

# 热处理手册

典型零件热处理

第3版

2

中国机械工程学会热处理专业分会  
《热处理手册》编委会 编

# 热 处 理 手 册

(第 3 版)

## 第 2 卷 典型零件热处理

中国机械工程学会热处理专业分会  
《热处理手册》编委会 编



机 械 工 业 出 版 社

本手册是一部热处理专业的综合工具书,本版为第3版,共4卷。  
第1卷 工艺基础,第2卷 典型零件热处理,第3卷 热处理设备和  
工辅材料,第4卷 热处理质量控制和检验。

本卷为第2卷,共19章。内容包括齿轮、滚动轴承零件、弹簧、紧  
固件、大型铸锻件、工模量具、汽车拖拉机零件、金属切削机床零件、  
气动工具及钻探机械零件、农机具典型零件、发电供电设备零件、石油  
化工机械零件、液压元件、轻工产品零件和飞机零件等的热处理。此外,  
本卷还论述了热处理工艺制订原则和程序及零件的热处理工艺性。

本卷可供热处理工程技术人员、质量检验和生产管理人员使用,也  
可供科研开发、设计人员,高校和中专材料科学与工程专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热处理手册.第2卷,典型零件热处理/中国机械工程  
学会热处理专业分会《热处理手册》编委会编.-3  
版.-北京:机械工业出版社,2001.5

ISBN 7-111 02355-2

I. 热… II. 中… III. ①热处理-手册②零部件  
-热处理 IV. TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第03581号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:韩会民 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新  
季顺利 吴美英

封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年7月第3版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·22.25印张·3插页·1340千字

117 251 -120 250册

定价:62.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

**中国机械工程学会热处理专业分会**  
**《热处理手册》第3版编委会 名单**

主任委员 孙大涌

副主任委员 王广生 刘 迨 俞少罗 雷廷权 樊东黎

委 员 王广生 安运铮 刘 迨 李福臣 俞少罗

宋余九 周敬恩 侯增寿 荀毓闽 崔 昆

黄国靖 雷廷权 潘 邻 潘健生 樊东黎

《热处理手册》总主编 樊东黎 王广生

本 卷 主 编 王广生 周敬恩



# 前 言

四卷本的《热处理手册》于1992年10月完成第2版修订，并出版发行，至今已重印7次四卷、累计印数30万余册。

按照中国机械工程学会热处理专业分会第二届第三次理事扩大会议决议，手册将逐版修订下去，不断删去过时落后的内容，补充国内外最新成就及先进的生产技术，使其永葆青春活力，为行业技术进步起持续推动作用。

根据手册第3版修订编委会通过的编例，本次修订的主要原则是：以总结国内先进经验、科研开发和引进技术消化吸收成果为主，同时吸收国外成熟的先进技术；普及与提高相结合；力求资料和数据的科学性、实用性、可靠性和先进性。手册的读者对象定位为中专文化程度以上的从事热处理生产的技术人员；也可供科研、开发、设计人员，教师、学生、生产管理人员和熟练技术工人参考。

手册第3版修订后仍为四卷，分四个分册出版。第1卷 工艺基础，第2卷 典型零件热处理，第3卷 热处理设备和工辅材料，第4卷 热处理质量控制和检验。

修订后，第1卷的主要变动为：增加“冷却”一章，旨在提高对冷却重要性的认识；将基础部分的钢铁加热转变和冷却转变放在相应的“加热”和“冷却”各章中；“钢的淬透性”和“回火转变”放在“整体热处理”一章的“淬火与回火”一节；将铁碳合金相图和非铁合金相图放在第1章的概论，将“深冷处理”作为“淬火钢深度冷却过程”一节，放在“冷却”一章中；取消“其他热处理方法”一章，将“激光电子束热处理”放在“表面热处理”一章；“离子化学热处理”并入“化学热处理”一章；将“奥氏体状态化学热处理”和“铁素体状态化学热处理”合并为“化学热处理”；将“形变热处理”从“其他热处理”中的一节提升为章；在“功能合金热处理”一章中增加“形状记忆合金”一节。

修订后，第2卷的主要变动为：增加了“零件热处理工艺制订原则和程序”以及“热处理工艺性”两章，重点说明机器零件热处理工艺制订的通则和零件热处理与设计、结构、使用条件的关系；在各种零件热处理各章都增加了“失效分析”一节，使热处理工艺措施能够对症下药；将“大型锻件热处理”、“轧辊热处理”和“电站设备零件热处理”中的“转子和叶轮锻件预备热处理”部分合并为“大型锻铸件热处理”一章；在“发电供电设备零件热处理”一章中补充“汽轮机叶片热处理”一节。

第3卷内容作了如下变动：增加“热处理工艺材料”和“热处理节能与环境保护”两章；把“热处理的机械化和自动化”一章改为“热处理生产过程控制”。

第4卷改动的主要内容为：在质量的控制和检验两部分内容中把重点放在了质量的控制和管理；在“宏观组织检验及断口分析”一章中补充“失效分析方法”一节；增加了新的检验和试验研究方法；在“热处理常用数据”中增加了许多新的有用数据。

由这些内容的变动和补充可知,本次修订的绝大部分内容是重新编写,而不是简单的修改补充。经本次修订出版后的热处理手册肯定会使读者耳目一新。

中国机械工程学会热处理专业分会  
《中国热处理手册》第3版编辑委员会

# 目 录

## 第 1 章 零件热处理工艺制订

### 原则与程序 ..... 1

#### 1.1 热处理工艺制订原则 ..... 1

##### 1.1.1 工艺的先进性 ..... 1

##### 1.1.2 工艺的合理性 ..... 1

##### 1.1.3 工艺的可行性 ..... 2

##### 1.1.4 工艺的经济性 ..... 2

##### 1.1.5 工艺的可检查性 ..... 2

##### 1.1.6 工艺的安全性 ..... 2

##### 1.1.7 工艺的标准化 ..... 2

#### 1.2 热处理工艺制定依据 ..... 3

##### 1.2.1 产品图样及技术要求 ..... 3

##### 1.2.2 毛坯图或技术条件 ..... 3

##### 1.2.3 工艺标准 ..... 3

##### 1.2.4 企业条件 ..... 3

#### 1.3 工艺规程的基本内容 ..... 3

##### 1.3.1 工艺规程的基本要素 ..... 3

##### 1.3.2 工艺规程类型 ..... 5

#### 1.4 工艺规程编制的程序 ..... 7

##### 1.4.1 工艺规程编制流程 ..... 7

##### 1.4.2 工艺规程编制步骤 ..... 8

##### 参考文献 ..... 8

## 第 2 章 零件热处理工艺性 ..... 9

#### 2.1 零件材料的合理选择 ..... 9

##### 2.1.1 材料的热处理工艺性 ..... 9

##### 2.1.2 材料的热处理种类及 应用 ..... 16

##### 2.1.3 零件服役条件分析及合 理选材 ..... 19

#### 2.2 零件结构的合理性 ..... 20

##### 2.2.1 零件的热处理结构 工艺性因素 ..... 20

##### 2.2.2 改善零件热处理工艺性 的结构设计 ..... 20

#### 2.3 零件尺寸的合理性 ..... 24

##### 2.3.1 淬透性与尺寸限制 ..... 24

##### 2.3.2 热处理变形及预留加工 余量 ..... 26

#### 2.4 零件热处理技术要求 及其标注 ..... 31

##### 2.4.1 热处理技术要求的确定 ..... 31

##### 2.4.2 热处理技术要求的标注 ..... 34

##### 2.4.3 热处理技术要求的审查 ..... 35

#### 2.5 零件类别与热处理检验 ..... 36

##### 2.5.1 淬火回火件质量要求与 检验 ..... 36

##### 2.5.2 表面淬火件质量要求与 检验 ..... 37

##### 2.5.3 渗碳(含碳氮共渗)件质量 要求与检验 ..... 37

##### 2.5.4 渗氮(含氮碳共渗)件质量 要求与检验 ..... 37

##### 参考文献 ..... 37

## 第 3 章 齿轮的热处理 ..... 39

#### 3.1 齿轮受力状况及损坏特征 ..... 39

##### 3.1.1 啮合齿面间的摩擦力 及齿面磨损 ..... 39

##### 3.1.2 啮合齿面的接触应力 及接触疲劳 ..... 39

##### 3.1.3 齿轮的弯曲应力及 弯曲疲劳 ..... 40

#### 3.2 齿轮材料 ..... 42

##### 3.2.1 齿轮用钢 ..... 42

##### 3.2.2 齿轮用铸铁 ..... 46

##### 3.2.3 齿轮用有色金属 ..... 50

#### 3.3 齿轮的热处理工艺 ..... 53

##### 3.3.1 齿轮的调质 ..... 53

##### 3.3.2 齿轮的表面加热淬火 ..... 55

##### 3.3.3 齿轮的化学热处理 ..... 70

##### 参考文献 ..... 96

## 第4章 滚动轴承零件的

## 热处理 ..... 97

4.1 一般用途滚动轴承零件  
的热处理 ..... 1014.1.1 铬钢滚动轴承零件的一  
般热处理 ..... 1014.1.2 铬钢滚动轴承零件的感应加  
热热处理 ..... 1164.1.3 铬轴承钢的贝氏体淬火  
热处理 ..... 1174.1.4 一般铬钢轴承零件在各种  
设备中的热加工工艺 ..... 1184.1.5 渗碳钢制中小型轴承零件的  
热处理 ..... 1214.1.6 中碳合金钢轴承零件的  
热处理 ..... 1264.1.7 限制淬透性钢 (GCr4) 制  
套圈表面淬火 ..... 1274.2 特大、特小、特轻、精密  
轴承零件的热处理 ..... 1304.2.1 特大及重大型轴承零件的  
热处理 ..... 130

## 4.2.2 微型轴承零件的热处理 ..... 131

## 4.2.3 精密轴承零件的热处理 ..... 133

4.2.4 超轻、特轻轴承套圈的  
热处理 ..... 1344.2.5 铁路车辆轴承零件的  
热处理 ..... 1354.3 特殊用途轴承零件的  
热处理 ..... 1374.3.1 耐腐蚀轴承零件的  
热处理 ..... 137

## 4.3.2 高温轴承零件的热处理 ..... 143

## 4.3.3 防磁轴承零件的热处理 ..... 150

## 4.4 其他轴承零件的热处理 ..... 153

4.4.1 保持架、铆钉等零件的  
热处理 ..... 1534.4.2 冲压滚针轴承套圈等零件  
的热处理 ..... 156

## 参考文献 ..... 158

## 第5章 弹簧的热处理 ..... 159

## 5.1 弹簧的分类、服役条件

## 失效方式和性能要求 ..... 159

## 5.1.1 弹簧的分类 ..... 159

5.1.2 弹簧的服役条件和失效  
方式 ..... 161

## 5.1.3 对弹簧的性能要求 ..... 162

## 5.2 弹簧材料及其热处理 ..... 163

## 5.2.1 通用弹簧钢材及其热处理 ..... 163

5.2.2 特殊用途的弹簧钢、合金  
钢的热处理 ..... 176

## 5.3 弹簧的最终热处理 ..... 181

5.3.1 已强化材料制成弹簧的  
去应力退火 ..... 1825.3.2 螺旋弹簧的热处理  
(淬火和回火) ..... 187

## 5.3.3 板簧的热处理 ..... 191

5.3.4 扭杆弹簧及稳定杆的  
热处理 ..... 192

## 5.3.5 轿车悬架弹簧的热处理 ..... 194

## 5.3.6 碟簧的热处理 ..... 196

5.3.7 汽车离合器膜片弹簧  
的热处理 ..... 198

## 5.3.8 平面蜗卷弹簧的热处理 ..... 199

## 5.3.9 压缩机气阀弹簧的热处理 ..... 201

## 5.3.10 卡簧的热处理 ..... 204

5.3.11 汽车风挡玻璃雨刮器胶条  
弹簧的热处理 ..... 206

## 5.3.12 耐热弹簧的热处理 ..... 206

## 5.3.13 电子表音叉的热处理 ..... 208

## 5.4 弹簧的特殊处理 ..... 209

## 5.4.1 弹簧的喷丸强化处理 ..... 209

## 5.4.2 高应力弹簧的离子渗氮 ..... 214

5.4.3 弹簧的应力松弛和抗应力  
松弛处理 ..... 217

## 参考文献 ..... 225

## 第6章 紧固件的热处理 ..... 227

## 6.1 螺纹紧固件的热处理 ..... 227

## 6.1.1 通用螺纹紧固件 ..... 227

## 6.1.2 专用螺纹紧固件 ..... 238

6.2 垫圈、挡圈、销和铆钉的热处理 .....	248
6.2.1 垫圈和挡圈 .....	248
6.2.2 销 .....	249
6.2.3 铆钉 .....	250
6.3 质量检查和控制 .....	250
6.3.1 脱碳与渗碳 .....	250
6.3.2 硬度与强度的关系 .....	251
6.3.3 再回火试验 .....	251
6.3.4 氢脆的检查和控制 .....	251
参考文献 .....	251

## 第7章 大型锻铸件的

热处理 .....	252
7.1 大型锻件的锻后热处理 .....	252
7.1.1 大锻件中的白点与氢脆 .....	252
7.1.2 大锻件的扩氢计算 .....	253
7.1.3 大锻件的晶粒细化问题 .....	255
7.1.4 锻后热处理工艺制订原则与工艺参数 .....	255
7.1.5 大锻件锻后热处理的基本工艺类型与典型工艺曲线 .....	256
7.2 大型锻件的最终热处理 .....	261
7.2.1 大锻件淬火、正火时的加热 .....	261
7.2.2 大锻件淬火、正火时的冷却 .....	264
7.2.3 大锻件的回火 .....	270
7.2.4 大锻件最终热处理工艺举例 .....	277
7.2.5 大锻件热处理后的力学性能 .....	277
7.3 大锻件的化学热处理 .....	283
7.3.1 大型重载齿轮的深层渗碳 .....	283
7.3.2 大锻件的渗氮处理 .....	284
7.4 热轧工作辊的热处理 .....	284
7.4.1 热轧工作辊的种类、材质及技术要求 .....	284
7.4.2 锻后热处理 .....	285
7.4.3 调质 .....	285
7.5 冷轧工作辊的热处理 .....	286

7.5.1 冷轧工作辊的种类和技术要求 .....	286
7.5.2 冷轧工作辊用钢 .....	286
7.5.3 冷轧工作辊制造工艺路线 .....	287
7.5.4 锻后热处理 .....	287
7.5.5 调质 .....	287
7.5.6 淬火与回火 .....	288
7.6 支承辊的热处理 .....	294
7.6.1 支承辊的种类和技术要求 .....	294
7.6.2 支承辊用钢 .....	294
7.6.3 锻后热处理 .....	295
7.6.4 预备热处理 .....	295
7.6.5 最终热处理 .....	295
7.7 大锻件的其他热处理工艺 .....	297
7.7.1 锻件切削加工后的去应力退火 .....	297
7.7.2 锻件矫直加热与回火工艺 .....	297
7.7.3 电渣焊焊接件的热处理工艺 .....	298
7.8 大型铸件的热处理 .....	298
7.8.1 大型铸钢件热处理的种类与目的 .....	298
7.8.2 典型工艺 .....	298
参考文献 .....	300

## 第8章 工具的热处理 .....

8.1 工具的工作条件及失效特征 .....	301
8.1.1 工具的工作条件 .....	301
8.1.2 工具的失效特征 .....	301
8.2 工具用钢 .....	302
8.2.1 工具用钢的选择 .....	302
8.2.2 工具用钢的质量要求 .....	304
8.3 工具钢的热处理工艺 .....	304
8.3.1 普通工具钢的热处理工艺 .....	304
8.3.2 高速钢的热处理 .....	309
8.4 工具热处理后的金相组织 .....	320
8.4.1 普通工具钢热处理后的	

金相组织 .....	320	9.4.2 塑料模具的主要失效形式 .....	365
8.4.2 高速钢热处理后的金相 组织 .....	324	9.4.3 塑料模具材料的选用 .....	366
8.5 典型工具的热处理 .....	328	9.4.4 塑料模具的热处理工艺 .....	366
8.5.1 锉刀的热处理 .....	328	9.5 提高模具性能和寿命的 途径 .....	371
8.5.2 手用锯条的热处理 .....	328	9.5.1 高强韧模具材料的应用 及效果 .....	371
8.5.3 手用丝锥的热处理 .....	329	9.5.2 模具的强韧化处理 工艺及应用实例 .....	373
8.5.4 圆板牙的热处理 .....	329	9.5.3 模具表面强化技术及 应用实例 .....	375
8.5.5 手用铰刀的热处理 .....	330	9.6 模具热处理的缺陷分析 及防止措施 .....	380
8.5.6 搓丝板的热处理 .....	330	9.6.1 模具热处理的畸变方式 及控制 .....	380
8.5.7 滚丝轮的热处理 .....	332	9.6.2 模具热处理常见缺陷分析 及防止措施 .....	385
8.5.8 车刀的热处理 .....	332	参考文献 .....	386
8.5.9 拉刀的热处理 .....	333	<b>第 10 章 量具热处理</b> .....	388
8.5.10 齿轮刀具的热处理 .....	335	10.1 量具用钢 .....	388
8.5.11 小型高速钢刀具的 热处理 .....	336	10.1.1 对量具用钢的要求 .....	388
8.5.12 高速钢对焊刀具的 热处理 .....	337	10.1.2 量具常用钢种及 质量要求 .....	388
8.5.13 常用五金和木工工具的 热处理 .....	339	10.2 量具热处理工艺 .....	390
参考文献 .....	341	10.2.1 量具制造工艺路线简介 .....	390
<b>第 9 章 模具的热处理</b> .....	342	10.2.2 预备热处理(或第一次 热处理) .....	390
9.1 模具材料的分类及性能 要求 .....	342	10.2.3 最终热处理(或第二次 热处理) .....	391
9.1.1 模具材料的分类 .....	342	10.2.4 量具热处理的技术要求 .....	393
9.1.2 模具材料的性能要求 .....	344	10.2.5 量块及高尺寸稳定性量规的 热处理特点 .....	393
9.2 冷作模具的热处理 .....	345	10.2.6 热处理后机械加工(磨削) 对量具的影响 .....	395
9.2.1 冷作模具的工作条件和 要求 .....	345	10.3 典型量具热处理 .....	396
9.2.2 冷作模具的主要失效形式 .....	345	10.3.1 百分表零件的热处理 .....	396
9.2.3 冷作模具钢的选用 .....	345	10.3.2 游标卡尺零件的热处理 .....	396
9.2.4 冷作模具的热处理工艺 .....	347	10.3.3 千分尺零件的热处理 .....	398
9.3 热作模具的热处理 .....	354	10.3.4 螺纹环规和塞规的 热处理 .....	398
9.3.1 热作模具的工作条件和 要求 .....	354	10.3.5 卡规的热处理 .....	398
9.3.2 热作模具的主要失效形式 .....	355		
9.3.3 热作模具材料的选用 .....	355		
9.3.4 热作模具的热处理工艺 .....	356		
9.4 塑料模具的热处理 .....	365		
9.4.1 塑料模具的工作条件和 分类 .....	365		

参考文献 .....	406
------------	-----

## 第 11 章 汽车、拖拉机及柴油 机零件的热处理 .....

11.1 活塞环的热处理 .....	401
11.1.1 活塞环的服役条件和失效方式 .....	401
11.1.2 活塞环的材料 .....	401
11.1.3 活塞环的热处理工艺 .....	405
11.1.4 活塞环的表面处理 .....	405
11.1.5 活塞环的质量检验 .....	406
11.2 活塞销的热处理 .....	408
11.2.1 活塞销的服役条件和失效方式 .....	408
11.2.2 活塞销材料 .....	408
11.2.3 活塞销的热处理工艺 .....	409
11.2.4 活塞销的质量检验 .....	411
11.2.5 活塞销的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	412
11.3 连杆的热处理 .....	412
11.3.1 连杆的服役条件和失效方式 .....	412
11.3.2 连杆材料 .....	412
11.3.3 连杆的热处理工艺 .....	414
11.3.4 连杆的质量检验 .....	416
11.3.5 连杆的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	418
11.4 曲轴的热处理 .....	419
11.4.1 曲轴的服役条件和失效方式 .....	419
11.4.2 曲轴材料 .....	419
11.4.3 曲轴的热处理工艺 .....	419
11.4.4 曲轴的质量检验 .....	426
11.4.5 曲轴的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	426
11.5 凸轮轴的热处理 .....	427
11.5.1 凸轮轴的服役条件和失效方式 .....	427
11.5.2 凸轮轴材料 .....	427
11.5.3 凸轮轴的热处理工艺 .....	429
11.5.4 凸轮轴的质量检验 .....	431
11.5.5 凸轮轴的常见热处理缺陷	

及预防补救措施 .....	431
11.6 挺杆的热处理 .....	432
11.6.1 挺杆的服役条件和失效方式 .....	432
11.6.2 挺杆的材料 .....	432
11.6.3 挺杆的热处理工艺 .....	431
11.6.4 挺杆的质量检验 .....	438
11.6.5 挺杆的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	438
11.7 排气阀的热处理 .....	439
11.7.1 排气阀的服役条件和失效方式 .....	439
11.7.2 排气阀的材料 .....	440
11.7.3 排气阀的热处理工艺 .....	441
11.7.4 排气阀的质量检验 .....	447
11.7.5 排气阀的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	447
11.8 半轴的热处理 .....	448
11.8.1 半轴的服役条件和失效方式 .....	448
11.8.2 半轴材料 .....	448
11.8.3 半轴的热处理工艺 .....	449
11.8.4 半轴的质量检验 .....	454
11.8.5 半轴的常见热处理缺陷及预防补救措施 .....	454
11.9 喷油泵柱塞偶件和喷油嘴偶件的热处理 .....	455
11.9.1 喷油泵和喷油嘴偶件的服役条件和失效方式 .....	455
11.9.2 喷油泵和喷油嘴材料 .....	455
11.9.3 喷油泵和喷油嘴偶件的热处理工艺 .....	456
11.10 履带板的热处理 .....	461
11.10.1 履带板的服役条件和失效方式 .....	461
11.10.2 履带板材料 .....	461
11.10.3 履带板的热处理工艺 .....	462
11.10.4 履带板的质量检验 .....	463
参考文献 .....	463

## 第 12 章 金属切削机床零件 的热处理 .....

12.1 机床导轨的热处理 .....	464
---------------------	-----

12.1.1 导轨服役条件及失效形式 .....	464	<b>第 13 章 气动工具及钻探机械零件的热处理 .....</b>	<b>499</b>
12.1.2 导轨材料 .....	464	13.1 凿岩机活塞的热处理 .....	499
12.1.3 铸铁导轨的感应淬火 .....	465	13.1.1 工作条件及失效形式 .....	499
12.1.4 铸铁导轨的火焰淬火 .....	469	13.1.2 凿岩机活塞的材料 .....	499
12.1.5 铸铁导轨的接触电阻加热淬火 .....	469	13.1.3 20CrMnMo 钢活塞的热处理 .....	500
12.1.6 镶钢导轨热处理 .....	470	13.1.4 35CrMoV 钢活塞的热处理 .....	502
12.1.7 机床导轨用材和热处理的进展 .....	472	13.1.5 钒钢活塞的热处理 .....	502
12.2 机床主轴的热处理 .....	473	13.2 凿岩机主要渗碳件的热处理 .....	505
12.2.1 主轴服役条件及失效形式 .....	473	13.2.1 工作条件及失效形式 .....	505
12.2.2 主轴材料 .....	473	13.2.2 技术条件和使用材料 .....	506
12.2.3 主轴的热处理工艺 .....	474	13.2.3 制造工艺路线 .....	507
12.2.4 机床主轴用材及热处理的进展 .....	478	13.2.4 热处理工艺 .....	507
12.3 机床丝杠的热处理 .....	478	13.2.5 渗碳件热处理的质量检验 .....	507
12.3.1 丝杠服役条件及失效形式 .....	478	13.2.6 热处理常见缺陷及防止方法 .....	507
12.3.2 丝杠材料 .....	478	13.3 凿岩用钎头 .....	510
12.3.3 梯形螺纹丝杠热处理 .....	480	13.3.1 工作条件及失效形式 .....	510
12.3.4 滚珠丝杠热处理 .....	483	13.3.2 技术条件和使用材料 .....	510
12.3.5 丝杠特殊热处理工艺 .....	483	13.3.3 制造工艺路线 .....	510
12.3.6 机床丝杠和热处理的进展 .....	485	13.3.4 热处理工艺 .....	510
12.4 机床基础件的去应力处理 .....	486	13.4 凿岩机钎尾及成品钎杆的热处理 .....	511
12.4.1 机床基础件服役条件及失效形式 .....	486	13.4.1 工作条件及失效形式 .....	511
12.4.2 热时效 .....	486	13.4.2 技术条件和使用材料 .....	511
12.4.3 振动时效 .....	488	13.4.3 制造工艺路线 .....	513
12.4.4 天然时效 .....	491	13.4.4 热处理工艺 .....	513
12.5 机床其他零件的热处理 .....	491	13.4.5 技术要求和质量检验 .....	513
12.5.1 机床附件的热处理 .....	491	13.5 其他气动工具零件的热处理 .....	514
12.5.2 机床离合器零件的热处理 .....	492	13.6 牙轮钻机三牙轮钻头 .....	516
12.5.3 弹簧卡头的热处理 .....	495	13.6.1 工作条件及失效形式 .....	516
12.5.4 蜗杆的热处理 .....	498	13.6.2 技术条件和使用材料 .....	516
12.5.5 花键轴的热处理 .....	498	13.6.3 制造工艺路线 .....	517
参考文献 .....	498	13.6.4 热处理工艺 .....	517
		13.6.5 质量检验 .....	518
		13.7 钻探机械钻具的热处理 .....	519



13.7.1	工作条件及损坏形式	519
13.7.2	技术条件和使用材料	519
13.7.3	钻具的制造工艺路线	520
13.7.4	钻具的热处理	520
13.7.5	钻具热处理的质量检验	522
13.7.6	钻具热处理常见 缺陷及防止方法	522
	参考文献	523

## 第 14 章 农机具零件的 热处理 524

14.1	农机具零件的服役条件、 失效方式与性能要求	524
14.1.1	农机零件的磨损失效	524
14.1.2	农机耐磨零件的力学 性能要求	527
14.1.3	农机耐磨零件的组织 要求	530
14.1.4	农机具零件的特殊性能 要求	532
14.2	耕作机械典型零件的 热处理	535
14.2.1	犁铧的热处理	535
14.2.2	犁壁的热处理	538
14.2.3	圆盘的热处理	539
14.2.4	锄铲的热处理	541
14.2.5	旋耕刀的热处理	543
14.3	收获与采集机械典型刀片 的热处理	544
14.3.1	剪毛机刀片的热处理	544
14.3.2	往复式收割机刀片的 热处理	546
14.3.3	秸秆还田机刀片的 热处理	548
14.3.4	铡草和青饲料切碎 刀片的热处理	550
14.4	农产品加工机械典型 零件的热处理	551
14.4.1	脱粒机弓齿、钉齿与切 草刀的热处理	551
14.4.2	粉碎机锤片的热处理	553
14.4.3	筛片的热处理	555

14.4.4	颗粒饲料压粒机环模与 压辊的热处理	556
14.4.5	轧棉花机、剥绒机锯片和 肋条的热处理	558
14.4.6	榨油机的榨螺的热处理	560
14.5	小农具材料及其热处理	561
	参考文献	562

## 第 15 章 发电设备零件 的热处理 561

15.1	汽轮机转子和发电机转子 的热处理	564
15.1.1	汽轮机转子和汽轮发电机转 子的服役条件及失效 方式	564
15.1.2	转子用钢	565
15.1.3	转子锻件的热处理	571
15.1.4	常见大型转子锻件热处理 缺陷及预防措施	575
15.2	汽轮发电机无磁性护环 的热处理	575
15.2.1	护环的服役条件及失效 方式	577
15.2.2	护环用钢	577
15.2.3	护环锻件的热处理	579
15.2.4	常见护环锻件热处理缺陷 及预防措施	577
15.3	汽轮机叶轮的热处理	577
15.3.1	叶轮的服役条件及 失效方式	577
15.3.2	叶轮用钢	577
15.3.3	汽轮机叶轮锻件的 热处理	579
15.3.4	常见叶轮锻件热处理缺陷 及预防措施	580
15.4	汽轮机叶片的热处理	580
15.4.1	叶片的服役条件及 失效方式	580
15.4.2	叶片用钢	581
15.4.3	叶片毛坯的热处理	587
15.4.4	叶片的特种热处理	589
15.5	汽轮机螺栓的热处理	589

15.5.1 汽轮机螺栓的服役条件 及失效方式 .....	589	参考文献 .....	632
15.5.2 汽轮机螺栓用钢 .....	590	<b>第 17 章 液压元件的零件 热处理</b> .....	634
15.5.3 螺栓毛坯的热处理 .....	591	17.1 概述 .....	634
15.5.4 常见螺栓热处理缺陷 及预防措施 .....	592	17.2 齿轮泵零件的热处理 .....	634
15.6 锅炉构件及输汽管 的热处理 .....	593	17.2.1 齿轮的热处理 .....	634
15.6.1 锅炉用钢管及钢板的服 役条件和零件失效方式 .....	593	17.2.2 齿轮泵轴的热处理 .....	634
15.6.2 锅炉钢管及钢板用钢 .....	593	17.2.3 泵体的热处理 .....	634
15.6.3 锅炉构件的热处理 .....	596	17.3 叶片泵零件的热处理 .....	637
参考文献 .....	598	17.3.1 转子的热处理 .....	637
<b>第 16 章 石油化工机械 零件的热处理</b> .....	600	17.3.2 定子的热处理 .....	637
16.1 泥浆泵零件的热处理 .....	600	17.3.3 叶片泵轴的热处理 .....	640
16.1.1 液缸的热处理 .....	600	17.3.4 叶片的热处理 .....	640
16.1.2 缸套的热处理 .....	601	17.3.5 配油盘的热处理 .....	640
16.1.3 阀体与阀座的热处理 .....	603	17.4 柱塞泵零件的热处理 .....	640
16.1.4 活塞杆的热处理 .....	604	17.5 液压阀零件的热处理 .....	643
16.2 钻机绞车零件的热处理 .....	605	17.5.1 滑阀的热处理 .....	643
16.2.1 刹车鼓的热处理 .....	605	17.5.2 阀座的热处理 .....	643
16.2.2 石油钻机链条的热处理 .....	607	17.5.3 提动阀和提动阀座的 热处理 .....	643
16.3 钻探工具的热处理 .....	609	17.6 液压元件的零件热处理 的质量检验 .....	645
16.3.1 吊环的热处理 .....	609	参考文献 .....	645
16.3.2 吊夹的热处理 .....	611	<b>第 18 章 手表、自行车、缝纫 机和纺织机械零件的 热处理</b> .....	646
16.3.3 钻杆接头的热处理 .....	612	18.1 手表零件的热处理 .....	646
16.3.4 抽油杆的热处理 .....	613	18.1.1 手表零件用材与热处理 工艺 .....	646
16.3.5 公母锥的热处理 .....	615	18.1.2 手表零件的典型热处理 工艺 .....	649
16.3.6 抽油泵泵筒的热处理 .....	616	18.1.3 手表零件热处理质量 检验要求 .....	652
16.3.7 石油钻头的热处理 .....	617	18.1.4 手表零件热处理缺陷 及预防措施 .....	652
16.4 钻机齿轮的热处理 .....	619	18.2 自行车零件的热处理 .....	655
16.4.1 石油钻机螺旋锥齿轮 的热处理 .....	619	18.2.1 自行车零件的热处理 工艺 .....	657
16.4.2 转盘齿轮的热处理 .....	621	18.2.2 自行车零件热处理 质量检验 .....	661
16.5 化工机械零件的热处理 .....	622		
16.5.1 压力容器的热处理 .....	622		
16.5.2 典型容器的热处理 .....	627		
16.5.3 压缩机阀片的热处理 .....	629		
16.5.4 低温压缩机壳体的 热处理 .....	630		

18.2.3 自行车零件热处理常见 缺陷及防止措施 .....	662	补救措施 .....	686
18.3 缝纫机零件的热处理 .....	662	19.5 涡轮叶片的热处理 .....	686
18.3.1 家用缝纫机零件的 热处理 .....	663	19.5.1 服役条件及性能要求 .....	686
18.3.2 工业缝纫机零件的 热处理 .....	668	19.5.2 使用材料及零件技术 要求 .....	686
18.4 纺织机械零件的热处理 .....	672	19.5.3 工艺路线 .....	687
18.4.1 工作条件及材料选择 .....	673	19.5.4 热处理工艺 .....	687
18.4.2 热处理工艺 .....	677	19.5.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	688
18.4.3 热处理质量检验与控制 .....	680	19.6 涡轮盘的热处理 .....	689
18.4.4 常见热处理缺陷及 防止方法 .....	680	19.6.1 服役条件和性能要求 .....	689
参考文献 .....	681	19.6.2 使用材料及零件技术 要求 .....	689
<b>第 19 章 飞机零件的热处理 .....</b>	<b>682</b>	19.6.3 工艺路线 .....	690
19.1 飞机零件材料和热处理 特点 .....	682	19.6.4 热处理工艺 .....	690
19.2 飞机起落架外筒的 热处理 .....	682	19.6.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	691
19.2.1 服役条件及失效方式 .....	682	19.7 涡轮轴的热处理 .....	691
19.2.2 使用材料和零件技术 要求 .....	683	19.7.1 服役条件和性能要求 .....	691
19.2.3 工艺路线 .....	683	19.7.2 使用材料和零件技术 要求 .....	691
19.2.4 热处理工艺 .....	683	19.7.3 工艺路线 .....	691
19.2.5 常见热处理缺陷及 预防措施 .....	683	19.7.4 热处理工艺 .....	692
19.3 飞机蒙皮的热处理 .....	684	19.7.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	692
19.3.1 服役条件和性能要求 .....	684	19.8 燃烧室的热处理 .....	692
19.3.2 使用材料和零件技术 要求 .....	684	19.8.1 服役条件和性能要求 .....	692
19.3.3 工艺路线 .....	684	19.8.2 使用材料和零件技术 要求 .....	693
19.3.4 热处理工艺 .....	684	19.8.3 工艺路线 .....	693
19.3.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	684	19.8.4 热处理工艺 .....	693
19.4 压气机叶片的热处理 .....	684	19.8.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	693
19.4.1 服役条件和性能要求 .....	684	19.9 航空齿轮的热处理 .....	694
19.4.2 使用材料及零件技术 要求 .....	685	19.9.1 服役条件和性能要求 .....	694
19.4.3 工艺路线 .....	685	19.9.2 常用材料和零件技术 要求 .....	694
19.4.4 热处理工艺 .....	685	19.9.3 工艺路线 .....	695
19.4.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	685	19.9.4 热处理工艺 .....	695
		19.9.5 常见热处理缺陷及预防 补救措施 .....	696
		参考文献 .....	696

# 第 1 章 零件热处理工艺制订原则与程序

中国南方航空动力机械公司 苏怡兴

热处理工艺是指热处理作业的全过程,包括热处理规程的制订、工艺过程控制与质量保证、工艺管理、工艺工装(设备)以及工艺试验等,通常所说的热处理工艺就是指工艺规程的制订。

热处理工艺规程的编制是工艺工作中最主要、最基本的工作内容,确切地说工艺规程的编制属于工程设计的范畴。制订正确、合理的热处理工艺必须从企业实际出发,考虑企业从事热处理工作的人员素质、管理水平、生产条件等,依据相关的技术标准和资料以及质量保证和检验能力,设计编制出完善、合理的热处理工艺。

完善合理的热处理工艺不但能优质高效地生产出合格的产品,而且能降低生产成本,提高企业的经济效益。

## 1.1 热处理工艺制订原则

热处理工艺制订应遵守以下原则:

- 1) 工艺的先进性。
- 2) 工艺的合理性。
- 3) 工艺的可行性。
- 4) 工艺的经济性。
- 5) 工艺的可检查性。
- 6) 工艺的安全性。
- 7) 工艺的标准化。

### 1.1.1 工艺的先进性

先进的热处理工艺是企业参与市场竞争的实力和财富,具备领先于其他企业的热处理工艺技术,能以少的投入获得最佳的热处理质量。工艺先进性包括的内容见表 1-1。

表 1-1 热处理工艺的先进性

序号	要素	内 容
1	采用新工艺、新技术	充分采用新的工艺方法及新的热处理技术,可提高或稳定零件热处理质量

(续)

序号	要素	内 容
2	热处理设备的更新改造	更新或改造现有热处理设备,确保零件处理质量均匀性和稳定性 提高生产效率,具备特殊工艺功能和连续生产监控功能
3	采用新型工艺材料	提高工艺质量,降低工艺成本,采用新型淬火介质及防氧化、防渗涂料等工艺材料

### 1.1.2 工艺的合理性

热处理工艺制订应最大限度避免产生热处理缺陷,实现工艺流程短,工人易掌握,操作简单,产品质量优并稳定。工艺合理应考虑的内容见表 1-2。

表 1-2 热处理工艺的合理性

序号	要素	内 容
1	工艺安排的合理性	在零件制造流程中,热处理工序应安排恰当位置,确保零件各处质量一致。避免后续加工难度,减少制造复杂性,防止增加不必要的辅助工序
2	热处理要求的合理性	零件的选材应与零件热处理要求相匹配,零件的几何形状以及尺寸要求应与热处理特性相匹配
3	工艺方法及工艺参数合理性	工艺方法应简单,易于操作。工艺参数应依据标准,调整的参数应以试验数据为依据
4	热处理前零件的形状和尺寸的合理性	零件的各截面尺寸差不应过大,避免尖边、锐角,防止处理过程中因应力集中导致开裂
5	热处理前零件状态的合理性	锻、铸件应经正火、退火消除应力。焊接件不宜选择盐浴加热。切削量大的机加件,应消除加工应力

### 1.1.3 工艺的可行性

根据企业的热处理条件、人员结构素质、管理水平制订的热处理工艺才能保证在生产中正常运行。可行性的要素见表1-3。

表 1-3 热处理工艺可行性

序号	要素	内 容
1	企业热处理现状	人员结构及素质、热处理设施配备程度、设备精度及工艺能力
2	操作人员专业技术水平	操作者文化程度及专业技术水平及对热处理工艺操作的熟练程度
3	工艺技术的合法性	新工艺、新技术、新材料的应用应在试验的基础上经过评审或鉴定认可,方能投入应用

### 1.1.4 工艺的经济性

工艺应充分利用企业现有条件,力求流程简单操作方便,以最少的消耗获取最佳的工艺效果。经济性包括的内容见表1-4。

表 1-4 工艺的经济性

序号	要素	内 容
1	能源利用	工艺应合理利用能源,采用节能的加热设备,利用水溶性淬火介质
2	设备工装的使用	充分利用设备加热能力,组织生产。采用装炉工装,合理利用加热空间,对大批量生产的企业,尽量采用机械化和自动化生产 工装具尽量采用通用型
3	工艺方法应简便	工艺流程应简单,便于操作 充分利用各类加热设备的特点,满足不同零件的加热要求
4	利用现有设备,设计辅助工装	如在箱式电炉中设计移动渗氮箱,满足零件渗氮要求。设计气氛保护箱,减少零件加热氧化

### 1.1.5 工艺的可检查性

现代质量管理要求,热处理属特种工艺范畴,工艺过程的主要工艺参数必须具备追索性,对产品处理质量追索查找,因此工艺应具备可检查性,可检查性内容见表1-5。

表 1-5 工艺的可检查性

序号	要素	内 容
1	工艺参数的追索性	热处理使用的加热炉,应配备时间、温度记录仪表,记录加热、保温温度及时间等 设有操作记录表格,记录处理产品的批次、数量、炉次等项的内容数据
2	检验结论的追索性	产品处理完的检验结果,包括力学性能、硬度、尺寸等的检验记录
3	工艺参数选用的可检查性	工艺编制中参数的选用必须依据相关的技术标准、材料标准及技术条件或经过试验鉴定后的工艺参数

### 1.1.6 工艺的安全性

工艺要有充分的安全可靠性,遵守安全规则,不成熟的工艺要经试验验证鉴定后方可编入工艺,安全性内容见表1-6。

表 1-6 工艺的安全性

序号	要素	内 容
1	工艺本身的安全性	工艺要充分安全可靠,对特殊形状零件(如内腔工件)要有安全措施。保护气氛(如氢气等)的采用要有防范措施
2	控制有毒作业	尽量不采用有毒作业,如采用气体碳氮共渗代替液体碳氮共渗。对已采用的有毒作业,应有可靠的防护措施
3	环境保护	对工艺过程的废气、废液的排放要有检测,达到排放标准后方可排放,保护环境

### 1.1.7 工艺的标准化

标准化工作是企业的基础,标准化工作在热处理中也是必不可少的,是工艺质量的保证。标准化内容见表1-7。

表 1-7 工艺的标准化

序号	要素	内 容
1	文件的标准化	书写格式、术语的应用、基础标准的引用及法定计量单位等必须按有关标准执行
2	制订工艺参数标准化	给出的工艺参数(温度、时间等)应按相关的标准或计算;检测应依据相关标准
3	文件配套致性	配套及相关文件中的同一概念所用术语应一致、企业标准及工艺管理制度要走向法制化

## 1.2 热处理工艺制定依据

制定热处理工艺的依据包括：产品图样及技术要求、毛坯图或毛坯技术条件、工艺标准、机加工对热处理的要求以及企业热处理条件等。

### 1.2.1 产品图样及技术要求

产品图样应是经工艺审查的有效版本。图样上应标明以下内容：

1) 材料：标明材料牌号及材料标准。

2) 热处理：零件最终热处理后的力学性能及硬度等。化学热处理零件在图样上应标明化学热处理部位及尺寸、化学热处理渗层深度、硬度及渗层组织要求和标准。

对零件有热处理检验类别要求时，还应标明热处理检验类别。

### 1.2.2 毛坯图或技术条件

零件常采用毛坯（锻、铸件）热处理，因此毛坯图可视为零件图样，所以毛坯图上应标明材料牌号和标准，以及热处理要求性能及硬度。

毛坯技术条件（毛坯验收标准）应给出毛坯热处理后的性能指标。

### 1.2.3 工艺标准

工艺技术标准（工艺说明书）分为上级标准（国家标准、国家军用标准、行业标准）和企业标准。它是编制工艺规程的主要依据。

质量控制标准也分为上级标准和企业标准。它是工艺过程中质量控制的主要依据。

### 1.2.4 企业条件

企业条件包括热处理生产条件、热处理设备状况、热处理工种具备程度、人员结构、专业素质及管理水平等。

## 1.3 工艺规程的基本内容

工艺规程应包括工艺的基本要素、热处理工序流程及审批栏、更改栏等。

### 1.3.1 工艺规程的基本要素

工艺规程基本要素及其内容见表1-8。

表 1-8 工艺规程要素及内容

序号	要素	内 容
1	零件概况 (工艺规程表头栏)	零件所属产品 零件图号 零件名称 材料牌号 热处理工序名称、工序号 单台数量 单件重量 热处理检验类别
2	零件简图 (简图栏)	零件结构图(示意图) 基本尺寸 硬度检验位置及硬点处理 方法和允许磨去深度 热处理变形要求部位及尺寸 化学热处理(局部)部位及尺寸
3	装炉示意图 (简图栏)	零件热处理装炉示意图 模具淬火示意图 高频淬火示意图 装炉摆放示意图 矫正示意图
4	热处理技术要求	依据技术标准(上级标准或企业标准) 热处理前质量要求(如零件材料状态、表面状态、表面粗糙度、热处理使用试件尺寸及数量) 热处理后质量验收及检验要求数据(如力学性能、硬度、表面状态、变形及尺寸要求、增碳要求、化学热处理渗层深度及组织、晶粒度等)
5	热处理工艺	零件装炉加热方式(装炉夹具、数量及装炉示意图等) 热处理设备(加热炉、冷却设备等) 热处理工艺参数(加热升温方式、加热介质、加热温度、真空度、保温时间、冷却方式及介质等)
6	辅助工序	清洗与清理(设备、方式及要求) 涂或镀防氧化、防渗层、涂、镀层性质、表面质量要求及验收要求等) 校正、(校正方式、设备及技术要求)
7	检验工序	硬度、力学性能、金相组织、渗层深度、尺寸及变形要求和表面质量等
8	工艺规程审批	编制者、校对、标准化审查、审定或批准 会签、相关单位)

典型热处理工艺规程见表1-9、1-10。

□	热处理工艺规程		型号:	页次: /
			图号:	
车间	零组件名称:		版次: /	
材料牌号:	硬度:	检验等级:	单台件数:	
指导文件:	单件重量: kg	工序名称:	工序号:	

说明:

[illegible]

底图编号

表 1-10 橫式熱處理工藝規程表

车间		热处理工艺规程			材 料		零件号:		页次:		产品型号	
硬 度		渗碳(渗氮)深度					零件名称:		工序号:			
指导文件		单台数量(件)					检验类别:					
纤维方向		$I$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	零件重量/kg					
工 步 号	工步名称	设备	工装 夹具	装炉量 (件)	加 热		保 温		冷 却		备注	
					装炉 ℃	时间 min	温度 ℃	时间 min	介质	介质温度 ℃		时间 min

日期	更改单号	标记	更改者
编 制			
校 对			
审 定			
批 准			

(续)

### 1.3.2 工艺规程类型

当前国内外常用的热处理工艺规程类型有以下几种:

- 1) 单列式工艺规程。
- 2) 工艺说明书(总工艺规程)加工艺卡。
- 3) 工艺说明书加指令卡。
- 4) 电脑(微机)的热处理工艺自动控制。

上述各类型工艺规程的特点和适用范围见表

表 1-11 各类型工艺规程特点和适用范围

序号	类型	特 点	适用范围
1	单列式 工艺规程	<p>1) 现常用的工艺规程模式, 独立性强, 操作时, 受其他文件约束小</p> <p>2) 整个工艺规程应编写热处理流程的各个工步并叙述详细、直接指导生产</p> <p>3) 此类工艺规程缺少对工艺的质量控制要求, 不适应现代的质量管理要求</p>	适用于中小型 企业

序号	类型	特 点	适用范围
		(1) 对工艺过程 中的人(人员)、机(设备)、 料(材料)、环(环境) 提出要求和控制方法 (2) 说明书中将企业 或对象产品所涉及的 同类钢种的工艺规范 统一 (3) 说明书中给出了 工艺程序, 确保工艺质 量的稳定 (4) 说明书规定了质 量保证措施 (5) 说明书是企业质 量体系保证满足 GB 219000 (idt ISO9000) 《质量管理和质量保 证》要求的必备的工艺 文件, 属企业的指令性 文件 (6) 相对而言, 工艺卡 可给出对象零件具体的 工艺参数, 简单明了	适用于产 品多、热处理 厂种多的大 中型企业
2	工艺说明书加工艺卡		



(续)

序号	类型	特点	适用范围
3	工艺说明书加指令卡	1) 在工艺说明书加工艺卡的基础上,指令卡代替工艺卡是工艺管理的发展 2) 说明书中热处理工艺规范化,使每种工艺均有具体代码,指令卡仅给出零件的执行代码,操作者按代码号从工艺说明书中找出工艺规范进行生产	适用于产品多、热处理工种多的人中型企业

(续)

序号	类型	特点	适用范围
1	电脑(微机)热处理工艺自动控制	1) 将工艺说明书中各类工艺设计成每一种编码给出固定代码,按代码号输入电脑 2) 指令卡给出执行代码号,操作者从电脑中提取代码工艺,电脑按代码要求控制设备运转	适用于产品多、热处理工种多的人中型企业或批量生产

典型热处理工艺卡见表 1-12, 典型热处理工艺指令见表 1-13。工艺说明书内容见表 1-14。

表 1-12 通用型热处理工艺卡

厂 车间		热处理工艺卡				处理前要求:			
零件名称:									
零件号:		材料:		工序号:					
装炉方法及数量:						热处理技术要求:			
						硬 度: 表面 _____ 心部 _____			
						硬化层深度: _____ mm			
						允许变形量: _____			
工步号	名称	设备	工装、夹具	加 热		保 温		冷 却	
				温度 / °C	时间 / min	温度 / °C	时间 / min	介质	温度 / °C
编制:	校对:	审定:		批准:		更改日期	更改单号	更改标记	更改者

表 1-13 热处理指令卡

热处理工艺指令卡			
零件图号		零件名称	
工 序 号	38	材料代码	B2
执行指令			
H3、H1B			
制定		审定	

表 1-14 工艺说明书章目及其编写要点

序号	主要章目	编写要点
1	范围	明确说明书的主题及其包括的方面，从而指明该说明书使用范围的限制
2	引用文件	应编写出说明书中所引用的标准和技术文件、标准和技术文件应是现行有效版本，标准引用应是上级（国家标准或行业标准）以及已正式颁发的企业标准
3	术语或定义	说明书中使用术语或定义应限定选用已颁布的国家与行业标准，在说明书中应明确的术语与定义应给出确切的概念，文字表述要清楚
4	材料控制	“材料”是指本说明书适用于制造零件的材料和热处理过程中使用的工艺材料，本章节中应列出它们的牌号、材质、技术条件（标准）及状态等
5	制造工艺	<p>这是工艺说明书的核心部分，可根据工艺流程涉及到的主要工序绘制工艺流程图</p> <p>1) 工艺前的辅助工序：表述预处理、清洗、清理及装夹等的技术要求和控制</p> <p>2) 工艺方法：表述各种材料所要求的工艺方法、工艺条件及其工艺参数和限制条件</p>

(续)

序号	主要章目	编写要点
5	制造工艺	<p>3) 过程控制：生产环境的要求和控制、各工序间的要求和限制、过程中原始数据的表格填写要求以及对有其他特殊要求的规定等</p> <p>4) 试件：处理过程中所需试件的牌号、尺寸、状态及数量的要求规定</p> <p>5) 热处理后的辅助工序：清洗、清理、打磨及校正等的要求</p>
6	工装设备控制	<p>1) 写明所购设备、自制设备以及大修后的设备投入生产的要求</p> <p>2) 明确现场使用的工装、测量器具的使用要求</p> <p>3) 工艺对使用设备型号、规格及精度等的要求</p> <p>4) 设备定检要求（如控温精度、槽液定检）、设备检定结果的标识（挂牌）</p>
7	技术安全	写明在操作时，危及人身、产品、设备的安全及有害操作者身体健康的预防措施和事故发生时的应急措施
8	质量检验（过程检验）	<p>1) 写明工序与工序间的检验项目、方法及关键工序控制要求</p> <p>2) 产品检验，写明产品检验项目、方法及其依据文件</p> <p>3) 检验记录：对生产监控的原始记录，检验结果记录的填写要求与规定</p> <p>4) 检验控制：对检测设备、工量具、仪器仪表等的要求与规定</p>

1.4 工艺规程编制程序

1.4.1 工艺规程编制流程（见图 1-1）

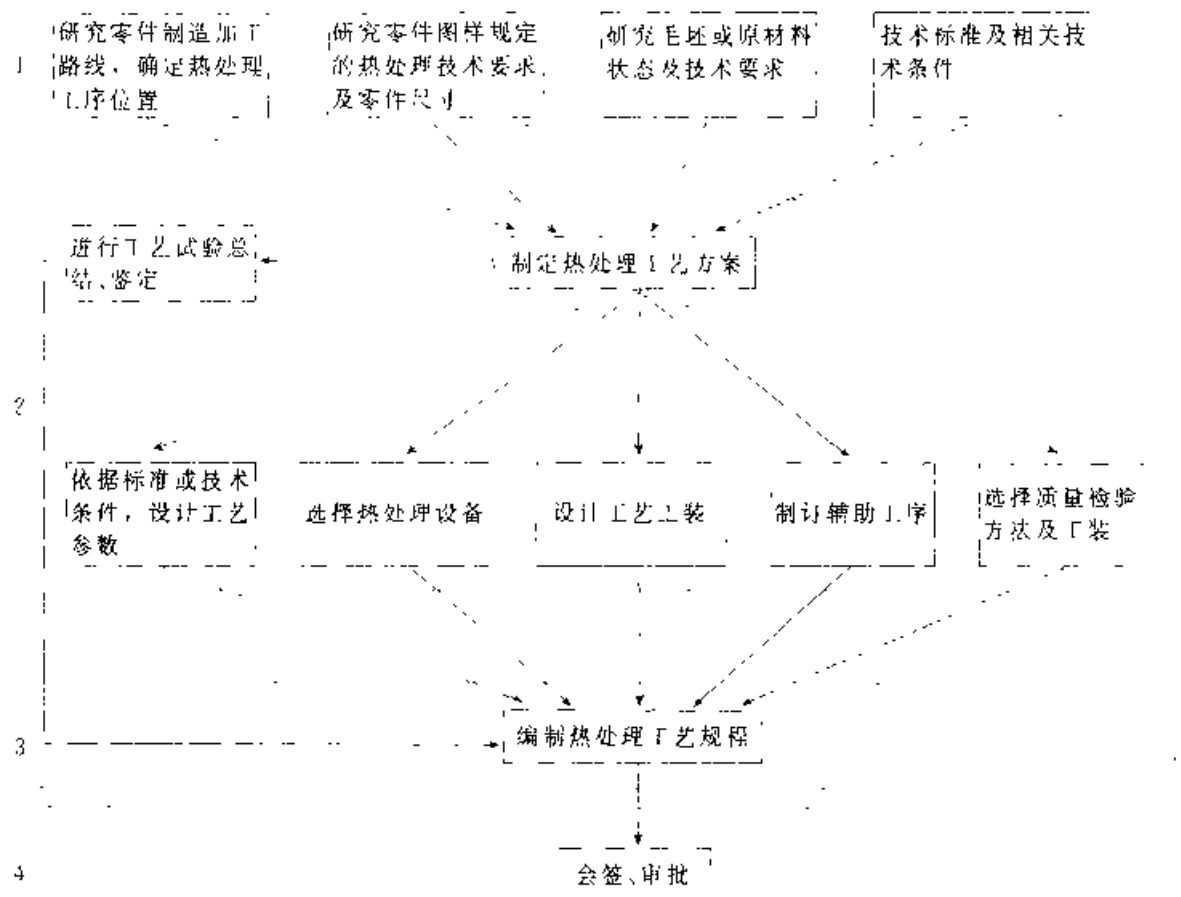


图 1-1 工艺规程制定流程图

(续)

## 1.4.2 工艺规程编制步骤 (见表 1-15)

表 1-15 编制工艺规程步骤

步 骤	内 容	步 骤	内 容
步骤 1: 研究与资料准备	<p>研究图样规定的热处理技术要求的可行性与合理性, 零件在实施热处理过程中将会产生的变形情况和技术要求, 选择的零件材料能否达到热处理要求等</p> <p>研究毛坯或材料的供应状态, 是否增加预备热处理来满足最终热处理要求和毛坯尺寸的精密程度</p> <p>研究零件制造加工路线安排, 确定热处理工序最佳合理位置, 尤其是化学热处理及零件需经多次热处理, 合理的工序位置将有利于最终热处理质量及后继的机械加工进行</p> <p>技术标准及技术条件的占有程度, 通过标准了解采用的工艺方法及工艺参数</p>	步骤 2: 条件准备	<p>对不具备的工艺方法或设备条件, 确定改造方案或外委措施</p> <p>依据标准或相关技术文件确定工艺参数或经工艺试验验证调整后的工艺参数</p> <p>按工艺方案要求设计工艺工装</p> <p>按零件要求和工艺实施路线, 安排辅助工序 (清洗、清理、校正、保护等)</p> <p>确定检验方法及设备, 按需要设计检验专用工装</p>
步骤 2: 条件准备	<p>确定工艺路线、工艺方法, 对未进行过的工艺方法, 确定工艺试验方案</p>	步骤 3: 制定工艺规程	<p>按规定的工艺表格编写工艺规程, 填全表格规定的栏目, 不要空栏</p> <p>工艺术语应按国家或行业标准</p> <p>工艺编写应统一标准化</p> <p>工艺规程是指令性文件, 用词严谨, 不应出现模棱两可的字句, 字迹端正, 版面清晰</p>
		步骤 4: 会签、批准	<p>编制、校对、审定、批准</p> <p>会签, 根据要求有质量保证部门及其他有关部门</p>

## 参 考 文 献

- 1 《航空制造工程手册》总编委会主编, 航空制造工程手册: 热处理, 北京: 航空工业出版社, 1993
- 2 钟华仁, 热处理质量控制, 北京: 国防工业出版社, 1990

## 第2章 零件热处理工艺性

北京航空材料研究院 王广生 李彤

零件热处理工艺性是指在满足使用要求的前提下,采用热处理生产的可行性和经济性。零件热处理工艺性既涉及零件的材料和结构,又与零件生产流程和热处理工艺过程各环节密切相关。所以,设计师在设计零件时应充分注意热处理工艺性,合理地选择材料,正确提出技术要求;工艺师在制定生产流程时应合理安排热处理在整个工艺路线中的位置,处理好热处理工艺与前后工序的关系;热处理工艺人员应正确地制订热处理工艺,以确保零件和产品的质量,提高生产效率,降低成本。

### 2.1 零件材料的合理选择

#### 2.1.1 材料的热处理工艺性

##### 2.1.1.1 钢的热处理工艺性

钢的热处理工艺性主要包括淬透性、淬硬性、回火脆性、过热敏感性、耐回火性、氧化脱碳趋向及超高强度钢表面状态敏感性等,这些工艺性均与材料的化学成分和组织有关,是选材和制定生产工艺的重要依据。

1. 淬透性 钢的淬透性是指在一定条件下钢件淬火后能够获得淬硬层的能力。钢的淬透性一般可用淬火临界直径、截面硬度分布曲线和端淬硬度分布曲线等表示。

淬火临界直径是指淬火试件中心形成一定量马氏体,即心部达到一定临界硬度的最大直径,临界硬度与碳含量关系见图 2-1。

一般机械制造行业大多以心部获得 50% 马氏体(体积分数)为淬火临界直径标准,对于重要机械及军工行业则以心部获得 90% 马氏体(体积分数)作为临界直径标准,以保证零件整个截面都获得较高力学性能。对于同一个钢种,由于选用淬火临界直径标准不同,其临界直径尺寸也不同,以 50% 马氏体(体积分数)为标准的临界直径大于以 90% 马氏体(体积分数)为标准的临界直径。

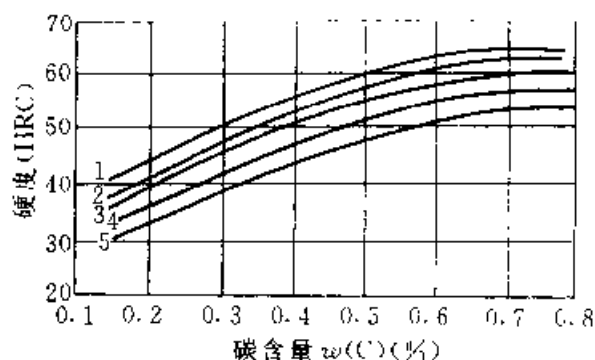


图 2-1 淬火钢临界硬度与马氏体量(体积分数)及含碳量(质量分数)的关系

1—99.9% 马氏体 2 95% 马氏体 3 90% 马氏体 4 80% 马氏体 5—50% 马氏体

钢的淬透性使钢产生了尺寸效应(亦称质量效应),由于零件截面尺寸大小不同而造成淬硬层深度不同,同时也影响淬火件表面硬度,因此设计师必须充分注意材料的淬透性,合理选择材料,设计大截面或形状复杂的重要零件时应选用淬透性好的合金钢,可以保证沿整个截面都具有高强度和高韧性的良好配合,同时减少热处理变形和开裂。设计师还要根据零件的服役条件合理确定淬透性要求,对于重要零件(如连杆、高强度螺栓、拉杆等),要求淬火后保证心部获得 90% 以上马氏体(体积分数);对于一般单向受拉、受压的零件,则要求淬火后心部获得 50% 马氏体(体积分数)即可;因考虑刚度而尺寸较大的曲轴,淬火后只要求离表面  $1.4R$  处保证获得 50% 以上马氏体(体积分数);弹簧零件一般要求淬透;对于滚动轴承、小轴承要全部淬透,但受冲击载荷大的大轴承则不宜淬透。此外,设计师还应注意,各种材料手册中的数据都有尺寸限制,不能根据小尺寸试样的性能指标来进行大尺寸零件的强度计算。

工艺师应根据钢的淬透性合理安排加工工序。当零件尺寸较大、又受到淬透性限制时,为了保证淬硬层深度,可采用先粗加工后热处理,热处理后再精加工。截面差别较大的零件,如大直径台

阶轴,从淬透性考虑,可先粗车成形,然后调质,增加淬硬层深度。

钢的淬透性是制定热处理工艺的重要依据。淬透性好的钢淬火时,可以选用较缓和的淬火介质和较慢冷却的淬火工艺,以减少零件的变形和开裂趋向。

2. 淬硬性 淬硬性是指钢在理想淬火条件下,以超过临界冷却速度冷却,使形成的马氏体能够达到最高硬度。钢的淬硬性主要取决于钢的含碳量,碳含量越高,淬火后硬度也越高,其他合金元素的影响较小。碳含量(质量分数)达0.6%时,淬硬钢的硬度接近最大值。碳含量进一步增加,虽然马氏体硬度会有所提高,但由于残留奥氏体量增加,碳素钢的硬度提高不多,合金钢的硬度反而会下降。见图2-2。

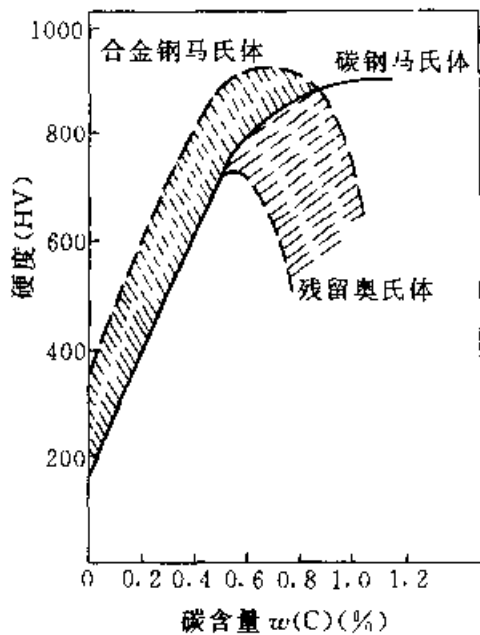


图 2-2 碳含量对马氏体硬度的影响

设计师在零件设计时要考虑钢的淬硬性,合理确定钢的碳含量。在要求表面硬度较高时,应选择中碳或高碳钢;对表面硬度要求不高时,一般选择中碳或低碳钢。可根据图 2-3 所列钢的强度、硬度与最小含碳量关系及图 2-4 所示淬火硬度与回火硬度关系,确定零件的最小含碳量,并选择相应钢号。例如某零件要求  $\sigma_s = 1440\text{MPa}$ ,在图 2-3 中可由①→②查出回火后硬度需 48HRC,淬火最低

硬度为 53HRC,沿④可查出钢的最低碳含量(质量分数)为 0.4%。

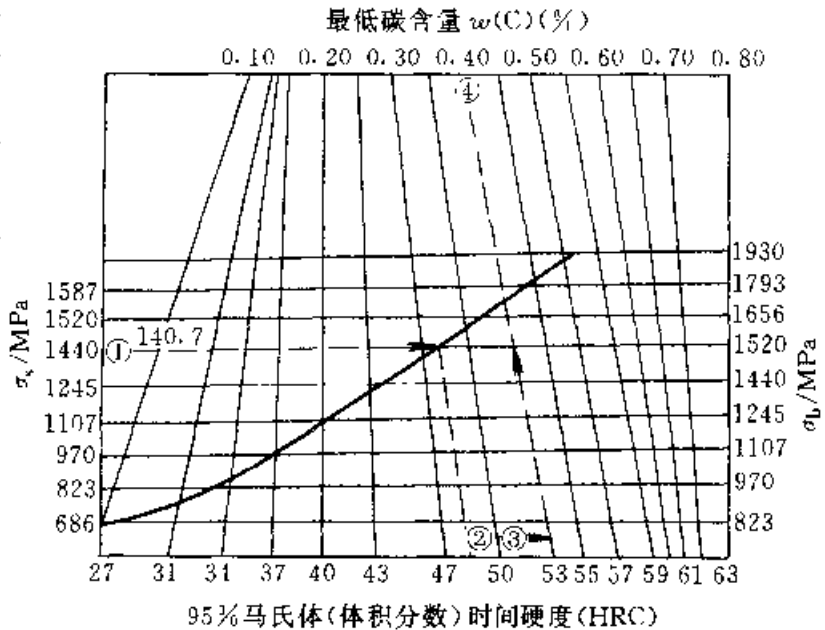


图 2-3 钢的强度、硬度和最低含碳量之间关系

3. 回火脆性 钢制零件的使用性能主要通过回火获得,回火温度等参数主要根据设计强度要求来选择。但很多钢种随回火温度升高会出现两次冲击韧性明显降低现象,称之为回火脆性。

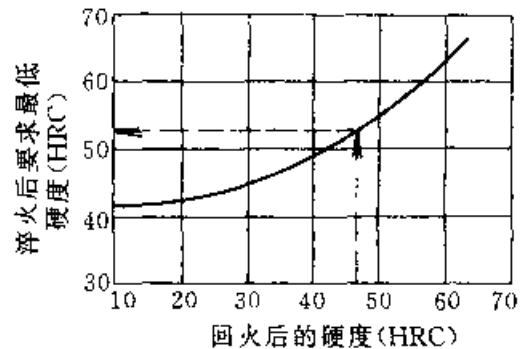


图 2-4 调质钢淬火硬度与回火硬度的关系

钢在  $300^{\circ}\text{C}$  左右温度范围回火时产生的回火脆性称为第一类回火脆性,也称低温回火脆性;在  $400\sim 550^{\circ}\text{C}$  温度范围内回火时产生的回火脆性称为第二类回火脆性,也称高温回火脆性,回火脆性的特点如表 2-1 所示。

在设计和生产中应尽量避免选用需要在回火脆性区回火所达到的强度水平。常见钢回火脆性温度范围如表 2-2 所示。采用快速冷却可以消除第二类回火脆性,选用含钼、钨的合金钢、细晶粒钢及高纯净钢可降低回火脆性。

表 2-1 不同回火状态的脆性特点

种 类	特 点
第一类回火脆性 (低温回火脆性)	300℃发生的回火脆性, 具有不可逆性 凡是淬成马氏体的钢均有这类脆性
第二类回火脆性 (高温回火脆性)	400~550℃发生的回火脆性经快速冷却可以消除。Mn 钢、Cr 钢、Cr—Mn 钢、Cr—Ni 钢等钢种易发生第二类回火脆性

表 2-2 常用钢产生回火脆性的温度范围 (℃)

钢 号	第一类回火脆性	第二类回火脆性
30Mn2	250~350	500~550
20MnV	300~360	
25Mn2V	250~350	510~610
35SiMn		500~650
20Mn2B	250~350	
45Mn2B		450~550
15MnVB	250~350	
20MnVB	200~260	520 左右
40MnVB	200~350	500~600
40Cr	300~370	450~650
45Cr		
38CrSi	250~350	450~550
35CrMo	250~400	无明显脆性
20CrMnMo	250~350	
30CrMnTi		400~450
30CrMnSi	250~380	460~650
20CrNi3A	250~350	450~550
12Cr2Ni4A	250~350	
37CrNi3	300~400	480~550
40CrNiMo	300~400	一般无脆性
38CrMoAlA	300~450	无脆性
70Si3MnA	400~425	
4Cr9Si2		450~600
65Mn 60Si2Mn		有回火脆性

(续)

钢 号	第一类回火脆性	第二类回火脆性
50CrVA	200~300	
4CrW2Si	250~350	
5CrW2Si	300~400	
6CrW2Si	300~450	
MnCrWV	250 左右	
4SiCrV		>600
3Cr2W8V		550~650
9SiCr	210~250	
CrWMn	250~300	
9Mn2V	190~230	
T8~T12	200~300	
GCr15	200~240	
1Cr13	520~560	
2Cr13	450~560	600~750
3Cr13	350~550	600~750
1Cr17Ni2	400~580	

4. 过热敏感性 钢在加热时, 由于温度过高, 晶粒会长大, 引起性能显著降低的现象, 称之为过热。加热温度接近固相线附近时, 晶界会被氧化和部分熔化, 称之为过烧。

过热的重要特征是晶粒粗大, 将使钢的屈服强度、塑性、冲击韧度和疲劳性能降低, 同时提高钢的脆性转变温度; 过热还会使淬火马氏体粗大, 降低其耐磨性能, 增加淬火变形和开裂倾向, 因此工业上总是通过各种途径细化晶粒, 从而达到细化组织提高性能的目的。在各种钢种中, 含锰钢的过热敏感性较大。

在设计和生产中应注意钢的过热敏感性, 选用合适的钢种, 合理选择淬火加热温度和保温时间, 按工艺要求准确控制工艺参数。由于渗碳钢在渗碳时温度较高, 时间较长, 容易产生晶粒粗大, 所以对于含锰钢等过热敏感性较大钢种一般不直接淬火, 应采用二次淬火。

对于一般过热组织, 可以通过多次正火或退火消除, 对于较严重的过热组织, 如石状断口, 不能用热处理消除, 必须采用高温变形和退火联合

作用才能消除。过烧组织不能挽救,是不允许的缺陷。

5. 耐回火性 耐回火性是指钢在回火时抵抗软化的能力,也称回火抗力、抗回火性和回火稳定性。耐回火性好的钢在回火时组织、性能变化缓慢,可以在较高温度下回火后使用。合金钢的耐回火性比碳钢好,所以对于相同碳含量的钢种要得到相同回火硬度时,合金钢的回火温度要比碳钢高、回火时间较长,回火后内应力比碳钢小,塑性和韧性也高。

在工业生产中,对于要求内应力消除较完全、强度与韧性配合好的零件,设计时应选用耐回火性好的合金钢。对于使用温度较高的零件,要选择耐回火性好的钢种,一般使用温度最高限度在回火温度以下 50℃。

6. 氧化脱碳趋向 钢在加热过程中,由于周围氧化气氛的作用,表面形成金属氧化物,使钢表面失去原来的光泽,称之为氧化;同时钢材表面的碳全部或部分丧失掉,使表面碳含量降低,称之为脱碳。在还原气氛中加热,一般不会产生氧化,但控制不好还会产生脱碳。

氧化使钢表面失去金属光泽,表面粗糙度值增加,精度下降,这对精密零件是不允许的。同时,氧化使钢的强度降低,其他力学性能也下降,增加了淬火开裂和淬火软点可能性。脱碳明显降低钢的淬火硬度、耐磨性及疲劳性能,高速钢脱碳会严重影响热硬性。各种钢种中,含硅钢的氧化脱碳倾向较大。

在工业生产中应尽量避免氧化脱碳,重要受力件不允许在最终零件上有氧化脱碳层存在。为此,设计师必须根据生产过程和现场条件,合理留足加工余量,工艺师应适当安排好加工流程,热处理工作者应积极采用各种少无氧化脱碳的热处理工艺,控制氧化脱碳,保证零件热处理质量,获得稳定可靠的使用性能。

7. 超高强度钢表面状态敏感性 超高强度钢具有比强度高特点,可以减轻零件重量,提高产品性能,应用范围不断扩大。但超高强度钢的缺口敏感性较大,对表面状态比较敏感,表面不完整将使其疲劳性能、耐腐蚀性能、塑性与韧性等大幅度下降,甚至造成灾难性破坏,因此应注意改善缺口敏感性,保持表面完整性,防止氢脆和表面氧化脱碳,具体措施见表 2-3。

表 2-3 超高强度钢表面  
状态敏感性改进措施

目 的	改 进 措 施
改善或避免缺口敏感性	1) 采用等温淬火工艺,代替油淬、低温回火工艺 2) 对于受拉伸疲劳作用的重要螺纹零件,一般对螺纹部分进行局部回火,螺纹局部回火后硬度为 39~43HRC 3) 硬度检验或作标识,均应打在应力水平较低、应力集中较小的部位 4) 设计时应采用大圆角过渡,避免截面和尺寸的剧变
减少表面残留应力敏感性	1) 对淬火回火后又经磨削、高速铰孔或校正的零件,还应进行一次去应力回火,一般在原回火温度以下 20~30℃,保温 3h 以上 2) 磷化后磨削的零件,应补充 150℃、3h 的去应力回火 3) 表面大都需喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面强化 4) 机加工后进行酸浸检查,以防止二次未回火马氏体
防止氢脆	1) 超高强度钢不宜在吸热式等含氢量较高的保护气氛中加热,避免增氢。如发现增氢,应在淬火后立即进行 190℃、16h 以上的除氢处理 2) 在酸洗、电镀后应及时进行除氢处理,一般为 190℃、16h 除氢 3) 电解加工或经回火酸浸蚀检查的零件在 8h 内进行 190~260℃、3h 以上的回火处理
防止热处理加热时氧化脱碳	一般规定,低合金超高强度钢最终热处理后,表面脱碳层 $\leq 0.075\text{mm}$ ,不得有增碳、增氮和晶界氧化,为此这类钢的最终热处理应采用真空热处理、氮基气氛等保护气氛热处理,或者盐炉及涂料保护加热

2.1.1.2 铝合金的热处理工艺性

铝合金的热处理工艺性主要包括冷却速度敏感性、过热过烧敏感性及使用中的稳定性等,在设计和生产中必须引起足够重视。

1. 冷却速度敏感性 对于大多数铝合金,淬火冷却时都要求在 100~290℃ 范围内以最快速度冷却,在随后的时效处理后才可以获得高强度与良好韧性的最佳配合,同时具有较好的抗应力腐蚀性能。因此要求淬火转移时间≤5~15s,并且严格规定淬火转移时间是指从炉门开启瞬间至全部零件都浸入淬火介质中的整个过程所用时间。

零件尺寸增大,淬火冷却速度降低。为了保持一定冷却速度,应在固溶处理前进行粗加工,减少截面尺寸,或者选用另一种允许厚壁面的合金牌号。如果热处理零件尺寸无法改变,应降低设计许用应力值

铝合金淬火后具有高塑性,可进行零件成形和校正,或者通过一定量冷变形,提高力学性能。淬火后在室温下保持塑性时间及淬火与人工时效的间隔时间有一定限制,见表 2-4。

表 2-4 铝合金淬火后保持塑性时间  
及淬火与人工时效的间隔时间

合金	淬火后保持 塑性时间/h	淬火与人工时效 的间隔时间/h
LY2	2~3	<3 或 15~100
LY11	2~3	
LY12	1.5	不限
LY16		
LY17	2~3	不限
LD5	2~3	<6
LDB5	2~3	<6
LD7	2~3	不限
LD8	2~3	不限
LC10	2~3	<3 或 >48
LC4	6	<4 或 2~10 昼夜
LC9	6	不限

注:淬火和人工时效间隔不符合本表规定时,则这些合金在人工时效后强度下降 15~20MPa。

在淬火后时效前进行冷冻处理,可以保持新淬火状态塑性,延缓时效硬化,便于随时取出进行成形加工或校正。铝合金冷冻处理温度一般为 -18℃,冷冻最长时间及淬火与冷冻之间最长时间限制见表 2-5。

表 2-5 变形铝合金的冷冻条件限制

合金	淬火和冷冻之间 最长延迟时间 /min	最长冷冻时间 h		
		-12℃	18℃	-23℃
LY 系列	15	1	30	90
其他系列	30	7	30	90

2. 过热过烧敏感性 铝合金固溶处理加热温度取决于合金本质和强化相溶解速度,为了使尽可能多的强化相溶入固溶体,加热温度尽量提高,应接近其熔点,所以容易产生过热过烧。时效处理温度对铝合金性能影响很大,为了获得最佳性能,必须严格控制加热温度。铝合金热处理加热温度范围一般在 10℃ 以内,要求加热炉的炉温均匀度≤±5℃。

对于包铝铝合金热处理时,为了防止包铝层与基体铝合金之间扩散而影响使用性能,应尽量加快固溶处理的加热速度,限制加热时的最大回复时间,见表 2-6。

表 2-6 包铝铝合金固溶处理加热的  
最大回复时间限制

截面有效厚度/mm	允许最大回复时间/min
≤1.5	10
>1.5~5	20
>5~10	30
>10~15	60

3. 使用中的稳定性 铝合金在使用中的尺寸稳定性取决于合金成分、热处理状态、残留应力及使用条件等。消除残余内应力是保证使用中尺寸稳定性的重要措施,消除淬火内应力的工艺措施见表 2-7。



表 2-7 变形铝合金各类制件  
消除淬火应力工艺措施

工件种类	冶金工厂采取消除应力措施	使用工厂采取消除应力措施
钣金件		1) 最佳措施是在水基有机淬火剂中淬火 2) 在保证力学性能和耐蚀性的前提下适当提高淬火水温 3) 对 ZA16 合金采用较高温度的时效规范
薄板	淬火后通过精整装置进行精整	
热轧厚板		1) 在机加工后进行淬火 2) 在保证力学性能和耐蚀性的前提下适当提高淬火水温
预拉伸厚板	在淬火后进行 1%~3% 永久变形率的校直	不用再采取消除应力措施, 适于数控机床加工
挤压型材	在淬火后进行 1%~3% 永久变形率的校直	
挤压棒材 (较大规格)		制造筒形件时在粗加工后进行淬火, 适当提高淬火水温

(续)

工件种类	冶金工厂采取消除应力措施	使用工厂采取消除应力措施
自由锻件	1) 较小的自由锻件在淬火后进行 1%~5% 永久变形率的压缩, 大型自由锻件由使用工厂淬火 2) 适当提高淬火水温	1) 小型自由锻件在淬火后进行 1%~5% 永久变形率的压缩 2) 大型自由锻件先行粗加工, 再淬火, 适当提高淬火水温
模锻件	1) 淬火后在模具内校正, 必要时在专门的校形模内校正 2) 适当提高淬火水温	和冶金工厂相同
精密零件毛坯		进行深冷处理

对于使用温度较高的铝合金, 为使其使用中尺寸稳定, 一般应进行稳定化处理。

为了防止铝合金零件在制造和使用过程中因高温累计损伤可能影响材料的使用性能, 对铝合金零件的热历程限制如表 2-8 所示。如果多次热历程, 应限制高温暴露的累计损伤, 计算方法如下

$$\frac{t'_{T_1}}{t_{T_1}} + \frac{t'_{T_2}}{t_{T_2}} + \dots + \frac{t'_{T_x}}{t_{T_x}} \leq 1$$

式中  $t'_{T_x}$  —— 在某一温度  $T_x$  下暴露的时间;

$t_{T_x}$  —— 在该温度下 ( $T_x$ ) 允许暴露的时间,

见表 2-8。

表 2-8 铝合金热历程限制

(°C)

合金及状态	限制原因	暴露时间							
		1min	1.5min	1h	4h	10h	100h	1000h	10000h
2024-T3	A、B、C	177	177	149	107	93	93	93	93
2024-T351、T4、T42	A、C								
2024-T6、T62、T81、T851 2124-T851	B、C	204	199	188	177	166	143	121	104

(续)

合金及状态	限制原因	暴露时间							
		1min	1.5min	1h	4h	10h	100h	1000h	10000h
2219-T6, T62, T81	B、C	216	210	199	182	171	149	121	104
6061-T1, T42, T451	B	246	232	224	216	204	204	191	191
6061-T6, T62, T651	B	199	199	188	188	182	166	143	104
7050-T71, T76, T7451, 17651	B、C	149	149	138	132	127	116	99	
7075-T6, T62, T651	B、C	171	166	149	132	121	104	82	
7075-T73, T7351, T76, T7651	B	171	171	160	151	149	121	99	
7475-T76, T73	B、C	160	160	160	149	143	121	99	
356-T6	B	232	232	204	177	163	149		
A356-T6									
K01-T7	B	232	232	232	191	191	177		

注：A：根据腐蚀敏感性；B：根据暴露后室温强度下降；C：根据胶接在高温固化循环后，某些合金强度和抗腐蚀性下降。

### 2.1.1.3 钛合金的热处理工艺性

钛合金的热处理工艺性主要包括冷却速度敏感性、吸氢和氧化敏感性等，在使用和工业生产中应引起注意。

1. 冷却速度敏感性 钛合金的强化热处理工艺主要是固溶处理+时效处理。 $(\alpha+\beta)$ 型和 $\beta$ 型钛合金都可以进行固溶处理+时效强化。为了保证时效强化效果，固溶处理淬火冷却速度越快越好，一般采用水淬或油淬，同时还要严格控制淬火转移时间，见表2-9。

表2-9 钛合金零件淬火转移时间限制

零件厚度/mm	允许的最大淬火转移时间/s
<3	6
5~25	8
>25	12

钛合金固溶时效强化效果与零件尺寸有关，零件尺寸增加，其抗拉强度下降，见表2-10所示，对于钛合金零件，设计时必须考虑尺寸效应。

表2-10 钛合金固溶处理和时效后的抗拉强度与尺寸的关系

抗拉强度/MPa 截面尺寸/mm 合金	13	25	50	75	100	150
Ti-6Al-4V	1105	1070	1000	930		
Ti-6Al-6V-2Sn(Cu+Fe)	1205	1205	1070	1035		
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	1170	1170	1170	1140	1105	
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(Ti-17)	1170	1170	1170	1105	1105	1105
Ti-10V-2Fe-3Al	1240	1240	1240	1240	1170	1170
Ti-13V-11Cr-3Al	1310	1310	1310	1310	1310	1310
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn( $\beta$ II)	1310	1310	1310	1310	1310	
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo( $\beta$ c)	1310	1310	1240	1240	1170	1170

2. 吸氢和氧化敏感性 钛合金很容易吸氢, 使其性能变坏。钛合金加热至 300℃ 即开始吸氢, 500℃ 时吸氢速度急剧增加。在机加工、化学铣切及酸洗等工艺过程中都会发生氢污染。钛合金零件一般控制含氢量(质量分数)  $\leq 0.02\%$ , 超过标准规定含氢量必须进行真空除氢处理。

钛合金热处理后表面氧化层对使用性能影响很大, 大幅度降低塑性与韧性, 因此钛合金的表面氧化层必须去除, 清除方法有喷砂、酸洗、化学铣切或机械加工等。对于接近成品的精加工作, 在表面氧化层去除后, 还应去除一定深度的基体钛合金, 去除最小深度见表 2-11。在钛合金零件设计和生产过程中必须注意留足加工余量, 确保去除氧化层引起的有害影响。

表 2-11 去除基体金属最小深度

去除深度 $\mu\text{m}$ 加热温度 $^{\circ}\text{C}$	加热时间/h						
	$\leq 0.2$	0.2~0.5	0.5~1	1~2	2~6	6~10	10~20
500~600	不要求	8	13	13	13	25	51
600~700	8	13	25	25	51	76	76
700~760	13	25	25	51	76	76	152
760~820	25	25	51	76	142	152	
820~930	51	76	142	152	254		
930~980	76	142	152	254			
980~1100	152	254	356				

注: 在进行多道次加热时, 可在最后一道加热后消除氧化层, 加热时间以各次相加计算。

表 2-12 钢的热处理种类及应用范围

工 艺 名 称		作 用	应 用 范 围
退 火	均匀化退火	成分均匀化	铸钢件及有成分偏析的锻轧件
	完全退火	细化组织和降低硬度	亚共析钢锻、焊、轧件
	等温退火	细化组织, 降低硬度, 防止白点	碳钢、合金钢以及高合金钢的锻件、冲压件等。较完全退火的组织和性能更均匀, 且缩短工艺周期
	球化退火	碳化物球状化, 降低硬度, 提高塑性	共析钢或过共析钢件(如工模具、轴承钢)
	不完全退火 (亚临界退火)	细化组织, 降低硬度	中、高碳钢及低合金钢的锻、轧件, 组织细化程度低于完全退火
	再结晶退火 (低温退火)	消除加工硬化, 使冷变形晶粒再结晶 为细小等轴晶	冷变形钢材和零件
	去应力退火	消除内应力, 使之达到稳定状态	铸件、焊接件、锻轧件及机加工件

## 2.1.2 材料的热处理种类及应用

同一种材料经不同热处理后能获得不同的组织, 具有不同的使用性能, 从而满足不同用途。同一种零件可以选择不同的材料, 采用相应的热处理工艺来满足零件的使用性能。在零件选定材料后, 在满足其使用性能的前提下, 也还有多种热处理方法可供选择。

设计人员和工艺人员应在熟悉各种材料特性的基础上, 掌握材料成分、工艺、组织和性能的内涵变化本质和规律, 正确合理选择材料和制订工艺, 不断提高产品的质量。钢、铝合金、钛合金的热处理种类、作用及应用范围见表 2-12~表 2-14。

(续)

工 艺 名 称		作 用	应 用 范 围
正 火		提高硬度, 改善加工性能, 防止机加工“粘刀”, 降低表面粗糙度值	低碳钢
		细化晶粒, 均匀组织, 为淬火做好组织准备	中碳钢、合金钢
		消除网状碳化物, 为球化退火作准备	高碳钢、高合金钢
		消除渗层中的网状碳化物	渗碳钢
		消除不正常组织(如粗晶等)	铸件、锻件
		最终热处理	要求不高的碳钢
淬 火	单介质淬火	在单一冷却介质(如油、水、空气等)中淬火, 达到硬度、强度等要求	最常用方法
	双介质淬火	在两种淬火介质(水—油、水—空气、油—空气等)中淬火, 保证足够淬硬层, 避免淬裂, 减少变形	中、高碳钢零件 合金钢大型零件
	分级淬火	先淬入浴槽中, 使零件内外温度都达到浴槽介质温度, 然后再淬入另一种冷却较缓慢的介质, 减少变形和开裂	形状复杂、变形要求严格的零件, 包括尺寸较小的合金钢、碳钢零件, 尺寸较大零件或淬透性差的钢种
	贝氏体等温淬火	先淬入浴槽完成淬火, 然后再空冷, 获得良好综合性能, 减少变形和开裂	合金钢及 $w(C) < 0.6\%$ 碳钢零件 高碳工模具钢零件
	固溶处理	将其他相充分溶解到固溶体中	沉淀硬化不锈钢、马氏体时效钢
回 火	低温回火	150~250℃回火, 获得回火马氏体组织。目的是在保持高硬度条件下, 提高塑性和韧性	超高强度钢、工模具钢、量具、刃具、轴承及渗碳件
	中温回火	350~500℃回火, 获得托氏体组织。目的是获得高弹性和足够的硬度, 保持一定韧性	中温超高强度钢、弹簧、热锻模具
	高温回火	500~650℃回火, 获得索氏体组织。目的是达到较高强度与韧性良好配合	结构钢零件、渗氮件预备热处理
	多次回火	淬火后进行二次以上回火, 进一步促使残留奥氏体转变, 消除内应力, 使尺寸稳定	超高强度钢、工模具钢、高速钢
	时效	从过饱和固溶体中析出金属间化合物, 提高强度、硬度	
渗碳(含碳氮共渗)		增加表层碳含量, 提高表面硬度、耐磨性及抗疲劳性能 碳氮共渗与渗碳相似, 但渗入温度略低, 渗层较浅, 变形较小	用于心部有一定强度和良好韧性而表面要求高硬度(58~64HRC)的场合, 还用于提高耐磨性或疲劳性能的场合。主要用于齿轮、销类和轴类零件

(续)

工 艺 名 称	作 用	应 用 范 围
渗氮 (含氮碳共渗)	<p>增加表层氮含量, 提高表面硬度、耐磨性、疲劳性能, 以及热硬性 (<math>\leq 500^{\circ}\text{C}</math>) 和抗胶合性</p> <p>氮碳共渗与渗氮相似, 但渗入温度略高, 表面硬度稍低</p> <p>与渗碳相比, 渗氮的渗层较浅, 硬度高, 不能承受大接触应力和冲击负荷, 生产周期长</p>	用于心部保持良好强韧性而表面要求高硬度 (65~72HRC) 场合, 还用于提高耐磨性、疲劳性能, 耐腐蚀性或热硬性场合
渗金属及非金属	使另一种或多种金属, 如 Al、Cr、Si、B、V、W、Mo、Zn、Re 等渗入表层, 提高耐腐蚀性、抗氧化性、耐磨性等	渗铝或铝与其他元素多元共渗, 主要用于高温防护, 提高高温抗氧化和热蚀性

表 2-13 铝合金热处理种类及应用

(续)

工 艺 名 称	作 用	工 艺 名 称	作 用
均 匀 化 退 火	1) 提高铸锭热加工工艺塑性	固 溶 处 理 + 人 工 时 效	获得高的抗拉强度, 但塑性较自然时效时低
	2) 提高铸态合金固溶线温度, 从而提高固溶处理温度	固 溶 处 理 + 过 时 效	抗拉强度不如人工时效的高, 但提高了耐应力腐蚀和其他腐蚀的性能
	3) 减轻制品的各向异性、改善组织和性能的均匀性	人 工 时 效	仅依靠铸件在成形冷却过程中所达到的部分固溶效果, 经人工时效提高强度, 改善切削加工性能
	4) 便于某些变形铝合金制取细小晶粒制品	固 溶 处 理 + 稳 定 化 处 理	提高铸件组织及尺寸稳定性和耐腐蚀性能, 适用于较高温度下工作的零件
	5) 组成铝合金形变热处理的一个工艺环节	固 溶 处 理 + 软 化 处 理	使铸件在获得一定强度的同时, 得到高的塑性和尺寸稳定性
去 应 力 退 火	全部或部分消除在压力加工、铸造、热处理、焊接和切削加工等工艺过程中, 工件内部产生的残留应力, 提高尺寸稳定性和合金的塑性	固 溶 处 理 + 深 冷 处 理 + 时 效	在保证力学性能的同时, 极大地消除残留应力
完 全 退 火	消除变形铝合金在冷态压力加工或固溶处理时效的硬化, 使之具有很高的塑性, 以便进一步加工	形 变 热 处 理	使变形铝合金制品具有优良的综合性能
不 完 全 退 火	使处于硬化状态的变形铝合金有一定程度的软化, 以达到半硬化实用状态, 或使已冷变形硬化的合金恢复部分塑性, 便于进一步变形		
固 溶 处 理 + 自 然 时 效	提高合金的性能, 尤其是塑性和常温条件下的耐腐蚀性能		

表 2-14 钛合金热处理种类及应用范围

(续)

工艺名称	作用	应用范围
去应力退火	部分或基本上消除残留应力, 减少变形	机加工件 焊接件
普通退火 (工业退火)	完全消除内应力, 使组织和性能均匀	铸件、锻件棒材、板材、型材
$\beta$ 退火	提高 ( $\alpha+\beta$ ) 型钛合金抗蠕变性能和断裂韧度, 但降低低周疲劳性能和塑性	$\alpha+\beta$ 型钛合金经 ( $\alpha+\beta$ ) 区变形加工后进行
等温退火	获得稳定组织和性能, 提高塑性和热稳定性	$\beta$ 稳定化元素含量较高的 $\alpha-\beta$ 型钛合金, 如 TC6 等
双重退火 (或三重退火)	同时获得稳定组织和提高强度、塑性及断裂韧度	$\alpha+\beta$ 型钛合金, 如 TC6、TC9、TC11 等

工艺名称	作用	应用范围
真空退火	减少气体含量, 防止氧化	钛合金中氢含量超过规定值时, 或者成品件、薄壁精密件等
固溶+时效	提高强度和塑性, 获得良好综合性能	$\alpha+\beta$ 型钛合金 (TC 类) 亚稳定 $\beta$ 型钛合金 (如 TB1、TB2)
形变热处理	提高强度、塑性、疲劳强度、热强性等, 获得良好综合性能	研究和发展方向之一

### 2.1.3 零件服役条件分析及合理选材

零件选择材料首先必须满足零件的使用性能要求, 其次还要考虑其工艺性和经济性。

#### 2.1.3.1 使用性能

一般根据零件的服役条件, 分析其常见的失效形式, 确定零件的使用性能及对材料的主要性能要求。典型零件的服役条件、失效形式及材料选择的主要指标如表 2-15 所示。

表 2-15 典型零件的服役条件、常见失效方式

零件 类型	服 役 条 件								常见失效方式												材料选择的主要指标	
	负荷种类及速度			应力状态					磨 损	温 度	介 质	振 动	过 量 变 形	韧 断	脆 断	表面 变化	尺寸 变化	疲 劳	咬 蚀	腐 蚀		
	静	疲劳	冲击	拉	压	弯	扭	切														接触
紧固 螺栓	✓	✓		✓		✓		✓					✓	✓	✓				✓	✓	✓	疲劳、屈服及抗剪 强度
轴类		✓	✓			✓	✓			✓					✓	✓			✓	✓		弯、扭复合疲劳强度
齿轮		✓	✓		✓	✓			✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓	✓		弯曲和接触疲劳、 耐磨性、心部强度
螺旋 弹簧		✓					✓						✓		✓				✓		✓	扭转疲劳、弹性极限
板弹 簧		✓				✓							✓		✓				✓		✓	弯曲疲劳、弹性极限
滚动 轴承		✓	✓		✓				✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓		✓	接触疲劳、耐磨性、 耐蚀性
曲轴		✓	✓			✓	✓			✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		扭转、弯曲、疲劳、 耐磨性、循环韧性
连杆		✓	✓	✓	✓										✓							拉压疲劳

### 2.1.3.2 工艺性能

材料的工艺性能主要包括铸造工艺性、压力加工工艺性、焊接工艺性、热处理工艺性、表面处理工艺性、机械加工工艺性、特种加工工艺性及装配和维护工艺性等。这些工艺性与材料的成分、组织有关,同时也与工具、介质、温度等外部环境有关。材料工艺性能的好坏在加工的难易程度、生产效率和生产成本等方面起重要作用,这是选择材料必须同时考虑的另一个重要因素。

材料工艺性能的好坏在单件或小批量生产中并不显得十分突出,而在大批量生产条件下常成为选材的决定因素。例如标准件生产批量大,为提高生产效率,宜选用ML钢。对于汽车齿轮,在流水线大量生产条件下,为保证产品质量,必须选用“保证淬透性的结构钢”。

### 2.1.3.3 经济性

材料经济性是指零件的材料费用和制造费用的综合,在满足使用性能前提下,材料成本要低,制造成本也要低,才是最好经济性,在设计零件时要综合比较,合理选材。

设计人员必须了解材料在各种组织状态下性能指标的物理本质,才能针对零件的服役条件准确提出各种性能指标要求,通过查阅手册合理选择材料。所以近代设计发展的一个重要特点是把机构设计和材料设计有机结合起来。图2-5是这种设计过程的示意图。

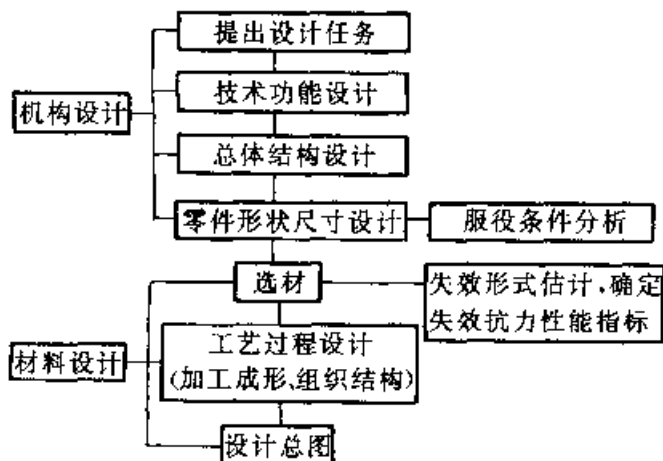


图 2-5 零件设计过程示意图

## 2.2 零件结构的合理性

在产品零件设计中,设计人员有时只注意如何使零件的结构形状适合机械的需要,而往往忽视零件的材料和结构不合理给热处理带来的困

难,甚至难以实现热处理的效果。因此,设计人员在设计零件结构形状时须充分重视结构的热处理工艺性。

### 2.2.1 零件的热处理结构工艺性因素

影响结构的热处理工艺性因素主要有:

- 1) 零件材料的选择。
- 2) 零件的几何形状和刚度。
- 3) 零件的尺寸大小。
- 4) 零件的表面状态。

为避免零件热处理时发生过变形、开裂或硬度不足及软点等,零件的几何形状往往是关键。尖锐的棱边、尖角和凹腔会产生应力集中,是产生开裂的主要根源;零件截面突变处(如螺纹、油孔、键槽及退刀槽等)也容易造成应力集中;零件的显微组织不均匀会使热处理时的应力分布不均匀,从而导致变形和开裂。

如果零件的结构形状已无改善余地,可改用淬透性较好的材料,用缓和的冷却介质淬火,可避免变形、开裂。

零件的刚度差,加热或冷却时均会产生大的变形,可设计专用夹具来防止变形。

零件的表面状态对热处理工艺性也有很大影响。表面粗糙度值低,淬火冷却时的气膜不易附着,冷却均匀,可减小变形,表面的刀痕和较深或部位不合适的印痕也可能导致热处理时开裂。

### 2.2.2 改善零件热处理工艺性的结构设计

在零件结构设计时应注意改善热处理工艺性,对热处理零件结构设计主要要求有:

- 1) 锐边尖角要倒钝或改成圆角。
- 2) 尽量使零件截面均匀,质量平衡。必要时可加开工艺孔或工艺性槽,并合理分布其位置和数量。
- 3) 轴类零件的细长比不可太大。
- 4) 内孔要求淬硬时,应变不通孔为通孔。孔与孔之间或孔与棱边之间应有一定距离。如有可能可在内孔底部横向钻通,以改善淬火时内孔的冷却条件。
- 5) 提高零件结构的刚性,必要时可附加加强肋。
- 6) 零件几何形状应力求简单、对称。

7) 热处理前要有一定的表面粗糙度。一般淬火零件的表面粗糙度不大于  $R_a 3.2\mu\text{m}$ ; 渗氮零件表面粗糙度值大时, 脆性增大, 硬度测不准确, 一般要求  $R_a$  在  $0.80 \sim 0.10\mu\text{m}$ ; 渗碳零件表面粗糙度不高于  $R_a 6.3\mu\text{m}$ 。表面不能有较深的印痕, 关键部位不能有印痕。

8) 形状特别复杂或者不同部位有不同性能要求时, 在可能的情况下可改成组合结构。对特别细长、薄长的零件, 结构上有可能拼接时, 应尽量拼接。

9) 尽量避免配作孔、局部渗碳、局部渗氮。

10) 对于大件、长件, 设计时应考虑便于热处理的装夹、吊挂。

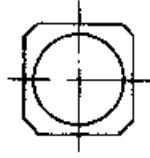
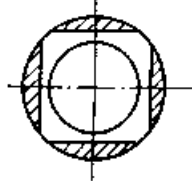
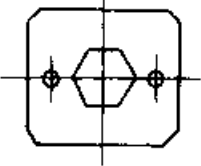
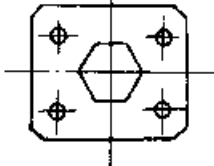
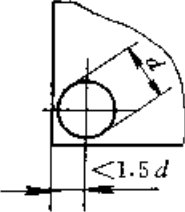
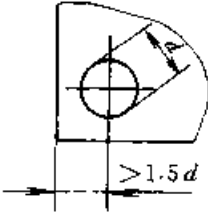
11) 高频淬火部位应尽量避免有孔或槽。不能避免的孔或槽, 其边缘一定要倒角, 键槽可在槽两端的圆弧处倒角。

12) 带花键孔的套和齿轮, 外圆或齿部要求高频淬火者, 其壁厚的最小尺寸应有所限制, 以避免变形超差。

另外, 零件结构形状与热处理工艺方法及所选用设备有一定关系。例如, 细长的零件应采用井式炉吊挂加热。热处理工艺参数不但要根据选用的材料来确定, 而且还应根据零件的形状尺寸等因素来调整。淬火冷却时, 细长和圆筒形零件应按长度方向淬入介质; 圆盘形零件则应径向淬入并横向往右移动; 薄片形长刀片应使刃口同时先入淬火液, 带各种孔眼、凹槽的零件应选择使淬火液易于流动的方向淬火。总之, 零件的结构应与所需进行的热处理工艺相适应。

改善零件热处理工艺性的结构设计示例见表 2-16。

表 2-16 改善零件热处理工艺性的结构设计要点和示例

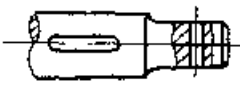
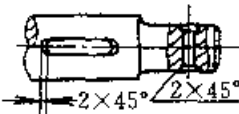
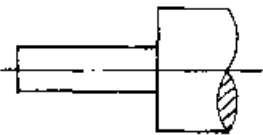
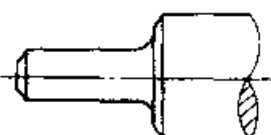




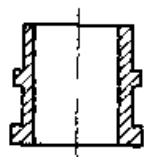
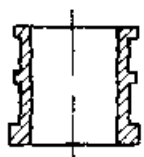
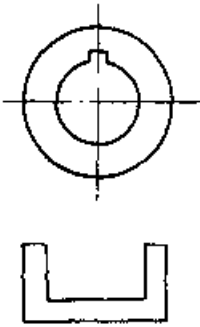
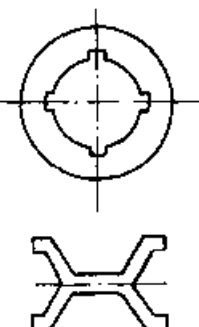
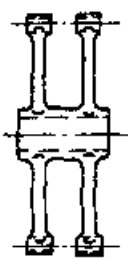
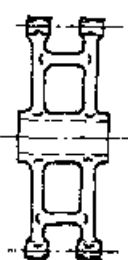
要 点	图 例		说 明
	改 进 前	改 进 后	
避免孔距 离边缘太 近, 减少热 处理开裂			避免危险尺寸或太薄的边缘。当零件要求必须是薄边时, 应在热处理后成形
			改变冲模螺孔的数量和位置, 减少淬裂倾向
			结构允许时, 孔距离边缘应不小于 $1.5d$



(续)

要 点	图 例		说 明
	改 进 前	改 进 后	
避免孔距 离边缘太 近, 减少热 处理开裂			原设计尺寸为 $64^{+0.5}_{-0}$ mm, 角上易出现裂纹, 现改为 $60^{+0.3}_{-0}$ mm, 增加了壁厚, 大大减少了淬裂倾向
避免结构 尺寸厚薄相 差悬殊, 以 减少变形或 开裂			加开工艺孔使零件截面较均匀
			变不通孔为通孔
			截面比设计不当, 工艺孔的直径约为轮辐的 1/3 为好
			按虚线所示, 把轮毂的厚度改变到与齿部相同的程度
避免尖 角、棱角	<p>高频淬火表面</p>	<p>高频淬火表面</p>	二平面交角处应有较大的圆角或倒角, 并有距交角 5~8mm 不能淬硬

(续)

要 点	图 例		说 明
	改 进 前	改 进 后	
避免尖角、棱角			为避免锐边尖角在热处理时熔化或过热,在槽或孔的边上应有2~3mm的倒角(与轴线平行的键槽可不倒角)
避免断面突变、增大过渡圆角、减少开裂			断面过渡处应有较大的圆孤半径
			结构允许时可设计成过渡圆锥
			增大曲轴轴颈的圆角,且必须规定淬硬要包括圆角部分,否则曲轴的疲劳强度显著降低
零件形状应力求对称,以减小变形			一端有凸缘的薄壁套类零件渗氮后会变形喇叭口,在另一端增加凸缘后变形大为减小
			几何形状在允许条件下,力求对称。图例为T611A机床渗氮摩擦片和坐标镗床精密刻线尺
零件应具有足够的刚度			该铸件杆臂较长,铸造及热处理时均易变形。加上横梁后,增加了刚度,变形减小

(续)

要 点	图 例		说 明
	改 进 前	改 进 后	
零件应具有足够的刚度			该零件虽为 Cr12MoV 钢制作, 但淬火空冷时槽口会向外叉开, 采用左图的工艺提墙后, 淬火回火后再设法切开, 易保证尺寸要求
避免不通孔、死角			不通孔和死角使淬火时气泡不易逸出, 造成硬度不均, 应设计工艺排气孔
形状复杂、热处理工艺性很差或零件各部性能要求不同时, 在可能条件下将零件设计成组合件			此件两部分工作条件不同, 设计成组合结构, 既提高工艺性, 又节约高合金钢材料
			某钻台, T10 钢, 有 $\phi 10\text{mm}$ 导向孔, 孔要求耐磨, 硬度为 60HRC。钻台整体淬火, 导向孔处易开裂, 热处理工艺性差。改为组合结构, 将一小套淬硬后镶在钻台上, 解决了问题
			零件截面相差悬殊, 不易加工, 热处理也难达到要求, 可改成拼接结构

## 2.3 零件尺寸的合理性

在满足零件使用性能前提下, 零件尺寸的合理性主要受淬透性和热处理变形两方面控制。

### 2.3.1 淬透性与尺寸限制

钢的淬透性对钢件淬火后的组织性能有重大影响, 为了使零件组织性能均一并稳定, 一般都要

求零件淬火时完全淬透。钢完全淬透的最大断面直径称为临界直径( $D_0$ )，一般机械零件以心部获得50%马氏体(体积分数)为标准，重要零件(如航空零件)则以心部获得90%马氏体(体积分数)为标准。常用钢的临界直径( $D_0$ )如表2-17所示。航空结构钢最大尺寸限制如表2-18所示。

表 2-17 常见钢种的  
临界直径  $D_0$  (mm)

钢号	冷却介质			
	静油	20°C 水	40°C 水	20°C、w(NaCl) 5%水溶液
优质结构钢	15	2	7	5
	30	7	15	12
	45	10	20	16
	60	12	24	19.5
	45Mn	17	31	26
合金结构钢	50Mn2	28	45	41
	42Mn2V	25	42	38
	20Cr	10	20	16
	40Cr	22	38	35
	45Cr	25	42	38
	20CrMnSi	15	28	24
	38CrMoAl	47	69	65
	25Cr2MoV	35	52	50
	12CrNi2	11	22	18
	45B	10	20	16
弹簧钢	40MnVB	22	38	35
	65	12	24	19.5
	65Mn	20	36	31.5
轴承钢	60Si2Mn	22	38	35
	GCr6	12	24	19.5
	GCr15	15	28	24
工具钢	T10	<8	26	22
	9Mn2V	33	52	50
	9SiCr	32	51	47
	9CrWMn	75	95	90

表 2-18 航空结构钢最大尺寸限制

钢号	热处理工艺	最大限制尺寸	
		零件形状	尺寸/mm
30CrMnSiA	油淬	圆柱体	25
	等温淬火	圆柱体	12
		双面冷却扁平或管状件	6
		单面冷却件	3
40CrNiMoA	油淬	圆柱体	35
18Cr2Ni4WA	油淬	圆柱体	80
12Cr2Ni4A	油淬	圆柱体	30
12CrNi3A	油淬	圆柱体	25
18CrMn2MoBA	空淬	圆柱体	80
	油淬	圆柱体或正方体	80
30CrMnSiNi2A	180 ~ 230°C 等温淬火	型材	60
	280 ~ 320°C 等温淬火	双面冷却板材或管材	40
	310 ~ 330°C 等温淬火	单面冷却管材	20
40CrMnSiMoVA	油淬	圆柱体	80
	180 ~ 230°C 等温淬火	圆柱体	50
		单面冷却管材	20
	290 ~ 320°C 等温淬火	圆柱体	40
	300 ~ 340°C 等温淬火	圆柱体	40
40CrNi2Si2MoVA	油淬	圆柱体	100
45CrNiMo1VA	油淬	圆柱体	127

钢的淬透性和具体淬火条件下零件的淬透深度是有区别的。在相同奥氏体化条件下，同一种钢的淬透性是相同的，但具体条件下零件的淬透层深度则还受冷却介质、零件体积、形状、表面状态等因素的影响。完全淬透的钢，整个截面上的力学

性能均匀一致,未淬透的钢,经回火后虽然也会使整个截面上的硬度趋于一致,但未淬透部分的屈服强度和冲击韧度均有下降,致使整个零件的屈

服强度、塑性、韧性降低,疲劳性能降低。钢的这种尺寸效应不但反应在淬硬层深度上,而且对淬火零件的表面硬度也有影响,见表 2-19。

表 2-19 几种常用钢整体淬火后硬度值与钢件截面尺寸的关系

截面尺寸/mm 淬火后硬度值(HRC)	<3	4~10	11~20	20~30	30~50	50~80	80~120
材料与热处理							
15 钢渗碳,水淬	58~65	58~65	58~65	58~65	58~62	50~60	
15 钢渗碳,油淬	58~62	40~60					
35 钢水淬	45~50	45~50	45~50	35~45	30~40		
15 钢水淬	54~59	50~58	50~55	48~52	45~50	40~45	25~35
45 钢油淬	40~45	30~35					
T8 钢水淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	50~55	40~45
T8 钢油淬	55~62						
20Cr 渗碳油淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	45~55	
40Cr 油淬	50~60	50~55	50~55	45~50	40~45	35~40	
35SiMn 油淬	48~53	48~53	48~53	45~50	40~45	35~40	
65SiMn 油淬	58~64	58~64	50~60	48~55	45~50	40~45	35~40
GCr15 油淬	60~64	60~64	60~64	58~63	52~62	48~50	
CrWMn 油淬	60~65	60~65	60~65	60~64	58~63	56~62	56~60

对于铝合金,由于对淬火冷却速度敏感,使大截面尺寸零件性能下降,为了保持零件在固溶时效后获得高强度与良好韧性配合及最佳抗应力腐蚀性能,应对固溶处理最大截面进行限制,见表 2-20。

钛合金也有类似的尺寸效应,其强化效果与零件尺寸有一定关系,固溶时效后的力学性能随零件尺寸加厚而下降,如表 2-11 所示。

### 2.3.2 热处理变形及预留加工余量

钢在热处理的加热、冷却过程中,由于热应力和组织应力作用,使热处理后零件产生不同残留应力,可能引起变形,几种简单形状工件外形和尺寸变化一般趋向如表 2-21 所示。实际零件形状都比较复杂,变形情况也很复杂。

热处理变形给后续工序,特别是机械加工增加了很多困难,影响了生产效率,增加了成本,因此应研究热处理变形规律,采取措施减少热处理变形,具体措施见表 2-22 和表 2-23;另一方面,通过适当调整、选用热处理前的加工余量,既满足热

表 2-20 铝合金固溶处理最大厚度尺寸限制

淬火介质	合金牌号	品 种	最大厚度尺寸/mm
水	2024、2124 2219、6061	全部	101.6
	7049、7050	全部	127.0
	7075	全部	76.2
	7475	薄板、中厚板	76.2
聚合物水溶液	2024 <sup>①</sup>	薄板、管材	1.0
	2124	薄板	1.6
	2219	薄板	2.0
	6061	薄板	4.6
	7049	锻件	76.2
	7050	锻件	25.4
	7050	锻件 薄板	50.8 6.3

① 2024—T42 最大厚度尺寸 1.0mm;2024—T62 所有厚度薄板都可淬透。

处理的可能性,又不会造成机械加工过分麻烦,对保证零件质量、提高生产效率、降低成本具有重大意义。对于热处理变形很有规律的零件,可以采用预留变形量的办法,使热处理后变形在允

许范围内。如机床导轨淬火后变形规律总是下凹,则在淬火前加工成上凸。渗氮零件也常用预留尺寸胀大量来解决变形问题。

表 2-21 几种简单形状钢件的外形与尺寸变化的一般趋向

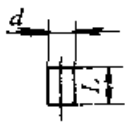


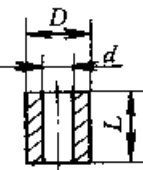
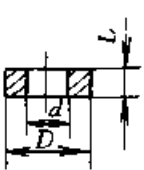




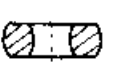
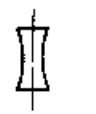



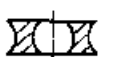



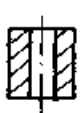

零件类别	轴类	扁平体	正方体	圆(方)孔柱体	圆(方)孔扁平体
原始状态					
热应力作用 变形/尺寸变化	 $d^+, L^-$	 $d^-, L^-$	 趋向球形	 $d^+, D^-, L^-$	 $d^+, D^+$
组织应力作用 变形/尺寸变化	 $d^+, L^-$	 $d^+, L^-$	 平面内凹, 棱角突出	 $d^+, D^-, L^+$	 $d^+, D^-$
体积效应作用 变形/尺寸变化	 $d^+, L^+$ 或 $d^-, L$	 $d^+, L^-$ 或 $d^-, L^-$	 $d^+, L^+$ 或 $d^-, L$	 $d^+, D^+, L^-$ 或 $d^-, D^-, L^-$	 $d^+, D^+$ 或 $d^-, D^-$

表 2-22 钢零件减少热处理变形的措施与方法

措 施	方 法	备注
合理选材和提高硬度要求	1) 对于形状复杂、截面尺寸相差较大而又要求变形较小的零件,应选择淬透性较好的材料,以便使用较缓和的淬火介质淬火	
	2) 对于薄板状精密零件,应选用双向轧制板材,使零件纤维方向对称	
	3) 对零件的硬度要求,在满足使用要求前提下,尽量取下限	

(续)

措 施	方 法	备注
正确设计零件	1) 零件外形应尽量简单、均匀、结构对称 2) 尽量避免截面尺寸突然变化,减少沟槽和薄边,不要有尖锐棱角 3) 避免较深的不通孔 4) 长形零件避免截面呈横梯形 5) 尽量使零件纤维方向对称 6) 必要时增加工艺孔和工艺堤墙	

(续)

措 施	方 法	备 注
合 理 安 排 生 产 路 线,协调冷 热加工与 热处理的关系	1) 对于形状复杂、精度要求高的零件,应在粗、精加工之间进行预先处理,如消除应力、球化退火等 2) 合理安排热处理与机加工工序顺序,如两个对称零件可先热处理,最后再切分 3) 掌握热处理变形规律,预留磨削量 4) 适当提高锻造比,使组织更均匀 5) 做好毛坯预备热处理,使组织均匀 6) 淬火之前进行消除应力处理	
	1) 在满足热处理工艺要求前提下,尽量降低淬火加热温度 2) 选择较缓和的冷却介质 3) 采取预热或阶梯状升温 4) 用等温淬火、分级淬火等代替油淬 5) 用渗氮或高碳钢表面处理代替渗碳淬火 6) 局部热处理代替整体热处理 7) 夹具中间火或加压回火 8) 长杆状零件垂直吊挂,避免平板形式淬火	

表 2-23 铝合金热处理变形及改进措施

热处理工艺	变形原因	改进措施	备注
固 溶 处 理	固溶处理时相溶解造成膨胀或收缩。 2219 合金收缩 2mm/m, 7075 合金膨胀 0.6mm/m。不合适的装夹方式和夹具也会引起变形	1) 采取合理装夹,尽量垂直悬挂,水平摆放时要有多处支撑 2) 制作夹具时,要为铝材加热膨胀、冷却收缩留有余地 3) 铸件采用低温装炉,慢速升温或阶梯式升温 4) 采用冷却较缓的冷却介质淬火 5) 拉伸消除内应力 6) 固溶处理后立即校正	

(续)

热处理工艺	变形原因	改进措施	备注
时 效 与 稳 定 化 处 理	大多数可热处理合金,时效时膨胀,Al—Zn—Mg—Cu 系合金则收缩 2219—T87 伸长 1.5mm/m; 2014—T6 伸长 0.5mm/m; 2024—5851 伸长 0.1mm/m; 7050、7075—T6 收缩 0.3mm/m; 7050、7075—T73 收缩 0.7mm/m	设计和生产中应考虑这种变形,留有余地	
机 械 加 工 与 装 配	机械应力过大,零件热处理状态不合适,可能产生变形	1) 可热处理强化铝合金零件(除大截面零件外),应在固溶时效处理状态机械加工和装配 2) 机械加工每次进给量要合适,避免过大应力 3) 钣金零件上直凸缘应在最终热处理后成形	

对于大多数零件,一般根据热处理变形量来确定零件预留加工余量。典型零件推荐淬火变形允差和预留余量见表 2-24~表 2-28。

表 2-24 平板类零件预留

余量和淬火变形允差 (mm)

零件长度	零 件 宽 度					
	≤100			101~200		
	每边 留量	淬硬前 变形	淬硬后 变形	每边 留量	淬硬前 变形	淬硬后 变形
≤300	0.30~ 0.40	≤0.1	≤0.20	0.40~ 0.50	≤0.15	≤0.30
301~1000	0.40~ 0.50	≤0.15	≤0.30	0.50~ 0.70	≤0.20	≤0.40
1001~2000	0.50~ 0.70	≤0.20	≤0.40	0.60~ 0.80	≤0.25	≤0.50

表 2 25 轴、杆类零件预留余量和淬火变形允差

(mm)

直 径		轴 长 度										
		≤50	51~100	101~200	201~300	301~450	451~600	601~800	801~1000	1001~1300	1301~1600	1601~2000
≤5	留量	0.35~	0.45~	0.55~								
	变形	0.15	0.22	0.27								
6~10	留量	0.30~	0.40~	0.50~	0.55~							
	变形	0.10	0.20	0.25	0.27							
11~20	留量	0.25~	0.30~	0.40~	0.50~	0.55~						
	变形	0.12	0.17	0.22	0.25	0.27						
21~30	留量	0.25~	0.30~	0.35~	0.40~	0.45~	0.50~	0.55~				
	变形	0.15	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27				
31~50	留量	0.25~	0.35~	0.35~	0.35~	0.40~	0.45~	0.50~	0.60~	0.75~		
	变形	0.17	0.17	0.17	0.17	0.20	0.20	0.22	0.25	0.30		
51~80	留量	0.30~	0.40~	0.40~	0.40~	0.40~	0.40~	0.50~	0.60~	0.75~	0.80~	0.95~
	变形	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.25	0.27	0.30	0.35	0.42
81~120	留量	0.50~	0.50~	0.50~	0.50~	0.50~	0.50~	0.60~	0.65~	0.75~	0.85~	1.05~
	变形	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.32	0.32	0.37	0.42
121~180	留量	0.60~	0.60~	0.60~	0.60~	0.60~	0.70~	0.70~	0.80~	0.95~	1.00~	1.20~
	变形	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
181~260	留量	0.70~	0.70~	0.70~	0.70~							
	变形	0.35	0.35	0.35	0.35							

表 2-26 套类零件预留余量和淬火变形允差

(mm)

内孔直径	壁厚	变 形	套 的 高 度					
			≤100		101~250		251~500	
			内 孔	外 径	内 孔	外 径	内 孔	外 径
≤0.30	>5	直径上的留量	0.20~0.30	0.40~0.50	0.30~0.40	0.40~0.50	0.40~0.50	0.50~0.60
	≤5	变 形	0.10	0.20	0.15	0.20	0.20	0.25
	>5	直径上的留量	0.30~0.40	0.40~0.50	0.40~0.50	0.50~0.60	0.50~0.60	0.60~0.70
	≤5	变 形	0.15	0.20	0.20	0.25	0.25	0.30



(续)

内孔直径	壁厚	变 形	套 的 高 度					
			$\leq 100$		101~250		251~500	
			内 孔	外 径	内 孔	外 径	内 孔	外 径
31~50	$>5$	直径上的留量 变 形	0.30~0.40 0.15	0.40~0.50 0.20	0.40~0.50 0.20	0.50~0.60 0.25	0.50~0.60 0.25	0.60~0.70 0.30
	$\leq 5$	直径上的留量 变 形	0.40~0.50 0.20	0.50~0.60 0.25	0.50~0.60 0.25	0.60~0.70 0.30	0.60~0.70 0.30	0.70~0.80 0.35
51~80	$>6$	直径上的留量 变 形	0.40~0.50 0.20	0.50~0.60 0.25	0.50~0.60 0.25	0.60~0.70 0.30	0.50~0.60 0.25	0.70~0.80 0.35
	$\leq 6$	直径上的留量 变 形	0.50~0.60 0.25	0.60~0.70 0.30	0.50~0.60 0.25	0.60~0.70 0.30	0.60~0.70 0.30	0.70~0.80 0.35
81~120	$>12$	直径上的留量 变 形	0.50~0.70 0.25	0.60~0.80 0.30	0.50~0.60 0.25	0.60~0.80 0.30	0.60~0.80 0.30	0.70~0.90 0.35
	6~12	直径上的留量 变 形	0.60~0.80 0.30	0.70~0.90 0.35	0.60~0.80 0.30	0.70~0.90 0.35	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40
	$\leq 6$	直径上的留量 变 形	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45
121~180	$>14$	直径上的留量 变 形	0.60~0.80 0.30	0.70~0.90 0.35	0.60~0.80 0.30	0.70~0.90 0.35	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40
	8~14	直径上的留量 变 形	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.80~1.10 0.40	0.90~1.10 0.45
	$\leq 8$	直径上的留量 变 形	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45	0.90~1.10 0.45	1.00~1.20 0.50
180	$>18$	直径上的留量 变 形	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.70~0.90 0.35	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45	1.00~1.20 0.50
	10~18	直径上的留量 变 形	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45	0.80~1.00 0.40	0.90~1.10 0.45	1.00~1.20 0.50	1.10~1.30 0.55
	$\leq 10$	直径上的留量 变 形	0.90~1.10 0.45	0.90~1.10 0.50	0.90~1.10 0.45	1.10~1.20 0.55	1.10~1.30 0.55	1.20~1.40 0.60

注: 1. 变形量是指淬火后的最大尺寸与名义尺寸之差。

2. 套的截面变化很大时, 应按表中规定适当增加 20%~30%。

3. 碳素钢的加留量应取上限, 其变形量也允许随之增大。

4. 套的内孔 $>80\text{mm}$ 的薄壁零件, 粗加工后应经正火处理, 以消除应力和减小变形。

表 2-27 花键轴淬火 (包括渗碳  
淬火) 变形允差 (mm)

变 形	直 径		
	≤30	31~50	51~90
键双侧向留量	0.30	0.10	0.50
淬硬前的振摆	0.05	0.08	0.10
淬硬后的振摆	0.10	0.15	0.20

注: 振摆仅指花键部分, 其余部分仍按一般轴类件考虑。

表 2-28 蜗杆轴淬火 (包括渗碳  
淬火) 变形允差 (mm)

变 形	模 数		
	<3	3~4.5	>4.5
蜗线双面留量	0.30~0.40	0.40~0.50	0.50~0.60
淬硬前的振摆	0.07	0.1	0.12
淬硬后的振摆	0.15	0.2	0.25

## 2.4 零件热处理技术要求及其标注

零件设计时, 在材料确定之后, 还应提出对热处理的技术要求, 并在图样上标注出来。热处理技术要求一般是热处理质量的检验指标, 除硬度和其他力学性能指标之外, 还有对组织、变形量及局部热处理等要求, 对表面硬化零件有硬化层深度和渗层组织及脆性要求等。

### 2.4.1 热处理技术要求的确定

#### 2.4.1.1 硬度和其他力学性能要求

由于硬度试验简便、快捷又不破坏零件, 而且硬度与强度等其他力学性能有一定对应关系。可以间接反映其他力学性能, 因此硬度成为热处理质量检验最重要的指标, 不少零件还是唯一的技术要求。

对于重要受力件, 除有硬度要求外, 还有强度极限、屈服强度或断裂韧度等要求。在较高温度下工作的重要受力件, 还有持久强度和蠕变极限等要求。在有腐蚀介质条件下工作的重要受力件, 还有应力腐蚀、断裂韧度等要求。

在确定硬度等力学性能指标时, 要注意强度与韧性的合理配合, 避免忽视韧性或过分追求韧

性指标的偏向; 注意组合件强度或硬度的合理匹配, 提高使用寿命, 如滚珠比套圈硬度应高 2HRC, 汽车后桥主动齿轮的表面硬度比被动齿轮应高 2~5HRC; 处理好表面硬化零件 (如渗碳淬火、渗氮、表面淬火等) 的硬化层深度与表面、心部硬度的关系, 使心部与表面达到最优匹配, 适合零件的工作条件; 由于材料强度、结构强度和系统强度三者不完全一致, 所以设计中要处理好这三者的关系, 对于某些重要零件, 应根据模拟试验确定所需要的力学性能指标。

#### 2.4.1.2 表面硬化层深度选择

硬化层深度的选择要考虑零件的工作条件、使用性能、失效形式和表面硬化工艺特点, 几种表面硬化工艺效果见表 2-29。

对于以磨损为主的零件, 根据零件的设计寿命和磨损速度确定硬化层深度, 一般不宜过厚, 特别是工模具的硬化层过深会引起崩刃或断裂。

对于以疲劳为主的零件, 根据表面硬化方法、心表强度、载荷形式及零件形状尺寸等确定硬化层深度, 以达到最佳硬化率 (硬化率 = 硬化层深度 / 零件截面厚度), 如渗碳或碳氮共渗齿轮, 最佳硬化率为 0.1~0.15, 不同表面硬化法的最佳硬化率见表 2-30。

各种表面硬化工艺 (表面淬火、渗碳、渗氮等) 都有一定的合理硬化层深度和偏差, 应根据零件工作条件适当选择。推荐的表面淬火、渗碳、渗氮有效硬化层深度及上偏差如表 2-31~表 2-33 所示。从热处理工艺和节能降耗考虑, 硬化层应在满足零件使用要求下, 尽量选择浅一些为好。

#### 2.4.1.3 金相组织控制

由于零件的某些使用性能不能完全通过简单的硬度等力学性能表征出来, 所以对热处理质量又提出了一些金相组织检验的要求, 如中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级, 低、中碳钢球化体评级, 渗碳与渗氮金相组织检验, 钢件感应淬火金相检验, 钢铁零件渗金属层金相检验, 球墨铸铁热处理质量检验等等。在相应的热处理技术要求中应明确对金相组织的合格级别要求。

#### 2.4.1.4 热处理变形量要求

由于热处理是一个加热、冷却过程, 并伴随有相变发生, 所以热处理必然会产生变形; 但热处理变形量必须控制, 以满足零件生产和使用要求, 所以热处理变形量是热处理质量的重要指标之一。

表 2-29 几种表面强化工艺的效果

种类	表面层状态				性能特点					变形开裂倾向	设备投资	适用范围与应用举例
	层深/mm	表层变化	表层组织	厚度均匀性	表面硬度(HV)	耐磨性	接触疲劳强度	弯曲疲劳强度	抗粘着咬合力			
渗碳 淬火	0.3~2.0	表面硬化, 表层高压应力	马氏体 + 碳 + 奥氏体 残留奥氏体	好	650~850 57~63HRC	高	好	好	好	较大变形, 不易开裂	中等	低碳钢, 低碳合金钢等齿轮、轴、活塞销
碳氮共渗	0.1~1.0	表面硬化, 表层高压应力	碳氮化合物 + 含氮马氏体 残留奥氏体	好	700~850 58~63HRC	高	很好	很好	好	较小变形, 不易开裂	中等	低碳钢、中碳钢、低、中碳合金钢 齿轮、轴、链条
渗氮	0.1~0.6	表面硬化, 表层高压应力	合金氮化物 + 含氮固溶体	好	800~1200	很高	好	好	最好	变形甚小, 不易开裂	中等	中碳合金渗氮钢, 热作模具钢、不锈钢 镗杆、模具、轴
氮碳共渗	扩散层: 0.3~0.5 化合物层: 5~20 $\mu$ m	表面硬化, 表层高压应力	氮碳化合物 + 含氮固溶体	好	500~800	较高	较好	较好	最好	变形甚小, 不易开裂	中等	碳钢、合金钢、高速钢、铸铁、不锈钢 齿轮、工模具、液压件
感应加热淬火	高频: 1~2 中频: 3~5 工频: $\geq 10\sim 15$	表面硬化, 表层高压应力	马氏体	好	600~850	高	好	好	较好	较小	高	中碳钢、中碳合金钢、低淬钢、工具钢、铸铁 轴、齿轮

(续)

种类	表面层状态				性能特点					变形开裂倾向	设备投资	适用范围与应用举例
	层深/mm	表层变化	表层组织	厚度均匀性	表面硬度(HV)	耐磨性	接触疲劳强度	弯曲疲劳强度	抗粘着咬合力			
火焰 淬火	一般 2~6	表面硬化, 表层高压应力	马氏体	较好	600~800	高	好	好	较好	较小	低	中碳钢、中碳合金钢、铸铁、单件小批生产的大零件或局部淬火的零件
表面冷变形	滚压	~0.5	表层加工硬化, 高压应力	位错增加	较好	提高 0~150	—	改善	较大提高	—	较高	碳钢、合金钢
	喷丸	~0.5	表层加工硬化, 高压应力, 有凹痕	位错增加	较好	当 HV > 300 硬度不提高	—	改善	较大提高	—	中等	碳钢、合金钢
渗碳	0.1~0.3	表面硬化, 高压应力	渗碳物	好	1200~1800	很高	较好	较好	最好	表层脆性大, 变形大	中等	中高碳钢、中碳合金钢、模具

表 2-30 不同表面硬化法的最佳硬化率

表面硬化法	材料	心部强度 $\sigma_b$ /MPa	试样形状	负荷方式	最佳硬化率
渗碳淬火	15Cr	980	$m=3.25\text{mm}$ 齿轮	板状弯曲	0.1
	20CrMo	1080	$\phi 2\text{mm}$ 光滑试样	交变弯曲	$>0.17$
渗氮	Cr-V	1080	$\phi 6.5\text{mm}$ 光滑试样	旋转弯曲	$>0.12$
	Cr-Mo-V	930~1080	2.5mm 光滑板	交变弯曲	0.14
	调质合金渗氮钢	1080~1130	$\phi 6.5\text{mm}$ 光滑试样	旋转弯曲	$>0.12$
	Cr-V 渗氮钢	1080	缺口的光滑板	交变弯曲	0.14

表 2-31 表面淬火有效硬化层深度分级和相应的上偏差

最小有效 硬化层深度 $D_S$ /mm	上 偏 差 /mm	
	感应淬火	火焰淬火
0.1	0.1	
0.2	0.2	--
0.4	0.4	--
0.6	0.6	-
0.8	0.8	-
1.0	1.0	
1.3	1.1	-
1.6	1.3	2.0
2.0	1.6	2.0
2.5	1.8	2.0
3.0	2.0	2.0
4.0	2.5	2.5
5.0	3.0	3.0

表 2-32 推荐的渗碳或碳氮共渗有效硬化层深度及上偏差

有效硬化层深度 $D_X$ /mm	上 偏 差 /mm
0.05	0.03
0.07	0.05
0.1	0.1
0.3	0.2
0.5	0.3
0.8	0.4
1.2	0.5
1.6	0.6
2.0	0.8
2.5	1.0
3.0	1.2

当热处理是零件加工过程的最后一道工序时, 热处理变形的允许值就是图样上规定的零件

尺寸, 为了控制零件的最终尺寸, 必须根据热处理变形规律, 确定热处理前的零件尺寸。

当热处理是零件加工过程的中间工序时, 热处理前零件的预留加工余量应为机加工余量和热处理变形量之和。

表 2-33 推荐的有效渗氮层深度及上偏差

有效渗氮层深度 $D_N$ /mm	上 偏 差 /mm
0.05	0.02
0.1	0.05
0.15	0.05
0.2	0.1
0.25	0.1
0.3	0.1
0.35	0.15
0.4	0.2
0.5	0.25
0.6	0.3
0.75	0.3

## 2.4.2 热处理技术要求的标注

热处理零件在其图样上标注热处理技术要求是机械制图的重要内容, 正确、清楚、完整、合理地标注热处理技术要求, 对热处理质量和产品质量影响很大。

在零件图样上标注的热处理技术要求, 是指成品零件热处理最终状态所具有的性能要求和应达到的技术指标。对以正火、退火或淬火回火(含调质)作为最终热处理状态的零件, 硬度要求通常以布氏硬度或洛氏硬度表示, 也可以用其他硬度表示。对于其他力学性能要求应注明其技术指标和取样方法。对于大型锻、铸件的不同部位、不同方向的不同性能要求也应在图样上注明。

热处理技术要求的指标一般以范围法表示, 标出上、下限值, 如  $60 \sim 65\text{HRC}$ , 也可以用偏差法表示, 以技术要求的下限值为名义值, 下偏差为零再加上偏差表示, 如  $60^{+5}\text{HRC}$ 。特殊情况也可

以只标下限值或上限值,此时应用不小于或不大于表示,如不大于 229HBS。在同产品的所有零件图样上,必须采取统一表达形式。

对于局部热处理的零件,在技术要求的文字说明中要写明:“局部热处理”。在需要热处理的部位用粗点划线框出,如果是轴对称零件或在不致引起误会情况下,可以用一根粗点划线画在热处理部分外侧表示,如图 2-6 所示。

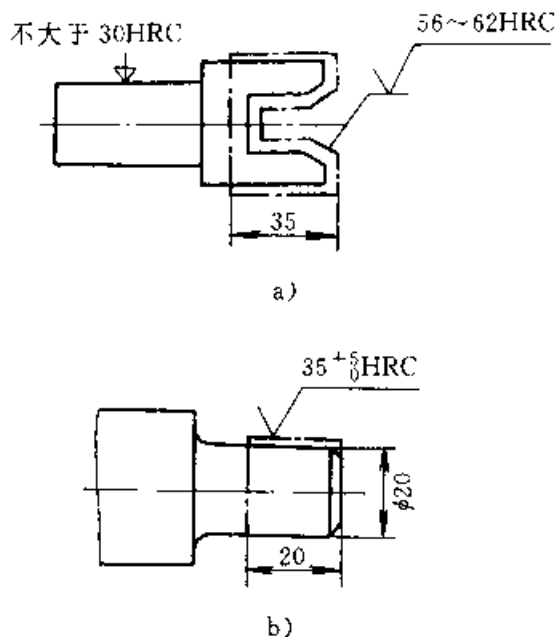


图 2-6 局部热处理在图样上标注案例

a) 范围标注法 b) 偏差标注法

如零件形状复杂或者容易与其他工艺标注混淆,热处理技术要求标注有困难,而用文字说明也很难说清楚时,可以用另加附图专门标注对热处理的技术要求。

对于表面淬火零件,除要标注表面和心部硬度之外,还要标注有效硬化层深度。例如图 2-7 所示,这是一个局部感应加热淬火零件,离轴端 $(15 \pm 5)$ mm 处开始,在长 $(30^{+5}_0)$ mm 一段内感应加热

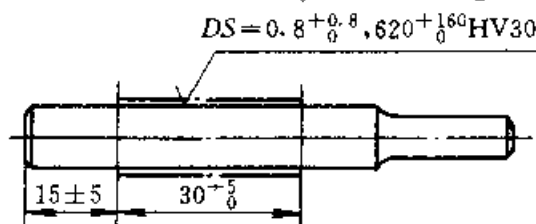


图 2-7 表面淬火零件热处理技术要求标注案例

淬火并回火,表面硬度  $620 \sim 780 \text{HV}_{30}$ ,有效硬化层深度  $DS=0.8 \sim 1.6 \text{mm}$ 。

对于渗碳(含碳氮共渗)和渗氮(含氮碳共渗)零件,也要标注表面和心部硬度、有效硬化层深度,还要标注出不允许渗碳或渗氮及硬化的位置,如图 2-8、图 2-9 所示。图 2-8 表示一个局部渗碳零件,要求渗碳并淬火回火部位用粗点划线框出,其表面硬度  $57 \sim 63 \text{HRC}$ ,有效硬化层深度  $DC$  为  $1.2 \sim 1.9 \text{mm}$ ;虚线框出部分表示渗碳淬硬或不渗碳淬硬均可;而未有标出部分表示不允许渗碳也不允许淬硬。图 2-9 表示一个整体渗氮零件,表面硬度  $850 \sim 950 \text{HV}_{10}$ ,有效硬化层深度  $DN$  为  $0.3 \sim 0.4 \text{mm}$ ,渗氮层脆性不大于 3 级。

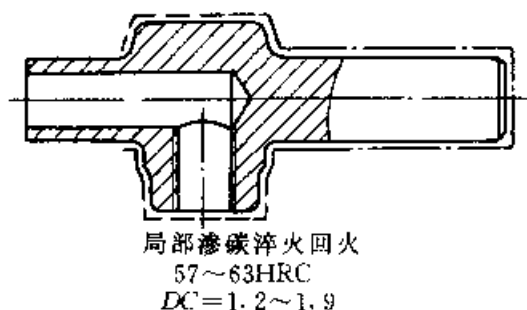


图 2-8 渗碳、淬火回火零件热处理技术要求标注案例

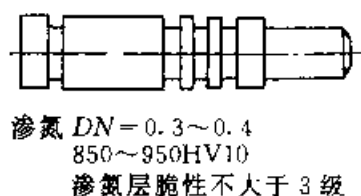


图 2-9 渗氮零件热处理技术要求标注案例

### 2.4.3 热处理技术要求的审查

零件图样上标注的热处理技术要求,是设计者对该零件提出的热处理质量要求,也是编制热处理工艺和进行热处理质量检验的重要依据,所以零件图样标注的热处理技术要求应全面和准确地反映设计者对零件的热处理要求,同时,也必须为热处理工作者所接受,在热处理生产中实现,为此对热处理技术要求应经热处理技术人员审查会签。

热处理技术要求审查主要包括热处理技术要求指标、零件热处理工艺性、热处理工艺的合理性、先进性、经济性、热处理零件的成组加工性,以及热处理工序安排的合理性,详见表 2-34。

表 2-34 热处理技术要求审查项目和内容

(续)

序号	项 目	内 容
1	热 处 理 技 术 要 求 指 标	<p>①热处理技术要求指标应合理,具有热处理可行性</p> <p>②热处理技术要求指标应正确,考虑到零件服役条件和结构要素,同一零件不同部位的技术要求可以不同,如带螺纹零件的螺纹部分不应淬硬或局部回火,减少应力集中和缺口敏感性;同一零件可以采用不同热处理工艺,技术要求指标也可能有所不同</p> <p>③热处理技术要求指标要完整。根据零件的重要性和质量要求,各种不同零件的技术要求不同。特别对于重要件有多项技术要求,应逐一注明</p> <p>④热处理技术要求指标与使用性能、代用性能要一致。特别注意硬度与其他性能的关系,并选择合适的硬度表示法</p> <p>⑤热处理技术要求指标标注应明确,不要给工艺或施工带来困难</p>
2	零 件 的 热 处 理 工 艺 性	<p>①技术要求和热处理工艺应与企业现实生产条件相适应</p> <p>②热处理工艺应与工艺路线中相关工序相匹配</p> <p>③零件结构设计时应考虑热处理工艺性,避免热处理工艺性不好的结构</p> <p>④协助设计人员解决零件结构形状不合理而带来的工艺性问题</p>
3	热 处 理 工 艺 的 合 理 性、先 进 性、经 济 性	按照零件技术要求,热处理工艺人员根据本企业现状设计合理的热处理工艺,在保证性能和质量前提下,作到技术先进、经济合理、生产安全,而设计人员一般不宜规定热处理工艺方法
4	热 处 理 零 件 的 成 组 加 工 性	把形状、尺寸及技术要求相近的零件归并成组,统一工艺及要求,使单件小批量生产变成批量生产,提高生产率、降低成本

序号	项 目	内 容
5	热 处 理 工 序 安 排 的 合 理 性	<p>①对于调质零件,要求硬度较低(170~230HBS)时,可先调质后机械加工;而要求硬度较高(&gt;285HBS)时,可先粗加工后调质。大批量生产时,可用锻造余热调质代替专门调质工艺</p> <p>②一般情况下可在毛坯生产后直接进行预备热处理,避免零件在加工车间的运输,还可利用余热,降低成本,提高生产率</p> <p>③形状复杂、精度要求较高的零件,化学热处理零件,感应淬火零件等应进行预备热处理,有利于减少热处理变形,为后续热处理作好组织准备</p> <p>④大批量生产的标准件毛坯在成形前应进行球化退火,降低成本,提高质量</p> <p>⑤大型铸件为稳定尺寸、保证精度应进行一次或多次时效处理</p> <p>⑥精度要求高的零件,在机械加工工序后应安排去应力退火或时效及时消除应力</p> <p>⑦重要焊接件在焊后应安排去应力退火,消除应力和除气,改善组织</p>

## 2.5 零件类别与热处理检验

热处理零件根据受力情况、重要程度、工作条件、材料特性和工艺特点等可分成特殊重要件、重要件、一般件三类。特殊重要件系指对性能有高要求并有金相组织要求的零件,重要件为对性能有较高要求的零件,而一般件指仅有硬度要求的零件。

### 2.5.1 淬火回火件质量要求与检验

对淬火回火件的质量要求主要有外观、硬度、金相组织和变形,对于特殊重要件还要增加随炉试样力学性能检验,用截面硬度法检查表面脱碳、增碳或增氮情况。

淬火回火件热处理最主要的质量要求是硬度,硬度必须达到图样和技术条件要求;另外还考核硬

度波动情况,表面硬度偏差不允许超过表 2-35 规定。

表 2-35 淬火回火件硬度偏差范围

零件类别	表面硬度偏差范围 (HRC)		
	$\leq 35$	35~50	$> 50$
特殊重要件	5	5	5
重要件	7	6	6
一般件	9	7	7

淬火回火件的金相检查包括晶粒度、基体组织、碳化物、表面腐蚀与元素贫化等。淬火回火件晶粒度应在 5~8 级,中碳钢和中合金钢的淬火回火组织一般为索氏体或回火马氏体。

淬火回火件的变形要求,应以不影响后序加工、最终成品尺寸及使用为准。允许进行冷或热校形。

## 2.5.2 表面淬火件质量要求与检验

表面淬火后,工件外观不能有过烧、熔化、裂纹等缺陷。

表面硬度必须达到图样和技术条件要求,同时表面硬度偏差不能超过表 2-36 规定。

表 2-36 表面淬火表面硬度偏差范围

零件类别	表面硬度偏差范围 (HRC)	
	$\leq 50$	$> 50$
重要件	6	5
一般件	7	6

有效硬化层深度必须达到图样技术条件要求,同时其波动范围不能超过表 2-37 规定。

表 2-37 表面淬火有效硬化层偏差范围

有效硬化层深度/mm	深度的偏差范围/mm
$\leq 1.5$	0.4
$> 1.5 \sim 2.5$	0.6
$> 2.5 \sim 3.5$	0.8

(续)

有效硬化层深度/mm	深度的偏差范围/mm
$> 3.5 \sim 5.0$	1.0
$> 5.0$	1.5

金相组织不应有过烧组织,变形量要满足图样和技术条件要求,或者变形不影响工件后续加工和使用。

## 2.5.3 渗碳(含碳氮共渗)件质量要求与检验

(1) 表面硬度和心部硬度要达到图样技术条件要求,表面硬度允许偏差为,重要件: $\leq 5\text{HRC}$ ,一般件: $\leq 7\text{HRC}$ 。

(2) 有效硬化层深度达到图样和技术条件要求,其偏差不能超过表 2-38 规定。

表 2-38 渗碳有效硬化层深度允许偏差

有效硬化层深度/mm	允许偏差值/mm
$\leq 0.50$	0.20
0.50~1.50	0.30
$> 1.50 \sim 2.50$	0.40
$> 2.50$	0.60

(3) 渗碳后工件不能有裂纹、碰伤及锈蚀等缺陷。金相组织和变形符合图样和技术条件要求。

## 2.5.4 渗氮(含氮碳共渗)件质量要求与检验

(1) 渗氮件表面不能有裂纹、剥落及肉眼可见的疏松等缺陷。

(2) 表面硬度和心部硬度达到图样和技术条件要求,同一批零件硬度偏差 $\leq 140\text{HV}$ 。

(3) 渗氮层深度符合图样和技术条件要求。脆性应符合 GB11354—1989 的 1~3 级。

(4) 渗层金相检验,应符合 GB11354—1989 的 1~3 级。

## 参考文献

- 《航空制造工程手册》总编委会主编,航空制造工程手册:热处理,北京:航空工业出版社,1993
- 《航空制造工程手册》总编委会主编,航空制造工程手册:飞机结构工艺性指南,北京:航空工业出版社,1998
- 蔡兰主编,机械零件工艺性手册,北京:机械工业出版社,1989



- 版社, 1993
- 4 王广生等编著, 金属热处理缺陷分析及案例, 北京: 机械工业出版社, 1997
- 5 全国热处理标准化技术委员会编, 金属热处理标准应用手册, 北京: 机械工业出版社, 1991
- 6 中国机械工程学会热处理专业学会《热处理手册》编委会编, 热处理手册 1~4 卷, 北京: 机械工业出版社, 1992
- 7 朱培瑜, 常见零件热处理变形与控制, 北京: 机械工业出版社, 1990
- 8 《简明热处理手册》编写组编, 简明热处理手册, 北京: 北京出版社, 1985
- 9 张宝昌等, 有色金属及其热处理, 北京: 国防工业出版社, 1981
- 10 美国金属学会主编, 中国机械工程学会热处理专业学会主译, 金属手册第四卷第九版, 北京: 机械工业出版社, 1988
- 11 王广生, 航空工业热处理质量控制, 金属热处理, 1993 (7)

## 第3章 齿轮的热处理

郑州机械研究所 陈国民

### 3.1 齿轮受力状况及损坏特征

齿轮在传递动力及改变速度的运动过程中,啮合齿面之间既有滚动,又有滑动,而且轮齿根部还受到脉动或交变弯曲应力的作用。齿面和齿根在上述不同应力作用下导致不同的失效形式。齿轮所受应力主要有三种,即摩擦力、接触应力和弯曲应力。

#### 3.1.1 啮合齿面间的摩擦力及齿面磨损

齿面上实际存在着凹凸不平,局部会产生很大的压强而引起金属塑性变形或嵌入相对表面,当啮合齿面相对滑动时便会产生摩擦力,齿面磨损就是由于相互摩擦的结果。齿轮磨损的种类、受力及损坏特征列于表3-1。提高齿轮耐磨性的方法视磨损类型而有所不同,大致有两种,分述如下。

表3-1 齿轮的磨损种类、受力及破坏特征

磨损类型	载荷及运行情况	表面破坏特征	齿轮类型举例
氧化磨损	各种大小载荷及各种滑动速度	氧化膜不断形成,又不断剥落,但磨损速度小,一般为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m/h}$ ;齿面均匀分布着细致磨纹	各类齿轮
冷咬合磨损	高载荷、低滑动速度,一般 $v < 1\text{m/s}$	局部金属直接接触、粘着,不断从齿面撕离;磨损速度较大,一般为 $10 \sim 15 \mu\text{m/h}$ ;齿面有严重伤痕	低速重载齿轮
热咬合磨损	高载荷、高滑动速度,一般 $v > 3 \sim 4\text{m/s}$	高的摩擦热使润滑油膜失效,金属间直接接触,发生粘着和撕离;磨损速度一般为 $1 \sim 5 \mu\text{m/h}$ ;齿面伤痕重	高速重载齿轮

(续)

磨损类型	载荷及运行情况	表面破坏特征	齿轮类型举例
磨粒磨损	各种大小载荷及各种滑动速度	各种磨粒进入啮合齿面,嵌入形成切刃或直接切削齿面,磨损速度 $0.5 \sim 5 \mu\text{m/h}$ ;齿面有磨粒刮伤纹	矿山、水泥、农业机械等齿轮,各类开式齿轮

(1) 减少非热影响引起的磨损,诸如氧化磨损、磨粒磨损及冷咬合磨损,这是提高轮齿表面的塑变抗力,即提高齿面硬度的另一方法。工业中常以中硬齿面( $\geq 320 \sim 380\text{HBS}$ )代替软齿面( $220 \sim 270\text{HBS}$ ),最好是采用表面硬化处理。其中渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等处理可使齿面具有良好的耐磨性。

(2) 减少摩擦热而引起的胶合磨损的关键是降低啮合齿面间的摩擦力,亦即着力减小齿面之间的摩擦系数。通常采用提高基体硬度并在表面形成软层的方法,如经渗碳、渗氮等表面硬化处理后,再在齿面上进行镀铜或镍铜合金,这样可以减小摩擦系数。

#### 3.1.2 啮合齿面的接触应力及接触疲劳

齿轮的接触疲劳破坏是由于作用在齿面上的接触应力超过了材料的疲劳极限而产生的。在齿轮的使用过程中可以看到,软齿面齿轮往往以麻点破坏为主,硬齿面齿轮则以疲劳剥落为主。

##### 3.1.2.1 齿面疲劳破坏的主要形式

1. 表面麻点 麻点的形成与表面金属的塑性变形密切相关,而且由于摩擦力的存在,疲劳裂纹大多在表面萌生,裂纹的扩展则是由于润滑油的挤入而产生油楔作用的结果。提高齿面硬度,改善齿面接触状况,可以有效地提高麻点破坏的抗力。

2. 浅层剥落 当接触表面下某一点其最大切应力大于材料的抗剪强度时,就可能产生疲劳裂纹,最后经扩展而引起层状剥落。

3. 深层剥落 经表面硬化处理的齿轮,在硬化层与心部交界处往往是薄弱环节,当接触负荷在层下交界处形成的最大切应力与材料的抗剪强度达到某一界限值之后,就可能形成疲劳裂纹,经扩展最后导致较深的硬化层剥落。这种破坏形式在火焰淬火或感应淬火齿轮中尤为常见。

### 3.1.2.2 影响接触疲劳强度的某些冶金因素

1. 钢中非金属夹杂物 一般来说,塑性夹杂物影响较小,脆性夹杂物危害最大,球状夹杂物的影响介于二者之间。采用净化冶炼钢材是提高齿轮接触疲劳寿命的有效方法。

2. 钢材的纤维流向 表3-2的试验数据给出了钢材纤维流向对接触疲劳寿命的影响。据此,应当重视齿轮锻造或压延毛坯的纤维流向分布。

表3-2 钢材的纤维流向与接触疲劳寿命的关系

类型	工作面与纤维流向夹角	寿命比
I	0°	2.5
II	45°	1.8
III	90°	1.0

3. 齿面脱碳 渗碳齿轮的失效分析表明,当齿面贫碳层为0.2mm、表面含碳量 $w(C)$ 为0.3%~0.6%时,70%左右的疲劳裂纹起源于贫碳层。

4. 黑色组织 黑色组织是齿轮在渗碳和碳氮共渗处理时容易产生的一种缺陷组织,当其深度达到一定程度时,就会对接触疲劳寿命产生不利影响,表3-3所列试验数据可以说明这一点。

表3-3 黑色组织对接触疲劳寿命的影响

碳氮共渗层深度/mm	黑色组织层深度/mm	在3600MPa应力下出现麻点的周次 $N$
0.92~0.95	0	$55.9 \times 10^6$
0.8	0.025	$7.7 \times 10^6$
1.0~1.1	0.07~0.08	$0.46 \times 10^6$

5. 碳化物 渗碳或碳氮共渗齿轮表层中的碳化物形态、大小及分布状态对接触疲劳寿命的影响很大,表3-4所列为试验结果。

表3-4 碳化物形态及分布对接触疲劳寿命的影响

碳化物形态及分布	平均寿命/h	寿命比
大块和粗粒状	183.1	1
集聚的颗粒状	262.8	1.43
分散的颗粒状	399.5	2.18

### 3.1.3 齿轮的弯曲应力及弯曲疲劳

齿轮的弯曲疲劳破坏是齿根部受到的最大振幅的脉动或交变弯曲应力超过了齿轮材料的弯曲疲劳极限而产生的。提高齿轮弯曲疲劳强度的基本途径是提高齿根处材料的强度(硬度)及改善应力状态。图3-1所示为齿轮材料的硬度与双向和单向弯曲疲劳极限之间的关系。

影响齿轮弯曲疲劳强度的一些物理冶金因素如下。

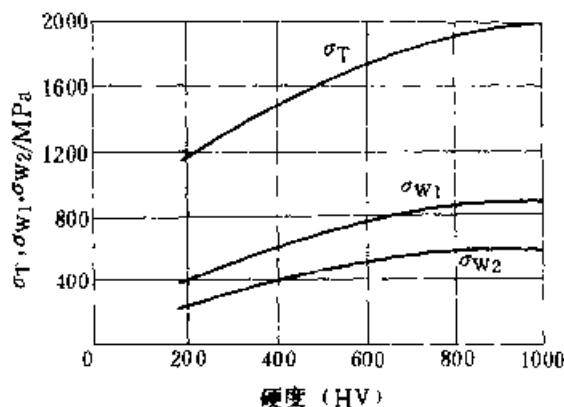


图3-1 齿轮材料的硬度与弯曲疲劳极限的关系  
 $\sigma_T$ —实际断裂应力  
 $\sigma_{W1}$ 、 $\sigma_{W2}$ —分别为单向和双向弯曲疲劳强度

1. 非金属夹杂物 非金属夹杂物作为微形缺口、引起应力集中而使弯曲疲劳强度降低。

2. 表面脱碳 表面脱碳将使弯曲疲劳极限降低,特别对于表面硬度高的齿轮,可使弯曲疲劳极限降低1/2~2/3。表3-5是三种合金结构钢表面脱碳对弯曲疲劳的影响。

表 3-5 表面脱碳对钢弯曲疲劳极限的影响

表面状况		40CrNi3		40CrMo		40Cr	
		$\sigma_{-1}$	$\sigma_{-1K}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_{-1K}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_{-1K}$
28HRC	未脱碳	570	295	501	275	535	288
	脱碳	302	172	220	130	240	158
48HRC	未脱碳	837	474	714	453	760	489
	脱碳	240	172	213	151	199	130

注:  $\sigma_{-1}$ —光滑试样的弯曲疲劳强度 (MPa)。

$\sigma_{-1K}$ —缺口试样的弯曲疲劳强度 (MPa)。

3. 金相组织 淬火钢表层含有 5% 的非马氏体 (体积分数) 组织时, 弯曲疲劳极限将降低 10%。图 3-2 是非马氏体组织对弯曲疲劳极限的影响。对于马氏体组织, 只有经过适当回火后才有良好的疲劳性能。

4. 残余压应力 试验表明, 当材料中已存在微细裂纹时, 残余压应力可抑制裂纹的扩展; 而当残余压应力层深约为裂纹深度的 5 倍时即可消除裂纹的影响, 见图 3-3。

齿根喷丸强化可以有效地提高弯曲疲劳强度, 见表 3-6, 这与表层形成有利的残余压应力有密切关系。

5. 心部硬度 渗碳齿轮的心部硬度影响齿轮的强度和热处理畸变。提高心部硬度有利于接触疲劳强度的提高, 而对齿轮的弯曲疲劳强度则

心部硬度有一最佳值, 如图 3-4 所示。齿轮渗碳淬火的热处理畸变随心部硬度的提高而增大。

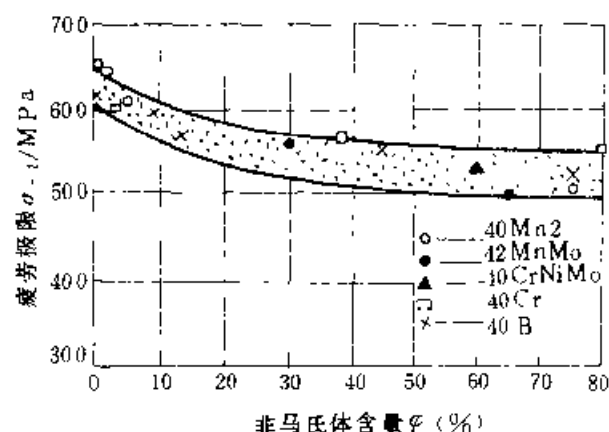


图 3-2 非马氏体组织对疲劳极限的影响

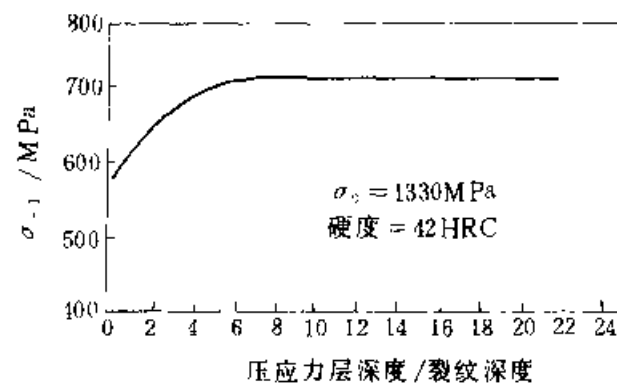


图 3-3 残余压应力对弯曲疲劳极限的影响

表 3-6 喷丸工艺对汽车变速箱渗碳齿轮弯曲疲劳及接触疲劳性能的影响

喷丸工艺	弯曲疲劳试验			接触疲劳试验		
	寿命范围周次 ( $\times 10^5$ )	平均寿命周次 ( $\times 10^5$ )	寿命比	寿命范围周次 ( $\times 10^5$ )	平均寿命周次 ( $\times 10^5$ )	寿命比
不喷丸	0.167~1.83	0.75	1.00	3.15~4.41	3.85	1.00
一般喷丸	2.16~2.76	2.46	3.28	1.88~2.21	2.08	0.54
强化喷丸	2.19~4.41	3.24	4.32	4.89~5.20	5.06	1.31

注: 1. 喷丸工艺: 喷丸在转台喷丸机上进行, 铁丸尺寸为  $\phi 0.6 \sim \phi 1.0 \text{ mm}$ , 喷射速度为  $58.3 \text{ m/s}$ , 转台每转一圈将零件转  $90^\circ$ , 一般喷丸共喷四圈, 强化喷丸喷八圈。

2. 齿轮用 20Mn2TiB 钢制造, 经气体渗碳 (层深  $1.0 \sim 1.3 \text{ mm}$ ), 淬火及回火。

3. 试验在封闭式变速箱试验台上进行, 中间轴挂一档作运转试验, 以中轴一档齿轮的损坏为寿命的标准。第一轴转速  $1450 \text{ r/min}$ , 第一轴转矩: 作弯曲疲劳试验时为  $441 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 作接触疲劳试验时为  $352.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

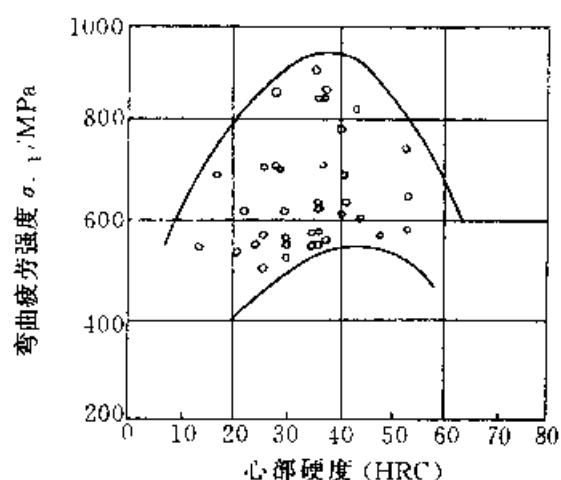


图 3-4 齿根心部硬度对弯曲疲劳强度的影响

## 3.2 齿轮材料

### 3.2.1 齿轮用钢

#### 3.2.1.1 齿轮用钢的冶金质量

齿轮用钢冶金质量的检验标准及技术要求见表 3-7。

#### 3.2.1.2 汽车、拖拉机齿轮用钢

汽车、拖拉机齿轮常用国产钢材及热处理技术要求列于表 3-8。

随着大规模的技术引进,我国汽车行业组织对 10 多种引进汽车齿轮产品用钢进行了消化吸收和国产化工作,已具备应用条件。

表 3-7 齿轮用钢的冶金质量要求

项目名称	检 验 标 准		技 术 要 求			
疏松和偏析	GB1979—1980《结构钢低倍组织缺陷评级图》		合金钢按 GB3077 -1988 规定			
	缺陷名称	级数	钢种	一般疏松	中心疏松	偏析
	一般疏松和中心疏松	1 级	优质钢	≤3 级	≤3 级	≤3 级
	般点状偏析和边缘点状偏析	1 级	高级优质钢	≤2 级	≤2 级	≤2.5 级
非金属夹杂	GB10561—1989《钢中非金属夹杂物显微评定方法》		合金钢按 GB3077 1988 规定			
			氧化物	硫化物	氧化物+硫化物	
			≤3 级	≤3 级	≤5.5 级	
带状组织	GB13299—1991《钢的显微组织评定方法》		齿轮渗碳钢要求不大于 3 级			
晶粒度	GB6394—1986《金属平均晶粒度测定法》		GB3077—1988 晶粒度不小于 6 级			
淬透性	GB5216 -1985《保证淬透性结构钢技术条件》		根据用户要求,按 A、B、C、D 四种方式订货			

表 3-8 汽车、拖拉机齿轮常用钢材及热处理工艺

序号	齿轮类型	钢材	热处理
1	汽车变速器和差速器齿轮	20CrMo 20CrMnTi	渗碳
		40Cr	碳氮共渗
2	汽车驱动桥主动及从动圆柱、圆锥齿轮,差速器行星和半轴齿轮	20CrMo 20CrMnTi 20CrMnMo 20SiMnVB	渗碳
3	汽车起动机电动机齿轮	20Cr	渗碳
		20CrMo	
		20CrMnTi	

(续)

序号	齿轮类型	钢材	热处理
4	汽车曲轴正时齿轮	40、45 40Cr	调质
5	汽车发动机凸轮轴齿轮	HT180 HT200	
6	汽车里程表齿轮	20	碳氮共渗
7	拖拉机传动齿轮、动力传动装置中的圆柱齿轮及轴内轮	20Cr	渗碳
		20CrMo	
		20CrMnTi	
		20CrMnMo 20SiMnVB	

(续)

序号	齿轮类型	钢材	热处理
8	拖拉机曲轴止时齿轮, 凸轮轴齿轮, 液压泵驱动齿轮	45	调质
		HT200	
9	汽车、拖拉机液压泵齿轮	10、15	调质

以保证渗碳齿轮有效硬化层深度为基点, 按齿轮钢材的重要性能——渗层淬透性的高低, 将渗碳钢材分为四类列于表 3-9、可供选材时参考。

3.2.1.3 机床齿轮用钢

机床齿轮常用钢材及热处理工艺列于表 3-10。

3.2.1.4 低速重载及高速齿轮用钢

1. 常用调质及表面淬火锅

(1) 按淬透性高低将钢分成五类, 见表 3-11。

表 3-9 引进汽车齿轮钢材的选用

类别	钢 材	尺寸范围 /mm	齿 轮 举 例
I	SCr420	40	大发变速器齿轮 日产柴油车变速器部分齿轮
II	20MnCr5 ZF6 ZF7 HSMnCB420H SAE8620H SAE4320H	60	轻、中型车, 轿车, ZF、富勒变速器齿轮
III	SCM420	70	轻型车, 轿车, 中型、重型载货车齿轮
VI	SCM822H 21NiCrMo5	>70	日产柴油车车桥齿轮

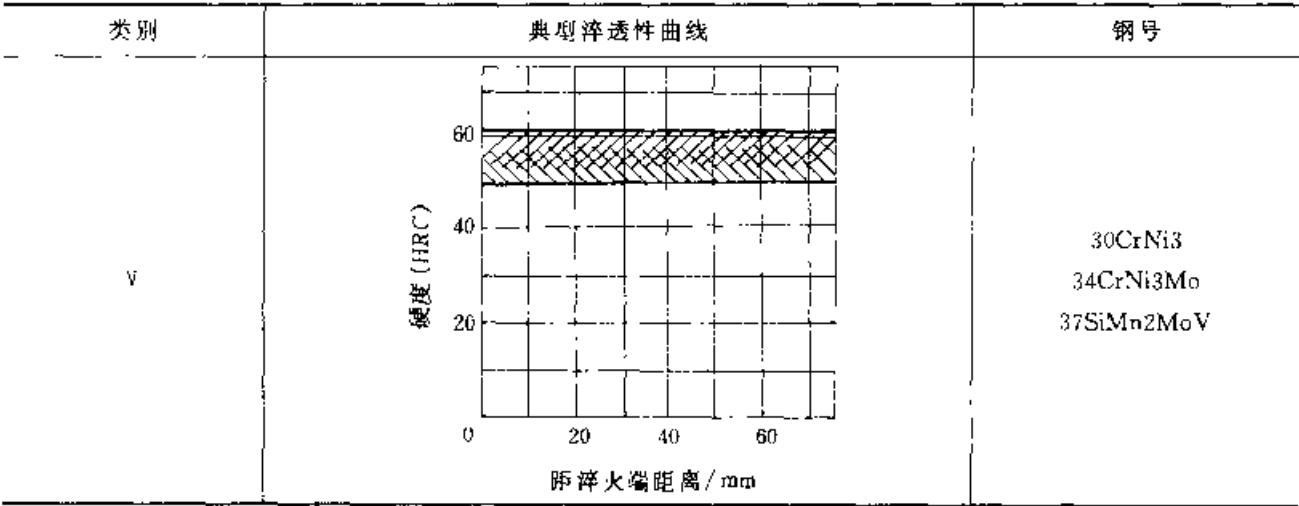
表 3-10 机床齿轮常用钢材及热处理工艺

序号	齿轮种类	性能要求	钢 材	热处理工艺
1	低速低载: 变速器齿轮 挂轮架齿轮 车溜板齿轮	耐磨性为主强度要求不高	45、50、55	调质: 200~250HBS 240~280HBS 感应淬火: 40~45HRC 52~56HRC
2	中、高速, 中载: 车床变速器齿轮 钻床变速器齿轮 磨床砂轮, 变速器齿轮 高速机床进给箱变速器内轮	较高的耐磨性和强度	40Cr、42CrMo 42SiMn	感应淬火(沿内廓) 52~56HRC
			38CrMoAl 25Cr2MoV	渗氮: 渗层深度 0.15~0.4mm
3	高速, 中、重载, 有冲击载荷: 机床变速器齿轮 龙门铣电动机齿轮 立车齿轮	高强度、耐磨及良好的韧性	20Cr 20CrMo 20CrMnTi 20SiMnVB 12CrNi3	渗碳
4	大截面齿轮	高的淬透性	35CrMo 50Mn2 60Mn2	调质

表 3-11 常用调质及表面淬火钢 (按淬透性高低分类)

类别	典型淬透性曲线	钢号
I	<p>硬度 (HRC)</p> <p>距淬火端距离/mm</p>	35 45 55
II	<p>硬度 (HRC)</p> <p>距淬火端距离/mm</p>	40Mn 50Mn 40Cr 35SiMn 42SiMn
III	<p>硬度 (HRC)</p> <p>距淬火端距离/mm</p>	35CrMo 42CrMo 40CrMnMo 35CrMnSi 40CrNi 40CrNiMo 45CrNiMoV
IV	<p>硬度 (HRC)</p> <p>距淬火端距离/mm</p>	35CrNi2Mo 40CrNi2Mo

(续)



(2) 各类钢的推荐应用范围见表 3-12。

表 3-12 各类调质及表面淬火的钢的  
推荐应用范围

齿轮尺寸 /mm		抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa		
		600~800	800~1000	>1000
圆棒 直径	≈40	I II	II III	III IV
	40~80	II III	III IV	IV V
	80~120	II III	III IV	IV V
	120~180	II III	III IV V	V
	180~250	II III IV	IV V	V
	>250	III IV	IV V	V
齿圈 厚度	≈20	I II	III IV	IV
	20~40	I II	III IV	IV V
	40~60	I II III	IV	IV V
	60~90	II III IV	IV	IV V
	90~120	III IV	IV V	V
	>120	III IV	IV V	V
盘状齿 坯宽度	≈12.5	I II	II III	III IV
	12.5~25	I II	III IV	III IV
	25~50	I II III	III IV	IV
	50~100	II III	III IV	V
	100~200	II III	IV	V
	>200	II III	IV	V

注：表中的 I~V 系指表 3-11 中相应的类别。

2. 常用渗碳钢 低速重载及高速齿轮常用的渗碳钢按其用途分类列于表 3-13。

表 3-13 不同条件下使用的各种低速重载  
及高速齿轮用渗碳钢

齿轮用途	性能要求	钢号
起重、运输、冶金、采矿、化工等设备的普通减速器小齿轮	耐磨、承载能力较高	20CrMo、 20CrMnTi 20CrMnMo
冶金、化工、电站设备及铁路机车、宇航、船舶等的汽轮发动机、工业汽轮机、燃气轮机、高速鼓风机及透平压缩机等的齿轮	运行速度高、周期长、安全可靠 性高	12CrNi2、 12CrNi3 12Cr2Ni4、 20CrNi3
大型轧钢机减速器齿轮、人字齿轮、机座齿轮、大型带式输送机传动轴齿轮、大型锥齿轮、大型挖掘机传动器主动齿轮、井下采煤机传动器齿轮、坦克等齿轮	传递功率大、齿轮表面载荷高、耐冲击；齿 轮尺寸大，要求淬透性高	20CrNi2Mo、 20Cr2Ni4 18Cr2Ni4W、 20Cr2Mn2Mo

3. 常用渗氮钢 表 3-14 是根据齿轮的不同使用要求而推荐的渗氮齿轮用钢。

表 3-15 是齿轮常用的渗氮钢经渗氮后的疲劳极限范围，可供设计选材时参考。



表 3-14 不同使用条件下渗氮齿轮钢材的选择

齿轮用途	性能要求	推荐牌号
一般用途	表面耐磨	45 10Cr 20CrMnTi
有冲击载荷	表面耐磨, 心部韧性好	18Cr2Ni4WA 30CrNi3 35CrMo
在重载下工作	表面耐磨, 心部强度高	35CrMoV 42CrMo 40CrNiMo 25Cr2MoV
在重载、冲击下工作	表面耐磨, 心部强韧性好	30CrNiMoA 40CrNiMoA 34CrNi3Mo
精密传动	表面耐磨, 畸变小	38CrMoAlA 38CrMnAlA

表 3-15 渗氮齿轮常用钢的疲劳极限范围

钢材牌号	疲劳极限 /MPa		表面硬度 (HV)
	接触疲劳	弯曲疲劳	
45	<700	<250	>300
40Cr 20CrMnTi	<800	<300	>450
38CrMoAl			>850
35CrMo 42CrMo 40CrNiMo	<1000	<350	>500
18Cr2Ni4W 25Cr2MoV			>600

## 3.2.2 齿轮用铸铁

铸铁齿轮与钢制齿轮相比, 具有可加工性能好、耐磨性高、噪声低及价格便宜等优点。

表 3-18 球墨铸铁牌号、基体组织及力学性能

牌 号	基 体	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ (%)	$a_K$ (J·cm <sup>-2</sup> )	HBS
		$\geq$				
QT400-18	铁素体	400	250	18	14 <sup>①</sup>	130~180
QT400-15	铁素体	400	250	15	50~150	$\leq 180$
QT450-10	铁素体	450	310	10	—	160~210
QT500-7	铁素体+珠光体	500	320	7	—	170~230
QT600-3	珠光体	600	370	3	15~35 <sup>②</sup>	190~270
QT700-2	珠光体	700	420	2	—	225~305
QT800-2	珠光体	800	560	2	—	245~335
QT900-2	下贝氏体	900	600	2	30~100 <sup>②</sup>	280~360

① V形缺口, 3个试样的平均值。

② 无缺口试样。

## 3.2.2.1 齿轮用灰铸铁

表 3-16 是齿轮用灰铸铁的牌号及力学性能。

表 3-16 齿轮用灰铸铁牌号及抗拉强度

牌号	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	牌号	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa
HT150	150	HT300	300
HT200	200	HT350	350
HT250	250	HT400	400

灰铸铁抗拉强度低, 脆性较高, 但耐磨性好, 减振性佳, 缺口敏感性小。表 3-17 是灰铸铁与球墨铸铁和钢的缺口敏感性系数的比较。

表 3-17 灰铸铁、球墨铸铁和钢的缺口敏感系数

材料	$\sigma_b$ /MPa	缺口敏感系数 $\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1K}}$
灰铸铁	163	1.05
	213	1.09
	261	1.20
	299	1.26
球墨铸铁	400	1.50
	700	1.70
球光体可锻铸铁	1.2~2.0	
铸钢 IG230~450	1.50	
锻 钢	2.10	

注:  $\sigma_1$  为光滑疲劳极限;  $\sigma_{1K}$  为缺口疲劳极限。

## 3.2.2.2 齿轮用球墨铸铁

球墨铸铁的性能介于钢和灰铸铁之间, 是很有发展前途的齿轮材料。

球墨铸铁按强度等级编号, 各种牌号球墨铸铁的基体组织和力学性能列于表 3-18。

球墨铸铁可以通过适当的热处理获得各种性能。表 3-19 是球墨铸铁在不同热处理状态下的力学性能。

几种用作齿轮的球墨铸铁的弯曲疲劳强度和

接触疲劳强度的试验数据列于表 3-20 和表 3-21。

表 3-22 给出了几种球墨铸铁的断裂韧度

$K_{IC}$ 。

球墨铸铁的常用热处理工艺列于表 3-23。

表 3-19 球墨铸铁在不同热处理状态下的力学性能

球铁基体种类	热处理状态	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	硬度	$\alpha_K$ /J · cm <sup>1/2</sup>
铁素体	铸态	450~550	10~20	137~193HBS	30~150
铁素体	退火	400~500	15~25	121~179HBS	60~150
珠光体+铁素体	铸态或退火	500~600	5~10	141~241HBS	20~80
珠光体	铸态	600~750	2~4	217~269HBS	15~30
珠光体	正火	700~950	2~5	229~302HBS	20~50
珠光体+碎块状铁素体	亚温正火	600~900	4~9	207~285HBS	30~80
贝氏体+碎块状铁素体	亚温贝氏体等温淬火	900~1100	2~6	32~40HRC	40~100
下贝氏体	贝氏体等温淬火	1200~1500	1~3	38~50HRC	30~100
回火索氏体	淬火, 550~600℃ 回火	900~1200	1~5	32~43HRC	20~60
回火马氏体	淬火, 200~250℃ 回火	700~800	0.5~1	55~61HRC	10~20

表 3-20 球铁齿轮的弯曲疲劳强度

球铁种类	硬度	$P=0.5$ 时疲劳曲线方程	失效概率 $P$	循环基数 $N$	疲劳极限 $\sigma_{Hlim}$ /MPa
珠光体	244HBS	$\sigma_b^{3.209} N = 4.0733 \times 10^{14}$	0.50	$5 \times 10^6$	292.0
		—	0.01	$5 \times 10^6$	198.2
上贝氏体	37HRC	$\sigma_b^{3.1704} N = 2.272 \times 10^{19}$	0.50	$3 \times 10^6$	308.48
		—	0.01	$3 \times 10^6$	289.45
下贝氏体	43.5HRC	$\sigma_b^{3.4676} N = 2.0116 \times 10^{18}$	0.50	$3 \times 10^6$	263.01
		—	0.01	$3 \times 10^6$	236.91
下贝氏体	41.8HRC	$\sigma_b^{3.8925} N = 1.7844 \times 10^{16}$	0.50	$3 \times 10^6$	324.25
		—	0.01	$3 \times 10^6$	307.35
钕钛下贝氏体	32.3HRC	$\sigma_b^{3.5307} N = 2.5074 \times 10^{13}$	0.50	$3 \times 10^6$	427.84
		—	0.01	$3 \times 10^6$	407.45
合金钢 (调质)	37.5HRC		0.01	$3 \times 10^6$	305.0
合金铸铁 (调质)	37.5HRC		0.01	$3 \times 10^6$	255.0

表 3-21 球墨铸铁的接触疲劳强度

球铁种类	硬度	$P=0.5$ 时疲劳曲线方程	失效概率 $P$	循环基数 $N$	疲劳极限 $\sigma_{Hlim}$ /MPa
铁素体	180HBS	$\sigma_H^{14.161} N = 5.194 \times 10^{16}$	0.50	$5 \times 10^7$	569.1
		—	0.01	$5 \times 10^7$	536.5

(续)

球铁种类	硬度	$P=0.5$ 时疲劳曲线方程	失效概率 $P$	循环基数 $N$	疲劳极限 $\sigma_{Hlim}$ (MPa)
珠光体+铁素体	226HBS	$\sigma_H^{384} N = 2.242 \times 10^{31}$	0.50	$5 \times 10^7$	657
		—	0.01	$5 \times 10^7$	632
珠光体	253HBS	$\sigma_H^{641} N = 3.688 \times 10^{30}$	0.50	$5 \times 10^7$	758
		—	0.01	$5 \times 10^7$	715
下贝氏体	41HRC	$\sigma_H^{1.5} N = 1.307 \times 10^{21}$	0.50	$10^7$	1371
		—	0.01	$10^7$	1235
铁素体 (氮碳共渗)	64HRC	$\sigma_H^{2.85} N = 2.307 \times 10^{20}$	0.50	$10^7$	1100
		—	0.01	$10^7$	1060

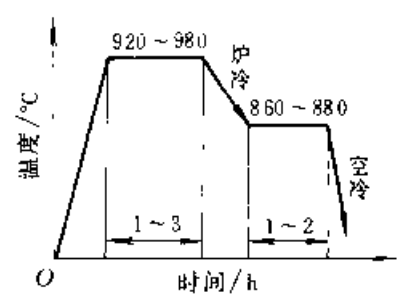
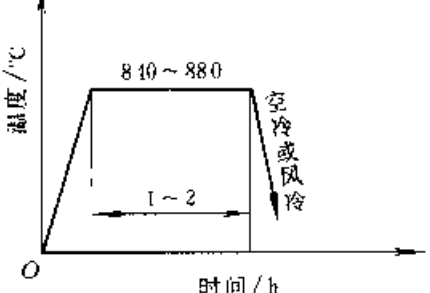
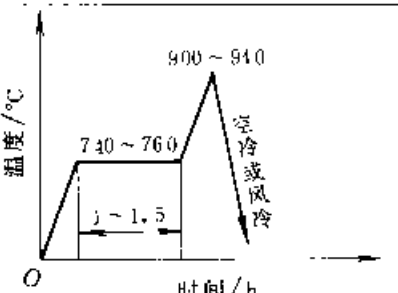
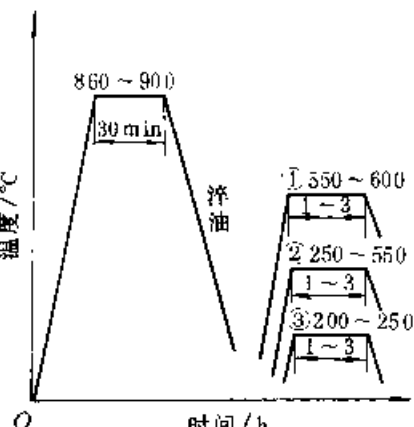
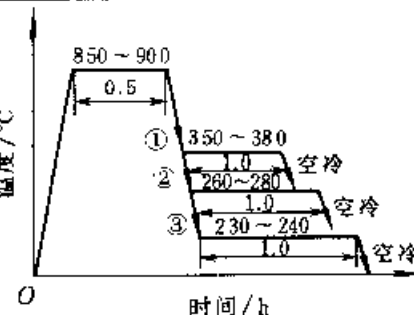
表 3-22 球墨铸铁的断裂韧性

基体组织	珠光体	铁素体	下贝氏体	奥氏体+上贝氏体
$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$	28~38	76~82	41~62	85~92

表 3-23 球墨铸铁齿轮的常用热处理工艺

热处理工艺	目的	工艺举例	基体组织	备注
等温退火	消除白口及游离渗碳体,并使珠光体分解,改善可加工性,提高塑性、韧性		铁素体	
去应力退火	使珠光体分解,提高塑性、韧性		铁素体	铸态,无游离渗碳体
正火	提高组织均匀度及强度、硬度,耐磨性或消除白口及游离渗碳体		珠光体+少量铁素体(牛眼状)	复杂铸件正火后需进行回火

(续)

热处理工艺	目的	工艺举例	基体组织	备注
两次正火	提高组织均匀度及强度、硬度、耐磨性或消除白口及游离渗碳体, 防止出现二次渗碳体		珠光体+少量铁素体(牛眼状)	复杂铸件正火后需进行回火
正火	获得良好的强度和韧性		珠光体+铁素体(碎块状)	铸态并无游离渗碳体, 复杂铸件正火后须进行回火
高温不保温正火	获得良好的强度和韧性		珠光体+铁素体(碎块状)	铸态并无游离渗碳体, 复杂铸件正火后须进行回火
淬火与回火	提高强度、硬度和耐磨性		①回火索氏体+残留奥氏体 ②回火马氏体+回火托氏体+少量残留奥氏体 ③回火马氏体+少量残留奥氏体	淬火前最好先进行正火处理
贝氏体等温淬火	提高强度、硬度、耐磨性及韧性		①上贝氏体+残留奥氏体 ②下贝氏体+残留奥氏体 ③下贝氏体+马氏体+残留奥氏体	铸态组织应无游离渗碳体

## 3.2.3 齿轮用有色金属

轮铜合金的主要特性及应用列于表 3-24。表 3-25 给出了常用齿轮铜合金的力学性能。

用作齿轮的有色金属主要是铜合金、常用齿

表 3-24 各种铜合金的主要特性及用途

序号	合金牌号	主要特性	用 途
1	HA160—1—1	强度高, 耐腐蚀性好	耐蚀齿轮、蜗轮
2	HA166—6 3 2	强度高, 耐磨性好, 耐腐蚀性好	大型蜗轮
3	ZCuZn25Al6Fe3Mn3	有很高的力学性能, 铸造性能良好, 耐腐蚀性较好, 有应力腐蚀开裂倾向, 可以焊接	蜗轮
4	ZCuZn40Pb2	有好的铸造性能和耐磨性, 可加工性好, 耐腐蚀性较好, 在海水中具有应力腐蚀倾向	齿轮
5	ZCuZn38Mn2Pb2	有较高的力学性能和耐腐蚀性, 耐磨性较好, 可加工性较好	蜗轮
6	QSn6.5 0.1	强度高、耐磨性好, 压力及可加工性好	精密仪器齿轮
7	QSn7—0.2	强度高, 耐磨性好	蜗轮
8	ZCuSn5Pb5Zn5	耐磨性和耐腐蚀性好, 减摩性好, 能承受冲击载荷, 易加工, 铸造性能和气密性较好	较高负荷, 中等滑动速度下工作的蜗轮
9	ZCuSn10Pb1	硬度高, 耐磨性极好, 有较好的铸造性能和可加工性, 在大气和淡水中有良好的耐腐蚀性	高负荷, 耐冲击和高滑动速度 (8m/s) 下的齿轮、蜗轮
10	ZCuSn10Zn2	耐腐蚀性、耐磨性和可加工性好, 铸造性能好, 铸件气密性较好	中等及较多负荷和小滑动速度的齿轮、蜗轮
11	QA15	较高的强度和耐磨性及耐腐蚀性	耐蚀齿轮、蜗轮
12	QA17	强度高, 较高的耐磨性及耐腐蚀性	高强、耐蚀的齿轮、蜗轮
13	QA19 4	高强度、高减摩性和耐腐蚀性	高负荷齿轮、蜗轮
14	QA110—3—1.5	高的强度和耐磨性, 可热处理强化, 高温抗氧化性, 耐腐蚀性好	高温下使用齿轮
15	QA110—4—4	高温 (400℃) 力学性能稳定, 减摩性好	高温下使用齿轮
16	ZCuAl9Mn2	高的力学性能, 在大气、淡水和海水中耐腐蚀性好, 耐磨性好, 铸造性能好, 组织紧密, 可以焊接, 不易钎焊	耐蚀、耐磨齿轮、蜗轮
17	ZCuAl10Fe3	高的力学性能、耐磨性和耐腐蚀性好, 可以焊接, 不易钎焊, 大型铸件自 700℃ 空冷可以防止变脆	高负荷大型齿轮、蜗轮
18	ZCuAl10Fe3Mn2	高的力学性能和耐磨性, 可热处理, 高温下耐腐蚀性和抗氧化性好, 在大气、淡水和海水中耐腐蚀性好, 可焊接, 不易钎焊, 大型铸件自 700℃ 空冷可以防止变脆	高温、高负荷、耐蚀齿轮、蜗轮
19	ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	很高的力学性能, 耐腐蚀性好, 应力腐蚀疲劳强度高, 铸造性能好, 合金组织致密, 气密性好, 可以焊接, 不易钎焊	高强、耐腐蚀重要齿轮、蜗轮
20	ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	很高的力学性能, 耐腐蚀性好, 应力腐蚀疲劳强度高, 耐磨性良好, 在 400℃ 以下具有耐热性, 可热处理, 焊接性能好, 不易钎焊, 铸造性能尚好	要求高强度、耐腐蚀性好及 400℃ 以下工作的重要齿轮、蜗轮

表 3-25 常用齿轮铜合金的力学性能

序号	合金牌号	状态	力学性能, 不低于				
			抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 (%)		冲击韧度 $a_K$ /J·cm <sup>-2</sup>
					$\delta_5$	$\delta_{10}$	
1	HA160—1	软态 <sup>1</sup>	440	—	—	18	—
		硬态 <sup>2</sup>	735	—	—	8	—
2	HA166—6—3—2	软态	735	—	—	7	—
		硬态	—	—	—	—	—
3	ZCuZn25Al6Fe3Mn3	S <sup>3</sup>	725	380	10	—	—
		J <sup>3</sup>	740	400	7	—	—
4	ZCuZn40Pb2	S	220	—	15	—	—
		J	280	120	20	—	—
5	ZCuZn38Mn2Pb2	S	245	—	10	—	—
		J	345	—	18	—	—
6	QSn6.5—0.1	软态	343~441	196~245	60~70	—	—
		硬态	686~784	578~637	7.5~1.2	—	—
7	QSn7—0.2	软态	353	225	64	55	174
		硬态	—	—	—	—	—
8	ZCuSn5Pb5Zn5	S	200	90	13	—	—
		J	200	90	13	—	—
9	ZCuSn10Pb1	S	200	130	3	—	—
		J	310	170	2	—	—
10	ZCuSn10Zn2	S	240	120	12	—	—
		J	215	140	6	—	—
11	QA15	软态	372	157	65	—	108
		硬态	735	529	5	—	—
12	QA17	软态	461	245	70	—	147
		硬态	960	—	3	—	—
13	QA19—4	软态	490~588	196	40	12~15	59~69
		硬态	784~980	343	5	—	—
14	QA110—3—1.5	软态	590~610	206	9~13	8~12	59~78
		硬态	686~882	—	9~12	—	—
15	QA110—4—4	软态	590~690	323	5~6	4~5	29~39
		硬态	880~1078	539~588	—	—	—
16	ZCuAl9Mn2	S	390	—	20	—	—
		J	440	—	20	—	—

(续)

序号	合金牌号	状态	力学性能, 不低于				
			抗拉强度 $\sigma_b$ , MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ , MPa	伸长率 (%)		冲击韧度 $a_K$ , J·cm <sup>-2</sup>
					$\delta_5$	$\delta_{10}$	
17	ZCuAl10Fe3	S	190	180	13	—	100
		J	340	200	13	—	110
18	ZCuAl10FeMn2	S	190	—	15	—	110
		J	540	—	20	—	120
19	ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	S	545	280	20	—	160
		J	670	310	18	—	170
20	ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	S	630	250	16	—	160

① 软态为退火态。

② 硬态为压力加工态。

③ S 砂型铸造。

④ J 金属型铸造。

铜合金大多数情况下是用来制做蜗轮, 表 3-26 时的许用接触应力。  
26 和表 3-27 是几种蜗轮材料在与蜗杆配对使用

表 3-26  $N=10^7$  时蜗轮材料的许用接触应力  $\sigma_{HP}$ 

蜗轮材料	铸造方法	适用滑动速度 $v$ , m·s <sup>-1</sup>	力学性能		蜗杆齿面硬度	
			$\sigma_b$	$\sigma_0$	HBS $\leq 350$	HRC $> 16$
			MPa		$\sigma_{HP}$ , MPa	
ZCuSn10Pb1	砂型	$\leq 12$	137	216	177	196
	金属型	$\leq 25$	196	215	196	216
ZCuSn5Pb5Zn5	砂型	$\leq 10$	78	177	108	123
	金属型	$\leq 12$	78	196	132	147

表 3-27 几种蜗轮蜗杆副材料配对时的许用接触应力  $\sigma_{HP}$  (MPa)

蜗轮材料	蜗杆材料	滑动速度, m·s							
		0.25	0.5	1	2	3	4	6	8
ZCuAl10Fe3 ZCuAl10Fe3Mn2	钢 (淬火) <sup>①</sup>		245	226	206	177	157	118	88.3
ZCuZn38Mn2Pb2	钢 (淬火) <sup>①</sup>		211	196	177	147	132	93.2	73.6
HT200 HT150 120~150HBS	渗碳钢	157	127	113	88.3	—	—		
HT150 120~150HBS	钢 (调质或正火)	137	108	88.3	68.7	—			—

① 蜗杆未经淬火时, 需将表中  $\sigma_{HP}$  值降低 20%。

3.3 齿轮的热处理工艺

3.3.1 齿轮的调质

调质齿轮的特点是尺寸和重量大,但设计、加工及热处理较易,运行中容易跑合,齿根强度高富裕,抗冲击能力强.所以在空间位置要求不严的重型齿轮传动中,调质齿轮占有相当大的比重

3.3.1.1 调质齿轮副的硬度选配

齿轮副合理的硬度匹配能提高寿命,表 3-28 是常用减速器齿轮副的硬度选配方案,使用中可根据具体情况选择和调整。

3.3.1.2 齿轮调质的工艺保证

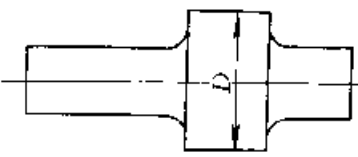
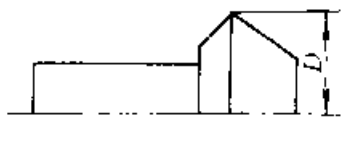
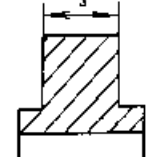
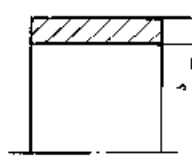
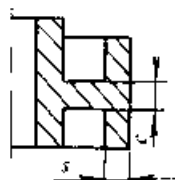
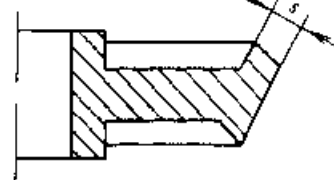
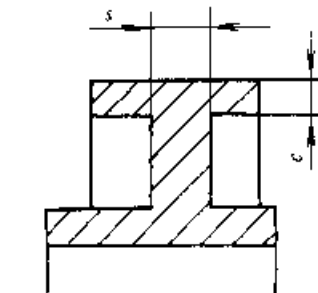
1. 调质齿轮截面尺寸的确定方法 表 3-29 列举了若干典型结构齿轮截面尺寸的确定方法,供编制调质热处理工艺时参考。

表 3 28 各类齿轮副的硬度选配方案

内齿硬度	齿轮种类	热处理工艺		内齿工作内齿面硬度差 (硬度 <sub>1</sub> ) <sub>min</sub> - (硬度 <sub>2</sub> ) <sub>max</sub> ≥(40~50HBS)	工作面硬度举例	
		小齿轮	大齿轮		小齿轮	大齿轮
软齿面(≤350HBS)	直齿	调质	正火调质	(硬度 <sub>1</sub> ) <sub>min</sub> - (硬度 <sub>2</sub> ) <sub>max</sub> ≥(40~50HBS)	260~290HBS 270~300HBS	180~210HBS 200~230HBS
	斜齿及人字齿	调质	正火调质 调质	(硬度 <sub>1</sub> ) <sub>min</sub> - (硬度 <sub>2</sub> ) <sub>max</sub> ≥(40~50HBS)	240~270HBS 260~290HBS 270~300HBS	160~190HBS 180~210HBS 200~230HBS
软、硬齿面组合(硬度 <sub>1</sub> ≥350HBS 硬度 <sub>2</sub> ≤350HBS)	斜齿及人字齿	表面淬火	调质	内齿硬度差很大	50~55HRC	270~300HBS 200~230HBS
		渗氮 渗碳	调质		56~62HRC	270~300HBS 200~230HBS
硬齿面(≥350HBS)	直齿、斜齿及人字齿	表面淬火		内齿硬度大致相同	50~55HRC	
		渗氮 渗碳	渗碳		56~62HRC	

注：硬度<sub>1</sub>为硬齿面硬度值；硬度<sub>2</sub>为软内齿面硬度值。

表 3 29 典型结构齿轮截面尺寸确定方法

I	II	III	IV
			
V	VI	VII	
			



2. 开齿调质工艺 大模数齿轮采用毛坯调质,由于受到钢材淬透性的限制,往往在齿根部位不能获得要求的调质组织和硬度。因此,当齿轮模数较大时,如碳素钢齿轮模数大于12mm时,应采用先开齿后调质的工艺,其齿轮的加工工艺路线如下:

毛坯锻造—退火—粗车—精车—粗铣齿(开齿)—调质—精铣齿。

图3-5所示为12CrMo钢制 $m=22\text{mm}$ 、 $z=20$ 的大齿轮采用开齿调质后轮齿各部位的硬度分布。

采用开齿调质,由于改善了齿部的冷却条件,可以采用淬透性较低的含合金元素较少的钢材,从而总体上使成本降低。

3. 中硬齿面调质 齿轮的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度都随齿轮的硬度提高而提高。目前常用的软齿面调质齿轮已难以适应现代工业发展对齿轮承载能力和使用寿命的要求。所以,调质齿轮的硬度趋向提高,中硬度( $>300\text{HBS}$ )的调质

齿轮日益广泛应用。

3.3.1.3 调质齿轮的常见缺陷与质量检验

表3-30和表3-31分别列举了调质齿轮的常见缺陷、防止措施以及质量检验项目和内容。

表3-30 调质齿轮的常见缺陷及防止措施

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
1	硬度偏低	齿轮钢材含碳量偏低; 淬火加热规范不当; 表面脱碳; 淬火冷却不足; 回火温度偏高; 材料选择不当	检查钢材化学成分; 调整加热淬火规范; 降低回火温度; 更换钢材
2	调质深度不足	选材不当, 钢材碳含量或合金元素含量偏低, 淬火规范不当	根据齿轮模数和尺寸选用合适淬透性钢材; 检查钢材化学成分; 调整加热冷却规范; 大模数齿轮采用开齿调质

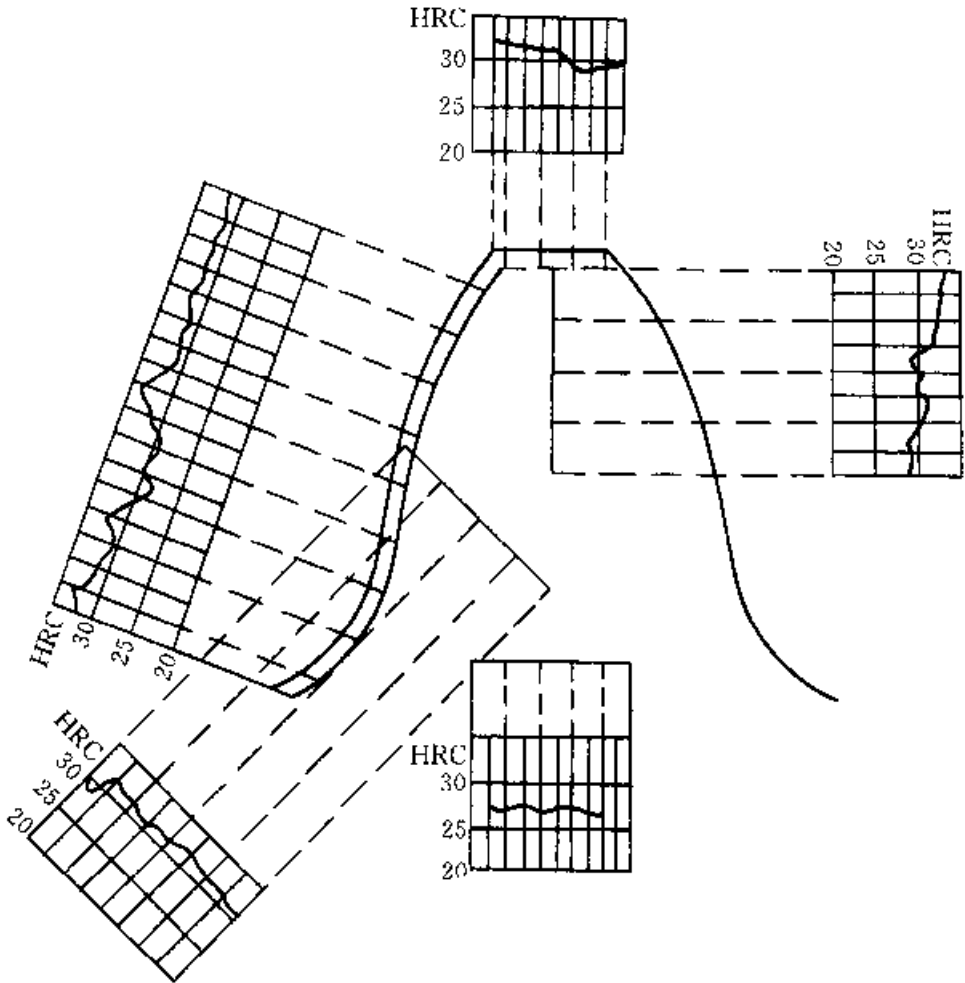


图3-5 开齿调质齿轮的轮齿硬度分布

(续)

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
3	硬度不均匀	钢材原始组织不良; 淬火冷却不均匀; 淬火回火加热温度不均匀	检查钢材质量; 重新进行一次正火或退火; 加强冷却液的循环; 改善淬火回火温度均匀度

表 3-31 调质齿轮的检验项目、内容和要求

序号	检验项目	检验内容及要求
1	钢材质量	用试样检查: 化学成分、低倍组织、晶粒度
2	力学性能	用试棒检查: 一般检查 HBS, 应该以加工成形后的齿面硬度为准; 要求较高的齿轮按图样检查 $\sigma_b, \sigma_s, \sigma_{-1}, \delta_5, \psi, \alpha_k$

(续)





序号	检验项目	检验内容及要求
3	探伤	用齿轮检查: 对要求较高的齿轮, 应在机加工后检查齿部裂纹、气孔、缩孔、白点等
4	显微组织	用试样检查: 齿部基本上为索氏体
5	脱碳层	用试样检查: 一般不超过加工裕量的 1/3

3.3.2 齿轮的表面加热淬火

3.3.2.1 表面淬火齿轮的一般技术要求

齿轮表面淬火硬化层分布形式、强化效果及应用范围列于表 3-32。

表 3-32 齿轮表面淬火硬化层分布形式及应用范围

硬化层分布形式	工艺方法	强化效果	应用范围		
			高频 (包括超高频) 淬火	中频 (2.5kHz, 8kHz) 淬火	火焰淬火
 (齿根不淬硬)	回转加热淬火法	齿面耐磨性提高; 弯曲疲劳强度受一定影响, 许用弯曲应力低于该钢材调质后的水平	处理内轮直径由设备功率决定; 齿宽 10 ~ 100mm; $m \leq 5mm$	处理齿轮直径由设备功率决定; 齿宽 35 ~ 150mm, 个别可达 400mm; $m \leq 10mm$	齿轮直径可到 450mm; 专用淬火机床 $m \leq 6mm$ , 个别情况可到 $m \leq 12mm$
 (齿根淬硬)	回转加热淬火法	齿面耐磨性及齿根弯曲疲劳强度都得到提高; 许用弯曲应力比调质状态提高 30% ~ 50%; 可部分代替渗碳齿轮	处理内轮直径由设备功率决定; 齿宽 10 ~ 100mm; $m \leq 5mm$	处理齿轮直径由设备功率决定; 齿宽 35 ~ 150mm, 个别可到 400mm; $m \leq 10mm$	齿轮直径可到 450mm; 一般 $m \leq 6mm$ , 个别情况 $m \leq 10mm$
 (齿根不淬硬)	单齿连续加热淬火法	齿面耐磨性提高; 弯曲疲劳强度受一定影响 (一般硬化层结束于离齿根 2 ~ 3mm 处); 许用弯曲应力低于该钢材调质后的水平	齿轮直径不受限制; $m \geq 5mm$	内轮直径不受限制; $m \geq 8mm$	齿轮直径不受限制; $m \geq 6mm$
 (齿根淬硬)	沿齿沟连续加热淬火法	齿面耐磨性及齿根弯曲疲劳强度均提高; 许用弯曲应力比调质状态提高 30% ~ 50%; 可部分代替渗碳齿轮	齿轮直径不受限制; $m \geq 5mm$	齿轮直径不受限制; $m \geq 8mm$	内轮直径不受限制; $m \geq 10mm$

表面淬火齿轮的一般技术要求见表 3-33。

表 3-33 表面淬火齿轮的技术要求

项目	小齿轮	大齿轮	说 明
硬化层深度/mm	0.2~0.4 $m^L$		有效硬化层深度, 按标准 GB5617-85 规定
齿面硬度 (HRC)	50~55	15~50 或 300~400HBS	如果传动比为 1:1, 则大小齿轮齿面硬度可以相等
表层组织	细针状马氏体		齿部不允许有铁素体
心部硬度 (HBS)	调质: 碳钢 265~280 合金钢 270~300		对某些要求不高的齿轮可以采用正火作为预备热处理

(1)  $m$  为齿轮模数。

### 3.3.2.2 齿轮的火焰表面淬火

1. 齿轮火焰加热烧嘴 图 3-6 是几种典型齿轮火焰加热用烧嘴示意图。

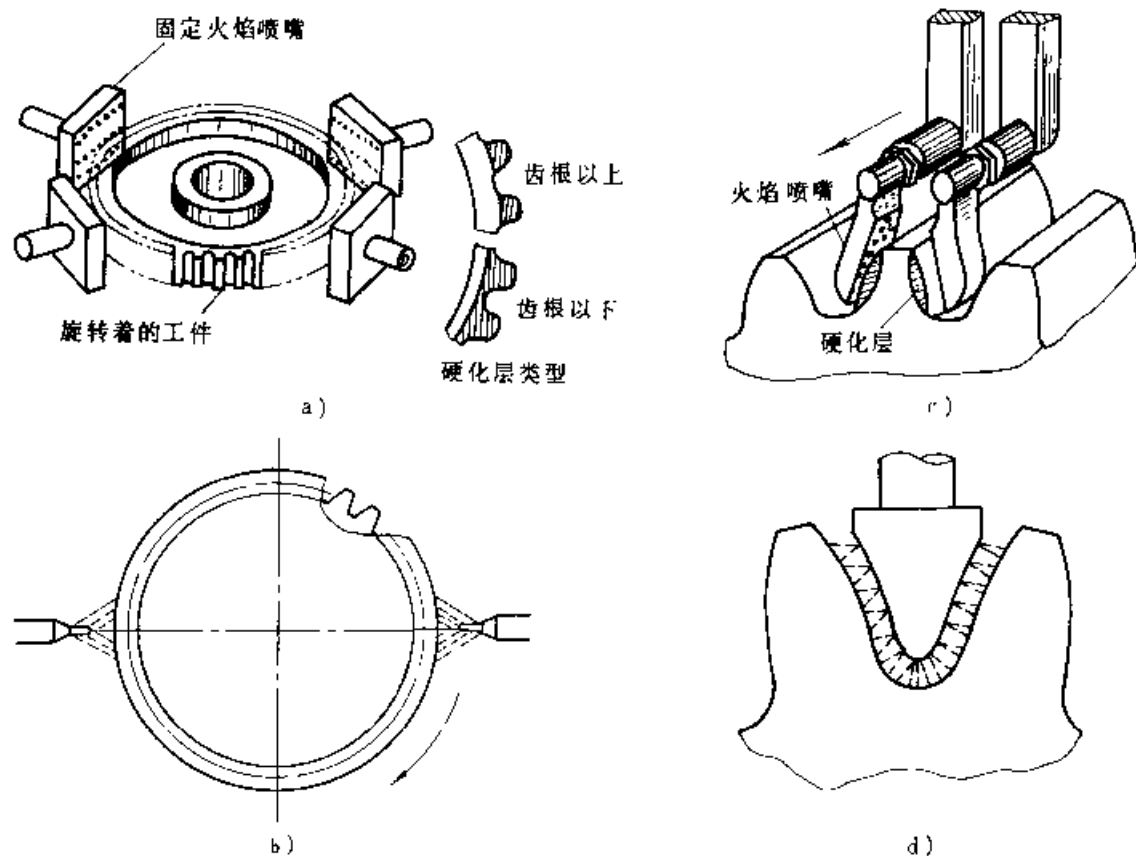


图 3-6 典型齿轮火焰加热烧嘴

a)、b) 回转加热 c) 单齿连续加热 d) 沿齿沟连续加热

沿齿沟加热烧嘴结构比较复杂, 图 3-7 示出一种仿形烧嘴结构图。烧嘴外廓与齿沟轮廓相似, 两者各处间距基本相等, 约 3~5mm。火孔直径一般为 0.5~0.7mm, 水孔直径一般为 0.8~1.0mm。齿根部火孔数量要多一些, 齿顶部容易过热, 火孔位置要低于齿顶面 3~5mm。水孔与火孔的排间距离与齿轮钢材有关, 可参考表 3-34 中的推荐数值。几种模数齿轮沿齿沟加热烧嘴设计参数如表 3-35 所列。表中各参数代号参阅图 3-7。

### 2. 齿轮火焰淬火工艺

(1) 齿轮的预备热处理, 火焰淬火齿轮一般采用调质作为预备热处理, 要求不高的齿轮也可采用正火。

(2) 齿轮火焰淬火的工艺参数, 表 3-36 为常用工艺参数, 可供参考。

### 3.3.2.3 齿轮的感应淬火

#### 1. 全齿回转加热淬火

(1) 电流频率的选择, 表 3-37 给出了几种加热电源频率的适用范围。

表 3-34 火孔和水孔排间距离与钢材关系

钢 号	火孔与水孔排 间距离 mm	钢 号	火孔与水孔排 间距离 mm
35、35Cr、40、40Cr	10	50、50Mn、50Mn2、40CrNi、55CrMo	20
15Cr、15Cr、ZG30Mn、ZG45Mn	15	35CrMnSi、40CrMnMo	25

表 3-35 几种模数齿轮沿齿沟加热烧嘴设计参数

模数 $M$ mm	$L$ mm	$L_1$ mm	$H$ mm	$H'$ mm	$n_1$ (个)	$n_2$ (个)	$n_1$ (个)	$n_2$ (个)	$n'$ (个)
10	80	80	15	25	12	10	14	12	8
12	80	80	15	25	11	12	16	14	9
14	90	90	15	25	16	14	20	18	10
16	95	95	15	25	18	16	22	20	11

1 齿顶火孔数目。

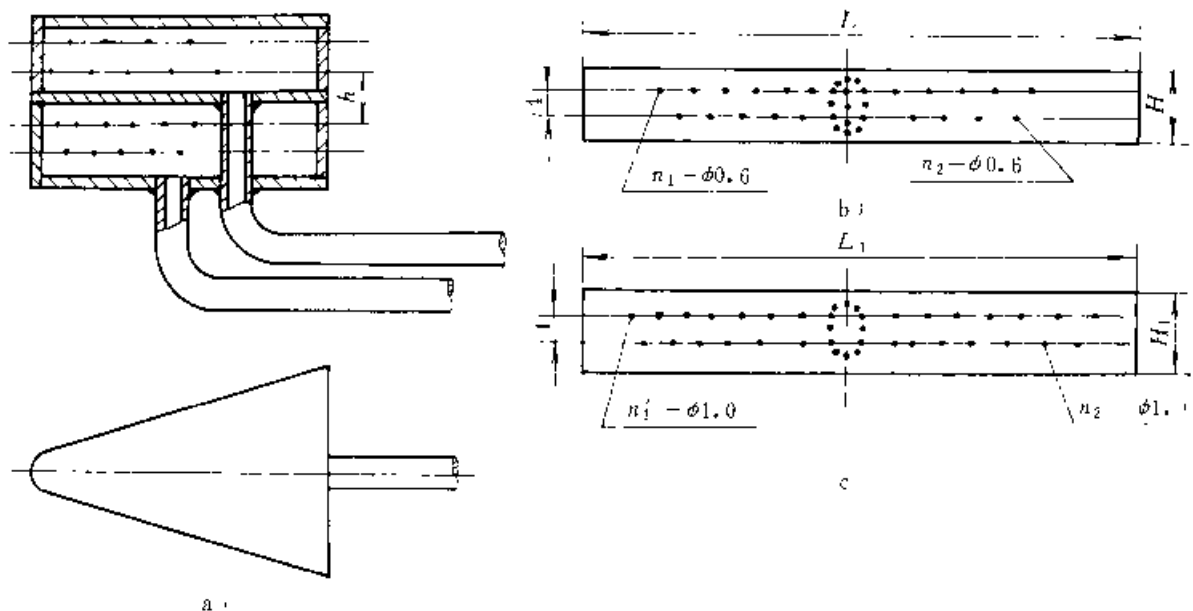


图 3-7 正齿轮沿齿沟加热烧嘴结构图

表 3-36 齿轮火焰淬火的推荐工艺参数

工艺参数	推荐数值	说 明
加热温度	$A_{c3} + (30 \sim 50)^{\circ}\text{C}$	根据齿轮钢材确定
火焰强度	乙炔 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^5 \text{ Pa}$ 氧 $(3 \sim 6) \times 10^5 \text{ Pa}$ 乙炔/氧 1:1.1~1:1.5	乙炔/氧 一般取 1/1.15~1/1.25, 这种比例火焰强度大, 温度高, 稳定性好, 并呈蓝色中性火焰
焰心距工件 距离/mm	套圈淬火 8~15 齿面淬火 5~10 沿齿沟淬火 2~3	焰心与齿顶距离 焰心与齿面距离
烧嘴(或工件) 的移动速度	旋转加热 50~300mm/min 单齿加热 模 数/mm >20 11~20 5~10 移动速度/(mm/min) <90 90~120 120~150	要求淬火温度高, 淬硬层深, 采用低的速度; 反之, 采用高的速度
水孔与火孔 距离	见表 3-34 水孔角度 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$	连续加热淬火时, 要防止水花飞溅影响加热效果

(续)

工艺参数	推荐数值			说 明
冷却介质	碳钢可采用自来水,一般压力为 $(1\sim1.5)\times10^5\text{Pa}$ 合金钢常采用聚合物(PAG)水溶液、乳化液及 压缩空气等			温度、压力等参数要保持稳定
回火	要求硬度	13~51HRC	50~55HRC	一般回火保温时间为45~90min
	回火温度	200~250℃	180~220℃	

表 3-37 常用感应加热频率的适用范围

频率 (kHz)	硬化层深度/mm			齿轮模数 $m$ /mm
	最小	适中	最大	
200~300	0.8	1~1.5	2.5~4.5	1.5~5(2~3 最佳)
30~80	1.0	1.5~2.0	3~5	3~7(3~4 最佳)
8	1.5	2~3	4~6	5~8(5~6 最佳)
2.5	2.5	4~6	7~10	8~12(9~11 最佳)

## (2) 感应器

1) 施感导体及导磁体,感应加热的施感导体采用纯铜材制造,铜材的厚度按表 3-38 选择,感应器用导磁体按表 3-39 选择。

2) 感应器结构,全齿回转加热淬火感应器均为圈式结构,常用感应器结构尺寸列于表 3-40。感应器冷却喷孔孔径及分布见表 3-41、表 3-42。

表 3-38 感应器用纯铜材厚度

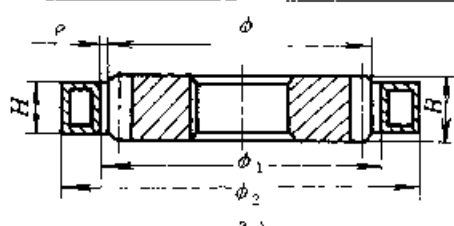
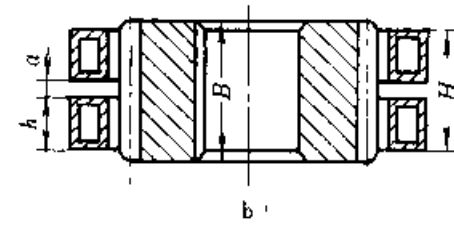
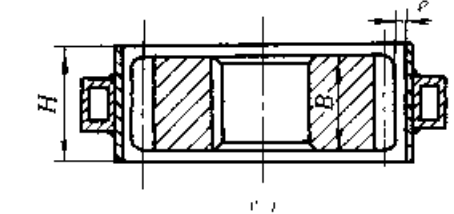
冷却情况	(mm)		
	200~300 (kHz)	8 (kHz)	2.5 (kHz)
加热时不通水 <sup>1)</sup>	1.5~2.5	6~8	10~12
加热时通水	0.5~1.5	1.5~2	2~3

1) 同时加热自喷式感应器。

表 3-39 常用导磁体的种类和规格

频率 (kHz)	导磁体	规 格	备注
2.5	硅钢片	片厚 0.2~0.3mm	硅钢片需 进行磷化处 理,以保证 片间绝缘
8	硅钢片	片厚 0.1~0.35mm	
200~300	铁氧体	根据具体要求	

表 3-40 全齿淬火感应器

名称	结 构	说 明																
圆 柱 外 齿 感应器	 <p>a)</p>	<p>1) <math>\phi_1 = \phi + 2e</math>; <math>\phi_2 = \phi_1 - 16</math> (<math>\phi &lt; 150</math>) 或 <math>\phi_2 = \phi_1 + 20</math> (<math>\phi &gt; 150\text{mm}</math>)</p> <p>2) <math>e</math> 的大小和模数有关:  <math>\phi &lt; 250\text{mm}</math> 时, 选下限, <math>\phi &gt; 250\text{mm}</math> 时选上限</p>																
	 <p>b)</p>	<table border="1"> <tr> <th>模数 mm</th><td>1~2.5</td><td>3</td><td>3.5</td><td>4</td><td>4.5</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr> <th><math>e</math> mm</th><td>2~2.5</td><td>2.5~3</td><td>3~3.5</td><td>3~4</td><td>3.5~4</td><td>3.5~4.5</td><td>4.5~5.5</td></tr> </table>	模数 mm	1~2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	$e$ mm	2~2.5	2.5~3	3~3.5	3~4	3.5~4	3.5~4.5	4.5~5.5
	模数 mm	1~2.5	3	3.5	4	4.5	5	6										
$e$ mm	2~2.5	2.5~3	3~3.5	3~4	3.5~4	3.5~4.5	4.5~5.5											
 <p>c)</p>	<p>3) 常啮合齿轮, <math>H = B - (1\sim2)e</math>; 滑移内轮 <math>\phi &lt; 150\text{mm}</math> 时, <math>H = B</math>; <math>\phi &gt; 150\text{mm}</math> 时, <math>H = B + (1\sim2)e</math></p> <p>4) 当 <math>B &lt; 25\text{mm}</math> 时, 采用单匝感应器; <math>25\text{mm} &lt; B &lt; 35\text{mm}</math> 时, 采用双匝感应器, 此时, 单匝高度 <math>h</math> 一般选用 10~15mm, <math>a = e</math></p> <p>5) <math>B \geq 70\text{mm}</math> 时, 选用连续加热淬火</p> <p>6) 图 c 为中频淬火感应圈。施感导体用 2mm 厚纯铜板绕成, 其上焊有矩形铜管冷却施感导体, <math>H &lt; 40\text{mm}</math> 时, 用单圈冷却水管, <math>H = 40\sim80\text{mm}</math> 时用双圈, <math>H = 80\sim120\text{mm}</math> 时, 用三圈, <math>H = B + (6\sim10)</math>, <math>e = 3\sim4\text{mm}</math></p>																	

(续)

名称	结 构	说 明
圆 柱 内 齿 感应器	<p>a</p> <p>b</p>	<p>1) 在保证感应器充分冷却的条件下,即感应器出口处冷却水温度<math>&lt;60^{\circ}\text{C}</math>,选用较小<math>B_0</math>,减小圆环效应,提高加热效率,<math>B_0</math>一般取<math>6\sim 8\text{mm}</math></p> <p>2) <math>B&lt;20\text{mm}</math>,当淬火机床精度较高时,可取<math>e=1\sim 1.5\text{mm}</math>.</p> <p>3) <math>15&lt;B&lt;35</math>用双组感应器;<math>B\geq 40</math>时,连续加热淬火</p> <p>4) 模数<math>&lt;3\text{mm}</math>的齿轮,应采用导磁体,提高加热效率</p> <p>5) 内齿端面有凸台的齿轮为减小邻近效应,改善近凸台齿部的加热情况,采用三角形截面感应器,如图b,<math>B_0=10\sim 15\text{mm}</math>,<math>e=1.5\sim 2.0\text{mm}</math></p>
圆 锥 齿 轮 感应器	<p>a</p> <p>b</p> <p>c</p>	<p>1) <math>2\theta_B\leq 20^{\circ}</math>,可用圆柱外齿感应器,感应器高度<math>H=h+(1\sim 1.5)\delta</math>,<math>\delta=2\sim 2.5\text{mm}</math>,大端面间隙</p> <p>2) <math>20^{\circ}&lt;2\theta_B\leq 90^{\circ}</math>,感应器做成锥形,工作面之锥角<math>\theta\approx\theta_B</math>,<math>\delta=2\sim 2.5\text{mm}</math>,感应器的垂直高度<math>H=h+(1\sim 1.5)\delta</math></p> <p>3) <math>90^{\circ}&lt;2\theta_B\leq 130^{\circ}</math>,<math>\theta_1\approx\theta_{根}</math>,<math>\theta_{根}</math>为圆锥内轮齿根圆锥角,<math>\delta=2\sim 2.5\text{mm}</math>,感应器的垂直高度<math>H=h+(1\sim 1.5)\delta</math></p> <p>4) <math>2\theta_B&gt;130^{\circ}</math>,为改善大端面的加热情况,在感应器大端面外接一块,<math>a=2\sim 3\text{mm}</math>,如图b所示</p> <p>5) 中频用圆锥齿感应器,如图c所示,也用纯铜板绕成,焊于冷却水管,<math>e</math>、<math>\delta</math>、<math>H</math>参照上面介绍的选取</p>

(续)

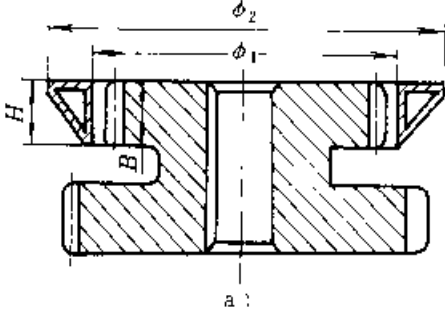
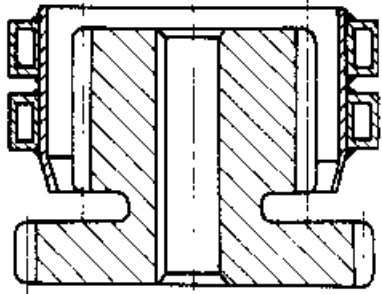
名称	结构	说明
双联、多联齿轮感应器		<p>1) 对双联及多联齿轮来说, 当大、小齿轮的距离 <math>\approx 15\text{mm}</math> 时, 先淬大齿轮, 后淬小齿轮, 加热小齿轮时, 为减小邻近效应, 采用 角形截面感应器, 参照圆杆外齿轮选配, <math>\phi_2 = \phi_1 + 2 \times (10 \sim 15)</math>, <math>H \approx B</math></p>
		<p>2) 加热小齿轮仍用圆杆外齿轮感应器, 但用厚度为 <math>1\text{mm}</math> 的铜板或低碳钢板套在大齿轮邻近小齿轮的那一面上, 起屏蔽作用</p> <p>3) 三联齿轮可用串联的双匝感应器同时加热, 上、下两齿轮靠感应器直接加热, 中联齿轮靠邻近效应加热, 在双匝感应器中加热速度较慢的一面上加导磁体, 使三个齿轮同时达到淬火温度</p> <p>4) 中联用双联齿轮感应器结构如图 b 所示</p>

表 3-41 自喷式感应器喷孔直径

(mm)

冷却介质	高频 (200~300kHz)	中频 (2.5、8kHz)
水	0.70~0.85	1.0~1.2
聚合物水溶液	0.80~1.00	1.2~1.5
乳化液	1.0~1.2	1.5~2.0
油 <sup>①</sup>	1.2~1.5	1.5~2.5

① 通常用附加喷头

表 3-42 连续加热自喷式感应器喷孔分布

频率/kHz	孔间距离 'mm	喷孔轴线与工作 轴线间夹角	说明
高频 (200~300)	1.5~3.0	35°~55°	通常为 —列孔
中频 (8)	2.5~3.5	35°~55°	—列或 —列孔

表 3-43 100kW 高频设备上齿轮表面积和比功率、单位能量的关系

齿轮表面积/cm <sup>2</sup>	20~40	45~65	70~95	100~130	140~180	190~210	250~300	310~450
比功率 $\Delta P/\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.5~1.8	1.4~1.5	1.3~1.4	0.9~1.2	0.7~0.9	0.53~0.65	0.4~0.5	0.3~0.4
单位能量 $\Delta Q/\text{kW} \cdot \text{s/cm}^{-2}$	6~10	10~12	12~14	13~16	16~18	16~18	16~18	16~18

5) 感应器喷孔设计, 自喷式感应器喷孔孔径大小的设计原则为

$$S_{\text{孔}} < S_{\text{管}}$$

式中  $S_{\text{孔}}$  喷水孔总面积;

$S_{\text{管}}$  进水管截面面积;

生产中可参考表 3-41 中的数值;

(3) 电加热规范

1) 加热功率的确定, 齿轮加热时所需总功率可按式估算

$$P_{\text{齿}} = \Delta P \cdot S$$

式中  $P_{\text{齿}}$  齿轮加热所需总功率 (kW);

$\Delta P$ ——比功率 (kW/cm<sup>2</sup>);

$S$  齿轮受热等效面积 (cm<sup>2</sup>).

比功率  $\Delta P$  与齿轮模数、受热面积及硬化层深度有关, 可参考表 3-43、表 3-44 及表 3-45 进行选择。

表 3-44 齿轮模数与比功率、  
单位能量的关系

模数	比功率 $\Delta P$ kW·cm	单位能量 $\Delta Q$ kW·s·cm <sup>-2</sup>
4	1.2~1.8	7~8
4~4.5	1.6~1.8	1~12
5	0.9~1.4	1~15

表 3-45 中频感应淬火硬化层深  
与比功率的关系

频率 kHz	硬化层深度 /mm	比功率 kW·cm <sup>-2</sup>		
		低值	最佳值	高值
8	1.0~3.0	1.2~1.4	1.6~2.3	2.5~4.0
	2.0~4.0	0.8~1.0	1.1~2.0	2.5~3.5
	3.0~5.0	0.4~0.7	1.1~1.7	2.0~2.8
	2.5~7.0	1.0~1.5	2.5~3.0	1.0~7.0
2.0	1.0~7.0	0.8~1.5	2.0~3.0	4.0~6.0
	5.0~10.0	0.8~1.6	2.0~3.0	3.0~5.0

表 3-46 感应加热电源设备参数

设备型号	功率 kW	频率 kHz	适合模数/mm		同时一次加热的最大尺寸 mm
			最佳	一般	
GP100-C3	100	20~250	2~5	≤4	φ300×40
CYP100-C2	≥75	30~40	3~4	3~7	φ300×40
CYP200-C4	≥150	30~40	3~4	3~7	φ400×60
BPS100/8000	100	8	5~6	4~8	φ350×40
BPS250/2500	250	2.5	9~11	6~12	φ100×80
KGPS100-2.5	100	2.5	9~11	6~12	φ350×40
KGPS100-8	100	8	5~6	4~8	φ350×40
KGPS250-2.5	250	2.5	9~11	6~12	φ100×80

表 3-47 钢材感应加热温度的确定

含碳量 w(C) (%)	加热温度 /℃	合金元素的考虑
0.30	900~925	含 Cr、Mo、Ti、V 等碳化物 形成元素的合金钢需在相应碳 钢加热温度之上提高 10~ 100℃
0.35	900	
0.40	870~950	
0.45	870~900	
0.50	870	

齿轮受热等效面积可按式计算

$$S=1.2\pi D_p B$$

式中  $D_p$  齿轮节圆直径 (cm);

$B$  齿轮宽度 (cm)。

2) 设备功率的估算, 根据齿轮加热所需功率, 要求设备提供的总功率按下式计算。

$$P_{\text{设}}=P_{\text{需}}/\eta$$

式中  $\eta$  设备总效率。

机械式中频发电机的总效率  $\eta=0.64$  (包括淬火变压器及感应器的能量损失); 真空管高频设备的总效率  $\eta=0.4\sim0.5$  (包括高频振荡管、振荡回路、变压器及感应器的能量损失)。新的固态电源效率较高, 可达 0.85 以上。如果设备总功率不能满足齿轮加热所需总功率要求时, 可采用降低比功率而适当延长加热时间的办法。生产中常用的电源设备参数列于表 3-46。

3) 加热和冷却规范, 各种钢材感应加热温度可根据碳和合金元素含量参考表 3-47 确定。

齿轮感应加热时间 ( $\tau$ ) 不是独立的参量, 同时加热时可通过下式来估算

$$\tau=\Delta Q/\Delta P$$

式中  $\Delta Q$  单位表面所消耗能量 (kW·s·cm<sup>-2</sup>);

$\Delta P$  比功率 (kW/cm<sup>2</sup>)。

连续加热淬火时的加热时间按下式计算

$$\tau=h/v$$



式中  $h$ ——感应器高度 (mm);

$v$ ——感应器与齿轮的相对移动速度  
(mm/s)。

图 3-8 是全齿沿齿廓加热淬火参数的经验曲线, 可供参考。

齿轮感应淬火的冷却介质及其冷却方式见表 3-48。

## 2. 单齿感应淬火

(1) 单齿同时加热感应器结构如图 3-9 所示。

为了防止齿端过热, 感应器长度一般应比齿宽短 3~5mm。为了防止已淬火相邻齿遭受回火, 通常采用 0.5~1.0mm 厚的纯铜板作屏蔽, 或用压缩空气、水雾冷保护。

(2) 单齿连续加热感应器的结构及尺寸见表 3-49。

单齿连续感应淬火的电气规范举例见表 3-50。

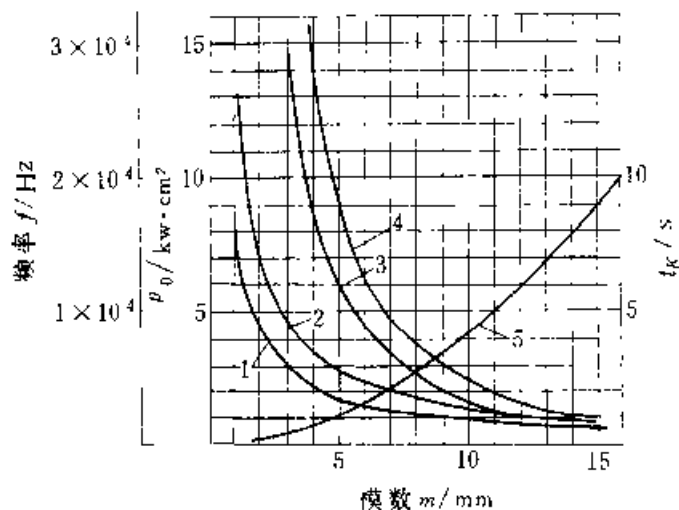


图 3-8 沿齿廓加热淬火参数的经验曲线  
1—零件所需比功率 ( $\text{kW}/\text{cm}^2$ ) 2 发电机的

比功率 ( $\text{kW}/\text{cm}^2$ ) 3  $f = \frac{300000}{m^2}$  计算的频

率 (Hz) 4  $f = \frac{160000}{m^2}$  计算的频率 (Hz)

5 加热时间 (s)

表 3-48 感应加热常用冷却介质及其冷却方式

冷却介质	介质温度 °C	所 用 钢 号	
		喷冷 <sup>①</sup>	浸冷
水	20~50	45	15
50%~15%乳化液 (质量分数)	<50	40Cr, 45Cr, 42SiMn, 35CrMo	
油	40~80	55	20Cr, 20CrMo, 20CrMnTi 渗 碳后直接浸冷
5%~15%聚合物 (PAG) 水溶液 (质量分数)	10~40	35CrMo, 42CrMo, 42SiMn 38SiMnMo, 55Ti, 60Ti, 70Ti	40Cr, 45Cr, 42SiMn, 38SiMnMo

① 喷液压力一般为  $(1.5 \sim 4) \times 10^6 \text{Pa}$ , 喷油冷却应注意防火及排烟。

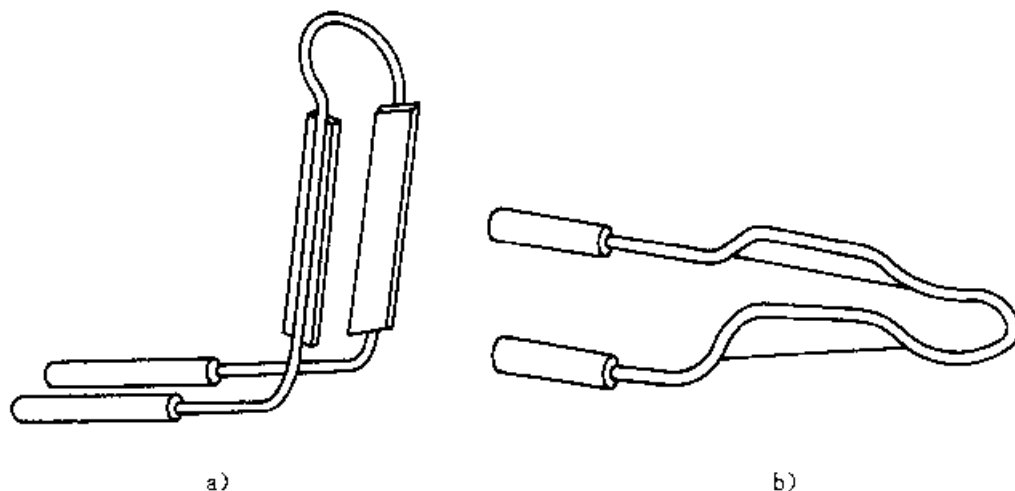


图 3-9 单齿同时加热感应器示意图

a) 直齿轮感应器 b) 锥齿轮感应器

表 3-49 单齿连续加热感应器结构尺寸

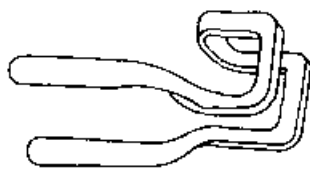
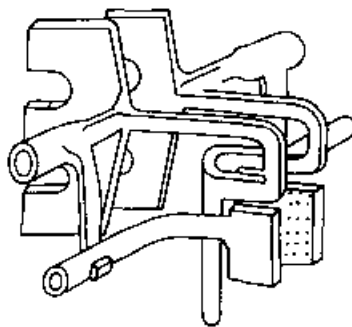
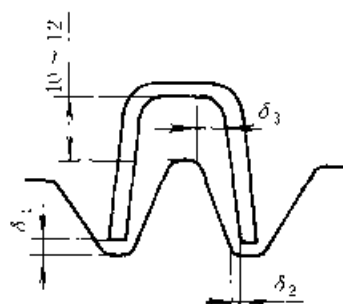
感 应 器	结 构 尺 寸				说 明
 (I)	单齿连续淬火感应器间隙尺寸				1) 淬火冷却有自喷(图 I)和附加冷却喷嘴(图 II)两种 2) $m=5\sim 10\text{mm}$ 的齿轮, 喷液孔应低于齿顶 $1.5\sim 2\text{mm}$ , 以防齿顶因冷却过激而产生开裂 3) $m>10\text{mm}$ 的齿轮, 喷液孔则应高于齿顶 $1.5\sim 2\text{mm}$ , 以保证齿顶能够淬硬
	模数/mm	$\delta_1/\text{mm}$	$\delta_2/\text{mm}$	$\delta_3/\text{mm}$	
	$3\sim 6$	$<1$	1	$3\sim 4$	
	$8\sim 12$	1	$1\sim 1.5$	$4\sim 4.5$	
	$\geq 16$	$1\sim 1.5$	$1.5\sim 2$	$4.5\sim 5$	
 (II)					

表 3-50 单齿连续感应加热的电气规范

模数 /mm	功率 /kW	板压 /kV	阳流 /A	栅流 /A	移动速度 mm/s
5	18~20	8~8.5	2.5	0.6	5~6
6	20~27	8.5~9	2.5	0.6	4~5
8~9	25~33	9~9.5	3~4	0.8	4~5
10	33~35	10~11	3.5	0.8	4~5
12	34~40	11~11.5	3.5	0.8	4~5
16	40~45	11~11.5	3.5~4	0.8	3~4
18	45~50	11.5~12	4~5	0.8~1	3~4
$\geq 20$	66~75	12~12.5	5.5~6	1~1.2	3~4

注: 输出功率取上限时, 则移动速度取上限; 反之, 输出功率取下限时, 移动速度亦取下限。

### 3. 沿齿沟感应淬火

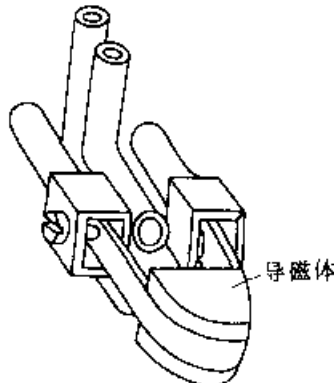
(1) V形感应器。表 3-51 是一种高频沿齿沟加热淬火感应器的结构及设计要点。

图 3-10 是一种中频 V 形沿齿沟加热淬火感应器的结构及设计参数。表 3-52 是其工艺规范。

(2) 门形感应器。图 3-11 是几种常用门形感应器结构形式。图 3-12 为一种典型门形感应器结构, 表 3-53 是这种感应器的主要结构尺寸确定方法。

表 3-54 是门形感应器中频沿齿沟淬火工艺规范举例。

表 3-51 高频 V 形感应器的结构及制作方法

结构示意图	适用范围	设计要点	制作方法	备 注
 导磁体	模数 $m$ 为 6~14mm 的齿轮淬火	(1) 感应器与齿沟轮廓仿形, 与齿面的间隙一般为 1mm, 与齿根间隙可小于 1mm (2) 感应器高度 $h=6\sim 8\text{mm}$ (3) 导磁体高度为 10~12mm	(1) 感应器用 1mm 纯铜片置于齿间弯制成形 (2) 汇流采用 $\phi 10\text{mm}$ 纯铜管弯制, 与感应器衔接端焊有一段方截面纯铜管, 用螺钉将感应器顶紧 (3) 冷却水管用 $\phi 14\text{mm}$ 铜管弯制后焊在一根汇流条上 (4) 导磁体可用金刚砂浇水磨制	(1) 加热时, 冷却水喷冷导磁体, 汇流方管出水口喷冷齿间及相邻两齿侧, 在加热淬火过程中, 感应器与零件间始终为流水所充满 (2) 采用这种感应器亦可将零件焊入水中进行水下加热, 此时仍需喷水

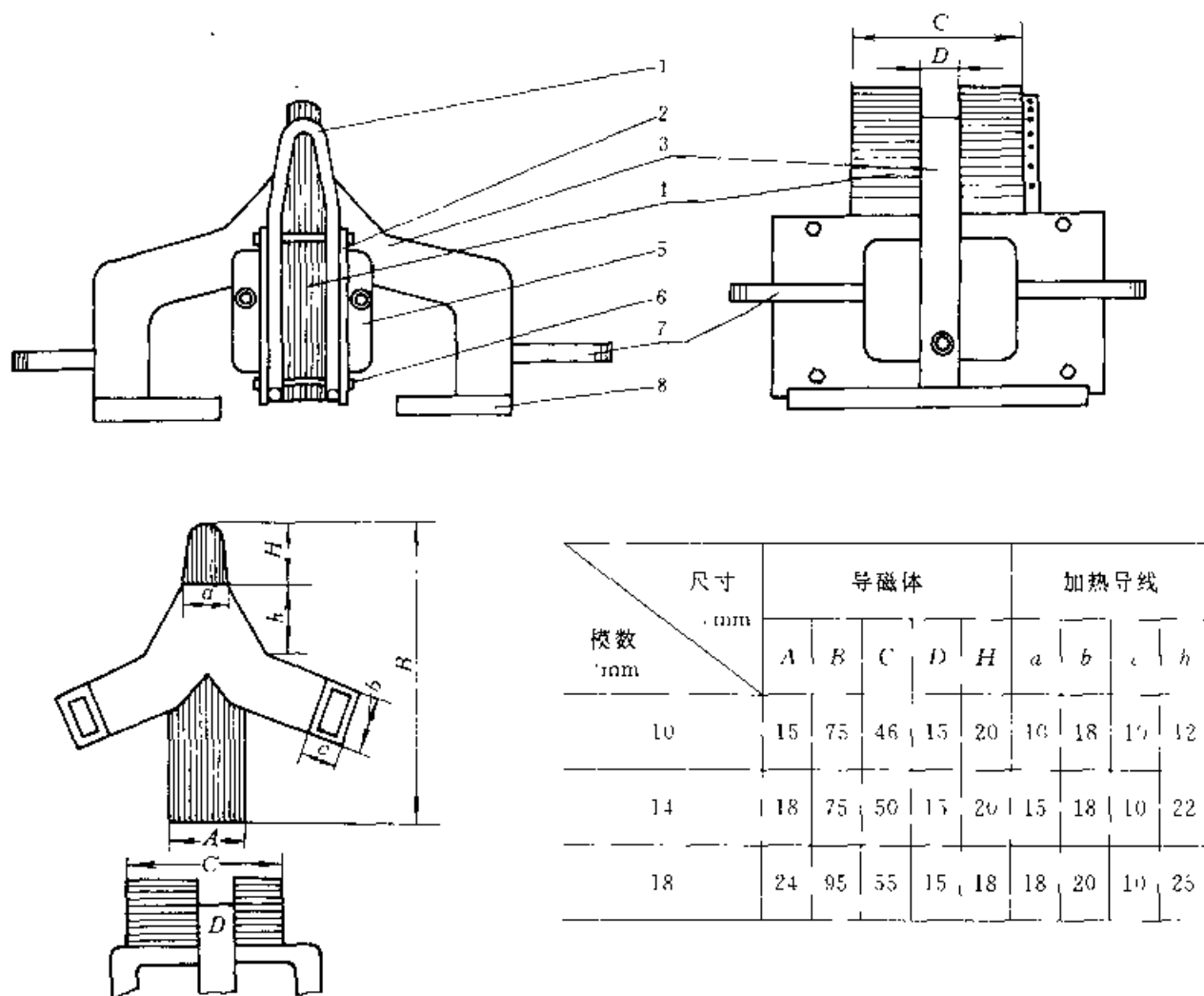


图 3-10 中频 V 形感应器结构

1—淬火喷水器 2—云母板绝缘夹 3—感应器施感导体 4—硅钢片导磁体  
5—导磁体水冷套 6—铜螺钉 7—水管接头 8—接线板

表 3-52 V 形感应器沿齿沟淬火工艺规范

模数 /mm	钢号	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	感应器移动速度 /mm·s	冷却介质 (质量分数)		表面硬度 (HRC)
10	40Cr	18	375	25	2.7~3.0	PAG	8%	45~50
	34CrNiMo	18	375	25	2.7~3.0		12%	50~55
12	45	30	600	75	3.34	水, 25~30°C		40~45
	40Cr	30	600	75	3.34	PAG	8%	45~50
	34CrNiMo	30	600	75	3.34		12%	50~55
14	40Cr	30	600~610	75	2.84	PAG	8%	45~50
	34CrNiMo	30	600~610	75	3.34		12%	50~55
16	40Cr	18	500	75	2.8	PAG	8%	45~50
18	40Cr	30	600	75	2.9	PAG	10%	45~50

注：发电机频率 2.5kHz。

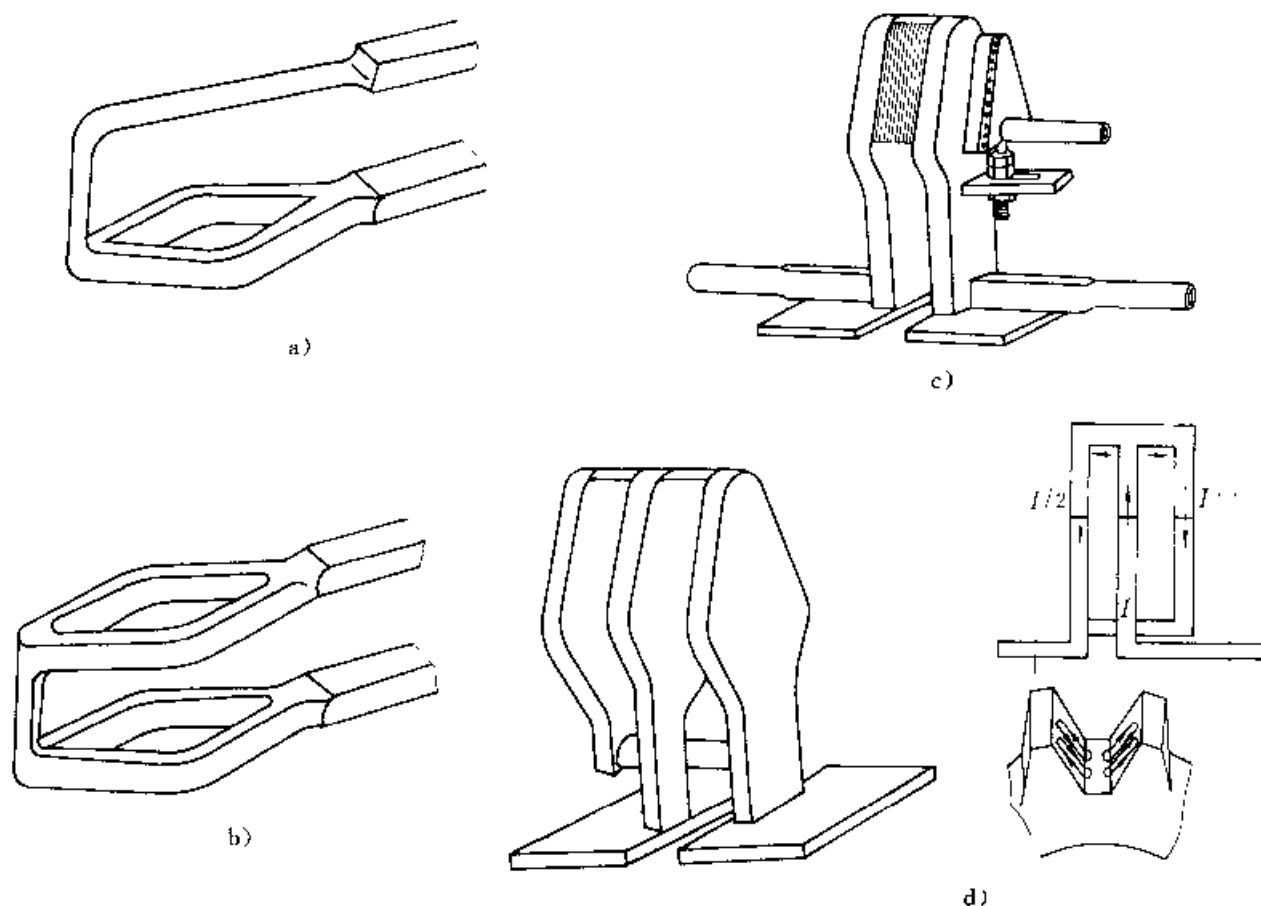
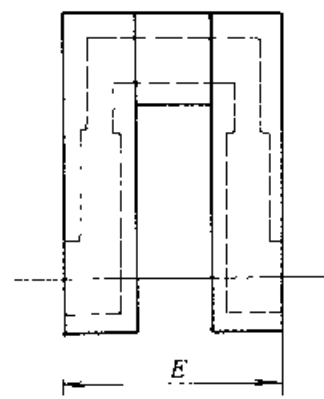
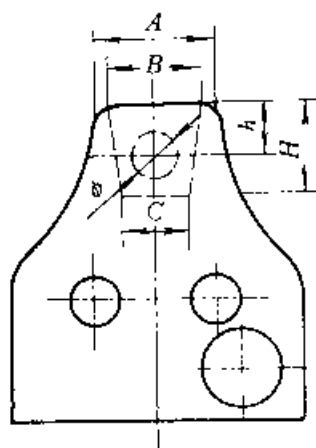


图 3-11 常用 形感应器结构示意图

a) 适用于  $m < 6\text{mm}$  齿轮，超音频电源 b) 适用于  $m = 6 \sim 12\text{mm}$  齿轮，超音频~中频 (8kHz) c) 适用于  $m > 10\text{mm}$  齿轮，中频 (8、2.5kHz) d) 适用于  $m > 10\text{mm}$  齿轮，中频；其特点为上、下两加热导板分流 (1、2) 后，可改善加热效果，尤其可防止感应器移出齿沟时造成的端面过热

表 3-53 典型 形感应器结构尺寸的确定方法

模数 $m/\text{mm}$	A	B	C	H	h	$\phi$	E~
6	1.0	3.2	2.4	4.0	1.8	2.0	22
7	4.5	3.6	2.8	4.5	2.2	2.5	22
10 <sup>1</sup>	6.0	1.5	3.5	6.5	3.0	3.0	22
10 <sup>1</sup>	6.5	5.5	4.5	6.5	3.2	3.5	22



- 1) 修正齿顶。
- 2) 形沟槽和上、下加热体厚度各为  $1.3E$ 。

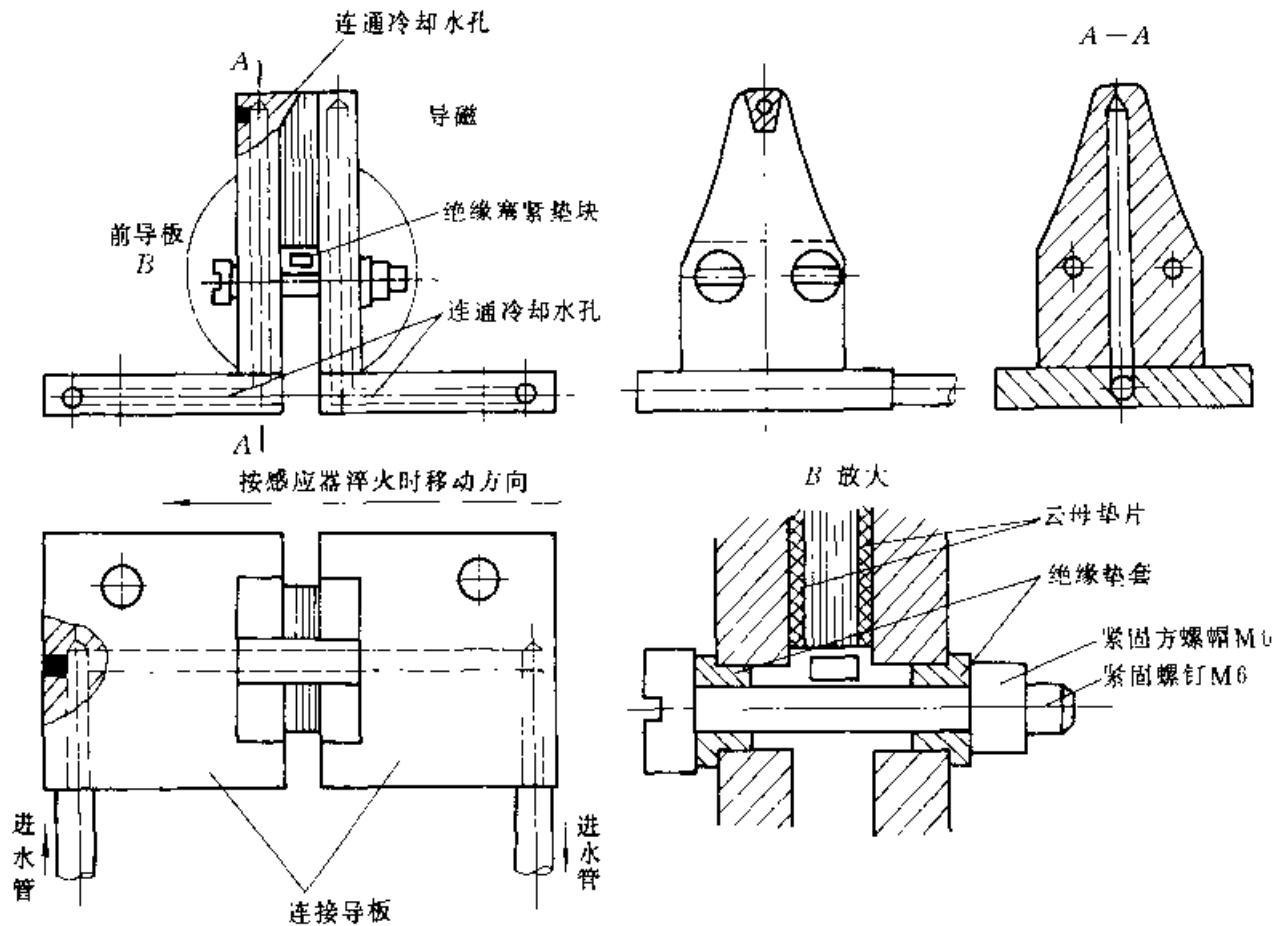


图 3-12 一种典型 U 形感应器结构图

表 3-54 U 形感应器沿齿沟淬火工艺规范

模数 /mm	钢号	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	感应器移动速度 /mm·s <sup>-1</sup>	冷却介质	表面硬度 (HRC)
14	ZG270~500	65	580	125	5	水 25~30℃	45~50
20	ZG35CrMo	50	350	155	7	聚合物 (PAG) 水 溶液 (质量分数) 5% ~15%	50~55
26	ZG35Mn	100	500	210	6.5		50~55
26	ZG35CrMo	60	380	165	7.5		50~55
26	35CrMoV	50	350	155	7.5		50~55

注：电源中频 8kHz。

(3) 沿齿沟淬火的冷却，沿齿沟淬火的冷却介 质、冷却器结构及感应器移动速度列于表 3-55。 的。

表 3-55 沿齿沟淬火冷却规范

冷却介质	喷冷器结构	感应器移动速度 $v$ (mm/s)
碳钢：一般自来水 合金钢： 1) 10%~15% 乳化液 (质量分数) 2) 聚合物 (PAG) 水溶液 (质量分 数) 5%~15% 3) 喷雾 4) 压缩空气	1) 喷孔孔径 $\phi 0.6 \sim \phi 0.8 \text{mm}$ 2) 喷孔间距 $2 \sim 2.5 \text{mm}$ 3) 喷射角 $30^\circ \sim 45^\circ$ 4) 孔的排列一般是：齿底喷孔 排，齿侧喷孔两排，并交错排列	$v = S/r$ 式中 $S$ —感应器加热结束至冷却开始 的距离 (mm)； $r$ —自加热结束至冷却开始的时间 (待冷时间)，碳钢为 $2 \sim$ $3 \text{s}$ ，合金钢 $3 \sim 5 \text{s}$

### 3.3.2.4 低淬透性钢齿轮的感应淬火

模数 2.5~6mm 的齿轮采用单齿沿齿沟加热淬火比较困难,而用食圈加热淬火不是将整个齿淬透,就是只能淬到齿根以上部位。为了克服工艺上的这种困难而发展了低淬透性钢,目前较常用的有三种,即 55Ti、60Ti、70Ti。

#### 1. 低淬透性钢齿轮的淬火加热

(1) 频率选择,低淬透性钢齿轮淬火加热频率可参考表 3-56 进行选择。

表 3-56 低淬透性钢齿轮淬火加热频率选择

模数 mm	3~4	5~6	7~8	9~12
适合钢种	55Ti	60Ti	60Ti	70Ti
推荐频率 kHz	30~40	8	4	2.5

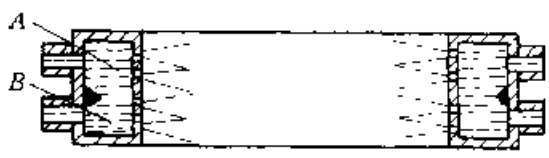
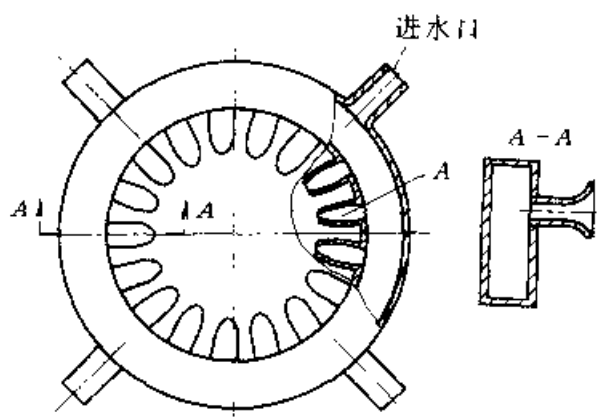
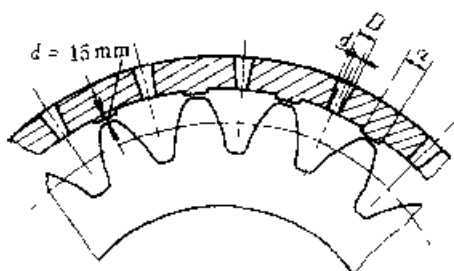
当现场频率难于匹配时,可采用一些补救措

施。一种是采用低的比功率,间断加热,使齿根部位能获得足够的加热深度而齿顶部又不致过热;另一种方法是当加热到齿根部位接近淬火温度的一瞬间,迅速接通自动附加电容强化齿根部加热。当加热深度达到要求时,立即淬火冷却。

(2) 淬火温度及加热速度,低淬透性钢的临界点较低,淬火温度通常控制在 830~850℃ 之间。加热速度不宜过大,以避免齿顶与齿根部温差过大,通常采用 0.3~0.5kW/cm<sup>2</sup> 的比功率。

(3) 淬火冷却,低淬透性钢的临界冷却速度较高,达 400~1000℃/s (45 钢仅为 150~400℃/s),所以要求淬火冷却速度很高。为了取得良好的冷却效果,可采取表 3-57 推荐的措施。为避免开裂,可采用聚合物水溶液,选择适当的配比浓度。淬火冷却液压力一般 7×10<sup>5</sup>Pa,单位面积流量不小于 0.12L/cm<sup>2</sup>。

表 3-57 加强冷却能力的喷水圈结构

喷水圈结构	说 明
	<p>上室 A 较下室 B 空间大,以保证下室有更高的喷射压力,借此防止上部冷却液沿齿面流下形成水帘,影响冷却。</p>
	<p>内侧上半部装有与齿数相等的扁嘴喷管,喷管出口处上下压力均匀,淬火后能使齿底和齿根处充分淬火成马氏体,并增加淬硬层深度,使齿顶和齿根硬化层均匀。</p>
	<p>喷水圈的内侧带凸台,并正对齿顶,喷水孔直对齿底,从而使齿的冷却均匀。结构要点:槽长等于内宽,内槽宽 <math>d=1/2 m</math> (模数),外槽宽 <math>D=1/2 m+2\text{mm}</math>,槽数=齿数,凸台宽 <math>a=K</math> (齿顶宽)+3mm。</p>

## 3.3.2.5 表面淬火齿轮的畸变

(续)

齿轮表面淬火时,通常内孔、外圆、齿形、齿向及螺旋角等均要产生一定的畸变,严重时会造成齿轮报废。齿轮表面淬火产生的畸变与很多因素有关,所以防止过大畸变的措施各异,但有些措施是普遍性的,对减小各类齿轮的畸变都有效果。表3-58是减小畸变的一般性措施,可供参考。

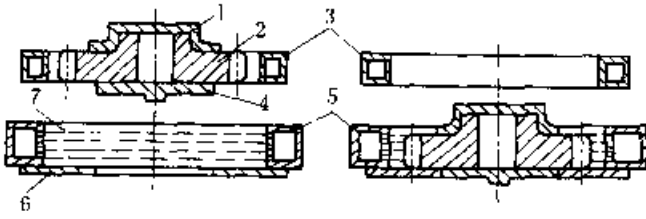
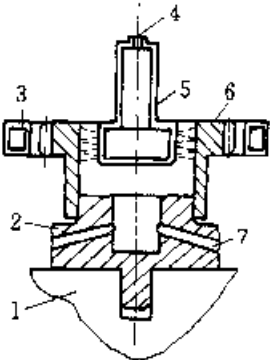
表 3-58 减小齿轮表面淬火畸变的一般性措施

措 施	工 艺 方 法
消除毛坯内应力细化组织	毛坯正火,尤其等温正火效果显著
较低的淬火温度	淬火前调质获得均匀细小的索氏体组织
较短的加热时间	淬火前调质;感应加热频率选择恰当;火焰烧嘴或感应器与被加热齿面间距离不要过大;淬火前预热

措 施	工 艺 方 法
消除加工应力	表面淬火前进行 600~650℃ 预热
加热均匀	机床心轴偏摆要小;烧嘴或感应器形状均匀对称;套圈加热时齿轮旋转
缓和冷却	采用合适浓度的淬火介质,尽量不采用自来水,而采用各类聚合物水溶液
增加齿轮本体强度	合理安排加工工序,如某些沟槽及减轻孔安排在淬火后加工;合理的结构设计

对于全齿淬火的小齿轮,其内孔由于多带键槽,因而内孔的畸变往往成为主要矛盾。表3-59是减小齿轮内孔畸变的热处理工艺举例。

表 3-59 减小齿轮内孔畸变的热处理工艺方法

工 艺 方 法	说 明
<p>高频预热法</p> <p>工艺路线:锻坯正火→粗车→高频预热(约700℃)→精车→滚、剃齿→高频淬火→回火</p>	粗车毛坯高频预热在表面获得约10mm的加热层,随即冷却使内孔产生一定预收缩变形,经加工后高频淬火,由于精车内孔是在预收缩条件下进行,所以淬火后内孔收缩得到补偿
 <p>1- 积水橡胶垫 2- 淬冷液 3- 上防冷垫 4- 齿轮 5- 感应圈 6- 淬冷圈 7- 下防冷垫</p>	齿轮淬火前在炉中预热(260~320℃),高频淬火时加防冷罩盖;当表面冷却接近室温时,取下罩盖让内孔冷却,以减小内孔收缩量
 <p>1 淬火机 2- 底座 3- 感应器 4- 入水口 5- 喷水管 6- 齿轮 7- 排水管</p>	对薄壁花键孔齿轮淬火时,内孔进行喷水冷却,由于内孔表面处于冷态,强度高,可以减小内孔的胀大

3.3.2.6 表面淬火齿轮的常见缺陷

齿轮表面淬火时通常产生的缺陷和原因及其防止措施见表 3-60。

3.3.2.7 表面淬火齿轮的质量检验

表面淬火齿轮的一般检验项目、内容及技术要求见表 3-61。

表 3-60 表面淬火齿轮的常见缺陷及防止措施

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
1	表面硬度过高或过低	钢材含碳量偏高或偏低，预备热处理组织不良；表面脱碳；淬火加热温度不当；冷却不合理；回火温度和保温时间选择不合理	检查钢材含碳量及原始组织，采用首件检查硬度来调整工艺参数；合理选用冷却介质；喷液淬火应能调节压力、流量、温度；浸液淬火应具有循环装置；回火规范选择合理
2	表面硬度不均匀	感应器或火焰喷嘴结构不合理；钢材有带状组织偏析；局部脱碳；加热和冷却不均匀	检查钢材质量；预备热处理组织要均匀；淬火前表面要清洗干净，不允许有油污和锈斑；冷却介质要清沾；喷水孔分布要均匀，并检查有无堵塞现象；加热面温度要均匀
3	硬化层深度过浅	加热时间不足，感应加热频率过高；火焰过于激烈；钢材淬透性低；冷却规范选择不恰当	根据深度合理选择感应加热频率，如无条件，则应调整参数和机械参数，缓慢加热；调整火焰强度；改变冷却规范，采用预热
4	淬火开裂	淬火温度过高；冷却过于激烈；局部（齿顶、齿端面）过热；钢材含碳量偏高；成分偏析；钢材有缺陷；回火不充分，不及时；齿根圆角尖锐	严格控制淬火温度；修正感应器或火焰喷嘴；调整电参数（感应淬火）或气体参数（火焰淬火）；检查钢材质量；根据钢材选择合适的淬火介质；采用合理的冷却规范；减轻齿顶或端面的冷却速度；加大齿根圆角；沿齿沟淬火采用隔齿淬火方法；有条件者采用埋油淬火（感应淬火）
5	畸变	加热规范不恰当；冷却过激；加热冷却不均匀；原始组织不均匀	改善原始组织；调整加热规范；保证加热和冷却均匀；选择合适的冷却介质；预热

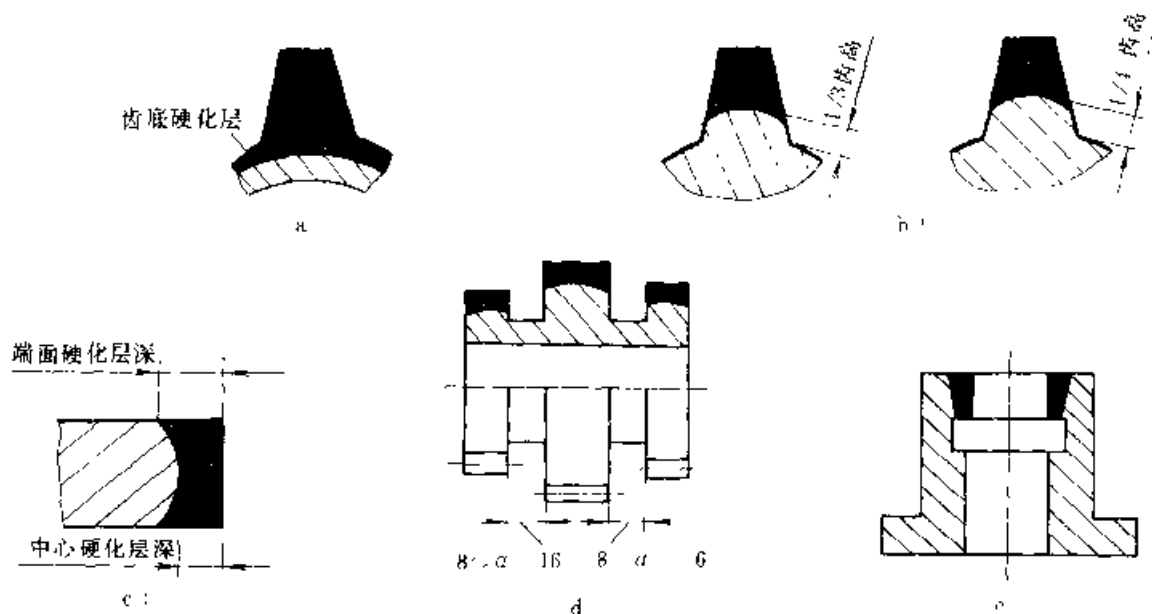
表 3-61 表面淬火齿轮的检验项目、内容和要求

序号	检验项目	检验内容及要求
1	钢材	试样：1. 化学成分 2. 低倍组织 3. 晶粒度
2	心部硬度	齿块：齿根中心处要达到要求
3	表面质量	目检：齿部不能有过烧 探伤：齿部裂纹，小批量 100% 检查，大批量按规定比例检查
4	表面硬度	齿轮：小批量 100% 检查，大批量按规定比例检查，一般要求硬度为 15~50HRC，承载能力高者为 50~56HRC
5	表面组织	齿块：按 ZBJ36 009—88 检查
6	有效硬化层深度	齿块：用维氏硬度计，在齿宽中部齿的截面上，自表至里进行测量，硬化层终点硬度值按以下规定： 界限硬度 $(HV_{H1}) = 0.80 \times \text{设计规定的最低表面硬度 } (HV_{MS})$
7	硬化层分布	齿块或齿轮： 1) $m < 4\text{mm}$ 的齿轮，允许全齿淬硬，齿底有一定的硬化层，一般为 1.2mm 见附图 a)



(续)

序号	检验项目	检验内容及要求
7	硬化层分布	<p>2) <math>m=4.5\sim 6\text{mm}</math> 的内齿轮, 采用同时一次加热淬火时, 允许离齿根有 <math>1/3</math> 齿高不淬硬, 采用单齿连续淬火时, 允许有 <math>1/4</math> 齿高不淬硬, 见附图 b)</p> <p>3) 同时一次淬火的齿轮, 齿轮纵剖面的中心硬化层深为端面硬化层深的 <math>2/3</math> 以上, 见附图 c)</p> <p>4) 双联、多联内齿轮淬火时, 相邻齿轮距离在 <math>8\text{mm}\leq a\leq 15\text{mm}</math> 时, 较小的内齿轮硬化层允许带斜度, 见附图 d)</p> <p>5) 内齿轮 <math>m\leq 6\text{mm}</math> 时, 硬化层允许稍有斜度, 见附图 e)</p> <p>6) <math>m\geq 8\text{mm}</math> 的火焰淬火大齿轮, 齿部淬硬的高度应为模数的 <math>1.5</math> 倍, <math>m\leq 8\text{mm}</math> 时, 应有 <math>2/3</math> 齿高淬硬</p>



### 3.3.3 齿轮的化学热处理

#### 3.3.3.1 齿轮的渗碳和碳氮共渗

1. 齿轮渗碳和碳氮共渗的技术参数 各种齿轮的渗碳层深度可参考表 3-62 的数据来确定。碳氮共渗层深度一般在  $1\text{mm}$  左右。

表 3-62 齿轮渗碳层深度的推荐值

齿轮种类	推荐值	数据来源
汽车齿轮	$0.2\sim 0.3m$	汽车行业
拖拉机齿轮	$0.18\sim 2.1m$	拖拉机行业
机床齿轮	$0.15\sim 0.2m$	机床行业
重型齿轮	$0.25\sim 0.3m$	重型行业

注: 表中  $m$  为齿轮模数, 单位  $\text{mm}$ 。

渗碳和碳氮共渗齿轮渗层表面碳(氮)浓度、

表面硬度、表层组织及心部硬度的一般要求见表 3-63。

#### 2. 齿轮渗碳及碳氮共渗热处理工艺

(1) 齿轮毛坯的预备热处理, 齿轮毛坯的预备热处理推荐工艺见表 3-64。

对于大批量生产的汽车、拖拉机渗碳内轮, 为了改善切削性能及变形的稳定性, 国内外已广泛采用锻轧后等温正火工艺, 其工艺要点是用控制冷却方式, 使零件在一定的冷速、一定温度下冷却, 从而获得均匀的组织及较佳的硬度。

为适应大批量生产, 采用等温正火自动线设备。工艺流程为:

锻轧毛坯  $\rightarrow$  加热炉  $\rightarrow$  速冷室 (工件速冷至  $600^\circ\text{C}$  左右)  $\rightarrow$  等温室 (根据材料和硬度要求确定等温温度和时间)  $\rightarrow$  出炉。

表 3-63 渗碳和碳氮共渗齿轮表面碳(氮)浓度、表面硬度、  
表层组织及心部硬度

参 数		推 荐 值	说 明
表面 C、N 浓度		渗碳 $\alpha(\text{C})=0.7\% \sim 1.0\%$ 碳氮共渗 $\alpha(\text{C})=0.7\% \sim 0.9\%$ $\alpha(\text{N})=0.2\% \sim 0.4\%$	对受载平稳、以耐磨和抗麻点剥落为主的齿轮，C、N 含量选高限；对于受冲击的齿轮，C、N 含量选低限
心部硬度 (HRC)		$m \leq 8$ 时 33~48 $m > 8$ 时 30~45	汽车、拖拉机齿轮
		30~40	重载齿轮
表层组织	马氏体	细针状 1~5 级	各类齿轮
	残留奥氏体	渗碳 1~5 级 碳氮共渗 1~5 级	汽车齿轮
	碳化物	常啮合齿轮 $\leq 5$ 级 换挡齿轮 $\leq 4$ 级	汽车齿轮
		平均粒径 $\leq 1\mu\text{m}$	重载齿轮
表面硬度 (HRC)		58~62	各类齿轮
		55~60	重载内轮

表 3-64 齿轮毛坯的预备热处理工艺

钢 号	工 艺 规 范	硬 度 (HBS)	显微组织	备 注
20Cr	正火：900~960℃，空冷	156~179 (179~207)	均匀分布的片状珠 光体和铁素体	1)如果设备条件允 许，尽可能选用高于 渗碳温度 30~50℃ 正火 2)为了改善被切削 性能，提高光滑程度， 一般可采用以下方 法： ①提高正火温度加 强冷却 ②采用等温退火工 艺
20CrMo 20CrMnTi 20SiMnVB	正火：920~1000℃ (常用 950~970℃) 空冷	156~207 (179~217)		
20CrMnMo 20CrNi3 20Cr4Ni2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA	正火：880~940℃ 空冷 回火：650~700℃	171~229 (20CrMnMo) 207~269 (其余)		
20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA 当锻后晶粒粗大时	回火：640℃，6~24h， 空冷 正火：880~940℃ (加热速度≥20℃/min) 空冷 回火：650~700℃	207~269		
40Cr 10Mn2	正火：860~900℃ 空冷	179~229	均匀分布的片状珠 光体和铁素体	

举例：20CrMnTi，有效厚度 50mm，锻造温度 1200~1250℃，1000℃ 停锻后空冷至室温，结果其组织为不均匀粗大的先共析铁素体 + 粒状贝

氏体 + 珠光体，硬度 29HRC，晶粒度 3~6 级。采用等温正火工艺，同样停锻后迅速冷却，在 580~650℃ 等温 90min 后空冷，结果，组织为块状铁素

体+细片状珠光体, 硬度 160~180HBS, 晶粒度 7~8 级。

(2) 齿轮经渗碳和碳氮共渗后的热处理, 不

同钢材的齿轮经渗碳和碳氮共渗后, 根据要求进行不同的淬火、回火, 其工艺详见表 3-65。表 3-66 提供了渗后不直接淬火齿轮的各种冷却方式。

表 3-65 渗碳、碳氮共渗齿轮各种热处理方式

钢号	序号	齿轮类型	热处理工艺
20CrMnTi 20SiMnVB 20CrMo 20CrMnMo	1	大多数经气体或液体渗碳 (或碳氮共渗) 的齿轮	渗碳 (920~940°C) 或碳氮共渗 (840~860°C) → 炉内预冷, 均热 (830~850°C), (碳氮共渗者不预冷) → 直接淬火 (油淬或热油马氏体分级淬火) → 回火 (180°C, 2h)
	2	1) 直接淬火后畸变不符合要求而需用压床或套芯棒淬冷的齿轮 2) 渗碳后需进行机械加工的齿轮 3) 固体渗碳齿轮	渗碳或碳氮共渗 → 冷却 (冷却方式的选择参阅表 3-66) → 再加热 (850~870°C) → 淬冷 (油淬或热油马氏体分级淬火) → 回火
	3	精度要求较高 (7 级) 的齿轮	齿轮在渗碳前经过粗加工成形; 渗碳后以较慢的冷速冷下来, 进行齿形的半精加工; 再用高频或中频感应加热装置透热齿部及齿根附近部位进行淬火, 回火后再进行齿形的精加工 (珩或磨齿) 并用推刀修整花键内孔
20, 20Cr	4	渗碳齿轮	渗碳后直接淬火, 如晶粒较粗大, 宜用序号 2 的热处理工艺进行处理
12CrNi3A 20CrNi3A 12Cr2Ni4A 20Cr2Ni4A 20CrNi2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni1WA	5	渗碳齿轮	渗碳 (900~920°C) → 冷却 (冷却方式选择参阅表 3-66) → 再加热 (12CrNi3A, 20CrNi3A, 12Cr2Ni4A, 20Cr2Ni4A: (800±10)°C <sup>①</sup> ; 18Cr2Ni4WA: (850±10)°C) → 淬冷 (油或 (200±30)°C 碱槽, 保持 5~10min 后, 空冷) → 冷处理 ( -70~-80°C × 1.5~2h) → 回火
	6	渗碳后还需进行切削加工的齿轮	渗碳 → 冷却 → 高温回火 (650±10)°C × 5.5~7.5h, 空冷, 18Cr2Ni4WA 则应随炉冷到 350°C 以下出炉空冷 <sup>②</sup> → 再加热 → 淬冷 → 回火
	7	一般淬火后, 心部硬度过高的齿轮	淬火可按下述规范进行: 18Cr2Ni4WA: (850±10)°C 保温后, 快速放入 280~300°C 碱槽中, 保持 12~20min, 转入 560~580°C 硝酸盐浴中保持 30~50min 油冷 12CrNi3A: 820~850°C 保温后, 在 (230±50)°C 的碱槽内保持 8~12min 后油冷
	8	碳氮共渗齿轮	碳氮共渗 (830~850°C) → 直接淬火 (油或碱槽, 马氏体分级淬火, 18Cr2Ni4WA 可用空淬) → 冷处理 → 回火
	9	碳氮共渗后还需进行切削加工的齿轮	碳氮共渗 → 冷却 (冷却方式的选择参阅表 3-66) → 高温回火 → 淬火 → 回火

① 渗层残留奥氏体过多或心部硬度过高, 可降低淬火温度到 760°C, 心部硬度偏低、铁素体量过多, 可提高淬火温度到 850°C。

② 回火后硬度应不高于 35HRC。如个别零件硬度偏高, 可再进行 680~700°C 高温回火一次。

表 3-66 渗碳、碳氮共渗后冷却方式（直接淬火除外）的选择

齿轮用钢	冷却方式	说 明
20Cr 20CrMnTi 20SiMnB 20CrMo 12CrNi3A 12Cr2Ni4A 20CrNi2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA	空冷	气体或盐浴渗碳（或碳氮共渗）后采用。比较简单易行，但齿表面形成一定的贫碳层，影响齿轮使用性能；宜适当降温后出炉并单独开，以增加冷速，减少脱碳
	在冷却井中冷却	冷却井为四周盘有蛇形管通水冷却的带盖容器。齿轮自井式渗碳炉中移入冷却后，应向其中通入保护气或滴入煤油以保护齿面（最好先在冷却井中倒入适量甲醇）
	在 700℃ 等温盐浴中保持一段时间后空冷	盐浴渗碳（或碳氮共渗）后采用。齿轮出炉空冷时温度较低，可减少齿面脱碳
	随罐冷却	采用 20Cr2Ni4A 钢的齿轮固体渗碳后，如随罐冷却到室温，常出现表面裂纹，应在 400~500℃ 左右开罐空冷，并及时回火
20CrMnMo 20CrNi3	在缓冷坑中冷却或油冷	20CrMnMo, 20CrNi3 钢的齿轮如渗碳后空冷，易产生表面裂纹，须慢冷或随炉冷到 550℃ 再出炉空冷

(3) 齿轮的渗碳工艺 齿轮渗碳温度常用 920~930℃。为了减小畸变，对要求渗碳层较浅的齿轮，可采用较低的渗碳温度，表 3-67 可供参考。

表 3-67 渗碳层深度与渗碳温度

渗碳层深度/mm	渗碳温度/℃
0.35~0.65	880±10
0.65~0.85	900±10
0.85~1.0 以上	920±10

渗碳时间主要根据渗层深度确定，而且与渗碳温度及炉内气氛等因素有关。在某一定条件下，渗层深度与渗碳时间存在着以下关系

$$\delta = K \sqrt{\tau}$$

式中  $\delta$  渗碳层总深度 (mm)；

$\tau$  渗碳时间 (h)；

$K$  与渗碳温度有关的系数，当渗碳温度为 875℃ 时， $K=0.45$ ；900℃ 时， $K=0.51$ ；925℃ 时， $K=0.63$ 。

表 3-68 是在通常渗碳气氛条件下，渗层深度与渗碳温度和时间的大致关系。

渗碳气氛对渗碳速度及渗层质量有很大的影响。齿轮多用气体渗碳，渗碳阶段的炉气组分可参考表 3-69。

(4) 齿轮的典型渗碳工艺举例，表 3-70 是汽车齿轮在电加热无罐连线式炉中的渗碳工艺。

表 3-71 是几种齿轮在井式气体渗碳炉中的渗碳工艺。

目前由于碳势的微机控制，使渗碳工艺日趋简单化，而质量得到更加可靠的保证。

表 3-68 在不同渗碳温度下，渗层深度与渗碳时间的关系

渗碳时间/h	渗碳层深度/mm		
	875℃	900℃	925℃
2	0.64	0.77	0.89
4	0.84	1.06	1.27
8	1.27	1.52	1.80
12	1.56	1.85	2.21
16	1.80	2.13	2.54
20	2.0	2.39	2.84
24	2.18	2.62	3.10
30	2.46	2.95	3.48
36	2.71	3.20	3.81

表 3-69 渗碳阶段的炉气组分（体积分数）（%）

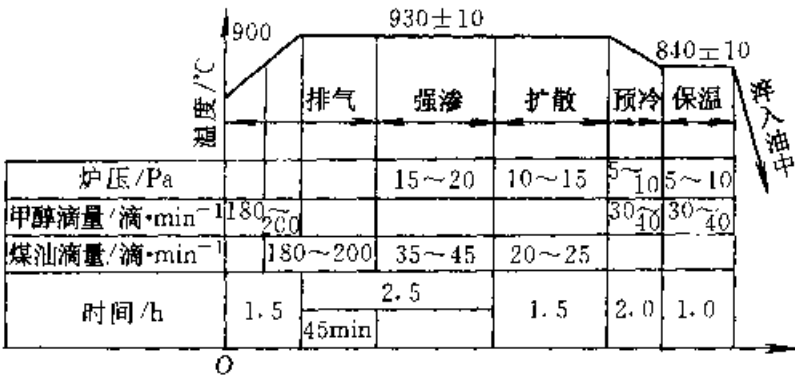
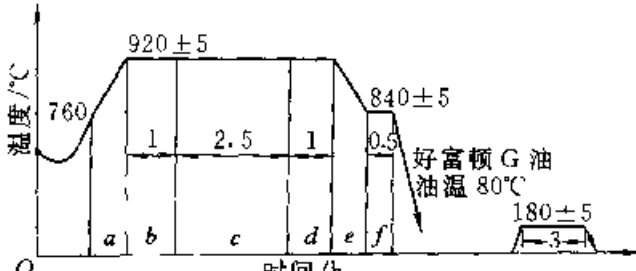
$C_2H_5OH$	$C_4H_{10}$	CO	$H_2$	$CO_2$	$O_2 + N_2$
5~15	≤0.5	15~25	40~60	≤0.5	≤0.5；余量

表 3-70 齿轮在电加热无罐连续式炉中的渗碳工艺

齿轮名称: 变速器齿轮		渗碳层深度: 1.0~1.4mm			
材 料: 20CrMnTi		表面硬度: 58~62HRC			
工 艺 参 数	各 区 数 值				
	I - 1	I - 2	II	III	IV
温度 /°C	840	920	930	900	840
吸热式气供量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	6	6	4	6	6
富化气(丙烷)供量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	—	0.1~0.3	0.15~0.25	0.1~0.15	0.1
装炉盘数	4	3	6	4	3
碳势 $w(\text{C})$ (%)	—	1.1	1.1	1.0	0.9
炉膛容积/ $\text{m}^3$	10				
推料周期/min	30~45				

注: 渗碳后直接油淬。

表 3-71 齿轮在井式和多用炉中的渗碳工艺

技术条件		渗碳工艺																																				
变速器齿轮 钢材: 20CrMnTi 要求层深: 0.8~1.2mm	设备: RQ <sub>1</sub> -75-9T	 <table border="1"> <tr> <td>炉压/Pa</td> <td></td> <td>15~20</td> <td>10~15</td> <td>5~10</td> <td>5~10</td> </tr> <tr> <td>甲醇滴量/滴·min<sup>-1</sup></td> <td>180~200</td> <td></td> <td></td> <td>30~40</td> <td>30~40</td> </tr> <tr> <td>煤油滴量/滴·min<sup>-1</sup></td> <td>180~200</td> <td>35~45</td> <td>20~25</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>时间/h</td> <td>1.5</td> <td>2.5</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>45min</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		炉压/Pa		15~20	10~15	5~10	5~10	甲醇滴量/滴·min <sup>-1</sup>	180~200			30~40	30~40	煤油滴量/滴·min <sup>-1</sup>	180~200	35~45	20~25			时间/h	1.5	2.5	1.5	2.0	1.0			45min								
炉压/Pa		15~20	10~15	5~10	5~10																																	
甲醇滴量/滴·min <sup>-1</sup>	180~200			30~40	30~40																																	
煤油滴量/滴·min <sup>-1</sup>	180~200	35~45	20~25																																			
时间/h	1.5	2.5	1.5	2.0	1.0																																	
		45min																																				
转向器齿轮 钢材: 20CrMnTi 要求层深: 0.4mm	设备: 可控 气氛多用炉	 <table border="1"> <tr> <th>工艺阶段</th> <th>碳势(C) (%)</th> <th>p(CO) (%)</th> <th>p(CH<sub>4</sub>) (%)</th> <th>p(CO<sub>2</sub>) (%)</th> </tr> <tr> <td>a</td> <td></td> <td></td> <td>1.5~2.0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>1.00</td> <td>20</td> <td>1.2~1.5</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>1.05</td> <td>20</td> <td>0.8~1.2</td> <td>0.07</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>0.85</td> <td>20</td> <td>0.4~0.6</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>e</td> <td>0.85</td> <td>21</td> <td>0.4~0.6</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>f</td> <td>0.85</td> <td>21</td> <td>0.4~0.6</td> <td>0.10</td> </tr> </table>		工艺阶段	碳势(C) (%)	p(CO) (%)	p(CH <sub>4</sub> ) (%)	p(CO <sub>2</sub> ) (%)	a			1.5~2.0		b	1.00	20	1.2~1.5	0.08	c	1.05	20	0.8~1.2	0.07	d	0.85	20	0.4~0.6	0.10	e	0.85	21	0.4~0.6	0.10	f	0.85	21	0.4~0.6	0.10
工艺阶段	碳势(C) (%)	p(CO) (%)	p(CH <sub>4</sub> ) (%)	p(CO <sub>2</sub> ) (%)																																		
a			1.5~2.0																																			
b	1.00	20	1.2~1.5	0.08																																		
c	1.05	20	0.8~1.2	0.07																																		
d	0.85	20	0.4~0.6	0.10																																		
e	0.85	21	0.4~0.6	0.10																																		
f	0.85	21	0.4~0.6	0.10																																		

注: 氧探头控制碳势; 红外仪测定 CO 动态补偿; CH<sub>4</sub> 监视报警; CO<sub>2</sub> 监视报警。

注: 氧探头控制碳势; 红外仪测定 CO 动态补偿; CH<sub>4</sub> 监视报警; CO<sub>2</sub> 监视报警。

(续)

技术条件

渗碳工艺

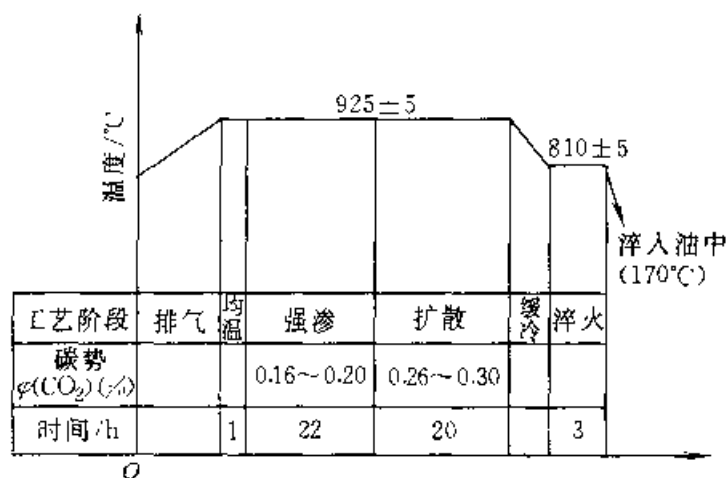
齿轮名称: 轧钢机齿轮

钢材: 12CrNi3

要求层深: 3.0~3.5mm

表面含碳量: 0.7%~0.9% (质量分数)

设备: 300kW 井式渗碳炉



(5) 齿轮的碳氮共渗工艺, 齿轮的碳氮共渗主要是采用气体共渗。气体共渗介质大体有三类:

- 1) 含碳的液体有机化合物加氮。
- 2) 气体渗碳剂加氮。
- 3) 含碳氮的有机化合物 (如三乙醇胺)

碳氮共渗时, 在共渗 20mm 后取气进行分析, 其炉气组分应基本上符合表 3-72 的数值。

表 3-72 碳氮共渗时的炉气组分 (体积分数) (%)

$\text{C}_2\text{H}_2$ (%)	$\text{C}_2\text{H}_4$ (%)	CO	$\text{H}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$
6~10	≤0.5	5~10	80~83	≤0.5	≤0.5	余量

齿轮碳氮共渗温度一般在 840~860°C, 个别也有采用 900~920°C 的高温碳氮共渗工艺。共渗时间与温度及要求层深等因素有关, 表 3-73 是在 840~850°C 共渗时渗层深度与共渗时间的关系。

表 3-73 碳氮共渗层深度与共渗时间的关系

共渗层深度 /mm	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1.1	1.1~1.3
共渗时间/h	3	6	8	10	13

(6) 齿轮的典型碳氮共渗工艺举例, 表 3-74 为汽车齿轮在无罐连续式炉中碳氮共渗工艺。

表 3-75 为内轮在井式炉的气体碳氮共渗工艺。

(7) 特殊渗碳工艺

1) 齿轮的离子渗碳工艺, 离子渗碳由于渗速快、表面质量好、生产清洁等优点而受到青睐, 并逐步进入实用阶段。

由于离子渗碳比较容易实现高温渗碳, 因而大大缩短工艺周期, 表 3-76 是不同温度及时间的离子渗碳结果。

表 3-74 齿轮在无罐连续炉中的碳氮共渗工艺

齿轮名称: 变速器内轮	渗层深度: 0.8~1.2mm					
材料: 20CrMnTi	表面硬度: 58~62HRC					
共渗区段	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	II	III	IV	
温度/℃	860	860	880	860	840	
吸热式气, m <sup>3</sup> ·h	7	6	4	5	6	
丙烷 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	0	0.8~0.2	0.15~0.2	0.08~0.1	0	
氮气, m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	0.1	0	0	0.3	0.3	
吸热式气成分 (体积分数) (%)	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
	0.2	0.4	23	34	1.5	余量
炉气成分 (体积分数) (%)	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
	0.2	0.4	20	39	1.6	余量
炉内总时间/h	10					
渗层碳、氮含量	$w(C)=0.85\% \sim 0.98\%$ $w(N)=0.25\% \sim 0.30\%$					

注: 炉气成分为奥氏分析结果。

表 3 75 齿轮在井式炉中的碳氮共渗工艺

技术条件	碳氮共渗工艺																				
齿轮名称: 汽车变速器齿轮 材 料: 40Cr 渗层深度: 0.25~0.4mm 表面硬度: 60HRC 以上 设备: RQ <sub>1</sub> —60—9T	<table border="1"> <tr> <td>煤油/<math>\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>氨/<math>\text{L} \cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>420</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>时间/min</td> <td>50~60</td> <td></td> </tr> </table>	煤油/ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	4	5	氨/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	420	150	时间/min	50~60												
煤油/ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	4	5																			
氨/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	420	150																			
时间/min	50~60																				
齿轮名称: 拖拉机变速器齿轮 材 料: 30CrMnTi 渗层深度: 0.6~0.9mm 表面硬度: 58HRC 以上 设备: RQ <sub>1</sub> —35—9T	<table border="1"> <tr> <td>煤油/滴<math>\cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>55~65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>三乙醇胺/滴<math>\cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>10~14</td> <td>60~64</td> <td>30~34</td> </tr> <tr> <td>炉压/Pa</td> <td>100~150</td> <td>100~600</td> <td>200~300</td> </tr> <tr> <td>时间/h</td> <td>0.5</td> <td>3</td> <td>2</td> </tr> </table>	煤油/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	55~65			三乙醇胺/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	10~14	60~64	30~34	炉压/Pa	100~150	100~600	200~300	时间/h	0.5	3	2				
煤油/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	55~65																				
三乙醇胺/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	10~14	60~64	30~34																		
炉压/Pa	100~150	100~600	200~300																		
时间/h	0.5	3	2																		
齿轮名称: 拖拉机高低档滑动齿轮 材 料: 25MnTiBRE 渗层深度: 0.8~1.2mm 表面硬度: 58~62HRC 设备: RQ <sub>3</sub> —75—9T	<table border="1"> <tr> <td>甲醇/滴<math>\cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>250</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>煤油/滴<math>\cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>220</td> <td>110</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>氨/<math>\text{L} \cdot \text{min}^{-1}</math></td> <td>300</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>炉压/Pa</td> <td></td> <td>250~300</td> <td></td> </tr> <tr> <td>时间/min</td> <td>40</td> <td>300</td> <td></td> </tr> </table>	甲醇/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	250			煤油/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	220	110	80	氨/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	300	300	300	炉压/Pa		250~300		时间/min	40	300	
甲醇/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	250																				
煤油/滴 $\cdot \text{min}^{-1}$	220	110	80																		
氨/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	300	300	300																		
炉压/Pa		250~300																			
时间/min	40	300																			

表 3-76 不同温度及时间离子渗碳深度

(mm)

钢 材	900°C				1000°C				1050°C			
	0.5h	1.0h	2.0h	4.0h	0.5h	1.0h	2.0h	4.0h	0.5h	1.0h	2.0h	4.0h
20	0.40	0.60	0.91	1.11	0.55	0.69	1.01	1.61	0.75	0.91	1.43	-
20CrMo	0.55	0.85	1.11	1.76	0.84	0.98	1.37	1.99	0.94	1.24	1.82	2.73
20CrMnTi	0.69	0.99	1.26		0.95	1.08	1.56	2.15	1.04	1.37	2.08	2.86

注: 渗碳深度是未经扩散的数值。

离子渗碳的主要工艺参数:

温度 通常 950~1000°C。

电流密度 0.13~0.79mA/cm<sup>2</sup>。渗剂 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (丙烷)。

渗碳扩散 1:1 或 1:2。

扩散气氛 真空, 最好保持一定碳势, 以避免表面脱碳。

稀释剂 氢气可促进渗碳, 表面洁净, 但易爆炸; 氮气效果较氢气差, 但安全性好。

齿轮离子渗碳工艺举例:

1700 轧钢机减速器轴齿轮, 材料 20Cr2Ni4, 模数 15mm, 尺寸  $\phi 265\text{mm} \times 625\text{mm}$ 。要求表面硬度 56~60HRC, 渗碳层深度 3.3~3.8mm。

采用温度为 940~960°C, 辉光电源功率 8.2kW, 辅助加热电源功率 12.5kW, 炉膛实际温度比工件温度低约 10°C。渗剂为丙烷  $\text{C}_3\text{H}_8$ , 稀释剂为  $\text{N}_2$ 。采用强渗 4h → 扩散 4h → 强渗 4h → 扩散 1h 交替渗的方法。强渗期  $\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)$  10%, 扩散期  $\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)$  2%。渗碳热处理后完全达到技术要求。

2) 齿轮的稀土渗碳工艺, 稀土渗碳是我国独具特色的一种渗碳工艺, 其显著特点是具有催渗效果及细化渗层碳化物的作用, 这一工艺在齿轮生产中取得良好效果。

表 3-77 是稀土渗碳时的炉气成分, 从表 3-77 看到, 由于稀土的加入使炉气中的碳氢化合物减少, CO 增加, 从而使气氛活化。

表 3-77 稀土渗碳时的炉气成分 (体积分数) (%)

工艺条件	$\text{CO}_2$	CO	$\text{O}_2$	$\text{H}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$
880°C 加稀土 $w(\text{CO}_2)=0.1\%$	0.3	14.5	0.8	64.5	14.5	5.2	0.2
不加	0.5	8.1	0.9	67.9	12.9	9.4	0.1

图 3-13 是稀土对渗碳层深度的影响。从图中曲线可以看到, 加入稀土后可使渗碳速度提高 30% 左右。

定碳及金相分析表明, 低温 (860~880°C) 稀土渗碳后, 表面碳浓度 (质量分数) 即使高达 1.5%, 其渗层碳化物、残留奥氏体及马氏体组织均为良好, 而且试验表明具有优异的综合力学性能。由于渗碳温度降低还使齿轮的变形减小。

3) 大型重载齿轮的深层渗碳, 大型重载齿轮的渗层深度通常都在 3mm 以上, 最深可达 6~8mm, 相应渗碳周期也就较长, 最长可达 150~200h。因而深层渗碳工艺的难点就在于既要尽量提高碳势以缩短工艺周期, 又要避免过多而形态

不良的碳化物形成。早期的深层渗碳工艺控制主要依靠过程试棒的定碳分析和深度检查, 现在已基本实现了计算机控制。这里例举一种“气相碳势动态控制”的深层渗碳工艺。这种工艺的要点是在强渗阶段将气相碳势  $C_g$  设定为析出炭黑的临界值  $C_{\text{max}}$ , 以加速渗碳。当工件表面碳浓度  $C$  达到饱和后即进入动态控制的扩散阶段, 在此阶段, 由计算机根据非稳态最优模型来调整  $C_g$ , 使其保持  $C_g = C_{\text{Fe}}$  饱和, 既不出现碳化物, 又保持最大的碳梯度, 创造最快的向内扩散速度。图 3-11 是齿轮渗碳的动态碳势控制实时打印记录曲线。图 3-15 是动态碳势控制和常规工艺的碳浓度分布曲线。动态碳势控制的应用举例见表 3-78。

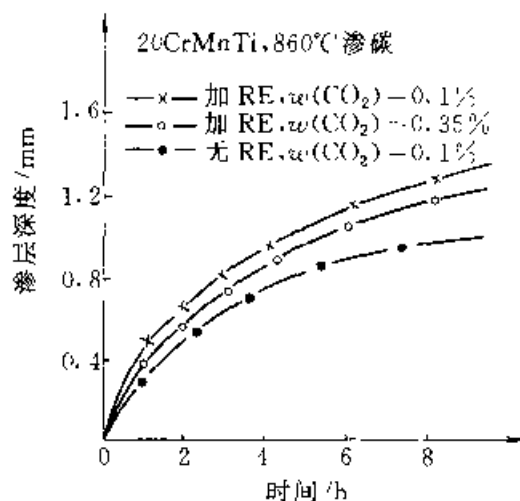


图 3-13 稀土对渗碳速度的影响

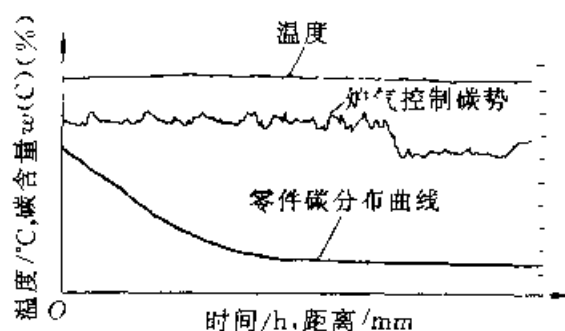


图 3-14 动态碳势控制的记录曲线

注: 1. 炉气控制碳势和温度与时间为—坐标系  
2. 零件的碳含量与距表面距离为另一坐标系

4) 大型焊接齿轮的渗碳, 对直径比较大的重载齿轮采用焊接结构比整体锻造重量可减轻 42%, 可节约优质合金钢 58%, 是当今大型重载齿轮热处理生产的发展方向。



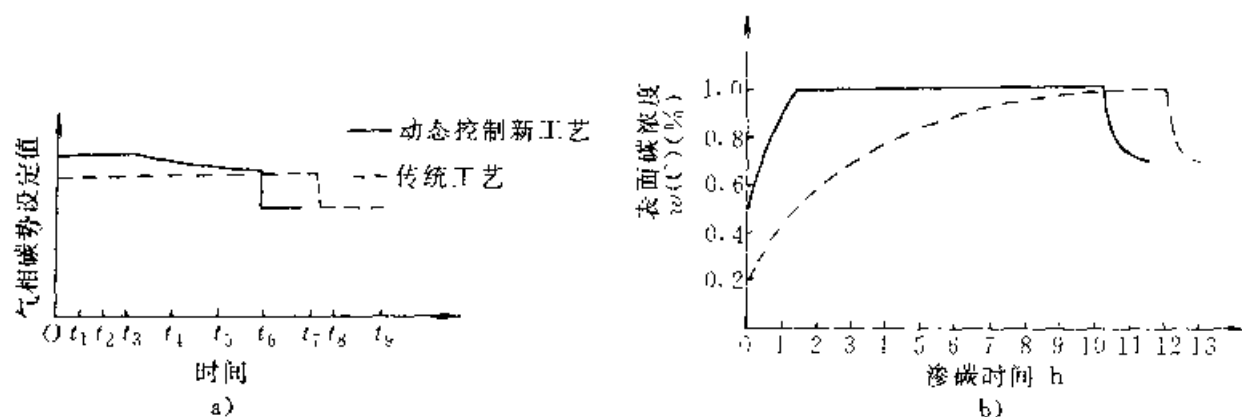


图 3-15 动态碳势控制与传统工艺的对比

表 3-78 动态碳势控制在齿轮深层渗碳中的应用

零件名称	材料	层深要求 'mm	强渗期		中间检查		扩散期		终 检	
			$w(C_s)$ (%)	$h$	层深 'mm	$w(C_s)$ (%)	$w(C_r)$ (%)	$h$	层深 'mm	$w(C_s)$ (%)
高速轮	20CrNi2Mo	2.0~2.4	1.1~1.2	18	2.1	0.95	0.8	6	2.5	0.75~0.80
太阳轮	20CrNi2Mo	3.0~3.5	1.1	13	3.2	0.95	0.7	5	3.5	0.90
太阳轮	20CrNi2Mo	3.5~4.1	1.1	14	3.6	0.95	0.9	7	4.0	0.85~0.90

渗碳焊接齿轮采用先焊接后渗碳淬火的工艺方法, 因而就存在着较大的焊接应力和渗碳淬火应力, 造成齿轮变形, 甚至焊缝开裂。故技术难度较大。为此, 在生产中要采取若干防范措施。以下是渗碳焊接齿轮生产的工艺路线, 可供参考。

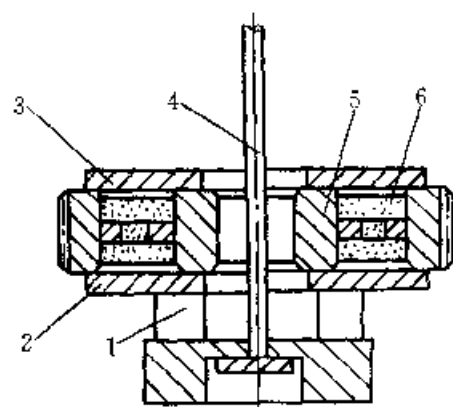


图 3-16 焊接齿轮渗碳前的装夹

1—垫块 2—下盖板 3—上盖板  
4—吊具 5—齿轮 6—耐火泥

齿坯锻造→调质或正火→齿圈粗加工、正火、回火→第二次粗加工, 探伤, 堆焊过渡层, 消除应力退火→堆焊层粗加工, 探伤→轮毂、轮辐与齿圈

成形焊接→去应力退火, 焊缝探伤→粗滚齿→渗碳、球化退火→车去内孔和端面渗碳层, 焊缝探伤→淬火、回火、焊缝探伤→精车、精滚齿或磨齿。

为了有效地防渗及控制淬火冷却速度, 改善冷却均匀性, 焊接齿轮渗碳淬火的装夹就十分重要, 图 3-16 是齿轮渗碳前的装夹图。

### 3. 齿轮渗碳及碳氮共渗热处理后的畸变

(1) 畸变形式, 表 3-79 列举了齿轮渗碳及碳氮共渗淬火后产生的各种畸变形式

表 3-79 渗碳及碳氮共渗齿轮热处理畸变形式举例

齿轮种类	齿轮参数变化	热处理畸变趋势
圆柱齿轮	直径变化	盘状齿轮的齿顶圆直径通常胀大, 轴齿轮齿顶圆直径通常缩小
	齿顶圆及内孔的不均匀变化	由于齿轮材料质量不均匀, 几何形状不均衡及加工不当, 热处理时引起不均匀胀缩, 而形成椭圆

(续)

齿轮种类	齿轮参数变化	热处理畸变趋势
圆柱齿轮	平面翘曲及齿圈锥度	外径较大的盘状齿轮，其端面容易产生翘曲，以及从齿圈形成锥度
	齿向尺寸变化	靠近两端面处齿厚胀得较多，齿宽中部呈凹形
齿轮轴	轴向变化	由于材料、几何形状及工艺等原因造成齿轮弯曲畸变
锥齿轮	齿轴端面及内孔畸变	端面翘曲，内孔呈椭圆
弧齿锥齿轮	螺旋角变化	螺旋角变小，斜齿盘齿轮角度改变较大；斜齿轴齿轮角度改变较小，弧齿锥齿圈、锥齿轮、主动轮角度改变较大
带花键孔齿轮	内孔胀缩	低合金钢齿轮渗碳淬火后，内孔通常缩小；钢材淬透性越高，渗层越厚，则收缩越大；内孔径防渗的齿轮则微胀 40Cr 钢浅层碳氮共渗淬火后，内孔通常胀大
	内孔锥度	通常截面较小处，内孔收缩较大；截面较厚处内孔收缩较小或微胀

(2) 减小齿轮热处理畸变的措施

1) 影响齿轮热处理畸变的因素，表 3-80 是一些主要影响因素。

表 3 80 影响齿轮热处理畸变的主要因素

影响因素	造成齿轮畸变的原因
设计	形状对称性及截面均匀性差，轮辐刚度差
材料	晶粒度不均匀，带状组织严重，淬透性带宽
锻造	锻造流线不对称，锻后冷却不均匀
预备热处理	加热温度过高或过低，冷却不均匀
切削加工	切削量过大，工艺孔位置安排不当
最终热处理	加热不均匀，夹具设计不合理，冷却介质及冷却规范选择不当，渗层质量不均匀

2) 控制齿轮热处理畸变的一般性措施：

①合理的齿轮结构设计。减小齿轮热处理畸变的结构设计原则大致为：a. 加大圆角；b. 形状尽量对称；c. 合理安排键槽；d. 挖槽、打孔，以求均衡冷却；e. 改变支承底面。

②合理地使用淬火夹具及装夹方式。图 3-17、图 3-18 及图 3-19 是几种夹具及装夹方式举例。

③控制齿轮花键孔精度的方法。表 3 81 列举了几种常用的方法。

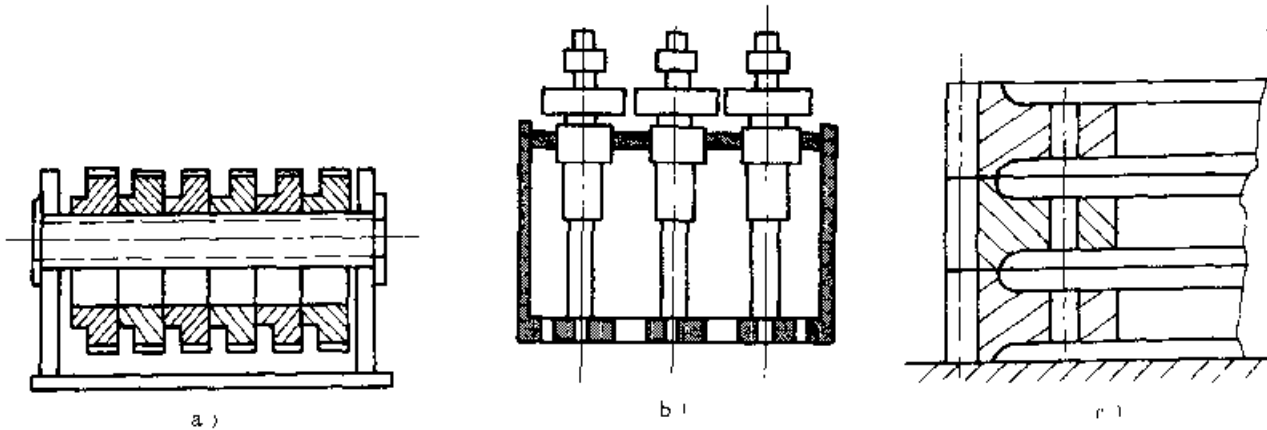


图 3-17 常用的几种夹具

a) 串挂横装夹具 b) 竖装夹具 c) 摆装

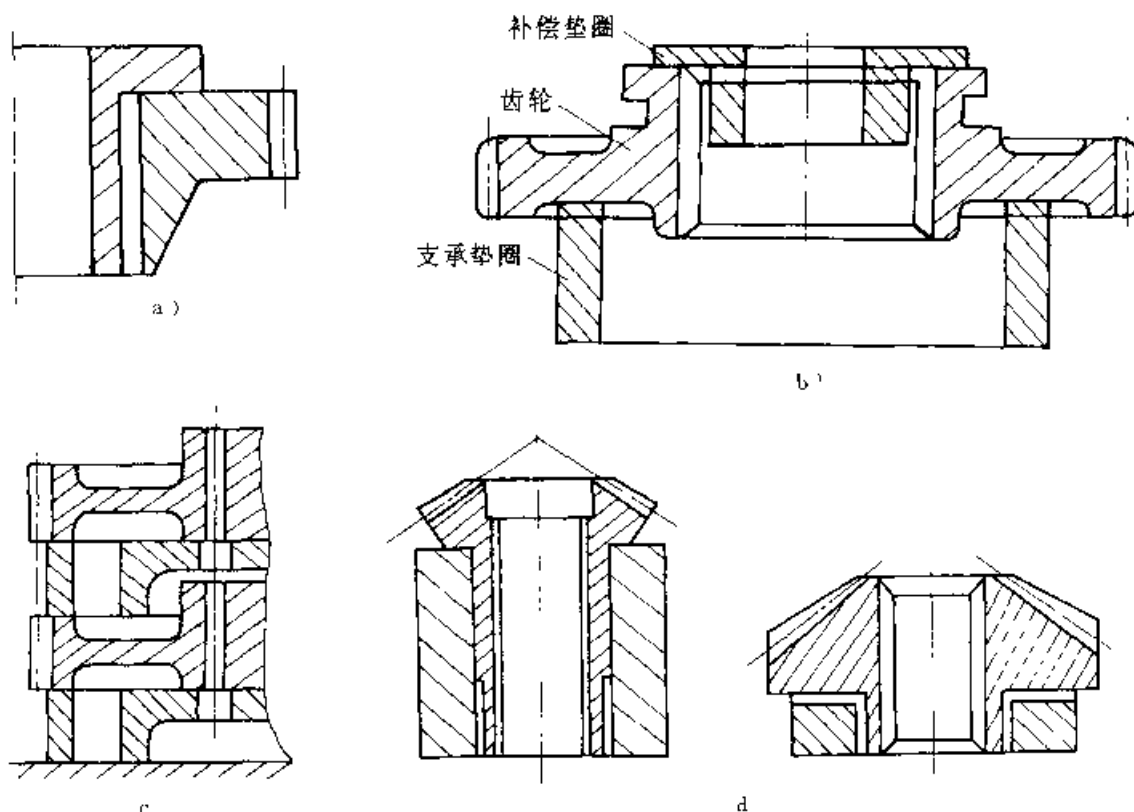


图 3-18 不同形式的垫圈

a) 补偿垫圈 b) 支承垫圈 c) 叠加垫圈 d) 支承垫圈

表 3-81 控制渗碳齿轮花键孔精度的方法

内轮定位方式	控制花键孔精度的方法	加工工艺路线	说 明
内径定位	热处理后挤键宽及磨内孔	机械加工→渗碳、淬火、回火→挤键宽→磨内孔	热处理时对畸变的控制要求不太严, 仅用于内径定位齿轮
	热处理后用推刀精整花键	机械加工→内孔镀铜(或采用其他防渗措施)→渗碳、淬火、回火→去铜→推刀精整花键孔	工序复杂, 花键孔硬度较低, 耐磨性较差, 但精度较高
		机械加工→渗碳(然后空冷、缓冷或再加高温回火)→齿部感应淬火→回火→推刀精整花键孔	省掉镀铜工序, 但需再次感应加热, 齿轮其他方面的精度也较高, 花键孔硬度较低
底径或键侧定位	渗碳后再加热, 套芯棒淬火	机械加工→渗碳(然后空冷或缓冷)→再加热套芯棒淬火→回火	适用于淬火时内孔收缩的齿轮(大部分渗碳齿轮)
	热处理后挤花键孔。花键孔出现锥度者可采用补偿垫圈	机械加工→渗碳后直接淬火→回火→挤花键孔	工序简单, 但用挤刀挤花键孔所能矫正的畸变很有限, 因此应在原材料质量稳定及工艺控制较严的情况下应用
	热处理前对收缩较大的一端施行预胀孔	机械加工→一端预胀孔→渗碳、淬火、回火	适用于热处理时花键孔出现锥度的齿轮
	热处理后电解加工精磨花键孔	机械加工→渗碳、淬火、回火→电解加工精整花键孔	工序简单, 适应性强, 但需有直流电源的电解加工机床

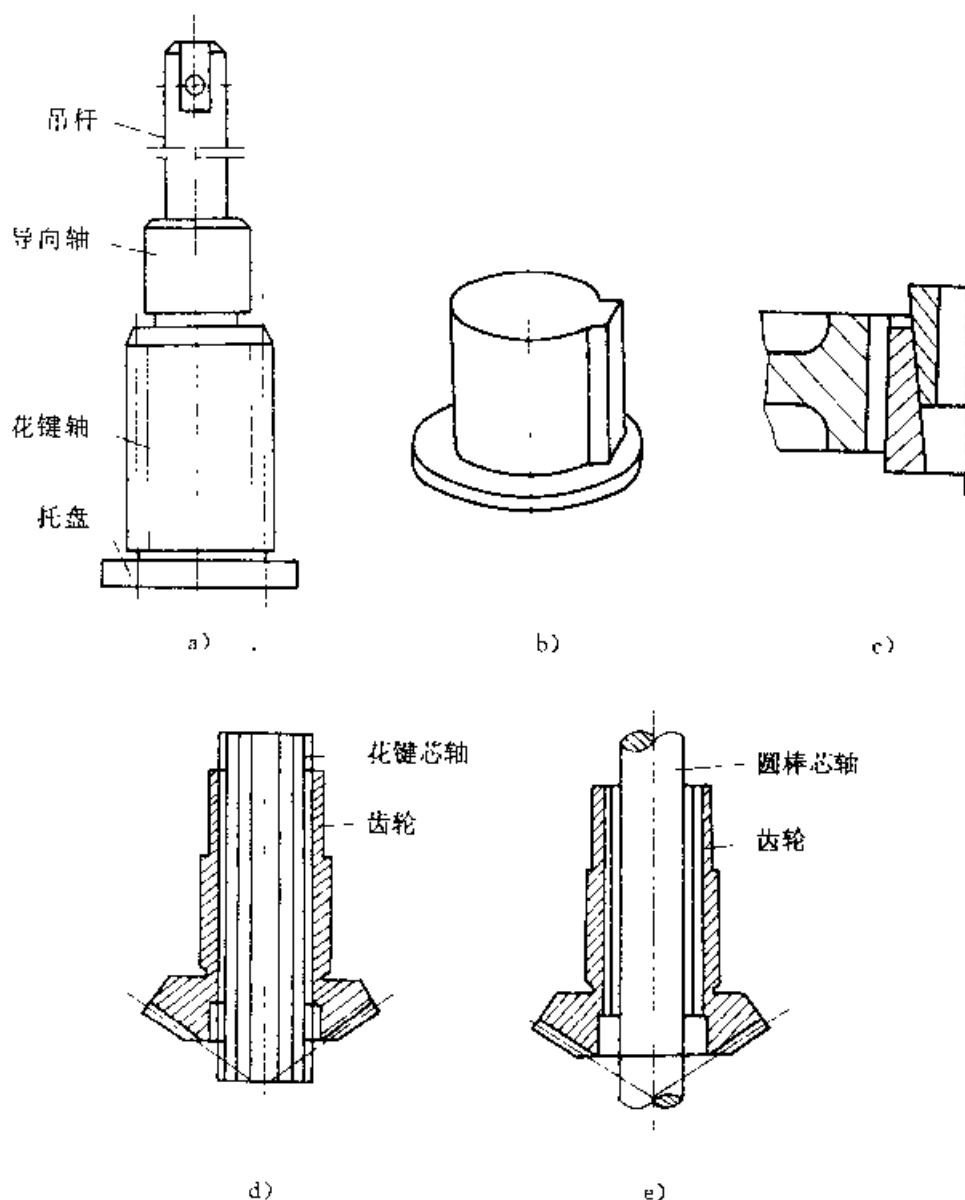


图 3-19 各种花键芯轴及吊具

a) 吊具 b) 花键芯棒 c) 楔形芯棒 d) 花键芯轴 e) 圆棒芯轴

①减小锥齿轮热处理畸变的方法。锥齿轮的渗碳淬火畸变在生产中主要采用模压淬火来控制。图 3-20 是一种典型的脉动淬火压床的结构示意图。表 3-82 列出了两种齿轮压淬的参数。模压淬火齿轮的畸变有时仍不能有效控制,可参考表 3-83 中所列项目进行分析。

②热处理前的齿轮加工尺寸调整,掌握热处理畸变规律,在热处理前调整齿轮的加工尺寸,以补偿热处理畸变,是批量生产齿轮的常用方法。生产中常用 50 件齿轮在给定条件下进行冷加工和热处理,经过对该批齿轮热处理前后的尺寸测量,并对其数据进行统计学处理,得出畸变趋势,然后

确定公差带位置。很显然,加工尺寸的调整是建立在稳定生产的基础之上。

4. 渗碳和碳氮共渗齿轮的常见缺陷 表 3-84 是齿轮进行渗碳和碳氮共渗后的缺陷及预防办法。

#### 5. 渗碳和碳氮共渗齿轮的质量检验

(1) 质量检验方法,齿轮的外观质量、表面裂纹、材料的白点和气孔、畸变及表面硬度等,一般在齿轮本体上进行无损检测,而其他很多项目则是通过工艺试样来检查。表 3-85 是对工艺试样的一些要求和规定。

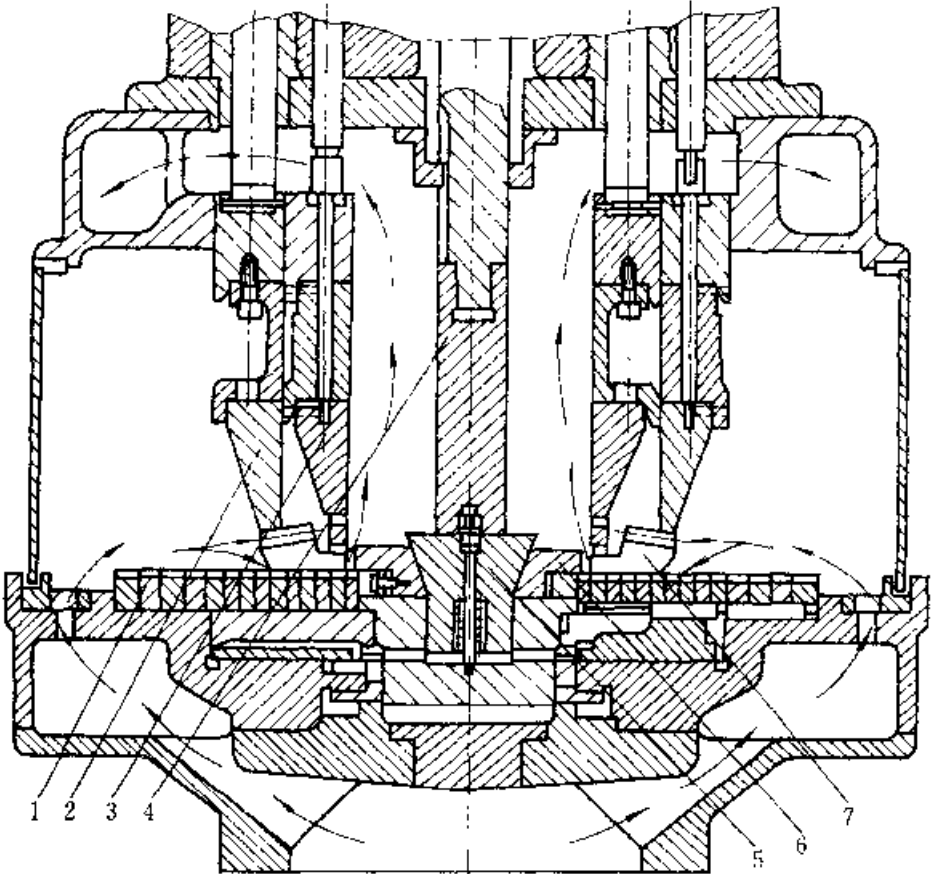
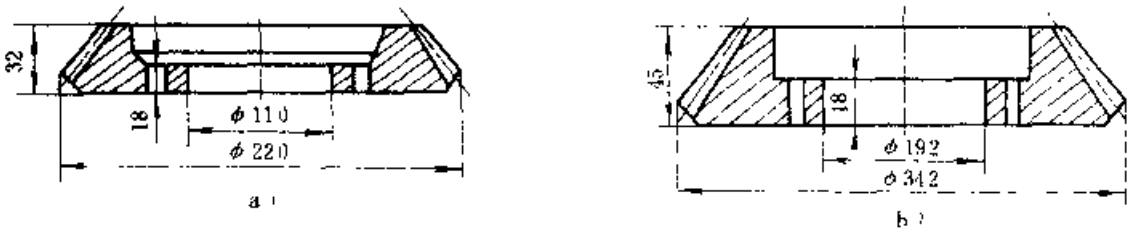


图 3-20 脉动淬火压床结构示意图

1 底模圈 2 外压环 3 内压环 4 芯轴 5 压头 6 扩张环 7 齿轮

表 3-82 齿轮压床淬火参数举例



齿轮	压力/N			冷却条件, 油流量 $\cdot \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$			底模的凸凹量 /mm	压床型号
	内压环	外压环	扩张环	第一阶段	第二阶段	第三阶段		
a)	11740	16003	3910	$\frac{800}{20}$	$\frac{190}{30}$	$\frac{800}{30}$	0	格里森 537 号
b)	30184	52773	9349	$\frac{1130}{10}$	$\frac{180}{60}$	$\frac{1130}{30}$	+0.35	国产 YZ49050 号

表 3-83 压床淬火时锥齿轮畸变失控原因

(续)

畸变情况	主要原因	畸变情况	主要原因
内孔椭圆	1) 锥形胀杆与中心模的锥面配合不好	内端面不平度偏大	1) 中心模压力过大或限位圈内径太大
	2) 中心模工作面或齿轮内孔表面不净		2) 内压环压力太小
	3) 中心模或限位圈尺寸精度低或尺寸选用不当		3) 外压环压力太大
	4) 中心模压力太小		4) 下模面锥度太大
	5) 无压冷却时间太短 (对定压压床而言)		5) 无压冷却时间太长

(续)

畸变情况	主要原因
外端面不平度偏大	1) 外压环压力太小 2) 内压环压力太大 3) 下模面锥度太小 1) 无压冷却时间太长

表 3-84 渗碳和碳氮共渗齿轮的  
常见缺陷及防止措施

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
1	毛坯硬度偏高	正火温度偏低或保温时间不足使组织中残留少量硬度较高(≥250HV)的魏氏组织。正火温度超过钢材晶粒显著长大的温度	应重新制定正火工艺;检查控温仪表,校准温度,控制正火冷却速度
2	毛坯硬度偏低	正火冷却过缓	重新正火,加强冷却
3	带状偏析	钢材合金元素和杂质偏析,一般正火难以消除	更换材料
4	层深不足	碳势偏低;温度偏低或渗期不足	提高碳势;检查炉温,调整工艺,延长渗碳(共渗)时间
5	渗层过深	碳势过高,渗碳(共渗)温度偏高;渗期过长	降低碳势;缩短周期,调整工艺
6	渗层不均	炉内各部分温度不均;碳势不均;炉气循环不佳;工件相互碰撞;齿面有脏物;渗碳时在齿面结焦	齿轮表面清洗干净;合理设计夹具;防止齿轮相互碰撞;在齿轮料盘上加导流罩,保证炉内各部温度均匀;严格控制渗碳剂中不饱和碳氮化合物
7	过共析,共析层比例过大(大于总深度的3/4)	炉气碳势过高;强渗和扩散时间的比例选择不当	降低碳势;调整强渗与扩散期的比例,如果渗层深度允许,可返修进行扩散处理

(续)

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
8	过共析,共析层比例过小(小于总深度的1/2)	炉气碳势过低,强渗时间过短	提高炉气碳势;增加强渗时间;可在炉气碳势较高的炉中补渗
9	表面碳浓度过高形成大块碳(氮)化物网	炉气碳势过高,强渗时间过长	降低碳势,缩短强渗时间;如果渗层深度允许,可在较低碳势炉中进行扩散处理;适当提高淬火温度;进行二次渗层的球化退火
10	表面残留奥氏体过多	碳(氮)含量过高;渗后冷却过快;碳(氮)量析出不够;淬火温度偏高	调整渗碳(共渗)工艺控制碳(氮)含量;从渗碳(共渗)炉或预冷炉中出炉的温度不宜过高;降低淬火温度
11	表面碳量过低	炉气碳势过低,炉温偏高;扩散时间过长	提高碳势;检查炉温,调整强渗与扩散时间的比例
12	表层马氏体针粗大	淬火温度偏高	降低淬火温度
13	表层出现非马氏体组织	升温排气不充分;炉子密封性差,漏气,使表层合金元素氧化,淬火冷却速度低	从设备和工艺操作上减少空气进入炉内;适当提高淬火冷却速度;在渗碳最后10min左右通入适量氨气
14	表层脱碳	渗后出炉温度过高;炉子出现严重漏气;淬火时产生氧化	防止炉子漏气;降低出炉温度;控制淬火时炉内气氛;盐炉淬火脱氧要充分;补渗碳

(续)

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
15	心部硬度偏低	淬火温度过低; 冷却速度不当, 心部游离铁素体过多; 选材不当	提高淬火温度; 加强淬火冷却; 采用两次淬火; 更换材料
16	畸变	淬火温度偏高; 冷却方法不当; 夹具设计不合理, 材料选择不当	调整淬火工艺, 合理设计夹具, 改善冷却条件, 改换钢材

表 3-85 工艺试样的种类及要求

试样种类	用途	技术要求	数量
中间(过程)试样	调整工艺参数, 决定停炉降温时间等	试样材料与齿轮材料相同	按不同工艺及操作水平定
最终试样(圆形或方形试样及齿块)	质量评定: 表面及心部硬度、显微组织、表面碳(氮)浓度、渗层深度及硬度梯度等	1) 与齿轮同批材料, 并在相同条件下预处理 2) 试样的结 果用来说明同炉齿轮的质量时, 必须有试验依据 3) 齿块试样不得少于 3 个齿	1. 间歇炉: 1~2 个 2. 连续炉: 1~2 付 齿轮 1 批 定期检查

用作渗碳层深度测定的试样, 其组织应是平衡态; 若试样已经过淬火, 则推荐用表 3-86 的工艺进行处理。

有效硬化层深度与渗碳层深度之间的关系与试样大小, 钢材成分及冷却条件等因素有关, 应在自己生产条件下找出对应关系。表 3-87 是推荐举例。

(2) 质量检验项目及内容, 渗碳和碳氮共渗齿轮的通常检验项目及内容见表 3-88 和表 3-89。

表 3-86 经淬火的渗碳试样作深度检查前的热处理规范

钢号	加 热		等 温		冷却
	温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /min	温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /min	
10、20	850	20	—	—	空冷
15Cr、20Cr	850	15~20	650	10~20	
20CrMnTi	850	15~20	640	30~60	
12Cr2Ni4	840	15~20	620	180~240	

表 3-87 20CrNi2Mo 钢有效硬化层与渗碳层深度的关系

试样截面 /mm	淬火冷却剂	表面硬度 (HRC)	550HV <sub>0.05</sub> 处 w(C) 的含碳量 (%)	有效硬化层深度 $\delta_{\text{有效}}$ /mm	有效硬化层 $\delta_{\text{有效}}$ /mm
$\phi 30$	静止油	60	0.34	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{1.15}$	$K=1.15$
$\phi 50$	静止油	60	0.40	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{1.0}$	$K=1.0$
$\phi 70$	静止油	60	0.46	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{0.85}$	$K=0.85$
$\phi 30$	静止油	55	0.38	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{1.1}$	$K=1.1$
$\phi 50$	静止油	55	0.52	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{0.80}$	$K=0.80$
$\phi 70$	静止油	55	0.62	$\delta = \frac{\delta_{\text{有效}}}{0.70}$	$K=0.70$

表 3-88 渗碳齿轮的检验项目、内容和要求

序号	检验项目	检验内容及要求
1	原材料质量	用试样检查: 化学成分、低倍组织、晶粒度、淬透性、带状组织
2	毛坯力学性能	用试样检查: 一般检查布氏硬度, 要求严格者按图样检查 $\sigma_1$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta$ 、 $\psi$ 、 $\alpha_k$
3	外观质量	用齿轮检查: 渗碳淬火后 100% 检查表面氧化、裂纹及碰伤
4	渗层深度	用试样检查: 按图样要求, 从表面测到 550HV 深度处为有效硬化层深度, 显微检查渗碳层总深度时, 碳钢: 过共析 + 共析—1/2 过渡区; 合金钢: 过共析 + 共析 + 全部过渡区, 过共析 + 共析层应占总深度为 50%~70%

(续)

序号	检验项目	检验内容及要求
5	表面硬度	用齿轮检查:按图样要求,一般为5h ~64HRC
6	表面碳浓度	用试样检查:按图样要求,一般为 0.75%~1.0%
7	表层显微组织	用试样检查:按 ZB/T04 501--1988 检查,细针马氏体+分散细小碳化物+ 少量残留奥氏体为佳,按标准图,马氏体 和残留奥氏体1~5级合格;对无冲击载 荷的齿轮,碳化物为1~5级,对有冲击 载荷的齿轮,碳化物1~4级合格
8	心部硬度组织	用试样检查:心部硬度: $m \leq 8\text{mm}$ 者 为30~45HRC, $m > 8\text{mm}$ 者为30~ 40HRC; 心部组织:应基本上为板条马氏体+ 少量铁素体;铁素体级别按标准图评级; $m \leq 5\text{mm}$ 为1~4级; $m > 5\text{mm}$ 为1~ 5级合格
9	畸变	用齿轮检查:按图样和工艺要求检查

表 3-89 碳氮共渗齿轮的检验  
项目、内容和要求

序号	检验项目	检验内容及要求
1	原材料质量	同渗碳齿轮
2	毛坯力学性能	
3	外观质量	
4	共渗层深度	用试样检查:按图样要求,硬度法 测到350HV处,金相法测至心部
5	表面碳、氮浓度	用试样检验:一般含碳量0.7% ~0.9%,含氮量0.2%~0.4%
6	表面硬度	用齿轮检查,按图样要求,一般为 57~63HRC
7	表层显微组织	用试样检查:按 QC/T29018- 1991检查,碳氮化物1~5级合格, 马氏体、残留奥氏体1~5级合格, 黑色组织暂不作规定,一般以不影 响表面硬度为佳
8	心部硬度、组织	用试样检查:心部硬度按图样规 定,一般不作统一规定,心部组织按 ZB/T04 001-1988检查,小模数齿 轮为1~4级合格,大模数齿轮1~ 5级合格
9	畸变	用齿轮检查:按图样和工艺要求 检查

### 3.3.3.2 齿轮的渗氮

#### 1. 齿轮渗氮技术参数的确定

(1) 影响渗氮齿轮强度和韧性的因素 表 3-90 所列影响齿轮强韧性能的主要因素。

表 3-90 影响渗氮齿轮力学性能的因素

力学性能	影响因素及其倾向性	
接触疲劳强度	1) 渗氮层深度增加,接触疲劳强度提高 2) 心部强度提高,接触疲劳强度提高 3) 表面硬度提高,接触疲劳强度提高	
弯曲疲劳强度	光滑试样 1) 扩散层深度增加,弯曲疲劳强度提高 2) 氮的固溶量增加,弯曲疲劳强度提高 缺口试样 1) 化合物层越厚,弯曲疲劳强度下降 2) 晶间化合物严重,弯曲疲劳强度下降	
耐磨性及抗咬合性能	有润滑条件 Fe、N最耐磨,ε相次之,γ+ε较差 干摩擦条件 γ最耐磨(γ的韧性起主导作用)	
抗咬合性能	ε相具有最高的抗咬合性能,依次是ε-γ,γ相和纯扩散层	
渗氮层脆性	以ε相为主的化合物层脆性最高,γ单相化合物层的渗层具有高的韧性	

1) 经渗氮后试样冲击韧度下降,2) 预备热处理为正火时,其冲击值比调质的更低,下表为不同材料渗氮后的试验结果

钢号	预备热处理	离子渗氮工艺	冲击韧度 $\alpha_K$ $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
38CrMoAlA	930℃正火	-	92.6
		530℃×12h	27.2
	930℃油淬, 670℃回火	-	105
		530℃×12h	86.6
40Cr	880℃正火	-	80
		530℃×12h	38
	860℃油淬, 600℃回火	-	162
		530℃×12h	72.5
20CrMnTi	930℃正火	-	234
		530℃×12h	25.5
	930℃油淬, 620℃回火	-	251
		530℃×12h	68.2



(2) 渗氮齿轮的技术参数, 齿轮的渗氮层深度可以根据模数按表 3-91 中推荐的数值选用。

表 3-91 齿轮模数与渗氮层深度的关系

模数/mm	公称深度/mm	深度范围/mm
$\leq 1.25$	0.15	0.10~0.25
1.5~2.5	0.30	0.25~0.40
3~4	0.40	0.35~0.50
4.5~6	0.50	0.45~0.55
$> 6$	0.60	$> 0.50$

注: 迄今渗氮齿轮的模数最大到 10mm; 为提高承载能力, 对高速重载齿轮其渗氮层深度已增加到 0.7~1.1mm。

齿轮的渗氮层表面硬度, 根据钢材的不同而有所不同, 见表 3-92。

表 3-92 不同钢材齿轮渗氮层表面硬度参考范围

钢 材	原始状态		渗氮表面硬度 (HV5)
	预备 热处理	硬 度	
45	正火		250~400
20CrMnTi	正火	180~200HBS	550~800
	调质	200~220HBS	600~800
40CrMo	调质	29~32HRC	550~700
40CrNiMo	调质	26~27HRC	450~650
40CrMnMo	调质	220~250HBS	550~700
40Cr	正火	200~220HBS	500~700
	调质	210~240HBS	500~650
37SiMn2MoV	调质	250~290HBS	48~52HRC (超声测定)
25Cr2MoV	调质	270~290HBS	700~850
20Cr2Ni4A	调质	25~32HRC	550~650
18Cr2Ni4W	调质	27HRC	600~800
35CrMoV	调质	250~320HBS	550~700
30CrMoAl	正火	207~217HBS	850~1050
	调质	217~223HBS	800~900
38CrMoAlA	调质	260HBS	950~1200

注: 为提高承载能力, 对高速重载内轮其心部硬度最好调质到 300HBS 以上。

渗氮齿轮的渗层组织可根据使用工况, 参考表 3-90 进行选择。

## 2. 齿轮的渗氮工艺

(1) 制造工艺路线, 表 3-93 是针对不同精度要求的齿轮而采用的制造工艺路线。

表 3-93 渗氮齿轮的制造工艺路线

一般精度要求的 齿轮	锻造→调质(正火)→滚齿→剃齿 →渗氮
精度要求高的 内轮	锻造→正火或退火→粗车→调质 →半精滚齿→去应力处理→精滚齿 →剃齿→渗氮→珩齿

## (2) 预备热处理

1) 调质, 渗氮齿轮的预备热处理应当采用调质, 调质硬度不仅影响心部强度, 同时还影响表面渗氮硬度。渗氮齿轮的心部硬度一般不应低于 300HBS, 表 3-94 是美国渗氮内轮心部硬度规定, 表 3-95 是心部硬度对渗层硬度的影响, 可供参考。

表 3-94 渗氮齿轮的心部硬度规定

钢 号	心部硬度 (HBS)	回火温度/°C
4140	300~340	552
4150	300~340	552
4340	300~340	552
Nitralloy N	260~300 <sup>①</sup>	650~677
Herding II	300~340	552

① 在渗氮过程中硬度会因沉淀硬化提高到 360~415HBS。

表 3-95 最高渗氮层硬度与心部硬度的关系<sup>①</sup>

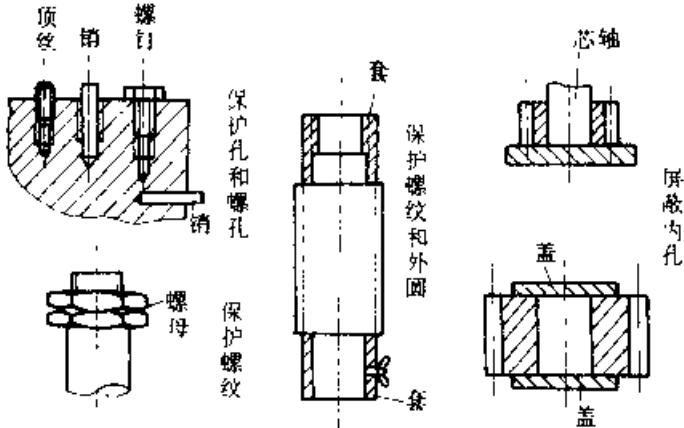
回火温度 /°C	最高渗层硬度 (HRC)	心部硬度 (HBS)	
		回火后	渗氮后
538	56	380	350
566	56	363	343
593	56	342	332
621	51	317	315
649	50	292	292
677	47	258	258

① 材料 4340; 渗氮 524°C×40h。

2) 去应力退火, 去应力退火温度低于调质回火温度, 而高于渗氮温度 20~30°C。

3) 局部防渗, 齿轮不需要渗氮的部位要进行防渗处理, 常用的局部防渗方法见表 3-96。

表 3-96 不渗氮部位的局部防渗法

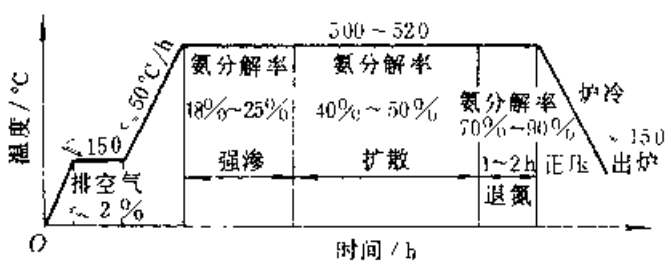
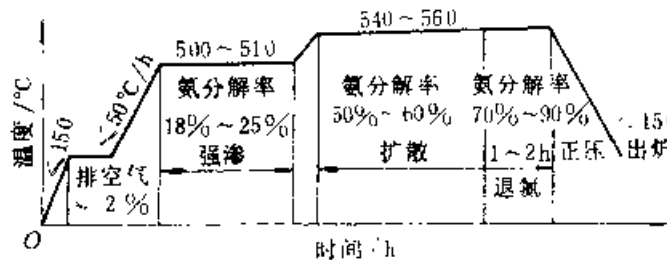
渗氮法	局部防渗法
气体渗氮	1. 镀锡膜：一般膜厚 0.003~0.015mm，当锡膜厚度大于 0.01mm 时，为了防止流锡，可进行 350℃ 左右加热 1~2h 的均锡处理 2. 镀铜膜：一般无孔隙铜膜 0.01~0.02mm 3. 其他有机和无机涂料
离子渗氮	<p>主要采用机械防渗，如下各例：</p> 

(3) 齿轮的气体渗氮工艺

1) 工艺方法，气体渗氮有两种典型的工艺方法，见表 3-97。可根据齿轮材料及不同技术要求进行选择。

气体渗氮温度通常为 500~560℃。渗氮温度的选择与齿轮材料、渗层深度及齿面硬度等因素有关。图 3-21 是渗氮温度对渗层深度及表面硬度的影响。渗氮时间与渗层深度的关系见图 3-22。

表 3-97 齿轮气体渗氮工艺方法及其应用

工艺方法	工艺曲线	说 明
一段（或等温）渗氮法		渗氮温度低，相应变形小，但工艺周期较长，而且易产生高脆性氮层 适用于硬度要求高，渗层浅，以及容易变形的齿轮
二段渗氮法		可以缩短工艺周期，适用于不仅要求硬度高，而且渗层较厚的齿轮

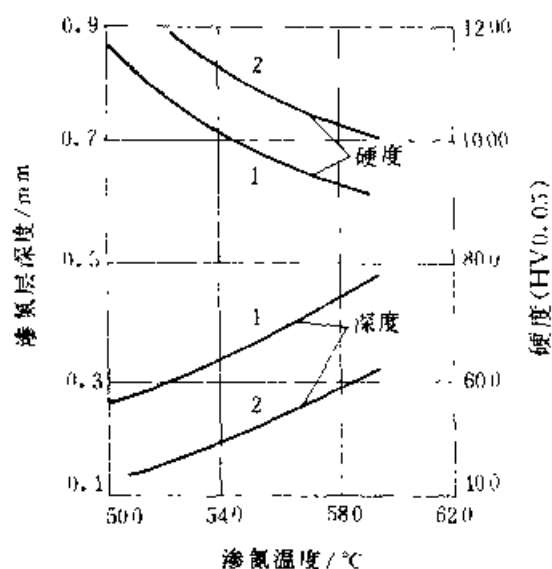


图 3-21 渗氮温度对 38CrMoAl 钢渗层深度及表面硬度的影响  
1 离子渗氮 2 气体渗氮

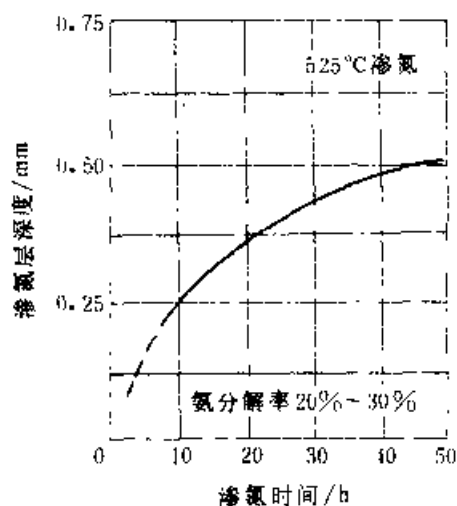


图 3-22 38CrMoAl 钢一段法渗氮时渗层深度与渗氮时间的关系

渗氮时的氨分解率与渗氮温度的关系见表 3-98。氨分解率增加到 60%~65% 对硬度和深度的影响不大（见图 3-23）。为了控制脆性相  $\epsilon$  的生成，应增大氨分解率。

表 3-98 氨分解率与渗氮温度的关系

渗氮温度/°C	氨分解率(%)
500~520	20~40
520~540	30~50
540~560	40~60

## 2) 齿轮气体渗氮工艺举例

① 机床齿轮，两种机床齿轮的渗氮工艺见图 3-24 和图 3-25。

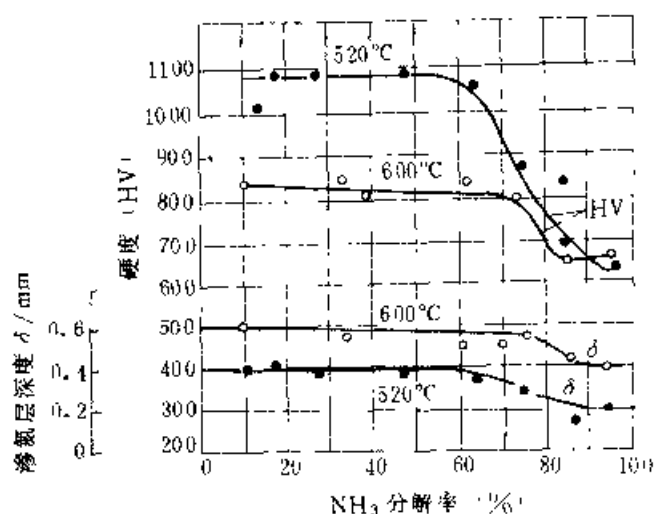


图 3-23 氨分解率对 38CrMoAl 钢渗氮层深度及硬度的影响

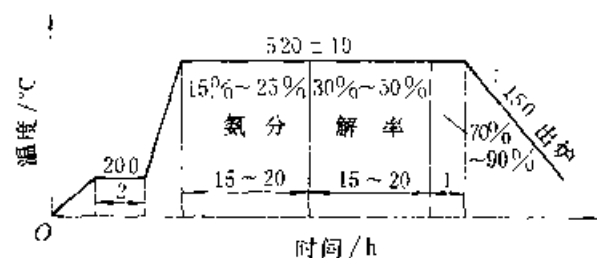


图 3-24 38CrMoAl 钢齿轮的渗氮工艺  
齿轮模数：3mm 要求层深：0.25~0.40mm

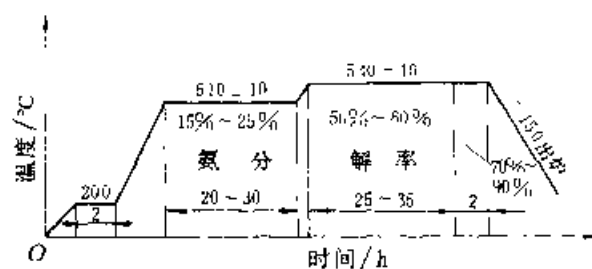


图 3-25 20CrMnTi 钢齿轮的渗氮工艺  
齿轮模数：5mm 要求层深：0.45~0.55mm

② 高速齿轮，30 万 t 合成氨离心空气压缩机的一种 GJK250 增速器齿轮，材料 25Cr2MoV，要求层深 0.45~0.55mm。

该齿轮渗氮前经调质、去应力处理，精滚齿及跑合。渗氮及预备热处理工艺见表 3-99，渗氮结果见表 3-100。

表 3-99 齿轮预备热处理及渗氮工艺

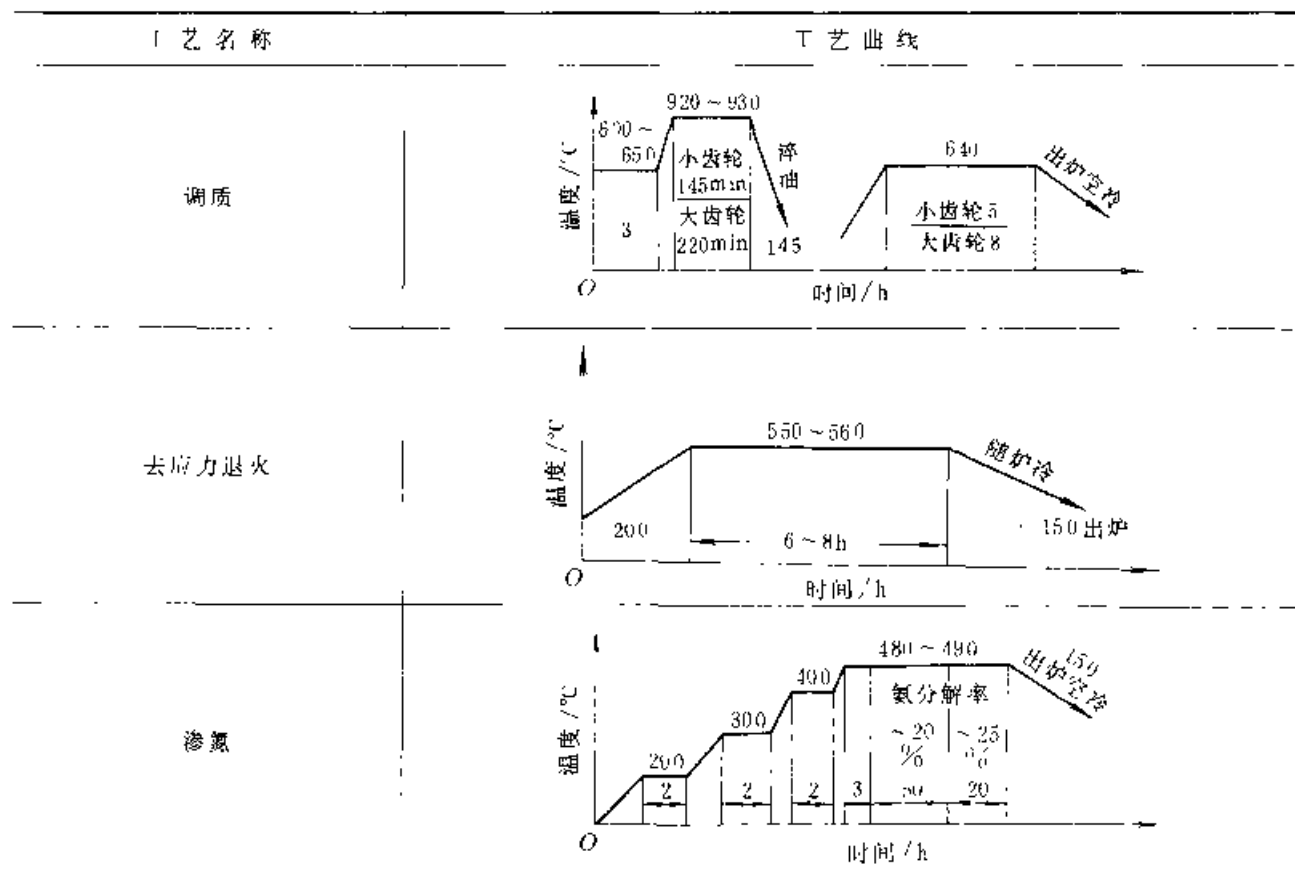


表 3-100 齿轮渗氮结果

(续)

渗层深度/mm	齿面硬度(HV)	渗层脆性	表层组织
0.5	688~713	1级	0.01mm的ε相及近表层脉状氮化物

(4) 内轮的离子渗氮工艺，离子渗氮工艺比气体渗氮工艺有渗速快、畸变小及化合物层的相组成容易控制等优点。不过，影响工艺稳定性的因素也较多，设备维护也要难一些。

1) 离子渗氮工艺，齿轮离子渗氮工艺参数的选择及控制要点见表 3-101。

表 3-102 为常用齿轮渗氮钢材离子渗氮时渗层深度、表面硬度与渗氮温度和渗氮时间的关系曲线，可供制定齿轮离子渗氮工艺时参考。

表 3-101 齿轮离子渗氮工艺参数的选择

工艺参数	选择范围	说明
辉光电压	一般保温阶段保持在 500~700V	与气体电离电压，炉内真空度及工件与阳极间距离有关

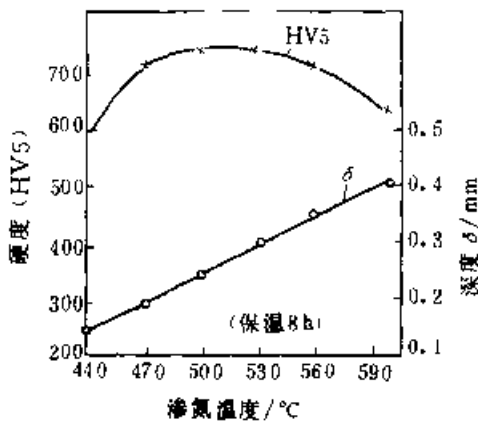
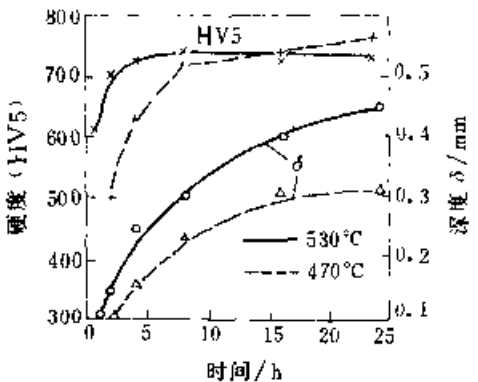
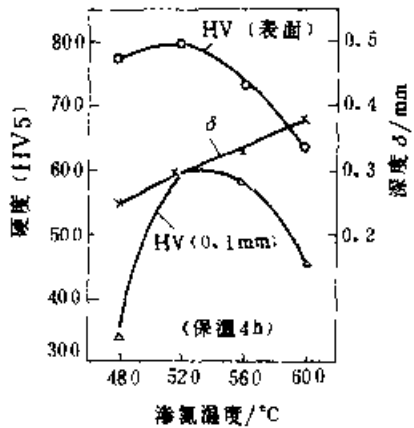
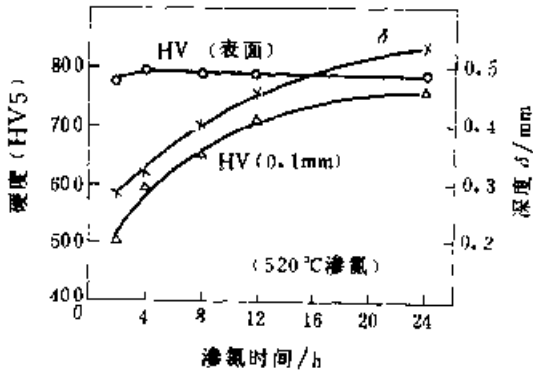
工艺参数	选择范围	说明
电流密度	2~15mA/cm <sup>2</sup>	电流密度大，加热速度快，但电流密度过大将使辉光不稳定，易打弧
炉内真空度	133.322~1333.22Pa，生产上常用 266~533Pa（辉光层厚度为 5~0.5mm）	当炉内压力低于 133.322Pa (1torr) 时达不到加热目的，而当压力高于 1333.22Pa (10torr) 时，辉光将受到破坏而产生打弧现象，造成工件局部烧熔
渗氮气体	液氮挥发气，热分解氨或氮氢混合气	液氮虽使用简单，但渗层脆性大；氨热分解后得到 1:3 的氮氢混合气可改善渗层性能；氮氢混合气可调整炉气氮势，从而控制渗层相组成成分

(续)

(续)

工艺参数	选择范围	说 明	工艺参数	选择范围	说 明
渗氮温度	含 Al 钢宜采用二段渗氮法: 第一阶段 320~530°C 第二阶段 560~580°C	对某些精度要求较高的齿轮,为减少畸变,也可采用等温(一段)渗氮工艺,一段 510~530°C,但渗氮时间较长	渗氮时间	0.2 ~ 0.6mm	渗层深度与时间存在着以下关系: $\delta = K \sqrt{D\tau}$ , $\delta$ —渗层深度(mm); $\tau$ —渗氮时间(h); $D$ —扩散系数; $K$ —常数 即渗氮时前期渗速较快,以 35CrMo 钢为例,在 530°C 渗氮时,6h 可以获得 0.3mm 的深度;而要达到 0.5mm 的深度,则需 25h 左右的时间
	不含 Al 钢一般采用等温(一段)渗氮工艺, 520~550°C	当渗氮温度高于 530°C 时,易破坏合金氮化物与基体的共格结合,还会使氮化物发生集聚,导致渗层硬度下降		时,渗氮时间通常在 8~30h	

表 3-102 离子渗氮温度和渗氮时间对各种处理态的  
齿轮钢材渗氮层深度和表面硬度的影响

序号	钢号	关系曲线
1	18Cr2Ni4WA (正火+回火 26~28HRC)	 
2	20CrMnTi (调质)	 

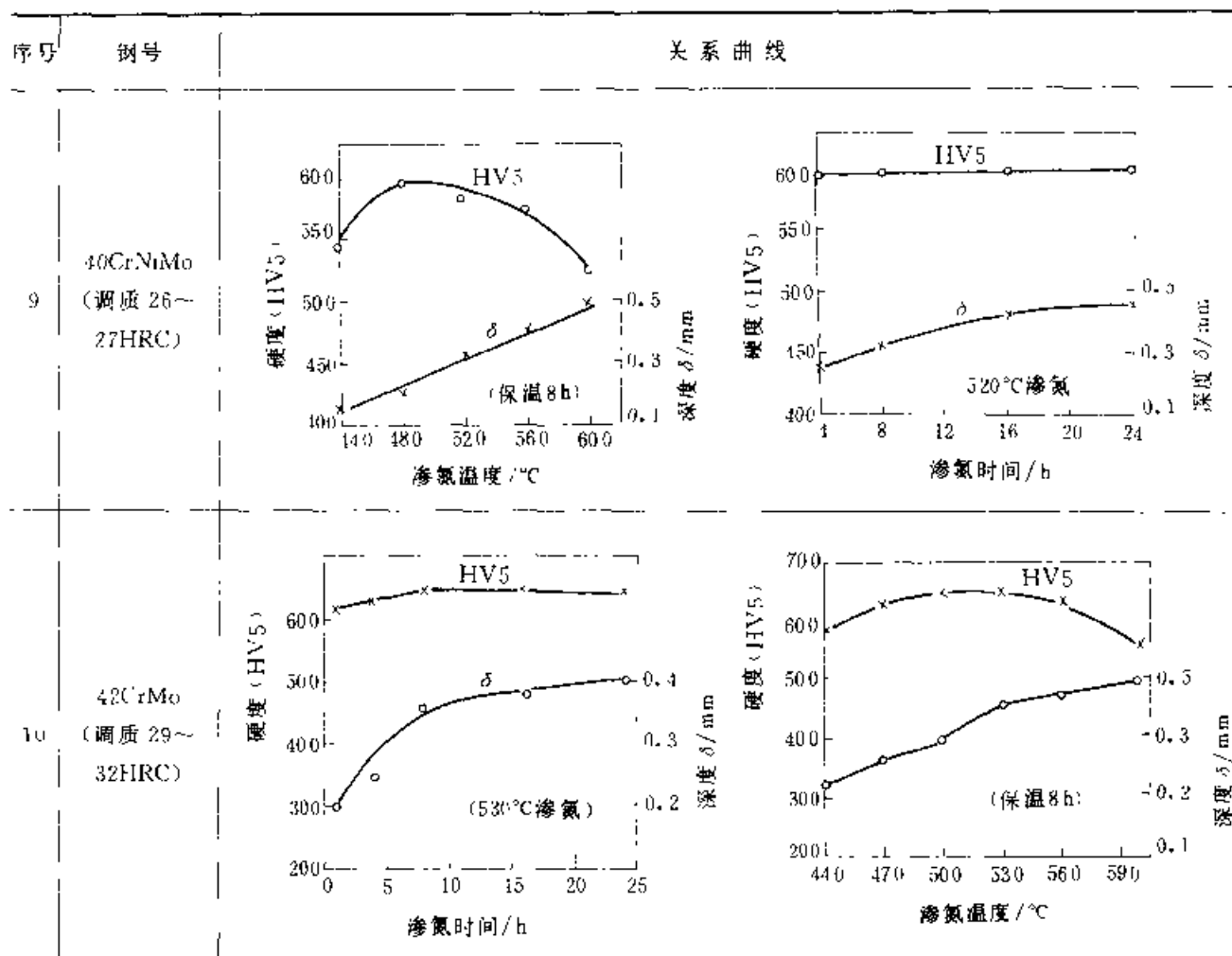
(续)

序号	钢号	关系曲线
3	30CrMoAl 30CrMnAl (正火)	<p>硬度(HV5): 1000, 800, 600, 400, 200, 0</p> <p>深度 <math>\delta</math>/mm: 0.5, 0.3, 0.1</p> <p>保温8h正火态</p> <p>渗氮温度/°C: 500, 530, 560, 590</p> <p>Legend: 30CrMoAl (x), 30CrMnAl (+)</p>
4	30CrNi3	<p>硬度(HV5): 600, 500, 400, 300, 200</p> <p>深度 <math>\delta</math>/mm: 0.1, 0.3, 0.2</p> <p>(保温8h)</p> <p>渗氮温度/°C: 440, 470, 500, 530, 560, 690</p> <p>硬度(HV5): 700, 600, 500, 400, 300, 200</p> <p>深度 <math>\delta</math>/mm: 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1</p> <p>渗氮时间/h: 0, 5, 10, 15, 20, 25</p> <p>Legend: 530°C (solid line), 470°C (dashed line)</p>
5	35CrMo (调质 32HRC)	<p>硬度(HV5): 700, 600, 500, 400, 300, 200</p> <p>深度 <math>\delta</math>/mm: 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1</p> <p>(保温8h)</p> <p>渗氮温度/°C: 440, 470, 500, 530, 560, 590</p> <p>硬度(HV5): 700, 600, 500, 400, 300, 200</p> <p>深度 <math>\delta</math>/mm: 0.5, 0.4, 0.3, 0.2</p> <p>渗氮时间/h: 0, 5, 10, 15, 20, 25</p> <p>Legend: 530°C (solid line)</p>

(续)

序号	钢号	关系曲线
6	35CrMnSi (调质 280HV)	<p>硬度 (HV5)</p> <p>深度 <math>\delta</math> / mm</p> <p>(保温 8h)</p> <p>渗氮温度 / °C</p>
7	38CrMoAlA (调质)	<p>硬度 (HV5)</p> <p>深度 <math>\delta</math> / mm</p> <p>(保温 8h)</p> <p>渗氮温度 / °C</p> <p>硬度 (HV5)</p> <p>深度 <math>\delta</math> / mm</p> <p>渗氮时间 / h</p> <p>520°C</p> <p>540°C</p>
8	40Cr	<p>硬度 (HV5)</p> <p>深度 <math>\delta</math> / mm</p> <p>(520°C 渗氮, 调质态)</p> <p>渗氮时间 / h</p> <p>硬度 (HV5)</p> <p>深度 <math>\delta</math> / mm</p> <p>(保温 8h, 正火态)</p> <p>渗氮温度 / °C</p>

(续)



## 2) 齿轮离子渗氮工艺举例

① 机床齿轮, 图 3-26 是一机床齿轮的离子渗氮工艺曲线。

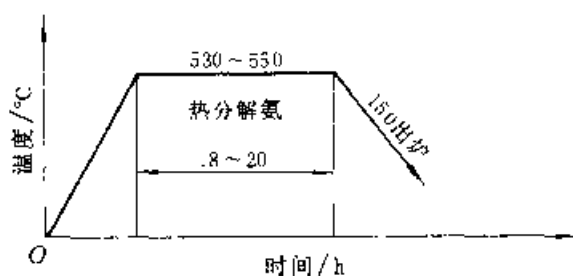


图 3-26 38CrMoAl 齿轮离子渗氮工艺

内轮模数: 3mm 要求层深: 0.25~0.40mm

② 船闸启闭机齿轮, 图 3-27 为齿轮离子渗氮的工艺曲线。

氮碳共渗温度一般为 570°C, 低于此温度渗速太慢, 高于此温度表层易产生疏松结构。

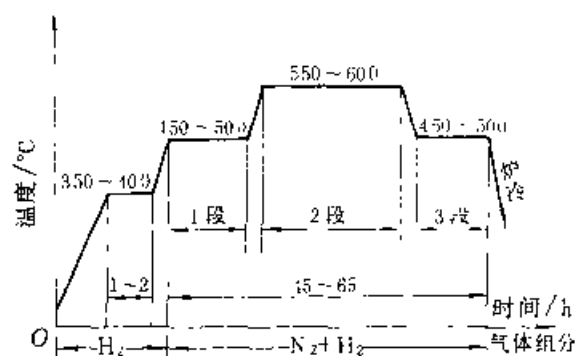


图 3-27 船闸启闭机齿轮离子渗氮工艺

齿轮模数  $m_n$ : 6mm,  $\beta$ : 9°22'

材料: 25Cr2MoV 要求渗氮层深: 0.7~0.9mm

(5) 齿轮的氮碳共渗工艺, 氮碳共渗能显著提高齿轮的耐磨性, 抗咬合和抗擦伤能力及耐疲劳性能。

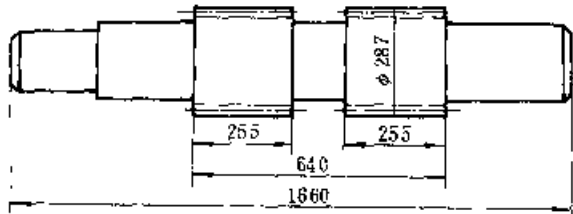
表 3-103 是常用几种齿轮钢材的氮碳共渗工艺及结果。表 3-104 是一卷扬机齿轮氮碳共渗工艺举例。



表 3-103 几种常用齿轮钢材氮碳共渗工艺及结果

钢 材	工 艺 号	化 合 层		扩 散 层		备 注
		厚度/ $\mu\text{m}$	硬度(HV0.05)	侵蚀层/mm	硬化层/mm	
45	1	10~12	562~685	0.2~0.4		HV0.1
	2	24~26	760		0.55	
	3	7~15	550~700	0.35~0.55		
	4	10~25	450~650	0.24~0.38		
40Cr	1	7~15	211~772	0.15~0.25		HV0.1
	2	20~24	960	0.40	0.30	
	3	6~12	550~800	0.10~0.20		
	4	4~10	560~600	0.12		
30CrMoA	1	7~12	888~940	0.10~0.20		HV0.1
	2	20~22	1170	0.35	0.22	
	3	5~12	900~1100	0.10~0.20		
30CrMo	2	19~21	960	0.40	0.32	
35CrMo	3	5~12	650~800	0.10~0.20		HV0.1
18Cr2Ni4W	1	9~10	860		0.27	560℃×4h
工 艺 号	氮碳共渗工艺				温度/℃	时间/h
1	酒精+氨				570	3
2	盐酸催渗气体氮碳共渗					2
3	尿素					3
4	甲酰胺+尿素					2

表 3-104 卷扬机圆弧齿轮氮碳共渗工艺

项 目	技术参数、热处理工艺及处理结果
齿轮结构及尺寸	
齿轮参数	$m_n = 10\text{mm}$ , $z = 35$ , $\beta = 18^\circ 11' 22''$ , $A = 800\text{mm}$
材料及预备处理	35SiMnMo (860±10)°C, 油淬, 570°C 回火; 286HBS

(续)

项 目	技术参数、热处理工艺及处理结果
氮碳共渗工艺	
处理结果 (硬度、深度)	

3. 渗氮齿轮的常见缺陷 渗氮齿轮的常见缺陷产生的原因及防止措施见表 3-105。

4. 渗氮齿轮的质量检验 渗氮齿轮的通常检验项目及内容见表 3-106。

表 3-105 渗氮齿轮的常见缺陷及防止措施

序号	缺陷名称	产生原因	防止措施
1	心部硬度偏低	预备热处理时淬火温度偏低, 出现游离铁素体; 调质回火温度偏高; 调质淬火冷却速度不够	提高淬火温度; 充分保温, 调质回火温度不宜超过渗氮温度过多
2	渗氮层深度过浅	渗氮温度偏低; 氮势不足; 保温时间过短	提高渗氮温度; 检查漏气; 提高氮势; 增加保温时间
3	表层高硬度区太薄	第一段渗氮温度过低, 时间偏短; 或第二段渗氮温度过高	调整第一段渗氮温度、延长保温时间
4	硬度梯度过陡	第二段渗氮温度偏低, 时间过短	提高第二段渗氮温度, 延长保温时间
5	渗层深度不均匀	渗氮温度不均匀; 工件之间相互碰接; 气流速度过大	正确设计夹具; 合理装炉; 气体流量控制适中; 离子渗氮采用分解氨; 改善炉内工件温度的均匀度
6	局部软点	工件表面有氧化皮或其他脏物; 防渗镀涂时污染	渗氮前仔细清洗表面; 仔细进行防渗镀涂
7	表面硬度偏低	材料有错; 渗氮温度过高或过低; 渗氮时间不够; 氮势偏低	检查核对材料, 调整渗氮温度和时间, 降低氨分解率; 检查炉子漏气



# 第 4 章 滚动轴承零件的热处理

洛阳轴承研究所 贾刚、王中玉

滚动轴承品种很多,但结构上一般均由外套、内套、滚动体(钢球、滚柱、滚针)和保持架等组成。目前,最小的轴承内径仅为 0.6mm,最大轴承的外径达 5m 以上。滚动轴承大多集中在高载荷(如球轴承的接触应力达 4900MPa,滚柱轴承达 2940MPa),并承受交变应力,以及高转速( $dN$  值高达  $1.5 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ )的条件下服役。其失效的主要形式是疲劳磨损。因此,通常要求滚动轴承应具有:高的抗疲劳性能、高的耐磨性及良好

的尺寸稳定性,最终表现为使用寿命长。对于在化工工业、航空工业、原子能工业、食品工业以及仪器、仪表等所用的滚动轴承还需具有耐腐蚀、耐高温、抗辐射及防磁等特性。因此滚动轴承用材料种类较多,常用滚动轴承用钢与合金及用途见表 4-1。热处理对提高滚动轴承内在质量,延长使用寿命起着重要的作用,所以热处理在轴承制造过程中是关键工序。一般滚动轴承零件的加工过程列于表 4-2。

表 4-1 常用滚动轴承用钢(合金)及应用范围

类别	牌 号	采用标准及附加技术要求	材料规格 供应状态	用 途	最高工作 温度/℃
高 碳 铬 轴 承 钢	GCr6、GCr9 GCr9SiMn GCr15、ZGCr15、HGCr15 GCr15SiMn ZGCr15SiMn GCr18Mo GCr15SiMo HGCr15		棒、管、条、钢 丝、热轧或锻制、 退火或不退火、 冷拉钢丝均为退 火状态	套圈和滚动体(钢球、滚针、圆柱 滚子、圆锥滚子、球面滚子) GCr15、GCr9SiMn 制造套圈壁厚经特殊热处 $\leq 12\text{mm}$ ,滚子直径 $\leq 22\text{mm}$ ,钢球 直径 $\leq 50\text{mm}$ GCr15SiMn 制造套圈壁厚 $\geq 12$ $\sim 40\text{mm}$ ,滚子直径 $\leq 55\text{mm}$ GCr18Mo 制造套圈壁厚 $\geq 12 \sim$ $40\text{mm}$ ,滚子直径 $\leq 55\text{mm}$ GCr15SiMo 制造套圈壁厚 $\geq$ $50\text{mm}$ ,滚子直径 $\geq 55\text{mm}$	轴承工作 温度 $\leq 100$ ; 特殊热处 理( $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ )轴承 工作温度可 到 180;在低 转速小负荷 时可达 250
限 制 淬 透 性 轴 承 钢	GCr4	试制技术条件	棒、条、热轧或 锻制退火或不退 火	套圈和滚子 该钢适用壁厚 $\geq 14\text{mm}$ 的铁路轴 承。该钢 TSH 表面淬火后可获得高 的表面硬度,60~66HRC,中心硬 度 35~45HRC,晶粒细化,表面呈 压应力。用于承受高的冲击负荷条 件下工作轴承。如铁路轴承内套、轧 机轴承等	轴承工作 温度 $\leq 100$ 高冲击负荷 条件下工作轴 承

(续)

类别	牌 号	采用标准及附加技术要求	材料规格供应状态	用 途	最高工作温度/°C
渗碳钢	08、10 15Mn、15Cr、20Cr G20CrMoA G20CrNiMoA G20CrNi2MoA G20Cr2Ni4A	GB699 GB3203	板、棒、管、热轧或锻制、冷拔、退火或不退火	套圈和滚子 08、10 钢板制作 BK、HK 型冲压滚子及轴承内套 15Mn 钢制万向节轴承外套 15Cr、20Cr、G20CrMoA 用作滚针轴承保持架 G20CrNiMo、G20CrNi2MoA 制作铁路货车轴向轴承 G20Cr2Ni4A、G20Cr2Mn2MoA 制作轧机轴承、承受高冲击负荷的轴承	轴承工作温度 $\leq 100$
不锈钢	9Cr18 9Cr18Mo 1Cr18Ni9Ti	GB3086 GB1220	棒、条料、钢丝、热轧或锻制、冷拔、退火	套圈和滚动体 适用于在腐蚀介质和高温下工作的轴承。淬火后,在低于 400°C 回火,具有耐腐蚀性,它适用于在海水、河水、蒸馏水、硝酸、高温蒸气等介质工作套圈和滚动体,微型轴承套圈和滚动体,以及高真空和 -253~+350°C 范围内工作轴承套圈和滚动体。1Cr18Ni9Ti 制作防磁轴承以及耐腐蚀轴承保持架	轴承工作温度 -253~+350 低温、高温、耐腐蚀轴承零件
高温轴承钢	Cr14Mo4 Cr4Mo4V HCr4Mo4V W18Cr4V W9Cr4V2Mo W6Mo5Cr4V2 GCrSiWV H10Cr4Mo4Ni4V	GB1205 YB688  GB9943 GB9943 GB9943 试制技术条件 试制技术条件	棒、条料、钢丝、热轧或锻制、冷拔、退火	套圈和滚动体 H10Cr4Mo4Ni4V 适用于制造 $\geq 2.5 \times 10^4$ r/min 高温高速航空发动机主轴承和高温轴承	Cr14Mo4、Cr4Mo4V、HCr4Mo4V 轴承工作温度 $\leq 315$ ,其他高温轴承钢可达到 500, GCrSiWV 轴承工作温度 $\leq 250$
中碳钢	55SiMoVA 50CrNiA 40CrA	试制技术条件 GB3077 GB3077	棒、条料 条料 带	套圈、钢球和滚子、螺旋滚子在泥浆条件下,承受高的冲击负荷轴承,如井下动力钻具(螺杆、涡轮)、滚动轴承以及石油、矿山、煤矿之车轮钻头滚动体。制造耐冲击滚子,如坦克上使用。制造螺旋滚子轴承中滚子,适用轧钢机辊道辊子支撑部分	轴承工作温度 $\leq 120$

(续)

类别	牌 号	采用标准及附加技术要求	材料规格供应状态	用 途	最高工作温度, °C
特大型轴承钢	20Cr2Ni4A 20Cr2Mn2MoA	GB3203	棒、套圈毛坯	套圈、滚子 制造直径 $\leq 2\text{m}$ 轴承, 承受高冲击负荷轧钢机轴颈轴承, 有时也用于安全性、可靠性高的中小型轴承	轴承工作温度 $\leq 100$
	5CrMnMo 42CrMo 42SiMn 45Mn 50Mn	GB1299 GB3077 GB3077 GB699 GB699	套圈毛坯	套圈 适用制造大型回转轴承, 用于矿山机械、工程机械及其他需要两部分作相对回转的机械	轴承工作温度 $\leq 100$
	GCr15SiMo GCr15SiMn	YB(T)1 和试制技术条件	棒、套圈毛坯	套圈和滚子 制造套圈直径 $\leq 2\text{m}$ 轴承, 用于冲击负荷小、高耐磨的大型轴承, 如雷达回转轴承	轴承工作温度 $\leq 100$
	00Cr40Ni55Al3	试制技术条件	棒、条、线	套圈和钢球, 适用于制造高温、高真空、防磁和耐腐蚀(抗硝酸、硫化氢介质、海水等)轴承	轴承工作温度 $\leq 500$
防磁轴承用钢或合金	Cr23Ni28Mo5Ti3Al	试制技术条件	棒、条	套圈和钢球。制造高温、高压、水腐蚀、低负荷无磁轴承	轴承工作温度 $\leq 250$
	70Mn18Cr4V2WMoV	试制技术条件	棒、条	套圈和钢球。制造石油钻探用防磁轴承	轴承工作温度 $\leq 250$
	7Mn15Cr2Al3V2WMo	GB1299	棒、条	套圈和钢球。制造大型板坯连铸机及结晶用无磁轴承	轴承工作温度 $\leq 100$
	Monelk-500	试制技术条件	棒、条	套圈和钢球。制造抗氢氟酸、海水等腐蚀介质工作轴承	轴承工作温度 $\leq 100$
	00Cr15Ni60Mo16W4	试制技术条件	棒、条	套圈和钢球。制造耐腐蚀轴承	轴承工作温度 $\leq 150$
	QBe2.0	YS/T339 GB3134	棒、丝	套圈和钢球。制造无碳仪表轴承	轴承工作温度 $\leq 150$
保持架、铆钉、支柱等用钢	08、10	GB699 GB710 BQB402	钢板、带、厚钢板、冷轧薄钢板及钢带	制造深沟球轴承、圆锥滚子轴承保持架、挡盖、密封圈等	
	30、40、45	GB699	钢板和保持架毛坯	制造大型轴承实体保持架	
	ML15 ML20	GB5955	冷拉圆钢丝	制造保持架铆钉和支柱	
	T8A T9A	GB3525 GB1298	带、钢丝	制造冲压冠型保持架、防尘盖、弹簧圈	
	65Mn	GB3525 GB4357	带、丝	制造耐腐蚀冲压保持架	
	0Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti Cr17Ni2	GB4239 GB3280 GB4240 GB1220	钢带、板、丝棒	制造耐腐蚀实体保持架	
	S16SiCuCr 石墨钢	试制技术条件		制造润滑保持架	
	40CrNiMoA	GB3077	棒料	制造高温、高速实体保持架	工作温度 $\leq 350$

(续)

类别	牌 号	标 准	材料规格 供应状态	用 途	最高工作 温度/°C
保持架、铆钉、支柱等用非铁金属	QA110-3-1.5	GB3808 GB/T1528	挤制(R)青铜 棒 直径 5~160mm; 挤制(K)青铜 管 外径 $\phi 20 \sim \phi 250\text{mm}$ , 壁厚 3~50mm	工作温度 $\leq 200^\circ\text{C}$ 实体保持器, 代号 Q1	$\leq 200$
	QSi3.5-3-1.5	GB13808	挤制(R)直径 40~120mm	工作温度 $\leq 200^\circ\text{C}$ 实体保持器, 代号 Q2	$\leq 200$
	HPb59-1	GB/T1528 GB4423	挤制(R)管 外 径 $\phi 20 \sim \phi 300\text{mm}$ , 壁厚 1.5~50mm; 挤制(R)棒直 径 10~160mm	制造实体保持器, 代号 M	
	H62	GB4423	挤制 10~160mm 棒	制造隔离块	
		GB2041	冷轧板厚度 0.2~10mm	冲压保持架	
		GB2060	带厚度 0.05~2.0mm 宽 20~600mm		
		GB/T1527	拉制管外径 $\phi 3 \sim \phi 360\text{mm}$ , 壁厚 1.5~42.5mm	实体保持架, 代号 M	
		GB/T1528	挤制(R)管 外 径 $\phi 20 \sim \phi 300\text{mm}$ , 壁厚 1.5~50mm	实体保持架, 代号 M	
	H96	GB/T1531	毛细管外径 $\times$ 内径为 $\phi 0.5 \sim \phi 3.0 \times \phi 0.3 \sim \phi 2.5\text{mm}$	铆钉	
	T2、T3	GB/T14956	钢丝直径 1.0~6.0mm	铆钉	
	LY11CZ、LY12CZ	GB3191	挤制(R)棒直 径 5.0~300mm	实体保持架	
	LY11CZ、LY12CZ	GB4437	热挤制(K)管 外 径 $\phi 25 \sim \phi 500\text{mm}$ 壁厚 3~50mm	实体保持架	

注: 1. 轴承钢前加 Z 代表电渣重熔, H 代表真空感应和真空自耗高纯度轴承钢。

2. LY11CZ (代号 L1)、LY12CZ (代号 L2)。

表 4-2 滚动轴承零件的加工过程

零件名称		加工过程
套 圈		热轧未退火棒料→锻压毛坯→球化退火
		热轧退火棒料(钢管)→车削加工→淬回火→粗磨 →细磨→精研工件表面→成品
滚 动 体	冷冲及半热冲钢球	钢丝或冷拉条钢→冷冲或半热冲→光球加工→淬、回火→粗磨 →强化处理→精磨→精研→成品
	热冲及模锻钢球	未退火条钢→热冲→球化退火→光球(锉削→软磨)→淬、回火→粗磨 →下料→热锻→强化处理→精磨→精研→成品
	滚柱与滚针	冷拉钢丝或条钢→冷冲、冷轧或车削→淬、回火→粗磨→精磨→成品

## 4.1 一般用途滚动轴承零件的热处理

### 4.1.1 铬钢滚动轴承零件的一般热处理

铬轴承钢是制造滚动轴承零件(套圈和滚动体)的主要钢种,其中 GCr15 钢用量最大,其次是 GCr15SiMn 钢。铬轴承钢的使用范围见表 4-3。

表 4-3 铬轴承钢的使用范围

钢号	使用范围					
	套圈 壁厚	钢球 直径	圆锥滚 子直径	圆柱滚 子直径	球面滚 子直径	滚针 直径
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
GCr15	<12	≤50.8	≤22	≤22	≤22	所有滚针
GCr15SiMn	≥12	>22	>22	>22	>22	

#### 4.1.1.1 预备热处理

##### 1. 退火

(1) 球化退火 目的是使组织变为均匀分布的细粒状珠光体,获得最佳的机加工性能并为淬火提供良好的原始组织,淬火、回火后获得最佳的力学性能。例如 GCr15 钢退火组织为均匀细粒状珠光体(碳化物平均直径为  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ , 最小  $0.2 \mu\text{m}$ , 最大  $2.5 \mu\text{m}$ ) 和不均匀粗粒状珠光体(碳化物平均直径为  $2.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ , 最小  $0.5 \mu\text{m}$ , 最大  $6 \mu\text{m}$ ) 的 206 内套,经不同温度淬火并回火,加工后在轴承寿命试验机上试验,结果见表 4-4。

表 4-4 退火组织中碳化物颗粒大小和均匀性对轴承接触疲劳寿命的影响

原始组织	淬火温度 /°C	平均寿命 /h	寿命波动范围 /h	稳定系数 <sup>(1)</sup>
均匀细小粒状珠光体	820	395	198~561	2.8
	840	811	354~1941	5.4
	860	581	401~818	2.0
不均匀粗粒状珠光体	820	310	89~489	5.4
	840	505	185~1408	7.6
	860	558	413~870	2.1

(1) 稳定系数为最长与最短寿命之比。

轴承钢球化退火温度一般是: GCr15 钢为  $780 \sim 810^\circ\text{C}$ , GCr15SiMn 为  $780 \sim 800^\circ\text{C}$ , GCr18Mo, GCr15SiMo 为  $780 \sim 810^\circ\text{C}$ , 但如果锻件经各种预备热处理后,其退火温度应分别降低  $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 。球化退火分为一般球化退火、等温球化退火、快速球化退火等。

1) 一般球化退火,此种工艺可用箱式电炉、台车式电炉或煤、油炉、井式电炉和推杆式电炉等进行。具体工艺见图 4-1。

2) 等温球化退火 此种工艺最好用双炉进行(即加热炉与等温炉),但亦可用在冷却区带有速冷(风或水冷)装置的推杆式连续退火炉。具体工艺见图 4-2。

3) 快速球化退火 快速球化退火实质上是正火后再进行退火的工艺。零件正火后获得索氏体组织,然后选用  $760 \sim 780^\circ\text{C}$  加热退火。具体工艺如图 4-3。



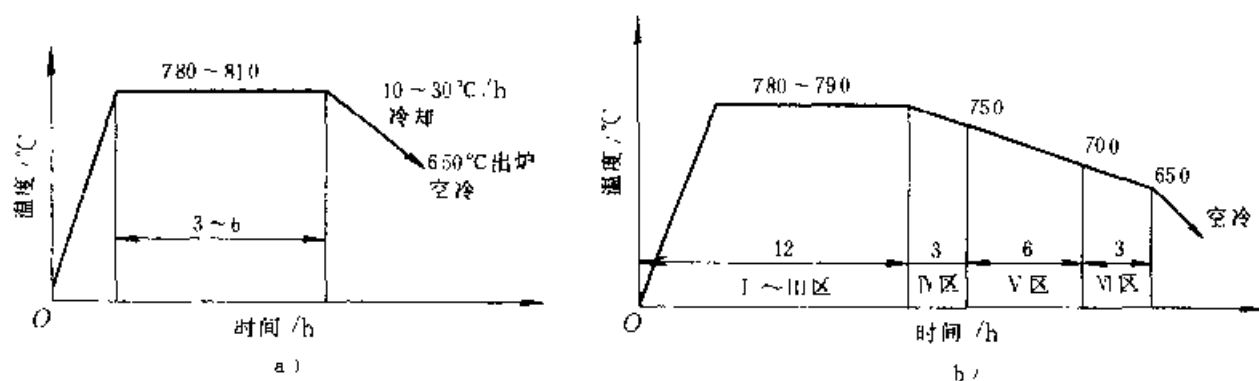


图 4-1 一般球化退火工艺曲线

a) 用于箱式、井式或台车式炉 b) 用于推杆式或大型连续炉

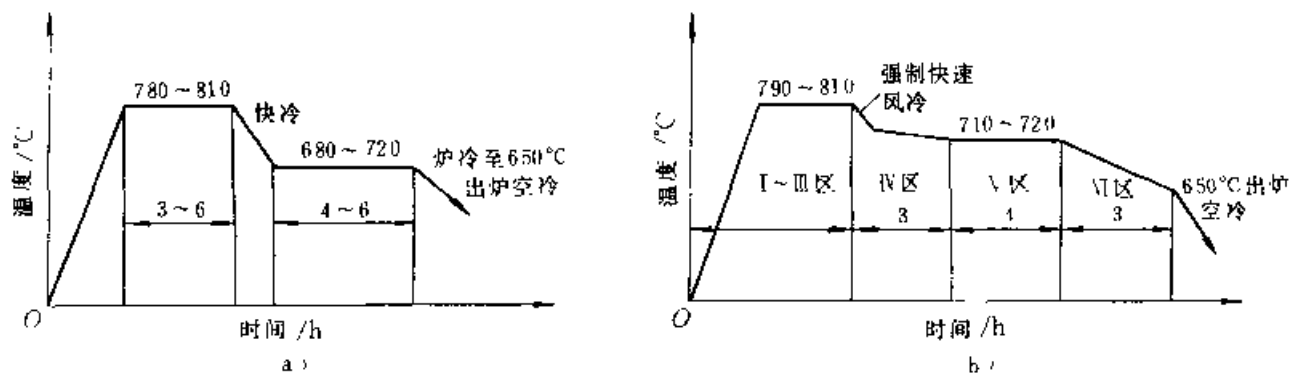


图 4-2 等温球化退火工艺曲线

a) 双炉等温球化退火 b) 带强制快速风冷装置的连续推杆炉的等温球化退火

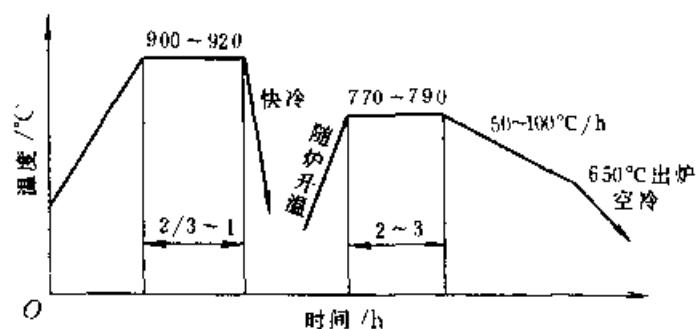


图 4-3 快速球化退火工艺

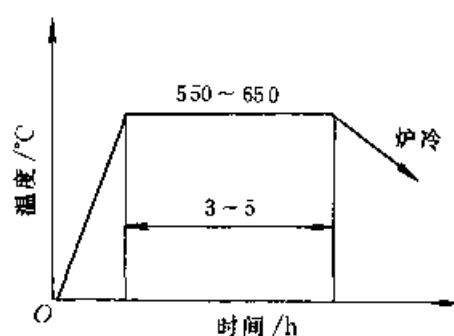


图 4-4 去应力退火工艺

(2) 去应力退火 主要目的是消除因机加工和冷冲压在零件中形成的残留应力。工艺曲线见图 4-4。

(3) 再结晶退火, 主要用于消除冷轧、冷拔和冷冲压后在零件中所产生的冷作硬化, 使破碎了的晶粒得到再结晶, 具体工艺见表 4-5。

(4) 退火缺陷及对策, 详见表 4-6。

表 4-5 再结晶退火加热规范

钢 号	温度/°C	时间/h	备注
GCr15	670~720	2~8	具体保温时间根据装炉量多少确定
GCr15SiMn	650~700	2~8	

表 4-6 退火缺陷及其对策

检查项目	技术要求	缺陷名称	产生原因	补救办法	防止措施
脱碳层	不超过车削余量的 2/3	脱碳层超过规定深度	1) 原材料锻造或正火脱碳严重 2) 炉子密封性差,或在氧化性气氛中加热,退火温度高,保温时间长,或正火,重复退火	改其他型号或报废	1) 加强对原材料和锻件的脱碳控制 2) 正确执行工艺,防止失控超温 3) 尽可能不进行正火和不重复退火 4) 提高炉子密封性,在中性火焰炉中加热
显微组织	1) 退火组织应为细小、均匀分布的球化组织,按 JB1255 标准中第一级别图评定,2~4 级为合格组织,不允许有第 1 级欠热,第五级碳化物颗粒不均匀,和第 6 级过热组织 2) 碳化物网按第三级别图 $\leq 2.5$ 级为合格	欠热	1) 加热温度低或保温时间不足 2) 原材料组织不均匀 3) 装炉量多,炉子的均温性差,或在正常工艺下,还有部分(局部位置)工件加热不足,或保温时间不够 4) 加热温度偏高,冷却速度过快	根据不同缺陷调整工艺,进行二次退火	1) 合理制定工艺,严格执行工艺 2) 改善炉温均匀度 3) 装炉量合理,放置要均匀 4) 严格控制原材料及锻件质量 5) 控制冷却速度不宜太快
		过热	1) 加热温度过高,或在上限温度下保温时间过长 2) 原材料组织不均匀 3) 装炉量多,炉温均匀性差,或在正常工艺下,仍有部分工件加热温度过高,保温时间过长	先正火而后调整工艺,进行快速退火或正火退火	1) 合理制定工艺,严格执行工艺 2) 改善炉温均匀度 3) 装炉量合理,摆放均匀 4) 严格控制原材料和锻件质量
		粗大颗粒碳化物	1) 锻造组织有粗大片状珠光体 2) 退火温度偏高,冷速慢 3) 原材料碳化物不均匀(网状、带状) 4) 重复退火	先正火再进行第一次退火	1) 严格控制原材料和锻件质量 2) 尽量不进行重复退火,更不能进行多次退火
		网状碳化物超过规定级别	1) 锻造组织有严重碳化物网,退火时无法消除 2) 退火温度过高,同时冷却太慢	先正火再进行第一次退火	1) 严格控制锻造组织 2) 防止退火失控超温和冷却太慢
硬度	GCr15: 170~207HBS GCr18Mo GCr15SiMo GCr15SiMn 179~217HBS	太硬	1) 欠热,有片状珠光体残留 2) 冷速太快,产生密集点状珠光体	调整工艺,进行二次退火	加热充分,但不过热,冷速合适
		太软	1) 组织过热 2) 多次退火或冷速太慢	先进行正火然后进行退火	

2. 正火 轴承钢锻件正火的目的是消除和改善网状碳化物, 细化和均匀化组织, 改善退火组织中粗大碳化物组织。正火工艺主要根据正火目的和正火锻件的原始组织来制定的, 常用的正火工艺见表 4-7。正火常见的缺陷及防止办法见表 4-8。

3. 轴承钢的双细化处理 近期研究成功的预备热处理工艺有轴承钢的碳化物细化和晶粒细化, 即所谓双细化处理工艺, 包括锻造余热淬火后高温回火或等温退火, 亚温锻造快速退火和毛坯温挤后高温回火或快速退火等工艺。锻件经双细

化处理后可比原始晶粒细化 1.5~2.0 级, 从而提高钢的冲击韧度、抗弯强度和疲劳寿命, 经双细化处理后, 碳化物颗粒细, 尺寸  $< 0.6\mu\text{m}$ ; 同时碳化物的均匀性得到改善。所以在淬、回火后可获得均匀的马氏体组织, 提高硬度均匀性, 从而可提高轴承的耐磨性和接触疲劳寿命。

(1) 锻造余热淬火后高温回火或快速等温退火

1) 锻造余热淬火加高温回火, 此工艺可获得均匀分布的点状珠光体 + 细粒状珠光体组织, 硬度一般为 207~220HBS (压痕直径为 4.2~4.0mm), 具体工艺如图 4-5。

表 4-7 铬轴承钢锻件的正火工艺

正火目的	钢号	正火工艺		
		温度 /℃	保温时间 /min	冷却方法
消除和减少粗大网状碳化物	GCr15	930~950	40~60	根据零件的有效厚度和正火温度正确选择正火后冷却条件, 以免再次析出网状碳化物或增大碳化物颗粒及裂纹等缺陷, 一般冷却速度 $>50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。冷却方法有: 1. 分散空冷 2. 强制吹风 3. 喷雾冷却 4. 乳化液中(70~100℃)或油中循环冷却到零件300~400℃后空冷 5. 70~80℃水中冷却到零件300~400℃后空冷
	GCr15SiMn	890~920		
消除较粗网状碳化物, 改善锻造后晶粒度以及消除粗片状珠光体	GCr15	900~920	40~60	
	GCr15SiMn	870~890		
细化组织和增加同一批零件退火组织的均匀性	GCr15	860~900	40~60	
	GCr15SiMn	810~860		
改善退火组织中粗大碳化物颗粒	GCr15	950~980	40~60	
	GCr15SiMn	940~960		

表 4-8 铬轴承钢正火时常见缺陷及防止方法

缺陷名称	产生原因	防止方法
碳化物网大于标准规定级别	1) 原材料的碳化物网严重 2) 正火温度偏低或保温时间短 3) 正火后冷却速度太慢	1) 加强原材料检验 2) 正确选择正火温度和保温时间 3) 加快冷却、合理选择冷却方法
脱碳严重, 超过机加工余量	1) 锻件本身脱碳严重 2) 在氧化气氛炉中加热 3) 正火温度高, 装炉量多, 保温时间长	1) 加强原材料脱碳检验, 严格执行锻造加热规范 2) 调整加热炉的火焰为还原性, 或采用保护气氛加热 3) 正确选择正火加热温度与保温时间
裂纹	1) 锻造时遗留在锻件上 2) 冷速太快或出冷却介质温度低	1) 加强对锻件正火前的裂纹检查 2) 严格执行正火工艺, 出冷却介质温度不应低于 $300\sim 400^\circ\text{C}$ , 并及时进行退火或回火

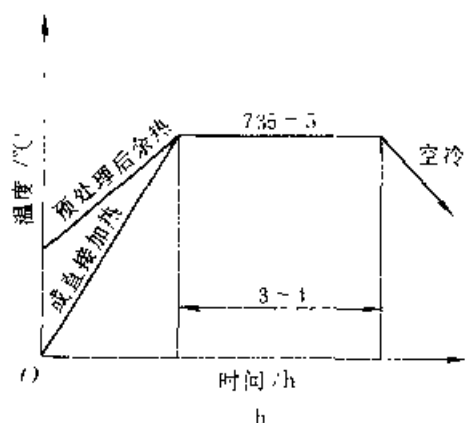
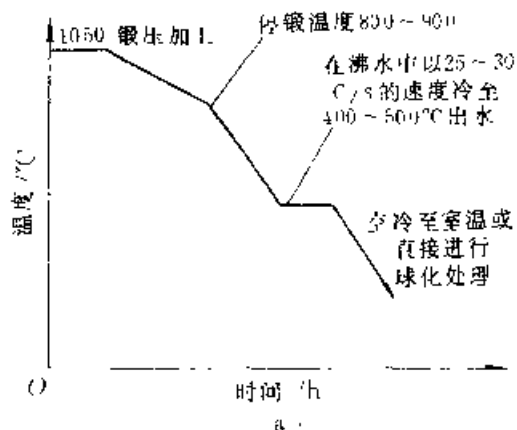


图4-5 锻造余热淬火加高温回火的工艺曲线

a) 锻造余热沸水淬火 b) 高温回火

(2) 锻造余热淬火加快速等温退火。将锻造余热沸水淬火的锻件加热到略高于  $A_{c1}$  点进行等温退火, 可获得均匀的细小粒状-点状珠光体组织, 硬度可为 187~207HBS (压痕直径为 1.2~1.4mm)。具体工艺如图 4-6 所示

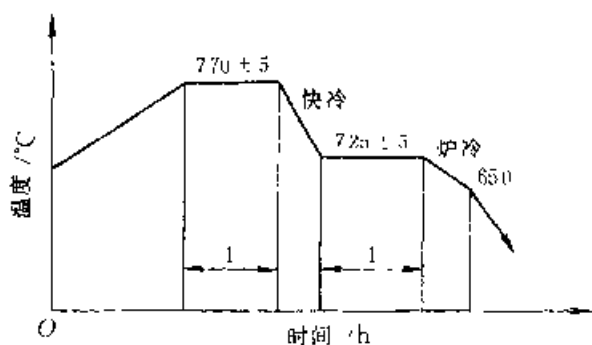


图4-6 经沸水淬火后锻件进行快速等温退火工艺

(2) 亚温锻后热处理细化 此种工艺处理后不仅可细化组织, 硬度也能符合标准要求, 可适用于大批生产, 但需指出, 供锻压材料的碳化物网必须符合标准规定。具体工艺如图 4-7 所示。

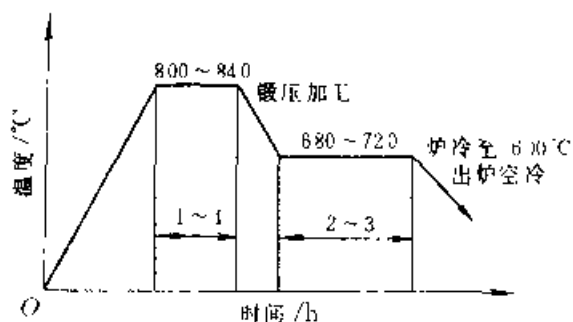


图4-7 亚温锻后热处理细化工艺

(3) 高温固溶等温淬火加高温回火, 具体工艺如图 4-8 所示

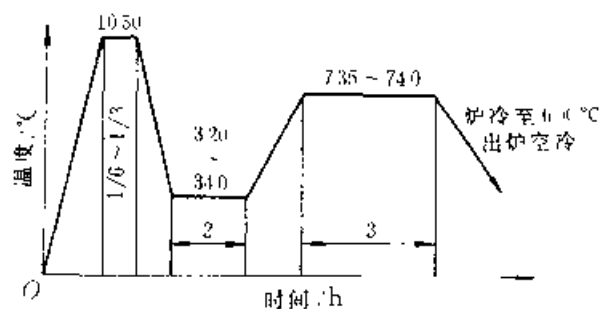


图4-8 高温固溶等温淬火加高温回火工艺

#### 4.1.1.2 最终热处理

1. 淬火 可使零件获得高的硬度和耐磨性, 高的接触疲劳寿命和可靠性, 高的尺寸稳定性。淬火工序工艺参数包括淬火加热温度、加热方法、保温时间、冷却介质及冷却方法等。

(1) 淬火加热温度, 淬火最佳加热温度应使奥氏体中含有适宜的含碳量并溶解大量 Cr、Mn、Mo 合金元素, 而不产生晶粒长大及出现过热组织。长期实践证明: 以 GCr15 钢为例: 固溶体中含碳量  $w(C) 0.5\% \sim 0.6\%$ ,  $w(Cr) 1\%$ , 未溶解碳化物 (质量分数)  $6\% \sim 9\%$  为最佳。高碳铬轴承钢推荐加热温度见表 4-9。

(2) 加热时间, 淬火加热时间包括升温、均热和保温。总的加热时间 = 升温时间 + [(升温 + 均热)  $\times 0.3 \sim 0.5$ 。加热时间与淬火加热温度高低有关。推荐的轴承钢加热温度与加热时间关系见表 4-10。

滚动轴承零件有效厚度计算方法见图 4-9。

表 4-9 高碳铬轴承钢推荐的加热温度

零件名称	零件的直径/mm	钢 号	加热温度/°C
套	2~20	GCr15	830~850
	20~35	GCr15	830~850
	35~150	GCr15	840~860
圈	150~300	GCr15SiMn	820~840
	300~600	GCr15SiMn	820~840
	600~1800	GCr20SiMn	820~840
滚子	1.5~5	GCr15	840~860
	5~15	GCr15	840~860
	15~23	GCr15	840~860
	23~30	GCr15SiMn	820~840
	30~55	GCr15SiMn	830~850
	55~70	GCr20SiMn	830~850
钢球	0.75~1.5	GCr15	830~850
	1.5~3	GCr15	830~850
	3~14	GCr15	840~860
球	14~50	GCr15	840~860
	50~75	GCr15	840~860

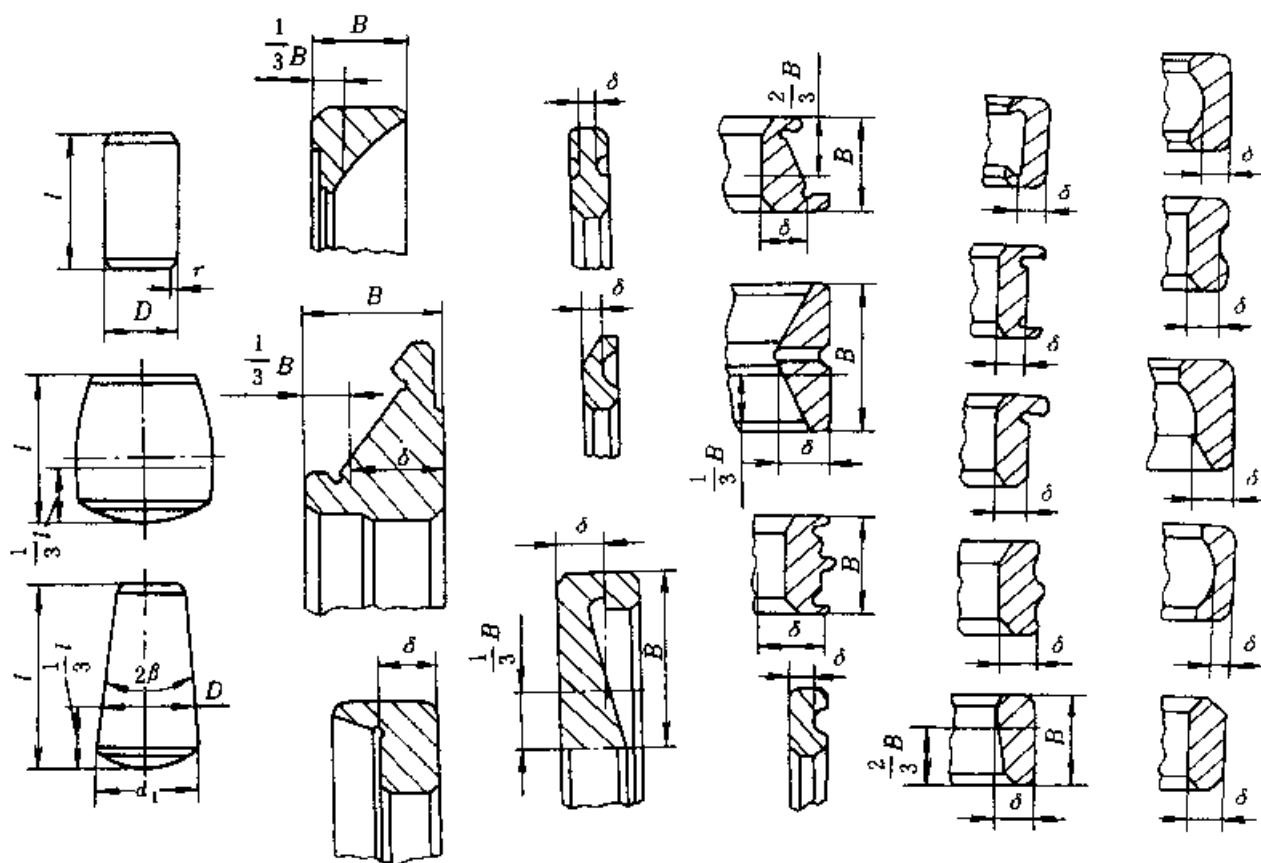
表 4-10 推荐的轴承钢加热温度与加热时间的关系

钢号	名称	零件有效厚度, mm	加热温度/°C	加热时间/min	备注
GCr15	套圈	<3	835~845	23~35	电炉加热
		>3~≤6	840~850	35~15	
		>6~≤9	845~855	45~55	
		>9~≤12	850~860	55~60	
GCr15SiMn	套圈	>12~15	820~830	50~55	
		>15~20	825~835	55~60	
		>20~30	835~840	60~65	
		>30~50	835~845	65~75	
GCr15	钢球	<3	840~845	23~35	
		>3~15	845~850	35~45	
		>15~50	850~860	50~65	
GCr15	滚子	<3	835~845	23~25	
		>3~10	840~850	35~45	
		>10~22	845~855	45~55	

注: 1. 快速加热(感应)温度比表中规定温度高 30~50°C。

2. 产品返修加热温度比正常温度低 5~10°C。

3. 大钢球在水溶性介质中冷却, 其加热温度比正常低 10~15°C。

图 4-9 轴承零件的有效厚度( $\delta$ )计算

$\delta$ —有效壁厚(mm)  $B$ —宽度(mm)  $l$ —长度(mm)  $D$ —滚子的有效直径(mm)

## (3) 淬火冷却介质与冷却方法

(续)

1) 淬火冷却介质, 淬火冷却介质应保证轴承零件在冷却过程中, 在奥氏体最不稳定区有足够的冷却速度, 而不发生非马氏体转变; 在马氏体转变范围  $M_s \sim M_f$  内缓慢冷却, 以达到减少组织转变应力, 从而减少套圈的变形和开裂的效果。

轴承钢具有足够的淬透性, 按零件大小(指壁厚), 通常选用不同冷却特性的淬火油。常用淬火油有: 普通淬火油、快速淬火油、超速淬火油、光亮淬火油、真空淬火油及分级淬火油等。常用淬火油及应用范围按表 4-11 推荐。

表 4-11 淬火介质应用范围

淬火介质名称	冷却的轴承零件和尺寸范围
普通淬火油	1) GCr15 钢制直径小于 $\phi 12\text{mm}$ 的滚动体 2) GCr15SiMn 钢球 3) GCr15 钢制壁厚小于 $12\text{mm}$ 的套圈
10%~22% 碳酸钠(质量分数)水溶液	GCr15 钢制直径 $12.7 \sim 50\text{mm}$ 的滚动体
快速淬火油	GCr15 钢制有效壁厚 $13.5\text{mm}$ 以下的套圈使用
PZ 2A	GCr15 钢制直径 $25\text{mm}$ 以下滚动体和有效壁厚 $15\text{mm}$ 以下的套圈
GZ-1 高速淬火油	GCr15 钢制壁厚 $\leq 16\text{mm}$ 的套圈和直径 $32\text{mm}$ 的滚子使用
快速淬火油	GCr15 钢制壁厚小于 $19\text{mm}$ 和 $\phi 20 \sim \phi 30\text{mm}$ 滚子使用
光亮淬火油	适用于保护气体加热的中小截面轴承零件

淬火介质名称	冷却的轴承零件和尺寸范围
快速光亮淬火油	适用于可控气氛加热的较大截面轴承零件
真空淬火油(ZZ-1 和 ZZ-2)	适用于在真空炉中加热的 GCr15 钢制的轴承零件
1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 光亮等温(分级)淬火油	适用于 GCr15 钢制轴承套圈的等温和分级淬火, 而 1 <sup>#</sup> 油其使用温度 $\leq 120^\circ\text{C}$ , 2 <sup>#</sup> 油 $\leq 160^\circ\text{C}$ , 还可用于外径 $150\text{mm}$ 以下, 有效壁厚 $5.5\text{mm}$ 以下的薄壁套圈淬火

2) 冷却方法, 按轴承零件的不同质量要求、形状、壁厚及尺寸而有所不同。通常马氏体淬火的冷却方式有: 小零件自由落下冷却, 上下震动冷却、压模淬火、分级淬火、等温淬火及旋转机冷却(速度  $< 1.5\text{m/s}$ ) 等。其目的为了使套圈变形小, 并获得均匀组织和性能。

常用的淬火冷却方式与方法见表 4-12。

(4) 淬火后的质量检查如表 4-13、表 4-14。

(5) 淬火缺陷及防止办法见表 4-16。

2. 冷处理 一般情况下轴承钢在淬火后含有 15% 左右残留奥氏体(体积分数), 由于这些奥氏体存在于淬火组织中, 虽经常规回火处理, 仍不能使其全部转变和稳定; 故当零件在室温条件下长期存放时, 其尺寸会因奥氏体转变而变化。冷处理的目的是减少淬火组织中残留奥氏体含量, 并使剩余的少量奥氏体趋于稳定, 从而增加尺寸稳定性和提高硬度。

表 4-12 轴承零件常用的淬火冷却方式与方法

零件名称	直径、壁厚/mm	淬火冷却的方式与方法	淬火介质温度/ $^\circ\text{C}$
滚动体	大中小型滚子和球	自动摇筐、滚筒、溜球斜板和振动导板等	油: $30 \sim 60$ 水溶液 $20 \sim 40$
中小型套圈	小于 200	手摇、自动摇筐、强力搅动油、喷油冷却、振动淬火机等	油 $30 \sim 60$
大型套圈	200~400	手摇式旋转、淬火机和吊架带动, 同时喷油冷却	油 $30 \sim 60$
特大型套圈和滚子	$> 1000$ 薄壁套圈 $\phi 40 \sim \phi 1000$ 套圈滚子	吊架机动冷却, 同时吹气搅油, 旋转淬火机冷却, 同时吹气搅油	油温 $< 70$
薄壁套圈	$< 8$	在热油中冷却后, 即放入低温油中冷却	热油: $130 \sim 170$ 低温油: $30 \sim 80$
超轻、特轻套圈		先在高温油中冷至油温后, 放入压模中冷至 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 时脱模, 或将加热与保温的套圈直接放入压模中进行油冷	低温油: $30 \sim 60$

表 4-13 轴承零件淬火后的质量检查

零件名称	检查项目	技术要求	检查方法
套圈	1) 硬度	1) 硬度 套圈淬火后硬度 $> 63\text{HRC}$	1) 用洛氏硬度计、表面洛氏硬度计、维氏硬度计或显微硬度计进行检查硬度
	2) 显微组织	2) 显微组织 套圈淬火后显微组织应由隐晶或细小结晶状马氏体、均匀分布的细小残余碳化物和少量的残留奥氏体所组成。不允许有过热针状马氏体或托氏体组织	2) 淬火、回火后显微组织需在套圈纵断面上进行取样, 用金相显微镜进行检查, 放大倍数 500 倍, 也允许用 450~600 倍评定
	3) 断口	3) 断口 套圈淬火后断口具有细小晶粒闪烁光泽的断口, 不允许有欠热、过热以及其他形式断口存在	3) 将淬过火的套圈用压力机或其他方法上断后肉眼观察其断口的特征
	4) 裂纹与其他缺陷	4) 不允许有裂纹、脱碳、软点等缺陷不得超过规定值	4) 检查软点和脱碳用冷酸洗方法, 其深度用金相法测定。软点用硬度计测定。裂纹用磁力探伤、冷酸洗、油浸喷砂等方法进行检查
	5) 畸变(椭圆、挠曲以及尺寸的胀缩)	5) 套圈的畸变按表 4-14、表 1-13 进行控制	5) 椭圆用外径测量仪测量; 挠曲用 G863 仪器检查; 尺寸胀缩用外径测量仪检查、圆锥内套用 D13 或 D914 检查, 在检查出套圈变形超过规定时, 则 100% 需进行变形的检查。套圈变形超过规定可按后述整形方法进行
钢球	1) 硬度	硬度钢球直径 $\leq 45\text{mm}$ , 淬火后硬度 $> 64\text{HRC}$ ; 钢球直径 $> 45\text{mm}$	同套圈的检查方法 1)、2)、3)、4)
	2) 显微组织	淬火后硬度 $> 63\text{HRC}$ , 其他均同套圈	
	3) 断口		
	4) 裂纹和其他缺陷		
滚针滚针	1) 硬度	均同套圈	同套圈的检查方法 1)、2)、3)、4)
	2) 显微组织		
	3) 断口		
	4) 裂纹和其他缺陷		

表 4-14 推力轴承套圈允许的畸变程度

套圈外径 /mm		外径留量 (推力) /mm	允 许 椭圆度 (推力) /mm	允许弯曲度 (推力)				其他类型、轻、特 轻系列允许弯曲度	
				轻、中、重系列		特轻系列		高度留量 mm	允许弯曲度 mm
				高度留量 /mm	允许弯曲度 /mm	高度留量 /mm	允许弯曲度 /mm		
>	≤								
10	30	0.20	0.12	0.25	0.10	0.25	0.10	—	—
30	50	0.25	0.15	0.25	0.10	0.25	0.10	0.20	0.10
50	80	0.25 (0.30)	0.15	0.30	0.15	0.35	0.18	0.25	0.10
80	100	0.30	0.20	0.30	0.15	0.35	0.18	0.25 (0.30)	0.15
100	120	0.30 (0.35)	0.20	0.30 (0.35)	0.20	0.40	0.25	0.25 (0.30)	0.15
120	150	0.35	0.25	0.30 (0.35)	0.20	0.40	0.25	0.30 (0.40)	0.18
150	180	0.40	0.25	0.40	0.25	0.45	0.28	0.40	0.25
180	—	0.50	0.30	—	0.30	0.45	0.30	—	0.25

注: 括号内是轻系列套圈的留量。

表 4-15 其他轴承套圈允许畸变程度

(续)

外套外径 /mm	允许圆度 mm	外径允许留量/mm		内套内径 mm	允许圆度 /mm	内径允许留量/mm	
		最 小	最 大			最 小	最 大
0~30	0.15	0.15	0.40	0~18	0.10	0.10	0.35
30~50	0.15	0.15	0.40	18~30	0.10	0.10	0.35
50~80	0.18	0.15	0.40	30~50	0.15	0.12	0.40
80~120	0.20	0.20	0.55	50~80	0.20	0.15	0.45
120~150	0.25	0.20	0.60	80~100	0.20	0.20	0.50
150~180	0.30	0.25	0.75	100~120	0.25	0.25	0.55
180~210	0.35	0.25	0.85	120~150	0.30	0.25	0.60
210~250	0.40	0.30	1.25	150~180	0.30	0.25	0.60
250~300	0.45	0.30	1.15	180~200	0.35	0.35	1.00
300~350	0.50	0.40	1.70	200~215	0.35	0.35	1.00
350~400	0.60	0.50	1.90	215~250	0.40	0.35	1.30
				250~300	0.40	0.40	1.60

表 4-16 淬火缺陷及防止办法

检查项目	缺陷名称	产生原因	防止办法
显微组织	过热针状马氏体组织	1) 淬火温度过高或在较高温度下保温时间过长 2) 原材料碳化物带状严重 3) 退火组织中碳化物大小分布不均匀或部分存在细片状珠光体	1) 降低淬火温度 2) 按材料标准控制碳化物不均匀程度 3) 提高退火质量,使退火组织为均匀细粒状珠光体
	5~6~7级托氏体组织	1) 淬火温度偏低或淬火温度正常而保温时间不足 2) 冷却太慢 3) 原材料碳化物不均匀性严重和退火组织不均匀	1) 提高淬火温度和延长保温时间 2) 增加冷却能力,采用旋转淬火机等 3) 按材料标准控制碳化物不均匀程度 4) 提高退火组织的均匀性
	局部区域有针状马氏体,同时存在块状、网状和片状托氏体	1) 退火组织极不均匀,有细片状珠光体 2) 淬火温度偏高保温时间长 3) 原材料碳化物带状严重	1) 降低淬火温度,适当延长保温时间 2) 增加冷却能力 3) 提高退火组织的均匀性
	碳化物网状,2.5级	1) 原材料的网状超过规定 2) 锻造时停锻温度过高以及退火温度过高,冷却缓慢形成网状	在盐炉或保护气氛炉中加热到920~950℃正火,正火后低温退火,再进行淬火回火
	残留粗大碳化物直径超过4.2μm	1) 反复退火 2) 原材料碳化物严重不均匀	加强对原材料的控制,尽量避免反复退火
	硬度偏低,显微组织合格	1) 淬火保温时间太短 2) 表面脱碳严重 3) 淬火温度偏低 4) 油冷慢,出油温度高	1) 延长保温时间 2) 适当提高淬火温度5~10℃ 3) 在保护气体炉中或涂3%~5%磷酸酒精(质量分数)溶液加热
硬度	硬度偏低,显微组织出现块状或网状托氏体	淬火温度偏低或冷却不良	1) 适当提高淬火温度或延长保温时间 2) 强化冷却



(续)

检查项目	缺陷名称	产生原因	防止办法
断口	欠热断口	淬火温度偏低	提高淬火温度
	过热断口	淬火温度过高	降低淬火温度
	颗粒状断口显微组织合格	锻造过烧	控制锻造加热温度不要超过 1100℃
	带小亮点的断口	网状碳化物严重	按标准控制碳化物网状
软点	体积软点 (40~55HRC)	锻造过程局部脱碳; 淬火加热温度低, 保温不够; 冷却不良	提高淬火加热温度或适当延长保温时间以及增加冷却能力
	表面软点 (比正常硬度低 2~3HRC)	碳酸钠水溶液配制不当, 温度较高, 碳酸钠水溶液上面有油	采用热配碳酸钠水溶液, 温度 < 35℃, 或增加碳酸钠水溶液浓度 15%~20% (质量分数)
表面缺陷	氧化、脱碳、腐蚀坑严重	炉子密封性差; 淬火前工件表面清洗不干净或有锈蚀; 淬火温度高或保温时间长; 银件和棒料的脱碳严重	改进炉子密封性; 淬火前工件表面清洗干净, 在保护气体炉中加热或涂 3%~5% 硼酸酒精 (质量分数); 盐炉加热淬火后零件需清洗干净
畸变	畸变量超过规定	退火组织不均匀, 切削应力分布不均, 淬火加热温度高; 装炉量多, 加热不均; 冷却太快和不均; 加热和冷却中机械碰撞	提高退火组织的均匀性; 增加去应力退火工序; 降低淬火加热温度; 提高加热和冷却的均匀性; 在热油中冷却或压模淬火; 消除加热和冷却中机械碰撞等; 采用上述措施后畸变量仍超过规定, 可采用整形方法
裂纹	淬火裂纹	1) 组织过热, 淬火温度过高或在淬火温度上限保温时间过长 2) 冷却太快, 油温低, 淬火油中含水分超过 0.25% 3) 应力集中, 如圆锥内套油沟呈尖角。车加工套圈表面留有粗而深的刀痕, 以及套圈断面打字处 4) 表面脱碳 5) 返修中间未经退火 6) 淬火后未及时回火	降低淬火温度; 提高零件出油温度或提高淬火油的温度; 降低车加工表面粗糙度; 增加去应力工序; 减少表面的脱碳, 贫碳以及从设计和加工中避免零件产生应力集中

(1) 冷处理的温度, 冷处理温度主要根据钢的马氏体转变终止点 ( $M_f$ )、淬火组织中残留奥氏体含量、冷处理对力学性能的影响、零件的技术要求和形状复杂情况而定。GCr15 钢在加热到正常淬火温度后连续冷却到低温时, 马氏体转变终止点 ( $M_f$ ) 在  $-70^{\circ}\text{C}$  左右。低于  $M_f$  的冷处理, 对减少残留奥氏体的效果并不显著。GCr15, GCr15SiMn 钢的冷处理温度对残留奥氏体含量的影响见图 4-10。经不同温度冷处理后的 GCr15 钢的多次冲击疲劳值和对套圈尺寸变化的影响分别见表 4-17 和图 4-11。

GCr15 钢所采用的冷处理温度: 一般精密品多在  $-20^{\circ}\text{C}$  冷冻室内处理; 高精品 (B、C 级) 产品零件采用  $-78^{\circ}\text{C}$  (干冰酒精) 或低温箱等其他冷处理方法。此种钢如采用  $-183^{\circ}\text{C}$  和  $-195^{\circ}\text{C}$  冷处理与  $-80^{\circ}\text{C}$  相比, 不仅不能显著减少残留奥氏体含量, 还会加大零件内应力, 会引起超显微裂纹, 从而降低疲劳寿命和冲击韧性, 所以很少采用。

(2) 冷处理的保温时间, 仅从马氏体相变来看, 奥氏体的转变是冷到  $M_s \sim M_f$  温度范围内完成的。由于装入量不同, 所以在生产上冷处理保

温时间通常规定为1~1.5h,但应指出,深冷处理并不能使残留奥氏体全部转变。

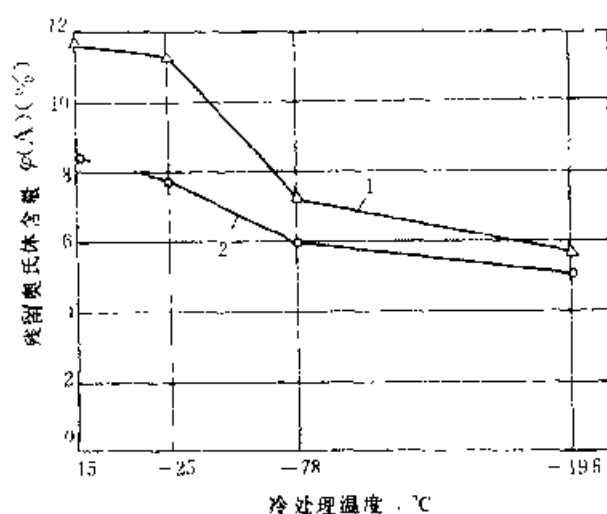


图 4-10 GCr15、GCr15SiMn 钢深冷处理温度对残留奥氏体含量的影响  
1—GCr15, 850℃ 淬火  
2—GCr15SiMn, 830℃ 淬火

表 4-17 冷处理温度对多次冲击疲劳的影响

热处理规范	多次冲击疲劳寿命/mm			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
820℃ 油淬, 回火	85	145	55	95
820℃ 油淬, -50℃ 冷处理回火	140	70	—	105
820℃ 油淬, -80℃ 冷处理回火	145	70	220	145
820℃ 油淬, -183℃ 冷处理回火	60	15	40	50

注: 试验钢号为 GCr15, 试样形状为环状, 外径 52.5mm, 内径 44.80mm, 宽度 15.2mm, 在直径方向进行冲击, 冲击能量为 6.08N·m, 每分钟 208 次。

(3) 冷处理的操作方法, 淬冷后到冷处理之间的停留时间不宜过长, 一般不超过 2h。生产中, 零件淬冷到室温后, 立即在低温箱或干冰酒精中进行冷处理。从淬冷后到冷处理之间停留时间越短, 冷处理的效果越好。停留时间过久, 易出现残留奥氏体的陈化稳定, 降低冷处理效果。对形状复杂的零件淬冷到室温后立即进行冷处理会产生开裂, 因此, 对这种零件在淬火和冷到室温后, 可先进行

110~130℃ 保温 30~40min 预回火, 然后再进行冷处理, 但回火会使残留奥氏体陈化稳定。冷处理后零件应放在空气中恢复到室温后立即进行回火, 否则, 会导致零件开裂。一般从冷处理后至回火的停留时间不应超过 4h。

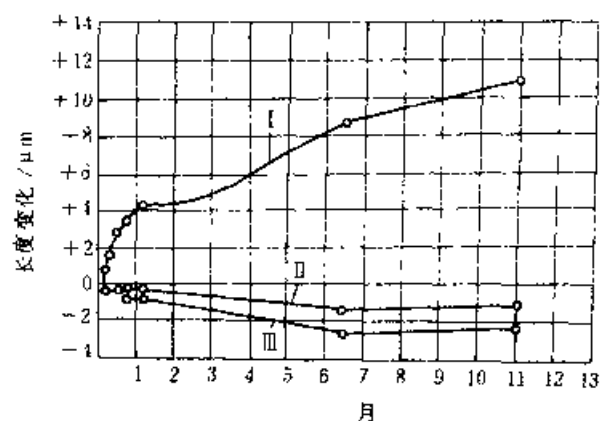


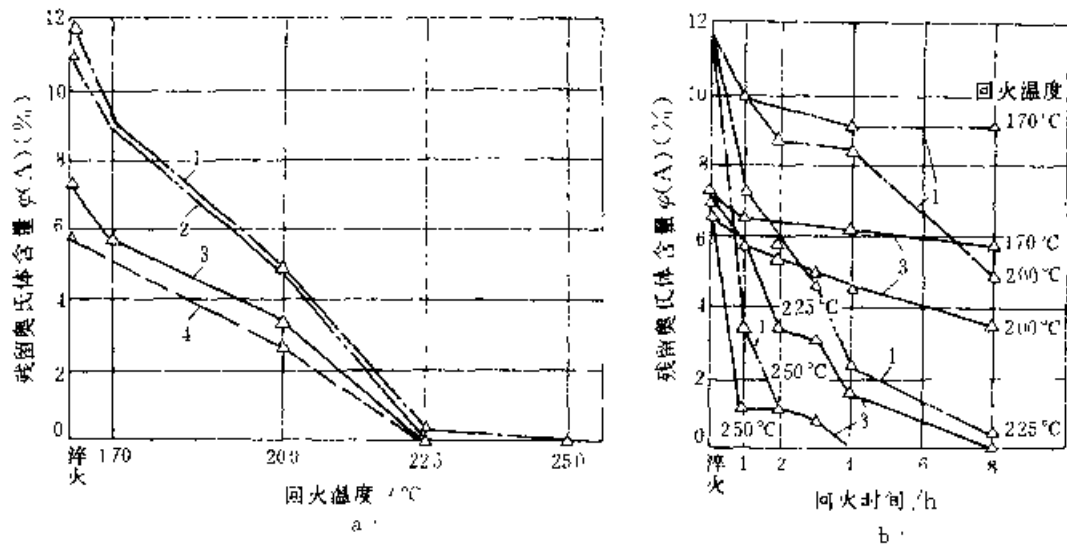
图 4-11 按各种热处理规范处理后的套圈尺寸变化

I 在 50~60℃ 油中淬火, 150℃ 回火 2h  
II 在 50~60℃ 油中淬火, -70℃ 深冷处理, 150℃ 回火 2h  
III 在 50~60℃ 油中淬火, 流动冷水冷却, 150℃ 回火 2h

对一些零件的尺寸稳定性有特殊要求时, 可采用多次冷处理与活化相结合的工艺, 即在第一次冷处理后, 待零件温度恢复到室温, 就进行 110~120℃ 加热 1~2h 的活化处理, 出炉后冷到室温再进行第二次冷处理。

3. 回火 GCr15 和 GCr15SiMn 钢在淬火组织中存在着两种亚稳定组织——马氏体和残留奥氏体, 有自发转化或诱发转化为稳定组织的趋势。同时, 零件在淬火后处于高应力状态, 在长时间存放或使用过程中, 极易引起尺寸改变, 丧失精度, 甚至开裂。通过回火可以消除残留应力, 防止开裂, 并能使亚稳组织转变为相对稳定的组织, 从而稳定尺寸, 提高韧性, 获得良好的综合力学性能。

(1) 回火温度、回火时间对组织和性能的影响, 回火温度和回火时间对 GCr15 和 GCr15SiMn 钢残留奥氏体含量的影响见图 4-12 和 4-13。对硬度的影响见图 4-14; 对应力消除程度的影响见图 4-15; 对接触疲劳强度的影响见图 4-16 和表 4-18; 对耐磨性的影响见图 4-17; 对力学性能的影响见图 4-18。

图 4-12 回火温度、回火时间对 GCr15 钢 (850 $^\circ\text{C}$  淬火) 残留奥氏体的影响

a) 回火温度的影响 (保温 8h) b) 回火时间的影响

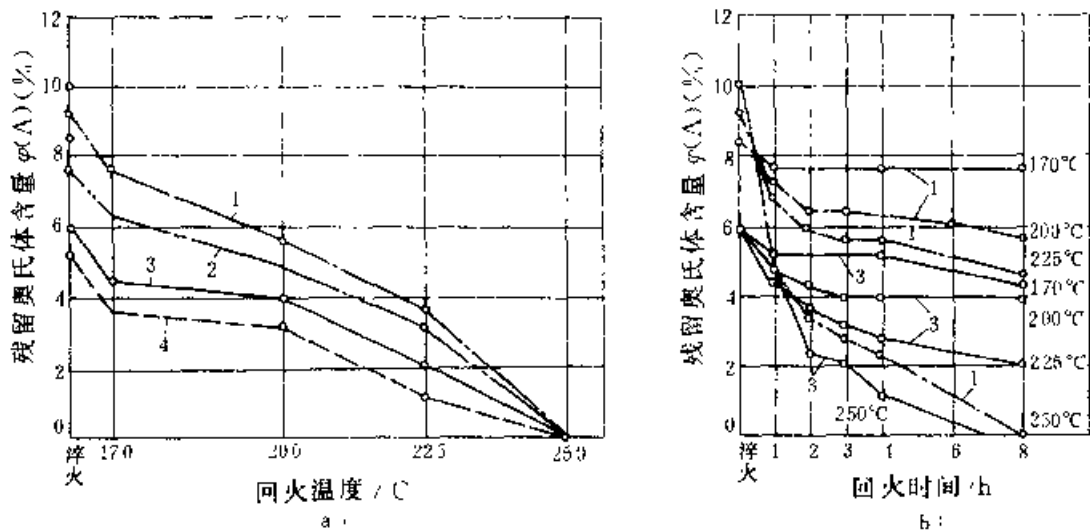
1 未经冷处理 ( $15^\circ\text{C}$ ) 2 冷处理 ( $-25^\circ\text{C}$ , 1h) 3 冷处理 ( $-78^\circ\text{C}$ , 1h) 4 冷处理 ( $-196^\circ\text{C}$ , 1h)

图 4-13 回火温度、回火时间对 GCr15SiMn 钢残留奥氏体的影响

a) 回火温度的影响 (保温 8h) b) 回火时间的影响

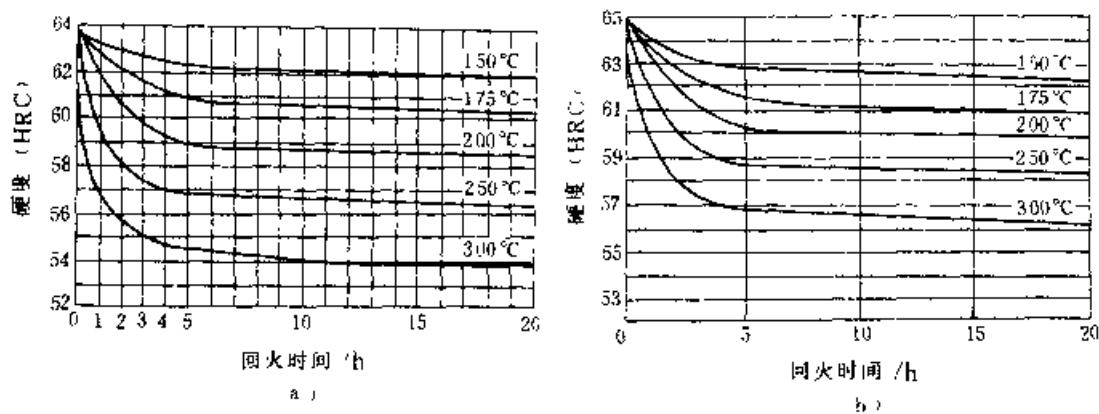
1 未经冷处理 ( $15^\circ\text{C}$ ) 2 冷处理 ( $-25^\circ\text{C}$ , 1h) 3 冷处理 ( $-78^\circ\text{C}$ , 1h) 4 冷处理 ( $-196^\circ\text{C}$ , 1h)

图 4-14 回火温度、回火时间对 GCr15 和 GCr15SiMn 钢硬度的影响

a) GCr15 钢 b) GCr15SiMn 钢

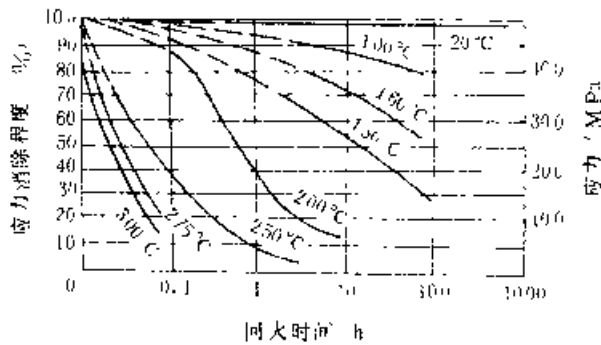


图 4-15 回火温度、回火时间对 GCr15 钢应力消除程度的影响

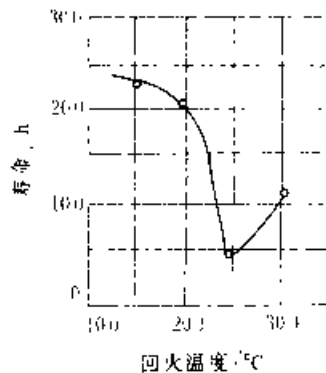


图 4-16 回火温度对 GCr15 钢接触疲劳寿命的影响

表 4-18 回火温度对铬轴承钢接触疲劳寿命的影响

钢号	在下列回火温度下的接触疲劳寿命/h							试验条件
	150°C	180°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	
GCr15	230	—	205	—	115	—	—	A
GCr15	290	—	—	200	—	—	—	B
GCr15SiMn	400	190	—	250	—	—	—	C
GCr15	15.1	—	13.6	8.6	6.3	3.5	1.3	D
GCr15SiMn	18.2	—	14.1	9.6	6.6	2.3	1.6	E

注: A—在对滚式疲劳试验机上, 使  $\phi 14.8\text{mm}$  的球, 在两个  $\phi 150\text{mm}$  的圆柱之间滚动, 载荷  $p=1.47\text{kN}$ , 转速  $n=1750\text{r/min}$ ;

B—用  $\phi 15\text{mm}$  的球, 其他同 A;

C—在对滚式疲劳试验机上试验,  $\phi 15\text{mm}$  钢球在两个  $\phi 250\text{mm}$  圆柱体之间滚动, 载荷  $p=2.45\text{kN}$ , 转速  $n=1100\text{r/min}$ ;

D—在对滚式疲劳试验机上试验,  $\phi 6\text{mm}$  圆柱型试样, 在两个  $\phi 150\text{mm}$  圆柱体之间滚动, 载荷  $p=1.04\text{kN}$ , 转速  $n=6280\text{r/min}$ ;

E—试验条件同 D。

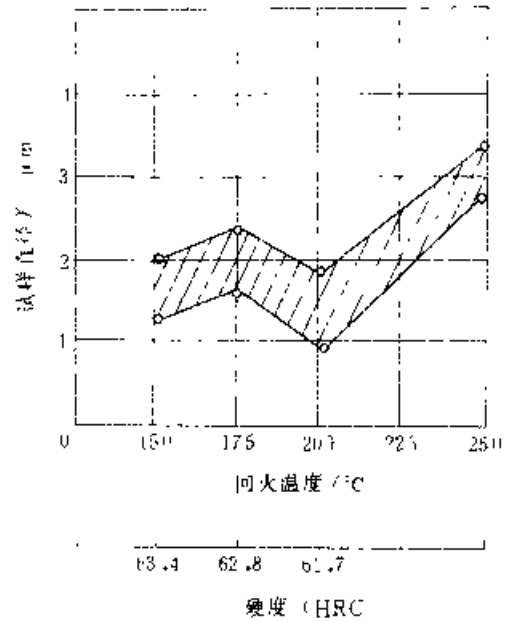


图 4-17 回火温度对 GCr15 钢耐磨性的影响 (840°C 加热, 150°C 马氏体分级淬火, 78°C×2h 冷处理, 不同温度回火 3h)

注: 试样直径为指试样原始直径和经磨损试验后试样直径之差。

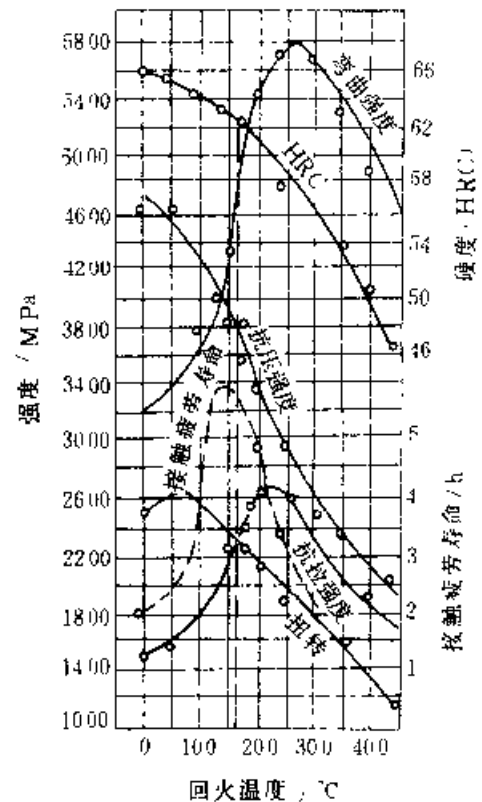


图 4-18 回火温度对 GCr15 钢力学性能的影响

(2) 回火工艺, 铬轴承钢回火工艺应根据轴承的服役条件和对技术质量要求来确定。总的来说可分为三种工艺: 常规回火——一般轴承零件的回火; 稳定化回火——精密轴承零件的回火; 高温回火——一些航空轴承及其他特殊轴承零件的回火。不论哪种工艺, 为保证轴承在使用条件下尺寸、硬度和性能的稳定, 回火温度应比轴承工作温度高  $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。一般轴承的使用温度均在  $120^{\circ}\text{C}$  以下, 因此常规回火温度采用  $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ 。对载荷较轻、尺寸稳定性要求高的轴承, 其零件可采用  $200\sim 250^{\circ}\text{C}$  回火。对在高温下工作的轴承, 根据使用温度, 零件的回火温度可选用  $200$ 、 $250$ 、 $300$  或  $400^{\circ}\text{C}$ 。

通常按轴承零件大小和精度等级来选择回火时间, 一般轴承零件是在电炉、油浴炉或硝盐浴炉中进行回火, 保温  $2\sim 3\text{h}$ 。如在油浴炉或硝盐浴炉中回火, 保温时间可稍缩短。大型和特大型轴承零件的回火时间, 根据其尺寸和壁厚可选  $6\sim 12\text{h}$ 。

一般轴承零件回火规范见表 4-19, 精密轴承零件回火均在油炉中进行, 且回火时间可增加  $1\text{h}$ 。高温回火的轴承零件回火规范见表 4-20。为了保证轴承零件有高的尺寸稳定性, 零件回火前必须冷却至室温或者在流动水中冷却, 方可进行回火。

表 4-19 轴承零件回火规范

零件名称	轴承零件精度等级	回火温度和时间	备 注
中小型滚柱	0 级、I 级、II 级、III 级	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $2.5\sim 3.5\text{h}$	滚子直径 $\leq 28\text{mm}$
大型滚柱	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $3\sim 6\text{h}$	滚子直径 $\leq 50\text{mm}$
	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $6\sim 12\text{h}$	滚子直径 $> 50\text{mm}$
钢球	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $3\sim 3.5\text{h}$	钢球直径 $< 48.76\text{mm}$
	5、10、16 级	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $3\sim 4\text{h}$	
中小型套圈	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $2.5\sim 4\text{h}$	—
	P2 级、P4 级	$160\sim 200^{\circ}\text{C}$ , $3.0\sim 4\text{h}$	
大型轴承套圈 (GCr15SiMn 钢)	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $3.5\sim 4\text{h}$	

(续)

零件名称	轴承零件精度等级	回火温度和时间	备 注
特大型轴承套圈	一般品	$150\sim 180^{\circ}\text{C}$ , $6\sim 12\text{h}$	
关节轴承套圈	一般品	$200\sim 250^{\circ}\text{C}$ , $2\sim 3\text{h}$	
有枢轴的长圆滚柱	一般品	$320\sim 330^{\circ}\text{C}$ , $2\sim 3\text{h}$	

表 4-20 轴承零件高温回火规范

套圈: 滚子	回火温度/ $^{\circ}\text{C}$		保温时间/h	回火介质
	钢	球		
200	同一般回火工艺	同一般回火工艺	3	过热汽缸油 HG-38、 HG-52、 HG-62 或 HG-72H HG-65H HG-33H
225	同一般回火工艺	同一般回火工艺	3	
250	直径 $< 15\text{mm}$ 时为 $170\sim 180$	直径 $< 25.4\text{mm}$ 时为 $150\sim 160$	3	
	直径 $\geq 15\text{mm}$ 时为 $250\sim 300$	直径 $\geq 25.4\text{mm}$ 时为 $250\sim 300$	3	
350	350	350	3	空气
400	400	400	3	
450	450	450	3	

## (3) 回火后技术要求及质量检查

1) 回火后技术要求, 轴承零件回火后硬度要求见表 4-21。高温回火零件的硬度应符合表 4-22。高于  $300^{\circ}\text{C}$  回火后零件的硬度按图样规定。

表 4-21 轴承零件回火后的硬度要求

钢 号	轴承零件名称 <sup>①</sup>	轴承成品硬度值 (HRC)
GCr15	套圈	61~65
	钢球 (直径 $< 45\text{mm}$ )	62~66
	钢球 (直径 $> 45\text{mm}$ )	60~66
	圆锥滚柱、球面滚柱、短圆柱滚柱	61~65
	关节轴承套圈	58~61
	滚针 (长度/直径 $> 2.5$ , 直径 $< 6\text{mm}$ )	61~65
	长圆柱滚柱 (长度/直径 $> 2.5$ , 直径 $> 6\text{mm}$ )	61~65
	有枢轴的长圆滚柱	48~56 <sup>②</sup>
GCr15SiMn	套圈	60~64
	钢球	60~66
	滚柱	61~65

① 同一零件不同部位硬度差不得超过 2HRC。

② 回火温度选用  $320\sim 330^{\circ}\text{C}$ 。

表 4-22 高温回火的轴承零件硬度要求

回火温度 /℃	代 号	硬度要求 (HRC)		
		套 圈	钢 球	滚 子
200	$T_1$	60~63	62~66	61~65
225	$T_1$	59~62	62~66	61~65
250	$T_2$	58~62	63~62	58~62
300	$T_3$	55~59	56~59	55~59

轴承零件回火后的显微组织、断口、脱碳、贫碳和畸变等均按淬火后技术要求。轴承零件的回火稳定性应小于 1HRC。钢球的压碎载荷不得低于表 4-23 的规定。

表 4-23 钢球的压碎载荷

钢球直径		破碎载荷/kN	
in	mm	热处理不低于	成品不低于
1/8	3.176	3.9	5.1
5/32	3.969	6.2	7.9
3/16	4.763	8.9	11.4
7/32	5.556	12	15.3
15/64	5.953	13.9	17.0
1/4	6.350	15.8	20.0
9/32	7.144	20.0	25.4
5/16	7.938	24.7	30.9
11/32	8.731	29.9	37.3
3/8	9.525	35.6	44.2
13/32	10.319	41.7	51.5
7/16	11.113	48.4	59.5
29/64	11.509	51.9	64.5
15/32	11.906	58.6	69.1
31/64	12.303	59.3	73.7
1/2	12.700	63.2	78.2
17/32	13.494	67.8	86.5
9/16	14.288	76.0	96.4
19/32	15.081	84.7	107.0
5/8	15.875	93.9	118.0
21/32	16.669	103.0	130.0
11/16	17.462	114.0	142.0
23/32	18.256	124.0	155.0
3/4	19.50	135.0	169.0
25/32	19.884	147.0	183.0
13/16	20.638	159.0	197.0
7/8	22.225	184.0	227.0
29/32	23.019	197.0	237.0
15/16	23.812	211.0	259.0
1	25.400	240.0	293.0
1 1/16	26.988	271.0	329.0
1 1/8	28.575	288.0	357.0

(续)

钢球直径		破碎载荷/kN	
in	mm	热处理不低于	成品不低于
1 1/16	30.162	321.0	397.0
1 1/4	31.750	356.0	438.0
1 1/8	33.338	392.0	481.0
1 3/8	34.925	430.0	524.0
1 1/2	38.112	476.0	569.0
1 5/8	38.100	512.0	617.0
1 5/8	41.275	601.0	719.0
1 11/16	42.862	648.0	767.0
1 3/4	44.450	697.0	820.0
1 7/8	47.625	800.0	935.0
2	50.800	910.0	1050.0

2) 回火质量检查。回火后质量检查除淬、回火后的检查项目外, 必须进行钢球压碎载荷和回火稳定性的检查。回火稳定性检查主要是检查回火是否充分, 其方法是将已回火零件用原回火温度、重新回火 3h, 在原回火硬度测点附近复测, 硬度下降不超过 1HRC 者为合格。钢球压碎载荷试验可按 GB308 规定进行。

4. 稳定化处理(补加回火) 稳定化处理主要是为了消除部分磨削应力, 进一步稳定组织, 提高轴承零件的尺寸稳定性。稳定化处理温度比原回火温度低 20~30℃, 一般采用 120~160℃, 保温时间为 3~4h。各种零件稳定化处理的保温时间, 一般应按照轴承精度等级和尺寸与形状来选择, 详见表 4-24。

表 4-24 稳定化处理工艺

名 称	轴承零件 精度等级	稳定化处理 温度与时间
中小型滚子	0 级、1 级	120~160℃, 12h
	Ⅱ 级	120~160℃, 3~4h
钢球	5 级、10 级, 16 级	120~160℃, 12h
大型钢球	20 级、一般品	120~160℃, 3~5h
中小型套圈	P2 级	粗磨后: 140~180℃, 4~12h
	P4 级	细磨后: 120~160℃, 3~21h
	P4 级	120~160℃, 3~5h
	短圆柱滚子	120~160℃, 3~5h
大型、特大型套圈	P0、P6、P6X	120~160℃, 3~4h
	P0~P6	120~160℃, 3~4h

5. 轴承零件淬、回火后的质量控制 零件淬、回火后的质量控制按 JB1255 高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件执行。

#### 4.1.2 铬钢滚动轴承零件的感应加热热处理

铬钢滚动轴承零件采用感应淬火及感应加热回火,其轴承的使用寿命比在炉中加热淬火、回火的提高 10%~20%。同时,感应淬火的设备占地面积小,节约能源,劳动条件好,便于机械化,而且还具有零件畸变小、氧化脱碳少等特点。适用于大批量生产轴承圈和滚动体。

##### 4.1.2.1 中型轴承(6308)套圈的感应加热热处理

轴承套圈大批量感应加热热处理生产线的工艺流程如下:套圈中频感应加热→送入带有振动淬冷机的油槽中淬冷 1min→清洗→工频感应加热回火。6308 轴承套圈的感应淬火、回火工艺见表 4-25。

表 4-25 GCr15 钢制 6308 轴承套圈感应加热热处理工艺

轴承零件	中频感应加热淬火					工频感应加热回火				
	推料节拍/ (件·min <sup>-1</sup> )	加热温度/ °C	保温时间/ s	总加热 时间/s	冷却	推料节拍/ (件·min <sup>-1</sup> )	电参数 $U_2/V$ $I_2/A$	加热温度/ °C	保温时间/ s	总加热 时间/s
6308/01	9.5	870±5	120	330	油	9.5	23.5±0.3 300	215±5	150	300
6308/02	9.5	870±5	120	330	冷	9.5	15.5±0.3 300	215±5	150	300

表 4-26 套圈在传送带式炉中加热与感应加热的经济和技术比较

项目	内 容	130kW 传送带式炉	6308 自动线感应加热设备	备 注
1	淬、回火耗电量	0.61kW·h/kg	0.38kW·h/kg	
2	材料消耗			可使用 3~5 年
	镍铬电阻带	1.5~8kg	200~300kg 紫铜管	
	耐热钢	1775kg	不超过 10kg	
3	淬、回火设备自重	30t	不超过 1t	系在箱式电炉 加热淬火+空气 回火
	产品质量			
	脱贫碳深度/mm	0.05~0.08	<0.02	
	同件硬度差(HRC)	<1	<0.5	
	同批硬度差(HRC)	<2	<1.0	
4	椭圆畸变/mm	0.15~0.25	0.08~0.20	
	平均寿命/h	3278	4223	
	劳动条件	50%以上热量损失,夏天环境温度超过 40°C	90%热量用于加热,环境温度同冷加工	
5	适应范围	多品种、多型号	少品种 大批量	

轴承套圈在感应加热热处理自动线上处理比在传送带式炉自动线上处理具有许多优点,6308 轴承套圈在 130kW 传送带式联动机上处理与在感应加热热处理自动线上处理的经济技术比较见表 4-26。

##### 4.1.2.2 钢球的中频感应淬火

1. 感应加热与保温 以 1/2"钢球感应加热为例,总加热时间为 9.3s,节拍为 6 粒/s,总冷却时间为 9s。在感应器出口处,钢球温度为 920°C,生产率为 200kg/h。经淬火后钢球硬度、断口、压碎载荷均与电阻炉加热的相同。淬火组织虽不如电阻炉处理的均匀,但也在标准的合格范围内。与电阻炉相比,其技术经济指标见表 4-27。

2. 钢球感应加热后电阻炉保温 采用此种淬火加热装置时质量全面合格,氧化脱碳、压碎载荷高于电阻炉加热淬火的钢球,电力消耗可节约 70%,生产率可提高 2.5 倍(平均 350kg/h)。钢球淬火加热与保温的温度和时间见表 4-28。

表 4-27 感应加热与电阻炉加热的技术经济指标

加 热 办 法	生产率 kg·h <sup>-1</sup>	加热时间 s	脱碳深度 mm	氧化耗损 (%)	电能耗损 kW·h·t <sup>-1</sup>
感应加热	200	30	0.06	0.1	330
电阻炉加热	10	1800	0.16	0.80	370

表 4-28 钢球淬火加热与保温的温度和时间

钢球直径/mm	重量/g	加热温度/℃	感应加热时间/s	电阻炉保温时间/min	生产率/kg·h
20.89	37.0	840±5	16	10~13	290~310
23.27	52.0	840±5	17.0	12~15	345~375
28.95	99.0	840±5	19.0	15~18	480~530
30.45	117.0	850±5	21	15~18	490~535
36.97	207.0	855±5	30	18~21	495~560

### 4.1.3 铬轴承钢的贝氏体淬火热处理

高碳铬轴承钢下贝氏体处理后断裂韧性 $K_{IC}$ 比常规马氏体淬火提高30%，裂纹的扩展速率比常规马氏体要慢，零件表面呈压应力，具有高的冲击韧性、尺寸稳定性高和磨削不易产生磨削裂纹等优点，适用于工作条件恶劣、润滑差受高冲击负荷的铁路、轧机、矿山、采煤、钻井等条件下工作。

贝氏体淬火工艺特点：

(1) 毛坯需经碳化物细化处理，通常选用正火和快速退火。要求退火组织为JB1255中1~2级退火组织，GCr18Mo退火后硬度为179~217HBS。

(2) 淬火加热温度比常规马氏体淬火温度高20~30℃，淬火加热应在可控气氛炉中进行或在盐浴炉中加热。

(3) 冷却在220~240℃硝盐中进行，按冷却介质的0.5%~1%（质量分数）加水，以调节冷却速度。

(4) 零件表面呈压应力，有利于接触疲劳寿命的提高，无淬火裂纹。

(5) 贝氏体淬火后套圈尺寸胀大，以NJ3226/Q1、S0为例，O1胀大0.4~0.6mm；O2胀大0.25~0.4mm。

(6) 高的尺寸稳定性，贝氏体淬火后组织为下贝氏体+未溶解碳化物以及≤3%（体积分数）残留奥氏体所组成。在120℃使用温度下，组织稳定，零件尺寸稳定如用GCr18Mo制造的NJ3226/O1、O2尺寸稳定性≤1.25×10<sup>-3</sup>mm，小于标准规

定值≤1×10<sup>-3</sup>mm。

(7) 力学性能良好，贝氏体淬火与常规马氏体淬火相比，耐磨性、接触疲劳寿命相当，抗弯强度提高15%， $K_{IC}$ 提高20%，冲击韧性比回火马氏体高2倍以上。

下贝氏体等温淬火可以减少热应力和变形，使零件表面呈压应力，从而提高了轴承寿命和可靠性，但热处理成本要高。

GCr15、GCr18Mo贝氏体淬火工艺见图4-19和表4-29。

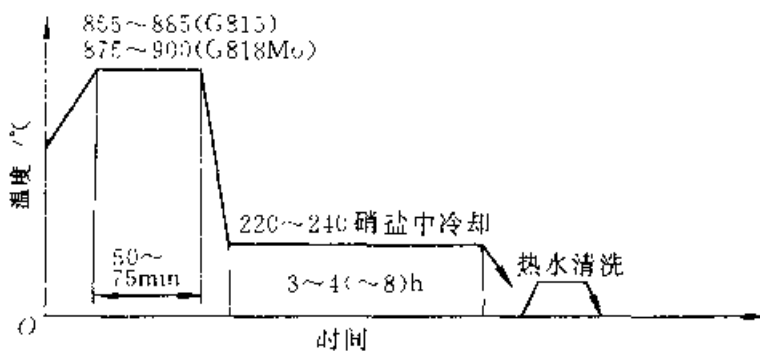


图 4-19 GCr15、GCr18Mo 贝氏体淬火工艺

（括弧时间8h适用GCr18Mo）

贝氏体淬火后，需经70~80℃热清洗。对于大型轴承零件还需进行回火。其回火工艺见表4-30。

GCr18Mo钢制准高速铁路客车轴承152726Q/S0、152726Q/S0经贝氏体处理后的技术要求。

(1) 硬度，套圈、挡圈的表面硬度为58~63HRC，同一零件硬度不均匀度≤1HRC，同一批零件硬度差≤3HRC。



- (2) 晶粒度,  $\leq 8$  级, 或更细。
- (3) 显微组织为下贝氏体和未溶解碳化物。
- (4) 不允许有裂纹。
- (5) 变形量, 贝氏体处理后尺寸均胀大, 12726/01 胀大 0.1~0.6mm; 12726/02 胀大 0.25~0.4mm。

表 4-29 推荐的 GCr15、GCr18Mo 贝氏体的淬火工艺

钢号	套圈壁厚 /mm	淬火工艺参数		盐浴等温时间 h
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温时间 min	
GCr15	$<10$	855~860	60	(220~240 $^{\circ}\text{C}$ ) $\times$ (3~4h)
	$>10\sim14$	860~865	60	
	$>14\sim18$	870~880	60	
	$>18\sim22$	870~880	60	
	$>22\sim25$	875~885	60	
GCr18Mo	40~45	885~890	60	220 $^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$
	45~50	890~895	60	
	50~55	895~900	60	
	55~60	900~905	60	

(续)

钢号	套圈壁厚 /mm	淬火工艺参数		盐浴等温时间/h
		温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温时间 /min	
100CrMnMo8 (W7) <sup>①</sup>	55~60	875~885	60~70	220 $^{\circ}\text{C}\times 10\text{h}$
	60~70	885~895	60~70	
	$\geq 70$	895~910	60~70	

① 100CrMnMo8 的化学成分 (质量分数) 为: 0.90%~1.05% C; 0.40%~0.60% Si; 0.80%~1.10% Mn; 1.80%~2.05% Cr; 0.50%~0.60% Mo。

表 4-30 贝氏体处理后的回火工艺

钢号	回火工艺 / $^{\circ}\text{C}\times \text{h}$	成品硬度 /HRC
GCr15	260 $\times$ 2.5	58 $\pm$ 2
GCr18Mo	260 $\times$ 4	
100CrMnMo8	260 $\times$ 4	—

4.1.4 一般铬钢轴承零件在各种设备中的热处理工艺

4.1.4.1 一般铬钢套圈的热处理工艺 (见表 4-31)

表 4-31 一般铬钢套圈的热处理

零件名称	钢号	主要热处理设备	淬 火			清 洗	回 火	稳定化热处理	备 注
			淬火温度 / $^{\circ}\text{C}$	总加热时间 /min	冷却介质及冷却方法				
轴 承 套 圈 直 径 小 于 25mm	GCr15	RYD-100—8 盐炉、输送带式保护气氛电炉或小型推杆式电炉	830~850	保温按 1.2~1.5min/mm	在 30~80 $^{\circ}\text{C}$ 的 L—AN10、L—AN20 全损耗系统用油中冷却	(1) 用盐炉加热后的清洗见注 1 (2) 用其他炉型加热淬火后在 3%~5% 碳酸钠水溶液 (质量分数) 中清洗, 冷热均可	150~180 $^{\circ}\text{C}$ , 2.5~3h	120~160 $^{\circ}\text{C}$ , 3~5h	
			840~850	15~20					



零件名称	钢号	主要热处理设备	淬 火			清 洗	回 火	稳定 化热 处理	备 注
			淬火温度 ℃	总加热 时间 min	冷却介质 及 冷却方法				
轴 承 套 圈 直 径 大 于 20mm	GCr15	鞍底连 续式电炉	3~5mm 840 835 835 ±10 ±5 ±5	8~12	2) 对易畸变的套圈自动下落油槽, 不得用动液压泵	在 3%~5% 碳酸钠水溶液 (质量分数) 中清洗, 冷热均可	150~180℃, 2.5~3h	120~160℃, 3~5h	见注 2
			5~8mm 845 840 835 ±10 ±5 ±5	12~14					
			8~12mm 840 845 840 ±10 ±5 ±5	14~20					
		RYD 100/8 盐 浴炉	套圈壁厚 12~15mm: 830~840 16~20mm: 835~840 20~30mm: 840~845	保温时间 13~17 15~19 19~26		见注 1			
中 心 套圈	GCr15	CC <sub>1</sub> -II --15--9x	套圈壁厚 3mm 以下: 850~855 3~25mm: 850~855 5~10mm: 850~855	20~25 25~28 30~40	光亮淬火油 油温应不高于 85℃		160℃ ±10℃ × 3h		保护气 氮 N <sub>2</sub> 压 力应调至 0.3~ 0.4 MPa 乙醇调至 2.5~3 mL/min
大 型 轴 承 套 圈 直 径 大 于 44mm	GCr15SiMn	220kW 输送带式 电炉	套圈壁厚 I 区 II 区 III 区 8~12mm 815 825 820 ±10 ±5 ±5 12~15mm 820 825 820 ±10 ±5 ±5 16~20mm 830 830 825 ±10 ±5 ±5 21~23mm 825 835 830 ±10 ±5 ±5	30~70	1) 在 30~80℃ 的 L--AN10、L--AN20 全损耗系统用油中冷却时采用手帘或旋转淬火机 2) 对于易畸变的, 用手帘冷却	套圈淬冷后冷却到 80℃ 以下时在 3%~5% 的碳酸钠水溶液 (质量分数) 中进行热清洗后再冷清洗	150~180℃, 4~6h	120~160℃, 25~35h	见注 2

(续)

零件名称	钢号	主要热处理设备	淬火温度 (°C)	加热 时间 min	冷却介质 及 冷却方法	清洗	回火	稳定 化热 处理	备注
大型 轴承套圈 直径 大于 150mm	GCr15SiMn	RJX 75-9箱式 电阻炉	套圈壁厚 8~12mm; 82~100; 10~15mm; 120~150; 17~20mm; 83.7~100	3~7	1) 在30~60°C的L-AN10、L-AN20全损耗系在含3%~5%的碱酸钠水(质量分数)中进 2) 对于易畸变的, 用于单冷	套圈淬冷后冷却到180°C, 110~160°C, 2.5~3.5h	150~180°C, 110~160°C, 2.5~3.5h	120~150°C, 2.5~3.5h	见注2
特大型轴承套圈直径110~2000mm	GCr15SiMn	150kW的井式电阻炉	820~840	1) 较薄的套圈: 1件到温时保温时间少于30min; 2) 较厚的套圈: 壁厚15mm时, 保温时间20~30min; 壁厚大于15mm时, 需吹扫空气, 将油搅动, 到温后, 保温时间6~10h; 3) 套圈壁厚, 90mm, 直径400~1100mm, 用旋转到淬火机冷却3~5min 4) 套圈直径1100mm时, 需架冷却	1) 在30~60°C的L-AN10、L-AN20全损耗系在含3%~5%的碱酸钠水溶液(质量分数)中清洗后再清洗	套圈冷却到60°C以下, 60~80°C的8%~12%碳酸钠水溶液(质量分数)中清洗后再清洗	150~180°C, 110~160°C, 2.5~3.5h	120~150°C, 2.5~3.5h	1) 对易畸变的套圈淬火油冷后, 出油温度应控制在80~120°C, 热整形后方可清洗 2) 带油沟的套圈淬火前需进行消除机加工应力退火, 以防止产生裂纹, 且L2为600°C, 8~10h
关节轴承套圈	GCr15	RYD 75-13盐炉	套圈壁厚 ≤5mm 840±5 5~6mm 845±5 5~6mm 85±5 840~850	保温时间 3~7 8~12 12~16 3~5	在30~80°C的L-AN10、L-AN20全损耗系统用油中单冷冷却	见注1	200~250°C, 120~160°C, 2.5~3.5h	120~150°C, 2.5~3.5h	
		RJX 45-9箱式电炉				在30~50%的碳酸钠水溶液(质量分数)中清洗(冷热均可)			

(续)

零件名称	钢号	主要热处理设备	淬 火			清 洗	回 火	稳定化热处理	备 注
			淬火温度 /°C	总加热时间 /min	冷却介质及冷却方法				
中 型 轴 承 套 圈 的 等 温 淬 火	GCr15	RJX— 45—9 箱式 电 炉	840~850	40~50	在125~135°C 的 L-AN10 或 L-AN20 全损 耗系统用油或 在 (质量分数) DF2-A 和 DFE-S 等油中 等温 120~150h	在 3%~ 5% 的 碳 酸 钠 水 溶 液 (质量分数) 中清洗 (冷 热均可)	不 进 行 回 火	120~ 160°C, 3 ~4h (粗 磨、细磨 后 各 一 次)	贝氏体 等温淬火 零件的退 火组织为 点状或细 粒状珠光 体, 因此 套圈毛坯 必需采用 900°C 正 火和 760 ~780°C 快速退火 工艺

注: 1. 用盐浴炉加热的零件, 应及时清洗, 除盐, 其工序为: 油淬后用热水冲洗, 即在温度为 80~90°C 的清洗槽 (1 质量分数) (664 1%, 105 1%, 6503 1.5%) 中清洗→沸水热冲→回火→沸水热冲→清洗槽 (1) 中清洗→沸水热冲再在清洗槽 (1 质量分数) (664 1.5%, 105 1.5%, 6503 2%) 中清洗→沸水热冲→防锈处理→入库。其中 105 清洗剂的组成质量分数为: 聚氯乙稀脂肪醇醚 24%, 聚氯乙稀基酚醚 12%, 烷基二乙醇酰胺 24%, 水 40%; 664 清洗剂的组成质量分数为: 105 清洗剂 50%, 油酸三乙醇胺 50%; 6503 清洗剂为十一烷基醇酰胺磷酸酯。

2. 为防止脱碳, 套圈在清洗下净淬火加热前, 涂以 3%~5% 的硼酸酒精溶液 (质量分数)。

4.1.4.2 一般铬钢钢球的热处理工艺 (见表 4-32)

4.1.4.3 一般铬钢滚柱滚针的热处理工艺 (见表 4-33)

表 4-32 一般铬钢钢球的热处理工艺

零件名称	钢号	主要热处理设备	淬 火				清 洗	回 火	备 注
			钢球尺寸/in	淬火温度 /°C	总加热时间 /min	冷却介质及冷却方法			
钢 球	GCr15	RYD— 100—8 RYD—75 13 盐浴 炉	<1/16	830~840	5~8	30 ~ 80°C 的 L— AN10 或 L—AN20		150~180°C 2~4h	1) 在盐 浴炉加热时, 先预热再加 热 2) 对于 “0 级”、“1 级”钢球淬火 后应进行— 60~—70°C 的冷处理, 硬 化磨削后要 进行 120~ 130°C, 4~ 6h 的稳定化 处理
			1/16~3/16	835~845	7~12	全损耗系统			
			3/16~3/8	840~850	9~15	用油散开滚			
			3/8~5/8	845~855	12~18	动冷却			
			5/8~25/32	830~835	15~20	波美度 22°Be, 20 ~50°C 的 盐水中滚动 冷却			
			25/32~1	830~835	18~23	同上			

(续)

零件名称	钢号	主要热处理设备	淬 火			冷却介质及冷却方法	清 洗	回 火	备 注
			钢球尺寸 in	淬火温度℃	总加热时间min				
钢球	GCr15	G-30鼓形回转电炉	7.32~9.32	835±5	18~22	在 30~80℃ 的 L-AN10、L-AN20 全损耗系统用油中冷却		150~180℃ 3~4h	
			9.32~23.64	835±5	22~26				
			23.64~12mm	845±5	26~30				
		G-70回转式电炉	3.18~1.12	845±5	22~27	在 15~40℃, 10%~20% 苏打水溶液质量分数中冷却		150~180℃ 3~5h	
			1.12~9.16	845±5	27~30				
			9.16~7.8	845±5	30~35				
			7.8~13.32	835±5	35~45				
			13.32~19.32	835±5	40~45				
			15.16~1.2	860±5	45~50				
			9.16~45mm	850±5	45~58				
钢球	GCr15	RG-45-9B 保护气氛滚筒式电阻炉	5.16	850±5	75min (65±1)kg	PZ-2A 淬火油, 温度不高于 90℃	(150±5)℃ ×2h	(1) 回火为油炉 (2) 保护气用 1:1 甲醇与丙酮混合液, 滴入量为 5~7mL/min	
			1.2		60min (70±1)kg		(150±5)℃ ×3h		
			5/8		65min (70±1)kg		(150±5)℃ ×3h		
			3/4		60min (60±1)kg		(150±5)℃ ×3h		
			3/8		45 (40±1)kg		(150±5)℃ ×3.5h		
			11.16		45 (40±1)kg		(150±5)℃ ×3.5h		
			钢球		GCr15SiMn		RJX-45-9箱式电阻炉		2~3
钢球	GCr-15SiMn	RYD-100-8 RYD-75-13 盐浴炉	2~3	845±5	1~1.2min/mm				

表 4-33 一般铬钢滚柱、滚针热处理

序 号	零件名称	钢 号	主要 热处理 设备	淬 火			清 洗	回 火	备注
				滚子 直径 mm	淬火 温度 /°C	总加热 时间 min			
1	滚柱	GCr15	G-30 回转式电 炉	5~7	830~850	18~22	30~80°C 的 L-AN10、L-AN20 全损耗系统用油中 串动或摇晃冷却	150~180°C 2.5~3.5h	(1) 为防止 脱碳,淬火前零 件清洗干净后 涂 3%~5% (质 量分数) 硼酸酒 精溶液 (2) 对于 0 级、1 级滚子或 滚针均在淬火 后进行 -10 70°C 的冷处 理,粗磨后应进 行 120~160°C、 12h 的稳定化处 理
				7~9	830~850	22~24			
				10~14	830~850	24~30			
				6~10	850~860	29~35			
			RJX- 45-9 箱式 电炉	10~15	850~860	35~37			
				15~22	850~860	37~40			
				6	835~840	保温时间 6~8			
				6~11	845±5	8~10			
				11~16	850±5	10~12			
				16~22	855±5	14~18			
2	滚针	GCr15	RYD- 100-8 盐 浴炉	所有滚针	835~840	1~1.2 min/mm	30~80°C 的 L-AN10、 L-AN20 全 损耗系统用 油中串动或 摇晃冷却	150~180°C 2~3h	
			G-70 回转式电 炉	22~28	820~850	保温时间 14~16			
				22~25	830±5	保温时间 14~16			
				25~30	845±5	保温时间 15~17			
				30~35	835±5	保温时间 16~18			
				35~40	840±5	保温时间 17~19			
				>41	840±5	保温时间 18~20			
			RJX- 45-9 箱式 电炉	30~35	835±5	保温时间 16~18			
				35~40	840±5	保温时间 17~19			
3	滚柱	GCr15SiMn	RJX- 45-9 箱式 电炉	30~35	835±5	保温时间 16~18	30~80°C 的 L-AN10、 L-AN20 全 损耗系统用 油中串动或 摇晃冷却	150~180°C 3~1h	
				35~40	840±5	保温时间 17~19			
				>41	840±5	保温时间 18~20			
				30~35	835±5	保温时间 16~18			
				35~40	840±5	保温时间 17~19			
				>41	840±5	保温时间 18~20			
				30~35	835±5	保温时间 16~18			
				35~40	840±5	保温时间 17~19			
				>41	840±5	保温时间 18~20			
				30~35	835±5	保温时间 16~18			

#### 4.1.5 渗碳钢制中小型轴承零件的热处理

要求轴承工作表面具有高耐磨性、高抗疲劳性,而心部具有高的强韧性,承受高冲击载荷的轴承零件采用渗碳钢制造,进行渗碳处理。目前轴承制造中常用的渗碳钢有 20、15Mn、20Cr2Ni4A、20Cr2Mn2MoA、G20CrNiMoA 等钢。其用途分别为:20 和 15Mn 钢主要用于制造汽车万向节轴承;20Cr2Ni4A 和 20Cr2Mn2MoA 钢主要用于制

造耐高冲击载荷轴承零件,如汽车方向盘轴承外套;20Cr2Ni4A 钢用于制造飞机起落架轴承;G20CrNiMoA 钢用于制造汽车轮鼓轴承。中小型轴承零件渗碳的技术要求如下:

(1) 渗碳层深度见表 4-34。

(2) 渗碳淬火后表面硬度应为 62~66HRC,回火后应为 60~64HRC;心部硬度一般≥25HRC。表面不允许有软点和硬度不均匀现象。

(3) 渗碳轴承零件淬、回火后渗层断口应为

灰色瓷状细小晶粒断口,中心断口应为纤维状,不允许有粗大晶粒断口。渗层组织的显微组织应为隐晶或细针马氏体和均匀分布的碳化物,以及少量残留奥氏体组成,不允许有粗大的碳化物网和明显可见的碳化物针。淬、回火后不允许有裂纹存

在。脱碳层深度不应超过零件的实际最小留量。

(4) 渗碳层表面碳浓度应控制在 0.8%~1.0% (质量分数),过渡层碳浓度梯度要平缓。

(5) 渗碳轴承零件热处理工艺见表 4-35。

表 4-34 中小型轴承零件渗碳层深度要求

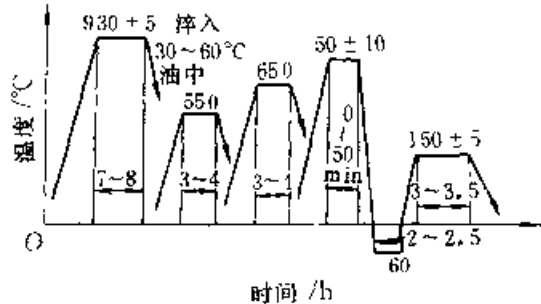
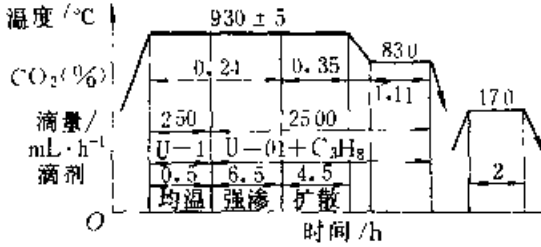
套圈壁厚/mm	渗碳层深度/mm	滚子直径/mm	渗碳层深度/mm	钢球直径/mm	渗碳层深度/mm
6~7	1.3~1.6	7~10	1.4~1.6	3.1	0.38~0.65
8~10	1.8~2.2	11~14	1.7~1.9	5~8	0.8~1.3
11~14	2.3~2.7	15~19	2.1~2.2	9.2	1.4~1.7
15~19	2.8~3.2			13~18	1.8~2.0
20~25	3.3~3.7	20~25	2.4~2.5	19~25	2.1~2.3

表 4-35 中小型渗碳轴承零件热处理工艺

钢号	渗碳零件名称	热处理设备	渗碳和淬、回火后技术要求	渗碳(淬、回火)工艺
20、15Mn	804705 汽车方向节渗针套	180kW 井式气体 渗碳电炉	1) 渗层深度为 0.5~1.5mm 2) 渗层硬度: 表面 60~65HRC, 心部 25HRC 3) 渗碳层组织应为细小针状马氏体和少量残留奥氏体 4) 不允许有裂纹 5) 畸变不能超过总留量的 1%	<p>(a)</p> <p>毛坯冷挤压后,在 680~710℃ 进行 3~4h 去应力退火。渗碳剂用煤油或苯。</p>
20Cr2Ni4A	776801 776901 676701 汽车方向盘轴承外套	RJ— 35~90 井式气体 渗碳电炉	1) 渗碳层深度: 776801、776901 为 1.3~1.7mm, 676701 为 1.2~1.5mm 2) 渗碳层硬度: 表面硬度 56~60HRC, 心部硬度 28~45HRC, 其他技术要求同 20、15Mn 钢零件	<p>(b)</p> <p>(1) 毛坯经 930~940℃ 加热,保温 30~50min 后空冷正火,然后再经 630~650℃ 回火或 680~710℃ 4~6h 低温退火。</p> <p>(2) 渗碳工艺如图所示。</p>



(续)

钢号	渗碳零件名称	热处理设备	渗碳和淬、回火后技术要求	渗碳(淬、回火)工艺
20Cr2Ni4A	飞机起落架轴承	RJ 6—9井式 气体渗碳 电阻炉	1) 渗碳层深度: 7511 内外套为 1.3~1.6mm, 滚子为 1.4~1.6mm; 7512S 内套为 1.8~2.2mm, 外套为 1.3~1.6mm, 7516S 内套为 1.3~1.6mm, 外套为 1.3~2.2mm, 滚子为 1.7~1.9mm 2) 渗碳层硬度, 表面为 61~61HRC, 心部为 >35HRC	 <p>温度/°C</p> <p>时间/h</p> <p>930±5 淬入 30~60°C 油中 550 650 50±10 150±5 7~8 3~4 3~1 50 min 3~3.5 2~2.5 60</p> <p>渗碳剂(质量分数)为 94% 苯, 6% 酒精; 滴入量: 渗碳期为 110~140 滴, 扩散期为 55~70 滴, 后期为 35 滴; 回火在油炉中进行</p>
20CrNi-Mo	汽车轮轴承套圈 外径 φ135mm 高度 36mm 壁厚 9.1mm	滴注式 可控气氛 气体渗碳 炉	1) 有效渗碳层深度为 1.4~1.8mm 2) 表面碳浓度应为 0.8%~0.9% (质量分数) 3) 硬度: 表面 59~63HRC, 心部 >30HRC 4) 显微组织: 表面应为细针状马氏体+少量残留碳化物, 不得有粗大碳化物网; 心部应为低碳马氏体+少量铁素体	 <p>温度/°C</p> <p>CO<sub>2</sub>(%)</p> <p>滴量/ mL·h<sup>-1</sup> 滴剂</p> <p>时间/h</p> <p>930±5 830 170 0.24 0.35 1.11 2.50 6.5 4.5 2 17.0</p> <p>说明: 1) 上述工艺事先向微机储存, 即设定温度: 930°C, 830°C; 时间: 0.5h, 6.5h, 4.5h; CO<sub>2</sub> (体积分数): 0.24%, 0.35%, 1.11% 2) 强渗期一开始设备自动将滴剂 U-1 (甲醇) 换成 U-01 (甲醇+3% 水) 并开始控制通入丙烷量 3) 强渗期、扩散期、淬火保温期的 CO<sub>2</sub> (体积分数) 设定值为 0.24%, 0.35%, 1.11% 相应的碳势值(质量分数) 为 1.15%, 0.8%, 0.9%</p>

#### 4.1.6 中碳合金钢轴承零件的热处理

对承受冲击载荷条件下工作的轴承, 除有的选用合金渗碳钢外, 有的还采用中碳合金钢来制造。主要用途见表 4-36。中碳合金钢轴承零件热处理工艺见表 4-37。

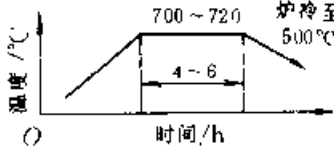
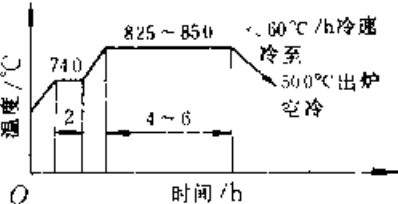
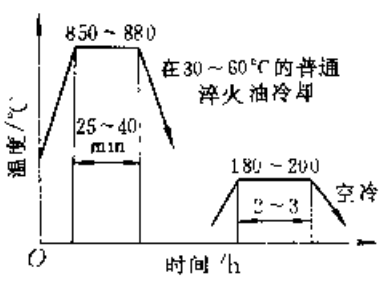
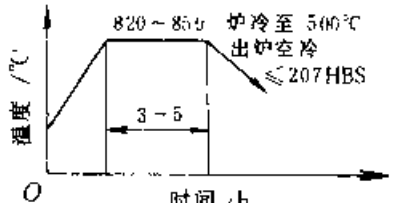
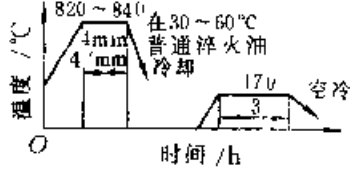
GCr15 钢的化学成分除碳比 GCr15 钢低外, 其他成分均与 GCr15 相同, 其退火工艺与 GCr15 钢基本相同, 但在实际生产中, 退火温度采用较 GCr15 钢低 10°C 为宜, 即 770~790°C。退火后的硬度、组织和脱碳层均能达到 GCr15 钢标准的技术要求。用该钢制造的零件最佳的淬火温度范围为 830~850°C, 回火温度一般采用 160°C, 时

间为 3h。淬、回火组织与 GCr15 钢淬、回火组织稍有差异, 但能符合 GCr15 钢的热检标准要求。

表 4-36 常用中碳合金钢在轴承零件上的应用

钢号	主要用途
GCr10、50CrNiA	制造使用在高冲击载荷下工作的螺旋滚子轴承零件
65Mn	制造有切口螺旋滚子轴承外套、锁圈和弹簧等
55SiMoV	制造石油与矿山钻探机械牙轮钻头中滚动体和轴承零件
G8Cr15	制造一般轴承零件或承受低冲击载荷的轴承零件

表 4-37 中碳合金钢轴承零件热处理工艺

零件名称	钢号	零件技术要求	退火(或正火)	淬火、回火	备 注
螺旋滚子	GCr10 (相当 40Cr)	淬火回 火后硬度: 40~50 HRC	1) 冷卷制成螺旋滚子的再结晶退火  2) 热卷制成螺旋滚子的退火工艺 		1) 在退火加热时，要注意防止脱碳，可用铸铁屑或木炭装箱密封退火 2) 退火组织欠熟者可按原工艺再退火一次 3) 为防止脱碳，需在可控气氛电炉内加热淬火
滚子	50CrNiA	淬火回 火后，45~ 50HRC	1) 退火  2) 正火 840~860℃，空冷，670~690℃回火后空冷		
套圈和滚动体	55SiMoV	按 JB/T T6360 标 准淬火回 火后硬度为 57~59 HRC，组织 为板条状 马氏体+ 残留奥氏 体+少量 碳化物	1) 正火和高温回火 860~870℃保温30~40min，空冷 700~730℃×4~6h 炉冷至650℃ 2) 退火： 760~790℃×4h，然后以≤20℃/h 炉冷至650℃ 退火后硬度为179~255HBS	1) 淬火 860~870℃×40~50min 淬油，淬 火后硬度≥58HRC 2) 回火 220~250℃×3h，空冷，回火后硬 度，套圈 51~58HRC，滚动体 55~59HRC	

#### 4.1.7 限制淬透性钢 (GCr4) 制套圈表面淬火 (TSH)

TSH(Through-Surface-Hardening)的新工艺包括选用低淬透性和限制淬透性特殊钢；整体感应加热或电炉中加热；将加热零件放在特殊冷却装置上用高压水快速冷却，待工件冷却到150℃

左右随后空冷。特殊淬火冷却装置见图4-20。

由于TSH表面淬火选用的钢具有低淬透性，因此其套圈表面为高强度马氏体淬硬层，心部为托氏体、索氏体混合组织，在零件表面呈压应力状态。铁路轴承内套圈TSH表面淬火后的硬化层深度、硬度、及残留应力分布见图4-21。

TSH表面淬火已成功应用铁路客车轴承内

套 (42726/02)、大型轴承、水泥窑炉和轧机轴承等, 近期用 TSH 梯度加热工艺处理的铁路轴承寿命提高 2.36 倍。

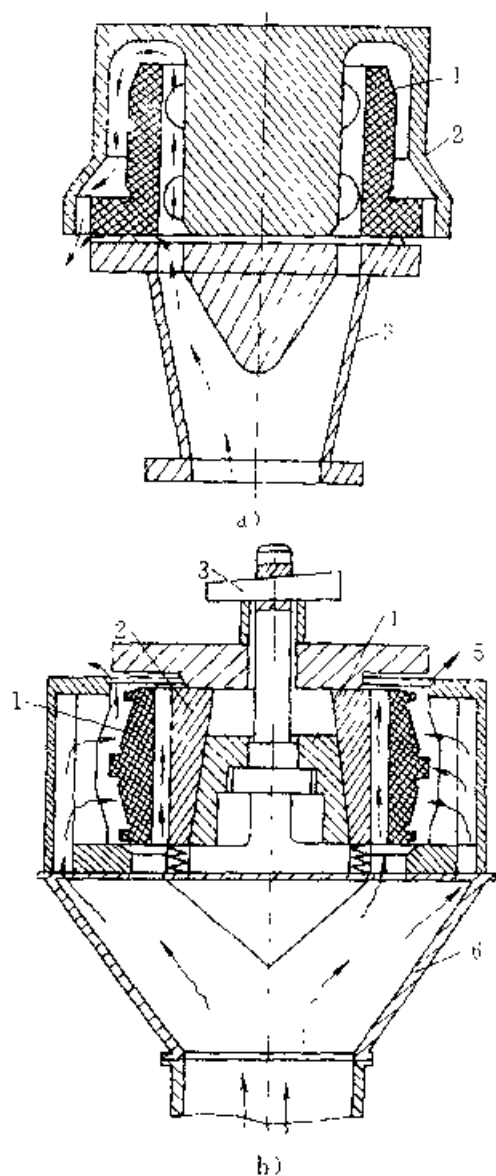


图 4-20 TSH 特殊冷却装置

a) 铁路轴承内套 (42726/02) 冷却装置

1—内套 2—可移动上盖 3—固定支架

b) 人型轴承圆锥内套冷却装置

1—内套 2—组合轴套 4—镶块 5—轴

封 6—密封盖 6—外壳

箭头表示水流方向

TSH 表面淬火与传统全淬透马氏体淬火工艺相比, 提高了在高冲击负荷轴承寿命和可靠性。如铁路客车轴承内套, 以前选用 GCr15SiMn, 按常规热处理后表面硬度为 58~62HRC。短期服役后, 一些内套脆性断裂和疲劳失效。TSH 与渗碳

钢相比, 降低了钢材成本和加工费用, 且热处理工艺简单。

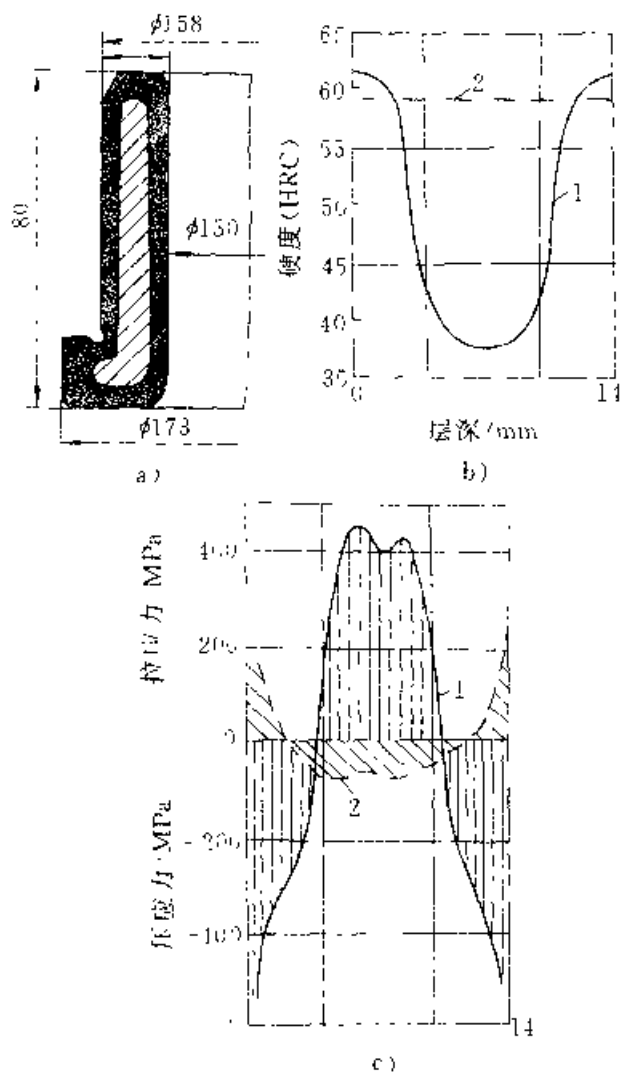


图 1-21 铁路轴承内套 TSH 淬火后硬度、硬化层深度和表面残留应力分布

a) 硬化层情况

b) 硬度分布

1—GCr4 2—GCr15SiMn

c) 残留应力分布

1—GCr4 2—GCr15SiMn

关于 GCr4 TSH 与 GCr15SiMn、18CrMnTi 铁路客车轴承内套组织和硬度比较见表 4-38。

GCr1 TSH 表面淬火与 18CrMnTi、GCr15SiMn 钢制铁路客车轴承内套的静强度与冲击功 (10 套圈的平均值) 的比较见表 4-39; 轴承的疲劳寿命见图 4-22。铁路轴承内套的力学性能比较见图 4-23。

表 4-38 不同钢制铁路轴承内圈的组织和硬度

参 数	由以下钢制造的套圈的数值			
	GCr15SiMn	18CrMnTi	GCr15	GCr4
钢及其热处理 的编号	1	2	3	4
表面硬度 (HRC)	60~61	60~61	62~63	62~63
硬化层深度 mm				
HRC = 8	全淬透	0.7~0.9	1.0~2.0	1.0~1.5
HRC = 55		1.8~2.0	2.4~2.5	1.0~1.5
心部硬度 (HRC)	60~61	57~58	59~60	57~58
心部组织	马氏体、 碳化物	低碳马 氏体	索氏 体、托氏体	托氏体
表面残留奥 氏体 $\varphi$ (%)	11~16	8~10	7~8	6~8
奥氏体晶粒 尺寸级别	9~11	9	10~11	10~11

表 4-39 铁路客车轴承内套静强度和冲击功

不同钢号 和淬火方法	试验温度 /°C	静试验时 失效负荷 /kN	冲击试验时 失效能 /kJ
GCr4TSH 淬火	+20	1270	1.8
	+20	1620*	
	-60		1.45
18CrMnTi 渗碳	+20	1190	0.95
	-60		0.78
GCr15SiMn 全淬透	+20	1530	1.05
	-60		0.67

※ 服役 40 万公里后套圈: 10 个套圈的平均值。

限制淬透性钢 TSH 表面淬火后综合性能优, 它是 21 世纪轴承零件热处理新方向。

GCr4 TSH 表面淬火铁路轴承内套的工艺过程: 锻造后套圈, 需经球化退火, 其球化退火工艺为:  $(790 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h} \rightarrow (710 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$  随炉冷却  $600^{\circ}\text{C}$  出炉空冷。退火后硬度为  $179 \sim 207\text{HBS}$ , 退火后显微组织按 JB127 之规定为 2~3 级。

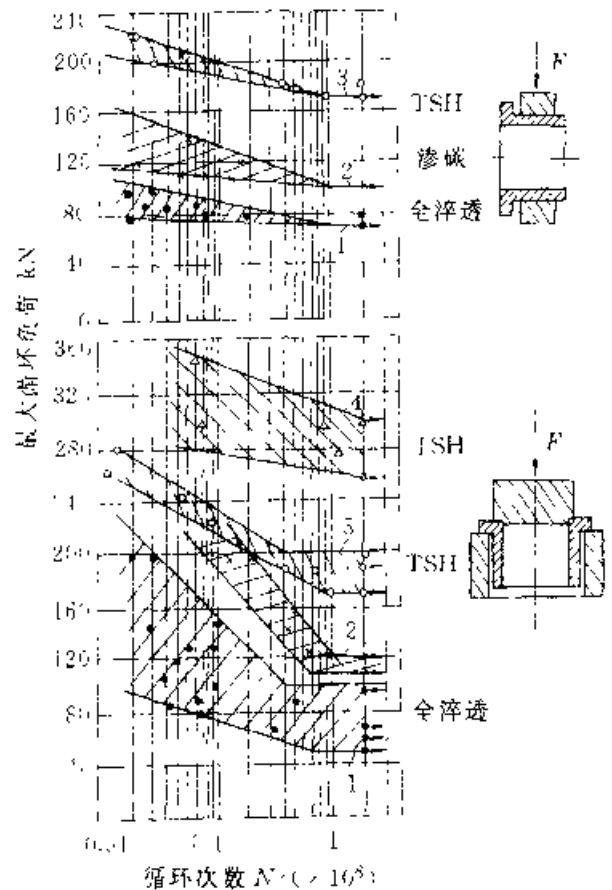


图 1-22 三种钢制铁路客车轴承内套的疲劳寿命 (编号与表 4-38 相同)

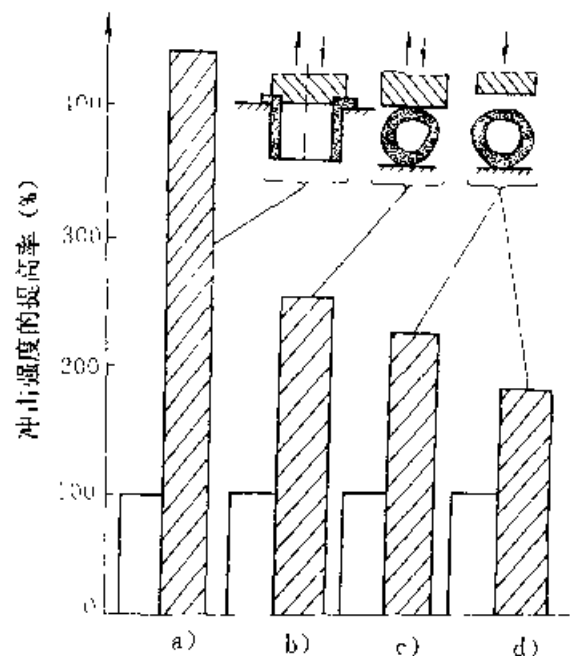


图 4-23 GCr4 (TSH)、GCr15SiMn 钢制铁路客车轴承内套力学性能比较

a)、b) 疲劳极限 c)、d) 在  $-60^{\circ}\text{C}$  和  $+20^{\circ}\text{C}$  冲击强度  
 为 GCr15SiMn (全淬透)  
 为 GCr4 (TSH)

TSH 表面淬火:

加热温度为  $850^{\circ}\text{C}$ , 可用中频感应加热功率 100kW 频率 2500Hz 或电炉中加热。

套圈淬火冷却在特殊冷却装置上进行 (如图 4-20), 以保证水以  $10\sim 15\text{m/s}$  速度通过淬火零件的表面。水压为  $1.5\sim 3\text{MPa}$ , 其快速冷却时间以保证零件于  $150^{\circ}\text{C}$  左右自回火。低温回火  $160\sim 170^{\circ}\text{C}\times 6\sim 12\text{h}$ 。

空心滚子 (直径  $\phi 32\text{mm}\times 52\text{mm}\times \phi 12\text{mm}$ ) TSH 表面淬火采用大功率与高频电流进行快速感应加热, 温度为  $930\sim 960^{\circ}\text{C}$ , 时间 15s, 随后均温。内径表面温度  $650\sim 750^{\circ}\text{C}$  时使滚子内外表面形成奥氏体, 然后用快速流动水冷却。

TSH 表面淬回火后技术要求: 表面硬度为 61~64HRC; 中心硬度为 31~43HRC; 淬火层深度为  $2.0\sim 3.5\text{mm}$ 。表层的显微组织为隐晶 (或细晶马氏体), 残留碳化物以及残留奥氏体组成, 中心组织为托氏体与索氏体的混合组织。

## 4.2 特大、特小、特轻、精密轴承零件的热处理

### 4.2.1 特大及重大型轴承零件的热处理

制造特大及重大型轴承零件的材料主要有: GCr15SiMn、20Cr2Ni4A、20Cr2Mn2Mo、5CrMnMo、45 钢、42CrMo、30Mn50CrMn 等。

#### 4.2.1.1 5CrMnMo 钢制重大型轴承套圈的感应淬火

1. 锻造毛坯的调质 轴承套圈不仅要求滚道表面耐磨, 而且要有一定的强度, 为了改善淬火前的组织, 套圈毛坯必须进行预备热处理, 其工艺如图 4-24 所示, 处理后的硬度要求为  $230\sim 260\text{HBS}$ 。

2. 重大型轴承套圈感应加热热处理 重大型轴承多用于重型起重、挖掘、堆取、隧道掘进机械及雷达、火炮等方面的回转支承。此种轴承以 5CrMnMo 钢制造, 工作表面硬度要求  $55\sim 63\text{HRC}$ , 硬化层深度按表 4-40 执行, 并允许在滚道上有一宽度为小于  $30\text{mm}$  的软带, 且其硬度不应低于  $40\text{HRC}$ 。过去采用火焰加热淬火, 温度高低不稳, 因而其硬化层深度与硬度亦不均, 且软带

较宽, 硬度亦低。采用中频感应淬火时, 不仅淬硬深度和硬度均匀一致, 而且加热时间短, 零件畸变小, 氧化和脱碳少, 同时劳动条件也较好。

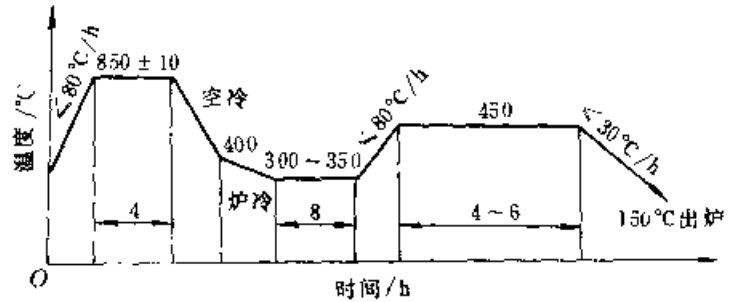


图 4-24 5CrMnMo 钢预备热处理工艺

重大型轴承套圈的感应加热采用频率为 2500Hz, 感应器固定, 并与套圈表面保持  $3\sim 5\text{mm}$  间隙, 套圈随工作盘的转动而进行连续加热。淬火温度为  $830\sim 900^{\circ}\text{C}$ , 淬火介质是从感应器中喷出的 0.05% 聚乙烯醇 (质量分数) 水溶液。淬冷后应立即进行  $150^{\circ}\text{C}$  回火。经淬火后的套圈的表面硬化层深度可达  $4\sim 6\text{mm}$ , 均匀度仅差  $0.5\text{mm}$ , 表面硬度为  $60\sim 62\text{HRC}$ , 淬火软带宽度在  $30\text{mm}$  以下, 软带处的硬度为  $40\sim 50\text{HRC}$ , 畸变为  $0.25\sim 0.35\text{mm}$ 。

表 4-40 有效硬化层深度

钢球直径 /mm	20	25	30	35~50	55~65	75 ~100	
硬化层深度 /mm	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	
滚子直径 /mm	16	20	25	28~32	40~45	50~70	80 ~100
硬化层深度 /mm	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0

#### 4.2.1.2 特大型轴承零件的渗碳

1. 渗碳层深度及允许的圆度 淬火后表面硬度和显微组织与中小型渗碳轴承零件的要求相同, 要求的渗碳层深度及允许圆度误差如表 4-41 和表 4-42 所示。

表 4-41 特大型渗碳轴承零件要求的  
渗碳层厚度

内 外 套		滚 动 体 (滚柱)	
轴承外径 /mm	渗碳层厚度 /mm	滚子直径 /mm	渗碳层厚度 /mm
$\leq 700$	$\geq 4.2$	$\leq 50$	$\geq 3.5$
$700\sim 1000$	$\geq 4.7$	$50\sim 80$	$\geq 4.0$
$> 1000$	$\geq 5.0$	$> 80$	$\geq 4.5$

表 4-42 特大型渗碳轴承零件圆度  
误差允许值 (mm)

外 套		内 套	
外径	允许圆度误差	外径	允许圆度误差
400~450	0.7	< 100	0.6
450~500	0.9	100~150	0.7
500~600	1.0	450~500	0.9
600~700	1.2	500~600	1.0
700~800	1.3	600~700	1.3
800~900	1.5	700~800	1.3
900~1000	1.6	800~900	1.6

外 套		内 套	
外径	允许圆度误差	外径	允许圆度误差
1000~1100	1.8	900~1000	1.6
1100~1200	1.9	1000~1100	1.8
1200~1300	2.1	1100~1200	1.8

注：渗碳轴承零件在渗碳、淬火、回火过程中都会产生收缩。

2. 热处理工艺 毛坯锻造后要进行低温退火，其工艺为  $(680 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  (20Cr2Ni4A) 或  $(650 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  (20Cr2Mn2MoA)，保温 8~12h，炉冷加工后进行渗碳及淬火、回火，工艺见图 4-25。

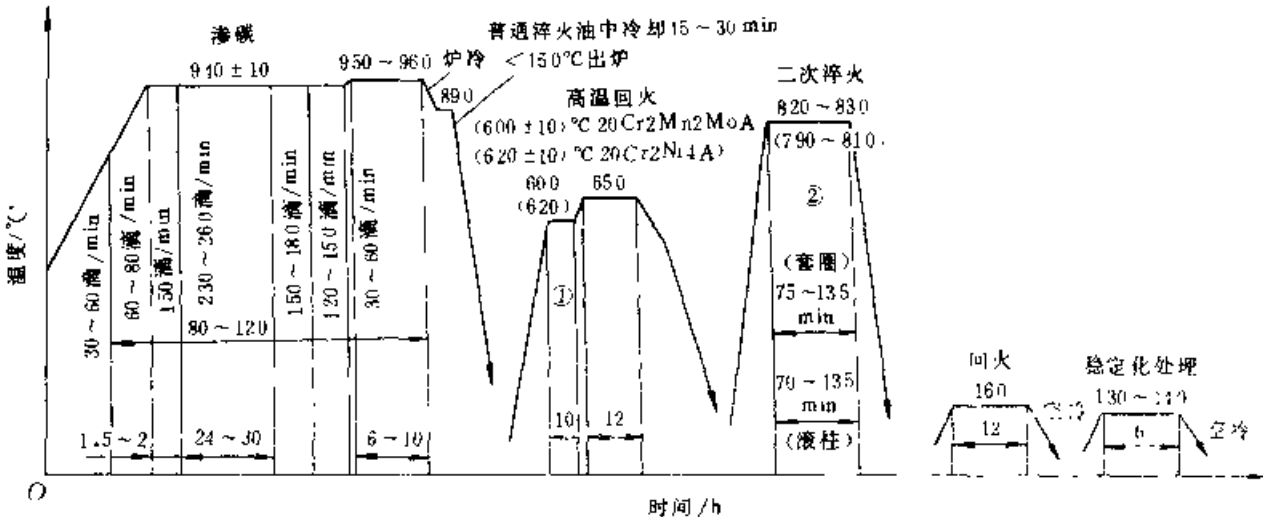


图 4-25 特大型轴承渗碳、淬火、回火工艺 (180kW 井式渗碳炉)

- ①.  $(600 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 20Cr2Mn2MoA;  $(620 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 20Cr2Ni4A  
②.  $820 \sim 830^{\circ}\text{C}$ , 20Cr2Mn2MoA;  $790 \sim 810^{\circ}\text{C}$ , 20Cr2Ni4A

为了防止套圈畸变(胀缩、椭圆、挠曲)，在二次淬火加热时，要保证套圈装架平整，并采用模压淬火，以防止套圈淬火收缩并保证圆度误差在允许范围内。模具需根据每个型号的具体情况专门设计。

4.2.2 微型轴承零件的热处理

微型轴承(指轴承内径 $<9\text{mm}$ )应具有高精度、高灵敏度、长寿命以及使用可靠等要求。微型轴承要求热处理后应具有高而均匀的硬度和耐磨性以及高的尺寸稳定性。由于其接触应力小( $<1960\text{MPa}$ )，不易产生疲劳剥落，主要失效形式是磨损。目前微型轴承所选用的钢种有：ZGCr15、

9Cr18 和 W18Cr4V。其零件热处理一般采用保护气氛或真空热处理。微型轴承的技术要求见表 4-43，热处理工艺曲线见图 4-26，真空淬火工艺见表 4-44。轴承零件在淬火后，对 ZGCr15 钢制 D 级以上和 9Cr18 钢制轴承零件均须于淬火后 30min 内进行冷处理(温度为  $-60^{\circ}\text{C}$ ，时间不少于 30min)。轴承零件的回火：ZGCr15 和 9Cr18 钢制零件在油炉中进行，温度为  $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ，时间为 2h，W9Cr4V 钢制零件在真空炉中进行，两次回火温度为  $560^{\circ}\text{C}$ ，时间为 1.5h。此外，对一些特殊用途的轴承零件可进行化学气相沉积(CVD)TiC 或 TiN 来降低轴承工作面的摩擦系数。GCr15 钢微型轴承零件热处理工艺见表 4-45。

表 4-43 微型轴承零件热处理技术要求

钢 种	零件名称	技 术 要 求		
		金 相 组 织	硬 度	表 面 质 量
ZGCr15	套圈	按 JB1255-81 标准, 合格级别为 1~3 级	61 ~ 65HRC (739 ~ 856HV) 同 零件不同三点硬度应小于 1HRC	1) 表面呈银白色 2) 不得有氧化、脱碳黑斑
ZGCr15	钢球		62 ~ 66HRC (766 ~ 906HV), 其它同上	裂纹、软点和锈蚀
9Cr18	套圈钢球	按 JB1460-71 标准, 合格级别为 2~4 级	≥58HRC (661HV) 其它同上	油淬表面呈黄灰色, 允许在油淬引起的渗碳层 其它同上
W18Cr4V	套圈	按 JB2405-79 标准淬火后晶粒度应符合标准中第二级别图 9-11 级。回火程度按第四级别图, 合格为 ≤2 级过热程度按第三级别图, 合格为 ≤1 级	≥61HRC (739HV)	表面应为银白色, 不得有氧化和脱碳
W18Cr4V	钢球		62 ~ 65HRC (766 ~ 880HV)	

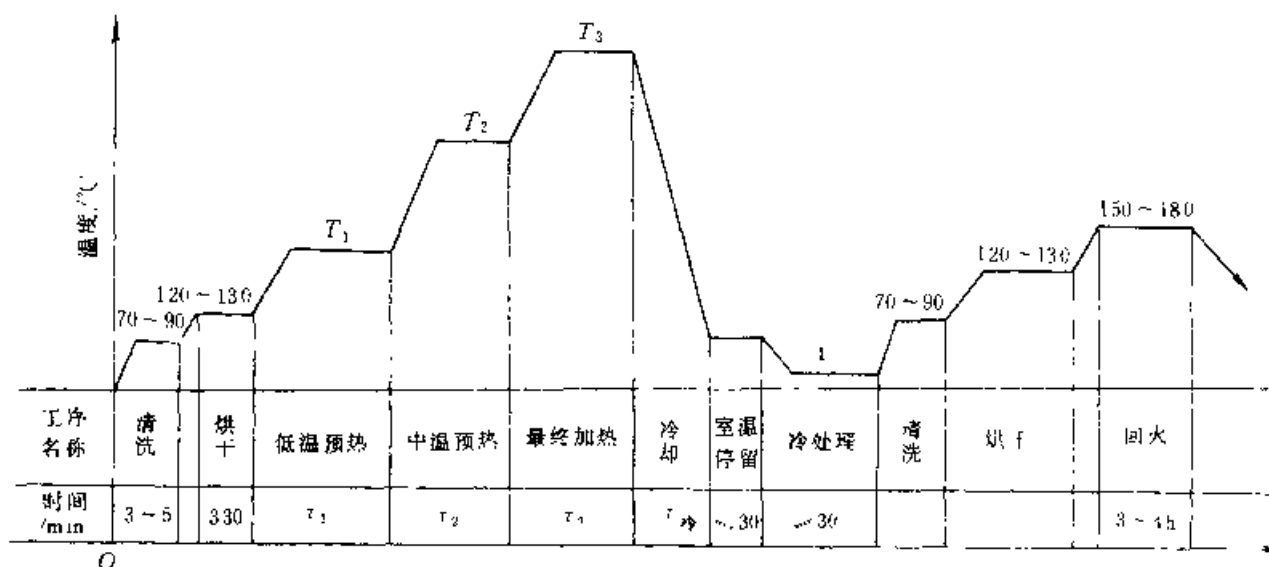


图 4-26 专用微型轴承热处理工艺曲线

(1) 参阅表 4-45

表 4-44 微型轴承零件在 WZ-20 真空炉①中热处理

钢种及 零件名称	装 炉 量 /kg	加 热						冷 却					
		低温预热		中温预热		最终加热		气 冷			油 冷		
		$T_1$ /°C	$\tau_1$ /min	$T_2$ /°C	$\tau_2$ /min	$T_3$ /°C	$\tau_3$ /min	压力 /MPa	时间 /min	终止温度 /°C	压力 /MPa	时间 /min	油温 /°C
ZGCr15 轴承套圈	5					840~850	45~60				0.04	3~5	50~60
	10	—	—	—	—	840~850	75~90	—	—		0.04	3~5	50~60
	15					840~850	120~140				0.04	3~5	50~60
ZGCr15 钢 球	2					840~850	45~55				0.04	3~5	50~60
	7	—	—	—	—	840~850	60~75	—	—		0.04	3~5	50~60
	11					840~850	85~100				0.04	3~5	50~60

(续)

钢种及 零件名称	装炉量 kg	加 热						冷 却					
		低温预热		中温预热		最终加热		气 冷			油 冷		
		$T_1$ °C	$\tau_1$ min	$T_2$ °C	$\tau_2$ min	$T_3$ °C	$\tau_3$ min	压力 MPa	时间 /min	终止温度 °C	压力 MPa	时间 min	油温 °C
GCr15 轴承 套圈	5			850	10~15	1070~1080	20~35				0.04	3~5	50~60
	10			850	20~30	1070~1080	25~35				0.04	3~5	50~60
	15			850	30~45	1070~1080	25~30				0.04	3~5	50~60
GCr15 钢 球	5			850	10~15	1070~1080	20~30				0.04	3~5	50~60
	10			850	20~30	1070~1080	20~30				0.04	3~5	50~60
	15			850	30~45	1070~1080	20~30				0.04	3~5	50~60
W18Cr4V 轴承套圈	3	650	20	850	10	1260~1270	12~15	0.093	10~15	室温			
	5	650	30	850	10	1260~1270	15~20	0.093	10~15	室温			
	7	650	40	850	20	1260~1270	20~25	0.093	10~15	室温			
	10	650	50	850	25	1260~1270	25~30	0.093	2~3	800~900	0.093	3~5	50~60
W18Cr4V 钢球	3	650	30	850	15	1270~1280	15~20	0.093	10~15				
	5	650	40	850	20	1270~1280	20~25	0.093	10~15				
	7	650	50	850	25	1270~1280	25~30	0.093	2~3	800~900	0.093	3~5	50~60

1. 加热罩真空度为 $\leq 6.67\text{Pa}$ 。

表 4-45 GCr15 钢制微型轴承零件热处理工艺

零件名称	热处理设备	淬 火			冷处理	回 火	稳定化处理
		温度 °C	保温时间 min	冷却介质 和方法			
套 圈	可控气氛 震底式；或输 送带式；和网 带式电炉	835~850	套圈壁厚 $\leq 1\text{mm}$ ；	在 30~	流动冷水冲	150~180°C	120~160°C
			10~12	80°C L	洗后在-60~	3~4h	6~8h2次
			1~1.5mm；	AN10、L—	80°C保持1		
			12~15	AN20全系统	~2h		
			1.5~2.5mm；	损耗用油中			
钢 球	保护气氛 回转式电炉	815~835	钢球直径 $\leq 1\text{mm}$ ；	在 30~	流动冷水冲	150~180°C	120~160°C
			8~10	80°C L	洗后在-60~	3~4h	6~8h2次
			1.0~1.5mm；	AN10、L—	80°C保持1		
			10~12	AN20全系统	~2h		
			1.5~3.175mm；	损耗用油中			
			12~16	冷却			

#### 4.2.3 精密轴承零件的热处理

精密轴承，特别是P<sub>2</sub>、P<sub>4</sub>级轴承要求具有高精度、长寿命、耐磨以及高的尺寸稳定性。主要用于座标镗床主轴轴承、机床主轴轴承、电动机主轴轴承等。零件一般要选用ZGCr15钢制造，套圈毛坯要进行双细化处理和快速退火；淬火应在可控

气氛下或真空炉中加热，且温度采用中、下限，经保温后进行马氏体分级淬火或旋转机冷却等方法，以减少畸变；零件在淬冷至室温后30min内进行冷处理；根据要求可能适当提高回火温度，延长保温时间，及在磨削加工后进行二次稳定化处理。精密轴承零件在箱式电炉中热处理工艺见表4-46。近年来曾对GCr15钢轴承精研后的L作



表面,试验了二重叠法注入氮离子,显著提高了其表面硬度、耐磨性能和接触疲劳寿命。注入氮离子后零件无畸变,表面无氧化,并能很好地保持原有

尺寸精度和表面光洁。一重叠法氮离子注入试验工艺见表4-47。

表4-46 精密轴承零件在箱式电炉中的热处理工艺

钢种	零件名称	淬 火		清洗	冷处理	回火	稳定化处理
		淬火温度/°C	加热时间/min	冷却介质及冷却方法			
GCr15 GCr15SiMn	P <sub>1</sub> 级 轴承套圈	GCr15: 835~850 GCr15SiMn: 810~830	45~60	1) 套圈壁厚<8mm 在150~170°C的L-AN10、L-AN20全损耗系统用油中摇筐冷却5~10min后,再在30~60°C油液中冷却 2) 套圈壁厚>8mm 所在30~60°C L-AN10、L-AN20全损耗系统用油中用手帘或旋转机冷却	在80~90°C的3%~5%碳酸钠(质量分数)水溶液中热清洗	-40°C -70°C 1~1.5h	160~200°C 3~4h 粗磨后: 140~180°C 4~12h 细磨后: 120~160°C 6~24h
GCr15 GCr15SiMn	P <sub>2</sub> 级 轴承套圈	GCr15: 835~850 GCr15SiMn: 810~830				-70°C 1~1.5h	150~160°C 3~4h

表4-47 二重叠法氮离子注入试验工艺

注入能量/keV	注入剂量/(N <sup>+</sup> /cm <sup>2</sup> )	束流/μA	工作室真空度/Pa	工作室温度/°C
100	$3 \times 10^{17}$	120~130	0.00133	<150
40	$1.8 \times 10^{17}$	100~120		

#### 4.2.4 超轻、特轻轴承套圈的热处理

超轻、特轻轴承套圈(外径与内径的比值 $\leq 1.143$ ),在加工过程中,特别在热处理过程中易畸变。热处理工序是:毛坯进行碳化物均匀细化处理采用正火或快速退火球化工艺;车削加工后进行去应力退火;淬火温度偏下限;采用马氏体分级淬火;模压淬火;在磨削加工后进行附加回火等。热处理工艺见图4-27。

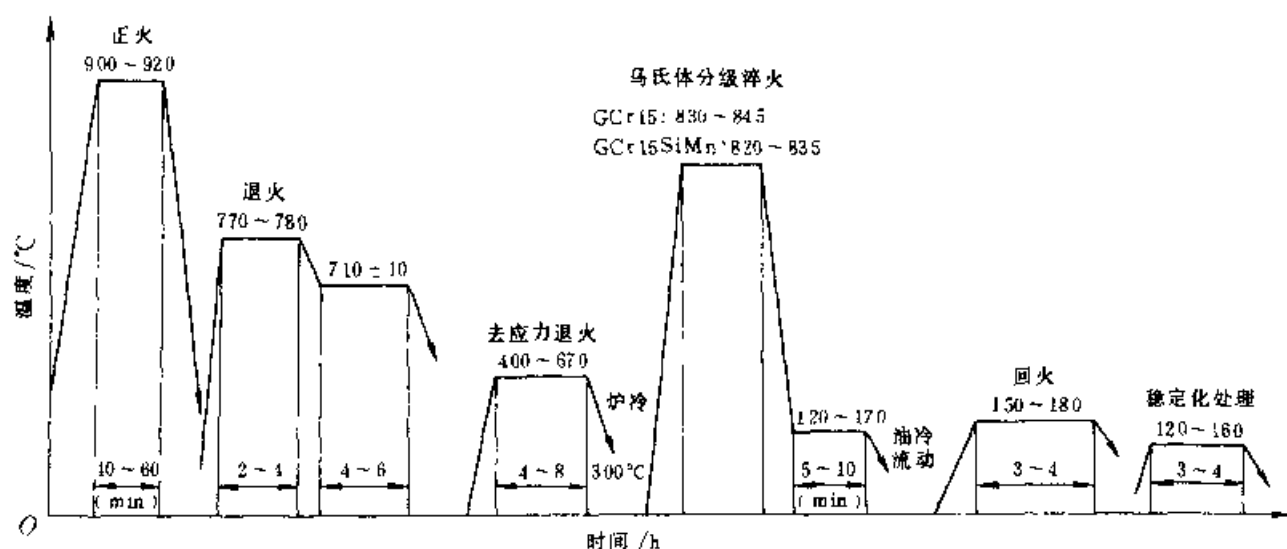


图4-27 超轻、特轻轴承套圈的热处理工艺  
(套圈壁厚 $\leq 8\text{mm}$ , 采用马氏体分级淬火、模压淬火或80~120°C热油中冷却,  
套圈壁厚 $> 8\text{mm}$ , 采用旋转淬火或搅拌冷却)

### 4.2.5 铁路车辆轴承零件的热处理

铁路车辆轴承应具有高冲击韧度和耐磨性以及使用可靠等要求。制造此类轴承用钢有 GCr15、GCr15SiMn、20CrNi2MoA 钢。并根据钢种和用途采用不同的热处理工艺。

#### 4.2.5.1 铁路车辆轴承热处理技术条件

1. 客车轴承 淬火后硬度为 62~66HRC, 回火后硬度为 60~64HRC; 淬、回火后同一零件的硬度差应 $\leq 2$ HRC; 淬、回火后组织应为隐晶和细小结晶马氏体及均匀分布的细小颗粒碳化物(按 JB1255-81 评定); 不得有脱碳(贫碳层 $< 0.05$ mm)、软点和裂纹。

#### 2. 货车轴承

(1) 20CrNi2MoA 渗碳钢制造的成品零件要求渗碳层深度为 1.5~2.3mm, 热处理后有效渗碳硬化层深度为 1.8~2.6mm(测至 50HRC 处); 零件表面含碳量(质量分数)为 0.85%~1.05%; 二次淬火后表层硬度为 62~66HRC, 二次淬、回

火后表层硬度为 60~64HRC, 二次淬火后心部硬度为 35~45HRC; 二次淬、回火后表层显微组织为细小马氏体和均匀分布粒状碳化物, 不允许出现网状或块状碳化物, 心部组织为板条状马氏体, 不允许出现块状铁素体组织; 淬、回火后同一工件硬度差应 $\leq 2$ HRC; 淬、回火后零件不得有软点和裂纹, 贫碳层应小于 0.06mm。

(2) GCr15 和 GCr15SiMn 钢常规热处理的技术要求同客车轴承。曾试验采用贝氏体等温淬火, 效果较好, 硬度为 58~62HRC。

#### 4.2.5.2 客车轴承零件热处理

制造铁路客车车辆用 42724QT、152724QT、42726QT、152726QT 轴承, 用两个钢种(GCr15 和 GCr15SiMn)制造。在 RJC-220 输送带式电炉和 RJX75-9 箱式电阻炉的热处理工艺见表 4-48。GCr15SiMn 钢制 12724 和 152724 轴承零件在 MCT-244824-AIST 直通式保护气体炉热处理工艺见表 4-49。

表 4-48 铁路客车轴承零件热处理工艺

零件名称	钢号	热处理设备	毛坯预备热处理	淬 火			清洗	回火	稳定化处理
				温度 ℃	加热时间 /min	淬火介质及冷却方法			
套圈	GCr15	RJC-220 输送带式电炉	正火温度为 890~910℃, 保温 2h 快速冷至室温后, 进行快速退火。温度为 800℃ 保温 4h 缓冷至 600℃ 出炉	850~860	1J2724 内外套: 50~60	在 30~80℃ GZ-1 高速淬火油中用手帘或旋转淬火机冷却	3%~5% 的碳酸钠水溶液中冷(热)清洗	200℃, 4h	160~180℃, 3~1h
	GCr15SiMn				42724 1J2726 内外套: 60~70				
滚柱	GCr15		不处理	850~860	42721 滚子: 70~80	在 30~80℃ GZ-1 高速淬火油中摇筐冷却	3%~5% 碳酸钠水溶液	170~180℃, 3~4h	140~160℃, 3~4h
	GCr15SiMn				42726 滚子: 75~85				

表 4-49 GCr15SiMn 钢制 42724 和 152724  
轴承热处理工艺

轴承零件名称	外套	内套	滚柱
每盘件数	32	17	1000
设定温度/℃	720	720	720
预热保温	320	810	810
设定时间/min	20	20	20
预热保温	80	80	80
炉气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$14 \pm 1$	$11 \pm 1$	$11 \pm 1$
油温/℃	$80 \sim 100$	$100 \sim 110$	$80 \sim 100$
油冷时间/min	8	6	8
炉气发生装置	$\phi$	$\phi$	$\phi$
$(\text{CO}_2)$ (%)	1	0.9	0.1
淬火升降装置振动频率	18 次/min	30 次/min	30 次/min
振动时间	1min30s	1min15s	1min30s
油搅拌循环	不搅拌	不搅拌	不搅拌

注: 1. 淬火前毛坯需进行预备热处理, 其工艺同表 4-18 之规定。

2. 淬火油为 KGZ-2。

#### 4.2.5.3 货车轴承零件热处理

铁路货车车辆用 197726 轴承套圈, 目前主要用 20CrNi2MoA、20CrNiMoA 渗碳钢制造, 同时亦有用 GCr15 钢经贝氏体等温淬火, 制成轴承内外套圈。

##### 1. 20CrNi2MoA 钢渗碳热处理工艺

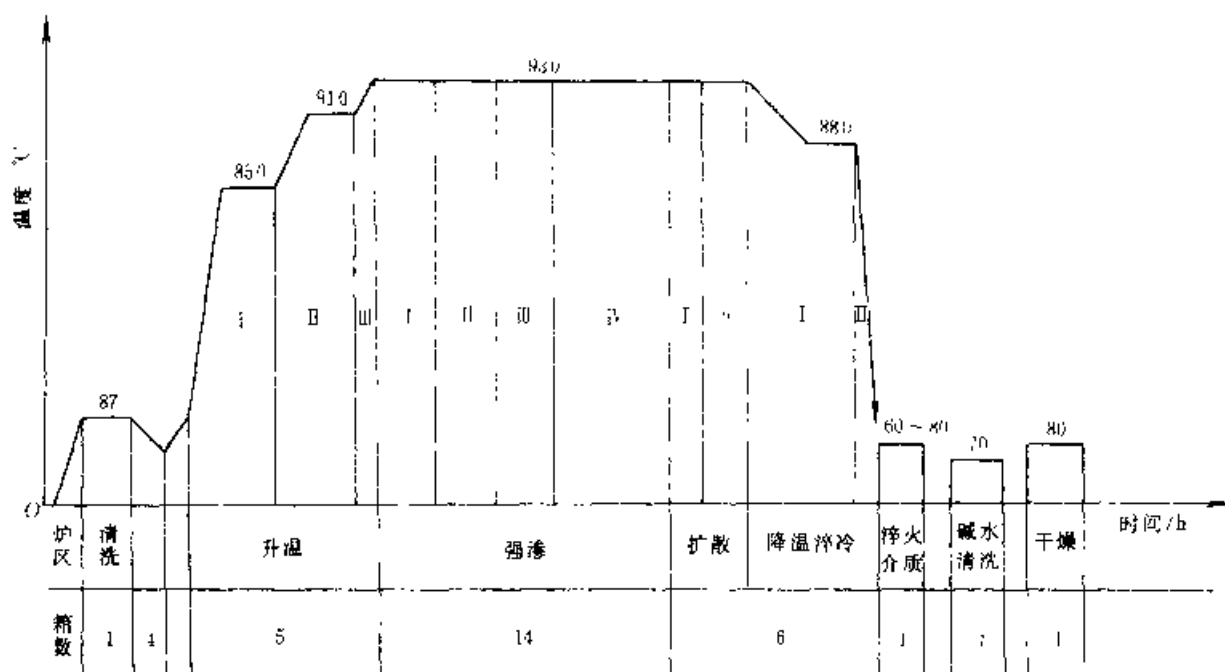


图 1-29 渗碳生产线的工艺曲线 (推料周期为 40min)

注: “60~80”为淬火介质温度, “70”为碱水清洗与温水清洗液温度, 80 为干燥温度

(1) 预备热处理为正火、高温回火, 锻造始锻温度为  $(1180 \pm 20)^\circ\text{C}$ , 终锻温度为  $880 \sim 930^\circ\text{C}$ 。锻后硬度高, 难以切削加工, 故锻后需进行正火和高温回火处理, 其工艺见图 1-28, 采取上述工艺处理后硬度为 163~202HBS。

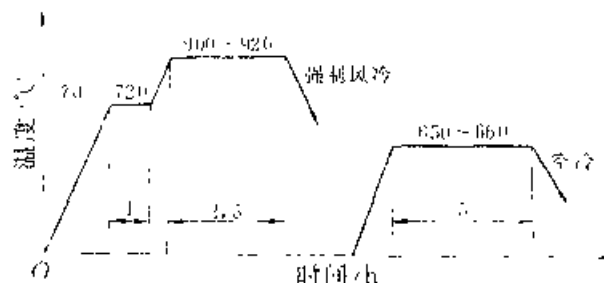


图 1-28 套圈正火高温回火工艺曲线

(2) 渗碳一次淬火热处理的技术要求: 渗碳层深度: 1.8~2.4mm; 表面碳浓度 (质量分数) 0.85%~1.05%; 表面硬度为 62~66HRC, 心部硬度为 35~45HRC。

渗碳是在 CTP-13-35-301522-AS 连续渗碳生产线上进行, 推料周期为 40min。渗碳工艺见图 1-29 和表 4-59。一次淬火在 CTP-243615-AS 生产线上进行。渗碳亦可在可控气氛井式渗碳炉进行。

表 4-50 渗碳炉载气量富化气量和 CO<sub>2</sub> 值

气体类别	反应炉	升温区			强 渗 区				扩散均热区		总计
		I	II	III	I	II	III	IV	I	II	
吸热式气量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>		5	5	5	20	20	20	20	11	11	117
丙烷量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>		6	9	9	0.25~0.3	0.22~0.28	0.20~0.26	0.18~0.20	0.05	0	0.92~1.36
m(CO <sub>2</sub> ) 控制值 (%)	0.4						0.235		0.13~0.14		

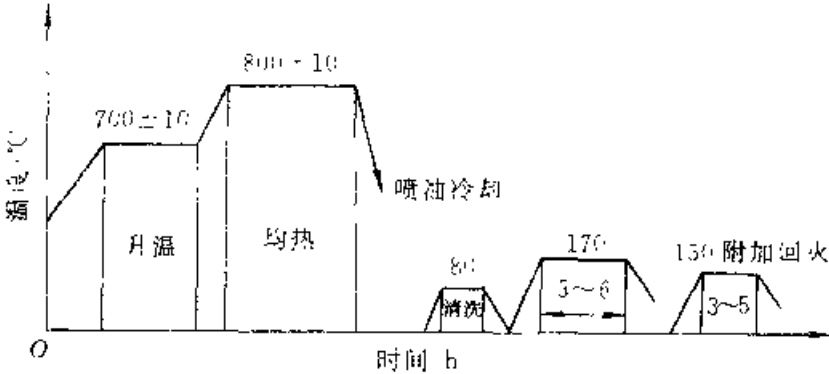


图 4-30 轴承套圈二次淬、回火工艺

(3) 轴承套圈二次淬火和回火，在 CTP 213615 AS 生产线上进行，推料周期为 7min，淬火在 10~60℃CKGZ—1 快速淬火喷油冷却 1min，其工艺见图 4-30，回火在 RJC—65—3 循环空气回火炉进行，其工艺为 170℃×3~4h，套圈粗磨后进行附加回火，其工艺 (150~160)℃×3~6h。

(4) 渗碳热处理后的淬、回火技术要求：渗碳层深度为 1.8~2.6mm，成品零件渗碳层深度为 1.5~2.3mm；零件表面含碳量（质量分数）为 0.85%~1.05%；二次淬、回火后零件表面硬度为 62~66HRC，回火后硬度为 60~64HRC，心部硬度为 35~45HRC，二次淬、回火（最终）后表面显微组织为细小结晶马氏体、均匀分布的碳化物及残留奥氏体组成。心部组织为板条马氏体，淬、回火组织按 ZBJ36001—86 执行。

4.3 特殊用途轴承零件的热处理

4.3.1 耐腐蚀轴承零件的热处理

耐腐蚀轴承零件通常采用不锈钢制造，所用钢号和应用情况见表 4-51。

表 4-51 各种不锈钢在轴承零件上的应用

钢 号	用 途
9Cr18	1) 制造在海水、河水、蒸馏水、硝酸、海洋性气候蒸汽等腐蚀介质中工作的轴承套圈和滚动体
9Cr18Mo	2) 制造微型轴承套圈和钢球 3) 适于在高真空以及在 -253~350℃ 范围内工作的轴承零件（套圈及滚动体）
0Cr18Ni9	制造耐腐蚀轴承保持架、防尘盖、铆钉、套圈、钢球等
1Cr18Ni9	
1Cr18Ni9Ti	
Cr17Ni2	制造高速耐腐蚀轴承保持架和钢球
1Cr13	制造 940/60 型滚针轴承的外套
2Cr13、3Cr13	制造关节轴承的内套
1Cr13	制造耐腐蚀滚针和套圈

4.3.1.1 9Cr18、9Cr18Mo 钢制轴承零件的热处理

9Cr18、9Cr18Mo 钢为高碳、高铬的马氏体不锈钢，该类钢经热处理（淬火、冷处理、回火）后具有高的硬度、弹性、耐磨性以及优良耐腐蚀性。主要制造在腐蚀介质中工作的轴承套圈和滚动

体,这类钢也可以用来制造耐高温轴承,回火温度 $\leq 410^{\circ}\text{C}$ ,超过该回火温度,耐蚀性急剧下降,在使用中应引起重视。

1. 锻造与退火 在锻造过程中,由于这类钢的导热性差,钢中复合碳化物在高温下溶于奥氏体中的速度慢,因此锻造加热速度不宜过快。又因该钢淬透性好,故锻后的冷却速度要慢,应在石灰、热砂或保温箱(炉)中冷却。锻件的组织不允许有过热、过烧、孪晶以及因停锻温度过高,冷却速度慢所产生的粗大碳化物网。正常的锻造组织应由马氏体、奥氏体和一次、二次碳化物所组成,钢的晶粒亦应细小。锻造加热与冷却工艺见图4-31。锻造后退火工艺见表4-52。退火后应按JB1460标准规定检查,对质量要求如下:

(1) 硬度 197~241HBS (压痕直径为4.3~3.9mm)。

(2) 显微组织不得有孪晶碳化物存在。

(3) 脱碳层之深度不得超过淬火前每边最小加工余量的2/3。热冲钢球退火后脱碳层的测量应在试件的垂直于环带横截面的磨面上进行。

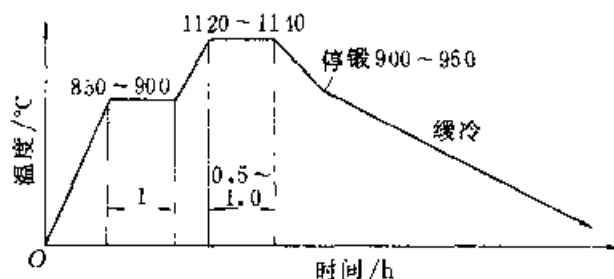


图 4-31 9Cr18 钢制套圈锻造加热冷却工艺

表 4-52 9Cr18、9Cr18Mo 钢制轴承零件退火工艺

退火名称	退火工艺	应用范围	备注
低温球化退火		1) 冷冲和半热冲球退火 2) 淬火过热与欠热零件的返修 3) 消除残留应力	零件裕量小时需密封退火或用保护气氛电炉退火
等温球化退火		热冲球和锻件毛坯退火	同上
一般球化退火		同上	同上

2. 淬火、回火 淬火通常是在盐浴炉、真空炉或带有保护气氛的电炉中加热,以免脱碳。在盐浴炉中加热,要防止零件表面产生腐蚀麻点。淬火加热温度一般选用 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 。在加热时须先在 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ 预热后再升温到淬火加热温度。预热时间一般为淬火加热保温时间的二倍,保温时间按零件有效厚度来计算。预热温度和加热温度

以及加热时间可参考表4-53。一般的轴承套圈和钢球在箱式电炉和盐浴炉中进行热处理工艺见表4-54和4-55。轴承零件需经高温回火热处理工艺(淬火、回火后 $\geq 55\text{HRC}$ )曲线见图4-32。工作温度为 $-253\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的轴承零件热处理工艺曲线见图4-33。在ZC-65真空炉热处理工艺曲线见图4-34。

表 4-53 9Cr18 钢轴承零件淬火加热温度和保温时间

有效厚度 /mm	预 热		加 热		加热设备	备 注
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min		
$<3$	$800\sim 850$	$6\sim 10$	$1050\sim 1070$	$3\sim 6$	箱式电阻炉	在盐浴炉中加热的保温时间可按 $1\text{min}/\text{mm}$ 厚度 $>14\text{mm}$ 者 可按 $40\sim 70\text{s}/\text{mm}$
$3\sim 5$	$800\sim 850$	$10\sim 15$	$1050\sim 1080$	$6\sim 10$		
$6\sim 8$	$800\sim 850$	$15\sim 20$	$1070\sim 1080$	$10\sim 13$		
$9\sim 12$	$800\sim 850$	$20\sim 25$	$1080\sim 1100$	$13\sim 15$		
$13\sim 16$	$800\sim 850$	$25\sim 30$	$1080\sim 1100$	$14\sim 16$		
$17\sim 20$	$800\sim 850$	$30\sim 35$	$1080\sim 1100$	$16\sim 20$		
$21\sim 25$	$800\sim 850$	$35\sim 40$	$1080\sim 1100$	$19\sim 23$		

表 4-54 9Cr18 钢制套圈的热处理工艺

常用热处理 设 备	零件型号	预 热		淬 火			清洗	深冷处理	回 火	补充回火
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	冷 却				
箱式电阻炉 RJX 45-9 RJX-50-13	201/01.02	850	30	1080	$8\sim 12$	在 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的 L-AN10 油中冷却	冷 碳 酸 钠 水 溶 液 冲 洗	$-70^{\circ}\text{C}\times 1\sim 3\text{h}$	$150\sim 170^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$	$130\sim 140^{\circ}\text{C}\times 3\sim 4\text{h}$
	204/01.02		30		$9\sim 13$					
	208/01.02		30		$10\sim 14$					
	212/01.02		35		$11\sim 15$					
	4612/01.02		40		$13\sim 18$					
	132/01.02		40		$18\sim 20$					
盐浴炉 RYD-75 RYD-45	100802/01.02	850	10	1090	$4\sim 5$	在 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的 L-AN10 油中冷却	冷 碳 酸 钠 水 溶 液 冲 洗	$-70^{\circ}\text{C}\times 1\sim 3\text{h}$	$150\sim 170^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$	$130\sim 140^{\circ}\text{C}\times 3\sim 4\text{h}$
	36018/01.02		15		$5\sim 6$					
	8100/01.02		$15\sim 20$		$6\sim 7$					
	900912/01.02		20		$8\sim 9$					
	1206/01.02		25		$10\sim 11$					
	700108/01.02		25		$11\sim 12$					

表 4-55 9Cr18 钢制钢球热处理工艺

常用热处理 设 备	零件规格	预 热		淬 火			清洗	冷处理	回 火	补充回火
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	冷 却				
盐浴炉: RYD-35 RYD-45 RYD-75	$<1\text{mm}$	850	10	1080	5	在 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的 L-AN10 或 L-AN20 油中冷却	冷 碳 酸 钠 水 溶 液 冲 洗	$-70^{\circ}\text{C}\times 1\sim 3\text{h}$	$150\sim 170^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$	$130\sim 140^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$
	$1/16\sim 1/8\text{in}$		$10\sim 20$		$5\sim 10$					
	$1/8\sim 13/16\text{in}$		$20\sim 25$		$10\sim 12$					
	$13/16\sim 1/4\text{in}$		$25\sim 30$		$12\sim 15$					
	$1/4\sim 9/32\text{in}$		$30\sim 35$		$15\sim 17$					

(续)

常用热处理设备	零件规格	预 热		淬 火		清 洗	冷 处 理	回 火	补充回火
		温度 /°C	时间 min	温度 /°C	时间 /min				
箱式电阻炉:									
RJX-45-9	1/8~9/32in	850	20~25	1080	9~13	在 30~	冷 硬	150~	130~
	9/32~31/64in		20~30		10~14	60°C 的 L-	酸 钠 水	70°C × 1~	170°C × 2~
RJX-50-13	31/64~19/32in	25~30			11~15	AN10 或	溶 液 冲	3h	3h
	19/32~13/16in	30~35			12~16	L AN20	洗		
	13/16~7/8in	35~40			18~22	油中冷却			

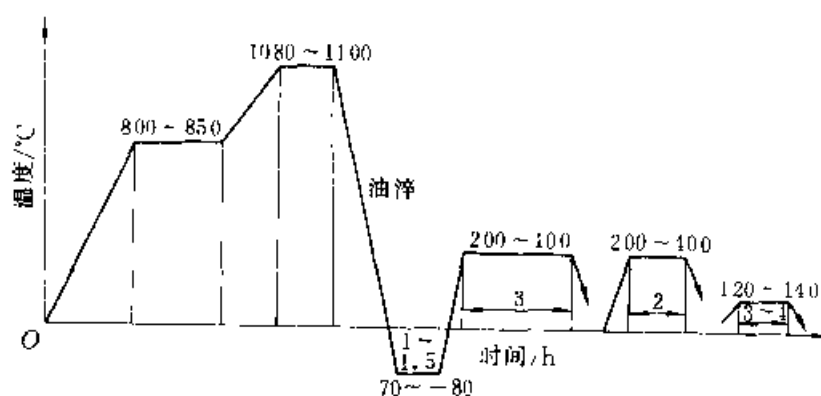


图 4-32 高温回火轴承零件热处理工艺  
(预热和淬火保温时间参阅表 4-53、4-54、4-55)

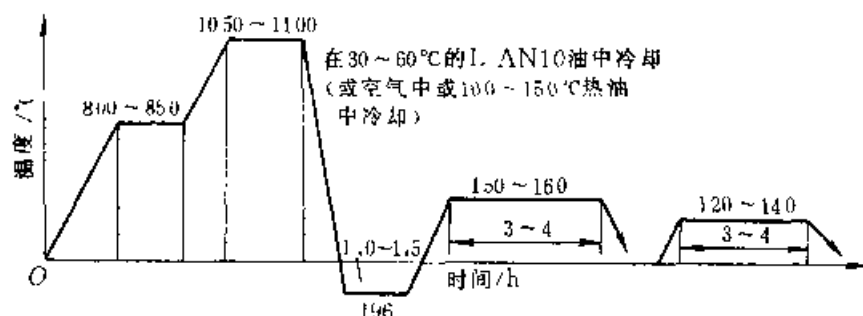


图 4-33 工作温度-253~100°C 轴承零件热处理工艺  
(预热和淬火保温时间参阅表 4-53、4-54、4-55)

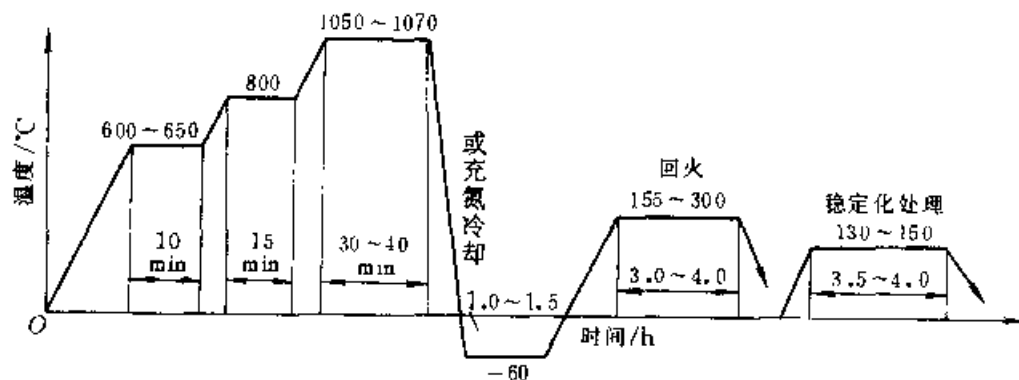


图 4-34 在 ZC<sub>2</sub>-65 真空炉中的热处理工艺

淬火、回火后质量检查按 JB1460 标准规定。  
硬度应符合表 4-56。

表 4-56 9Cr18 钢轴承零件淬火、  
回火后硬度要求

回火 温度 $^{\circ}\text{C}$	套圈滚动体 硬度 (HRC)	回火 温度 $^{\circ}\text{C}$	套圈滚动体 硬度 (HRC)
150~160	$\geq 58$	250	$\geq 54$
200	$\geq 56$	300	$\geq 53$

淬火、回火后显微组织由隐晶、细小马氏体、残余一次碳化物、二次碳化物和残留奥氏体组成。评级按 JB1460 标准第二级别图,第二、三、四、六级为合格组织,不允许一级的欠热组织,第五级的过热组织和因锻造过热引起的第七级孪晶碳化物组织出现。

零件淬、回火后的表面脱碳、腐蚀坑、氧化皮等缺陷,必须在磨加工过程中除净。

钢球淬火、回火后的压碎载荷值不得低于表

4-23 所列的规定。

对于在腐蚀介质内工作的轴承零件,如有要求,则需进行耐腐蚀检查。此项检查,一般用人造海水或稀硝酸水溶液来进行。对于在低温下工作的轴承套圈、尚需进行尺寸稳定的检查。检查时将装配前的套圈测定尺寸后,置于 $-180\sim-200^{\circ}\text{C}$ 低温下停留 $1\sim1.5\text{h}$ ,取出后再在室温测定其尺寸,尺寸变化应在合格范围内。

淬火、回火工序常见的缺陷及防止方法见表 4-57。

此组织主要是在锻造加热温度过高情况下形成。

#### 4.3.1.2 其他不锈钢轴承零件热处理

1. 奥氏体不锈钢的固溶热处理工艺(见表 4-58)。

2. 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13 和 Cr17Ni2 钢的热处理工艺(见表 4-59)。

表 4-57 9Cr18 不锈钢在淬、回火工序常见的缺陷及防止办法

缺陷名称		产生原因	防止办法
显微组织不合格	欠热	淬火温度低,保温时间短	提高淬火温度或适当延长保温时间
	过热	淬火温度超过上限且保温时间过长	降低淬火温度或适当缩短保温时间
	孪晶碳化物	锻造温度过高,且加热时间长	严格控制锻造加热温度和时间
	一次碳化物 沿晶界析出	停锻温度高,超过 $1000^{\circ}\text{C}$	控制停锻温度在 $900\sim950^{\circ}\text{C}$
畸变		1) 淬火温度高或冷却太快 2) 加热不均或套圈加热摆放不当	1) 用淬火温度的中下限加热 2) 在 $120\sim150^{\circ}\text{C}$ 的热油中或在静止空气中淬火冷却
硬度偏低		1) 淬火温度低或保温时间短 2) 回火温度过高 3) 退火组织不均	1) 提高淬火温度,增长保温时间 2) 降低回火温度 3) 控制材料质量
裂纹		1) 淬火温度高,冷却太快 2) 原材料(锻件)有裂纹或工件表面有缺陷 3) 淬火后工件未冷到室温就进行冷处理或冷处理后未及时回火	1) 严格执行工艺 2) 加强对材料和锻件表面质量检查
脱贫碳		1) 在电炉加热时间长,温度高 2) 工件在淬火前存在脱、贫碳层	1) 在保护气电炉、真空炉和除氧良好的盐炉中加热 2) 控制淬火前工件脱、贫碳层
腐蚀麻点		1) 工件未清洗干净便在盐炉中加热 2) 在盐炉中加热淬火后未及时除盐 3) 盐炉脱氧捞渣不及时	1) 淬火前工件清洗干净 2) 尽量不用盐炉加热,如用必须严格执行操作规程



表 4-58 奥氏体不锈钢固溶热处理工艺

钢 号	固 溶			时 效	备 注
	温度/°C	冷 却	硬度 (HBS)		
0Cr18Ni9	1080~1100	1) 40°C 的自来水 2) 碳酸钠水溶液	<170	850°C×2h 水冷或空冷	1) 在盐浴炉中加热, 按有效厚度 1~1.5mm/mm 计算在电炉中加热可适当延长保温时间 2) 去应力退火 300~350°C, 4~6h
1Cr18Ni9	1) 1100~1150 2) 1090~1100		137~179 143~159		
1Cr18Ni9Ti	1) 1100~1150 2) 1090~1100		143~159		

表 4-59 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13 和 Cr17Ni2 钢的热处理工艺

钢号	退 火			淬 火			回 火		
	温度/°C	冷 却	硬度 (HBS)	温度/°C	冷 却	硬度 (HBS)	温度/°C	时间/h	硬度 (HBS)
1Cr13	1) 700~800 (3~6h)	空冷	170~200	1000~1050	油、水或空冷		650~700	2	187~200
	2) 840~900 (常用 960) (2~4h)	以 $\leq 25^\circ\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 600°C 出炉	$\leq 170$	927~1010	油	380~415	230~270	1~3	360~380
	3) 850~880 (2~4h)	以 $20\sim 40^\circ\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 600°C 空冷	126~197	925~1000	油或空冷	380~415	230~270	2	360~380
							500	2	260~330
							600	2	215~250
							650	2	200~230
							700	2	195~220
2Cr13	1) 700~800 (2~6h)	空冷	200~230	1000~1050	油或水		—	—	—
	2) 850~880 (2~4h)	以 $20\sim 40^\circ\text{C}/\text{h}$ 冷却至 600°C 空冷	126~197	927~1010	油	380~415	330~370	1~3	360~380
	3) 840~900 (常用 860°C) (2~4h)	以 $\leq 25^\circ\text{C}/\text{h}$ 冷至 600°C 空冷	$\leq 170$	950~975	油	—	530~650	2	217~269
3Cr13	同 2Cr13	同 2Cr13	200~230	1000~1050	油		200~300	—	48HRC
			131~207	980~1070		530~560	150~370	—	48~53HRC
			$\leq 217$	1000~1050		485	200~300	—	$\geq 48\text{HRC}$
				975~1000		—	200~250		429~477
4Cr13	同 2Cr13	同 2Cr13	200~300	1050~1100	油	530~560	150~370	1~3	48~53HRC
			143~229	980~1070			—	—	—
			$\leq 217$						
Cr17Ni2	1) 780 (2~6h)	空冷	126~197	950~975	油	38~43 HRC	300	2	$\geq 35\text{HRC}$
Cr17Ni2	2) 650~670 (10h)	空冷	260~270	950~975	油	38~43 HRC	275~320	—	321~363
	3) 850~880 (2~4h)	炉冷至 750°C 出 炉空冷	$\leq 250$				530~550	—	235~277

(续)

## 4.3.2 高温轴承零件的热处理

制造耐高温轴承零件的钢除要求在一定高温条件下保持硬度外,还必须具备耐磨损、耐疲劳、抗氧化、耐腐蚀、抗冲击、良好尺寸稳定性以及较好的被加工性能等。常用的钢种及使用温度范围见表4-60。

表 4-60 耐高温轴承钢的钢种和应用

钢 号	用 途
GCr15	制造工作温度 $<200^{\circ}\text{C}$ 套圈和滚动体
GCrSiWV	制造工作温度 $\leq 250^{\circ}\text{C}$ 套圈和滚动体
Cr4Mo4V	制造工作温度 $\leq 315^{\circ}\text{C}$ 套圈和滚动体
Cr14Mo4V	制造高温腐蚀介质中工作的轴承套圈和滚动体,工作温度 $<430^{\circ}\text{C}$

钢 号	用 途
W9Cr4V2Mo	制造工作温度 $\leq 450^{\circ}\text{C}$ 套圈和滚动体
W18Cr4V	制造工作温度 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 套圈和滚动体

## 4.3.2.1 GCr15 钢制高温轴承零件热处理

用 GCr15 钢制轴承零件的使用温度一般不超过  $120^{\circ}\text{C}$ 。为使其能在  $\leq 200^{\circ}\text{C}$  下工作,就必须提高该钢的抗回火的性能,对锻件毛坯要进行预备热处理,并采用最佳热处理工艺。

1. 套圈毛坯碳化物细化预备热处理工艺,见图4-35。

碳化物细化后组织按 JB1255 第一级别应为  $\leq 2$  级;硬度  $200\sim 229\text{HBS}$ 。

2. 淬火、回火工艺,见图4-36。

回火温度根据轴承使用温度来选择。

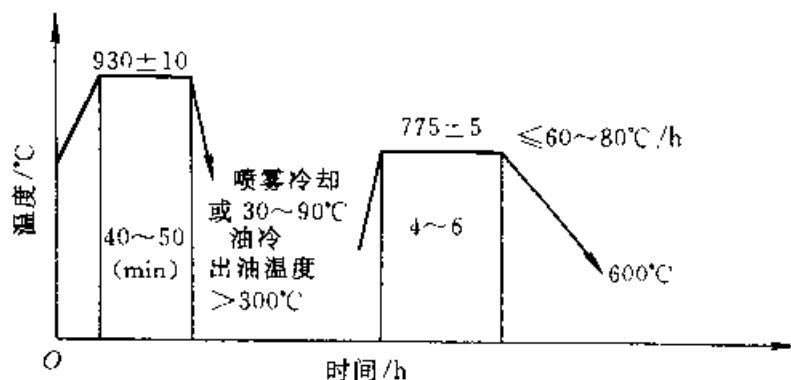


图 4-35 ZGCr15 毛坯碳化物的油化工艺

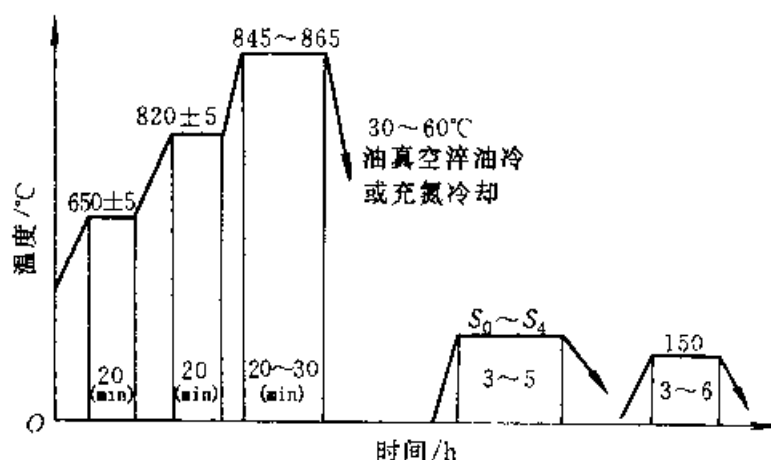


图 4-36 ZGCr15 钢制 ZC3-65 真空淬火热处理工艺

高温轴承零件的回火规范见表4-61, 高温回火后硬度见表4-62。

表4-61 高温轴承零件回火规范

(°C × h)

回火代号	套圈	滚子	钢球
$S_0$	$200 \times 3 \sim 5$	$150 \sim 160 \times 3$	$150 \sim 160 \times 3$
$S_1$	$250 \times 3 \sim 5$	直径 $\leq 15\text{mm}$	直径 $\leq 25.4\text{mm}$
		$180 \times 3$	$160 \times 3$
		直径 $\geq 15\text{mm}$	直径 $> 25.4\text{mm}$
$S_2$	$300 \times 3 \sim 5$	$250 \times 3$	$250 \times 3$
$S_3$	$350 \times 3 \sim 5$	$300 \times 3$	$300 \times 3$
$S_4$	$400 \times 3 \sim 5$	$350 \times 3$	$350 \times 3$

对于2GCr15、2GCr15SiMn钢制高温回火轴承零件, 在保证尺寸情况下允许返修。对复杂形状套圈, 返修前进行 $600 \sim 650^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 高温回火, 在可控气氛炉进行。

建议高温回火轴承零件, 均在真空炉加热淬

火, 零件表面光亮、无氧化、无脱碳、变形小, 表面呈压应力。

#### 4.3.2.2 GCrSiWV钢制中高温轴承零件的热处理

1. 热处理工艺 5D32118CQ轴承系采用耐 $250^\circ\text{C}$ 的GCrSiWV中温轴承钢制造。零件的锻造预备热处理工艺见图4-37, 最终热处理工艺见图4-38。

2. 技术要求 轴承锻件退火的组织应为细小和均匀的珠光体, 硬度一般为 $207 \sim 229\text{HBS}$ 。

淬、回火组织为隐晶马氏体加少量碳化物, 晶粒度为 $9 \sim 10$ 级, 淬火后硬度 $\geq 65\text{HRC}$ , 回火后硬度 $\geq 60\text{HRC}$ 。

淬、回火后零件的脱、贫碳层一般在 $0.06 \sim 0.07\text{mm}$ 。

#### 4.3.2.3 高温钢制轴承零件热处理

高温钢制轴承零件退火工艺见表4-63, 淬火回火工艺见表4-64, 真空热处理工艺见图4-39。

表4-62 高温回火轴承零件的硬度

回火温度 (°C)	回火补充代号	硬 度 (HRC)					
		GCr15, ZGCr15, HGr15			GCr15SiMn, ZGCr15SiMn		
		套 圈	钢 球	滚 子	套 圈	钢 球	滚 子
200	$S_0$	60~63	62~66 不进行高温回火	61~65 不进行高温回火	59~62	60~66 不进行高温回火	60~61 不进行高温回火
250	$S_1$	58~62	58~62 直径大于25mm时进行高温回火	58~62 直径大于15mm时进行高温回火	57~61	57~61 直径大于50mm时进行高温回火	57~61 直径大于23mm时进行高温回火
300	$S_2$	55~59	55~59	55~59	54~58	54~58	54~58
350	$S_3$	$\geq 52$	$\geq 52$	$\geq 52$	$\geq 52$	$\geq 52$	$\geq 52$
400	$S_4$	$\geq 48$	$\geq 48$	$\geq 48$	$\geq 48$	$\geq 48$	$\geq 48$

注: ① 回火保温时间均为 $3 \sim 4\text{h}$ 。

②  $S_0$ 钢球或滚子若使用单位要求进行高温回火时, 其硬度要求与套圈相同。

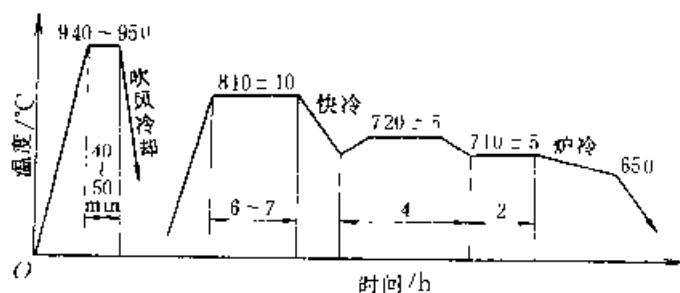


图4-37 中温钢制轴承零件正、退火工艺

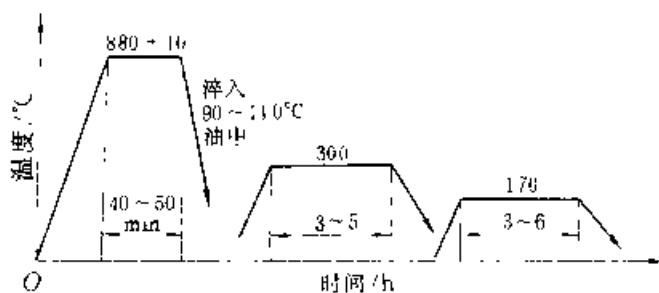


图4-38 中温钢制轴承零件淬、回火及稳定化处理工艺

表 4-63 高温钢制轴承零件退火工艺

零件名称	钢 号	技 术 要 求	退火名称	退 火 工 艺	备 注
锻造的 内外套和 热冲钢球	Cr4Mo4V	按 JB2850 标准: (1) 硬度: 退火后硬度应为 179~241HBS (2) 脱碳层: 套圈和滚柱脱碳层的深度不得超过车加工每边留量的 2/3。钢球脱碳层深度不得超过软磨每边留量的 2/3	一般 退火		
锻造的 内外套和 热冲钢球	Cr4Mo4V		等温 退火		
冷冲球	Cr4Mo4V		低温 退火		用铸 铁屑装 箱密封
热冲球 与半热冲 球	W18Cr4V W9Cr4V2Mo W6Mo5Cr4V2		低温 退火		
锻造的 套圈和热 冲球	W18Cr4V W9Cr4V2Mo W6Mo5Cr4V2		等温 退火		如锻 件留量 小时必 须用木 灰或铸 铁屑封 闭退火
锻造的 套圈和热 冲球	Cr14Mo4V		等温 退火		

(续)

零件名称	钢 号	技 术 要 求	退火名称	退 火 工 艺	备 注
冷冲球 和半热冲 球	Cr14Mo4V	按 JB2850 标准: (1) 硬度: 退火后硬度应为 179~241HBS (2) 脱碳层: 套圈和滚柱脱碳层的深度不得超过车加工每边留量的 2/3。钢球脱碳层深度不得超过软磨每边留量的 2/3	低温 退火		如锻件留量小时必须用木灰或铸铁屑封闭退火

表 4-64 高温轴承钢在真空炉的热处理规范

序号	钢号	加热规范					淬火温度/°C		回火规范/°C×h
		温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min	终加热 °C×min	期望	安全	
1	Cr4Mo4V	600	保温 10	800	保温 15	1085×20	1100	1130	535~550×2 三次, 稳定处理 (250±5)×4~6
2	Cr14Mo4	600	10	800	15	1065×30	1080	1100	510~530×2 三次, 稳定处理 180×4~6
3	W18Cr4V	600	10	1000	15	1225×20	1250	1280	560×2 三次, 稳定处理 180×4~6
4	W9Cr4V2Mo	600	10	1000	15	1210×20	1220	1240	
5	W6Mo5Cr4V2	600	10	1000	15	1190×20	1210	1240	

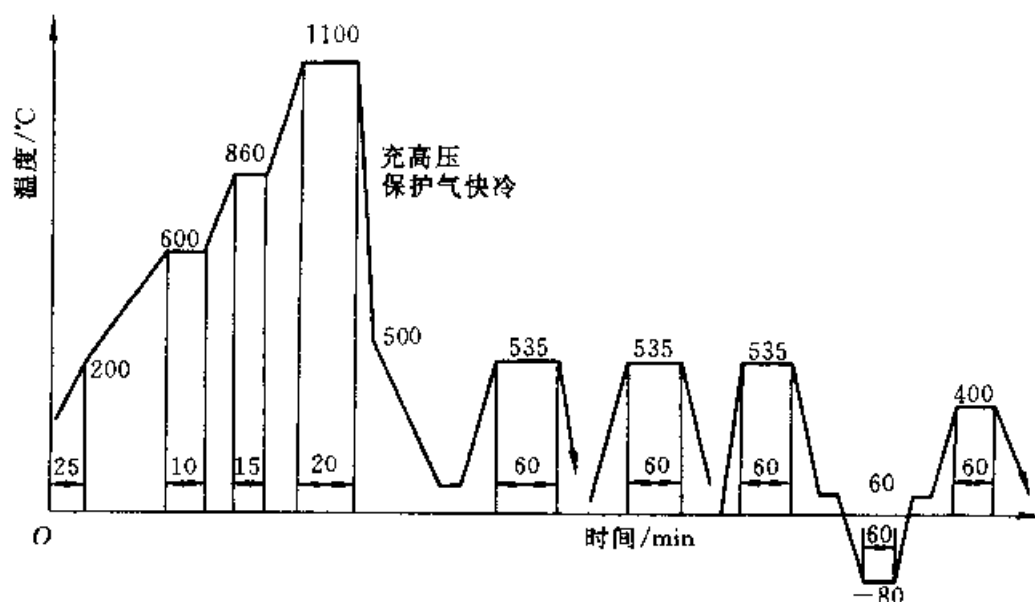


图 4-39 Cr4Mo4V 真空淬回火工艺

Cr4Mo4 真空热处理后硬度为 63~65HRC, 零件表面光亮。

零件冷至室温后, 在真空炉内回火。真空度达到 0.133Pa 充入保护气后, 降到 13.3Pa 开始升温。一般回火 3 次, 每次 1h。每次炉内零件冷却

100°C 时, 再升温进行二次和三次回火。回火后冷至室温进行冷处理 -71~80°C×1h, 冷处理后再进行 400°C×1h 回火。为防止冷处理时工件生锈, 事先涂防锈油。

同时还规定, 对于套圈外径 > 240mm, 壁厚

>15mm; 直径>30mm 滚子, 直径>40mm 钢球, 一般不允许冷处理。

为了提高 Cr4Mo4V 强韧性, 可采用下贝氏体等温淬火, 如航空燃油泵轴承 (68813N) 在高

应力和高速运转中, 同时承受冲击载荷。用常规热处理生产轴承, 工作表面常出现早期疲劳, 轴承设计寿命为 300h, 而采用下贝氏体淬火轴承寿命达到 500h。Cr4Mo4V 下贝氏体淬火工艺见图 4-40。

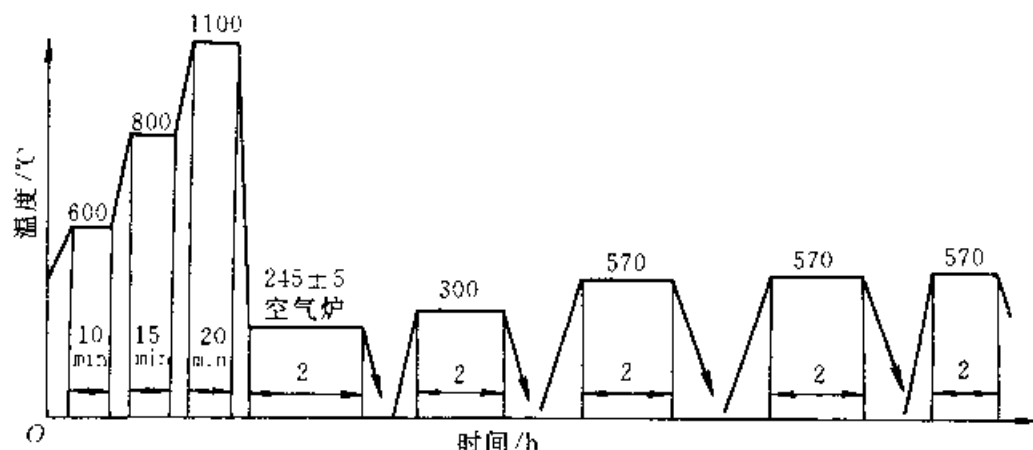


图 4-40 Cr4Mo4V 下贝氏体淬火工艺

#### 4.3.2.4 不锈钢高温轴承零件的渗氮

进行渗氮的不锈钢有 1Cr18Ni9、0Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、1Cr13、2Cr13 等。

1. 渗氮前的预备热处理 渗氮前的预备热处理是为了消除应力, 改善组织, 减少畸变, 为提高渗氮质量创造条件。其工艺见表 4-65。

表 4-65 不锈钢渗氮前的预备热处理

钢 号	渗氮前的预备热处理	热处理 后硬度 (HBS)
1Cr13	1000~1050°C 淬油, 700~780°C 回火, 油冷, 水冷或空冷	179~241
2Cr13	1000~1050°C 淬油, 600~700°C 回火, 油冷, 水冷或空冷	241~341
1Cr18Ni9Ti	1000~1150°C 淬油, 回火: 700°C 20h 或 800°C 10h	
(0Cr18Ni9, 1Cr18Ni9)		

2. 去除钝化膜 由于不锈钢中的合金元素 (如铬和镍等) 与空气中氧接触后, 在零件表面形成一层极薄而致密的氧化膜即钝化膜 (厚度为 1~3nm, 呈无色玻璃状) 覆盖在金属表面, 使渗氮无法进行。去除钝化膜的方法有:

(1) 喷砂, 用细砂在 1.5~2.5MPa 下喷吹零件的表面除膜。

(2) 渗氮炉中加氯化铵, 氯化铵加入量按炉了体积进行计算, 通常为 80~250g/m<sup>3</sup>。为了减慢氯化铵的分解速度, 常在其中加入一定比例的细砂。

(3) 酸洗, 在硝酸、氢氟酸、盐酸水溶液中酸洗, 其溶液 (1000mL) 的成分如下:

硝酸 (相对密度 1.4) 140mL; 氢氟酸 (相对密度 1.13) 60mL; 盐酸 (相对密度 1.19) 10mL; 其余为水。

酸洗温度为 70~80°C, 酸洗时间以使原表面失去光泽为准, 然后在 40~50°C 热水中刷洗, 再在流动冷水中冲洗, 最后烘干。

(4) 喷砂和炉中放置氯化铵相结合, 喷砂、酸洗后应立即装炉。

3. 渗氮工艺 不锈钢轴承零件渗氮工艺见表 4-66。渗氮温度与 NH<sub>3</sub> 分解率的关系见表 4-67。

4. 渗氮后质量检查 渗氮后质量检查的项目包括: 外观、渗氮层深度、渗氮层表面硬度和脆性以及畸变等。

5. 渗氮时常见的缺陷及防止办法 (见表 4-68)

表 4-66 不锈钢轴承零件渗氮工艺

钢 号	渗氮规范			渗氮层深度/mm	渗氮层表面硬度 (HV)
	温度/°C	时间/h	分解率(%)		
1Cr18Ni9Ti (1Cr18Ni9, 0Cr18Ni9)	I 560	30	45~55	0.15~0.20	950~1150
	II 580	20	55~65		
	I 560	8	25~40	0.15~0.20	950~1150
	I 560	34	40~60		
	II 580	3	85~95		
	560	48~60	40~50	0.15~0.25	900~1200
1Cr13	580	80	35~55	0.2~0.3	900~1200
	500	48	18~25	0.15	1000
	600	48	30~50	0.30	900
	500~520	55	20~40	0.15~0.25	950~1100
	540~560	55	40~45	0.25~0.35	850~950
	I 530 II 580	18~22 15~18	35~45 50~60	$\geq 0.25$	$\geq 650$
2Cr13	500	48	20~25	0.12	1000
	560	48	35~55	0.26	900

表 4-67 不锈钢轴承零件渗氮温度与  
NH<sub>3</sub> 分解率的关系

渗氮温度/°C	520	560	600	650
分解率 (%)	20~40	40~55	40~70	50~90

表 4-68 不锈钢轴承零件渗氮时常见的  
缺陷及防止办法

缺陷名称	产生原因	防止办法
局部渗不上	1) 零件清洗不干净 2) 装炉量多, 炉气不均匀 3) 加入氯化铵量小 4) 设备老化, 管道堵塞	1) 严格对零件清洗 2) 减少装炉量, 改进炉内管道系统提高炉气的均匀性 3) 适当增加氯化铵量 4) 定期维修设备和清洗管道
腐蚀	液氨水分多; 放入 NH <sub>4</sub> Cl 量过多; 操作不当	使用纯度 $\geq 99.8$ 的氨, 氯化铵控制在 80~200g/m <sup>3</sup>
脆性大	未按工艺执行, 液氨水分过多, 渗氮零件倒角太小, 炉子密封性不好	渗氮零件倒角 $\geq 0.5$ mm, 使用一级氨, 增加高温回火工序

(续)

缺陷名称	产生原因	防止办法
内套内径黑皮磨不掉	内套内径软磨时尺寸磨大或渗氮后尺寸有缩小	内套内径软磨后按图样控制尺寸, 或适当加大内径留量
畸变大	渗氮前零件存在较大的加工应力或操作不当	对易畸变零件渗氮前应进行高温回火和尽量采用低温渗氮
渗氮层深度不够	渗氮温度低或保温时间短	提高渗氮温度或延长保温时间

## 4.3.2.5 H10Cr4Mo4Ni4V 新型耐热钢轴承零件渗碳热处理

目前大多数航空发动机主轴轴承 DN 值  $\leq 2.2 \times 10^6$  下使用。为了提高发动机效率及降低燃料消耗率等目的, 轴承的转速需相应提高, 在高温下, DN 值到  $2.3 \times 10^6$ , 采用全淬透钢 (Cr4Mo4V, W18Cr4V) 制造的轴承将面临着套圈断裂问题。新研制 M50NiL 高温渗碳轴承钢, 该钢是 M50 钢改型(降低含碳量 0.10%(质量分数)左右, 增加 4%Ni(质量分数)即保持了 Cr4Mo4V 的各种高温性能, 又提高了断裂韧性, 心部的断裂韧性  $K_{IC} > 60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 而心部硬度为 43~45HRC, 有效地阻止裂

纹减缓和消除套圈断裂失效的危险。我国从90年代曾对该钢进行了全面的研究,制造发动机主轴承寿命已达到设计要求。

1. 套圈毛坯的退火见图4-41。

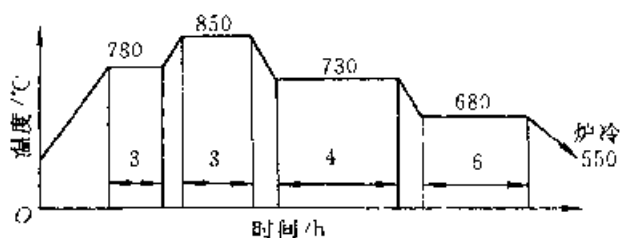


图 4-41 H10Cr4Mo4Ni4V 钢退火工艺

2. 套圈的渗碳 套圈的渗碳在井式渗碳炉或可控气氛的多用炉进行,碳势采用微机自动控制。渗碳的技术要求,渗碳层深度为1.6~1.8mm,(有效深度为1.0~1.5mm),表面含碳量为0.8%~1.05%(质量分数),其渗碳工艺见图4-42。

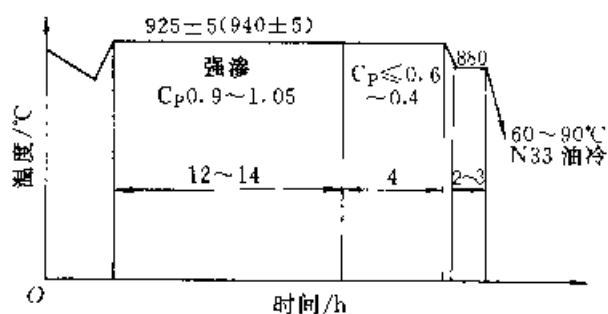


图 4-42 H10Cr4Mo4Ni4V 渗碳工艺

(括号内渗碳温度相应缩短  
渗碳时间; 渗碳时间按产品图样有效  
渗碳层深度而定

3. 高温回火 高温回火是使渗碳层中奥氏体转变成珠光体并使其成索氏体组成(或细小的均匀球化组织。为最终淬火提供良好的原始组织,其高温回火工艺见图4-43。

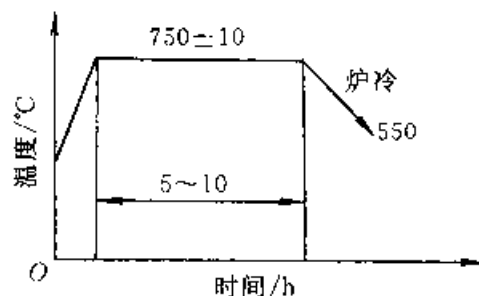


图 4-43 H10Cr4Mo4Ni4V 高温回火工艺

4. 最终热处理(淬火和回火) 淬、回火后技术要求:

渗碳层深度: 1.6~1.8mm(有效1.0~1.5mm)按产品图样规定执行。渗碳层的表面含碳量为0.85%~1.05%(质量分数),以保证成品的表面含碳量 $>0.8\%$ (质量分数)。渗碳层表面硬度为60~64HRC,中心硬度为35~48HRC。渗碳层显微组织为隐晶(细小结晶)马氏体,均匀细小分布残余碳化物以及少量残留奥氏体组成。心部组织为低碳板条马氏体。变形量,套圈的变形按大小而定,以保证磨加工能去除脱贫层深度应不大于0.06mm。表面应力呈压应力。

H90Cr4MoNi4V 淬回火推荐在真空炉中进行,也可在盐浴炉进行。其淬回工艺推荐见图4-44。淬火后硬度为不小于63HRC。

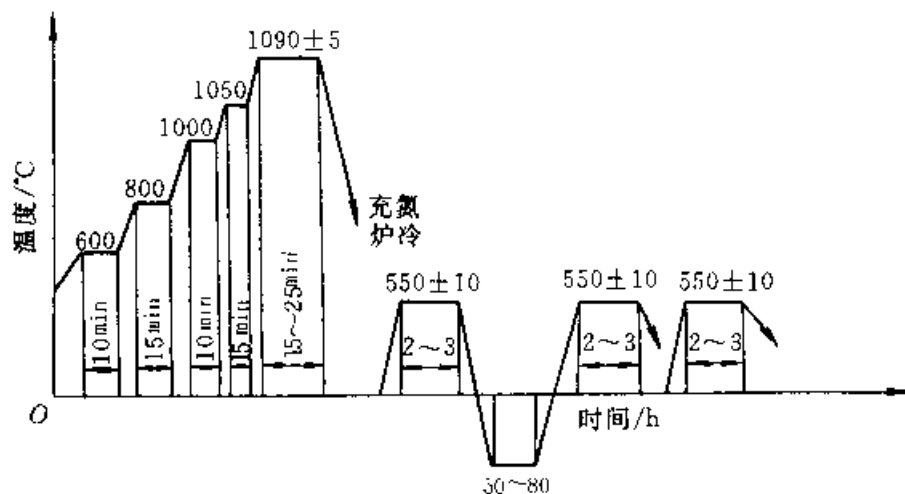


图 4-44 H10Cr4Mo4Ni4V 渗碳后淬回火工艺



5. 去应力处理 粗磨后第一次在  $250^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$  油中回火。细磨后第二次在  $130 \sim 150^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$  在循环空气炉中进行。精磨后第三次在  $200 \sim 250^{\circ}\text{C} \times 8 \sim 12\text{h}$  油中回火。

#### 4.3.3 防磁轴承零件的热处理

防磁轴承需选用导磁系数  $\mu < 1.0$  的材料制造。常用防磁轴承材料有: 铍青铜 QBe2.0、Monelk-500、00Cr40Ni55Al3、Cr23Ni28Mo5Ti3Al、70Mn18Cr4V2WMoV、7Mn15Cr2Al3V2WMo、00Cr15Ni60Mo16W4 等。

##### 4.3.3.1 7Mn15Cr2Al3V2WMo 合金轴承零件的热处理

7Mn15Cr2Al3V2WMo 系奥氏体沉淀硬化无磁钢。它的固溶处理温度为  $(1180 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ , 保温  $40 \sim 60\text{min}$ , 冷却在  $\leq 40^{\circ}\text{C}$  流动水冷却, 时效温度为  $650^{\circ}\text{C}$ , 保温  $20\text{h}$ 。制造轴承零件的固溶时效见图 4-45。固溶时效处理后硬度: 套圈的硬度  $> 42\text{HRC}$  滚子的硬度  $> 43\text{HRC}$  中隔圈的硬度  $> 41\text{HRC}$ 。

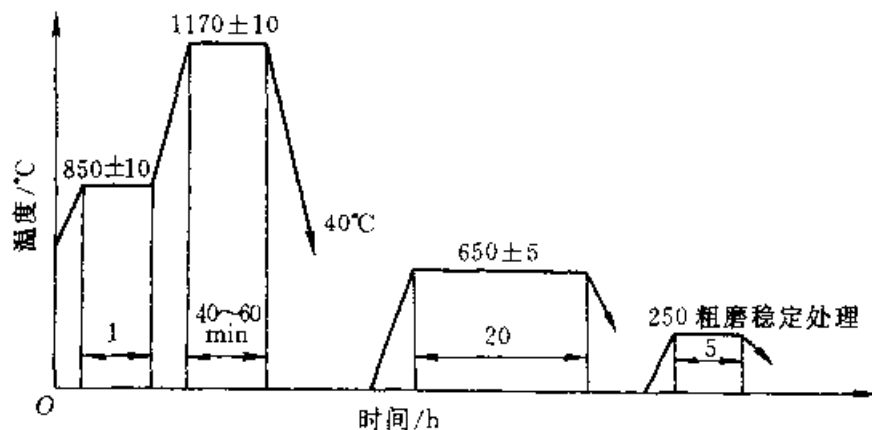


图 4-45 7Mn15Cr2Al3V2WMo 固溶时效工艺

##### 4.3.3.2 Cr23Ni28Mo5Ti3AlV 合金轴承零件的热处理

Cr23Ni28Mo5Ti3AlV 系 Fe 基奥氏体沉淀硬化性合金。它的强化通过固溶时效后达到。其固溶时效工艺见图 4-46。

固溶时效后硬度为  $\geq 48 \sim 52\text{HRC}$ 。

对于固溶热冲球 (材料加热到  $1100 \sim 1120^{\circ}\text{C}$ ) 经锉削、软磨后不需要固溶处理可以用  $900^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$  中间时效和最终时效  $720 \sim 750^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ 。

##### 4.3.3.3 00Cr40Ni55Al3、00Cr40Ni55Al3.5 合金裂滚动轴承零件固溶时效处理

该合金系 Cr、Ni 基无磁弥散硬化耐蚀合金,

在  $500^{\circ}\text{C}$  以下具有高的性能。在许多腐蚀介质中, 如硝酸、 $\text{H}_2\text{S}$ 、海洋性等条件下, 有好的耐蚀性。同时该合金无磁也可制作高温、无磁轴承。

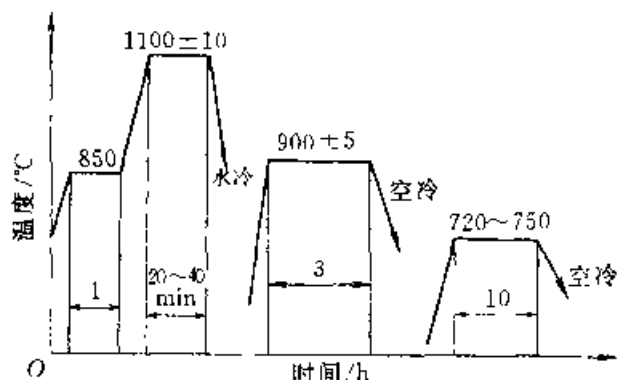


图 4-46 Cr23Ni28Mo5Ti3Al3V 合金

##### 固溶时效工艺

该合金是通过固溶时效或固溶、冷变形、再时效后具有优良的综合性能如高温硬度等。它的强化相由  $\gamma$  相分解, 析出  $\alpha$  相及其与基体共格的面心立方晶格  $\gamma'$  相和  $\text{Ni}_3(\text{Al})$  相所致。固溶时效后具有高的硬度, 强度及耐腐蚀性。固溶时效对性能的影响。见表 4-69。

该合金固溶温度保温时间、时效温度及时间对性能、晶粒大小的影响见表 4-70, 图 4-47~图 4-49。

该合金制造滚动轴承零件工艺过程:

原材料经固溶处理  $\rightarrow$  冷冲球或热冲球套圈、车削加工  $\rightarrow$  搓削、软磨接近成品尺寸  $\rightarrow$  时效处理粗、细、精磨  $\rightarrow$  成品尺寸  $\rightarrow$  装配。

套圈和钢球固溶时效工艺见表 4-71。

固溶时效后零件的热处理技术要求: 固溶处理晶粒度:  $6 \sim 9$  级; 时效后硬度: 套圈  $\geq 55\text{HRC}$ , 钢球  $\geq 56\text{HRC}$ ; 不允许有裂纹。

##### 4.3.3.4 Monel K-500 合金制轴承零件固溶时效处理

该合金是奥氏体沉淀硬化型无磁耐蚀 Ni-Cu 合金。具有较好的力学性能和耐腐蚀性能。在固溶状态下, 塑性好, 可采用冷变形, 且焊接性好。少量的 S、Pb 杂质元素使合金力学性能恶化, 产生热脆性。因此, 合金在进行加热时严禁使用 S、Pb 等元素燃料加热。

表 4-69 00Cr40Ni55Al3 固溶时效对性能的影响

合金牌号	热处理制度	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ (%)	硬度
00Cr40Ni55Al3	1160~1180℃, 水淬	$\leq 882$		20~30	$\leq 90\text{HRB}$
	1160~1180℃, 水淬 600~650℃×5h 时效	$\geq 1470$	—	5	$\geq 55\text{HRC}$
00Cr40Ni55Al3.5	1150℃, 水淬	784~882	588	>30	90~100HRB
	1200℃, 水淬, 70%冷变形, 500~550℃×5h 时效	1960~2371.6	1666	—	64~67HRC

表 4-70 固溶工艺对晶粒大小、硬度影响

固溶温度/℃	保温时间/h	晶粒大小(级)	硬度(HRC)
1180	0.5~2	8~9	26~28
1200	0.5~2	7~8	25~26
1200	0.5~2	5~7	21~23
1240	0.5~2	5~3	17~19

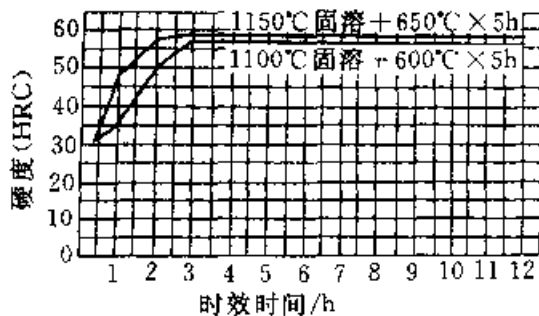


图 4-47 00Cr40Ni55Al3 合金时效温度对硬度的影响

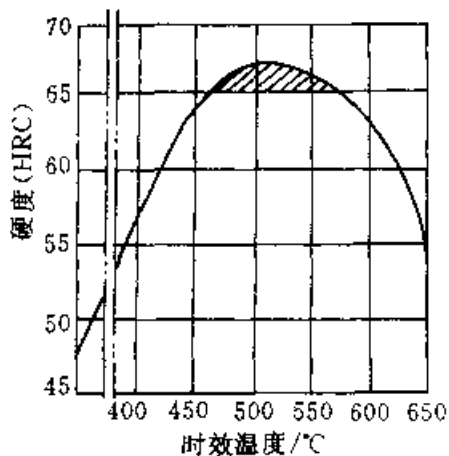


图 4-48 00Cr40Ni55Al3 合金的冷变形量(变形量 90%)、时效温度与硬度的关系

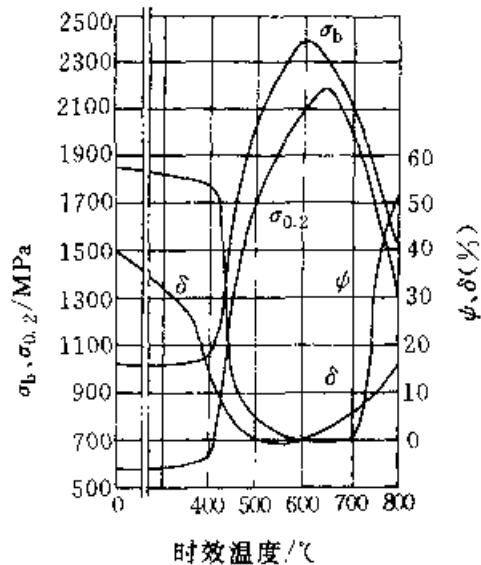


图 4-49 00Cr10Ni55Al3.5 合金  
时效温度对机械性能的影响  
1150℃ 淬火

表 4-71 00Cr40Ni55Al3 钢热处理工艺

序号	名称	固溶工艺	时效工艺
1	套圈	棒料固溶处理 1150~1180℃×40~60min 水淬	600~650℃×5~10h 后空冷
2	钢球	线材固溶 1150~1180℃×30~40min 水冷	600℃×5~10h 后空冷
		1150~1170℃×30~40min 热冲	600℃×5~10h 后空冷

该合金耐腐蚀性能优良。它适用轴承工作温度 $\leq 120^\circ\text{C}$  氢氟酸、磷酸、 $\text{H}_2\text{S}$  气体、氯化物, 海水等腐蚀介质滚动轴承元件如 3/16G200 合金球等。它可以通过冷变形和时效提高强度, 同时会稍稍影响耐腐蚀性。

该合金通过固溶(固溶后冷变形)和时效提高

强度。合金可以固溶态或冷变形态交货。固溶态交货 HV $\leq$ 170, 冷变形 $\leq$ 279HBS(视冷变形量而定)。固溶处理: 870~980℃ $\times$ 1~1.5h 在 $\leq$ 40℃流动水中冷却; 时效处理: 550~600℃ $\times$ 4~5h 后空冷。

固溶后 20%冷变形:  $\sigma_s$ 784~999MPa  $\delta \geq$  20% HRC $\geq$ 20

固溶后 20%冷变形加 550~600℃ $\times$ 4~5h 时效:  $\sigma_s$ 1029MPa  $\delta > 10\%$  HRC $\geq$ 28~35

固溶后 40%冷变形 530~550℃ $\times$ 5~6h 时效:  $\sigma_s$ 1176~1372MPa  $\delta > 5\%$  HRC $> 30$

以加工 3/16G200 合金球为例: 固溶后 $\rightarrow$ 冷冲球 $\rightarrow$ 铣削加工 $\rightarrow$ 软磨 $\rightarrow$ 时效处理 $\rightarrow$ 硬磨、精磨至成品尺寸。固溶时效后硬度为 30~40HRC。

#### 4.3.3.5 00Cr15Ni60Mo16W4 合金制轴承零件的固溶时效处理

00Cr15Ni60Mo16W4(又称 Hastelloy Alloy C 276)合金系奥氏体加工硬化型 Ni—Cr—Mo—W 系耐蚀合金。它适用于酸碱、农药、石油化工、海水等腐蚀介质中轴承元件。

该合金固溶态塑性好, 冷加工强化效应大, 经冷变形及时效后, 可获得高的强度和硬度。

固溶处理: 1150~1200℃,  $\leq$ 40℃流动水中冷却。

时效处理: 450~500℃ $\times$ 5~7h 后空冷。

固溶时效后硬度 $\geq$ 40HRC。

该合金冷变形量对硬度的影响见表 4-72。

表 4-72 00Cr15Ni60Mo16W4 合金冷变形量对硬度的影响

冷变形量 (%)	0	5	10	25	33	50	60
HV	244~257	256~266	283~303	362	386~412	399~441	426~441

#### 4.3.3.6 铍青铜(QBe2.0)轴承零件的热处理

QBe2.0 的热处理包括固溶和时效两个过程。固溶后应获得单相的  $\alpha$  固溶体组织。最高固溶温度不能超过包晶反应的温度 864℃, 一般选用 780~800℃。在这个温度范围内, 合金中固溶体含 Be 量与 864℃ 时基本上相接近, 所以在时效后有最佳的性能。保温时间一般按零件的厚度、装炉量和选用设备而定。一般情况下, 在电炉中加热, 零件厚度 $< 3\text{mm}$  时, 保温 30~60min; 零件厚度 $> 3\text{mm}$  时, 保温 60~120min。

固溶后冷却, 采用温度低于 30℃ 的水。由于铍青铜在固溶后冷却过程中, 脱溶进行得非常迅速, 零件加热后应迅速淬入水中, 以便获得单相过饱和  $\alpha$  固溶体。

铍青铜的时效温度选用 315~330℃ 较好, 保温时间为 2~3h。

铍青铜制轴承零件典型热处理工艺见表 4-73。

铍青铜热处理常见的缺陷见表 4-74。

表 4-73 铍青铜(QBe2.0)轴承零件热处理工艺

零件名称	技术要求	工序名称	热 处 理 规 范	备 注
套圈和滚动体	固溶时效后硬度为 $\geq$ 38HRC	固溶时效		

表 4-74 铍青铜(QBe2.0)热处理缺陷及解决办法

缺陷名称	产生原因	解决办法
固溶时效后硬度 $< 38\text{HRC}$	1) 时效温度高 2) 固溶温度和保温时间不合适	1) 零件加热前要清洗干净 2) 在保护气氛或真空炉中加热
零件氧化	1) 零件清洗不干净 2) 加热时氧化	对原材料进行固溶 $\rightarrow$ 车加工 $\rightarrow$ 时效处理 $\rightarrow$ 磨加工 $\rightarrow$ 稳定处理
畸变	零件在固溶处理时易畸变	

4.4 其他轴承零件的热处理

4.4.1 保持架、铆钉等零件的热处理

滚动轴承中的保持架是保持滚动体彼此相隔一定距离,并阻止滚动体之间的相互冲撞与摩擦。对于滚柱轴承保持架还有防止滚柱歪斜的作用。在工作时保持架除了受有离心力的作用外,还与轴承套圈和滚动体发生滑动摩擦。所以保持架材料应具有良好的导热性、耐磨性、一定的强度和小的摩擦系数,与套圈和滚动体应有相近的膨胀系数,并且要便于加工等。有些特殊的保持架还要求有自润滑性,耐高温和耐腐蚀性等。制造保持架常用的金属材料及其用途见表 4-75,中小型轴承采用冲压保持架,大型轴承一般用机加工保持架。保持架、铆钉等零件热处理工艺见表 4-76

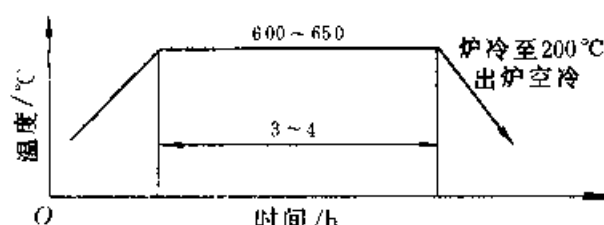
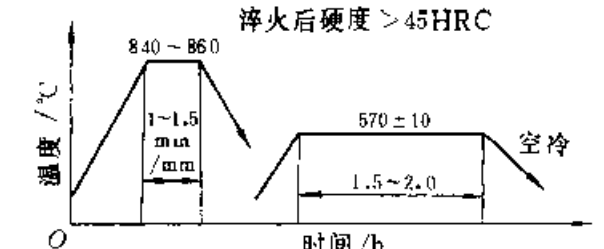
表 4-75 制造保持架的常用金属材料及其用途

材 料	用 途
08 08F 10 10F	制造 BK、HK 型轴承滚针轴承外套、浪形、盒形、菊形、筐形、Z 形、盆形、E 形等冲压保持架和防尘盖、挡圈、密封圈等

(续)

材 料	用 途
ML15、ML20	制造保持架铆钉、长圆柱和螺旋滚子等轴承的支杆
20、40、45	制造特大型轴承支柱、大型圆锥轴承的内外隔圈和保持架等
40CrNiMoA	制造高温、高速轴承实体保持架,工作温度 $\leq 315^{\circ}\text{C}$
0Cr18Ni9、1Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti、Cr17Ni2	制造防锈性能较高的保持架、垫圈和铆钉
S16SiCuCr	制造在润滑不良条件下工作的轴承保持架
T8A、T10A	制造冠形保持架、防尘盖等
H62、H96	制造冲压保持架和铆钉
HPb59 1	制造高强度实体保持架和保持架挡圈
QA19 3 1.5	制造高温、高速实体保持架,工作温度 $\leq 200^{\circ}\text{C}$
QSi1-3	制造实体保持架、挡盖和关节轴承内套
QSi3.5-3-1.5	制造高温、高速实体保持架,工作温度 $\leq 315^{\circ}\text{C}$
LY11、LY12	制造高温、高速实体保持架
T2、T3	制造冲压铆钉

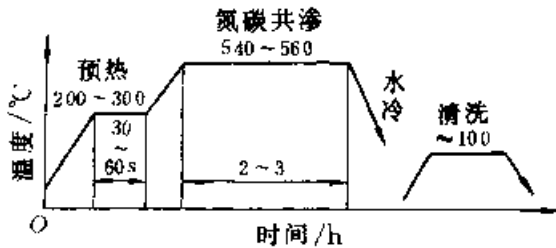
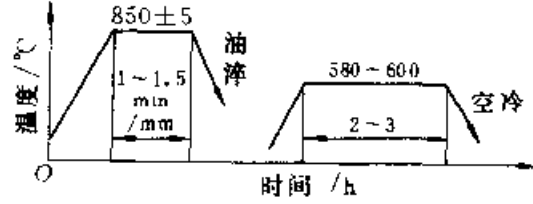
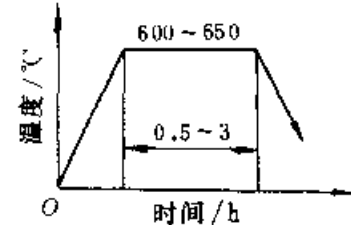
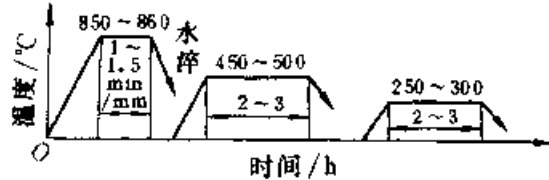
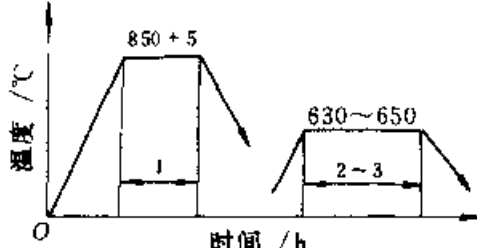
表 4-76 保持架、铆钉等零件的热处理工艺

零件名称	材 料	技术要求	工序名称	热处理工艺	备 注
铆 钉	ML15 或 ML20	消除加工硬化	软化退火		需无氧化退火
保 持 架	45	241~285HBS	淬火回火		淬火后硬度 $>45\text{HRC}$

(续)

零件名称	材料	技术要求	工序名称	热处理工艺	备注
锁圈	65Mn	① 53 ~ 55HRC ② 40 ~ 45HRC	淬火 回火	<p>淬火硬度 <math>&gt;57\text{HRC}</math></p>	为防止变形, 淬火后先低温回火, 后放入专用的夹具内再进行回火
保持架	Cr17Ni2	231~363 或 255~302HBS	淬火 回火	<p>淬火硬度 <math>&gt;57\text{HRC}</math></p>	300°C × 2h 回火 $>35\text{HRC}$ , 530~550°C × 1.5h 回火 $\geq 235 \sim 277\text{HBS}$
冲压保持架及铆钉	1Cr18Ni9 或 1Cr18Ni9Ti	消除加工硬化 (软化处理)	淬火	<p>在 <math>&lt;40^\circ\text{C}</math> 水中冷却 或在碳酸钠水溶液中冷却</p>	最好在真空中加热
冲压保持架	08、10 (08F、10F)	消除加工硬化	软化退火	<p>冷至 <math>100^\circ\text{C}</math> 出炉空冷</p>	需无氧化退火
保持架	S16SiCuCr 石墨钢	1) 硬度: 149~197HBS 2) 显微组织: 珠光体+石墨+少量铁素体, 不允许有封闭网状碳化物 3) 钢中化合碳量 (总碳量) 减去石墨碳含量 $w(\text{C}) \geq 0.4\%$ 4) 石墨形状: 链状球状或少量条状	退火 (或淬火回火)	 	自润滑保持架

(续)

零件名称	材料	技术要求	工序名称	热处理工艺	备注
挡圈	08 或 10	氮碳共渗后, 硬度 > 40HRC, 渗氮层深度 0.4~0.7mm, 处理后表面应为均匀银白色	氮碳共渗	 <p>1) 氮碳共渗保温时间: 挡圈厚度 &lt; 2.5mm 时为 2h; 挡圈厚度 &gt; 2.5~4mm 时为 2.5h; 挡圈厚度 4~6mm 时为 3h</p> <p>2) 在 5%~10% 热碳酸钠水溶液中进行 100% 清洗, 清洗后防锈氮碳共渗盐浴成分 (质量分数) 为</p> <p>①. <math>(\text{NH}_2)_2\text{CO}</math> 40%, <math>\text{Na}_2\text{CO}_3</math> 30%, <math>\text{KCl}</math> 20%, <math>\text{KOH}</math> 10%, 氰酸根含量控制在 32%~40%</p> <p>②. <math>(\text{NH}_2)_2\text{CO}</math> 60%, <math>\text{Na}_2\text{CO}_3</math> 40%, 然后加入混合盐总重量 10% 的 <math>\text{KCl}</math>, 使其氰酸根含量控制在 28%~30%</p>	有毒作业, 注意安全
保持架	40CrNiMoA	30~37HRC	淬火和高温回火		
冲压保持架	H62	消除加工硬化	软化退火	 <p>必须装箱密封退火, 在退火箱出炉后待零件冷至 100°C 以下时开箱</p>	冷加工后必须进行消除内应力退火 (270~300°C) 2~3h
保持架	QSi1-3	>177~209HBS	固溶和时效		将管料进行热处理达到要求后再加工成保持架, 并进行去应力退火
保持架	QAl10-3~1.5	① 130~200HBS ② 202~269HBS	固溶时效处理		

(续)

零件名称	材料	技术要求	工序名称	热处理工艺	备注
保持架	QAL10 3~1.5	130~ 200HBS	固溶时效处理		
保持架	HPb59-1	消除加工硬化	软化退火或除应力退火		(或室温时效2h 温度为15~40℃) 括号内是除应力退火温度
保持架	LY11 LY12	>60HRB	固溶时效处理		括号内为LY固溶温度

#### 4.4.2 冲压滚针轴承套圈等零件的热处理

用08或10钢板冲压成形的轴承零件有BK、HK型轴承滚针套、垫圈、保持架以及罩等。其形状见图4-50。这些零件一般要求一定强度，耐磨性要好。故零件表面多进行碳氮共渗或渗碳不同壁厚的零件对碳氮共渗层深度的要求见表4-77。冲压轴承零件的热处理工艺见表4-78。表面硬度要求和回火工艺的关系见表4-79。08和10钢板冲压的零件在RC-45-9型无马弗或有马弗带循环风扇的网带炉的碳氮共渗的工艺见表4-80。

表4-77 不同壁厚的零件对碳氮共渗层深度的要求

零件的壁厚/mm	碳氮共渗层厚度/mm
<0.5	0.07~0.11
0.5~1.5	0.07~0.12
1.5~2.0	0.08~0.15
2.0~2.5	0.12~0.20
2.5~4.0	0.15~0.25
4.0~6.0	0.20~0.30
6.0~10	0.25~0.35

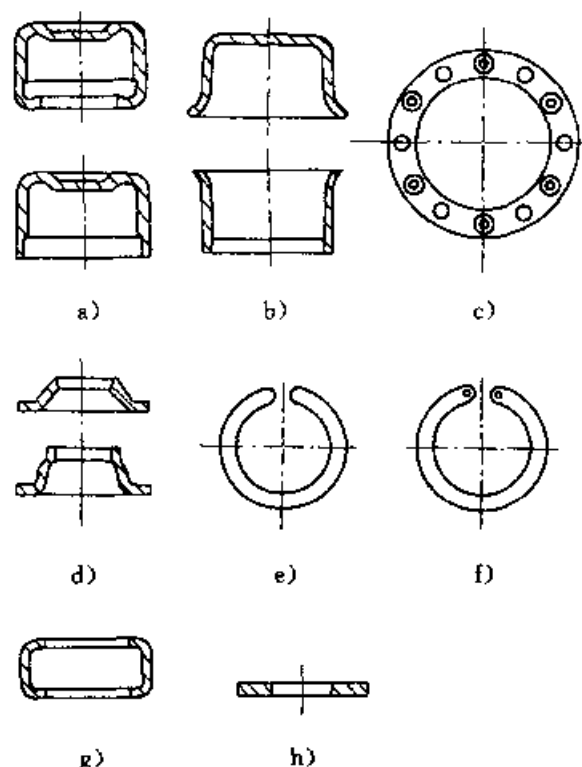


图4-50 08(或10)碳钢冲压滚针轴承零件  
a) 694<sub>800</sub>、794<sub>800</sub>冲压外套 b) 内外套 c)、d) 垫圈  
e)、f)、g) 锁圈和锁紧圈 h) 垫片

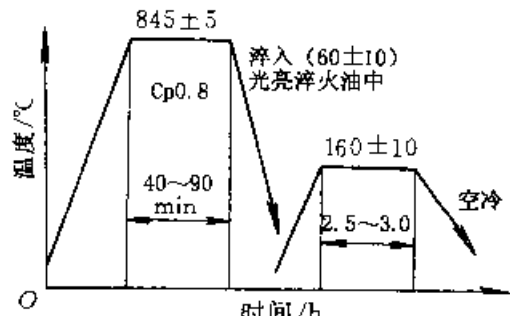
表 4-78 08 或 10 钢板冲压轴承零件的热处理

技术要求	热处理工艺
1) 碳氮共渗层淬、回火硬度: 套圈 664~795HV (或 629~697HV); 垫圈、保持架 613~697HV (或 484~619HV) 锁圈 392~446HV (或 434~484HV); 罩 302~345HV	1) 零件在处理前应清洗干净, 表面不允许有油污、锈蚀以及氧化皮, 并经 150~300℃ 烘干。不需共渗部分应在处理前镀铜
2) 碳氮共渗层见表 4-77	2) 中温液体碳氮共渗: $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 30 \sim 60\text{min}$ 。盐的成分 (质量分数) 为 NaCN 40%、NaCl 35%、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 25%, 碳氮共渗时 NaCN 量必须控制在 20%~25%。(盐浴剧毒)
3) 碳氮共渗层淬火后组织为细针状马氏体	3) 冷却: 对于要求硬度高的零件共渗后, 直接在 30~80℃ 的 L-AN10 或 L-AN20 油中冷却。对要求硬度在 30~35HRC 的零件, 碳氮共渗后采取空冷
4) 表面不允许有锈蚀、麻点、裂纹等缺陷	4) 清洗: 零件在 5%~10% (质量分数) (50~80℃) 碳酸钠水溶液中清洗除盐
	5) 回火工艺见表 4-79
	6) 清洗与防锈: 零件回火后必须进行清洗, 然后在 10%~20% (质量分数) 亚硝酸钠水溶液中进行防锈处理
	现采用气体氮碳共渗工艺

表 4-79 表面硬度要求和回火工艺的关系

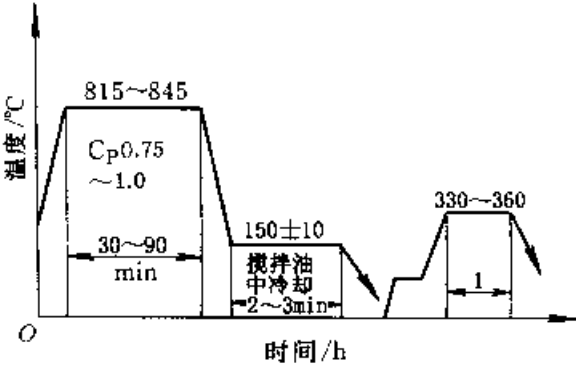
零件表面硬度要求 (HV)	回火温度 /℃	回火时间 /h
720~832	150~160	2~3
619~697	180~200	2~3
484~619	250	1
434~484	350	45min
392~446	370	45min

表 4-80 BK、HK 型冲压滚针轴承外套零件在网带炉内进行碳氮共渗热处理工艺

技术要求	热处理规范	备 注
1) 碳氮共渗直接淬火后表面硬度应为 720HV 以上。回火后应为 664~795HV	 <p>温度/℃</p> <p>时间/h</p> <p>845±5</p> <p>Cp0.8</p> <p>40~80 min</p> <p>淬入 (60±10) 光亮淬火油中</p> <p>160±10</p> <p>2.5~3.0</p> <p>空冷</p>	炉子分三个区。碳氮共渗时间要根据零件渗层深度的要求而定 不同回火工艺的硬度 150℃×2h: ≥64HRC 180℃×2h: 60~64HRC 230℃×2h: 59~62HRC
2) 共渗层深根据图样要求		
3) 渗层的显微组织应为细小针状马氏体和少量残留奥氏体组成, 心部为基体组织	1) 零件在共渗前必须经 3h 以上串光使表面清洁和光亮并需经汽油或酒精清洗	
4) 畸变量要求尺寸变化不超过 0.02mm, 圆度不超过 0.04mm	2) 滴注法碳氮共渗的液体流量控制以 CC 45 9X 为例	
5) 表面为银灰色	CH <sub>3</sub> OH 10~15mL/min	
6) 碳氮共渗深度:	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH 6~8mL/min	
壁厚 < 0.50mm; 0.08mm	NH <sub>3</sub> 添加 0.5%~3%	
壁厚 > 0.5~0.8mm; 0.1~0.18mm		
壁厚 > 0.8~1.32mm; 0.10~0.23mm		



(续)

技术要求	热处理规范	备 注
<p>渗碳</p> <p>1) 推力轴承保持架</p> <p>厚度<math>\leq 0.56\text{mm}</math></p> <p>有效深度 <math>\delta 0.01 \sim 0.04\text{mm}</math></p> <p>厚度 <math>T &gt; 0.569\text{mm}</math></p> <p><math>\delta 0.02 \sim 0.10\text{mm}</math></p> <p>厚度 <math>&gt; 0.9\text{mm}</math>, <math>\delta 0.10/0.20</math></p> <p>2) 径向轴承保持架</p> <p>厚度<math>\leq 0.63\text{mm}</math>, <math>\delta 0.01/0.08\text{mm}</math></p> <p>厚度 <math>&gt; 0.63 \sim \leq 1.0\text{mm}</math>, <math>\delta 0.02/0.10\text{mm}</math></p> <p>厚度 <math>&gt; 1.0\text{mm}</math>, <math>\delta 0.10/0.20\text{mm}</math></p> <p>3) 径向轴承保持架</p> <p>厚度<math>\leq 1.00\text{mm}</math>, <math>\delta 0.02/0.10\text{mm}</math></p> <p>厚度 <math>&gt; 1.00\text{mm}</math>, <math>\delta 0.10 \sim 0.20\text{mm}</math></p> <p>硬度 <math>&gt; 655\text{HV}</math></p>	 <p>温度/°C</p> <p>815~845</p> <p><math>C_p 0.75 \sim 1.0</math></p> <p>30~90 min</p> <p>150±10</p> <p>搅拌油中冷却</p> <p>2~3 min</p> <p>330~360</p> <p>1</p> <p>时间/h</p>	<p>330°C 回火</p> <p>硬度 52~57HRC;</p> <p>360°C 回火</p> <p>硬度 40~55HRC</p>

## 参 考 文 献

- 1 Раузин, Я. Р. Термическая Обработка Хромистой стали. Москва Машгиз, 1963
- 2 СПЕс. А. Г.; Зельвет. в. М. Структура и Свойства полированных. Москва, 1980
- 3 JB1255—1991《高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件》
- 4 JB/T1460—1992《高碳铬不锈钢滚动轴承零件热处理技术条件》
- 5 JB/T2850—1993《Cr4Mo4V 高温轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件》
- 6 JB/T6366—1992《55SiMoV 钢滚动轴承零件热处理技术条件》
- 7 ZBJ36001—1986、ZBJ36002—1986《滚动轴承零件渗碳热处理质量标准》
- 8 JB/T7361—1994《滚动轴承零件硬度试验方法》
- 9 JB/T7363—1994《滚动轴承零件碳氮共渗热处理技术条件》
- 10 第三届全国轴承热处理年会论文资料集. 机械工业部洛阳轴承研究所出版, 1997年9月
- 11 刘耀中等. 热处理工艺对 55SiMoV 钢组织与性能的影响. 金属热处理 1996N (02): 10~13
- 12 范友昌. 重大型轴承套圈感应加热. 轴承技术, 1982 (2)
- 13 CSBTSTC98.24—1997《特大型滚动轴承零件热处理技术条件》
- 14 JB/T2974—1993《滚动轴承 代号方法的补充规定》
- 15 Ball and Bearing steels Technical conditions of Delivery DIN 17230—1980

# 第 5 章 弹簧的热处理

天津大学 苏德达

弹簧(含弹性元件,下同)是量大面广的基础零件,对于动力机械、仪器仪表及武器中的控制性元件是非常关键的零件。它的基本功能是利用材料的弹性和弹簧的结构特点,在产生及恢复变形时,可以把机械功或动能转换为形变能,或者把形变能转换为动能或机械功,以便达到缓冲或减震、控制运动或复位、储能或测量等目的。所以,在各类机械设备、仪器仪表、军工产品、电器开关及家具家电甚至文具玩具中都广泛使用弹簧。影响弹簧质量和使用寿命的因素很多,如设计、材料选择、生产工艺及工况条件等等。其中,材质和热处理对弹簧的各种性能及其使用寿命有重要的甚至是决定性的影响。

本章主要介绍各类机械设备中常用的弹簧材料和典型弹簧的热处理,对于特殊用途的弹性材

料和元件的热处理只作扼要介绍。

## 5.1 弹簧的分类、服役条件失效方式和性能要求

### 5.1.1 弹簧的分类

弹簧种类很多,可按形状、承载特点、制造方法、材料成分和不同用途分类,每一类又分为若干小类和不同的规格。GB1805--79 弹簧术语中列出了 22 种,弹簧行业 1980 年提出的内部标准《弹簧分类》中分为 15 个小类。现将弹簧分类综合于表 5-1。

弹簧行业多采用按形状分类为主,在机械制造业中多按用途分类或按上述两者综合命名。常见的弹簧

表 5-1 弹簧的分类

分类法	弹 簧 名 称		分类法	弹 簧 名 称	
按形状特征分类	螺旋弹簧	包括压缩螺旋弹簧、拉伸螺旋弹簧和扭转螺旋弹簧三大类(图 5-1a、b、c);圆柱形、锥形、中凸形、中凹形;圆截面、矩形截面、方形截面等,单螺旋和多螺旋,等螺距和变螺距等	按开头特征分类	线弹簧	圆弧形线弹簧(卡簧)、弹性挡圈(同心或偏心)、蛇形弹簧、S 或 Z 字形弹簧
	板弹簧	单板或多板弹簧,等截面和变截面板簧,弓形板弹簧、椭圆形板弹簧(图 5-1d、e、f)及悬臂板弹簧等		片弹簧	单片或多片舌簧、平面矩形片簧、梯形或弧形片簧、网状弹簧片、刮片簧等
	杆弹簧	实芯扭杆、空芯扭杆、弓形、框形扭杆(轿车用稳定杆)、弹性方棒或圆棒	按承载特点及负荷大小分类	压缩螺旋弹簧	I 类负荷弹簧( $\tau_s \leq 1.67[\tau]$ ), II 类( $\tau_s \leq 1.26[\tau]$ ), III 类( $\tau_s \leq 1.12[\tau]$ ) I 类交变负荷作用次数 $N > 10^6$ , II 类 $N = 10^3 \sim 10^5$ , III 类 $N < 10^3$
	碟簧	普通碟形弹簧,组合(叠合、对合及复合等)碟形弹簧,有支承面和无支承面碟形弹簧,膜片弹簧,圆板及波形弹簧及圆筒形弹簧		拉伸螺旋弹簧	环形(A 型、B 型)、半圆形
	环形弹簧	简单型和组合型弹簧		扭转螺旋弹簧	单臂、双臂、对扭和双扭 按弯曲负荷分类: $\sigma_s = 0.625\sigma_1$ (I 类负荷), $\sigma_s = 0.8\sigma_1$ (II 类负荷)
	蜗卷弹簧	平面蜗卷弹簧(接触型与非接触型)、截锥蜗卷弹簧(笋形弹簧)			

(续)

分类法	弹 簧 名 称	分类法	弹 簧 名 称
按制作方法及精度分类	冷成形弹簧和热成形弹簧两大类, 又分 I、II、III 级精度	按用途分类	缓冲或减振弹簧、悬架弹簧、汽门或阀门弹簧、电站安全阀弹簧、纺织摇架弹簧、喷油嘴调压弹簧、柱塞弹簧、模具弹簧、密封弹簧、电器开关弹簧、定位卡簧、平衡弹簧、液压元件控制弹簧(为调速弹簧)、武器中的枪击弹簧、子弹中的皇冠尾翼导向弹簧、钟表及玩具中的弹簧(如发条、游丝)、测力弹簧、仪表弹性元件。运动器械用簧(如扩胸器簧、单杠、双杠及撑高杆)、家具弹簧、坐垫弹簧等
按弹簧材料分类	金属类弹簧 碳素钢弹簧、低合金弹簧、冷拔钢丝弹簧、油淬火钢丝弹簧、不锈钢弹簧、耐热钢弹簧、高温合金弹簧、铜合金弹簧(如锡青铜弹簧、锡磷青铜弹簧、铍青铜弹簧等)、钛合金弹簧及特殊合金弹簧等		
	非金属类弹簧 橡胶弹簧、塑料弹簧、流体(空气或液体)弹簧等		

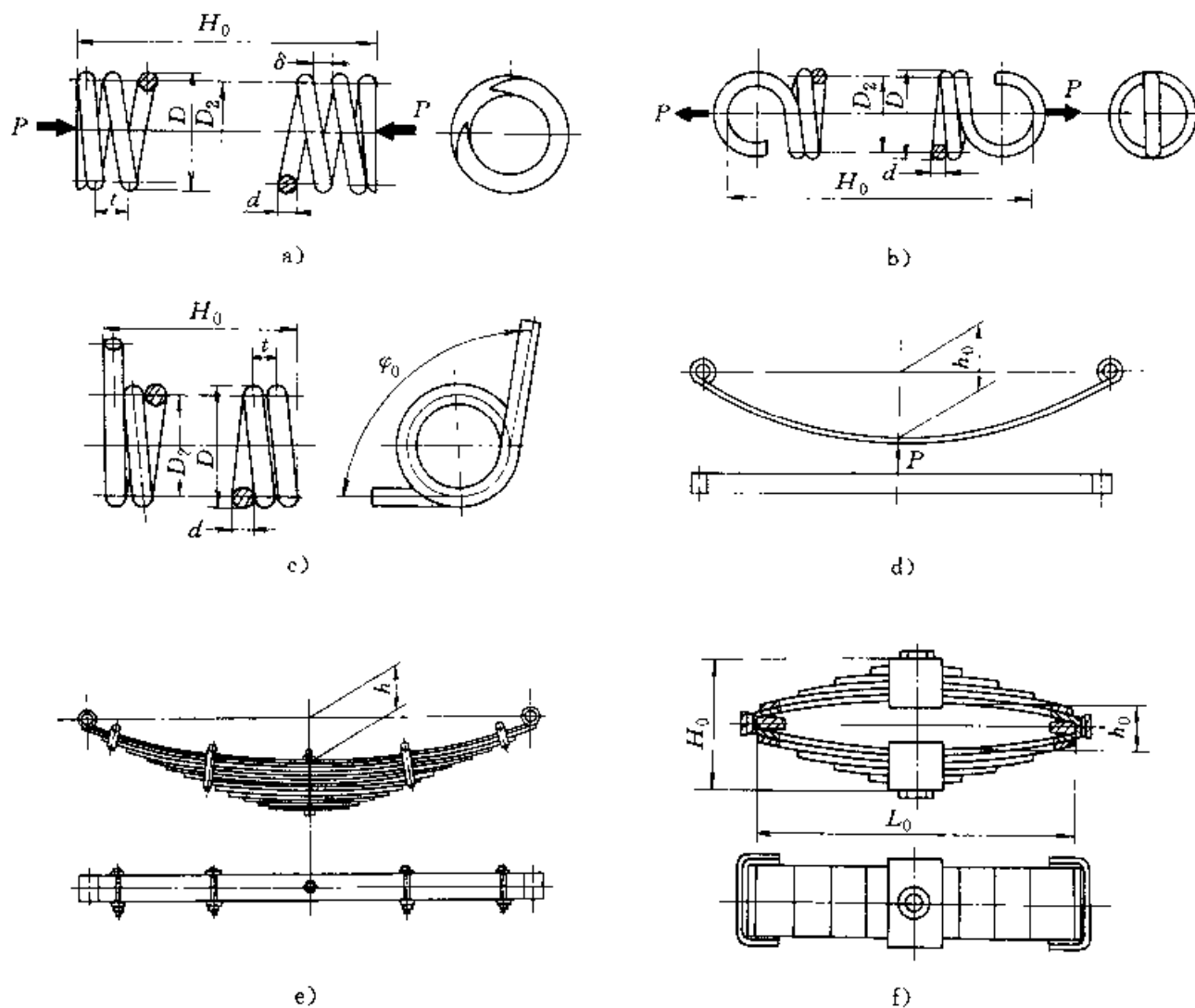


图 5-1 典型的螺旋弹簧及板簧

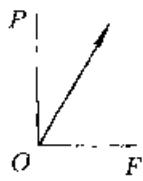

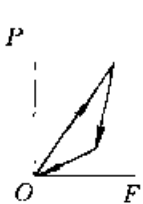
a) 压缩螺旋弹簧 b) 拉伸螺旋弹簧 c) 扭转螺旋弹簧 d) 单板弹簧 e) 多板弓形弹簧 f) 椭圆形板弹簧  
 $d$ —材料直径  $D_2$ —弹簧中径  $t$ —节距  $n$ —有效圈数  $\varphi_0$ —自由扭转角  $D$ —弹簧外径  $H_0$ —弹簧自由高度  
 $\delta$ —间距  $n_1$ —总圈数  $h$ —板簧弧高  $h_0$ —自由弧高  $L_0$ —自由弦长

5.1.2 弹簧的服役条件和失效方式

1. 弹簧的服役条件和应力状态 弹簧服役条件是指它工作的环境(温度和介质)及应力状态等因素。工作温度可分为低温(室温以下)、室温、较高温度(120~350℃)、高温(400℃以上)几个档次。工作环境介质有空气(干燥气和潮湿气)、水蒸气、雨水、燃烧产物、油及酸碱水溶液等。普通机械弹簧一般是在室温或较高工作温度、大气条件下承受负荷。也有用于耐蚀、承受高应力等各种特殊用途的弹簧,应当指出,工作持续时间也是一个值得考虑的重要因素。

弹簧的负荷特性由弹簧变形时载荷( $P$ )与变形( $F$ )之间的关系曲线表示。常见者有三类:直线型、渐增型、不重合型。各类弹簧的负荷特性见表 5-2。

表 5-2 各类弹簧的负荷特性

负荷特性	$P$ - $F$ 曲线	弹簧种类
直线型		圆柱形(圆或矩形截面)螺旋弹簧(包括压簧、拉簧和扭簧)、扭杆、单片或单板弹簧等
渐增型或先直线后渐增		圆柱形不等螺距压缩螺旋弹簧、圆锥形螺旋弹簧、多股压缩、螺旋弹簧、中凸形及中凹形螺旋弹簧、组合(塔形)螺旋弹簧、箕形弹簧(蜗卷螺旋弹簧)等
加载和卸载时特性线不重合型		多板组合弹簧、组合碟簧、组合环形弹簧、接触型蜗卷弹簧等

弹簧载荷有动载荷(振动、扭转、弯曲等)和静载荷,有些重要弹簧承受复杂的交变载荷。应力状态是设计弹簧、选材及热处理的一个极其重要的参数。在外力作用下,弹簧材料内部往往产生不同的应力,如弯曲应力、扭转应力(切应力)或弯扭复合应力等。各类弹簧承载时的应力分析与计

算可参看文献<sup>[1~3]</sup>。典型弹簧的应力状态见表 5-3。

表 5-3 弹簧的应力状态举例

应力状态	弹簧类型
弯曲应力( $\sigma_b$ )为主	各种板簧、片簧、碟簧、平面蜗卷弹簧、扭转螺旋弹簧、波形弹簧、弓形弹簧等
扭转(剪切)应力( $\tau_t$ )	压缩和拉伸螺旋弹簧、扭杆弹簧、蜗卷螺旋弹簧
复合应力	承受压缩和拉伸复合应力,如环形弹簧、承受弯曲和横向负荷的弹簧
交变应力 对称( $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$ ) 非对称( $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ ) 脉动( $0 - \sigma_{max}$ )	各种汽门弹簧、气阀弹簧

2. 弹簧的失效方式 由于弹簧服役条件的复杂性和苛刻性,其失效方式有多种多样,主要有断裂失效和应力松弛(变形)失效两大类。在断裂失效中又可分为脆性断裂和塑性断裂,其中突发性的脆性断裂的危害性最大。在断裂失效中又可分为脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂及腐蚀疲劳断裂。此外,还有氢脆、磷脆及黑脆等。其中疲劳断裂约占弹簧断裂失效的 80%~90%。在生产实践中可依据弹簧断口特征来判断其断裂方式,可根据弹簧的受力条件找出其断裂源,分析其裂纹的扩展速率。应力松弛(变形)失效是弹簧工作过程中普遍存在的现象,但一般不被重视,而对那些执行控制性元件中则是影响产品效率、灵敏度及可靠性的关键性零件。弹簧的早期失效对钢材的浪费相当严重、造成直接和间接的经济损失巨大。所以,弹簧的失效分析和预防是一项重要的技术任务。有关这方面的问题请参阅资料<sup>[4,5]</sup>。

典型弹簧的失效方式见表 5-4。

弹簧失效的原因比较复杂,除与设计是否合理,成形加工质量、安装和使用是否正确等有关外,弹簧材料好坏和热处理质量是影响产品的关键因素。因此,加强弹簧产品质量的全面管理是完全必要的。

表 5-4 典型弹簧的失效方式、特征及危害性

典型弹簧		工况及受力条件	主要失效方式和特征	事故危害性
螺旋弹簧	汽门弹簧	承受高频率、高应力非对称交变应力, 在燃烧产物、较高温度下工作	疲劳断裂及应力松弛, 断在 1~3 圈、断面与轴线呈 45°、断裂源一般在弹簧内表面	断簧掉入气缸内引发机毁人亡事故或降低发动机效率, 增加耗油量
	活塞式压缩机、气阀弹簧	工作介质为各种气体, 温度较高, 行程短频率高。弹簧工作时, 除压缩外还有转动、摇摆和振动	疲劳断裂, 并圈处磨损后折断, 被阀片卡断等。 应力松弛, 被压缩在阀座孔内, 失掉弹性	断簧掉入气缸内、将气缸顶破, 造成机毁人亡事故, 降低机器效率、噪声很大
	电站锅炉安全阀弹簧	静应力、工作温度较高	应力松弛为主	失控引发锅炉爆炸
	喷油嘴调压弹簧	高应力、高频率, 工作温度较高	疲劳断裂和应力松弛	喷油量失控或失稳, 降低内燃机效率
	轿车悬架弹簧	高应力, 振动大, 受冲击或摇摆, 受泥水、泥沙等腐蚀	断裂和应力松弛	舒适性降低
	模具弹簧	高应力, 受冲击, 振动大	断裂和应力松弛	停机事故, 噪声大
	液压元件调压弹簧	高应力	应力松弛为主	降低控制精度
	扭转密封弹簧	静应力、在油井中工作	应力松弛	漏油日益严重
片簧	纺织机摇架弹簧	微震室温 ( $<50^{\circ}\text{C}$ ) 要求 $\left\{ \frac{\Delta P}{P}, \% \right\}_{10} < 5\%$	应力松弛 (加压失控)	纺纱粗细不匀, 严重影响服装出口
	汽车、火车用板簧	高弯曲应力, 冲击和振动, 受泥水、泥砂等侵蚀	腐蚀疲劳断裂、应力腐蚀断裂、脆断、磨损和应力松弛	停车待修, 板簧耗损量大, 降低行车舒适性
	转子发动机刮片簧	高温受弯曲应力	应力松弛 (变形失效)	急剧降低机器效率, 甚至停机
	电器接插件片簧	室温工作	应力松弛 (变形)	接触不良, 引发故障
簧	地震仪拾震器片状异形弹簧	在深井中工作 ( $<100^{\circ}\text{C}$ )	应力松弛	地震仪失灵
	网状弹簧片	高应力、高频率、工作温度较高	疲劳断裂 (一般在片簧根部), 应力松弛、丧失弹性	造成停机事故降低设备效率
蜗卷弹簧	汽车平衡弹簧	室温工作, 往复弯曲	疲劳断裂和磨损、松弛	玻璃升降失效
	钟表发条、游丝	室温工作, 往复弯曲回转	应力松弛, 偶有断裂	走速不稳, 甚至停走
碟形和环形弹簧		高应力, 接触磨损	断裂、磨损和应力松弛	降低吸震、减震性能

### 5.1.3 对弹簧的性能要求

弹簧质量好坏应包括弹簧材料、几何形状、尺寸精度和表面质量 (美观) 等, 其中, 对弹簧材料的性能要求是其重点。具体内容如下。

1. 力学性能方面 由于弹簧是在弹性范围内工作, 不允许产生永久变形。弹性好坏可用应变能或弹性比功 ( $U$ ) 表示, 根据应力应变曲线  $U \propto \frac{\sigma_e^2}{E}$  或  $U' \propto \frac{\tau_e^2}{G}$  可知, 弹性应变能 (比功) 与材料的

弹性极限( $\sigma_e$ 或 $\tau_e$ )的平方成正比,与弹性模量成反比。要求弹性应变能或比功较大,也就是要求弹簧材料有良好的微塑性变形抗力,即弹性极限( $\sigma_e$ 或 $\tau_e$ )、屈服极限( $\sigma_{0.2}$ 或 $\tau_{0.2}$ )和屈强比( $\sigma/\sigma_b$ )要高,所以弹簧钢一般属于高强度或超高强度钢。弹簧材料的种类和热处理工艺对上述性能影响很大。相对而言,它们对钢材的弹性模量( $E$ 或 $G$ )的影响较小。例如,各种碳素钢、低合金钢的弹性模量 $E=210000\text{MPa}$ , $G=80000\text{MPa}$ 左右。所以,优选合金成分和改善热处理技术是提高弹性的主要方向。另一方面,许多重要弹簧是在交变载荷条件下长期工作,则要求弹簧有很高的疲劳强度,同时要求有良好的抗应力松弛性能,减少永久变形,以便保证机电产品效率的正常发挥和仪表的工作灵敏性及可靠性。因为应力松弛过程就是弹簧长期在室温或较高温度下工作、材料内部的微塑性变形逐渐转变为永久变形的必然结果。为了提高弹簧的使用寿命,对材料的冶金质量有很高要求。例如:要求弹簧材料表面不应有裂纹或类裂纹、凹坑、刻痕等弊病,在弹簧加工过程中更不应产生上述缺陷,要求钢质纯净(各种夹杂物含量要少、其形状和大小应在1级以内),第二相质点匀、细、圆、显微组织均匀,不含脆性马氏体等,尽可能减少表面脱碳。同时,要求材料尺寸公差应按合同或有关标准进行验收。各项指标合格后才能投产使用。

2. 理化性能方面 弹簧的工况很复杂,有些弹簧是在较高或高温下长期工作的,因此要求弹簧材料有良好的耐热性,即有高的蠕变极限、蠕变速率较小和较低的应力松弛率。相反,有些弹簧是在严寒地带工作,则要求材料有较高的低温冲击韧度、较低的脆性转化温度( $\theta$ 或 $\Delta T_{1/2}$ 低),以免发生冷脆。这方面的性能与弹簧材料的化学成分和组织状态有密切关系。

在腐蚀介质中工作的弹簧,其表层金属与腐蚀介质发生化学或电化学反应,弹簧表层逐渐被腐蚀,易造成腐蚀脆性断裂。特别是在交变应力作用下,材料的疲劳极限将显著降低,弹簧更易发生腐蚀疲劳断裂失效。所以,在这种情况下使用的弹簧必须具有良好的耐蚀性能。

对于精密仪器和电器仪表中使用的弹性元件,则要求有高导电、无磁性、不产生火花或恒弹性等。例如,铜合金弹性材料能满足高导电性能要

求,钛合金、铜合金及奥氏体不锈钢弹性材料能满足无磁的要求,恒弹性合金的热胀系数很小,弹性模量在 $-50\sim-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间基本上无变化,这是精密测量仪表及电子仪器中比较理想的弹性材料。

3. 工艺性能方面 对于要求淬火而其截面尺寸较大的弹簧,其钢材应有相应的淬透性、较小的过热敏感性和表面脱碳倾向小,才能保证弹簧表里组织和性能的均匀性。在冷、热成形时要求材料有足够的塑性和良好的弯曲、扭转及缠绕性能,以便保证或提高弹簧的制造质量。尺寸较小的弹簧热处理时变形大、难以校正和保证弹簧产品质量,宜选用已强化的弹簧材料。冷成形后不经淬火、回火,只须进行低温退火。这样更能保证大批量小弹簧的产品质量和成本低廉。

## 5.2 弹簧材料及其热处理

弹簧材料的种类繁多,生产上用量最多的是弹簧钢材。如碳素弹簧钢、低合金弹簧钢及高强度弹簧钢等,其次是具有特殊性能的弹簧材料,如不锈钢耐酸弹簧钢、耐热弹簧钢及合金(镍基、钛基及钴基合金、高弹性高导电的铜基合金)。非金属弹性材料有橡胶、塑料、陶瓷及流体等。本章只介绍金属类弹簧材料。其中又以通用弹簧钢材为重点。

### 5.2.1 通用弹簧钢材及其热处理

#### 5.2.1.1 热成形弹簧钢材(热轧弹簧钢)

热轧弹簧钢大部分是圆钢(GB1222)、盘条和扁钢(YB847),用以制造各种尺寸较大的热成形螺旋弹簧和板簧。热轧弹簧钢的生产都是按国家或部颁标准进行。各种热轧弹簧钢的化学成分如表5-5所示。

弹簧钢的 $w(\text{C})$ 是 $0.3\%\sim 1.2\%$ ,其中,碳素弹簧钢 $w(\text{C})$ 一般为 $0.6\%\sim 0.9\%$ ,合金弹簧钢的 $w(\text{C})$ 一般为 $0.45\%\sim 0.70\%$ 。钢中含碳量增加能有效地提高冷变形强化或马氏体相变强化效果,获得较高的强度和弹性极限,这是碳素弹簧钢的主要优点。但是,碳素弹簧钢的淬透性小,抗应力松弛性能不够好、耐蚀性差和弹性模量温度系数较大,只能用于制造截面较小、工作温度不高的弹簧。为了改善上述性能,在钢中加入Si、Mn、Cr、Ni、V、W、Nb及B等合金元素制成合金弹簧钢。大体上可分为:①锰弹簧钢和硅锰弹簧钢;②硅

铬、硅铬钒和硅锰钨弹簧钢。③铬钒和铬锰钒弹簧钢。④硼弹簧钢及稀土弹簧钢。⑤其他多元量少的

低合金弹簧钢。各种热轧弹簧钢的热处理工艺参数、处理后的力学性能和主要用途如表 5-6 所示。

表 5-5 热轧弹簧钢 (GB1222) 的化学成分 (质量分数) (%)

钢 号	C	Si	Mn	Cr	V	其他合金元素	Ni ≤	P ≤	S ≤
65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25			0.25	0.040	0.040
70	0.67~0.75	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25			0.25	0.040	0.040
75	0.72~0.80	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25			0.25	0.040	0.040
85	0.82~0.90	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25			0.25	0.040	0.040
65Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.25			0.25	0.040	0.040
55Si2Mn	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35			0.35	0.040	0.040
55Si2MnB	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35		B0.0005~0.004	0.35	0.040	0.040
60Si2Mn	0.56~0.64	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35			0.35	0.040	0.040
60Si2MnA	0.56~0.64	1.60~2.00	0.60~0.90	≤0.35			0.35	0.035	0.030
70Si3MnA	0.66~0.74	2.40~2.80	0.60~0.90	≤0.35			0.35	0.035	0.030
60Si2CrA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.70~1.00			0.35	0.035	0.030
65Si2MnWA	0.61~0.69	1.50~2.00	0.70~1.00	≤0.35		W0.80~1.20	0.35	0.035	0.030
60Si2CrVA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.90~1.20	0.10~0.20		0.35	0.035	0.030
50CrMn	0.46~0.54	0.17~0.37	0.70~1.00	0.90~1.20			0.35	0.040	0.040
55SiMnVB	0.52~0.60	0.70~1.00	1.00~1.30	≤0.35	0.08~0.16	B0.001~0.0035	0.35	0.040	0.040
50CrVA	0.44~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	0.10~0.20		0.35	0.035	0.030
30W4Cr2VA	0.26~0.34	0.17~0.37	≤0.40	2.00~2.50	0.50~0.80	W4.00~4.50	0.35	0.035	0.030
55SiMnMoV	0.52~0.60	0.90~1.20	1.00~1.30	≤0.35	0.08~0.15	Mo0.20~0.30	0.35	0.040	0.040
55SiMnMoVNb	0.52~0.60	0.40~0.70	1.00~1.30	≤0.35	0.08~0.15	Mo0.30~0.40	0.35	0.040	0.040
						Nb0.01~0.03			

表 5-6 热轧弹簧钢热处理后的力学性能 (GB1222) 及应用举例

钢 号	热处理			力学性能 (不小于)					交货状态	HBS (不大于)	主 要 用 途
	淬火温度 /°C	淬火介质	回火温度 /°C	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	伸长率 (%)		断面收缩率 $\psi$ (%)			
65	840	油	500	800	1000	—	9	35	热轧	285	用作一般机器上的圆、方螺旋弹簧或冷拔钢丝作小型机械的弹簧
70	830	油	480	850	1050		8	30	热轧	285	
75	820	油	480	900	1100	—	7	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机上承受振动的圆螺旋弹簧
85	820	油	480	1000	1150	—	6	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机及一般机器上的扁形弹簧、圆形螺旋弹簧, 以及其他用途的钢丝等

(续)

钢 号	热 处 理			力学性能 (不小寸)					交货状态	HBS (不大于)	主 要 用 途
	淬火 温度 /°C	淬火 介质	回火 温度 /°C	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	伸长率 (%)		断面收缩率 $\psi$ (%)			
65Mn	830	油	540	800	1000		8	30	热轧	302	用作截面直径小于 15mm 的中小型、低应力弹簧,如座垫板簧,弹簧发条等。冷拔钢丝的冷卷成形弹簧
55Si2Mn	870	油	480	1200	1300	—	6	30	热轧	302	用作汽车、拖拉机、铁道车辆上的板簧、螺旋弹簧等,以及温度在 250°C 以下的中等应力弹簧
60Si2Mn	870	油	480	1200	1300		5	25	热轧	321	用作汽车、拖拉机、铁道车辆上的板簧、螺旋弹簧,如安全阀及止回阀簧,也用于制造承受交变载荷及中等应力下工作的大型弹簧等
60Si2MnA	870	油	440	1400	1600		5	20	热轧	321	
70Si3MnA	860	油	430	1600	1800		5	20	热处理	302	用作承受重载荷的重要弹簧,如炮位输弹平衡机用弹簧等
60Si2CrA	870	油	420	1600	1800	6	—	20	热处理	302	用作承受重载荷和重要用途的大型螺旋弹簧和板簧
60SiMnWA	850	油	420	1700	1900	5	—	20	热处理	302	用作极重要的和重载下工作的螺旋弹簧与板簧
60Si2CrVA	850	油	410	1700	1900	6	—	20	热处理	302	
50CrMn	840	油	490	1100	1300		5	35	热轧	321	用作载荷较高、应力较大的板簧,也用作直径较大(50mm)的螺旋弹簧
50CrVA	850	油	500	1150	1300	10	—	40	热轧	321	用作特别重要的承受高应力的各种尺寸的螺旋弹簧,也可用作大截面的以及在 300°C 以下工作的重要弹簧,如各种阀门弹簧、喷油嘴弹簧
30W4Cr2VA	1050 ~ 1100	油	600	1350	1500	7	—	40	热处理	321	用作高温(500°C 以下)条件使用的弹簧,如 400t 锅炉蝶形阀弹簧等
55Si2MnB	870	油	480	1200	1300		6	30	热轧	321	用于汽车前后簧、副簧
55SiMnVB	860	油	460	1250	1400		5	30			用于汽车前后簧、副簧
55SiMnMoV	880	油	550	1300	1400		6	30	热轧	321	用于重型汽车板簧,越野汽车板簧
55SiMnMoVNB	880	油	530	1300	1400		8	35	热轧	321	用于重型汽车板簧,越野汽车板簧



## 5.2.1.2 冷成形用弹簧钢丝及其热处理

1. 弹簧钢丝分类及其热处理工艺原理 弹簧钢丝是制造各种螺旋弹簧等用量较多的材料,品种繁多。按其化学成分的不同,可分为碳素弹簧钢丝、合金弹簧钢丝(如硅锰弹簧钢丝、铬钒弹簧钢丝、硅铬弹簧钢丝等)、不锈钢弹簧钢丝等。按供货状态不同,可分为硬态和软态两大类,前者有冷拔强化的弹簧钢丝、油淬火+回火弹簧钢丝、形变热处理弹簧钢丝等,用硬态材料冷成形弹簧不需进行淬火,只需进行去应力退火(在弹簧行业中俗称低温回火);后者以退火状态供货,它包括碳素工具钢丝、低合金和高合金钢丝,用这类材料冷成形的弹簧必须进行淬火和回火,达到所要求的组织和力学性能才能使用。目前以冷拔碳素弹簧钢丝和各种油淬火+回火钢丝用量最大。

弹簧钢丝的强化原理有如下几个方面:合金化强化、冷形变强化、马氏体相变强化和沉淀强化(时效硬化)。其中,形变和相变强化占有重要地位。反映在弹簧钢丝生产过程就是拔丝和热处理两道工序。弹簧钢丝生产厂的两个支柱车间就是拔丝车间和热处理车间,而热处理又是其中的关键工序。

弹簧钢丝产品的热处理一般可分为中间热处理和最终热处理两类:前者有退火(等温退火、再结晶退火等)、正火及索氏体化处理。主要目的是软化,为冷拔工序准备良好的组织条件;后者有(铅浴淬火)、油淬火+回火、形变热处理及贝氏体

等温淬火等。只有冷拔弹簧钢丝是通过铅浴淬火后经过多次拉拔达到所需的力学性能外,其他硬态弹簧钢丝都是通过热处理达到所要求的力学性能。常用弹簧钢丝的冷拔和热处理过程、工艺原理、质量问题及组织性能特点见图5-2和表5-7。

生产弹簧钢丝的主要原料是热轧盘条(亦称线材),盘条质量的好坏直接影响弹簧钢丝的质量。为了减少金属的耗损(一般达5%),拔丝前容易清洗并提高钢丝性能的均匀性,目前多采用控制轧制技术或“散卷控制冷却”等来提高盘条质量。

拔丝车间用来生产弹簧钢丝的盘条质量应符合国家标准,即优质碳素钢(65、70、65Mn)和碳素工具钢(T7A、T8A、T9A、T10A)盘条符合GB4354—84,琴钢丝用钢为GB699—65中60~80、65Mn、70Mn和GB1298—77中的T8MnA、T9A等钢种,其盘条应符合GB4355—84质量要求,盘条的尺寸为4~16mm。制造异形钢丝时,宽边为5~15mm,盘条的圈径为500~1000mm。盘条往往存在着各种表面缺陷,如椭圆或其他异形、飞边、折叠、鳞皮、凹坑及刻痕,甚至有表面裂纹,表面脱碳更属常见的现象。线材内部缺陷则有缩孔、疏松、偏析、气孔及非金属夹杂物等。这些缺陷不仅影响拔丝的生产过程,而且直接影响弹簧钢丝的质量。为了进一步提高钢丝质量,可对盘条进行剥皮处理。

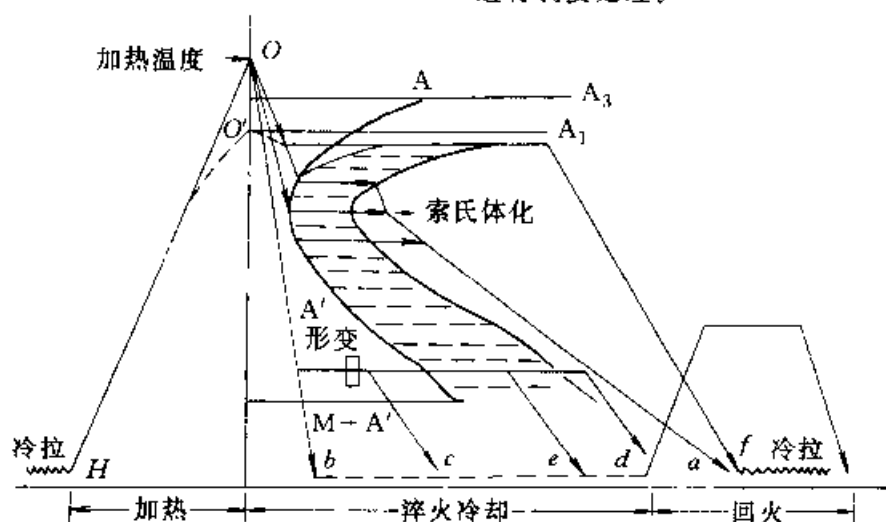


图 5-2 弹簧钢丝的热处理工艺原理示意图

HOa 铅浴淬火(索氏体化) HO b—油淬火 HO c 低温形变热处理

HO d—贝氏体等温淬火 HO e—复合组织(B<sub>F</sub>+M)处理

HO' f—等温退火(球化)工艺

表 5-7 常用弹簧钢丝的主要生产过程、热处理工艺原理、质量问题、组织性能特点

序号	钢丝名称	冷拔前热处理	冷拉	热处理工艺原理图	热处理质量问题	金相组织	冷拔簧性能	供应状态
1	冷拔弹簧钢丝			铅淬火(索氏体化)见图 5-2 中 $HOa$ 曲线	1. 表面脱碳 2. 先共析铁素体超标 3. 脆性马氏体	纤维状组织	好 但内应力大易变形	硬
2	油淬火-回火弹簧钢丝或带材	中间热处理(退火、或正火或焙烧处理)	多次冷拉到所需尺寸	油淬火(-铅浴回火)见图 5-2 中 $HOb$ 曲线	1. 表面脱碳 2. 组织粗大 3. 非马氏体过多 4. 回火不足	回火马氏体	好	硬
3	形变热处理弹簧钢丝			低温形变热处理工艺见图 5-2 中 $HOc$ 曲线	1. 形变量不足 2. 回火不足	回火马氏体	较好	硬
4	下贝氏体钢丝或钢带			等温淬火工艺见图 5-2 中 $HOd$ 曲线, $HOe$ 为复合组织处理工艺	1. 非 $B_F$ 量过多 2. 回火不足	$B_F$ 为主	好	硬
5	退火态弹簧钢丝			普通退火或等温退火(球化)工艺见图 5-2 中 $HO'f$ 曲线	球化级别不合格 表面脱碳	球状珠光体	好 但淬火时极易变形	软

2. 冷拔弹簧钢丝及其热处理 冷拔弹簧钢丝分为碳素弹簧钢丝(GB4357)、重要用途的 65Mn 弹簧钢丝(YB550)和琴钢丝(GB4358),都是用盘条拉拔而成。在拉拔前,盘条经过索氏体化处理,目的是提高其塑性,以利于冷拔。

(1) 钢丝的索氏体化(俗称铅淬火或焙烧处理)、钢丝铅淬火设备布置如图 5-3 所示。处理时将盘条 2(或钢丝)置于放线架 1 上,一般是十几根或几十根连续地通过加热炉 3,在炉中运行一定时间将钢丝加热  $900\sim 950^\circ\text{C}$  后,连续地浸入  $450\sim 600^\circ\text{C}$  的铅槽 4 中冷却,随后出炉空冷或淋水冷却,最后由收线架 5 收成捆。这种热处理使盘条(或钢丝)获得均匀片状珠光体(即索氏体),它

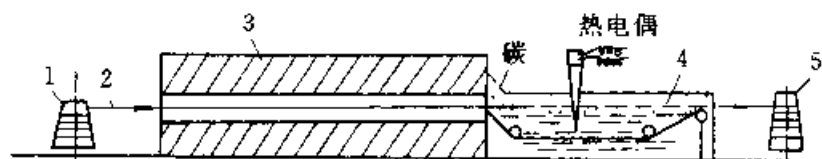


图 5-3 钢丝铅淬火设备布置简图

1—放线架 2—盘条或钢丝 3—加热炉 4—铅浴槽 5—收线架

具有优异的冷拔性能,断面收缩率可达  $80\%\sim 90\%$  以上。热处理后钢丝通过酸洗和沾白灰以备拉拔。经冷拔后的钢丝达到了所需要的力学性能。

盘条在炉中的淬火加热温度主要由钢中含碳量及线径大小而定,通常由下式确定

$$t_{\text{淬火}} = 900 - 50w(\text{C}) + 10d \quad (^\circ\text{C})$$

式中  $w(\text{C})$ ——钢中含碳量(%);

$d$ ——钢丝或盘条直径(mm)。

上述方程为直线关系,如图 5-4 所示。

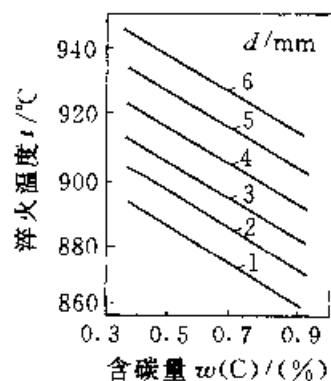


图 5-4 铅淬火时钢丝加热温度与其含碳量及丝径大小的关系

盘条在炉中加热的时间  $\tau_{\min}$  (s) 可用下式确定

$$\tau_{\min} = \frac{3600CYd}{4\alpha} \times \ln \frac{t_0 - t_a}{t_0 - t}$$

式中  $t_0$  —— 炉温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_a$  —— 室温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  —— 钢丝温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha$  —— 钢丝表面传热系数 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ );

$C$  —— 钢的比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ );

$\gamma$  —— 钢的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$d$  —— 钢丝直径 (mm)。

对于某种盘条,  $C$ 、 $\gamma$  及  $\alpha$  取平均值, 当  $\left(\frac{t_0 - t_a}{t_0 - t}\right)$  为定值时, 则  $\tau_{\min} = K_y d$ , 其中  $K = \frac{3600CY}{4\alpha} \ln \left(\frac{t_0 - t_a}{t_0 - t}\right)$ ;  $y$  为安全系数, 一般取  $y = 1.25$ 。

由上述可知, 钢丝在炉中的加热时间可近似地认为与钢丝直径成正比。

弹簧钢丝的热处理是连续性流水线作业, 通道式加热炉(燃料炉或电阻炉)长十几米甚至几十米, 由钢丝直径大小, 加热炉长度及铅浴槽长度可确定钢丝的运行速度, 用无级变速器来调整收线机的回转速度。

钢丝在炉中加热过程中必须完成奥氏体化过程, 实际上钢丝将发生如下几个转变: ①应变时效。②恢复、再结晶及珠光体球化。③奥氏体的形成。④奥氏体晶粒长大及成分均匀化等。由于炉内温度分布不均, 钢丝之间也有差异, 所以, 加热时钢丝内部奥氏体化过程也不完全一致。例如, 煤气加热炉长 15m, 分成预热, 加热及均热三段。钢丝在成形马弗砖孔中通过, 可同时并排处理 24~30 根钢丝, 加热温度为 900~920  $^{\circ}\text{C}$ , 在炉中加热时间为 6min; 则  $\phi 5.6\text{mm}$  钢丝加热转变的四个阶段占总加热时间的百分数分别为 13.3%、20%、20% 及 46.7%。实践表明, 奥氏体形成、长大和成分均匀化过程占 50% 以上是合适的。提高加热炉预热段温度, 将缩短前两个转变过程所需的时间、延长后两个转变过程的时间, 这有利于提高生产率。调整铅淬火前的组织状态或适当提高钢丝的加热温度都可改善索氏体处理后的组织均匀性, 改善冷拔性能并提高钢丝的综合力学性能。

铅淬火也可采用电接触加热法进行处理, 其

优点是加热速度快, 加热时间较短、热效率高, 所占生产面积较小, 比较容易采用保护气氛加热, 减少钢丝表面脱碳和金属耗损等。

钢丝加热到奥氏体状态是淬火的前提条件, 铅淬火时的冷却条件对冷拔弹簧钢丝的组织性能也有很大影响。由于冷却介质的不同, 索氏体处理便有不同的名称, 例如, 铅浴处理、盐浴处理、流态层处理及热水浴处理等, 甚至风冷处理, 正火也属于这个范围。

1) 铅浴处理, 目前, 国内外仍广泛采用铅浴作为铅浴处理的淬火介质。在生产中根据钢中含碳量及丝径大小确定铅浴温度。钢中含碳量越多, 铅浴温度应越高; 丝径越大, 铅浴温度应越低。通常用下式计算

$$t_{\text{铅浴}} = 400 + 60w(C) - 15d \quad (^{\circ}\text{C})$$

式中  $w(C)$  —— 钢中含碳量 (%);

$d$  —— 钢丝直径 (mm)。

上述关系亦可用图 5-5 表示。

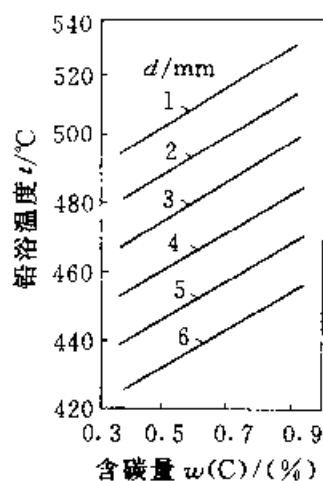


图 5-5 铅浴温度与钢中含碳量及钢丝直径大小的关系

实际生产时, 盘条通过铅浴的时间约为 60s。

铅浴的主要优点是有很好的导热能力, 钢丝可在较短时间内从奥氏体化温度冷却到接近铅浴的温度。如根据碳钢的冷却转变图来计算, 钢丝在 500  $^{\circ}\text{C}$  左右的铅浴中完成索氏体转变的时间只需 20s, 而实际生产中钢丝在铅浴中通过的时间约 1min。但是, 对于含锰量较高(如 65Mn、T8Mn 等)或钢中含有较多的 Si、Cr 等合金元素时, 将延长珠光体转变的孕育期, 要求获得全部匀细的索氏体, 就需延长在铅浴中的停留时间, 否则易出现脆性组织——马氏体。

铅淬火中另一个主要问题是当20~30根赤热钢丝同时进入铅浴中,大量的热传导给铅浴,它虽有良好的导热性,仍不能将这些热量散发出去,而恰在此处覆盖着相当厚的木炭,以防止钢丝表面氧化和脱碳,故在钢丝入铅浴处附近区域造成了非常严重的过热现象。这个过热区域较大,其温度可达700℃,与铅浴要求温度高300℃左右。很明显,钢丝从加热炉出来后,必然通过该过热区并先共析铁素体,形成的片层珠光体亦较粗,从而降低弹簧钢丝的力学性能。

影响铅温波动的因素很多,如铅液数量、铅液是否能循环流动、铅槽结构、钢丝加热温度的高低、钢丝尺寸大小和数量,以及运行速率等。实践证明:钢丝直径越大,其加热温度越高,则铅液的过热现象越严重。用液压泵循环冷却铅液可保证钢丝淬火冷却质量,但设备比较复杂和昂贵。如在过热区域安置冷却水套或水管,通过控制水的流量亦可有效比消除铅液的过热现象,安全、简易、可靠。

总之,铅淬火工艺中出现的质量问题有:钢丝表面脱碳、组织粗大、先共析铁素体量超标(标准规定应少于5%(体积分数))和出现脆性马氏体。其中前两项质量问题是钢丝加热过程中发生的,后两项是淬火冷却中产生的。这些问题严重影响钢丝热处理质量,即降低弹簧钢丝的疲劳寿命和应力松弛稳定性。

铅浴处理是获得高质量冷拔弹簧钢丝的重要首选工艺。但该工艺还存在一些严重缺点,就是铅蒸气和铅尘埃等污染环境、引起工作人员铅中毒,造成严重公害。所以,取代铅浴处理、采用无铅索氏体处理已成为拔丝行业中的重要技术课题。另外一种改善办法是采用SRQF(多种硅酸盐:K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MgO、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>等配制而成)新型覆盖材料取代木炭。优点是铅蒸气的逸出可达到国家排放标准( $\leq 0.03\text{mg}/\text{m}^3$ ,而用木炭覆盖时高达 $0.21\text{mg}/\text{m}^3$ ),经济效益好,节能,减轻工人劳动强度及隔热性能好等。

2) 非铅浴处理,由于铅蒸气和铅尘埃污染问题,曾试用80~100℃的肥皂水浴液作淬火介质代替铅浴,成本低,但较难控制,易出现马氏体组织,使高碳钢丝容易发生脆断。也有采用无毒、无臭、不燃和冷却能力可调的聚乙烯醇水溶液或4%~7%聚丙烯酸钠水溶液(质量分数)作淬火介质,取代铅浴进行索氏体处理(目前仍在试用和研

究)。国内外还试用流态化床作为盘条热处理时的加热和冷却介质。为获得匀细的索氏体,可采用加热段、冷却段和等温转变段三段处理。即盘条通过温度为850~1000℃的流态床加热段加热一定时间后,通过吹惰性气体获得温度为100℃的低温流态床,防止先共析铁素体析出,再在450~550℃的流态床中继续冷却,使过冷奥氏体等温转变为索氏体。这种处理过程只需2min即可完成。而设备的全长只有普通铅浴处理的1/4。

其他如盐浴的冷却能力和铅浴相近,但由于一些不易克服的缺点,如钢丝表面粘盐、不易清洗等,未能获得推广应用。

对于细规格弹簧钢丝的中间热处理,往往用正火代替铅淬火。鼓风冷却可进一步提高冷速,但其冷速不均匀,钢丝表面氧化严重。如先进行喷雾冷却,然后空冷则可避免上述缺点,又能提高处理钢丝的质量。

(2) 冷拔弹簧钢丝的力学性能,冷拔碳素弹簧钢丝按丝径不同共有46个规格,按用途和力学性能不同分为A、B、C三组(见图5-6),A组抗拉强度较低,用于制造一般弹簧;B组抗拉强度高于A组,但低于C组,用于制造低应力弹簧;C组的抗拉强度最高,用于制造高应力弹簧。此外,还有琴钢丝用于制造具有重要用途的不经淬火、只进行去应力退火的弹簧。它按用途不同亦可分为三组,即G1组(共15个规格)用于制造各种重要用途的弹簧;G2组(共有15个规格)用于各种高应力弹簧,F组(共9个规格)用于各种阀门弹簧。琴钢丝的强度(见图5-7)高于普通碳素弹簧钢丝,而且,其强度波动范围亦较小。例如,直径0.2~1.4mm钢丝,强度的上下限不得超过 $\pm 40\text{MPa}$ ,其他尺寸钢丝的抗拉强度不得超过规定上下限 $\pm 30\text{MPa}$ 。这类钢丝在化学成分、显微组织、表面质量、缠绕性能及疲劳寿命等都有更高的要求。

在弹簧设计中,材料的抗拉强度( $\sigma_b$ )是一个关键性数据。图5-6、5-7中由 $d$ 的大小可查出相应的 $\sigma_b$ ,但比较麻烦。为此,可采用回归方程通式: $\sigma_b = a - b \ln d$ 很方便地算出。对于图5-6中A、B、C三组相应为:

$$\text{A组方程: } \sigma_b = 1364 - 200 \ln d$$

$$\text{B组方程: } \sigma_b = 1662 - 241 \ln d$$

$$\text{C组方程: } \sigma_b = 1883 - 252 \ln d$$

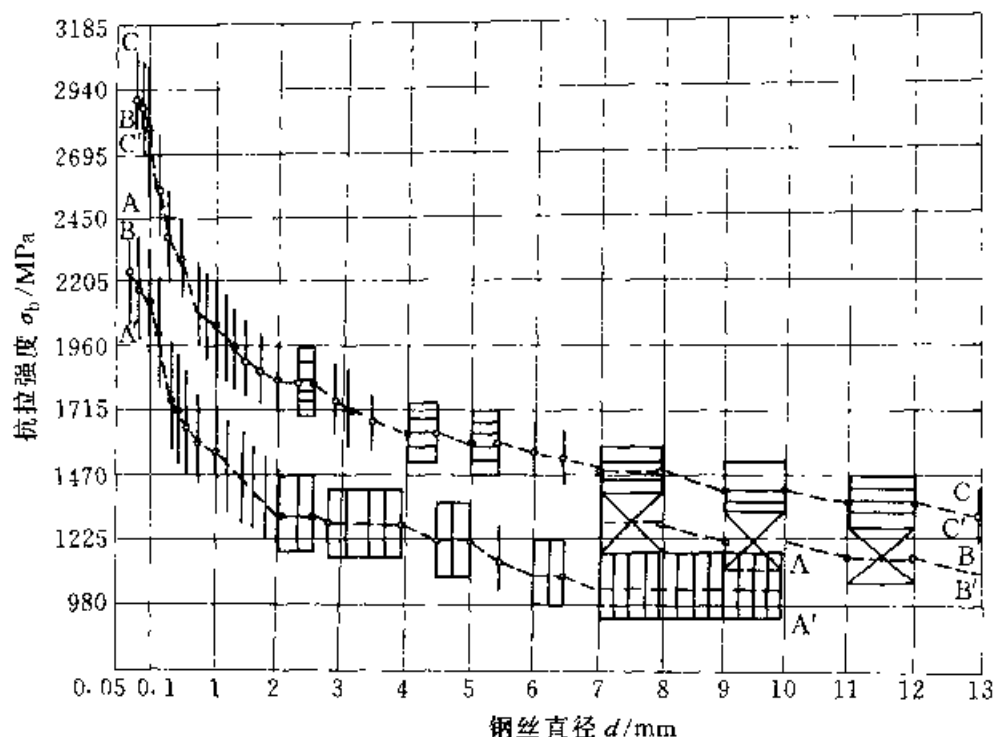


图 5-6 碳素弹簧钢丝 (GB4357) A、B、C 三组的抗拉强度与丝径的关系

A 组: AA (上限), A'A' (下限); B 组: BB (上限) B'B' (下限)  
C 组: CC (上限), C'C' (下限) 但  $\phi < 7\text{mm}$  者, 图中未标出

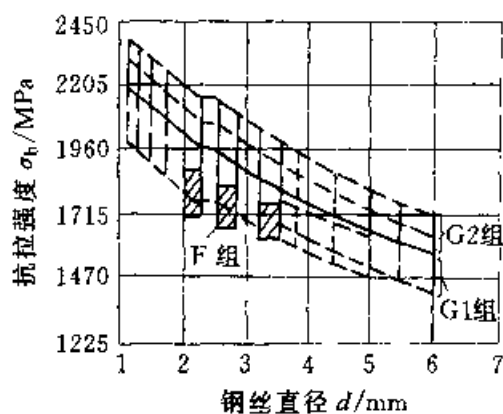


图 5-7 琴钢丝的抗拉强度与丝径的关系 (按 GB4358 绘制)

G1 组—[—] G2 组—[---] F 组— ( $2 < d < 5$ )  
对于琴钢丝 (图 5-7) G1、G2 及 F 三组钢丝相应为:

$$\text{G1 组方程: } \sigma_b = 2072 - 358 \ln d$$

$$\text{G2 组方程: } \sigma_b = 2293 - 403 \ln d$$

$$\text{F 组方程: } \sigma_b = 1926 - 226 \ln d$$

冷拔弹簧钢丝应具有良好的工艺性能 (见表 5-8), 其中, 琴钢丝 (特别是 F 组) 要求比碳素弹簧钢丝具有更好的扭转和缠绕性能, 以利于成形,

对钢丝的表面质量要求也更高, 以便保证其疲劳寿命。

3. 油淬火一回火钢丝 (国内简称油淬火钢丝, 国外简称油回火钢丝) 冷拔碳素弹簧钢丝 (特别是细规格) 可达到很高的综合力学性能。对于低合金钢丝能否通过索氏体化和冷拔达到上述优异性能呢? 这条道路至今未能实现。其原因是合金钢索氏体化时要求加热温度较高、保温时间较长, 才能获得比较均匀的奥氏体; 另一方面, 钢的淬透性较高, 在铅浴中冷却需更长的时间才能完成珠光体转变。上述原因其处理设备比碳素钢丝铅淬火者长得多, 否则易出现脆性相——马氏体; 第三, 合金钢丝的冷拔性能不良, 达到大的压缩率相当困难。所以, 在很长一段时期内低合金弹簧钢丝一般以退火状态供货。

油淬火一回火钢丝的出现比冷拔弹簧钢丝晚几十年, 它对弹簧行业的生产技术带来了一次飞跃。因为, 弹簧钢丝冷拔到所需规格后, 不是靠冷变形强化达到所要求的力学性能指标, 而是通过马氏体相变强化来实现。只要钢有足够的淬透性, 粗、细钢丝均能获得比较均匀的回火马氏体和良

好的综合力学性能。这类钢丝内部没有内应力,挺直性能优异,冷绕簧性能良好,而且质量均匀稳定,弹性极限较高,抗疲劳性能好,从而取代用退火料绕簧后再进行逐个淬火—回火的生产工艺,极大地提高了劳动生产率和产品质量。大直径的油淬火—回火钢丝、钢棒也容易制造(而冷拔大直径弹簧钢丝制造相当困难),所以,油淬火—回火弹簧钢丝是一种应用前景很广阔的材料。

油淬火—回火弹簧钢丝分两大类:一类是普通质量的油淬火—回火钢丝,用于制造重要用途的机械弹簧;另一类是专门用来制造阀门弹簧或其他要求高疲劳性能的阀门弹簧钢丝。主要不同

点是后者的冶金质量高,含有害杂质元素(S、P、O等)更少,非金属夹杂物数量少,表面质量更高,力学性能波动范围更严等。

我国自70年代开始研究和生产油淬火—回火钢丝,并列入国标。主要品种有:阀门用油淬火—回火铬钒合金弹簧钢丝(GB2211)、阀门用油淬火—回火碳素钢丝(GB4359)、油淬火回火碳素弹簧钢丝(GB4360)、油淬火回火硅锰合金弹簧钢丝(GB4361)及阀门用油淬火回火铬硅合金弹簧钢丝(GB4362)。这类弹簧钢丝已在汽车拖拉机等生产中得到广泛应用。

表 5-8 冷拔弹簧钢丝的工艺性能要求

弹簧钢丝种类	丝径 $d$ /mm	扭转次数, 不小于 (按 GB239 测定)	弯曲次数 (按 GB239)	缠绕试验 (按 GB2976)
碳素弹簧钢丝	$\leq 2.0$	20	—	在芯棒 $= 2d$ 上缠绕两圈以上, 表面不得产生裂纹或折断
	$> 2.0 \sim 3.5$	15		
	$> 3.5 \sim 6.0$	10		
	$> 6.0$	—	进行弯曲试验 $R = 10\text{mm}$ , 弯 $90^\circ$ 无裂纹	
琴钢丝	G1 及 G2 组	$\leq 2.6$	25	芯棒直径 $= d$ ( $d < 1\text{mm}$ ) $= 2d$ ( $d \geq 1\text{mm}$ ) 缠绕 5 圈不得破断
		$> 2.6 \sim 4$	20	
		$> 4 \sim 6$	15	
	F 组	$2 \sim 5$	25	

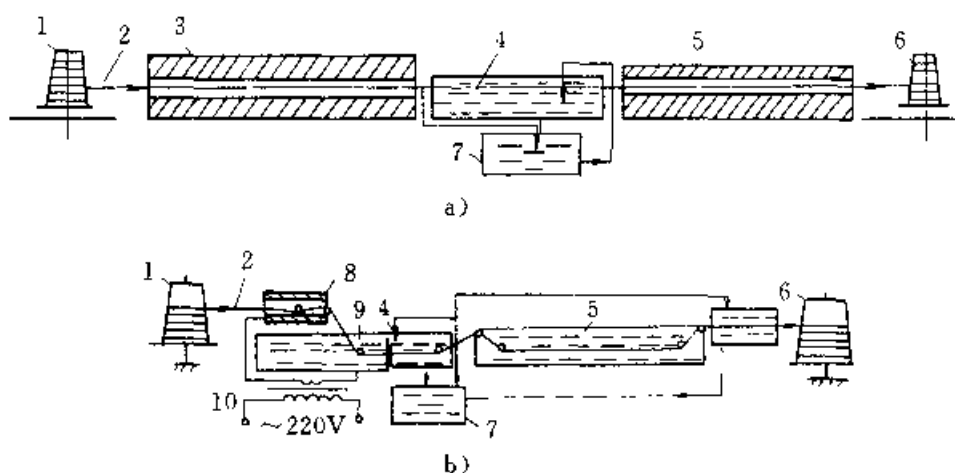


图 5-8 油淬火—回火弹簧钢丝热处理生产线布置简图

a) 马弗管间接(辐射)加热法 b) 电接触直接加热法

1—放线架 2—钢丝 3—加热炉 4—淬火油槽 5—铅浴回火槽

6—收线架 7—淬火油循环冷却装置 8—冷接点(铅浴)

9—热接点(铅浴) 10—稳压器及调压器



类只有 16 个规格 (由  $\phi 2 \sim \phi 12\text{mm}$ )。 $\sigma_b$  的上下波动范围为  $\pm 73.6\text{MPa}$ 。

阀门用油淬火一回火弹簧钢丝的抗拉强度和丝径的关系见图 5-10。由该图可见, 55CrSi 钢 (GB4362) 的强度最高, 它有 16 个规格 (丝径由  $\phi 1.6 \sim \phi 8\text{mm}$ ); 其次是 50CrVA 钢 (GB2271), 它有 21 个规格 (丝径由  $\phi 1.0 \sim \phi 10\text{mm}$ ); 碳素钢 (GB4359) 的强度最低, 它有 11 个规格 (丝径由  $\phi 2 \sim \phi 6\text{mm}$ )。上述三种阀门用油淬火一回火钢丝的强度中值在图中用圈点标出, 强度上下波动范围相同, 皆为  $\pm 73.6\text{MPa}$ , 但 50CrVA 的  $\phi 1.0 \sim \phi 1.8\text{mm}$  例外, 强度波动范围值达  $98.1\text{MPa}$ 。

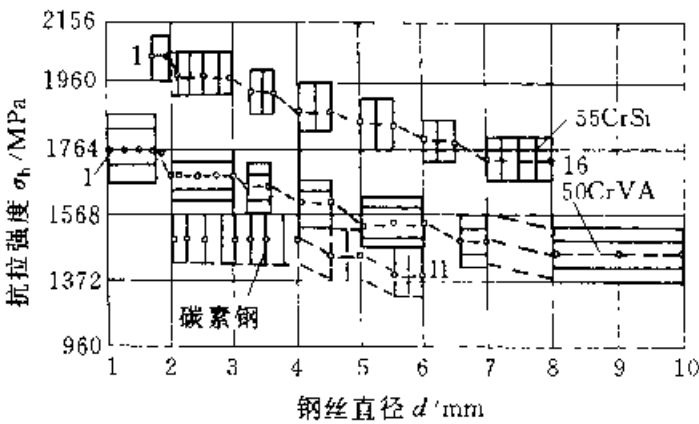


图 5-10 阀门用油淬火一回火弹簧钢丝的抗拉强度与丝径的关系

- 55CrSi 钢丝 (GB4362), 16 个规格
- 50CrVA 钢丝 (GB2271), 21 个规格
- 碳素钢丝 (GB4359), 11 个规格

阀门用油淬火一回火弹簧钢丝的塑性及工艺性能要求见表 5-9。

应指出, 机械弹簧用油淬火一回火钢丝对工艺性能要求和阀门用油基本相同。但对断面收缩率和扭转试验没有具体指标。国外航空用的油淬火一回火钢丝的抗拉强度上下波动  $\pm 49\text{MPa}$  甚至  $\pm 29.4\text{MPa}$ 。在规格品种方面, 国外大规格的油淬火一回火钢棒的直径达  $20 \sim 30\text{mm}$ , 小规格的丝径小于  $1.0\text{mm}$ 。

(3) 油淬火一回火弹簧钢丝的发展趋势

1) 最近, 日本开发的高强度油淬火一回火钢丝专门用来制造汽车阀门弹簧, 其化学成分 (质量分数):  $0.57\% \sim 0.62\% \text{C}$ ,  $1.40\% \sim 1.6\% \text{Si}$ ,  $0.50\% \sim 0.80\% \text{Mn}$ ,  $< 0.15\% \text{Cr}$ ,  $0.05 \sim 0.10\text{V}$ , 另加  $\text{Ni}$ 、 $\text{S}$  和  $\text{P}$  均  $\leq 0.020\%$  (可简称为  $60\text{Si2MnNiVA}$ )。它的抗拉强度 ( $\sigma_b$ ) 与丝径 ( $\phi 2 \sim \phi 6\text{mm}$ ) 的关系正好落在 55SiCr 钢丝的上方, 即比 55SiCr 钢的  $\sigma_b$  (见图 5-10) 高约  $150\text{MPa}$ 。这是由于该钢含有较多的碳、镍和钒的结果; 另一方面, 钢中有镍可提高淬透性和韧性, 是合金化强化为主的典型实例。从含  $\text{C}$ 、 $\text{Si}$ 、 $\text{Mn}$  三种元素含量看, 这种高强度钢是在  $60\text{Si2MnA}$  钢基础上开发出来的新型弹簧钢。添加  $\text{Ni}$  和  $\text{V}$ , 通过精炼技术尽可能减少  $\text{P}$ 、 $\text{S}$ 、 $\text{O}$  等有害元素的量, 不像  $60\text{Si2MnA}$  那样形成较多的硅酸盐夹杂物,  $\text{V}$  和  $\text{Ni}$  可细化晶粒和显微组织, 所以, 这种钢具有很高的强韧性, 与前苏联  $\text{ГОСТ60С2Н2А}$  较为接近。

表 5-9 阀门用油淬火一回火弹簧钢丝的塑性及工艺性能要求

油淬火一回火 钢丝名称	钢丝直径 $d/\text{mm}$	断面收 缩率 $\psi(\%)$	单向扭转试验 按 GB239 进行	弯折试验	缠绕试验 芯棒直径 = $d$ ( $d \leq 4.0\text{mm}$ ) 芯棒直径 = $2d$ ( $d > 4.0\text{mm}$ )
碳素钢丝 65Mn 钢丝	2.0~5.0 5.5~6.0	45 40	单向扭转 7 圈后向反向扭转 至断或进行单向扭转	—	
50CrVA 钢丝	2.0~3.5 4~10	45 40	$d \leq 6.0\text{mm}$ 应进行, 标距 $l = 100d$ , 同一方向扭转 3 圈后观察 试样表面有无局部扭转、再连续 扭转至断为止	$d > 6.0\text{mm}$ 应进行 弯折试验弯曲半径 = $d$ , 弯折 $90^\circ$ 不得有裂 纹或破断	$d \leq 6.0\text{mm}$ 应进 行缠绕试验, 密绕 2 圈以上, 表面不得产 生裂纹或破断
55CrSi 钢丝	2.0~3.5 4~8	45 40	断口平齐, 不得有裂纹及毛 刺		



2) 世界著名的油淬火—回火弹簧钢丝的生产厂家——瑞典 Garphyttann, 在 80 年代推出的专利产品 OTEVA-40, 其主要成分相当我国的 65Mn, 但钢中含 Mn 量较多, 而且加入微量元素 Ti 或 V, 从而获得 ASTM11 级以上的超细晶粒油淬火—回火弹簧钢丝, 其强度水平比油淬火—回火碳素弹簧钢丝的要高, 接近 50CrVA 油淬火

回火钢丝的水平。我国压缩机行业气阀弹簧攻关组采用电接触快速加热条件下(加热速度  $50^{\circ}\text{C}/\text{S}$  左右), 将钢丝加热到  $820\sim 850^{\circ}\text{C}$  后于油中淬火, 铅浴中回火, 一次处理(见图 5-2e 所示)就可获得 ASTM11~14 级超细晶粒的油淬火—回火 65Mn 钢丝和 ASTM11~12 级 50CrVA 油淬火( $1000^{\circ}\text{C}$ )回火弹簧钢丝。此外, 日本采用感应加热(循环 3~4 次加热法)可生产较粗规格的超细晶粒的高强度热处理弹性棒材。

超细晶粒油淬火—回火弹簧钢丝有优异的综合力学性能, 扭转和冷绕簧性能良好。众所周知, 晶粒越细小, 钢丝的韧性越好, 弹簧在断裂过程中需消耗较多的功; 另一方面, 根据 Hall-Pitch 方程, 65Mn 钢丝的屈服强度( $\sigma_s$ )与其晶粒度呈线性关系, 即晶粒越细小, 则弹簧钢丝的  $\sigma_s$  (或  $\sigma_{0.2}$ ) 或屈强比 ( $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ ) 越高。所以, 超细晶粒油淬火—回火 65Mn 弹簧钢丝比普通热处理者高, 和瑞典 OTEVA-40 的性能基本一致。扭转疲劳试验表明: 用超细晶粒油淬火—回火钢丝制成的弹簧比用普通热处理具有更高的疲劳寿命。由于这种钢丝的  $\sigma_{0.2}$  和屈强比均较高, 用它绕制的阀门弹簧也具有更好的抗应力松弛性能。

这一套处理技术, 专门用来处理压缩机广泛使用的细规格( $\phi 0.5\sim\phi 2.0\text{mm}$ )气阀弹簧钢丝, 其产品占领了国内市场。生产实践证明, 用这种超细晶粒油淬火—回火钢丝制成的气阀弹簧的使用寿命提高了几倍到几十倍, 获得了显著的技术经济效益。

3) 形变热处理技术在弹簧钢方面的应用最为广泛, 低温形变热处理(LTMT)弹簧钢丝的开发是具体实例之一。实际上它是一种超细晶粒、高强度的油淬火—回火弹簧钢丝。形变热处理生产线设备布置和图 5-8b 基本相似。不同点有二: 一是热接点(电极)铅浴槽中安置了一个拔丝模, 让过冷奥氏体状态下进行拉拔变形后立即油淬, 然后回火, 其工艺过程如图 5-2 中曲线 C 所示; 二是用拉丝机取代收线机。

70、75、80、65Mn、70Mn、80Mn、60Si2Mn、50CrVA 及 65Si2MnWA 等钢种均可试制和生产形变热处理弹簧钢丝。主要工艺参数: 奥氏体化温度为  $800\sim 950^{\circ}\text{C}$ ; 形变温度为  $400\sim 340^{\circ}\text{C}$  (铅浴); 拉拔时断面缩率约 25%; 油淬(油温  $\sim 70^{\circ}\text{C}$ 、循环冷却); 回火温度在  $350\sim 400^{\circ}\text{C}$  (铅浴炉或流动粒子炉)范围内选择。拉拔形变时润滑是一个关键技术问题。形变热处理弹簧钢丝和油淬钢丝力学性能的比较见表 5-10。

由表 5-10 中数据可知, 在相同的塑性条件下, 形变热处理弹簧钢丝的抗拉强度( $\sigma_b$ )比普通油淬钢丝高  $250\sim 300\text{MPa}$ 。有关形变热处理工艺参数的选择及其对组织与性能的影响请参阅有关技术资料<sup>[11~14]</sup>。

表 5-10 形变热处理弹簧钢丝与油淬钢丝力学性能比较

弹簧钢丝 种类及钢种		丝径 $d$ /mm	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa		断面收 缩率 $\psi$ (%)	扭转次数	缠绕性能
			形变热处 理钢丝	油淬火—回火钢丝 (GB4359)			
碳 素 钢 丝	70	2.0~2.5	1850~2000	1422~1569	$\geq 50$	$\geq 5$	芯轴直径= $d$ 合格
	80	$>2.5\sim 3.0$	1800~1950				
	65Mn	$>3.0\sim 3.5$	1750~1900	1422~1569	$\geq 45$	$\geq 4$	芯轴直径= $2d$ 合格
	80Mn	$>3.5\sim 4.0$	1700~1850			$\geq 3$	
		$>4.0\sim 4.5$	1650~1800	1373~1520		$\geq 3$	
		$>4.5\sim 5.0$	1600~1750			$\geq 3$	
50CrVA 钢丝		3.0	1850~2000	1650	45	—	合格 (自绕)

1. 退火(或冷拉)状态供应的低合金弹簧钢丝 这类弹簧材料包括硅锰弹簧钢丝(如60Si2MnA)(GB5218)、铬硅弹簧钢丝(GB5221)、铬钒弹簧钢丝(GB5219)及阀门用铬钒弹簧钢丝(GB5220)。此外,还有65Si2MnWA及70Si3MnA等。硅锰弹簧钢丝交货状态有冷拉(L)、退火(T)、正火(Zh)、高温回火(Gh)和银亮(Zy)等五种,丝径从1.0~12.0mm。铬钒或铬硅弹簧钢丝只有冷拉(L)和退火(T)两种,丝径从0.8~12.0mm。阀门用铬钒弹簧钢丝有冷拉(L)、退火(T)、冷拔+银亮(L+Zy)、退火+银亮(T+Zy)等四种,丝径从0.5mm到12.0mm。

这类钢丝是软态或半硬态,冷绕成弹簧后必须进行热处理(淬火和回火)达到所要求的力学性能后方能使用。弹簧质量的高低不仅与钢丝原材料的好坏有密切关系,在很大程度上取决于热处理的工艺水平。特别是那些细规格(丝径小于1.0mm)的钢丝绕制成的压缩机阀门弹簧,数量大而尺寸很小,热处理生产时很难保证质量(例如,极易变形、淬火质量达不到要求、表面氧化、锈蚀严重等),故一般选用油淬火+回火钢丝来制造。

用退火态或油淬火+回火钢丝(规格较粗者)进行磨光或抛光,使其表面质量提高,减少了表面缺陷,从而提高弹簧的疲劳寿命。如成盘供货或以一定长度(2m)的直条钢棒供货,常用来制造非常重要的弹簧。如轿车的汽门弹簧、喷油嘴调压弹簧及石油工业中的钻头卡簧等,这类弹簧都必须进行淬火+回火后才能使用。热处理时应保护其表面质量(不能碰撞等造成刻痕或氧化脱碳等),如采用磨光或抛光油淬火钢丝制造上述重要弹

簧,则其热处理比较简单,又能保证弹簧的内在质量。

### 5.2.1.3 弹簧用钢板及薄钢带

弹簧薄钢板和钢带用来制造碟簧、波形弹簧和蜗卷螺旋弹簧等。钢种有碳素钢、低合金钢及高合金钢三类。由于状态不同,弹簧钢带(板)可分为两类:即退火钢带( $<200\text{HV}$ )、冷轧钢带,其中一种是半硬态( $230\sim270\text{HV}$ );另一种是全硬态( $\leq 33\text{HRC}$ )。热处理钢带有调质(淬火、回火态)和贝氏体钢带。常用弹簧薄钢板和钢带的种类及技术标准见表5-11。

1. 弹簧薄钢板(YB543) 弹簧薄钢板选用的钢号及其化学成分应符合YB—59的规定。供货状态下的力学性能见表5-12。这类材料制成的弹簧都必须经过合适的热处理后才能获得所需的力学性能。

2. 热处理弹簧钢带 热处理弹簧钢带有两种:即通过淬火+回火处理的调质钢带和经过等温淬火的下贝氏体钢带。它们都是用连续作业炉生产。热处理时一般不测定钢带的加热温度,而是控制淬火加热炉钢带进出口处的炉温及回火浴炉的温度。例如,厚度约0.3mm的T10A钢带,运行速度为8m/min时,淬火加热炉(炉长4m)的入口温度为840℃,出口温度为930℃。钢带加热好后引入温度为320℃的铅锡合金浴炉中进行贝氏体等温淬火(或直接油淬),随后按所需强度级别、连续在380~580℃的浴炉中回火。按国标,热处理弹簧钢带的强度高低分为I、II、III级,其力学性能和相应的回火温度见表5-13。显然,用调质或下贝氏体钢带制成的弹簧均不需再淬火+回火处理,只进行去应力退火就可以了。

表 5-11 常用弹簧钢薄钢板和钢带的种类及技术标准

种类	技术标准	钢号	规格 厚度 $\delta/\text{mm}$	供货状态
弹簧薄钢板	YB543	自选(GB1222—84)	0.7~4	退火或高温回火
热处理钢带	GB1298	50A、65、75、85、95 或 T7A、T8A、T9A、T10A、T12A	0.08~1.5	冷轧后经热处理 强化
	GB1222 YB208	65Mn、60Si2MnA 70Si2CrA		
冷轧钢带	YB208	65Mn、T7~T13A、50CrVA、 60Si2MnWA、60Si2MnA、W18Cr4V	0.1~3.0	冷轧后经再结晶 退火

表 5-12 弹簧用薄钢板的钢号及其力学性能

钢 号	抗拉强度 $\sigma_b$		延伸率 $\delta$ (%) ( $L_0=11.3\sqrt{F_0}$ )
	MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	
85	(735)	(75)	(10)
60Mn	784	80	14
65Mn	833	85	12
55Si2Mn	(931)	(95)	(12)
60Si2Mn	931	95	12
60Si2MnA	931	95	12
60Si2CrA	(1029)	(105)	(12)
65Si2MnWA	(1029)	(105)	(6)

注：1. 不低于表中数据。

2. 表中括号中数据仅供参考。

3. 厚度小于 1mm 的钢板其伸长率指标仅供参考。

表 5-13 热处理弹簧钢带的力学性能及推荐的回火温度

钢号	强度级别	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa (kgf/mm <sup>2</sup> )	硬度 (HV)	推荐的回火温度 /°C
T7A、T8A、 T9A、T10A (GB1298)	I	1300~1600 (130~160)	375~485	490~570
65Mn、 60Si2MnA (GB1222)	II	1610~1900 (161~190)	486~600	430~500
70Si2CrA (YB208)	III	>1900 (>190)	>600	370~430

3. 冷轧钢带 (YB208) 弹簧钢及工具钢冷轧钢带按制造精密分类：普通精度钢带 (P)、宽度精度较高的钢带 (K)、厚度精度较高的钢带 (H)、宽度及厚度精度均较高的钢带 (KH) 等四种。按表面状态分类：光亮钢带 (G)、不光亮钢带 (BG) 两种；按边部状态分：切边钢带 (Q) 和不切边钢带 (BQ) 两种；按材料状态分类：冷轧硬钢带 (I) 和正火钢带 (T) 等。其力学性能见表 5-14。用退火态钢带制造的弹簧或弹性元件必须进行淬火一回火处理后才能达到所需的力学性能。

表 5-14 弹簧钢和工具钢冷轧钢带的力学性能 (YB208)

钢 号	冷轧硬钢带 (I)		再结晶退火钢带 (T)	
	抗拉强度 $\sigma_b$		抗拉强度 $\sigma_b$	
	MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	MPa	kgf/mm <sup>2</sup>
65Mn、T7、T7A、 T8、T8A	735~1176	75~120	637	65
T8Mn、T8MnA、 T9、T9A、T10、 T10A、T12、T12A、85	735~1176	75~120	735	75
T13、T13A	—	—	882	90
Cr06、8CrV	—	—	931	96
60Si2Mn、 60Si2MnA、 65Si2MnWA、 50CrVA	784~1176	80~120	882	90
70Si2CrA	784~1176	80~120	833	85

## 5.2.2 特殊用途的弹簧钢、合金钢的热处理

为了满足各种弹簧在不同工况条件下的性能要求，必须选用特殊性能的弹簧材料，如不锈钢耐蚀弹簧钢、高导电、无磁、耐热及恒弹性材料等。

### 5.2.2.1 不锈钢耐蚀弹簧钢及其热处理

在腐蚀性介质中或在较高温度下工作的弹簧和弹性元件，采用冷拔弹簧钢丝或油淬火一回火钢丝来制造已不能胜任时，就必须用不锈钢或耐热钢来制造。常用不锈钢耐蚀弹簧钢的品种主要有奥氏体类、马氏体类、过渡类（沉淀硬化型）等，其牌号及主要用途如表 5-15 所示。

1. 马氏体类不锈钢弹簧钢 马氏体相变强化的不锈钢弹簧钢有 2Cr13、3Cr13、4Cr13 及 1Cr17Ni2 等钢号。如用退火态材料制成的弹簧必须进行淬火和回火处理，达到所需的力学性能后才能使用。如采用油淬火一回火的 3Cr13 及 4Cr13 不锈钢丝来制造弹簧，则其生产工艺简单，可免去高温淬火时弹簧易变形、软硬不均等缺点。实践表明：采用电接触加热法处理上述不锈钢丝（即油淬火一回火）可获得良好效果。例如， $\phi 1.7\text{mm}$  4Cr13

表 5 15 常用不锈钢耐蚀弹簧钢的牌号及主要用途举例

钢 种	钢号(GB1220-84)	主 要 用 途 举 例
马氏体相变强化的不锈钢	3Cr13	在弱腐蚀介质(如空气、水蒸气、淡水、盐水、硝酸及某些浓度不高的有机酸等)温度不超过 30℃ 都有良好的耐蚀性
	4Cr13	
	1Cr17Ni2	有良好的耐酸性,能耐一定温度、浓度的硝酸及大多数有机酸和有机盐的水溶液
奥氏体形变强化的不锈钢	1Cr18Ni9	适用于腐蚀性强的介质,如硝酸及许多有机酸和无机酸的水溶液,含 Ti 的 18-8 型不锈钢在各种温度和浓度下均有较好的抗晶间腐蚀性能
	1Cr18Ni9Ti	
	0Cr18Ni12Mo2Ti 1Cr18Ni12Mo2Ti	适用于硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸介质中工作,有良好的抗晶间腐蚀能力
沉淀强化 A-M 不锈钢	0Cr17Ni7Al	耐蚀性能介于 Cr13 型和 18-8 型不锈钢之间
	0Cr17Ni7Mo2Ti	
	1Cr17Ni4Mo3N	
	0Cr12Ni4Mn5Mo3Al	
马氏体时效不锈钢	00Cr12Ni9Cu2TiNb 00Cr12Co12Ni4Mo4TiAl	耐蚀性能优于 Cr13 型不锈钢,在硝盐介质中有良好的耐蚀性

不锈钢弹簧钢丝的快速加热工艺:淬火温度 $(1070 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 、加热时间 9s; $(360 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 分级冷却 10s;在  $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$  油中冷却 9s;再在 $(460 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 铅浴中连续回火 32s,回火后应在油中冷却,防止回火脆性。处理后钢丝的力学性能如下: $\sigma_b \geq 1600\text{MPa}$   $\text{HRC} \geq 45$ 、弯、扭及缠绕性能良好。

1Cr17Ni2 钢属于马氏体-铁素体型不锈钢,它具有较高的耐蚀性和力学性能。但脆性倾向较大。其淬火温度为  $980 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ,回火温度为  $350 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

2. 奥氏体类耐蚀不锈钢弹簧钢 通用的 18-8 型镍铬奥氏体不锈钢比上述马氏体不锈钢具有更好的耐蚀性、良好的冷变形性能。在常温或低温下有很高的塑韧性。在室温下保持奥氏体组织、无磁,它属于形变强化的不锈钢弹簧钢。简单的 18-8 型奥氏体不锈钢的一个严重缺点是发生晶间腐蚀现象,因此,在钢中加入适量的钛或铌等元素,使其和碳结合,基体的含铬量不降低,在晶界附近不会形成贫铬区,从而防止晶间腐蚀现象的出现。在 18-8 型钢中加入 2%~4%Mo(质量分数),可提高它在硫酸和氯化物中的耐蚀性。为了获得纯奥氏体组织,相应增加钢中的含镍量,于是得到一些新的奥氏体不锈钢,如 0Cr18Ni9Ti 和 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni12Mo2Ti 及 1Cr18Ni12-

Mo2Ti 等。

YB(T)11 推荐的不锈钢弹簧钢号只有 1Cr18Ni9、0Cr19Ni10、0Cr17Ni2Mo2 及 0Cr17Ni8Al 等。按其抗拉强度( $\sigma_b$ )的不同分为 A(丝径 0.08~8.0mm,共 41 个规格)、B(丝径 0.08~10.0mm,共 44 个规格)C(丝径 0.1~6.0mm,共 36 个规格)三组,其力学性能见图 5-11。B 组的强度最高,A 组最低,C 组居中。三组的抗拉强度中值线在图 5-11 中分别用 BB'、AA'及 CC'连线表示。三组钢丝的强度波动皆为  $\pm 122.6\text{MPa}$ 。由此可知,YB(T)11 推荐的弹簧用不锈钢的强度波动范围比油淬火钢丝者要大。应当指出,对于 18-8 型奥氏体在深度冷拔时,形变将诱发马氏体相变;试验证明,面缩率越大,温度较低时,诱发马氏体的数量越多,钢丝强化效果越大。如冷拉不均匀,诱发马氏体量也不均匀,这是造成此类钢丝强度波动较大的原因,甚至发现一盘 50kg 重的  $\phi 2.5\text{mm}$  的 1Cr18Ni9 高强度不锈钢丝,头部的  $\sigma_b > 1850\text{MPa}$ ,而中尾部只有  $1530\text{MPa}$ ,强度差值达  $320\text{MPa}$ ,远远超过上述冶标的技术要求。

3. 沉淀硬化(PH 型)不锈钢弹簧钢及其热处理 用来制造弹簧或弹性元件的沉淀硬化型不锈钢有 GB1220 中的 0Cr17Ni7Al(简称 17-7PH)、0Cr15Ni7Mo2Al(简称 15-7MoPH)、

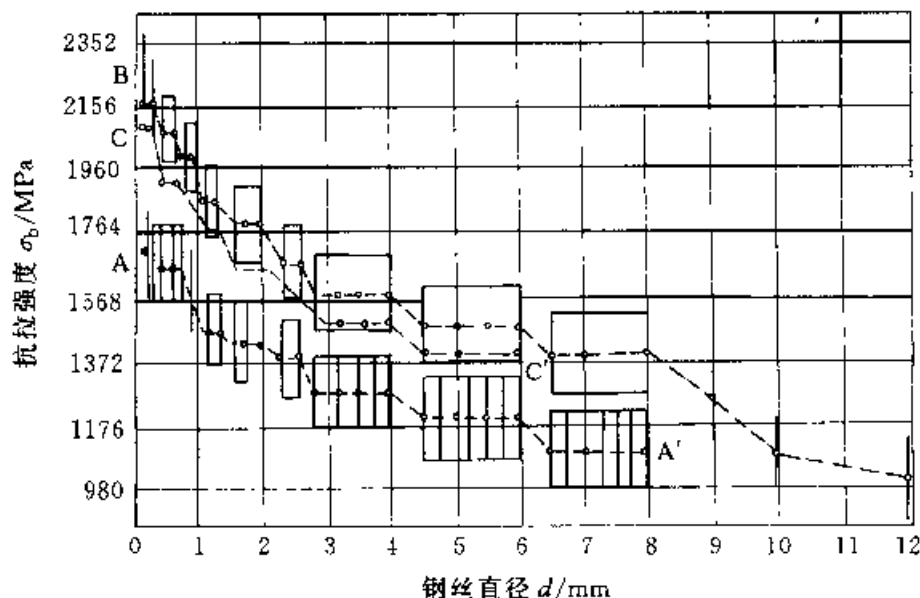


图 5-11 冷拔不锈钢弹簧钢丝的强度与丝径的关系(按 YB(T)11 绘出)

—A 组, 中值线为 AA', 适用 1Cr18Ni9, 0Cr19Ni10 及 0Cr17Ni12Mo2 三种钢

—B 组, 中值线为 BB', 适用于 1Cr18Ni9 及 0Cr19Ni10 两种钢

C 组未标出, 但标出其中值线为 CC', 适用于 0Cr17Ni8Al 钢

1Cr17Ni14Mo2N 及 0Cr12Ni14Mn5Mo3Al (YB/E7) 等钢号。这类钢中含铬镍量低于 18—8 型不锈钢, 奥氏体更不稳定, 易于转变为马氏体, 故称为奥氏体—马氏体过渡类不锈钢。它的耐蚀性比奥氏体不锈钢要低, 但优于马氏体不锈钢。钢中的铝、钼等合金元素在时效过程中起沉淀强化作用, 能进一步提高其强度和耐热性。

17—7PH 钢的冷加工和热处理过程比较复杂, 主要有下列几种情况: 固溶处理(A 处理)、调节处理(T 处理)、冷处理(R 处理)、冷变形(C 处理)及沉淀硬化处理(H 处理)。具体工艺流程见图 5-12。

4. 马氏体时效不锈钢 马氏体时效不锈钢主要有四个系列: Fe—Cr—Ni—Mo、Fe—Cr—Ni—Ti、Fe—Cr—Ni—Co—Mo 及 Fe—Cr—Co—Mn。由于这类钢的超低碳 ( $w(C) \leq 0.03\%$ ), 热处理后得到板条马氏体, 再经沉淀强化(时效), 既保留了马氏体时效钢的高强度、高弹性极限和优良的塑性、韧性、冷加工性优异等特点, 又具有不锈钢的耐蚀性。但价格昂贵。国产钢号有: 00Cr12Ni9Cu2TiNb、00Cr13Ni6MoNb 及 00Cr12Co12Ni4Mo4TiAl 等。

上述几类不锈钢耐蚀弹簧钢经不同热处理后的力学性能见表 5-16。

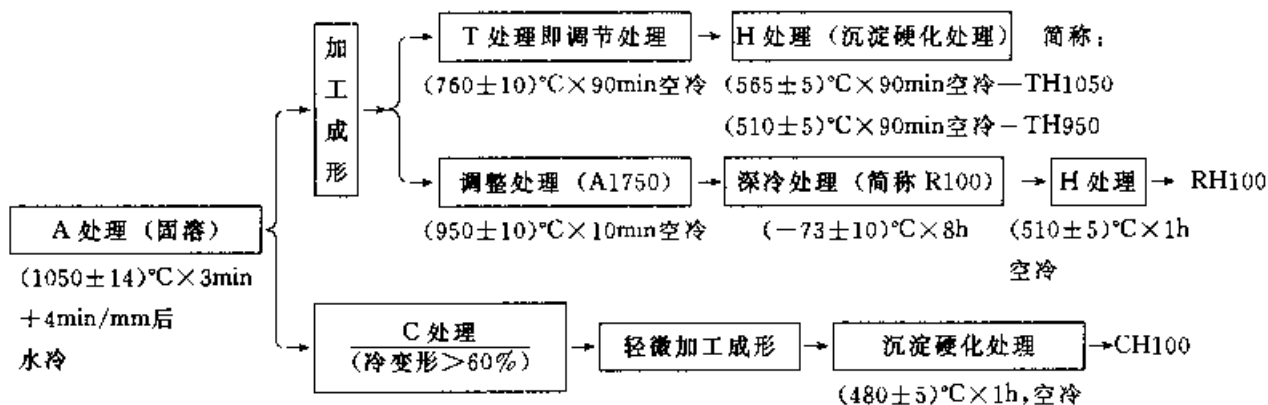


图 5-12 沉淀硬化不锈钢弹簧钢 (17—7PH) 的工序流程及工艺参数

表 5-16 不锈钢耐蚀弹簧钢经不同处理后的力学性能

钢种	钢 号	处 理 工 艺	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	硬 度	
马氏体 类不锈 钢	2Cr13	1000~1050℃ 油 (水)淬+500℃ 回火	1226	832	7~11	45		
	3Cr13	1050℃ 油 淬 — 450℃ 回火	1600	≥900	15	46	13~48HRC	
	4Cr13	1000~1100℃ 油 淬+150℃ 回火	1500~1700	≥900	10~15	42	HRC46~50	
	1Cr17Ni2	1000~1020℃ 油 淬—350℃ 回火	≥1275	≥832	≥10			
奥氏体 类不锈 钢	1Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti	1050℃ 固溶处理 +深度冷拉	1860	1730	—	12	420HV	
沉淀硬 化不锈 钢	0Cr17Ni7Al (17—7PH)	A 处理	892	274	35		80HBS	
		TH1050	1421	1340	9		43HRC	
		TH950	强硬性比		TH1050 处理高, 但韧性较低			47HRC
		RH950	1518	1441	6			
		CH900	1823	$E = 130\text{GN/mm}^2$ $G = 50\text{GN/mm}^2$		2	—	49HRC
	0Cr15Ni7Mo2Al (15—7MoPH)	A 处理	892	377	30		90HBS	
		TH1050	1819	1441	7	—	45HRC	
		RH950	1607	1490	6		49HRC	
		CH900	1823	1789	2		50HRC	
马氏体 时效不 锈钢	00Cr12Co12 Ni4Mo4TiAl	950~1100℃ 固溶 540~570℃ 时效 3h	1610 2160	1288 1860		50 20	420HV >47HRC	
	00Cr13Ni6MoNb Costom455 (美)	816℃, 1h 空冷 (500±20)℃ 空冷	1668~1875	1620~1746	10~18	40~60	49HRC	

### 5.2.2.2 耐热弹簧钢和合金

(续)

在室温~250℃范围内工作的弹簧, 一般选用冷拔碳素钢丝或油淬火钢丝。工作温度更高时, 可选用各种不锈弹簧钢、高合金工具钢或耐热弹性合金。各种弹簧钢、工具钢及耐热合金的允许工作温度见表 5-17。

表 5-17 各种弹簧钢、工具钢及耐热合金的容许工作温度

钢种	钢号或材料	容许工作 温度/℃
碳钢	碳素弹簧钢丝	120
	65Mn 弹簧钢丝	120
	油淬火 回火弹簧钢丝	190~300

钢种	钢号或材料	容许工作 温度/℃
低合 金钢	60Si2MnA	200~250
	50CrVA	250~300
	55CrSi、60CrSiA	250~300
	60Si2CrVA	350
	65Si2MnWA	350
不锈 钢	3Cr13 及 4Cr13	240~400
	1Cr18Ni9	300~400
	0Cr17Ni7Al (17—7PH)	350
	0Cr12Ni4Mn5Mo3Al	350
	0Cr14Co14Ni4Mo4TiAl	500

(续)

钢种	钢号或材料	容许工作温度/°C
高合金工具钢	30W4Cr2VA (DIN30WCrV179)	350~500
	3Cr2W8VA	350~550
	65Cr4W3Mo2VNb	350~550
	W18Cr4V	350~550
铁镍基高温合金	Ni36CrTiAl(3J1)	400
	Ni36CrTiAlMo5(3J2)	400
	Ni36CrTiAlMo8(3J3)	400
耐热合金	GH2132、A286(美) (0Cr15Ni26MoTi2AlB)	510~550
	GH4169、Inconel718(美)	600~650

耐高温高弹性合金主要用来制造自动仪器、仪表调压阀门弹簧,大型飞机发动机油门弹簧、差压膜片、膜盒和波纹管,微型继电器弹簧片,电视机显像管内支撑弹簧片及汽油转子发动机刮片弹簧等。下面介绍三类耐热弹簧材料。

1. 高合金工具钢 热作模具钢 3Cr2W8V 及 4Cr5MoSiV、高速钢 W18Cr4V 的耐热性能好,其热处理工艺比较成熟,也可用来制造耐热弹簧。钢丝热卷簧成形后,经淬火一回火后获得硬度<60HRC。但是,高合金工具钢的热处理工艺比较复杂,性脆,耐热性不够稳定,故应用较少。新型热作模具钢 30W4Cr2V (DIN30WCrV179)、65Cr4W8MoV (DIN65WMo348) 等,钢中含碳及钨量较低,不仅降低了成本,也改善了钢的塑性和

韧性,有利于缠簧并改善其热处理工艺性。

2. 奥氏体沉淀强化合金 这类材料属于 Fe-Ni 基耐热合金,主要有 Ni36CrTiAl (3J1)、Ni36CrTiAlMo5 (3J2) 及 Ni36CrTiAlMo8 (3J3) 等。在淬火状态(固溶处理)为奥氏体组织,有良好的塑性,易于成形加工,再通过时效处理、析出弥散分布的金属间化合物。这类合金的主要优点是在较高工作温度下仍保持高弹性,高的弹性稳定性,且无磁、耐蚀性能好。热处理后的力学性能见表 5-18。

铁基奥氏体沉淀硬化合金有 Cr14Ni25Mo 及 3Cr19Ni9WMoNbTi 等。合金中含有较多的铬和镍,故在室温下为奥氏体组织;又含有 Mo、W、Nb 及 Ti 等强碳化物形成元素,故固溶后沉淀强化显著,并形成稳定的第二相,阻止晶粒粗化,故有较高的热强性,在高温下有良好的抗氧化和耐蚀性。GH2132、A286 美 (0Cr15Ni26MoVTi2-AlB) 也属于这一类合金,其热处理工艺和处理后的力学性能见表 5-18。

3. 镍基及钴基耐热高弹性合金 它们是一些不含或少含铁的镍基合金(合金含量为质量分数),可分为两类: Ni-Cr (19%) 系列和 Ni-Cr (15%) -Co (29%) 系列,组织为 Ni-Cr 基奥氏体。钴基耐热合金中含有 (10%~20% Cr + Ni), 并有少量的 Mo、Ti、Nb、W、Al 等元素。它们属于高级弹性合金,具有高弹性、高疲劳极限、高的弹性稳定性、耐蚀、无磁等,用来制造在燃气中长期工作的弹性元件及钟表仪器中的精密弹簧。它们的热处理工艺及力学性能见表 5-18。

表 5-18 耐热弹簧钢及合金的热处理工艺和力学性能

种类	钢号或合金牌号	热处理工艺	力学性能			
			$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	HRC
			MPa		(%)	
高合金工具钢	3Cr2W8V	1050~1150°C 油淬, 600~650°C 回火	—	—	—	50~54
	4Cr5MoSiV	1020~1025°C 油淬, 540~650°C 回火	—	—	—	~54
	30W4Cr2V	1050~1100°C 油淬, 600~670°C 回火	1377~1667	—	—	—
	W18Cr4V, W9Cr4V2	1180~1220°C 油淬, 560°C 回火三次	—	—	—	58~60

(续)

种类	钢号或合金牌号	热处理工艺	力学性能			
			$\sigma_t$	$\sigma_{0.2}$	$\delta_5$ (%)	HRC
奥氏体沉淀硬化合金	Ni36CrTiAl(3J1)	冷拉棒材: 650~700℃ 时效 2~4h 冷拉丝材: 600~650℃ 时效 2~4h	$\geq 1373$	-	$\delta_5 \geq 5$	-
	Ni36CrTiAlMo5(3J2)	$\phi 0.3 \sim \phi > 2\text{mm}$ (700±10)℃ $\phi 2.0\text{mm}$ 时效 2~4h	$\geq 1172$	-	$\delta_{5-10} \geq 5$	-
	Ni36CrTiAlMo8(3J3)	980~1000℃ 油淬, 750℃ 时效 4h	$\geq 1172$	-	-	-
铁基	Cr14Ni25Mo	980~1000℃ 油淬 700~720℃ 时效 16h 30% 冷变形, 650~700℃ 时效 8~16h	932 1246~1354	618 1079~1187	$\delta_5 = 20$ $\delta_4 = 10 \sim 16$	-
	GH2132(A286 美)	980℃ 油淬 + 720℃ 时效 12~20h 空冷 冷拉 60% 650~700℃ 时效 8~16h	1030~1046 1122~1121	716~765 1310~1408	25~27 7~13	$\phi\% = 43 \sim 47.5$ $\phi\% = 18 \sim 27$
	Inconel 700	1175℃ 固溶 2h 空冷, 875℃ 时效	1177	716	25	-
镍基	Inconel 718(GH4169)	925℃ 固溶 1h 空冷, 720℃ 时效	1403	1167	26	-
	Inconel X 750	950℃ 固溶 1h, 730℃ 时效 8h + 620℃ 时效 8h	1275~1344	903~1040	21~26	-
钴基	Co40NiCrMo(3J21)	1150~1180℃ 水淬— 冷变形 $\begin{cases} 1 \text{ 级} \\ 2 \text{ 级} \end{cases}$	1177~1472 >1370~1864	— —	>3 —	—
	Co40NiCrMoW(3J22)	500~550℃ 时效 4h 后	2452~2649	1373~1570	3~5	600~700HV
	Co40TiAl(3J24)		2943~3139 1960~2100	1619~1668 >1177	4~6 4~6	>750HV 550~600HV

### 5.3 弹簧的最终热处理

由于弹簧选材、成形方法和要求性能的不同,其热处理主要有三种类型:

(1) 凡是用已经强化的丝材或带材冷成形的弹簧或弹性元件,不需高温淬火,只需进行去应力退火处理。

(2) 凡是热成形或用退火态材料绕制的弹簧都必须进行淬火一回火或进行等温淬火。

(3) 凡是经过固溶处理或冷拉(轧)的沉淀硬化型材料制成的弹簧必须进行时效强化处理。

表 5-19 列出了用弹簧材料成簧后的各种热处理方法。

表 5-19 中三种热处理方法以 1、2 项在弹簧生产上应用最广、第 3 种是特殊用途弹簧常用的热处理方法。此外,对于一些重要用途的弹簧或弹性元件,还应进行表面喷丸强化及预应力处理(例如强压、强拉、强扭及强弯处理等),这些内容将



在下节中讨论。本节将按弹簧的形状及结构特点分别介绍其热处理工艺。

表 5-19 弹簧材料种类及弹簧的热处理方法

类别	弹簧材料种类及其技术标准	热处理方法
1	碳素弹簧钢丝 (GB1357) A、B、C 二组 琴钢丝 (GB4358) G1、G2、F 二组 各种油淬火—回火弹簧钢丝 (GB2271、GB4359、GB4360、GB4361、GB4362) 形变热处理弹簧钢丝、超细晶粒油淬火—回火弹簧钢丝 冷轧硬棒材和带材 GB2059 2071、热处理弹簧钢带 冷拔强化不锈钢弹簧钢丝 (YB (T) 11—83 中 18-8 不锈钢丝和钢带) 形变硬化的铜合金弹簧材料	去应力退火 (有时称稳定化处理)
2	热轧弹簧钢棒和扁钢 (GB1222) 退火态供应的钢丝 (GB5220、GB5221 及 GB5218) 普通碳素钢热轧钢带 (GB3524)、冷轧钢带 (软态) (GB716) 优质碳素钢带 (退火态、GB3522) 弹簧钢、工具钢冷轧钢带 (GB3525) 镍基合金带 (GB2072) 马氏体不锈钢弹簧钢丝 (退火态) 和钢带 (软)	淬火和回火
3	沉淀硬化型不锈钢弹簧钢 (17-7PH)、高弹性合金、恒弹性合金 铍青铜和钛青铜 耐热合金 (Inconel718、X-750 等) GH2132 (A-286)、00Cr12Co12Ni4-Mo4TiAl	这类材料一般经固溶处理、冷镦成簧后必须进行沉淀强化 (时效处理)

### 5.3.1 已强化材料制成弹簧的去应力退火

#### 5.3.1.1 用冷拔碳素钢丝缠绕成簧的热处理工艺

由于冷拔强化的钢丝已具备了弹簧所需的力

学性能,用它绕制的各种螺旋弹簧 (如压簧、拉簧和扭簧等) 不需淬火、只进行去应力低温退火,工艺简便、成本低廉,在弹簧行业生产中应用极为广泛。例如纺织机械中的摇架加压弹簧 (一般用冷拔碳素弹簧钢丝 C 组制造), 液压元件中的调压弹簧 (由 T9A 钢丝制造) 及电冰箱压缩机的支承弹簧 (由 T8A~T10A 冷拔弹簧钢丝制造) 等是一些重要的实例。

这类弹簧去应力退火 (俗称低温回火) 的目的有三:

- (1) 消除冷拔钢丝和冷绕簧时产生的内应力。
- (2) 提高钢丝的抗拉强度、屈服极限和弹性极限。
- (3) 减少弹簧的变形并提高其抗应力松弛性能。

去应力退火工艺的选择与钢的化学成分、冷变形程度及丝径大小等因素有关。对于冷拔碳素钢丝绕制的弹簧来讲,比较合适的退火温度及保温时间见表 5-20。

表 5-20 冷拔强化碳素钢丝制弹簧的去应力退火工艺

丝径 $d/\text{mm}$	退火温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温时间 /min
$\leq 2.0$	240~280	10~20
$> 2 \sim 4$	260~300	20~30
$> 4 \sim 6$	280~320	25~35
$> 6 \sim 8$	300~340	30~40

注: 1. 只适用于硝盐炉加热,如在箱式电阻炉加热时,其保温时间应延长 10~20min。

2. 适当提高退火温度,可缩短加热保温时间。

冷拔碳素钢丝制成的弹簧经适当退火后将显著降低其内应力,如图 5-13 所示。加热温度不应超过其再结晶温度,否则,导致软化。去应力退火工艺虽然简单,但它对弹簧的力学性能、特别是对材料的微塑性变形抗力 ( $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$  及  $\sigma_e$ ) 的影响显著。例如:摇架加压前簧 (用直径 2.2~2.6mm 钢丝绕制的圆柱形压缩螺旋弹簧) 经不同退火工艺处理后,其力学性能的变化见图 5-14。如用琴钢丝制造时相应见图 5-15。图 5-16 为液压元件中的调压弹簧 [它选用 T9A 冷拔钢丝 (丝径为 2.6mm) 制造],经不同温度退火后的力学性能

变化。由图 5-14~图 5-16 可知,力学性能变化一致,强度指标 ( $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$  等) 与退火温度的关系曲线呈凸形,而塑性指标呈凹形。当退火温度小于 100℃ 时,其力学性能变化不大;当退火温度在 200℃ 左右时,强度达峰值,而塑性达低谷,这是应变时效的缘故。应变时效强化程度与钢种、冷变形程度等因素有关。当退火温度接近 400℃ 时,将引起强度、硬度急剧下降,而塑性显著上升,这种现象是由于恢复过程中亚结构的变化、特别是再结晶造成的。电镜分析表明, T9A 冷拔钢丝在 420℃ 可观察到再结晶现象。所以,冷拔碳素钢丝绕制的弹簧的去应力退火温度不应超过 400℃。

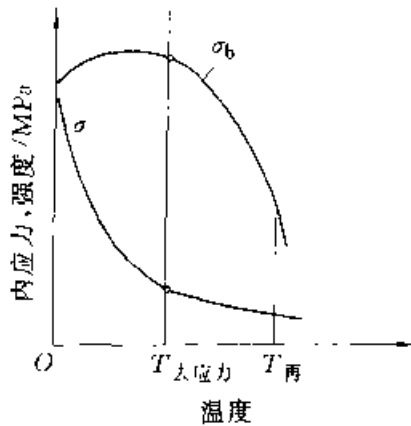


图 5-13 退火温度对冷拔弹簧钢丝内应力的影响  
 $\sigma_b$ —钢丝强度  $\sigma$ —绕簧时产生的内应力及冷拔时的内应力  $T_{再}$ —再结晶退火温度

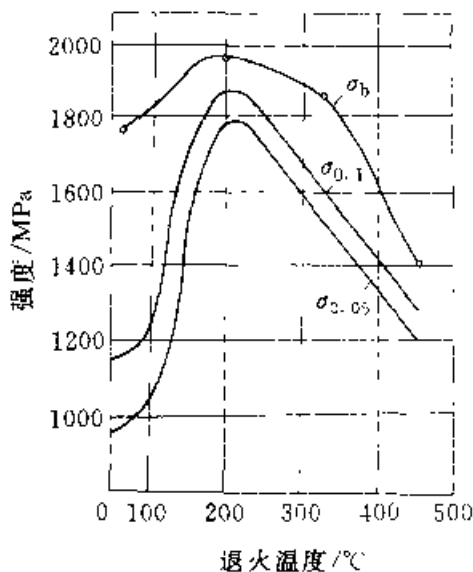


图 5-14 退火温度对冷拔碳素弹簧钢丝强度的影响  
(丝径 2.65mm)

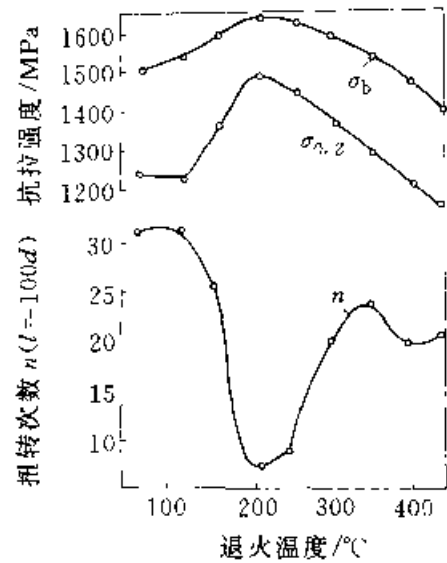


图 5-15 退火温度对琴钢丝力学性能的影响 (保温时间: 15min)

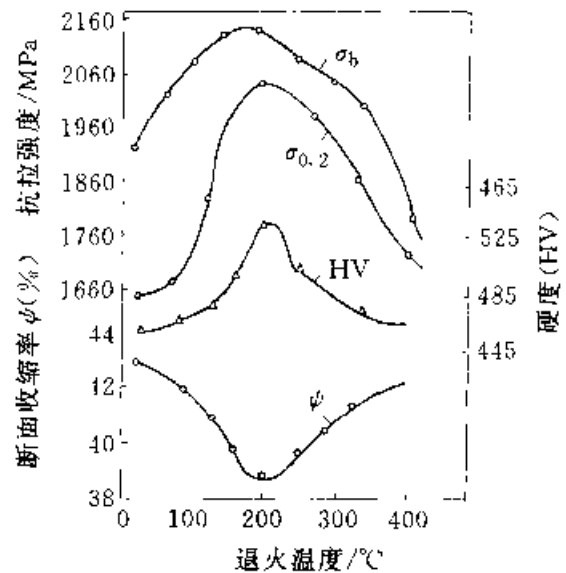


图 5-16 退火温度对冷拔 T9A 钢丝力学性能的影响 (保温时间: 30min) 调压弹簧  
参数: 丝径 2.8mm、 $H_c=31.5$ mm、 $D=11.5$ mm, 总圈数 10, 有效圈数 8

图 5-17 为退火温度 (保温 0.5h) 对 II<sub>a</sub> 弹簧 (用冷拔碳素钢丝 II<sub>a</sub> 组制造, 丝径为 2.5mm、 $H_c=36.8$ mm、内径 10.3mm、螺距 4.82mm) 负荷损失率 ( $\frac{\Delta P}{P}$ , %) 的影响。该图中还列出了英国 SRAMA<sup>[15]</sup> 的研究结果。由该图可知, II<sub>a</sub> 弹簧在 250~350℃ 退火 0.5h、在设定的松弛条件下可获得最小的负荷损失率。这种规律性变化和图 5-14 中曲线基本一致, 因在该温度范围内退火后, 弹簧

材料具有最佳的微塑性变形抗力( $\sigma_r$ 和 $\sigma_{s2}$ 等),故弹簧的松弛稳定性最好,和表5-20中所选工艺参数完全符合。

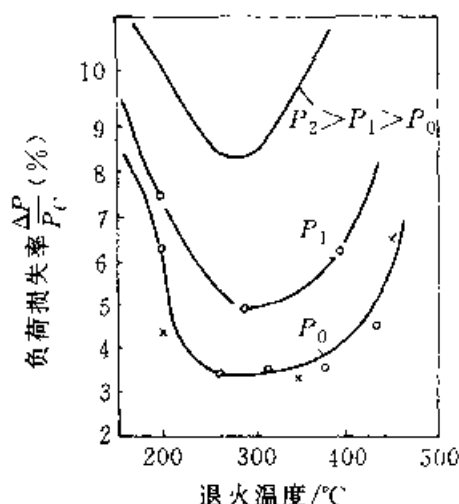


图 5-17 退火温度对弹簧负荷损失率的影响

0—0 Ⅰ。组弹簧(摇架  
弹簧)试验结果  
 弹簧用  $\phi 2.65\text{mm}$   
 冷拔钢丝制造  
 松弛负荷  $P_2 > P_1 > P_0$   
 松弛条件:  $\begin{cases} P_0 = 284\text{MPa} \\ T = 80^\circ\text{C} \\ t = 48\text{h} \end{cases}$

### 5.3.1.2 油淬火一回火钢丝制弹簧的去应力退火工艺

发达国家早已采用油淬火一回火碳素钢丝来制造汽门弹簧,优质油淬火一回火铬钒钢丝亦在飞机发动机中使用。目前设计高应力弹簧时,都要求选用油淬火一回火的高强度弹簧钢丝。过去,汽车及火车等发动机中的汽门弹簧热处理一直是个技术难题;现在,采用油淬火钢丝来制造就简便多了。

用各种油淬火钢丝绕制的弹簧需进行去应力退火。在冷卷簧时其材料内部留下了残留应力,低温退火可将这些内应力消除到一定程度。另外,在热处理过程中其钢丝内部组织及性能会发生相应变化(如图5-12相类似),有利于提高弹簧的尺寸稳定性、疲劳寿命和抗应力松弛性能。

图5-18~图5-21为退火温度对几种有代表性的油淬火钢丝力学性能的影响,图5-18为油淬火碳素钢丝和冷拔碳素弹簧钢丝在相同退火条件下力学性能的比较。它说明,在400°C退火时,油淬火钢丝仍有较高的微塑性变形抗力( $\sigma_r$ 、 $\sigma_s$ 等)

和塑性( $\delta$ 、 $\psi$ )。半铬钒钢油淬火一回火钢丝也存在类似规律,但在退火时没有出现像冷拔弹簧钢丝或琴钢丝那样的强烈的应变时效现象如图5-19所示;图5-20、图5-21分别为两种阀门用油淬火一回火高强度硅铬钢丝的力学性能与退火温度的关系,它们的应变时效和淬火时效现象比较明显。这表明,用此类油淬火钢丝制成的弹簧有更高的疲劳强度、疲劳寿命和抗应力松弛性能。

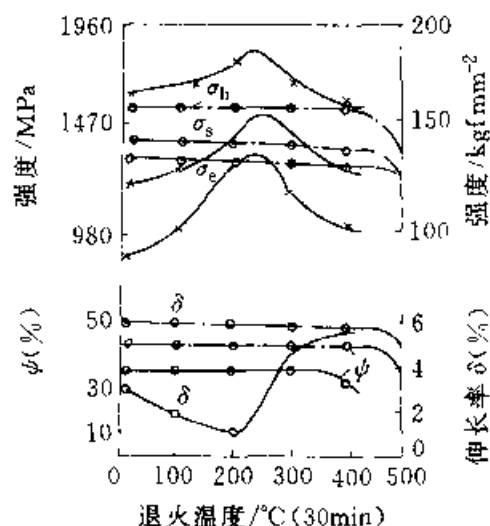


图 5-18 油淬火回火碳素钢丝(实线)和冷拔弹簧钢丝(点划线)经退火后力学性能的比较

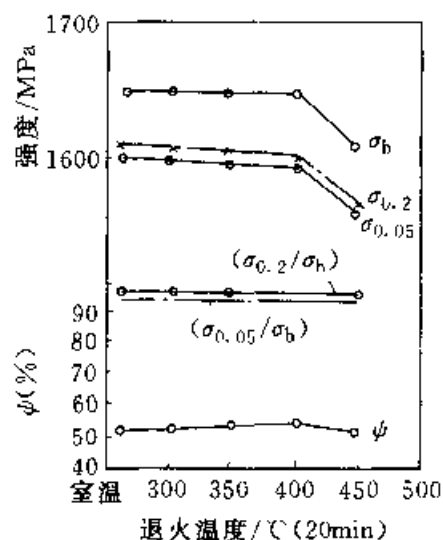


图 5-19 半铬钢油淬火回火钢丝的力学性能( $\phi 4.5\text{mm}$ )与退火温度的关系<sup>[10]</sup>

图5-22为几种油淬火一回火钢丝绕制的螺旋弹簧的负荷损失率与退火温度的关系曲线。其

中 (a) 为 Garphyttann 厂提出的 OTEVA 钢丝的实验数据, (b) 为国内对 50CrVA 钢丝制摇架弹簧的测试结果。对比图 5-22a、b 可知, 用不同种类的油淬火钢丝制造的弹簧的负荷损失率均在 400℃ 左右退火后出现最小值, 因此比较合适的去应力退火温度应在 350~420℃ 范围内选择。

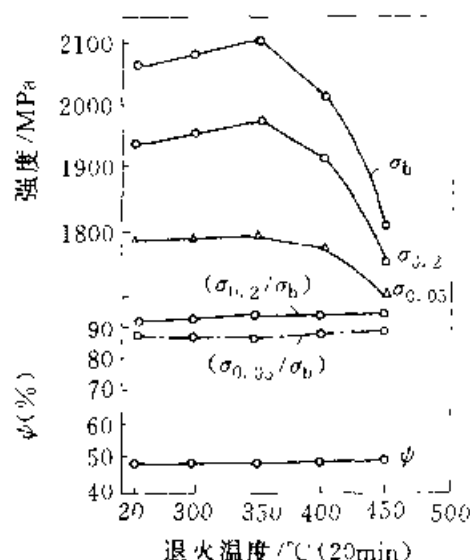


图 5-20 阀门弹簧用高强度油淬火回火钢丝的力学性能与退火温度的关系

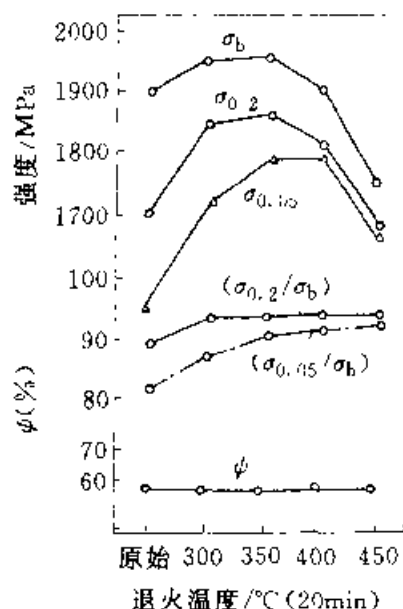


图 5-21 阀门弹簧用硅铬油淬火一回火钢丝的力学性能与退火温度的关系 (丝径 4.5mm)

生产上油淬火钢丝制弹簧的去应力退火工艺见表 5-21。

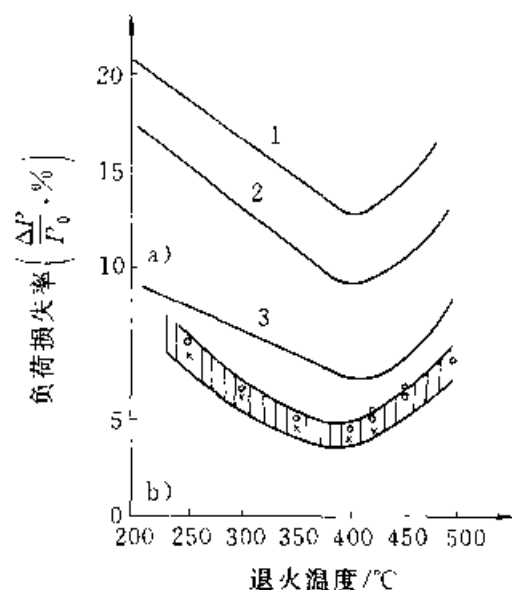


图 5-22 退火温度对油淬火钢丝制弹簧负荷损失率的影响

a) Garphyttann 厂的实验数据 1—OTEVA31 (与 GB4360 相当) 2—OTEVA60 (半铬钒钢) 3—OTEVA62 (与 GB2271 相当) (丝径、3.8mm, 缠绕比 6, 弹簧有效圈数 5.5)

b) 国内试验数据 (50CrVA 弹簧, 丝径 2.5mm, 松弛条件:  $P_0=284\text{N}$ ,  $T_R=80^\circ\text{C}$   $t_R=10\sim300\text{h}$ )

表 5-21 油淬火钢丝制弹簧的退火工艺

钢丝品种	丝径 $d/\text{mm}$	退火温度 $^\circ\text{C}$	保温时间 $\text{'min}$
碳素弹簧钢丝	—	320~400	20~30
50CrVA 钢丝	$\leq 3$	360~380	20
	$> 3$	380~400	30
60Si2MnA 钢丝	$\leq 3$	390~410	20
	$> 3$	410~430	30
55SiCr 钢丝	—	350~400	20~30
65Si2MnWA 钢丝	$\leq 3$	400~440	20
	$> 3$	420~460	30

注: 1. 丝径越细退火温度及时间选下限。

2. 第二次去应力退火时, 其温度应比第一次低。

3. 在连续生产线上退火时, 其工艺参数应由实验结果决定。

4. 此表中数据只适于硝酸盐浴中加热如用空气井式或箱式炉中加热, 保温时间应适当延长。

### 5.3.1.3 冷拔强化不锈钢丝制弹簧的去应力退火工艺

和冷拔碳素弹簧钢丝相类似,用冷拔强化的18-8型不锈钢丝绕制的弹簧必须进行去应力退火,因为退火能提高它的弹性极限和尺寸稳定性。图5-23为退火温度对冷拔1Cr18Ni9钢丝力学性能的影响。由该图可见,随退火温度的升高,抗拉强度( $\sigma_b$ )和硬度(HV)逐渐增大,而断面收缩率( $\psi$ )下降;当退火温度为400~430℃时, $\sigma_b$ 、HV达最大值,而 $\psi$ 值达低谷。图5-24为1Cr18Ni9钢丝制摇架弹簧负荷损失率与退火温度的关系。图中曲线1和2分别代表YB(T)11-83的B和A组的强度水平,由图可知,弹簧在400~460℃退火后可获得最低的负荷损失率。

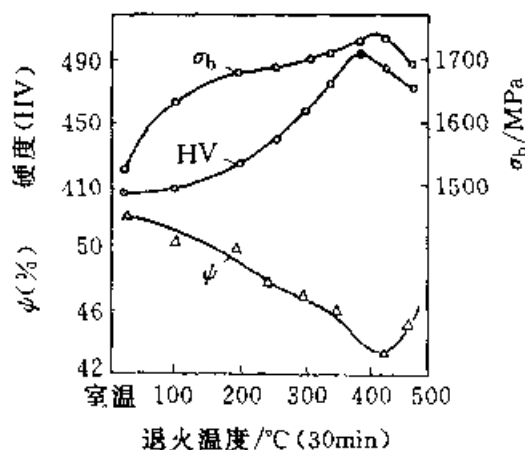


图 5-23 退火温度对 1Cr18Ni9 制摇架弹簧力学性能的影响

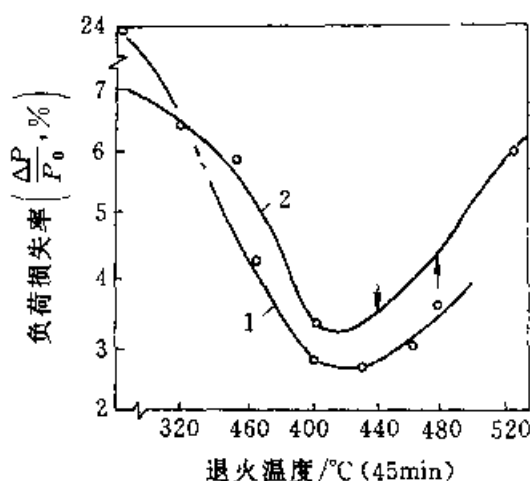


图 5-24 退火温度对 1Cr18Ni9 制摇架弹簧负荷损失率的影响

1- $\sigma_b=1864\text{MPa}$  松弛条件:  $P_0=284\text{N}$   
2- $\sigma_b=1531\text{MPa}$  松弛条件:  $P_0=255\text{N}$   
80℃×50h

由图5-23和图5-24中数据可优选出18-8型不锈钢弹簧合适的退火温度为400~460℃,生产上18-8型不锈钢弹簧的热处理工艺见表5-22。

表 5-22 18-8 型不锈钢弹簧的热处理工艺

丝径 $d/\text{mm}$	固溶处 理温度 /°C	保温时间 /min	去应力退 火温度 /°C	保温 时间 /min
$\leq 3.0$	1050~	5~15	400~460	30~35
$> 3.0 \sim 25$	1100℃	30~45	420~480	45~60
$> 25$	水冷	1~2min/mm	420~500	60~120

图5-25不仅绘出了18-8型不锈钢的力学性能与退火温度的关系曲线,也列出了弹簧在300℃、168h松弛条件下的松弛率与退火温度之间的变化曲线。平均应力分别为900MPa(曲线1)、600MPa(曲线2)及300MPa(曲线3)。由这组曲线可知,所加应力越高,弹簧松弛率也越大;从弹簧在300℃×168h松弛条件下,其松弛率较小的退火温度应选400~530℃;如从弹性极限和抗拉强度最大值考虑,为了获得最优的疲劳性能,该类弹簧的去应力退火温度应在400℃左右。

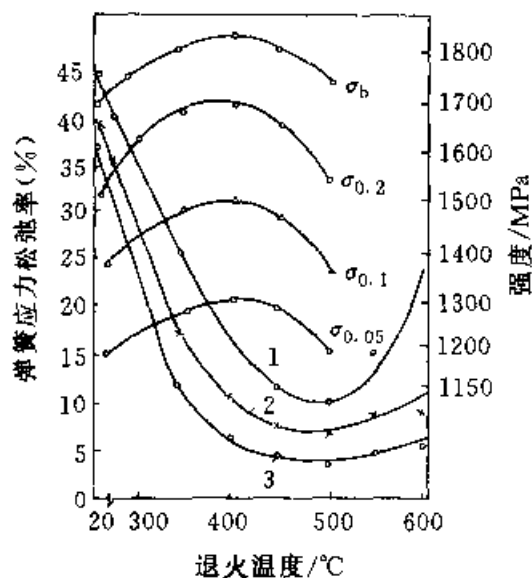


图 5-25 18-8 型 (EN58A) 不锈钢 (丝径 2.64mm) 的强度和弹簧的松弛率与退火温度的关系 (应力: 1-900MPa, 2-600MPa, 3-300MPa; 松弛条件: 300℃×168h)

### 5.3.2 螺旋弹簧的热处理 (淬火和回火)

圆截面材料直径大于 12mm、矩形截面材料边长大于 10mm、板厚大于 8mm 的螺旋弹簧一般采用热成形法制造。热成形的弹簧必须进行淬火和回火才能达到所需要的力学性能。

#### 5.3.2.1 热成形压缩螺旋弹簧的热处理工艺

1. 弹簧用钢及其淬透性 弹簧热处理时首先要根据钢的临界点正确选择其淬火加热温度,表 5-23 列出了各种弹簧钢的临界点及淬火回火温度。

表 5-24 中的热轧弹簧钢棒材均可制造各种压缩螺旋弹簧。棒料长度一般为 2~6m。碳素弹簧钢的淬透性很差,只适于制造尺寸较小的弹簧;

料径较大的螺旋弹簧一般选用低合金弹簧钢制造,因为它们的淬透性好,能保证整个截面淬透,回火后可获得均匀的回火马氏体(旧称回火托氏体或回火索氏体)。和未淬透者比较,它可获得更高的弹性极限、屈服强度与疲劳强度,其塑、韧性较高、冷脆性亦较好。

热轧弹簧钢的淬火临界直径见表 5-24。

选用和验收热轧弹簧钢材的尺寸要求应符合公差外,还应特别注意其表面是否有较严重的裂纹、划痕、刮伤、分层、斑疤、飞边或折叠、锈蚀麻坑及表面脱碳超标等。还应检查钢中的非金属夹杂物等级。所有上述各种缺陷在热处理过程中均不能消除,一般只会扩大其危害性,降低其力学性能和强度的使用寿命。

表 5-23 常用弹簧钢加热和冷却时的临界点和热加工温度的选择 (°C)

钢 种	钢 号	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	卷簧加热温度	淬火温度	回火温度
碳素弹簧钢	65	727	752	696	730	280	800~900	810	670
	70	730	743	693	727	280		830	480
	75	725	750	—	—	230		820	480
	85	723	737	—	695	230		820	480
锰钢	65Mn (60Mn, 70Mn)	720	740	689	741	270	850~950	820	540
硅锰弹簧钢	55Si2Mn	775	840	—	—	285	900~950	870	480
	55Si2MnB	768	—	—	—	289		870	480
	60Si2Mn	765	810	700	770	260		870	440~500
	60Si2MnA	755	810	700	770	260		870	140~500
	70Si3MnA	765	780	—	—	270		860	430
铬锰钢	50CrMn	740	785	700	—	300	900~950	840	490
铬钒钢	50CrVA	740	810	688	746	300	900~1000	850	500
硅铬钢	55SiCr	—	—	—	—	—	900~950	870	420
	60SiCrA	—	—	—	—	—			
含微量元素的 硅锰弹簧钢	55SiMnVB	745	790	675	720	—	900~950	870	480
	60Si2CrVA	770	780	710	—	—	900~1000	850	410
	55SiMnMoV	743	815	620	700	290	900~1000	870	550
	55SiMnMoVNb	744	775	550	656	—	900~1000	880	530

注: 1. 快速加热时, 卷簧温度还可适当提高。

2. 淬火介质, 淬火油 (40~100°C)。

3. 回火时间:  $[1.5 \sim 2.0 \text{ min/mm}] \times d$ , 铬锰、硅锰钢弹簧回火后水冷。

表 5-24 热轧弹簧钢的淬火临界直径

序号	钢 种 及 钢 号	淬火临界直径/mm		油淬火时的淬火 临界板厚/mm
		水淬	油淬	
1	碳素弹簧钢, 65、70、75、80	<15	<8	<5
2	锰弹簧钢, 65Mn	<25	15	9
3	硅锰弹簧钢, 55Si2Mn, 60Si2Mn	<30	20	12
4	铬锰弹簧钢, 50CrMn	≈40	34	20
5	铬钒弹簧钢, 50CrVA	50	40	24
6	铬锰硼弹簧钢, 60CrMnB (BSUP11)	55	45	27~30
7	硅铬等弹簧钢, 60Si2CrA, 60Si2CrVA, 65Si2MnWA	60~70	50	30
8	多元微合金化弹簧钢, 55SiMnMoV (Nb) B, 60CrMnMo (SAE4161H)	≈100	75 (90~110)	>50

## 2. 热成形弹簧的热处理

## (1) 火车缓冲器压缩螺旋弹簧的热处理

## 1) 弹簧的制造工艺路线, 钢材检查→切削

(断)料(→两端制扁)→(加热钢棒)→整形  
热卷弹簧

→淬火(再加热)→余热淬火

→热整形→回火→端面磨削→  
喷丸处理→冷(或热)强压处理→探伤→涂漆或磷  
化喷漆→检验→包装。

2) 弹簧的淬火和回火工艺, 铁路车辆缓冲器  
内外圈弹簧为圆截面圆柱形压缩螺旋弹簧, 材料  
用钢: 55Si2Mn 或 60Si2Mn, 具体规格尺寸见表 5-  
25。

## 3) 主要热处理设备及工艺参数:

①棒料加热, 一般采用自动上料出料的步进  
式加热炉, 炉温最高达 1100℃, 以天然气为燃料,  
并能控制炉内气氛实现无氧化脱碳加热。料径可  
达 60mm, 长度不超过 8m, 钢棒的加热温度一般  
为 880~950℃, 保温时间按料径 0.5min/mm 计  
算。

## ②卷制, 使用计算机控制的有芯或无芯热卷

机, 加工料径为 20~60mm, 把加热好的棒料热卷  
成所需规格的压缩螺旋弹簧。热卷成形后弹簧的  
温度应在 840℃以上, 便于直接淬火。即淬入 50  
~80℃油中。弹簧出油池的温度应控制在 120~  
180℃范围内, 防止其变形, 减小淬火应力。淬火  
后弹簧的硬度大于 54HRC。

③回火, 淬火后的弹簧在 2h 内必须回火, 防  
止淬火裂纹的产生。回火炉采用 PLD 控制, 使回  
火温度控制在 ±3℃以内, 回火温度为 400~  
450℃, 保温时间按料径 6min/mm 计算。回火后  
弹簧的硬度达 45~50HRC。热处理过程中易发生  
变形的弹簧另作处理, 一般应增加整形工序。

4) 用 55Si2Mn 或 60Si2MnA 棒料制造的压  
缩螺旋弹簧有如下三种淬火工艺 (见图 5-26)。

①常规热处理 (图 5-26a): 即弹簧热成形和  
淬火两道工序分开进行, 故叫二次加热淬火法。此  
法的优点是弹簧淬火质量稳定, 缺点是操作程序  
繁杂、能耗多、劳动强度大、生产周期较长, 生产  
率低。如无保护气体加热时钢材表面氧化脱碳严  
重, 这将显著降低弹簧的疲劳寿命。

表 5-25 火车缓冲器弹簧的具体参数

压缩螺旋 弹簧名称		料径 $d$	中径 $D_2$	自由高度 $H_0$	有效圈数	总圈数	工作负荷	最大负荷	最大切应力	旋向
		mm			$n$	$n_1$	$P_1/N$	$P_2/N$	$\tau_{\max}/MPa$	
组合簧 1	外簧	38	120	185	3.2	4.7	73967	93980	808	左
	内簧	16	60	202	9	10.5	12260	13930	744	右
组合簧 8	外簧	37	125	220	4.8	6.3	19895	33590	724	左
	内簧	16	72	220	8.7	10.2	7083	12233	742	右
轴箱弹簧		36	190	318	4.7	6.2	27076	55525	706	左

②成形余热淬火(又叫一次加热淬火法),如图5-26b所示。即把热卷、整形和淬火工序合并完成,俗称余热淬火法。其优点是减少一次高温加热,故其表面氧化脱碳少、节约能耗、作业占地面积较小、生产率高等。存在的主要问题是必须在较短时间内完成卷簧和整形(达到尺寸要求),它的温度不致降到 $Ar_1$ 以下。国内铁路工厂及弹簧厂多采用此法进行生产,表5-25中两种组合缓冲器螺旋弹簧是其实例。

③高温形变热处理(图5-26c),它和图5-26b工艺曲线相似,不同点在于形变热处理中的热卷簧和整形不应进行奥氏体再结晶,应保留一部分形变强化效果,而余热淬火法不考虑此现象。在一般生产条件下,b、c两种工艺很难区别。如目前研究的新产品“变径螺旋压缩弹簧”,加热时将钢棒用“靠模”轧制成变径钢棒及热卷、淬火等工序在较短时间内连续完成,强韧化效果良好。这就是真正的形变热处理工艺。

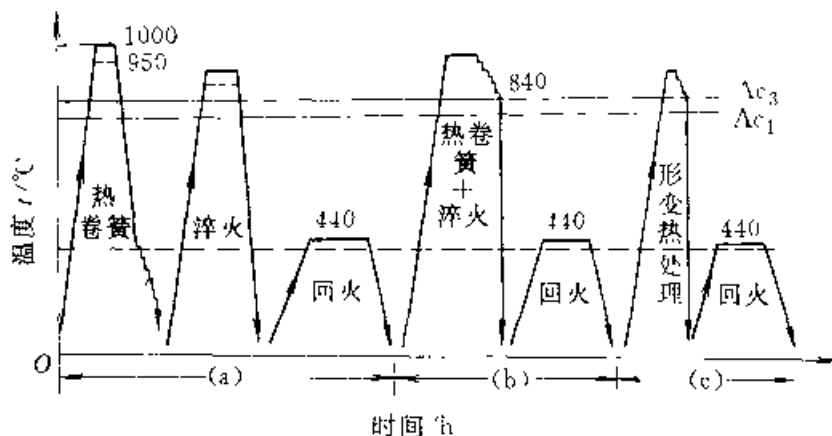


图 5-26 热成形螺旋弹簧的三种热处理工艺

a) 常规热处理 b) 热卷簧余热淬火 c) 高温形变热处理

很显然,为了实现上述工艺,必须有先进的轧制和热卷簧机,整个工序由计算机程序控制。某厂引进英国热卷机,编制了“圆柱形螺旋压缩弹簧的热卷程序”(见图5-27)。具体参数如下:料径  $d=60\text{mm}$ 、弹簧自由高度  $H_0=700\text{mm}$ 、总圈数( $n$ )6.25、有效圈数( $n$ )4.25。加热时采用保护气氛,用电阻炉加热、炉温和绕簧温度都能精确控制、淬火介质为水或油。经过上述处理生产的弹簧质量稳定可靠。既节约能耗和钢材(每年节能约合标准煤300t、节约钢材40t),又提高了生产率(1000t/年)。

④回火,上述三种淬火工艺处理后的弹簧都应及时回火,回火工艺基本相同。具体回火规范由

所要求的组织、性能而定,如弹簧要求40~45HRC时。回火温度选450~500 $^\circ\text{C}$ ;如要求43~47HRC时,则选400~450 $^\circ\text{C}$ 。回火保温时间以1.5~2.0min/mm计算。

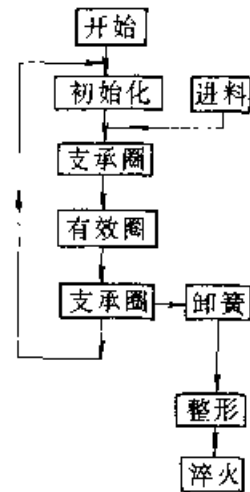


图 5-27 大型螺旋弹簧热卷时计算机程序框图

(2) 电站锅炉安全阀弹簧的热处理,火电厂已向高参数、大容量(300~600MW)、多机组和高度自动化方向发展,其辅机——脉冲式安全阀在配套质量上和国外先进厂家比较时,仍存在较大差距,特别是安全阀弹簧的质量差距更为明显。如果安全阀在规定压力下不能准确开启与回座,将使发电机组运行的可靠性得不到必要保障。如果安全阀弹簧一旦失效,将给整个机组甚至整个电厂的人员生命、财产带来直接威胁。目前,安全阀

弹簧存在的质量问题有:

1) 热稳定性差,即在一定的工作应力、温度及长时间作用下,弹簧的抗应力松弛性能不能满足要求。

2) 早期断裂

实践表明:制造能耐高温、抗应力松弛(蠕变)、不断裂的安全阀弹簧是急待解决的技术难题之一。

1) 安全阀弹簧的材料选择和制造工艺路线,这类安全阀弹簧一般用圆钢( $\phi 42\sim\phi 55\text{mm}$ )制造,主要是50CrVA和30W4Cr2VA两种钢材。优点是价格适当,来源广。50CrVA有冷拉态(L)、热



轧态 (Zh) 和银亮 (Zy) 钢等三种, 在油 (或先水后油) 中可淬透。屈服比 ( $\sigma_s/\sigma_b$ ) 可达 0.85 以上,  $\sigma_s=1128\text{MPa}$ , 即强韧性水平、疲劳强度和抗应力松弛性能均能满足要求。

安全阀弹簧是圆柱形螺旋压缩弹簧, 钢棒直径有  $\phi 42\text{mm}$ 、 $\phi 48\text{mm}$  及  $\phi 55\text{mm}$  三种, 旋绕比 ( $D_2/d$ ) 较小, 为 3~6, 弹簧中径  $D_2$  分级、126~252mm、144~288mm、165~330mm 三种,  $n$  为 3.5,  $n_1$  为 9~9.15。刚度大,  $P' \sim 3911\text{N/mm}$ ; 几何精度要求比 GB2391 级精度要高, 特性线呈直线变化, 负荷偏差小。弹簧端圈均为 2.5~3 圈, 每端端尖至 3/4 圈处要求与邻圈贴合, 其间隙不大于 0.5mm。弹簧螺距的大小由压缩到并紧变形的 80% 时工作圈不得接触。所以, 弹簧自由高度  $H_0$  应为工作圈高度 + 两端的过渡圈和支撑圈高度之和。要求达到上述技术条件, 对于热卷成形工艺是相当苛刻的。

制造工艺路线: 原材料探伤和质量检查 → 下料 → 展尖 → 钢棒加热和卷簧 → 整形 → 淬火 → 回火 → 热定型 (热强压) 处理 → 表面防锈 → 成品入库。

2) 安全阀弹簧的淬火、回火工艺, 50CrVA 安全阀弹簧的热卷簧、淬火及回火可参照上述火车缓冲簧的工艺进行, 只不过卷簧及淬火加热温度可适当提高, 即提高到 950~1050℃。如热卷和调整时能达到尺寸精度要求, 弹簧温度仍在 850℃ 左右可直接淬火, 否则应进行一次再加热淬火。回火温度为 500℃ 左右。热处理时应随炉放入力学性能试棒, 以便及时检验弹簧材料的性能。

3) 弹簧的强压处理, 目前, 工厂采用三次立定处理 (冷强压), 能达到一定的稳定化效果。试验表明, 采用热强压处理能获得最佳的稳定化效果。具体工艺是将安全阀弹簧加压 (其应力应超过材料的屈服强度 ( $\sigma_s$ ), 但不应达到并紧状态)、固定弹簧, 置入一定温度的炉中、保持一定时间后再松开。经过热强压处理的弹簧应通过应力松弛试验 (具体方法见 5.4 节有关内容), 找出弹簧的最佳热强压处理工艺。由于安全阀弹簧的价格占整个安全阀价格的 1/3, 所以, 提高安全阀弹簧的制造精度和热处理质量是非常重要的任务。

(3) 热卷簧和热处理缺陷及其预防措施

1) 热卷簧缺陷及其预防

① 支承圈末端超出弹簧圈外。这与端部制扁、弯成圆弧不当有关。

② 弹簧末端面反背, 它与制扁形状不当有关。

③ 弹簧倾斜过大, 它与校正不当、弹簧端面不平、钢料加热温度不均等因素有关。

④ 弹簧螺距不匀, 与设备精度及调整螺距不当有关。

⑤ 弹簧弯曲变形过大, 它与加热不均及卷簧工艺不当有关。

⑥ 过热或过烧, 与炉温过高有关。

⑦ 弹簧表面氧化脱碳严重, 与炉温过高有关。

⑧ 卷制裂纹、只能报废, 这与材料缺陷有关, 应加强对原钢材的检验。

⑨ 擦伤及锤痕, 这与操作不当有关。

⑩ 弹簧直径不合格, 这与芯轴尺寸不当有关。

2) 弹簧淬火及回火过程中产生的缺陷, 热卷簧过程中产生的各种缺陷在淬火时只能加剧其危害性, 所以, 热卷簧合格是减少热处理废品的前提条件。事实上, 弹簧在热处理过程中还会产生新的缺陷, 主要有:

① 淬火裂纹, 特别是水淬时容易出现这种缺陷。产生的原因有: 材料内部有缺陷, 淬火加热温度过高, 淬水冷却不当造成等。

② 淬火变形。如弹簧倾斜、弯曲过大、螺距不匀等形式, 采用模具压紧装置淬火方法可克服上述缺点。

③ 硬度不均匀或硬度不足。产生的原因主要是加热不均、弹簧温度过低及淬火介质冷却能力不足等。

④ 晶粒粗大及显微组织粗化导致弹簧变脆, 克服的办法是防止钢材过热。

⑤ 弹簧表面脱碳层深度超标。这与加热温度过高、保温时间过长、未采用保护气体加热有关。

### 5.3.2.2 冷成形压缩螺旋弹簧的热处理工艺

(1) 调压弹簧的工作特点、性能要求、钢材选择及制造工艺路线

调压弹簧是喷油器 (液压泵) 中的一个关键零件, 它的质量好坏直接影响喷油时的喷射压力和燃油雾化状况, 从而影响发动机的功率、经济性和排放指标。由于柴油机向高速、大马力、体积小、

结构紧凑、噪声小的方向发展,因而对调压弹簧的工作性能提出了更高的要求。主要有:

- 1) 工作应力大,  $\tau > 800 \text{ MPa}$ 。
- 2) 刚度大, 达  $120 \sim 330 \text{ N/mm}$ , 而缠绕比小 ( $\approx 3$ )。
- 3) 承受交变负荷, 要求疲劳寿命高, 超过  $1 \times 10^7$  次。
- 4) 抗应力松弛性能好, 在工作温度 ( $< 100^\circ \text{C}$ ) 长期工作后, 其负荷损失率小于 5%。

实践表明, 喷压器调压弹簧的主要失效形式是早期断裂和开启压力下降严重 (即应力松弛现象严重)。所以, 正确选择钢材、进行合理的热处理工艺、喷丸强化和强压处理有重要意义。一般选用退火态 50CrVA 钢丝制造。

某厂喷压器调压弹簧见图 5-28。主要参数:  $d = 2.3^{+0.06}_{-0}$  mm、 $D_2 = 7 \text{ mm}$ 、 $n_1 8.5$ ,  $n_2 6.5$ ,  $H_0 = 24^{+0.60}_{-0.10}$  mm, 旋向: 右。压缩至  $H_1 = 21.8 \text{ mm}$  时,  $P_1 = 271 \text{ N}$ ,  $\tau_1 = 622 \text{ MPa}$ ; 压缩至  $H_2 = 21.1 \text{ mm}$  时,  $P_2 = 363 \text{ N}$ ,  $\tau_2 = 835 \text{ MPa}$ 。展开长度: 187 mm。

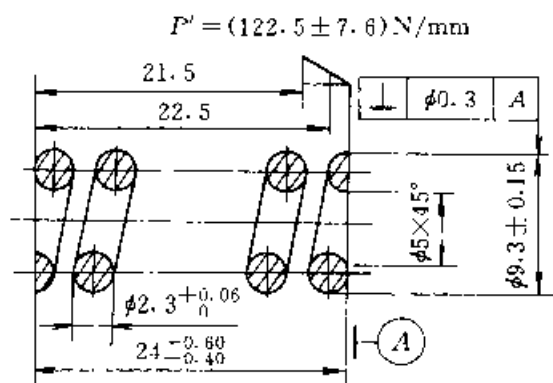


图 5-28 喷压器调压弹簧工作图样

制造工艺路线: 冷绕簧→淬火→回火→磨平端面→内外倒角→探伤→喷丸处理→强压处理→精磨端面→抛光→涂防锈油、成品检验:  $1 \times 10^7$  次的台架疲劳试验。

#### (2) 热处理工艺

1) 淬火工艺:  $900^\circ \text{C}$  加热油淬, 硬度达 58HRC。

2) 回火工艺:  $320 \sim 340^\circ \text{C}$  回火 30 min (浴炉), 获得均匀的回火马氏体, 硬度为 50~53HRC。

3) 调压弹簧的立定处理和热定型 ( $200^\circ \text{C} \times 2 \text{ h}$ ), 将簧压缩到并圈程度。如采用热强压处理可使该簧的负荷损失率  $\leq 5\%$ 。

### 5.3.3 板簧的热处理

#### 5.3.3.1 板簧用钢及制造工艺路线

板簧的截面积 (长  $\times$  宽) 一般比圆截面螺旋弹簧大得多。为了能淬透、获得良好的综合力学性能, 常选用低合金热轧弹簧扁钢制造。主要系列有硅锰钢 (如 55Si2Mn、60Si2Mn 及 70Si3Mn 等)、铬锰钢 (如 50CrMn 等)、硼弹簧钢 (如 55SiMnB、55SiMnVB 及 35SiMnVBA 等) 和多元微合金化弹簧钢 (如 55SiMnMoVA 及 55SiMnMoVNB 等)。铁路车辆及重型汽车用板簧的厚度大于 12~16 mm, 宽度大于 100~150 mm, 供货长度一般为 2~6 m。材料进厂后必须进行严格验收, 如钢号、规格、化学成分、力学性能、尺寸公差和外观质量等。验收合格后方能投产。

铁路板簧的制造工艺路线如下:

切料 (按工艺要求长度) → 簧板中心冲窝或钻孔 → 质检 → 簧板端面加工 (冲制吊杆孔、弯头、剪切成梯形、卷耳) → 质检 → 加热 → 簧板弯曲及淬火 → 质检 → 回火 → 质检 → 表面喷丸 → 选配簧板装配成套 (嵌装热簧箍、调整、板间涂油等) → 弹簧成品验收 (负荷试验、尺寸检查、外观检查、打印标记及表面涂漆等) → 成品入库。

汽车钢板弹簧的用量很大, 不仅要满足新汽车的配套要求, 还要大量供应汽车配件以便满足行驶汽车的板簧消耗。

汽车板簧生产工艺路线见图 5-29。由该图可见, 汽车和火车用的板簧生产主要工艺基本相同; 由于两者结构设计和装配上的差异而略有不同。

板簧质量的好坏与原材料密切相关, 同时要靠生产设备、工艺及检测手段来保证, 淬火和回火是其中的关键工序。

#### 5.3.3.2 板簧的淬火和回火

由于板簧选用的钢种及规格不同, 其淬火、回火工艺参数可参考表 5-23 中的有关数据, 但在生产实际中又要考虑具体的热处理设备、能源及工艺流程等情况, 确定加热炉的炉温和板簧的运行速度, 从而确定加热时间及其实际温度。在年产 5000 t 板簧的专业板簧生产厂中, 加热炉有两个系列: 一条是连续式生产加热炉, 另一条是周期性作业的加热炉。前者多采用液压步进式加热炉, 其设备优点是周期和步进距离均可调、炉温分布比

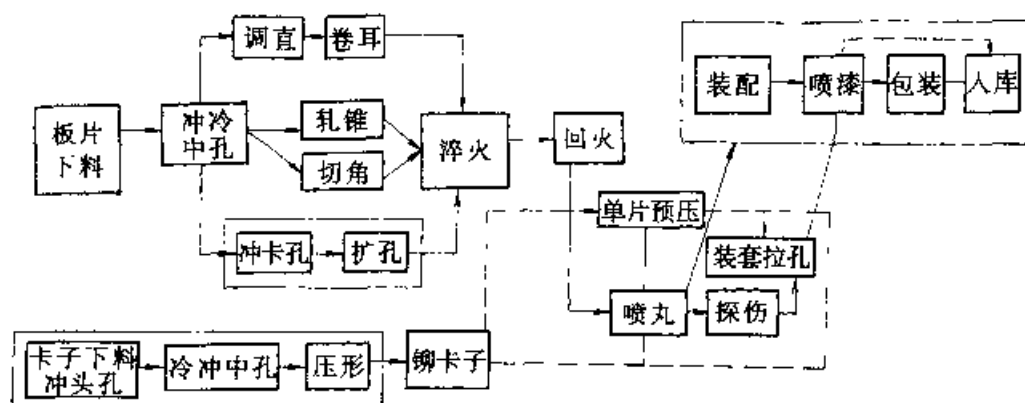


图 5-29 汽车板簧生产工艺路线流程图

----- 单片板簧生产工艺路线  
 ····· 总成生产路线  
 ——— 共用生产路线

较均匀。炉底板选用CrMnN耐热钢制造、步进梁选用Cr25Ni20Si2N钢制造。对于批量较小、多品种板簧的生产宜采用周期性作业炉进行生产。有条件者建议采用保护气氛加热，以便减少板簧表面氧化和脱碳现象。

淬火成形是板簧热处理生产中的一个重要工序。即把加热好的板簧置于淬火机上压形、随即入油中冷却。常用的淬火机有两种：一种为机械式淬火机，优点是夹紧力较大、自动入油中淬火和摆动，工作可靠、维修方便；缺点是噪声大、入油速度较慢，在连续生产中不宜使用。另一种为液压式（二缸或三缸）垂直入油淬火机，它的夹紧和摇摆动作分别由一个液压缸承担，并可采用微机或常规电气控制。为了适用短片变截面板簧的成形淬火，最近设计制造了一种反弓硬柔性链成形淬火机，淬火介质能循环流动，可提高淬火质量，板簧形状好，并适于大批量生产。

淬火池中安装多台淬火机的生产线，采用板式输送链，工件放在淬火机上夹紧，入油冷却、摇摆，自动卸片，再由输送链将板簧送出淬火池。这样可降低操作人员的劳动强度，生产连续性强，还可采用水溶性淬火介质代替淬火油，避免了燃油着火及带油过多而污染环境等问题。

板簧的回火同样有两种方式：即连续式回火炉和周期性作业回火炉，两者都应安装热循环装置、保证炉温均匀。前者，板簧的回火温度由所需硬度值选定，一般为450~500℃，而35SiMnB板簧在400~420℃回火。快速回火时，炉温可适当提高，以避免回火不足等不良现象。后者，采用车

底式回火炉，它装料多，有热循环装置，板簧回火时间较长。由于其炉温分布均匀，有效地保证了板簧的回火质量，而且操作方便，生产成本较低。

### 5.3.3.3 板簧热处理缺陷及其预防

1. 淬火板簧的硬度不足或过高。主要原因是板簧加热温度过低或过高，或冷却不足、不均匀造成的，或回火工艺不当造成的。

2. 过热或过烧。板簧过热还可再淬火回火得以补救，过烧时只能报废。

3. 簧板表面氧化及脱碳严重。上述两缺陷是由于炉温过高、保温时间太长造成的。

4. 板簧变形不符合技术要求（例如旁弯等）。

### 5.3.4 扭杆弹簧及稳定杆的热处理

#### 5.3.4.1 扭杆弹簧的结构特点、性能要求、钢材选择及其制造工艺路线

扭杆弹簧是利用杆的扭转弹性变形而起弹簧作用的零件，它最简单的结构是一直杆。一端固定，在另一端加上扭转负荷（即承受扭转应力）。扭杆可分为实芯扭杆和空芯扭杆两类，其截面又有圆、方、矩形、椭圆形及多边形等。图5-30为扭杆弹簧的结构示意图，用管材制造扭杆可减重量40%。

和螺旋弹簧及板簧比较时，扭杆弹簧结构简单，工作时无摩擦，弹簧特性稳定，不产生颤振、单位体积储能大，弹簧体积较小，属于小型轻量化产品。它在汽车、火车、坦克及装甲车等方面获得

广泛应用。轿车中的稳定杆用量也很大,它是将扭杆弯成弓形或框形等结构,使车身减少倾斜或横向摆动,能提高悬架车的制动性能和乘员的舒适感。

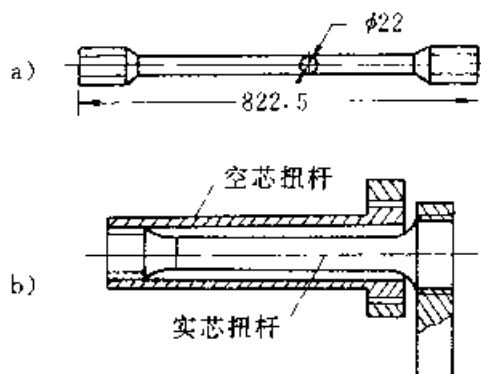


图 5-30 扭杆弹簧结构简图

a) 实芯扭杆 b) 串联式扭杆

根据承载(扭转应力)的高低选用所需的钢种(见表 5-26)。最大工作应力可分为:1250MPa、1200MPa、1150MPa、1100MPa 及 1000MPa 等五级。军用和公路重型汽车的悬架弹簧,其沉降挠度不得超过 10%。承受单向负荷的扭杆弹簧,热处理后必须进行表面喷丸强化及强扭处理才能达到所要求的性能,并采用电渣重熔的优质钢材(如 SAE4340 钢)制造。轿车及一般载重汽车用扭杆悬架和稳定杆,如最大工作应力仅为 900MPa、800MPa 及 700MPa 时,沉降挠度不超过 2%~4%时,这类扭杆经热处理或冷作硬化后可不进行喷丸和强扭处理。

扭杆弹簧的制造工艺路线:

切料(→锻锻→退火)→端部加工→淬火→回火→喷丸处理→强扭处理→检验→防锈处理。如来料为磨光或抛光料时,可免去锻锻及退火工序)。上述制造工艺只适于高应力( $\tau_{\max} > 900 \sim 980\text{MPa}$ )、永久变形(2~4/8~12)%的调质扭杆弹簧,对于  $\tau_{\max} = 720 \sim 790\text{MPa}$  的扭杆,淬火回火后应进行喷丸,但不作强扭处理;对于表面强化的扭杆,在  $\tau_{\max} = 823\text{MPa}$ 、永久变形为 2%~4%条

件下,不进行喷丸,只作强扭处理。

#### 5.3.4.2 扭杆弹簧的热处理工艺

1. 调质处理(调质扭杆) 这是一种常规热处理方法,淬火加热温度为  $830 \sim 890^\circ\text{C}$  油淬。如选低硬度 415~495HBS(即工作应力达 735~882MPa),宜选  $500^\circ\text{C}$  左右回火;如选高硬度 47~52HRC(即工作应力达 883~932MPa),宜选  $400^\circ\text{C}$  左右回火。

热处理应注意:淬火加热时应防止表面氧化和脱碳,不得产生过热现象。回火时要求及时和充分。

2. 高频淬火(高频扭杆) 高频淬火在齿轮热处理中广泛应用,但在扭杆弹簧热处理中是一种新工艺。其优点是扭杆热处理后变形很小,表面几乎不产生氧化和脱碳现象。但是,扭杆弹簧的高频淬火工艺尚有待深入研究,例如:淬火深度对扭杆弹簧疲劳性能的影响、非淬硬层部分在外力作用下是否发生屈服,回火工艺应如何选择等等。

(1) 淬硬率的确定,以 45 钢制造的扭杆(见图 5-30a)为例:

$$\text{淬硬率} = \frac{\text{从表面至硬度} > 45\text{HRC} \text{ 的位置}}{\text{扭杆半径}} \times 100\%$$

图 5-31 示出了扭杆经高频热处理和调质处理后力学性能的对比。如淬硬率增加到 70%时,在相同的塑性( $\phi$ 值)条件下,扭杆的扭转屈服强度比现行的调质工艺提高 40%以上;如淬硬层较浅时,它的断面收缩率却低得多。如淬硬率在 30%~100%范围内时,残余压应力为(800~650)MPa,和喷丸强化水平相当,即高频淬火扭杆的残余压应力不比喷丸者差。

(2) 高频淬火扭杆在低温回火时的力学性能,图 5-32 为低温回火温度(保温时间:30min)对扭杆力学性能的影响。由该图可看出:由室温到  $180^\circ\text{C}$  时,  $\tau_s$  一直在上升达最大值,超过  $200^\circ\text{C}$  则急剧下降。但  $\phi$  值随回火温度的升高不断上升,它与  $\tau_s$  的变化规律是不同的。

表 5-26 汽车悬架用扭杆热成形弹簧钢的选择

调质后的抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	1000~1300		1350~1550	1450~1600	1500~1700	
淬透性(扭杆直径)/mm	12	16(20)	25	30~40	50	70
选用钢种	55	65Mn	55Si2MnA	55CrMn	50CrVA	50CrMnMoVA SAE4340
	60	70Mn	60Si2MnA	60CrMn		
	70					

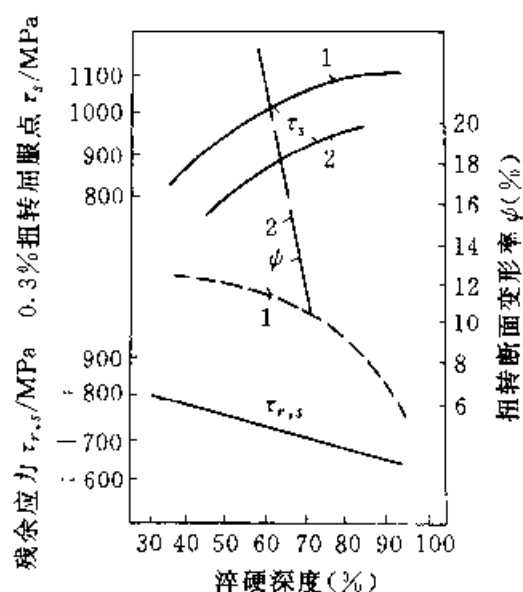


图 5-31 两种热处理工艺时、淬硬深度对力学性能及残留应力的影响  
1—高频热处理 2—调质热处理

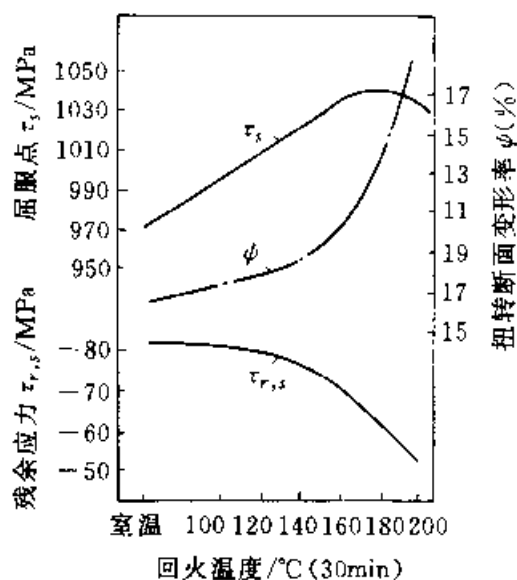


图 5-32 低温回火温度对扭杆力学性能的影响 (保温时间: 30min)

(3) 扭杆疲劳性能与淬硬层深度的关系, 在应力为  $(500 \pm 420)$  MPa 条件下进行疲劳试验。结果表明: 淬硬率  $\leq 40\%$  和  $\geq 80\%$  时均发生疲劳断裂; 而淬硬率在  $50\% \sim 70\%$  之间, 扭杆的疲劳寿命长, 不发生断裂。图 5-33 为高频热处理扭杆 (曲线 1) 和调质扭杆 (曲线 2、3) 的 S—N 曲线对比。试验条件: 平均应力  $\tau_m = 500$  MPa, 应力幅  $\pm 420$  MPa, 淬火硬化深度  $40\%$ 。由该图可知, 高频扭杆表面有很高的残余压应力, 故其疲劳极限最高, 调质高硬度扭杆次之, 普通调质扭杆最低。

另外, 高频淬火硬化深度达  $50\%$  时, 其抗应力松弛性能好 (松弛变形量仅为普通淬火回火扭杆的一半)。这样, 扭杆长度 (相当汽车幅长) 可缩短、扭杆直径可减小, 即可实现扭杆轻量化 (重量减轻约  $1/3$ )。

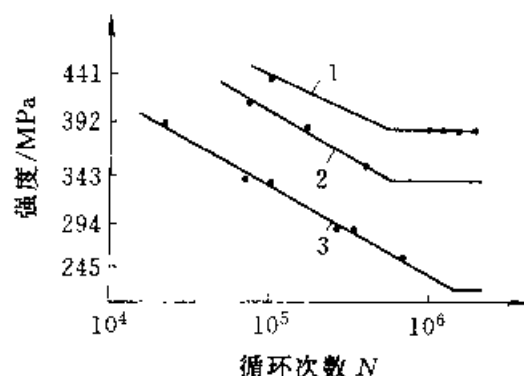


图 5-33 三种不同热处理扭杆的 S—N 曲线 [平均应力:  $500$  MPa ( $55 \text{ kgf/mm}^2$ )]  
1—高频扭杆 2—高硬度调质扭杆  
3—低硬度调质扭杆

### 5.3.5 轿车悬架弹簧的热处理

汽车和火车的悬架弹簧在结构上有三种: 压缩螺旋弹簧、组合式板簧和扭杆弹簧, 它们支承车箱, 起缓冲和减震作用。这里只介绍轿车用压缩螺旋悬架弹簧的热处理工艺。

#### 5.3.5.1 悬架弹簧的结构及工况特点、钢材选用制造工艺路线

这类弹簧的结构有多种多样, 主要有圆柱形和腰鼓形两种, 前者应用普遍, 后者是结构更合理的新产品。悬架弹簧是在周期性扭转、弯曲等交变应力下工作, 经常承受振动和冲击, 还受到水雾及泥沙等的侵蚀, 容易发生疲劳断裂失效。由于它的工作应力高、工况条件恶劣, 常选用 50CrMn、50CrVA、55SiCrA、60SiCrVA 或其他高强度弹簧制造。如用 60Si2MnA 钢材制造时, 要求冶炼时将 S、P 含量较低,  $w(\text{Sb} + \text{Pb} + \text{Sn} + \text{As} + \text{Bi}) \leq 0.01\%$ ,  $w(\text{O}_2) < 0.0025\%$ ,  $w(\text{N}) \leq 0.0012\%$ 。提高钢的纯净度主要是保证钢有很好的强韧性和弹簧有很高的疲劳寿命。材料直径一般为  $10 \sim 16$  mm (圆钢或盘条), 此尺寸正好处于冷热成形之间, 即既可用冷成形, 也可用热成形来制造悬架弹簧。

#### 1. 圆柱形压缩螺旋悬架弹簧的制造工艺路

线:

(1) 如采用 Cr—Si 油淬火钢丝来制造, 其工艺路线为: 卷制→去应力退火→磨端面→喷丸→冷或热强压处理→探伤→负荷分选→磷化喷涂→包装入库。

(2) 如采用热轧态或退火态的盘条 (60Si2MnA、225~298HBS, 表面脱碳层深度为 0.4%~0.9% $d$ ) 来生产悬架弹簧时, 其制造工艺路线为: 材料校直  $\begin{cases} \text{冷卷簧} \\ \text{热卷簧} \end{cases}$  → 磨端面 → 调整  $\begin{cases} \text{再加热淬火} \\ \text{余热淬火} \end{cases}$  → 回火 (→ 精磨端面) → 擦伤 → 喷丸 → 冷或热强压 → 负荷分选 → 磷化喷涂 → 包装入库。

## 2. 腰鼓形悬架弹簧的开发及其制造工艺<sup>[26]</sup>

减轻自重、提高行车安全性及舒适性和降低能耗是各种车辆、特别是轿车工业的发展方向。采用变截面板簧可降低其重量 30%~50%、板簧片数可减少 50%~70%; 采用变截面变螺距的腰鼓形压缩螺旋弹簧亦可达到类似效果。

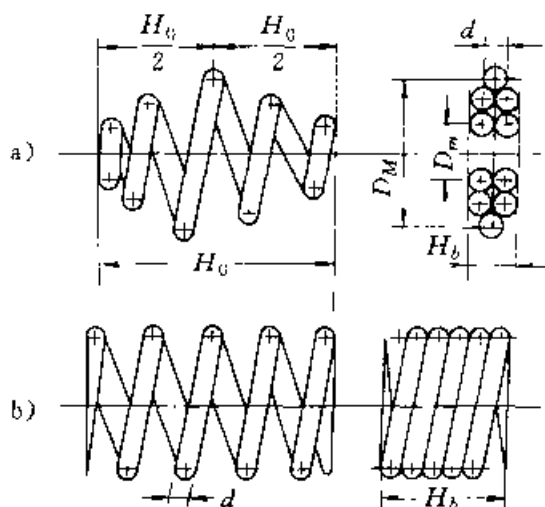


图 5-34 腰鼓形 (a) 与圆柱形 (b) 悬架弹簧的结构比较

图 5-34 绘出了腰鼓形和圆柱形悬架弹簧的结构特点。前者的优点: ①弹簧工作特性线是曲线变化 (渐增型)、变刚度; 而后者是直线型、等刚度。②重量轻、净重小, 减少了无效圈数, 小型化可节约钢材和能耗。③弹簧并紧高度 ( $H_b$ ) 最小, 因而降低汽车悬架高度, 使轿车流线型更好, 空间利用率高。④防止共振和转向撞击。⑤不等螺距, 工作应力分布较均匀, 故弹簧使用寿命长, 减少松弛变形, 提高轿车行驶时的安全性和舒适性。⑥能

降低成本。缺点是其制造技术难度较大, 而圆柱形压簧的制造工艺简单。

图 5-35 为腰鼓形悬架弹簧的展开长度及具体形状和尺寸。

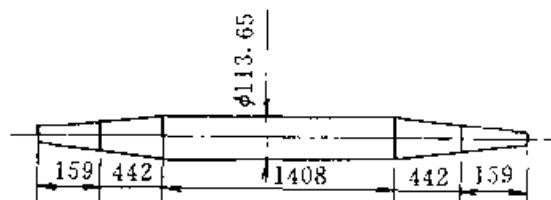


图 5-35 腰鼓形悬架弹簧的展开长度及尺寸

悬架弹簧的失效主要是脆断。例如, 轿车前悬架弹簧的具体参数: 料径 9.5mm、用 60CrVA 油淬火钢丝制造, 外径 100mm、 $H_0=339$ mm, 右旋,  $n_{6.3}, n_{7.5}$ , 最大负荷:  $(2097 \pm 97)$  N (压缩至 205mm) 时, 热处理后硬度 50HRC。要求疲劳寿命 20 万次, 实际使用寿命只有 13 万次。失效原因是由于原材料内部有微孔裂纹和金属渣片, 夹杂物等级严重超标造成的。又例如某厂用此料冷卷成簧后、通过淬火和快速回火后的硬度达 52HRC, 其台架试验 (在工况条件下) 的寿命只有 4.3 万次, 发生早期断裂失效的原因主要是热处理时表面脱碳严重和回火不足造成的。

某轿车前悬架弹簧用 60Si2MnA 线材制造, 料径  $d=10.8$ mm, 硬度 30HRC, 在卷簧过程中发生断裂。原因是材料的冶金质量差, 断口呈灰色, 金相分析可看到少量的点状石墨; 弹簧表面有刻痕, 夹杂物等级超标 (氧化物直径达  $25\mu\text{m}$ )。刻痕过深及石墨质点是造成弹簧断裂的主要原因。

由上述失效分析可知, 硅锰系弹簧钢只能满足低应力的悬架簧对性能的要求; 对于高应力者应选淬透性好; 冶金质量更高的 50CrVA 或 55SiCrA 等钢种制造。目前, 为了减少钢中非金属夹杂物 ( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等), 进一步改善钢材的表面质量, 并研制新型弹簧钢 SRS-60 (最佳成分 (质量分数): 0.60% C, 1.5% Si, 0.50% Mn, 0.50% Cr, 0.20% V) 来制造汽车悬架弹簧。比用 60Si2MnA 钢可减轻重量 15%~20%。可制成力学性能好的油淬火钢丝 (粗规格), 有利于冷卷簧生产。美国在 4340 (Cr—Ni—Mo 钢) 高强度钢的基础上增加了 Si、Mo 含量, 并加入少量的

V, 研制成 RK360 弹簧钢 (主要成分 (质量分数): 0.40% C、2.5% Si、0.80% Mn、2.0% Ni、0.85% Cr、0.40% Mo、0.2% V), 其淬透性比 60Si2MnA 钢好得多, 热处理后的硬度达 54HRC,  $K_{IC}$  值高达  $1470 \sim 1580 \text{ N/mm}^{3/2}$ , 而 60Si2MnA 钢的  $K_{IC}$  值低于  $980 \text{ N/mm}^{3/2}$ , 使弹簧钢强韧性达到了空前的高水平。

### 5.3.5.2 悬架弹簧的热处理工艺

用油淬钢丝或钢棒卷制的悬架弹簧只需进行去应力退火。例如用 55SiCr 油淬钢丝卷制的悬架弹簧的退火工艺为  $380^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 。如用退火或热轧态盘条卷制的悬架弹簧必须进行淬火和回火后才能达到所需要的力学性能。具体工艺:

1. 常规热处理工艺 批量生产时, 采用输送带或步进式连续加热炉, 保护气氛加热到  $860 \sim 880^\circ\text{C}$  时油淬, 再在热风循环的周期性作业炉或连续式回火炉中保持足够的时间, 使其硬度达到 46~52HRC。

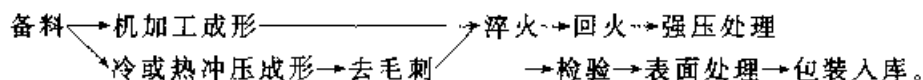
2. 高温形变热处理 将钢棒进行感应加热或电接触加热到  $950 \sim 1000^\circ\text{C}$ , 立即用靠模轧制成图 5-35 那样的形状及尺寸, 再热卷成簧后淬火 (余热淬火) 和回火。这是一种强化的热处理生产工艺, 生产率高, 又可获得超细晶粒和形变热处理强韧化效果。对于 Si—Cr 系 (SAE9254) 钢, 其抗拉强度可达  $1770 \sim 2060 \text{ MPa}$ ,  $\psi > 45\%$ ,  $\delta_5 > 7\%$ , 弹簧表面无脱碳现象。用这种方法制造的悬架弹簧具有很高的疲劳强度和抗应力松弛性能。

如生产条件不具备时, 可将轧制、绕簧和淬火工序分开进行。此时淬火方法可按常规工艺或等温淬火工艺进行。

### 5.3.5.3 强压处理

悬架弹簧热处理还应进行喷丸处理来提高其疲劳寿命。应进行强压处理来提高其抗应力松弛性能。

(1) 冷强压处理: 将悬架弹簧在室温下压并



其中,  $t < 1\text{mm}$  时, 用钢板冲制, 如  $1\text{mm} < t < 6\text{mm}$  时, 可用钢板冷冲或热冲制碟簧毛坯。表面处理有氧化、磷化或镀锡, 后者应进行脱氢处理。

### 5.3.6.2 碟簧的热处理工艺

1. 毛坯退火 为了消除冷冲时的加工硬化

(图) 一次或三次, 每次停留  $1 \sim 3\text{s}$ 。

(2) 热强压处理 (亦称热稳定化处理): 在  $250^\circ\text{C}$  箱式电炉中加热、保温 20min 后取出, 迅速放到强压机上进行热压、随即水冷。

## 5.3.6 碟簧的热处理

### 5.3.6.1 碟簧的结构及工作特点、用钢和制造工艺路线

碟簧是一种结构紧凑、单位体积材料的变形较大、缓冲时吸振能力强、适于各种组合使用方式和变刚度特性等优点, 广泛用于矿山、冶金及车辆等机械装备中。它是一种承受轴向静或动负荷的圆锥形环盘, 既可单只使用, 亦可叠合或对合使用。其结构截面简图如图 5-36 所示。当碟簧厚度 ( $\delta$ ) 小于 6mm 时无支承面 (A 型); 当  $\delta > 6\text{mm}$  时有支承面 (B 型)。GB1972—80 将碟簧按  $D/t$ 、 $h_0/t$  比值 (18、28、40) 不同, 分为三个系列; 系列一:  $D/t=18$ 、 $h_0/t=0.4$ ; 系列二:  $D/t=28$ 、 $h_0/t=0.75$ ; 系列三:  $D/t=40$ 、 $h_0/t=1.3$ 。每一系列有 34 种规格。



图 5-36 碟形弹簧的截面图

$D$ —碟簧外径 (mm)  $II$ —碟簧自由高度 (mm)

$d$ —碟簧内径 (mm)  $\delta$ —碟簧单件厚度 (mm)

$D_0$ —碟簧反转中心所在的圆周的直径 (mm)

$h_0$ —将碟簧压平时的变形量  $h_0 = H - \delta$  (mm)

碟簧用钢有优质碳素弹簧钢, 一般用于 A 系列的小碟簧; 低合金弹簧钢 (60Si2MnA 及 50CrVA 等) 用来制造中大型碟簧。这些材料都以热轧或冷轧态圆钢或钢板供货。

大中型碟簧的生产流程如下:

现象, 便于切削加工、毛坯需进行退火。工艺为  $(600 \pm 10)^\circ\text{C}$ 、保温  $1 \sim 2\text{h}$ , 随炉冷到  $400^\circ\text{C}$  左右出炉。

2. 碟簧的等温淬火 批量大而厚度较小的碟簧采用输送带式保护气氛加热炉和等温槽进行

下贝氏体等温淬火、连续回火。这种热处理生产设备比较先进、能保证碟簧的热处理质量、表面无脱碳、内应力较小、不易产生淬火裂纹和翘曲变形,硬度均匀,有较高的疲劳寿命。

碟簧热处理后的硬度:  $t < 1\text{mm}$ , 18~52HRC;  $1\text{mm} < t \leq 6\text{mm}$ , 46~50HRC;  $t > 6\text{mm}$ , 43~48HRC。

如碟簧在氧化性箱式电炉中加热(周期性作业)时,可在其表面涂刷淬火油+石墨粉,能防止氧化和脱碳,淬火后碟簧表面呈银灰色。对外径大而较薄的易变形的碟簧用模压淬火和模压回火处理,可提高碟簧的尺寸精度和处理质量。

3. 碟簧的中频加热、形变淬火工艺 以两种较大碟簧:  $D/t=140/8=17.5$  及  $D/t=290/17\approx 17.1$  为例:

(1)  $\phi 140\text{mm}$  碟簧。用 60Si2Mn 圆钢制造时的工艺路线:下料→机加工(车削、磨削)→中频形变淬火→回火→强压处理→喷丸→磨支承面→负荷试验→表面处理→检验→包装入库。

(2)  $\phi 290\text{mm}$  大碟簧。用 60Si2MnA 厚钢板制造的工艺路线:气割下料→退火→机加工(车、

磨)→中频形变淬火→回火→强压处理→喷丸→磨支承面→负荷试验→表面处理→包装入库。

中频电源 BPS 型 100kW、8000Hz、DGF C 10800 中频感应淬火控制设备和模压淬火(油冷),具体电参数和热处理工艺参数见表 5-27。

常规热处理(冷、热成形后重新加热淬火法)的主要工艺问题是:生产效率低,碟簧变形严重,表面氧化、脱碳超标,废品率高(达 40%);而中频感应加热模压淬火法的主要优点是:生产效率高,变形小,几乎无脱碳和氧化,提高了碟簧的制造精度,显著减少了废品率。特别是碟簧经过上述中频形变淬火比常规热处理者可获得更好的力学性能和更高的疲劳寿命(见表 5-28)。由表 5-28 中数据可知,中、大型碟簧经中频感应加热、模压淬火及回火后的疲劳寿命比普通热处理(箱式电炉加热淬火者)高得多,值得推广应用。如无感应加热装置时,将碟簧表面涂上淬火油和石墨混合剂,放在箱式电炉中加热,到温后钩出放在冲床上成形后立即油淬,也能达到上述形变淬火的效果。

表 5-27 碟簧的中频淬火工艺参数

碟簧 外径 $D/\text{mm}$	电 参 数						加热 时间 /s	成形 压力 /kN	予冷 时间 /s	喷油 时间 /s	感应器 与工件 间隙 /mm	冷却 介质	淬火加 热温度 /℃
	发电机 电压 /V	发电机 电流 /A	激磁 电流 /A	功率 因数	匝比	输入 功率 /kW							
140	700	135	2.8	0.95	8:2	15	45~50	150~200	3~5	25~30	5~7	L-	890~920
290	520	135	2.5	0.75	20:2	55	260~270	450~500	1~2	120~130	4~5	AN22	890~920

表 5-28 两种碟簧经不同热处理后疲劳寿命对比

碟簧外径 $D$ 及钢种	热处理工艺及表面强化		最大负荷 $P_{\max}/\text{kN}$	加荷 方法	断裂周次 $N \cdot 10^4$	断裂情况	原材料	疲劳试验条件
140mm 碟簧 (60Si2Mn)	原工艺 (电炉加热 淬火, 回火+喷砂)		85	分三次 加载	0.84~1.38		板坯	300kN 脉冲 疲劳试验机加 载频率:1000~ 1200 次/min
	中频感应 加热模压淬 火 + 480℃ 回火 2.5h	试件 1	100	37.7kN 变形 1mm	8.93		锻坯	
		试件 2		10 万次、 75.4kN 变形 2mm	10.2			
		试件 3		10 万次	13.2			
		试件 4		再达 $P_{\max}$	7.3	未断		



(续)

碟簧外径 $D$ 及钢件	热处理工艺及表面强化			$P_{max}$	$P_{min}$	振幅 /mm	断裂周次 $N \cdot 10^4$	断裂情况	原材料	疲劳试验条件
290mm 碟簧 (60Si2MnA)	原工艺: 电炉加热淬 火回火+喷砂			44	28	3	8.76	断	板坯	WPH-100 型脉冲疲劳试 验机
	同上	试件 0	喷丸	36	28	1.5	18.0	未断	板坯	
	中频感应 加热模压淬 火+ (450± 10)°C 回火 3.5h	试件 5	喷丸	45	29	2.2	23.0	断 (喷丸 时间短)	板坯	ZDMP-100 型液压脉动疲 劳试验机加载 频率 400 次/ min
		试件 6		45	29	2.2	34.3	断	板坯	
		试件 7		45	29	2.2	50.0	未断 (喷 丸时间长)	板坯	

### 5.3.7 汽车离合器膜片弹簧的热处理

有些汽车采用膜片弹簧作离合器的压紧装置, 它有结构简单、紧凑、零件少、占用空间小等优点。由于膜片弹簧的非线性工作特性, 使离合器工作性能稳定, 不致因摩擦片的磨损而使其压紧力发生显著变化。它的使用寿命比用螺旋弹簧离合器要长、运行中故障亦较少。

#### 5.3.7.1 膜片弹簧的结构特点、性能要求及其制造工艺路线

膜片弹簧的结构如图 5-37 所示, 其工作应力分析表明: 有窗口的截面  $AA$  的应力大于截面  $BB$

的应力。膜片弹簧的结构较复杂, 但其外形和碟簧非常类似。膜片弹簧压平时, 如小端变形量大、碟形部分的变形也较大。上表面 (I、N) 为压应力, 而下表面 (II、III) 为拉应力, I 点处的压应力最大, III 点处的拉应力最大 (见图 5-37b)。这种簧一般选用 50CrVA 或 60Si2MnA 钢板制造, 其主要失效形式为早期断裂和应力松弛, 所以, 膜片弹簧必须进行合适的热处理和强压处理后才能使用。

制造工艺路线如下:

剪板下料→车内圆→车外圆→冲孔槽→磨平面→车外圆、倒  $R_2$  圆角→倒  $\phi 14$  孔  $R_2$  圆角→热

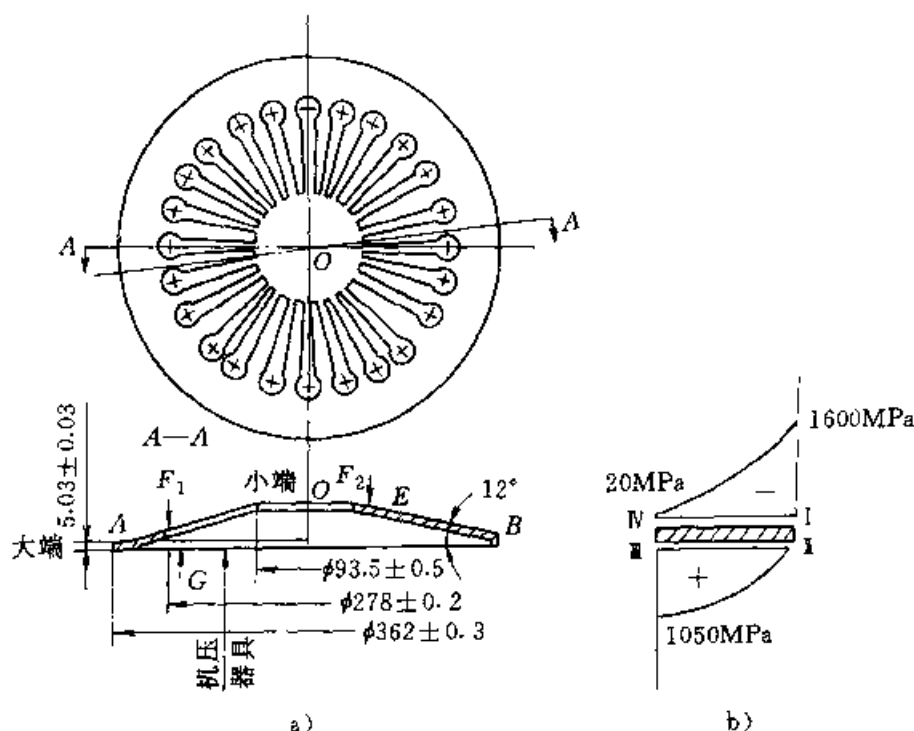


图 5-37 膜片弹簧的结构图(a)及压平时  $AA$  截面的应力分布(b)

冲压成形→淬火→回火→喷丸强化→强压(6次)  
→检验(压平试验的负荷不得超差)→包装入库。

### 5.3.7.2 热处理工艺及强压处理

1. 淬火工艺 将成形的簧片在 920℃箱式电炉中加热 4~5min(为防止氧化和脱碳,在其表面涂上石墨粉和淬火油调成的膏状物,热成形时也是如此)后进行模压淬火(油冷),淬火后片簧的硬度应达到 58~62HRC。

2. 回火工艺 将淬火后的多个簧片及时装入夹具中压紧回火,第一次回火为 450℃×5h,硬度合格后进行第二次回火,在 480℃回火 5h。回火后水冷,硬度达 42~46HRC 为合格。组织为回火马氏体。淬回火都应控制簧片的变形。

3. 强压处理 其目的是减小膜片弹簧工作过程中的松弛变形或弹力减退现象,稳定其自由锥高。强压处理时必须使膜片弹簧大端变形量( $\lambda$ )适当超过  $\lambda_{1r}$  和  $\lambda_{1s}$ (见图 5-38),使材料内部发生一定量的微型性变形和残留内应力。第二次强压时其应力分布将发生改变,经过几次强压处理后使膜片弹簧的自由锥高基本稳定。

图 5-38 为膜片弹簧负荷( $P$ )—变形( $\lambda$ )特性线。当离合器压紧时,膜片弹簧变形达  $\lambda_{1b}$ , $R$  为曲线拐点, $\lambda_{1b}$ 一般小于拐点处的变形量  $\lambda_{1R}$ ;彻底

分离时,膜片弹簧的变形量在曲线谷点  $\lambda_{1r}$ 附近。经过计算得到: $\lambda_{1r}-\lambda_{1s}\approx 0.5-1.0\text{mm}$ (式中  $\lambda_{1r}$  为  $\sigma-\lambda$  曲线上最大变形量)。所以,膜片弹簧强压处理时必须超过谷点 0.5~1.0mm。究竟强压处理几次合适呢?表 5-29 列出了强压次数对膜片弹簧负荷的影响。由该表中数据可知,第 1、2 次强压处理效果最显著,第 3 次强压的效果急剧变小。由此可见,生产上采用六次强压是不必要的,只需强压处理三次就可达到技术要求。

应指出,上述工艺属于冷强压处理,如采用适当的热强压工艺还可缩短生产周期,使膜片弹簧的负荷损失率达最小值。

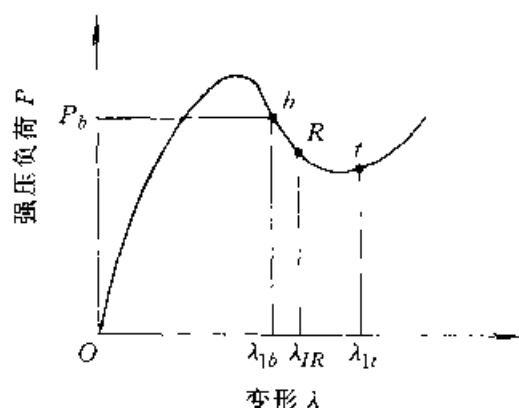


图 5-38 膜片弹簧的工作负荷—变形特性曲线

表 5-29 膜片弹簧负荷与强压次数的关系(加载行程为  $\lambda_{1\text{max}}$  时)

试验号	强压处理次数及弹簧负荷/N(kg)				
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
1	5808(592)	5503(561)	5523(563)	5533(564)	5543(565)
2	6014(613)	5719(583)	5690(580)	5680(579)	5680(579)
3	5925(604)	5641(575)	5631(574)	5631(574)	5631(574)
4	5994(611)	5709(582)	5700(581)	5690(580)	5690(580)

### 5.3.8 平面蜗卷弹簧的热处理

平面蜗卷弹簧是用细长的扁带或丝材绕成平面螺旋线形的一种弹簧,它又分非接触型和接触型两种,弹簧的一端固定,另一端施加扭矩,使材料产生弯曲变形。它储存较多的应变能,常用来制造汽车玻璃升降器的平衡弹簧、吸尘器的收线装置、自动武器的供弹具以及钟表、仪器机构中的原动力发条。现只介绍汽车的平衡弹簧和汽车安全带卷收器的平面蜗卷弹簧。

#### 5.3.8.1 平衡弹簧的热处理工艺

1. 平衡弹簧的结构特点、用钢及制造工艺路线 图 5-39 为其结构示意图,它属于非接触型平面蜗卷弹簧。其失效形式有二:一为断裂失效(见图中箭头所示处),一为松弛变形失效,不起平衡作用。

这种弹簧多采用特殊截面钢材制造,主要有三类:

(1) GB3530, 热处理弹簧钢带 I、II、III 级, 用钢为 65Mn、T7A、T8A、T9A、60Si2MnA 及

70SiCrA 等。

(2) GB8708, 汽车车身附件用异形钢丝 (65Mn 及 50CrVA)。

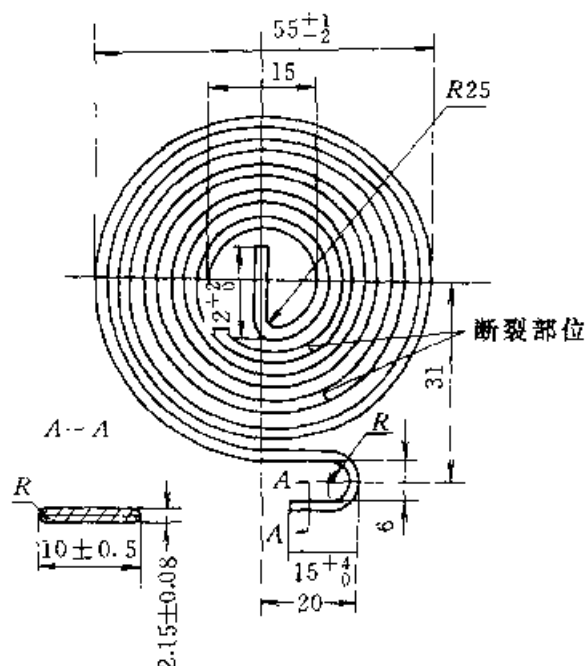


图 5-39 汽车玻璃升降器平衡弹簧的结构示意图

(3) GB3525, 弹簧钢、工具钢冷轧钢带、用钢有: 65Mn、50CrVA、60Si2Mn 及 60Si2MnA 等。厚度系列: 0.5~4.0mm, 共 22 种; 宽度系列: 5~50mm, 共 21 种。

现以矩形截面 (10mm×2.15mm 和 12mm×2.5mm) 65Mn 钢退火料为例, 介绍其制造工艺过程, 具体工艺过程如下: 下料→修边→卷制成形→端部加工→淬火→回火→(缠紧处理)→检验→涂防锈油→包装入库。

2. 平衡弹簧的热处理工艺 淬火方法有直接油淬、下贝氏体等温淬火及马氏体分级淬火等; 回火工艺在硝盐浴中回火 (370℃×30min)。

经热处理后平衡的弹簧组织、主要力学性能及疲劳寿命见表 5-30。

由表 5-30 可看出, 平衡弹簧在技术条件中要求往复疲劳寿命超过四万次, 直接油淬者往往达不到要求, 而采用等温淬火或分级淬火却能达到, 特别是下贝氏体等温淬火和马氏体分级淬火使其寿命达 6 万次左右。

如用热处理扁钢带制造平衡弹簧时, 则其工艺路线比较简单: 下料→两端局部退火→卷制成形 (包括端部成形加工)→定型和去应力退火 (与缠紧处理合并进行)→检验→表面处理→包装入库。

热处理钢带应控制在 40~46HRC 范围内, 两端弯钩部分的硬度经局部退火后降至 35HRC 左右, 退火工艺为 680℃浴炉中短时加热即可, 用这种方法生产的平衡弹簧往复疲劳寿命达 4.5~5.5 万次。

表 5-30 65Mn 平衡弹簧经不同热处理后的组织、力学性能及疲劳寿命

热处理工艺 <sup>①</sup>	显微组织	淬火后硬度 (HRC)		回火后硬度 (HRC)		回火后抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa		往复疲劳寿命, 次数 (3~10 个弹簧寿命的平均值)
		1	2	1	2	1	2	
直接油淬 (820℃×10min)	100%M	61	62	48	49	1580	1707	35752
马氏体分级淬火 (860℃加热 8min, 280℃分级 2min, 淬火)	70%M+30%B <sub>下</sub>	58	57	50	50	1687	1717	60202
马氏体分级—贝氏体等温淬火 (860℃加热 8min, 280℃等温停留 20min) 水冷	30%M+70%B <sub>下</sub>	55	56	50	50	1707		40195
下贝氏体等温淬火 (860℃加热 8min, 280℃等温停留 30min) 水冷	≈100%B <sub>下</sub>	52	53	50	50	1687		59967

① 均在 370℃硝盐浴中回火 30min, 1—10×2.5mm 带钢, 2—12×2.5mm 带钢; M—马氏体, B<sub>下</sub>—下贝氏体。

### 5.3.8.2 汽车安全带卷收器平面蜗卷盘簧的热处理工艺

轿车高速行驶时发生恶性事故的可能性及危害性都很大。为了确保人身安全,乘员必须套上安全带。其卷收器应符合GB11558要求,卷收器中的平面蜗卷盘簧就是一个重要的功能性零件,它属于接触型蜗卷弹簧。工作圈数 $\geq 25$ ,展开长度4150mm,系由截面为 $0.25\text{mm} \times 8\text{mm}$ 薄钢带制造。它装在直径55mm的弹簧盒中。它的失效方式主要是断裂和松弛。

常用薄钢带有碳素钢(60、65、75、85、T8A等)及低合金钢(60Mn、60Si2MnA等)。比较便宜的是选退火态厚度为 $0.22\text{mm}$  60薄钢带制造,这种薄钢带比较宽,用滚切法割成宽度为 $8\text{mm}$ 的窄条,再通过连续热处理炉加热到 $820 \sim 860^\circ\text{C}$ ,压模整形后油淬、 $360 \sim 400^\circ\text{C}$ 回火,达到GB3530中规定的技术要求: $\sigma_b > 1900\text{MPa}$ 、硬度 $> 600\text{HV}$ 。试制产品经测定: $\sigma_b = 2190\text{MPa}$ ,硬度 $= 665\text{HV}$ 。

盘簧的制造工艺路线:断料→两端头退火( $< 370\text{HV}$ )→端部加工成形→卷制→去应力退火及定型→表面处理(煮黑或电镀)→寿命考核→入库。

寿命考核方法:即将薄带拉出和回卷试验50000次,拉出速度低于每分钟30次,拉力负荷88N。

### 5.3.9 压缩机气阀弹簧的热处理

压缩机是一种重要的通用机械,无论是动力压缩机还是工艺流程压缩机,气阀都是压缩机的心脏。气阀是启闭气阀的功能部件,所以,它的质量好坏对压缩机运行性能有重要影响。气阀一旦失效(失效方式主要有早期断裂和应力松弛),将直接降低压缩机的功效,或使工艺流程不能正常运行,严重时会导致机毁人亡的恶性事故。压缩机的使用寿命要求达8千小时,但在70年代我国压缩机连续使用几十小时或几百小时后事故频繁,其中,气阀弹簧寿命短已成为压缩机行业的技术关键之一。

气体压缩机的工作介质有空气(空压机)、氧气、氢气、氮气及二氧化碳等。由于气阀结构的不同,气阀弹簧主要有两大类:一是用圆柱形压缩螺旋弹簧定位、分散安装在阀座内,上面顶着阀片作启闭运动;二是整体式网状弹簧片和阀片等完成

启闭工作,更简单的还有舌状弹簧片(小型压缩机使用)。分述如下:

#### 5.3.9.1 活塞式压缩机气阀弹簧的热处理

##### 1. 原生产工艺中存在的问题和改革方案

这类弹簧一般是圆柱形压缩螺旋弹簧(有两种端部结构:两端都磨平和一端磨平而另一端为平面绕成阿基米德螺旋线型。)其特点是簧丝径( $d$ )细小( $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ ),弹簧外形也较小,而且一只气阀座内分装3~20只阀簧。例如L8-60/7双缸两级复动式空压机中阀簧在较苛刻条件下工作,转速高(高达 $1470\text{r/min}$ ),工作介质温度 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ;设计时外圈环形阀片直径大,由十几只阀簧支承着两个阀片;内圈阀片直径较小,仅用几只阀簧支承阀片启闭。所以,工作时不平衡不能平稳,发生抖动和摇摆,因而使弹簧端圈或端部磨损折断或弯曲卡断等时有发生。

用退火态50CrVA钢丝制造阀簧的工艺路线:材料检验→冷卷成形→粗磨两端平面→粗调螺距→拼头(倒角)→精磨两端面→精调螺距、高度和垂直度→油淬火→清洗→定型回火→精调整→去应力退火→煮黑→检验,共14道工序。

原生产工艺工序繁杂,周期长,手工操作量大,热处理时极易变形,丝径细小的一串串弹簧加热、淬火,很难保证弹簧热处理质量;采用专门夹具进行定型回火时,大量能耗用在工夹模具上,加热时间长,回火后弹簧硬度分布不均,其变形仍然严重。每生产一只阀簧平均需1.2h,生产率太低,而生产成本很高,可以认为是一条“少、慢、差、费”的工艺路线。改革办法不应只看作是热处理工艺问题,而是要从阀簧生产方法、整个制造工艺过程中探求更好的技术去解决。

2. 新阀簧的制造工艺路线 当时,国内尚未生产过油淬火50CrVA钢丝,只能供应退火态材料,事实上至今仍不能供应力学性能合格、质量稳定的细规格(例如丝径 $0.5\text{mm}$ )的油淬火50CrVA钢丝。压缩机行业阀簧攻关组采用自行发明技术(见发明项目82--07--014):电接触快速加热、分级冷却、油淬、带温回火及回火后油冷工艺,获得了超细晶粒(ASTM11级以上)的油淬火50CrVA细规格钢丝,力学性能均匀稳定,保证了国内压缩机行业的需要。

阀簧的制造工艺路线:自动机卷簧→磨端面→去应力退火→防锈处理→包装入库。

表 5-31 新型油淬火钢丝与退火态钢丝热处理后力学性能比较

钢种	丝径 $d/\text{mm}$	热处理 方法	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	硬度 (HRC)	弯曲次数 <sup>③</sup> ( $r=25, 180^\circ$ )	扭转次数 ( $360^\circ, l=100d$ )	自绕 性能
50CrVA	0.5~1.3	油淬火回火丝 950~1000°C, 3~5s 440~500°C 回火 16s	1570~1680 (160~170)	46~50	11~17	14~28	良好
	0.9	原工艺 <sup>①</sup>	1380~1430	40~44	11~14	2~7	合格
		新工艺 <sup>②</sup>	1580~1620	46	6~8	15~29	良好
60Si2MnA	1.0~1.3	新工艺	1680~1780 (170~180)	48~52	11~20	21~23	良好
60Si2MnWA	0.5~1.0	新工艺	(160~175)	46~50	7~8	21~24	良好
	1.0	原工艺	1540~1570	46~48	3~6	4~6	合格
		新工艺	1570~1720	47~50	7~8	21~24	良好
4Cr13	0.5~1.7	新工艺: 1050~1100°C, 3~5s, 400~520°C 铅浴 回火 16s	(158~166)	44~47	5	17~22	良好

① 原工艺: 900°C 盐浴炉加热 80s, 油淬, 380~400°C 空气炉中回火 30min。

② 新工艺: 电接触快速加热到 950~1050°C, 370°C 等温, 淬火油淬火, 连续在 360°C 铅浴炉中回火 16s。

③  $d < 0.8\text{mm}$  者不测弯曲、扭转次数, 只测带扣拉力, 其值达到破断力的 58%~62%, 新型油淬火钢丝均能达到这项指标。

和原工艺路线比较, 主要区别是将阀簧的热处理(淬、回火)改为对原材料先进行油淬火一回火后再卷制成簧。它显著缩短了生产周期, 工序减少了, 完全避开了小弹簧小批量周期性热处理过程所带来的许多技术难点, 改为钢丝的连续热处理。只要钢丝热处理后的质量好, 力学性能稳定, 冷卷簧性能良好, 就可能减少大量的手工劳动, 大幅度提高劳动生产率和阀簧的质量及使用寿命。表 5-31 列出了两种热处理方法所得钢丝的力学性能比较。由该表中数据可知, 新型阀簧钢丝的特点是强韧性比原工艺处理好得多。而且表面质量好, 呈深蓝色, 光亮, 无氧化脱碳, 置于室内储存一年不生锈, 扭转疲劳寿命高。这种钢丝具有优良的自动机冷卷簧性能(见表 5-32)。

由表 5-31 及表 5-32 可见, 新工艺生产的阀簧钢丝能卷制出合乎技术要求的弹簧, 并具有优异的力学性能, 生产成本每只 6 元降到不足 0.2 元。经过 20 多年的运行考验, 对于铁道上用 NPT 空压机(阀簧丝径为 0.5mm50CrVA)气阀弹簧的使用寿命由几十到几百小时提高到 8000h; 对于油漆厂用 4L44/2 型工艺压缩机阀簧(丝径为

1.3mm50CrVA)的使用寿命由 500h 左右提高到 17200h; 对于煤矿用 L5.5—40/8 空压机新阀簧使用寿命平均达 9000h。这是一条多快好省的工艺路线。

表 5-32 两种工艺处理钢丝(50CrVA)冷卷簧性能比较

序号	冷卷簧技术指标	退火态钢丝	新工艺油 淬火钢丝
1	弹簧自由高度的变化	~1.5mm	~0.4mm
2	弹簧圈数的变化	±0.5 圈	几乎不变
3	弹簧外径的椭圆度	0.1mm	几乎不变
4	弹簧外径的变化	0.4mm	几乎不变
5	弹簧螺距的变化	不均匀度 达 0.4mm	均匀
6	弹簧拼头性能	不好	好

### 5.3.9.2 压缩机网状弹簧片的热处理

1. 网状弹簧片的结构特点、受力条件、钢材选择及制造工艺路线 石油工业用 2V—6.5/12 型空压机中使用网状气阀, 其弹簧片系 圆形薄

件,四个象限内各有一个按一定弧度翘起的簧爪(见图5-10)。它与上述环状阀比较,其优点是弹性线性线好、气流阻力较小、温升低、摩擦小等;缺点是结构复杂、制造困难。弹簧片簧爪根部、阀片中环与环连接处均存在应力集中现象。由于簧爪承受弯曲应力,并有撞击及颤动等,故其失效方式一般在应力集中的根部或附近断裂。另一种失效方式是应力松弛,使簧爪翘起的高度逐渐降低。即降低压缩机的效率。



图 5-10 网状弹簧片的实物照片

网状弹簧片选用厚 0.5mm 宽 100mm 65Mn 退火钢带制造,原始组织为粒状珠光体,力学性能见表 5-33。由表中数据可知,原材料有各向异性特征。为了保证弹簧片四个簧爪具有相同的性能,冲载簧片毛坯时应取 45°向。

表 5-33 退火态 65Mn 薄钢带不同取向的力学性能

抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa			伸长率, $\delta$ (%)			弯曲次数			硬度 (HRC)
纵向	斜45°	横向	纵向	斜45°	横向	纵向	斜45°	横向	任意
910	807	801	9.9	9.6	8.6	10	10	3.7	24

网状弹簧片制造工艺路线:冷冲成圆片毛坯→去毛刺→淬火(检验)→回火(检验)→热定型

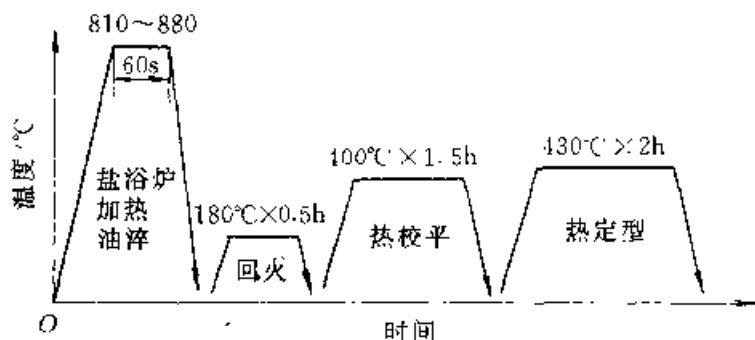


图 5-41 工厂原工艺曲线热处理及热定型

→切开簧爪→热定型(检验)→表面处理→成品入库。

2. 网状弹簧片的热处理工艺 工厂采用的热处理及热定型工艺见图 5-41。该工艺的特点:工序繁杂、生产周期长、簧片的硬度不足(37HRC),观察其组织是同火马氏体,但已出现再结晶迹象。没有注意簧爪取向问题等,这些是弹簧片使用寿命短的主要原因。

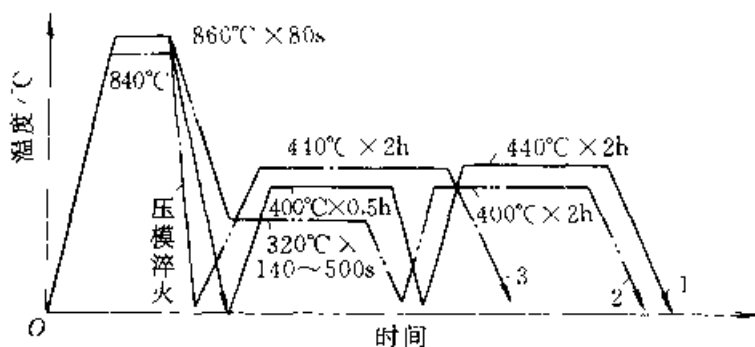


图 5-42 65Mn 钢网状弹簧片改进的三种热处理工艺

1—淬回火工艺 2—等温淬火工艺

3—光亮模压淬火工艺

图 5-42 中列出了三种改进工艺:

1) 淬、回火工艺(实线):860℃盐浴中加热 80s,油淬,400℃回火 0.5h—440℃×2h 热定型。

2) 等温淬火工艺(双点划线):860℃盐浴炉中加热 80s 后淬入 320℃硝盐浴炉中等温 140s—400℃×2h 热定型。

3) 光亮模压淬火工艺(点划线):在 840℃保护气氛炉中加热 3min,后取出模压(模内水冷)—440℃×2h 热定型。

随炉试样处理后的力学性能及疲劳寿命见表 5-34。由该表可知,三种新工艺比原工艺可获得相等或更好的力学性能和疲劳寿命,却减少了工序,

缩短了生产周期(由 4h 缩短到 2h 左右),节约能耗,减轻了劳动强度。特别是光亮模压淬火+热定形的生产方法,处理后的网状弹簧片表面光洁、平整、硬度分布更加均匀稳定,减少了清洗和热压平工序。因厚度仅为 0.5mm 的圆形弹簧片采用这种淬火方法后能确保质量,内应力亦小,可将回火和热定型工序结合起来,更为省事。

表 5-34 随炉试样处理后的力学性能及疲劳寿命

序号	热处理及热定型工艺	HRC	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta$ (%)	弯次 (纵向)	弯曲疲劳试验 $10^6$		300h 实物 模拟实验
						$N_0^*$	$N_f^{**}$	
1	淬回火工艺	42	1421	6.7	36	7.26	8.16	无裂纹
2	等温淬火工艺, 等温 140s	44	1524	6.5	41	9.22	10.45	无裂纹
	等温淬火工艺等温 500s	43	1408	6.9	38	5.26	6.21	
3	光亮模压淬火工艺	40~42	—	—	—	—	—	—
4	工厂原工艺 (图 5-41)	37	—	—	—	—	—	有一片出现裂纹

\*  $N_0$  裂纹萌生期。

\*\*  $N_f$  - 疲劳寿命, 名义应力 324MPa, 数据为 4~5 个试样之平均值。

表 5-35 边缘条件对弹簧片  $N_0$  的影响 (名义应力  $\sigma_{\max} = 324\text{MPa}$ )

弹簧片的 边缘条件	有 缺 口 试 样		无 缺 口 试 样		
	V 形	U 形	冲裁	钝平	磨光
$N_0$ 次数	$7.26 \times 10^3$	$4.75 \times 10^6$	$8.23 \times 10^5$	$1.39 \times 10^7$	$> 2.88 \times 10^7$

为了进一步提高薄弹簧片的疲劳寿命, 改善其边缘条件, 延长裂纹萌生期 ( $N_0$ ) 有重要意义, 表 5-35 中列出了不同边缘条件对  $N_0$  的影响。由此表中数据可知, 弹簧片的边缘条件对其裂纹萌生期  $N_0$  有重要影响。因此, 对于网状 (也包括舌状) 弹簧片的生产最后应增加一道光整或抛光工序。

### 5.3.10 卡簧的热处理

卡簧或卡圈是线弹簧中最简单的一种零件, 如图 5-43 所示。材料截面有圆形、矩形两大类, 端部结构有不同样式: 端部平齐、或带弯曲、有同心和偏心的等等。

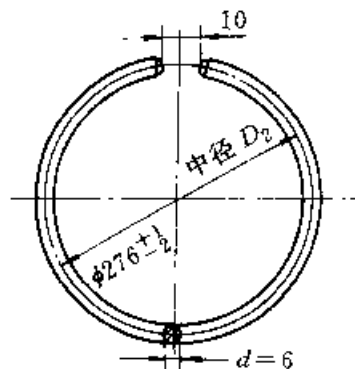


图 5-43 卡簧 (圈) 的基本形状

#### 5.3.10.1 拖拉机卡圈的选材及制造工艺路线

拖拉机用卡圈结构简单。由冷拔碳素弹簧钢丝制造 ( $\frac{11-6-GB342-82}{70-B-GB4357-84}$ )，其制造工艺有两种：

(1) 单体成形：定尺下料 → 冷卷成形 → 端部加工及整平 → 去应力退火 → 煮黑 → 检验 → 成品包装入库。

(2) 连续成形：盘料通过自动卷簧机或用车床密绕成形 → 单个卡簧切断 → 磨两端面、去毛刺 → 整平 → 去应力退火 → 检验 → 表面防锈处理 → 成品入库。

上述两种生产工艺各有优缺点，单体生产时工序繁，料头多、生产率低，但整形容易；连续密绕成形时生产率同、料夹少，由于冷卷时有较大内应力，故整平较困难。但可设计专用夹具，将去应力退火与热定型结合起来，可显著减少整平工作量，并提高卡簧的制造精度。

这种卡簧热处理工艺简单，只需进行去应力退火，具体工艺为：硝盐浴炉  $320^\circ\text{C} \times 20\text{min}$ 。

#### 5.3.10.2 后油牙轮钻头用卡簧的热处理

牙轮卡簧是钻头中一个非常重要的零件，它一旦失效（断裂或松弛），将导致钻头掉入油井的严重事故，造成很大损失。因此，对牙轮卡簧的质量要求非常严格。

1. 卡簧技术要求、用钢及制造工艺路线 由卡簧丝径不同有十几种规格, 选用不同的钢种制造。尺寸较小者 ( $d \leq 5.3\text{mm}$ ) 选用 75 钢制造; 尺寸较大者 ( $d \geq 5.4\text{mm}$ ) 选用 50CrVA 或 55SiCrA 钢丝制造。

卡簧的技术要求主要靠热处理工艺来实现, 具体内容如下:

(1) 卡簧成形后进行等温淬火, 用 55SiCrA 等油淬火钢丝制造时, 冷成形后只进行  $260 \sim 288^\circ\text{C}$  去应力退火处理。

(2) 表面磷化处理后再在防锈油中浸泡。

(3) 硬度要求应符合表 5-36。

表 5-36 不同丝径的卡簧对硬度的要求

卡簧料径 $d/\text{mm}$	2.0~4.2	4.2~5.0	5.0~5.4	5.4~8.0
硬度(HRC)	50~55	48~54	47~54	47~54

(4) 金相组织, 经等温淬火者应是均匀的下贝氏体; 用油淬火钢丝制造者应是均匀的回火马氏体。

(5) 检验, 卡簧应符合图样尺寸及公差要求, 卡簧表面应光滑、无铁锈及氧化皮和脱碳等缺陷, 如小坑、刻痕、薄片、接缝、擦伤及裂纹等。其最大深度不得超过料径的 3.5%。

(6) 卡簧应进行压缩试验。例如: 卡簧 (料径  $d=6.20\text{mm}$ ) 经压缩恢复后应超过卡簧槽直径 ( $86.61 \pm 0.05\text{mm}$ ) 1.524mm。

(7) 卡簧应作扭曲试验, 用卡钳夹住一端、另一端扭转, 其扭转角应大于  $180^\circ$  为合格。

(6) 和 (7) 两项试验应各取三个试样。

牙轮卡簧的制造工艺路线有两种:

(1) 油淬火—回火钢丝→冷卷成形→端部加工→去应力退火→强压(弯)处理→检验→表面磷化和浸油→成品包装入库。

(2) 退火态磨光料 50CrVA→检验→冷卷簧→端部加工→淬火→回火→预压缩处理→检验→表面磷化和浸油→成品、包装入库。

2. 卡簧的热处理工艺 卡簧等温淬火工艺见表 5-37, 处理后的力学性能和普通淬火—回火者比较见表 5-38。

表 5-38 说明了在三种弹簧钢制卡簧经不同热处理的工艺中, 以 75 钢的等温淬火的综合力学性能最好, 50CrVA 及 55SiCrA 也存在类似规律, 但不如 75 钢那样显著。不过, 低合金弹簧钢可制成规格较粗的油淬钢丝, 更便于制造卡簧。

卡簧经过上述热处理后仍不能满足对压缩试验的要求, 还应进行预压缩处理 (采用合适的预压工艺) 后才能满足其应力松弛的性能要求。

表 5-37 卡簧等温淬火、回火工艺

钢种	淬火加热 温度 $^\circ\text{C}$	等温温度 $^\circ\text{C}$	等温时间 /min	硬度 (HRC)
75	800~850	260~280	10~20	48~52
50CrVA	860~900	300~320	30	48~52
55CrSiA	860~900	300~320	30	50~52

注: 回火温度和保温时间与等温温度和等温时间相同, 硬度几乎不变。

表 5-38 卡簧用钢经等温淬火和普通淬火 回火后力学性能的比较

钢种	热处理工艺	硬度 (HRC)	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	伸长率 $\delta(\%)$	断面收缩率 $\psi(\%)$	冲击韧度 $\alpha_K/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
75	贝氏体等温淬火	50.4	2010	1020	1.9	34.5	48
	淬火、回火	50.2	1750	870	0.3	6.7	4
50CrVA	860 $^\circ\text{C}$ 加热 300 $^\circ\text{C}$ 等温 30min	46		$\sigma_{0.01}=1060$	—	—	—
	另加 300 $^\circ\text{C}$ 补充回火	46	—	$\sigma_{0.01}=1246$	—	—	—
	860 $^\circ\text{C}$ 淬火+300 $^\circ\text{C}$ 回火 1h	45~50	>1470	$\sigma_{0.01}=824$	>8	≥40	—
55SiCrA	890 $^\circ\text{C}$ 等温淬火	50	1950	1725	10	46	73.5
	另加 -325 $^\circ\text{C}$ 回火	50.5	1920	1770	8.3	45	50.0
	870 $^\circ\text{C}$ 油淬+400 $^\circ\text{C}$ 回火	51	1980	1830	7.5	38	37.1



### 5.3.11 汽车风挡玻璃雨刮器胶条弹簧的热处理

#### 5.3.11.1 胶条弹簧的性能要求, 材料选择及制造工艺路线

汽车风挡玻璃雨刮器是保证司机在雨天安全行车的重要配件。胶条弹簧的服役条件是在雨水或大气中工作。要求耐蚀性能好, 有足够的弹性, 否则, 胶条与玻璃压不紧, 雨水刮不净。但弹力又不宜过高, 使胶条与玻璃之间摩擦力过大, 增加了电动机负荷。一般选用不锈钢 (如 1Cr18Ni9Ti、17-7PH 及 15-7MoPH 钢等) 制造。不同型号雨刮器用片弹簧的规格也不一样。现以厚 0.6mm、宽 4.0mm、长 400mm 弹簧片为例, 选用厚 1.0mm 的 17-7PH 钢带材制造, 其制造工艺路线如下:

固溶处理 → 冷变形 60% → 下料 → 去毛刺 → 端部加工 → 时效强化 → 表面钝化处理 → 检验 → 成品包装入库。

#### 5.3.11.2 弹簧片的热处理工艺

17-7PH 和 PH15-7Mo 为典型的沉淀硬化不锈钢, 采用 CH 处理, 其工艺曲线见图 5-44。两种钢经不同时效温度处理后的力学性能见图 5-45。由该图可见, 选择 480℃ × 1h 时效工艺是合理的。

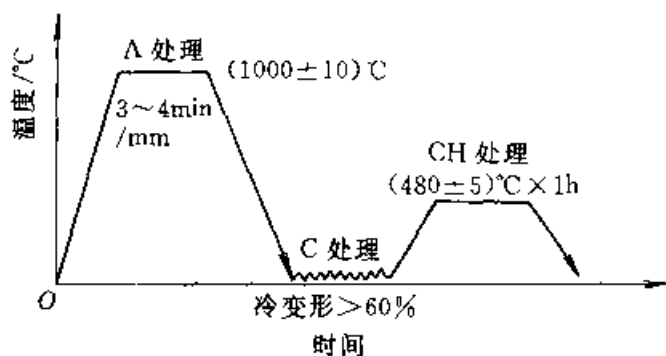


图 5-44 17-7PH 和 PH15-7Mo 制弹簧片的 CH 处理工艺流程

钝化处理可进一步提高弹簧片的耐蚀性。未经钝化者的腐蚀速率为  $14\text{g/h} \cdot \text{m}^2$ ; 而经钝化处理者为  $11.07\text{g/h} \cdot \text{m}^2$ 。

雨刮器胶条弹簧片应进行台架试验: 包括抗震试验 ( $1750\text{次/min} \times 1\text{h}$ )、耐蚀试验 (喷水)、刮净试验和耐久试验。结果表明, 选用 PH 钢制造的胶条弹簧通过了 150 次的耐久试验, 达到了汽车

部门提出的全部技术要求。

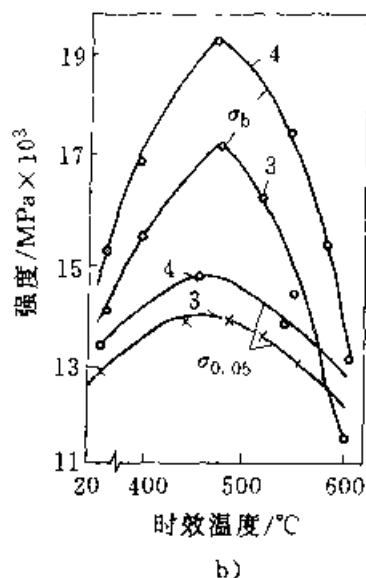
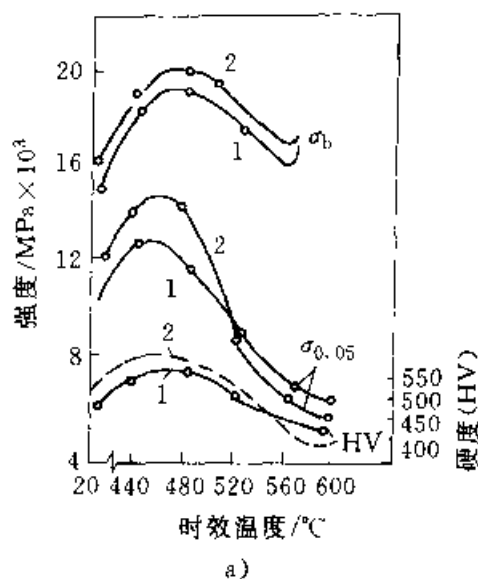


图 5-45 时效温度对 17-7PH (a) 及 PH15-7Mo (b) 经 CH 处理后力学性能的影响

1、2—炉号为 17-7PH 钢;  
3、4—炉号为 PH15-7Mo 钢

### 5.3.12 耐热弹簧的热处理

耐热弹簧在较高温度下长期工作, 对其材料性能要求是: 有足够的高温强度和良好的抗氧化、抗应力松弛性能。根据工作温度高低来选用耐热弹簧钢或耐热合金 (见表 5-17)。

#### 5.3.12.1 W18Cr4V 钢制耐热弹簧的热处理工艺

军用耐热压缩螺旋弹簧选用银亮高速钢 (料径  $d=9, 12, 16\text{mm}$ ) 三种) 制造。热处理后硬

度要求达到 45~50HRC, 在并圈状态下置于 200℃ 的恒温炉中 2h, 在工作负荷下置于 428℃ 的恒温炉中 5h, 经五次全压缩 (压并) 后其变形量不超过自由高度 ( $H_0=98.5\text{mm}$ ) 的 2%。

制造工艺路线: 下料→热成形→整形→磨端面→退火→调整→淬火→回火→热强压处理→检验→防锈处理→成品包装入库。

为了达到该簧的性能要求, 不宜采用 W18Cr4V 高速钢的常规热处理工艺, 而改用如下强韧化工艺 (见图 5-46), 具体工序:

(1) 预备热处理 (退火), 弹簧热成形后将两端磨平、调整预制高度 (比  $H_0$  稍大) 和垂直度, 在 740℃ 进行 2h 退火、炉冷到 500℃ 以下出炉。

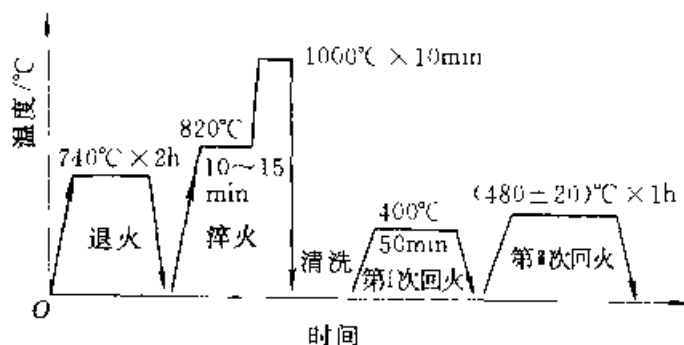


图 5-46 W18Cr4V 钢制耐热弹簧的强韧化工艺

(2) 淬火: 在 820℃ 预热 10~15min 后放入高温盐浴炉中加热到 1000℃ 保持 10min, 再于 100℃ 淬火油中淬火。得到合金元素 (W、Cr、V) 含量不高的低碳马氏体, 硬度为 55HRC 左右。

(3) 回火: 第一次回火工艺: 400℃×50min; 第二次: 480℃×1h, 硬度为 (50±2) HRC。

(4) 热定型 (热强压处理), 按图样要求的工艺进行两次热定型: 第一次将簧压缩到接近并紧状态 (仍低于工作变形量) 在 200℃ 恒温箱中保持 24h; 第二次将簧压缩到最大变形后置于 430℃ 炉中保持 5h。经过上述处理后, 该簧全压缩的永久变形量 < 2%。

### 5.3.12.2 转子发动机刮片弹簧的热处理

1. 刮片弹簧的结构特点、服役条件、失效形式及其制造工艺路线 转子发动机是一种新型发动机, 它具有结构简单、重量轻、高速动力性能好等优点。转子发动机缸体 3 有一个三角形转子 4 (见图 5-47a) 转子的三个边把缸体分割成三个工

作室, 转子转动一周, 每个工作室依次进气、压缩、点火爆发到排气完成一个工作循环。为了保证密封, 转子的三角上都有一个刮片 5, 其刮片底部均有一个弓形刮片弹簧 6。它的作用是保证刮片始终与缸体内面贴合。由于刮片弹簧的工作质量直接影响到刮片与缸体贴合的密封效果, 直接影响到转子发动机的性能好坏, 因此, 刮片弹簧是转子发动机中一个关键性零件。其形状和具体尺寸见图 5-47b。

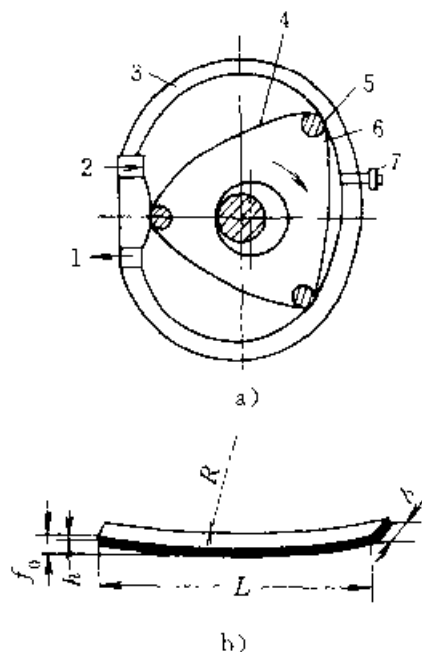


图 5-47 转子发动机结构 (a) 及刮片弹簧 (b) 示意图

1—排气口 2—进气口 3—缸体  
a) 4—转子 5—刮片 6—刮片弹簧  
7—火花塞

b)  $\left\{ \begin{array}{l} L—刮片弹簧长度 (62\text{mm}) \\ h—刮片弹簧厚度 (0.63\text{mm}) \\ b—刮片弹簧宽度 (4.93\text{mm}) \\ f_0—刮片弹簧自由高度, R—片簧弧度半径 \end{array} \right.$

由于刮片弹簧是在发动机燃烧室中工作, 工况条件相当恶劣: 工作温度长期处于 300~400℃, 还受到瞬时扫过表面的高温燃烧产物和进气、排气口冷热混合气体的交替作用, 故其受力情况比较复杂, 既有静载荷又有动载荷, 前者较大, 后者较小 (循环载荷) 可忽略不计; 所以, 刮片弹簧的主要失效形式是蠕变和应力松弛。

刮片弹簧的选材非常重要, 一些发达国家用高级材料制造。例如, 德国用钴基弹性合金 (Co40); 日本用 PH17-7 或 PH15-7Mo, 高温合

表 5-39 几种耐热合金制刮片弹簧在不同温度下夹平试验  
挠度 ( $f$ ) 及应力松弛率的比较

耐热合金牌号	热处理工艺及冷变形程度	在 320°C 下夹平 150h				在 400°C 下夹平 150h				在 550°C 下夹平 100h	
		$\Delta f$ mm	$\Delta f/f$ (%)	$\Delta\sigma$ Pa	$\Delta\sigma/\sigma$ (%)	$\Delta f$ mm	$\Delta f/f$ (%)	$\Delta\sigma$ Pa	$\Delta\sigma/\sigma$ (%)	$\Delta f/f$ (%)	$\Delta\sigma/\sigma$ (%)
3J1	1050°C 固溶 + 30% 冷变形 + 700°C $\times$ 40min 时效	0.084	1.40	11.27	1.56	0.813	13.6	109	15.1	—	—
3J3	1050°C 固溶 + 35% 冷变形 + 700°C $\times$ 4h 时效	0.068	1.13	9.11	1.28	0.56	9.3	75	10.4	—	—
GH2132 (A286)	1050°C 固溶 + 30% 冷变形 + 650°C $\times$ 4h 时效	0.048	0.72	5.78	0.21	0.21	8.4	27	3.8	—	—
GH4169 (718)	1000°C 固溶 + 720°C $\times$ 8h 时效 (55°C/h) $\rightarrow$ 620°C $\times$ 8h 时效									7	12

金 A286、65WMo 或弹性合金 3J3、3J1 等；国内试制时选用耐热弹簧钢 65WMo、弹性合金 3J1 及 3J3、PH15-7Mo、铁基耐热合金 0Cr15Ni25Ti2-MoVB (GH2132 或 A286) 及镍基耐热合金 NiCr19Fe18Nb5Mo3TiB (GH4169, 即 Inconel718) 制造。具体工艺: 固溶处理  $\rightarrow$  冷变形  $\rightarrow$  下料成形修边  $\rightarrow$  时效  $\rightarrow$  检验  $\rightarrow$  成品。

2. 刮片弹簧的热处理工艺 正确选材和热处理是决定刮片弹簧性能好坏的主要因素。不同的材料应选择其合适的热处理工艺。例如:

(1) 3J1 弹性合金制刮片弹簧的热处理工艺: 1050°C 淬火 (固溶处理) + 30% 冷变形 + 700°C  $\times$  40min 时效。

(2) 3J3 基本上与 (1) 相同, 只是冷变形量改为 35%。

(3) A286 耐热合金制刮片弹簧的热处理工艺: 1050°C 淬火 + 30% 冷变形 + 650°C  $\times$  4h 时效。

(4) GH4169 (Inconel718) 制刮片弹簧的热处理工艺: 950~1050°C  $\times$  1h 固溶处理 + 720°C  $\times$  8h 空冷 (55°C/h) + 620°C  $\times$  8h 空冷时效。

上述几种耐热合金制成的刮片弹簧经不同温度的夹平试验后挠度及应力松弛率 ( $\Delta\sigma/\sigma, \%$ ) 的比较见表 5-39。由该表中数据可知, 弹性合金 3J1、3J3 经正常热处理后仍不能满足刮片弹簧的性能要求, 容易导致应力松弛失效 (在 400°C 夹平 150h 后, 松弛率 ( $\Delta\sigma/\sigma, \%$ ) 都在 10% 以上。) GH2132 (即 A286) 尚可达到要求, 而镍基高温合

金 718 (GH4169) 性能更好, 在 550°C 夹平 100h 后挠度变化小于 10%。

工厂在 22120 型转子发动机上通过了 600h 的装机试验, 证明 GH4169 合金可满足性能要求。

### 5.3.13 电子表音叉的热处理

1. 电子表音叉的结构特点、选材及其制造工艺路线 由电子元件和音叉组成的振荡器比晶体管振荡器有许多优点: 制造方便、成本低廉, 又有很高的温度稳定性, 因而可省去恒温措施, 有利于设备的小型化和降低能耗。这一点对于空间技术的应用非常有利。目前已制造的 800~15000Hz 的音叉振荡器, 其精度已达  $1 \times 10^{-7}$ 。音叉固有频率的稳定性对手表定时的影响特别重要。音叉部件固有频率的变化与选用的材料密切相关, 采用铁镍恒弹性合金 3J58 制造音叉, 其外形及主要尺寸见图 5-48。技术要求:  $f=360\text{Hz}$ , 频率温度系数  $v_f \leq 3.0 \times 10^{-6}/10^\circ\text{C}$ , 机械品质因数  $Q \geq 5000$ , 它在装表前是否处于稳定状态是一个关键性技术难题。

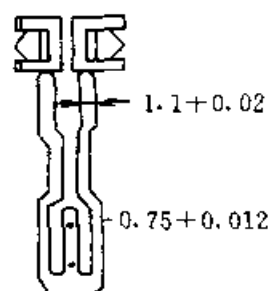


图 5-48 音叉外形及主要尺寸

音叉的制造工艺路线：线切割下料成形→焊铁环→时效处理→整形→稳定化处理→电抛光或电镀→钻簧柱孔→粘磁芯→银簧柱及调整片→粗调频率→老化处理→精调频率→老化处理。

2. 音叉件的时效处理、稳定化处理和老化处理

3J58合金是铁镍基沉淀硬化型弹性材料。热处理工艺：高温固溶处理（1050℃×20~30min）、水冷和60%冷变形轧成板料，用线切割法制成音叉。还应进行下列三种处理（时效、稳定化和老化）方能达到所要求的性能。

（1）时效处理工艺，音叉件的时效是在真空炉（真空度13.3Pa以下）内进行，时效温度在500~700℃范围内选择，保温时间均为3h。测得其频率系数（ $\nu_f$ ）、机械品质因数（Q）和维氏硬度（HV）值与时效温度的关系如图5-49所示。由此图可见，为了得到最小的 $\nu_f$ 、Q值最大，其时效工艺：610℃×3h。

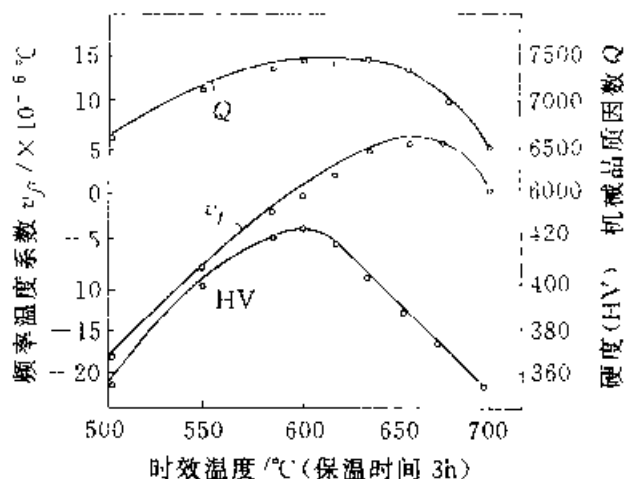


图 5-49 时效温度对 3J58 音叉件频率温度系数（ $\nu_f$ ）、机械品质因数（Q）及维氏硬度（HV）的影响

（2）稳定化处理工艺，稳定化处理的目的是消除音叉在时效及整形过程中产生的内应力。稳定化处理第一阶段工艺为 350℃×4h，使其内应力降低 50%~70%，但内应力的消除仍不充分；第二阶段工艺为 400℃×24h，使音叉件的漂移值减小。

（3）老化处理工艺

1) 音叉件经过 610℃×3h 的时效处理及 350℃×4h 的稳定化处理后在进行第一阶段的高低温老化或振动老化处理。研究证明：高低温循环

老化工艺的最高温度宜选 170℃，它和振动老化处理比较时，振动老化时前三天的漂移量较大：达  $22 \times 10^{-4}$ ，三天以后其漂移渐趋于平稳。而 170℃⇌-50℃高低温循环老化处理的音叉，从开始其频率漂移量就较小，两周内的最大漂移量为  $5.7 \times 10^{-4}$ 。因此，选定 170℃⇌-50℃（各保温 1h）为高低温循环 20 次的老化处理工艺。

2) 居里点上下加热的高低温循环老化工艺：

高温（130℃⇌170℃）反复两次→室温→低温[-（15℃~50℃）]，不同温度下各保温 1h，循环两次。

3) 振动老化工艺：70℃大振幅振动 8 天，室温下小振幅振动 4 天。大振幅振动时，线圈感应电势为 1.2~1.5V；小振幅振动时相应为 0.65~0.2V。

## 5.4 弹簧的特殊处理

弹簧生产过程中除与上述材料与热处理有密切关系外，在达到成品之前，往往需进行一些特殊处理才能使弹簧有满意的使用性能。其中，喷丸强化处理和离子渗氮能进一步提高弹簧的疲劳寿命，离子渗氮还可提高耐腐蚀性和耐热性；而强压（弯、扭、拉等）处理则是改善弹簧的抗应力松弛性能的有效方法。

### 5.4.1 弹簧的喷丸强化处理

喷丸处理是一种表面强化技术。弹簧是该工艺在生产上应用最早的典型零件之一，特别是那些承受循环载荷、容易发生疲劳损坏的各种压缩螺旋弹簧、板簧和扭杆弹簧等都进行喷丸处理。喷丸一般安排在弹簧成形及热处理后进行。通过这种工艺不仅可以减轻或消除弹簧表面缺陷（如小裂纹、凹凸、缺口及表面脱碳等）的有害作用，而且达到规定的喷丸强度和表面覆盖率时，在其表层产生循环的塑性变形、加工硬化和有益的残余压应力，从而有效地提高弹簧的疲劳寿命。喷丸操作是采用小金属球丸以每秒数十米的速度，频繁地喷射到弹簧表面上，使它产生许多小压坑，呈均匀细小鼓包状（犁地状），覆盖在弹簧的表面层。

#### 5.4.1.1 喷丸处理的基本要素

1. 喷丸种类和规格 对弹簧进行喷丸处理所用的弹丸一般有下列几种：硬钢丝切断丸、铸铁

丸、铸钢丸及有机玻璃丸等。弹丸的直径为 1.3~1.7mm, 由直径小于 3mm 的钢丝制造的轻型压缩弹簧, 采用直径为 0.4mm 钢丸, 由直径为 3~6mm 钢丝制作的中型压缩弹簧, 采用直径为 0.7mm 钢丸, 对于重型弹簧采用直径为 0.8mm 钢丸。

用硬钢丝或琴钢丝切断成长度等于丝径的圆柱形钢丸, 由于棱角锐利, 不宜用来喷丸处理弹簧, 而要先空运转一定时间后, 待棱角变钝、接近球形, 才能正常使用。在生产过程中, 由于旧丸的消耗, 必须补充一定数量的新钢丸, 此时要注意单位时间的投射量, 减少新丸的有害作用。铸钢丸的特点是单价较高, 而使用寿命较长, 消耗量较少。如果铸钢丸碎成几块, 单个重量将显著减小, 而且形成新的尖锐棱角。为了保证原有的喷丸效果, 必须通过筛选, 获得良好的钢丸。

喷丸处理一般分自由喷丸和应力喷丸两种。前者弹簧处于自由状态下喷丸, 后者弹簧处于应力状态下喷丸。喷丸强化效果与其工艺(如丸的直径、喷丸机的结构特点、喷射速度与时间及喷丸强度等因素)密切相关。喷丸强度用标准试片(Almen 片)的弧高度值表示。对于不同的喷丸强度范围, 采用三种厚度不同的标准试片: A 型试片厚度  $t=1.295\text{mm}$ , 相当于中等喷丸强度(应用较多); C 型试片厚度  $t=2.388\text{mm}$ , 常用于高喷丸强度; N 型试片厚度  $t=0.787\text{mm}$ , 用于低喷丸强度。例如, 喷丸强度 0.37A 表示用 A 型试片的弧高值为 0.37mm, 余下类推。

2. 喷丸机械 喷丸机通常由下列几部分构成: 弹丸加速装置(如离心式及气喷式)、弹丸循环装置、弹丸分离装置、弹丸补充装置和操纵被加工零件运动的装置等。

#### 5.4.1.2 弹簧表面喷丸处理条例

1. 螺旋弹簧的喷丸处理 拉伸螺旋弹簧很少进行喷丸处理, 而压缩螺旋弹簧(特别是汽门簧及缓冲簧)通过合适的喷丸处理后能显著提高其疲劳极限和使用寿命。例如, 用各种阀门弹簧钢丝冷卷成如下规格的汽门弹簧(丝径 3.8mm、缠绕比 6、 $n_s=7.5$ )去应力退火温度: 油淬火钢丝皆为 400℃、琴钢丝为 275℃, 保温时间皆为 30min。疲劳试验机的转速为 4000r/min。每个弹簧在室温下(试验时的应力: 汽门关闭时为  $\tau_{\min}$ , 打开时承受的应力最大  $\tau_{\max}$ , 并按正弦曲线循环变化)进行

疲劳试验。循环次数达  $15 \times 10^6$  而不破坏。由试验测得的 Goodman 图见图 5-50。由该图可看出, 各种油淬火钢丝和琴钢丝制作的汽门弹簧有近似的疲劳强度, 但是, 经过超细晶粒处理的钢丝弹簧具有更高的疲劳强度。应强调指出的是, 弹簧经过合适的喷丸处理后, 其疲劳强度明显增加(提高约 20%~30%)。如从抗应力松弛性能比较, 在 120℃ 试验时, 其抗应力松弛性能最好的是硅铬油淬火钢丝, 铬钒钢丝次之, 油淬火碳素钢丝又次之, 而冷拔硬钢丝和琴钢丝制弹簧最差。

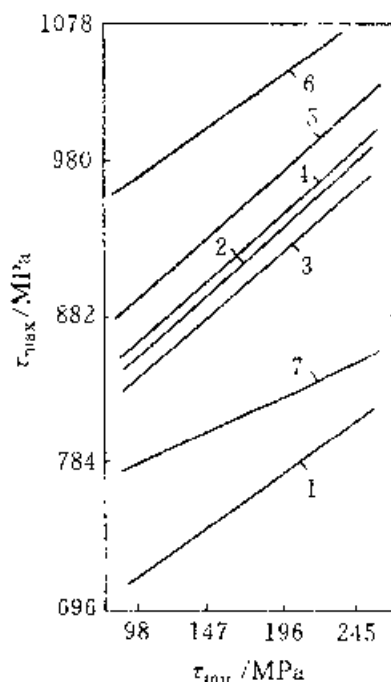


图 5-50 各种材料制阀门弹簧的疲劳性能 (Goodman 图) 对比

- 1—琴钢丝(未喷丸) 2—琴钢丝(已喷丸)  
3—油淬火碳素钢丝(喷丸后) 4—油淬火硅铬钢丝(喷丸后) 5—油淬火铬钒钢丝(喷丸后) 6—超细晶粒油淬火钢丝(喷丸后) 7—超细晶粒油淬火钢丝(未喷丸)

图 5-51 为优质弹簧钢制造的热成形压缩螺旋弹簧经喷丸处理前后疲劳性能的对比; 图 5-52 为用阀门油淬火铬钒钢丝冷卷螺旋弹簧经喷丸处理前后的疲劳图。两图中的虚线为未喷丸、而实线为已喷丸, 实线皆在虚线的上方, 这表明喷丸处理有效地提高了弹簧的疲劳强度。例如, 50t 货车用缓冲压缩螺旋弹簧(料径 30mm), 在初载荷 2842N、最大载荷 48990N 条件下工作, 未喷丸时的平均寿命只有 44.4 万次; 经喷丸后可达 237.8 万次, 即寿命提高 5 倍以上。

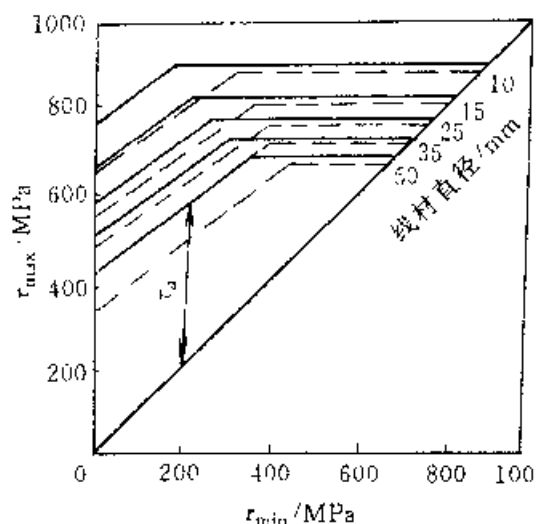


图 5-51 热卷螺旋弹簧的疲劳性能 (Goodman 图)

—— 经喷丸，断裂加载次数：\$N=10^5\$  
 ···· 未喷丸，断裂加载次数：\$N=2 \times 10^6\$  
 材料：优质弹簧钢，钢材表面经磨光或剥皮  
 螺距大于料径

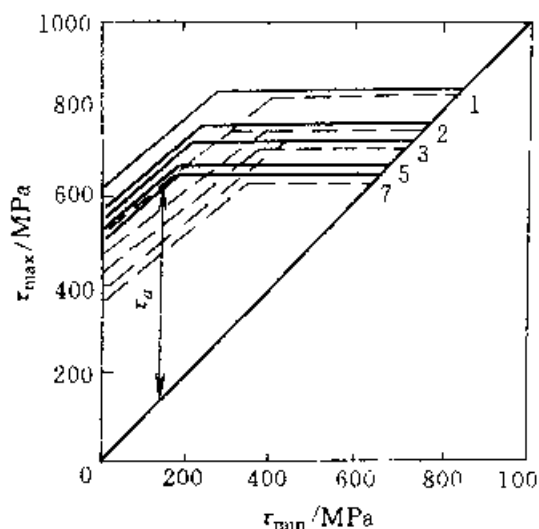


图 5-52 冷卷阀门弹簧 (铬钒油淬火钢丝制) 的疲劳性能 (Goodman 图)

—— 已喷丸 断裂加载次数：\$N=10^7\$  
 --- 未喷丸

用沉淀硬化型不锈钢 (Cr12Mn5Ni4Mo3Al) 绕成压缩螺旋弹簧进行对比试验，两种弹簧尺寸：外径为 18、14 (mm)、丝径 \$d=3\$、2 (mm)，螺距 \$t=5.6\$、5 (mm)，自由高度 \$H\_0=57\$、30 (mm)、喷丸时应使其表面 (特别是弹簧内表面) 喷丸良好，即覆盖率应达饱和程度，保证弹簧内外表面均形成一定深度的均匀残余压应力层，如图 5-53 所示。由该图可见，当喷丸的喷射强度为

0.4mmN 时，弹簧内外表面均具有最大的残余压应力，因而它的疲劳寿命也最高 (见图 5-54)。

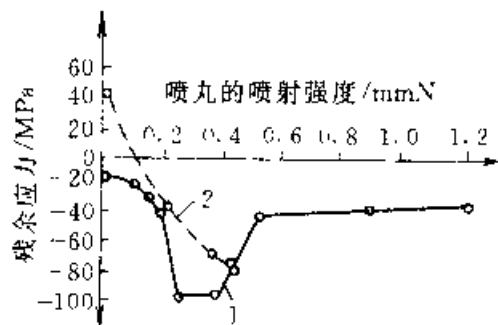


图 5-53 喷丸对 Cr12Mn5Ni4Mo3Al 沉淀硬化不锈钢 (\$d=2\text{mm}\$) 冷卷压缩螺旋弹簧残留应力的影响

1 弹簧外表面 2 弹簧内表面

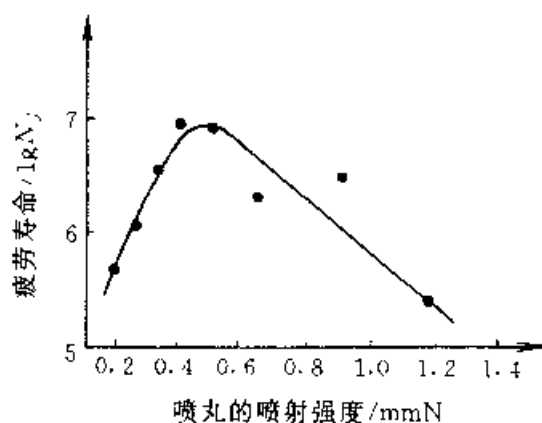


图 5-54 喷丸的喷射强度对 Cr12Mn5Ni4-Mo3Al 不锈钢弹簧疲劳寿命的影响

弹簧尺寸：丝径 \$d=2\text{mm}\$，\$D=14\text{mm}\$，  
 \$H=30\text{mm}\$，\$t=5\text{mm}\$，\$C=6\$  
 试验条件：\$\tau\_{max}=1095\text{MPa}\$，应力比 \$r=0.1\$，  
 频率 \$f=1200\text{次/min}\$

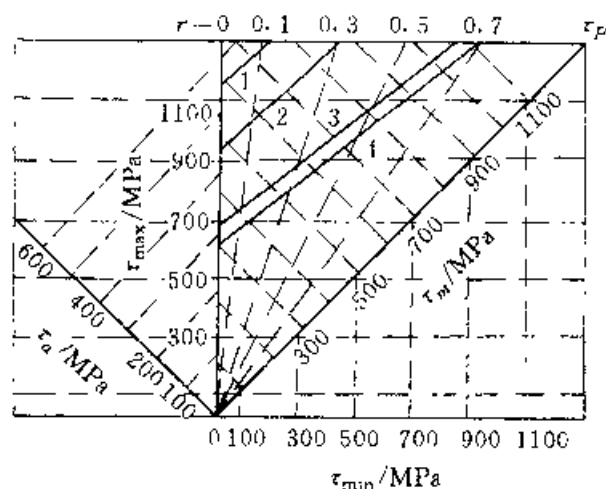


图 5-55 沉淀硬化型不锈钢 (Cr12Mn5Ni4-Mo3Al) 弹簧喷丸前后的 Goodman 图<sup>(4)</sup>  
 丝径 \$d=2\text{mm}\$

图 5-55 为丝径  $d=2\text{mm}$  的 Cr12Mn5Ni4-Mo3Al 不锈钢卷制的弹簧经喷丸前后的 Goodman 图。如前所述, 沉淀硬化型不锈钢弹簧经喷丸后比未喷丸者具有更高的疲劳强度和疲劳寿命。

图 5-56 为冷拔强化的 1Cr18Ni9 不锈钢弹簧 (丝径  $d=3\text{mm}$ ) 的  $S-N$  曲线。该曲线同样表明, 喷丸处理能有效地提高其疲劳强度。

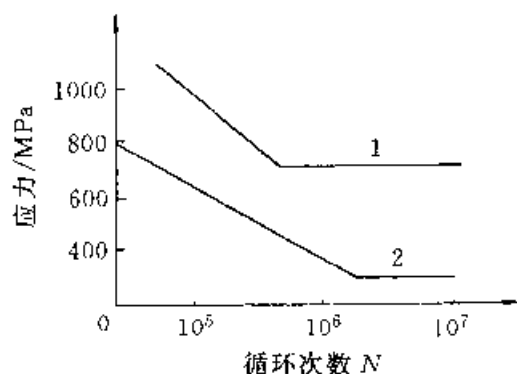


图 5-56  $\phi 3.0\text{mm}$  1Cr18Ni9 不锈钢丝卷制弹簧的  $S-N$  曲线  
1—喷丸后 2—未喷丸

2. 板簧的喷丸处理 板簧通常仅对其凹面喷丸。喷丸时, 使板簧的弧高降低, 所以, 板簧成形时应适当增加弧高。汽车行业规定, 板簧必须进行喷丸处理后才能使用。现已采用了两种工艺: 自由喷丸和预应力喷丸。另一方面, 板簧的热处理质量 (特别是其表面质量) 对喷丸工艺也有重要影响。现以 60Si2Mn 板簧经不同表面处理后进行喷

丸对比试验: 自由喷丸板簧截面为  $6.2\text{mm} \times 69.5\text{mm}$ ; 预应力喷丸板簧截面为  $7.2\text{mm} \times 69.5\text{mm}$ 。采用两种喷丸设备: 工厂生产用的机械离心式喷丸机和实验室用的气动式喷丸机。原表面喷丸时用  $\phi 0.8\text{mm}$  钢丝丸, 喷丸强度约  $0.60\text{A}$ ; 经处理的表面喷丸时用  $\phi 0.6\text{mm}$  铸钢丸, 喷丸强度为  $0.50\text{A}$ 。采用 X 射线应力仪测定沿钢板深度 ( $\delta$ ) 各层的残留应力 ( $\sigma_r$ ) 的分布, 结果见图 5-57。各试样  $\sigma_r-\delta$  曲线上采用如下的特征值 (见表 5-40)。由图 5-57 及表 5-40 中数据可见, 板簧在空气中加热时将引起表面脱碳, 其深度 ( $\delta_c$ ) 达  $0.35\text{mm}$ ; 如采用感应淬火时, 可将其脱碳层深控制在  $0.09 \sim 0.12\text{mm}$  范围内。在相同喷丸工艺条件下可形成较高的表面残余压应力 ( $\sigma_{rs}$ ), 应力喷丸后的  $\sigma_{rs}$  比自由喷丸者略高。如果弹簧表面有脱碳层存在时, 其  $\sigma_{rs}$  均不能达到无脱碳层自由喷丸那样高的  $\sigma_{rs}$  ( $\sim 560\text{MPa}$ ), 无脱碳面自由喷丸的  $\sigma_r$  值比有脱碳者 (包括自由及应力喷丸) 分别提高  $70\%$  和  $27\%$ 。对比试验说明, 生产现行喷丸工艺仍有待进一步改善。

从应力喷丸与自由喷丸比较, 前者的残余压应力场深度 ( $\delta_0$ ) 比后者要大一倍。在自由喷丸条件下,  $\delta_r$  值随喷丸强度的增大而加深, 但在应力喷丸条件下,  $\delta_r$  值基本上不随预应力值的高低而发生明显变化 (见图 5-58)。该图表明, 预应力喷丸主要影响表面至  $\delta_0$  深度范围内的残留应力值, 而

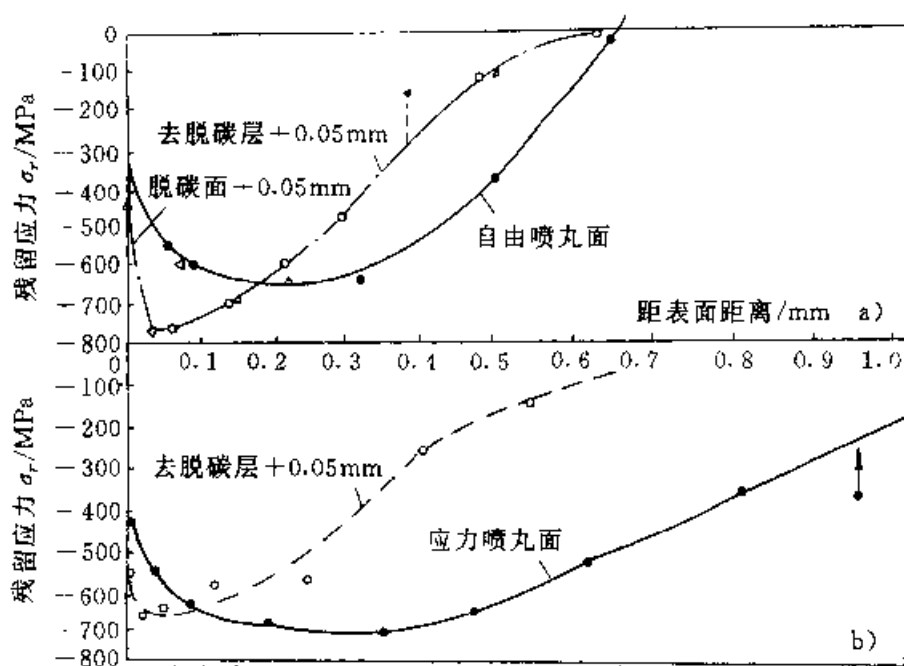


图 5-57 自由喷丸(a)和应力喷丸(b)三种板簧试样的  $\sigma_r-\delta$  曲线

对最高残余压应力值的深度  $\delta_r$  的影响不明显。提高  $\delta_r$  层以内的残余压应力水平, 能有效地把疲劳裂纹源推至残余拉应力附近萌生, 此处所加的工作应力 ( $\sigma$ ) 和残余拉应力相加, 便在板簧此处发生断裂失效。

板簧表面粗糙度越高, 其疲劳强度越低。由于板簧断裂源往往萌生于其侧面 (即厚度弯曲表面), 而现行喷丸工艺忽略了这一薄弱区域的喷丸, 这就削弱了喷丸强化的作用。为此, 针对现行工艺作进一步调整才能提高板簧的喷丸效果。

表 5-40 各板簧试样  $\sigma_r-\delta$  曲线上的特征值

喷丸方式	试样表面处理	$\sigma_{rs}$ /MPa	$\sigma_{rmax}$ /MPa	$\delta_i$ /mm	$\delta_0$ /mm	$\delta_c$ /mm
自由喷丸	自由喷丸面	-320	650	0.20	0.65	0.35
	无脱碳层：喷丸	-560	-760	0.05	0.60	—
	脱碳面+喷丸	-400	-760	0.05	0.60	0.35
应力喷丸	应力喷丸面	-440	-720	0.30	~1.20	—
	无脱碳层+喷丸*	560	-680	0.05	0.60	0.35
	脱碳面	~0	—	—	—	0.35

\* 去掉脱碳层后的喷丸为自由喷丸。

$\sigma_{rs}$ —表面残余压应力； $\sigma_{rmax}$ —最大残余压应力； $\delta_i$ —热处理时脱碳层深度； $\delta_0$ —残余压应力场深度； $\delta_c$ —最大残余压应力深度。

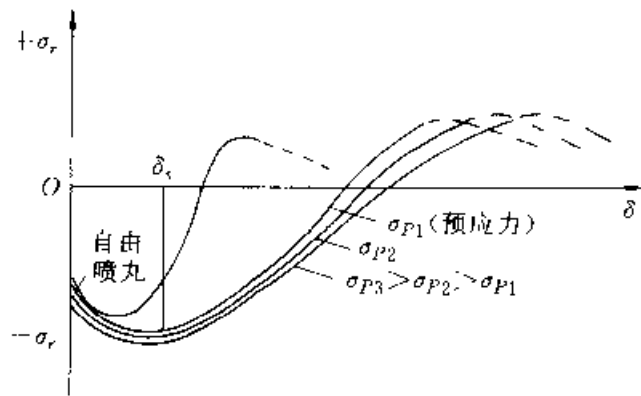


图 5-58 不同预应力喷丸和自由喷丸条件下的  $\sigma_r-\delta$  曲线示意图

表 5-41 为喷丸处理对 55Si2Mn 平板试样的疲劳极限及货车板簧寿命的影响。平板试样喷丸后比未喷者的疲劳极限提高 90%；货车用板簧的平均寿命提高 6 倍多。

某汽车弹簧厂针对 60Si2Mn 板簧（规格为 7×65×560（mm）、经 920℃ 淬火、480℃ 回火、硬度为 42~47HRC）进行喷丸处理（用 65 冷拔钢丝丸，丸径等于丝径（0.8~1.2mm），新丸占 50%（质量分数）。设备：离心式喷丸机，叶轮转速 2500r/min、喷射丸速度 70m/min，叶轮中心至试样喷射表面的距离为 0.5m，喷射角 45°，喷射作用时间：24s）、同时放入 AlmenC 试片弧高值米测定其喷丸强度；再对每片板簧进行疲劳试验，所得其平均疲劳寿命见表 5-42。由此表可知，在该试验条件下，喷丸强度为 0.18C 时，单片板簧的疲劳寿命最长。

应力喷丸可进一步提高板簧的疲劳极限（见表 5-43）。棱边喷丸良好亦可提高板簧的疲劳寿命（见表 5-44）。

表 5-41 喷丸对 55Si2Mn 平板试样及板簧使用寿命的影响

试样或板簧	试验条件		疲劳极限/MPa		寿命（平均）万次		注
			未喷丸	喷丸后	未喷丸	喷丸后	
平板试样	板簧表面脱碳层深 0.12 ~ 0.15mm	喷丸直径 0.4 ~ 0.6mm，转筒直径 500mm，转速 2250r/min，丸流量 100 ~ 120kg/min	474	903	—	—	板簧硬度，喷丸后 39.5 ~ 44.5HRC，未喷丸：30 ~ 32HRC
	钢板表面经过研磨		858		—	—	未喷丸板簧硬度，42.5 ~ 44.5HRC
货车用 12 片板簧	初载荷 68600N，最大载荷：在初载荷下再压下 20mm		—	—	6 ~ 35 (15.4)	65 ~ 130 (93.5)	未喷丸板簧 16 片喷丸板簧 8 片



表 5-42 喷丸强度对 60Si2Mn 汽车板簧疲劳寿命的影响

N.	喷丸强度	疲劳寿命(10 片平均值)次数
1	未喷丸	37500
2	0.16C	116250
3	0.18C	193500
4	0.20C	172500

注: 疲劳试验机频率: 15000 次/h, 预加载荷: 4.5min

表 5-43 55Si2Mn 钢板弹簧喷丸及应力喷丸后的疲劳极限

试样厚度 mm	试样类型	疲劳极限/MPa		
		未喷丸	喷丸	应力喷丸 <sup>①</sup>
13	带槽平板	363	461	784
10	平板	343	686	833

注: 55Si2Mn 热轧表面淬火、回火后的硬度为 40HRC。

① 试样在弯曲状态下喷丸, 喷丸面受弯曲拉应力: 784~882MPa。

表 5-44 棱边喷丸对 60Si2Mn 钢板弹簧疲劳寿命的影响

序号	组别	热处理工艺	脱碳层深度/mm	硬度 (HRC)	喷丸方案	断裂周次	疲劳寿命对比(%)
1	I	920°C 保温 5min, 油冷, 540°C 回火 50min	0.136	39~40	一般喷丸	107800	100
2				40	一般喷丸+棱边喷丸	161280	150
3				41~42	一般喷丸+棱边喷丸	160160	149
4	II	920°C 保温 5min, 油冷, 510°C 回火 24min	0.097	44~45	一般喷丸	75880	100
5				43~44	一般喷丸	90440	
6				43	一般喷丸+棱边喷丸	183960	221
7				44~45	一般喷丸+棱边喷丸	95200	114
8				44~45		144480	174
9				44~45		85210	102
10				40~42		201320	243
11				41		129360	156

注: 板簧尺寸: 6mm×65mm×650mm, 试验应力: 1029MPa。

### 5.4.2 高应力弹簧的离子渗氮

1. 高应力弹簧的工作特点和性能要求 随着发动机等工业的发展, 设计中使用高应力、高频率的汽门弹簧及喷油器调压弹簧(见图 5-28), 它们承受的切应力达 800~900MPa, 比国际规定值高 50%, 疲劳安全系数由通常的 1.3 降到 1.1, 而其疲劳寿命要求达到  $2.3 \times 10^7$  次。采用传统的弹簧材料和热处理工艺已很难满足上述技术要求。急需探求新的强化技术, 实现这些技术有下列三条途径:

(1) 开发新的高强度弹簧钢材, 这是目前国际上普遍采用的途径。即采用先进的冶炼技术(如真空冶炼、尽可能除去钢中有害杂质元素, 适当控制钢中碳含量、加入适量的镍和细化晶粒的合金元素(如 V、Ti 及 Nb 等), 提高材料的强韧性水

平, 并使其夹杂物及第二相质点达到小、匀、细、圆的程度, 尽可能提高材料的表面质量。

(2) 采用形变热处理和超细晶粒处理技术进一步提高弹簧材料的强韧性水平。

(3) 对弹簧表面采用强化技术。例如: 喷丸强化和离子渗氮处理等。

众所周知, 在一般情况下, 弹簧的表面强化的传统技术是喷丸(如上所述); 采用离子渗氮等强化处理却很少研究。最近国内已在这方面进行了一些探索性工作。

2. 弹簧的离子渗氮工艺、组织和性能 离子渗氮是最终热处理工序。为了保证弹簧整体力学性能的优良, 必须要求前面的热处理工序(淬火及回火)达到预定要求。根据冷成形前钢丝的状态不同, 其离子渗氮工艺略有差异。

(1) 退火状态 50CrVA 钢丝冷卷成簧的热处

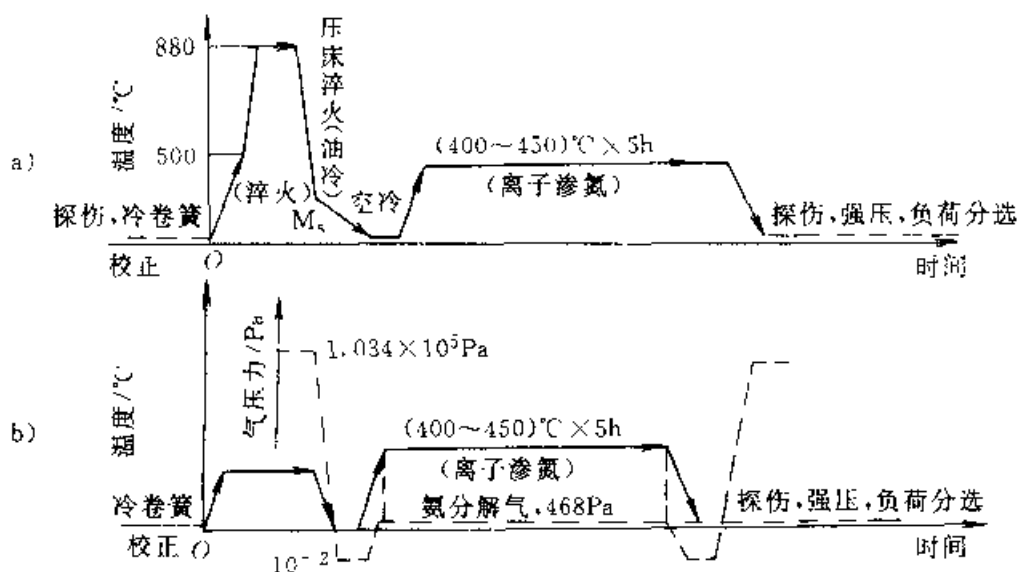


图 5-59 50CrVA 汽门弹簧离子渗氮工艺曲线

a) 退火状态钢丝成簧 b) 油淬火-回火钢丝成簧

理工艺,如图 5-59a 所示。

(2) 50CrVA 油淬火-回火钢丝成簧的离子渗氮工艺,如图 5-59b 所示。

上述两种热处理工艺及制造路线基本相同,其中,离子渗氮也相同  $(400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C})\times 5\text{h}$ ;主要不同点是退火钢丝冷卷成簧后必须进行淬火和回火,而油淬火钢丝冷卷成簧后只需去应力退火。50CrVA 钢丝制弹簧经  $400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  离子渗氮 5h 后渗层硬度的变化如图 5-60 所示。由该图可看出,离子渗氮温度过低,则渗层深度太浅;离子渗氮温度过高,则芯部强硬性显著降低。故弹簧离子

渗氮工艺宜选  $(400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C})\times 5\text{h}$ 。

对渗氮前的淬火-回火工艺必须严格控制。第一,要求得到匀细的回火马氏体组织,这有利于提高弹簧材料的强韧性,也有利于提高离子渗氮层组织的致密性,防止渗层出现网状、块状、针状及脉状等脆性氮化物。第二,采用压床油淬或超声油淬空冷工艺,冷却均匀,所得淬火组织匀细,变形亦较少,其冲击韧性  $\alpha_K$  比普通油淬者提高约 1/3。第三,应防止弹簧表面脱碳。第四,应控制回火后的硬度要比图样要求的高 2~4HRC,为离子渗氮工艺留有硬度余量。因为渗氮时间太长,弹簧芯部硬度仍有所下降。

对于油淬火钢丝宜选用较高强度、硬度(上限)水平的材料,它的制造工艺路线较退火钢丝制簧更简单,生产成本低,经济效益更好。

采用 50CrVA 油淬火钢丝卷制的弹簧经  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  离子渗氮后的组织见表 5-45。

由图 5-60 可知,50CrVA 弹簧经离子渗氮后表层硬度远高于基体硬度,而且最高硬度峰不在表面,而在距表面约  $20\mu\text{m}$  处。 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  离子渗氮层硬度最高达 1080HV,高于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  渗氮者(988HV)。但前者的硬度变化梯度较陡。基体硬度也是  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的高于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的,但渗层总深度的情况相反(见表 5-45), $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  处

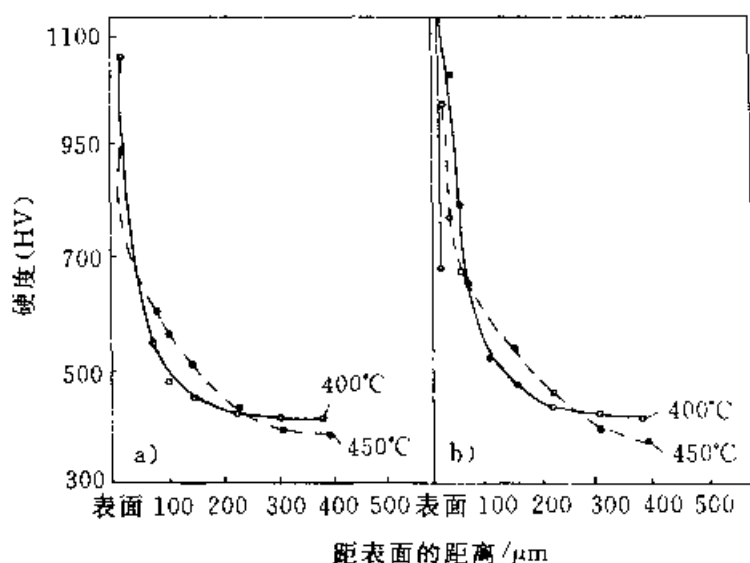


图 5-60 50CrVA 钢丝弹簧经不同温度渗氮后的渗层硬度分布(渗氮时间: 5h)

a) 疲劳试验前 b) 疲劳试验后

其渗层深度大于 100℃处理时

表 5 45 50CrVA 钢离子渗氮层的组织特征

离子渗氮		化学分析		渗层总深度 mm		脉状组织 (JB2849 S0)
工艺	相组成 %	厚度 μm	金相法硬度法			
	网状分析 %					
400°C 1h	ε 7	2.0	0.15	0.18	极少	
550°C 2h	ε 7	3.5	0.18	0.20	轻微	

3. 离子渗氮弹簧的疲劳寿命 采用 AH-1 型多工位疲劳试验机进行其疲劳寿命考核。按高应力条件试验的弹簧主要参数： $d=4\text{mm}$ 、 $L_0=32\text{mm}$ 、右旋、 $H_1=69\text{mm}$ 、 $n=5$ 、 $n_1=7$ 。气门关闭（安装高度  $H=53\text{mm}$ ，启开时高度  $H_2=30\text{mm}$ ，此时弹簧内外侧受力分析见表 5-46。在疲劳试验机中共装 32 个弹簧，共振频率 32.5Hz，应力比  $r=0.43$ ，试验结果见图 5-61。

表 5-46 离子渗氮 50CrVA 气门弹簧的受力分析

所应力 计算 部位	安装高度 (11.5mm)	振幅 (11.5mm)	$H=30\text{mm}$ 时的最大切应力 $\tau_1$ /MPa		$H_2=53\text{mm}$ 时的切应力 $\tau_2$ /MPa	
			$\tau_1$ /MPa		$\tau_2$ /MPa	
			$\tau_1$ /MPa		$\tau_2$ /MPa	
弹簧内侧	605.8	253.7	859.6		352.1	
弹簧外侧	432.7	181.2	613.9		251.5	

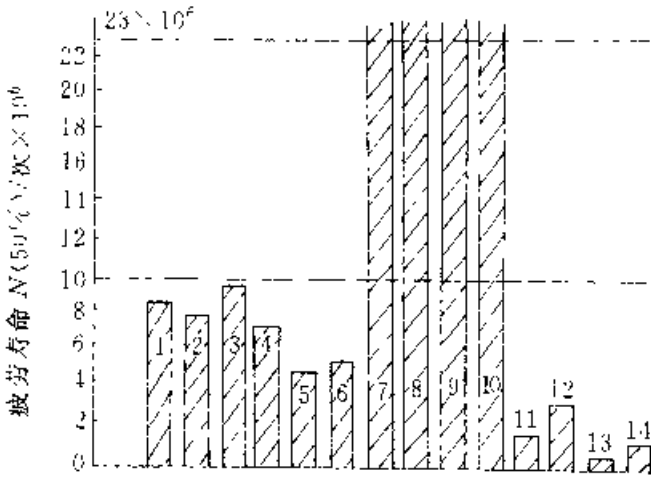


图 5 61 不同处理工艺下高应力气门弹簧的疲劳寿命对比 ( $N(50\%)$ ) 直方图

$r=0.43$

由图 5-61 可知，经离子渗氮和喷丸处理的 50CrVA 气门弹簧在高应力条件下的疲劳寿命能达到  $22 \times 10^6$  的技术要求；而经传统工艺（如油淬

火回火工艺、等温淬火工艺、气体氮碳共渗工艺）却不能满足技术要求。用 65 钢制造高应力弹簧的疲劳寿命与技术要求相差甚远。

表 5-47 图 5-61 中所示统计实例的工艺条件

No.	钢号	材料及热处理工艺
1	50CrVA 钢弹簧	油淬火回火钢丝
2		油淬火回火钢丝
3		880℃ 淬火，400℃ 回火
4		880℃ 淬火，320℃ 回火（等温 5min）
5		880℃ 淬火，320℃ 回火（等温 50min）
6		油淬火回火钢丝弹簧 + 450℃ 气体氮碳共渗
7		油淬火回火钢丝弹簧 + 400℃ × 5h 离子渗氮
8		油淬火回火钢丝弹簧 + 450℃ × 5h 离子渗氮
9		油淬火回火钢丝弹簧 + 气动式喷丸
10		油淬火回火钢丝弹簧 + 滚筒式喷丸
11		840℃ 淬火，320℃ 回火
12		840℃ 淬火，320℃ 等温 140s，320℃ 回火
13		840℃ 淬火，320℃ 等温 30min，未回火
14		840℃ 淬火，~320℃ 回火（等温 30min）

注：2 号数据取自上海弹簧研究所资料、马鸿祥，《弹簧工程》1989（2），17~26，余为天津大学科技资料。

1. 50CrVA 弹簧离子渗氮工艺的可行性及技术经济分析 生产上通常采用喷丸强化工艺来提高弹簧的疲劳寿命，到目前为止，离子渗氮几乎没有在弹簧行业生产上应用。其主要原因是对弹簧离子渗氮工艺的可行性研究太少，也没有进行必要的技术经济分析。弹簧的离子渗氮有如下特点：

（1）表层强化效果好，喷丸强化能显著提高弹簧的疲劳寿命（30%~50%）的主要原因，使弹簧表层形成较高的残余压应力，清除了材料表面

不良缺陷,使疲劳源不易在表面处萌生,而转移到次表面层萌生,即提高了疲劳裂纹萌生期( $N_0$ )。众所周知, $N_0$ 约占疲劳寿命的80%~90%。离子渗氮后50CrVA弹簧比渗氮前的疲劳寿命提高一倍以上。因为离子渗氮层也具有很高的残余压应力,而且,渗氮时的阴极溅射作用,清除了弹簧表面的微裂纹等缺陷,使表面的组织结构均匀,获得较稳定的位错亚结构,故其疲劳寿命不比喷丸强化者差。并且,其抗应力松弛性能优于喷丸工艺(见图5-62)。

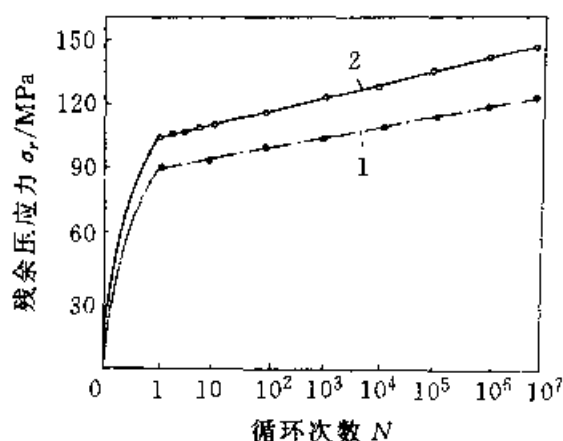


图5-62 在疲劳过程中与钢丝成45°方向的两种工艺处理弹簧(第二圈)表面残余压应力( $\Delta\sigma_r$ )松弛曲线

1—400°C离子渗氮工艺 2—气动式喷丸工艺

(2) 较低温度下的离子渗氮5h就能达到0.2mm渗层深度,同时保持芯部的强度水平。

(3) 离子渗氮可以缩短工艺路线,可免去去应力退火及喷丸工序,综合成本不会增加,甚至还可降低。

(4) 渗氮层具有良好的耐蚀性和耐热性,这些优点是喷丸工艺不能比拟的。

(5) 离子渗氮工艺无公害、工作条件舒适、节约能源(电、气等)。而喷丸时噪声大、产生粉尘,污染环境,工作条件很差。

(6) 离子渗氮是一种先进热处理技术。其设备在我国已达世界先进水平。炉子生产容量可达1千件气门弹簧的水平;而国内生产的喷丸设备质量及工艺水平较低。

不足之处是离子渗氮设备较贵、工艺过程较长。

总之,离子渗氮工艺在制造高应力弹簧、耐蚀

及耐热弹簧等方面是一种有效的热处理强化手段。

### 5.4.3 弹簧的应力松弛和抗应力松弛处理

#### 5.4.3.1 弹簧应力松弛特性指标、测试方法及其影响因素

1. 应力松弛曲线及其特性指标 弹簧在使用过程中主要失效形式是疲劳断裂和应力松弛。疲劳断裂失效的严重危害性非常明显,故被人们重视;而应力松弛(或松弛变形)是最为常见的现象,却往往不被人关注。事实上,内燃机气门弹簧、喷油器调压弹簧、轿车悬架弹簧、锅炉气阀弹簧、纺织摇架弹簧及日用电器、仪表中各种弹性元件都普遍存在应力松弛现象,其危害性有时比断裂失效还要严重。

应力松弛是指弹簧或弹性元件在恒应变条件下的应力随工作时间的延续而减小的现象。它是在服役时由于材料的弹性变形逐步向微塑性变形转变的结果。国家标准GB10120—88《金属应力松弛试验方法》中规定,试样有拉伸及弯曲两种,测试结果绘成应力松弛曲线(如图5-63)。该曲线明显地分为两个阶段:第Ⅰ阶段为从开始到持续较短时间内,应力随时间急剧降低(见图5-63中的ab线段);第Ⅱ阶段为应力随时间而慢慢降低,持续时间很长,其斜率(即松弛率)趋于一定值(见图5-63中bc线段)。在一定温度( $t$ )和一定初始应力( $\sigma_0$ )的条件下,弹簧或弹性元件的抗应力松弛性能的好坏可从如下特性指标来判断:

(1) 剩余应力 $\sigma_{sh}$ (或用 $\sigma_{sh}/\sigma_0, \%$ 表示)。它越大时表示其抗应力松弛性能越好。松弛掉的应力

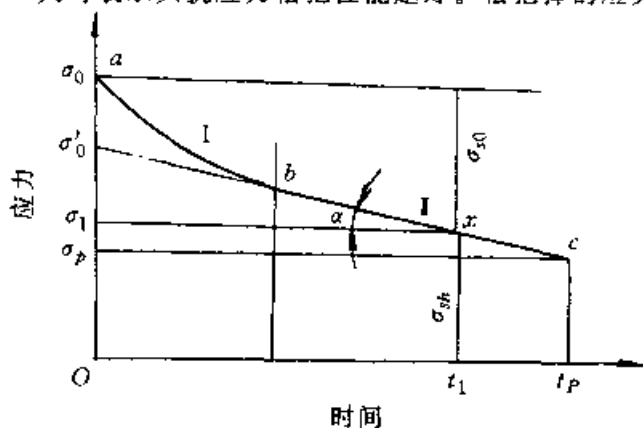


图5-63 典型的应力松弛曲线

$\sigma_{sk} = (\sigma_0 - \sigma_{sk})$ 也就越少。

(2) 松弛率  $\tau$  ( $\tau = d\sigma/dt$ ): 单位时间的应力松弛值。 $\tau$  越小, 其抗应力松弛性能越好。

(3) 松弛稳定系数  $s_0$  ( $s_0 = \sigma'_0 / \sigma_0$ ):  $\sigma'_0$  为直线段外延伸至纵坐标轴的应力值。 $s_0$  越大时表示其松弛稳定性越好。

(4) 松弛速度系数  $t_0$  ( $t_0 = 1/\tan\alpha$ ):  $\alpha$  为松弛曲线直线段与横坐标轴间的夹角。 $\alpha$  角越小,  $t_0$  越大, 则其松弛稳定性越好。

根据弹簧或弹性元件的服役条件, 需综合考虑上述特性指标, 才能较全面地评定其应力松弛性能的好坏。由于应力松弛过程很长 (一般达  $10^5\text{h}$ ), 故在松弛曲线中的时间多采用对数坐标, 纵坐标除用应力 ( $\sigma_{sk}$ ,  $\sigma_{sk}$  或  $\Delta\sigma$  等) 表示外, 还可采用负荷或负荷损失率 ( $\Delta P/P_0, \%$ ) 等表示。

2. 弹簧应力松弛测试方法 弹簧的松弛试验方法有多种多样。对于螺旋压缩弹簧可采用简单的螺栓固定法进行松弛试验, 如图 5-64b 所示。初负荷取在弹簧的弹性范围之内 (一般取上限), 把一批自由高度相等的弹簧加上负荷  $P_0$ , 例如, 摇架弹簧  $P_0$  为 284N, 对应的高度为  $H_0$ , 然后把加载后的弹簧放入恒温 (例如  $80^\circ\text{C}$ ) 炉中, 让  $H_0$  保持不变 (恒应变) 的条件下, 每隔一定时间后取出冷却, 再测定其负荷值 ( $P$ )。便可按下式求出弹簧的负荷损失率, 即  $\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_0 - P}{P_0} \times 100\%$ , 以负荷损失率为纵坐标, 松弛时间  $t_R$  (h) 为横坐标 (一般取对数), 便可绘出弹簧的应力松弛曲线。利用这些曲线的回归方程可以推算弹簧经长时间使用后的负荷损失率。

由于应力与负荷成正比, 应力松弛率亦可用下式表示:

$$\text{拉应力条件下: } \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} \times 100\%$$

$$\text{切应力条件下: } \frac{\Delta\tau}{\tau_0} = \frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} \times 100\%$$

此外, 还可采用弹簧高度变化  $\left| \frac{\Delta H}{H_0} \right|$  来表示。

3. 影响弹簧应力松弛性能的因素 主要有下列三个方面:

(1) 弹簧材料的种类及其化学成分, 根据使用性能及经济性的要求, 已研制出许多通用弹簧钢和各种特殊用途的弹性合金, 它们都具有较好的抗应力松弛性能。从应力松弛热力学看, 宜采用

弹性极限高的材料, 加入的合金元素能使位错运动较困难, 宜加入那些能阻碍原子沿晶界扩散、降低界面能的元素 (如加入微量的硼或稀土元素等)。

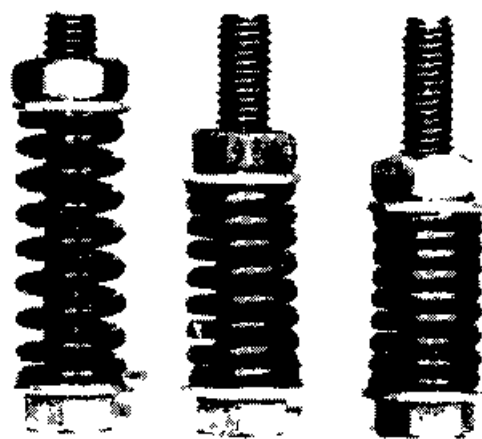


图 5-64 压缩螺旋弹簧的松弛

试验及强压处理装置

a) 原弹簧自由高度 b) 松弛试验加压  
c) 强压处理加压

(2) 热加工 (轧、拔等) 特别是热处理技术是改变材料组织结构和性能的有效手段, 对弹簧抗应力松弛有重要影响。

(3) 弹簧或弹性元件的各种预应力处理 (Prestressing) 技术。它们是成簧后控制弹性稳定性好坏的最后手段, 必须选用先进技术和工艺才能使弹簧成品达到所要求的抗应力松弛性能。

Prestressing 在国内尚没有准确的译名, 它的涵义是对弹簧进行预 (先) 应力处理, 通过这种处理可使弹簧产生微量塑性变形, 达到减少其松弛变形的目的。众所周知, 生产弹簧时广泛采用“立定”处理, 有时是压并处理来提高气门弹簧等的抗松弛变形的能力。这种操作可称为冷强压处理, 热强压处理则是在负荷  $P_F$  超过了材料的弹性极限, 在规定温度  $t_F$  下保持一定时间的处理方法 (见图 5-64c)。对于摇架弹簧  $P_F = 392\text{N}$ , 对应的弹簧高度为  $H_F$ , 然后固定之, 把它放在室温或一定温度的恒温炉中保持一定时间后再取出冷却。由上述可知, 强压处理和松弛试验方法非常类似, 只是所加负荷不同而已。

根据处理工艺条件的不同, 可分为如下几种强压处理 (Prestressing) 工艺。

①冷强压处理, 将弹簧在室温下强压处理几

小时到几十小时(一般采用多工位装簧、在压力机上进行压缩),亦可进行多次快速(动)强压处理。

②热强压处理(见前述)。

③电强压处理。将强压装置不是放入恒温炉中,而是放入两电极板中通电加热较短时间后取下快冷。其中又可分工频电源加热和脉冲电源加热两种。

④磁场强压处理。将强压弹簧装置放入强磁场浴炉中处理。

对于拉伸弹簧应进行强拉处理;对于扭转螺旋弹簧应进行强扭处理;对于片(板)弹簧应进行强弯处理;对于蜗卷弹簧则应进行缠紧处理等等。所有上述种种都属于预应力处理(Prestressing)。由于这种处理所加负荷较高(超过了材料表层的弹性极限),将发生微量塑性变形。当卸掉外加负荷时,处于弹性变形的心部力求恢复原状,在恢复过程中将受到已塑性变形的外层抑制。恢复后表层的应力与所加负荷的作用相反、二者叠加可使弹簧截面内的危险应力降低,并移到其表层以下,且小于按弹性变形计算的工作应力。所以,强压处理产生的残留变形和加工硬化现象,有利于提高弹簧的弹性极限和承载能力。提高处理的温度(特别是磁场或交流电直接加热时)将加速该过程中的组织结构状态的变化,可获得快速而稳定化效果。显然是一种先进的热处理技术。但是,由于强压处理后产生了永久变形量,因而,弹簧的预制高度应适当增加。

5.4.3.2 压缩螺旋弹簧的抗应力松弛处理(强压)

螺旋弹簧中有压簧、拉簧及扭簧三大类,其中压缩螺旋弹簧的抗应力松弛处理(强压)应用最多,扭簧次之,拉簧则更少。现以摇架弹簧,气门弹簧、液压元件中的调压弹簧及电冰箱压缩机支承弹簧为讨论对象,材料有冷拔硬钢丝(65、I<sub>A</sub>组及T9A)、油淬火钢丝(65、50CrVA、55SiCrA)及1Cr18Ni9不锈钢弹簧钢丝,按图样要求冷卷成簧后进行不同的处理(去应力退火后再经各种不同的强压处理,测绘其应力松弛曲线,所得结果如图5-65、图5-66、表5-48及表5-49)。

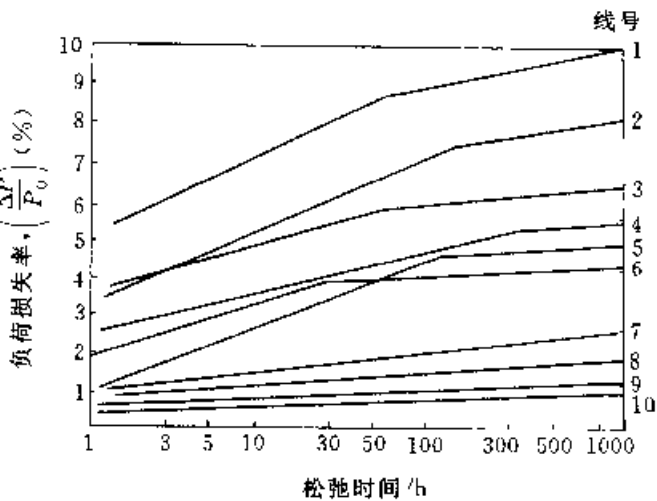


图 5-65 常用弹簧钢丝制摇架弹簧经不同强压处理后的应力松弛曲线  
松弛试验条件:  $P_0=284\text{N}$ ,  $t_R=80^\circ\text{C}$

表 5-48 常用钢丝制摇架弹簧的抗应力松弛特性指标

线号	弹簧钢丝种类	弹簧处理或强压方法	松弛Ⅱ阶段特性指标		$\left(\frac{\Delta P}{P_0}, \%\right)_{10}$
			a	b (v <sub>2</sub> )	
1	65, 冷拔态	未强压处理	6.89	0.383	11.25
2	I <sub>A</sub> , 冷拔态		5.74	0.304	9.20
3	65, 油淬火		5.22	0.190	7.36
4	50CrVA, 油淬火		4.26	0.150	6.00
5	50CrVA 形变热处理		3.75	0.142	5.37
6	I <sub>A</sub> , 冷拔态	冷强压 (25°C/6h, 392N)	3.28	0.154	5.04
7	I <sub>A</sub> , 冷拔态	热强压处理	0.85	0.219	3.34
8	65, 油淬火		0.73	0.145	2.38
9	50CrVA, 油淬火		0.53	0.080	1.44
10	50CrVA 形变热处理		0.41	0.061	1.09

(续)

线号	弹簧钢丝种类	弹簧处理或强压方法	松弛Ⅱ阶段特性指标		$\left(\frac{\Delta P}{P_0}, \%\right)_{10}$
			$a$	$b$ (r.)	
11	Ⅱ <sub>A</sub> , 冷拔态	磁场处理 (170°C, 3h, 225000A, m, 未强压)	5.36	0.286	8.6
12	I <sub>A</sub> , 冷拔态	磁场处理 (170°C, 3h, 225000A, m), 392N 强压	0.37	0.100	1.51
13	Ⅱ <sub>A</sub> , 冷拔态	电脉冲强压 (发明专利: 16142 号)	0.52	~0	0.52
14	50CrVA 形变热处理	电脉冲强压	0.37	0.005	0.43

注: 线号 11~14 在图 5-65 中未画出。冷强压属工厂现行工艺, 热强压为优选工艺。

图 5-65 为常用弹簧钢丝卷制的纺织摇架弹簧经不同强压处理后的应力松弛曲线。由该图可看出, 在半对数坐标中, 所有曲线皆为直线型, 不过, 未经强压者 (线号 1~5) 或经冷强压者 (6) 的松弛曲线均分为 I、Ⅱ阶段; 而经热强压者 (线号 7~10) 均为一条直线, 即松弛过程 I 阶段消失 (或经历时间太短), 只有松弛过程第 Ⅱ阶段。其数学回归方程通式:  $(\Delta P/P_0, \%) = a + b \ln t$ 。各种材料不同处理后回归方程中的  $a$ 、 $b$  及工作十年后的弹簧负荷损失率  $(\Delta P/P_0, \%)_{10}$  列于表 5-48。由  $a$ 、 $b$  值及弹簧工作十年后的负荷损失率  $\left\{ \frac{\Delta P}{P_0}, \% \right\}_{10}$  的变化规律可作如下分析:

(1) 纺织摇架簧如不进行强压处理, 形变热处理钢丝的抗应力松弛性能最好, 其次是油淬火钢丝, 最差的是冷拔硬钢丝; 进行相同的热强压处理后仍有类似规律, 但其差异明显缩小。

(2) 钢种相同 (如 50CrVA 或 65 钢) 如热处理工艺不同 (其组织状态也不一样), 则弹簧具有不同的抗应力松弛性能。例如: 这两种钢经过低温形变热处理后的抗松弛性能优于普通油淬火钢丝。

(3) 应特别指出, 冷强压处理 (或立定处理) 能提高弹簧的抗松弛性能; 而合适的热强压处理 (Hot prestressing) 使弹簧的  $a$  (即直线与纵坐标上的交点,  $a$  值越小, 其松弛性能越好),  $b$  (即松弛率  $v_r$ ) 及十年负荷损失率  $(\Delta P/P_0, \%)_{10}$  显著降低。这充分说明, 热强压处理有效地提高了压缩螺旋弹簧的抗松弛性能, 其实质是一种预应力热稳定化处理新技术, 它把弹簧加热、保温、强压、冷却 (快冷)、负荷分选 (高度分选) 等工序连成一条自动生产线, 从而提高了产量和质量, 又降低了成

本。

(4) 弹簧热强压处理技术中, 由于加热方法不同, 可分为普通热强压 (一般采用恒温箱式电炉加热)、电强压 (又可分为工频电流及脉冲电流通过弹簧本身进行加热) 和热磁场中强压等。其中磁场中强压和电脉冲强压处理系我国首创。由表 5-48 中 13、14 两项的  $a$ 、 $b$  及  $\left\{ \frac{\Delta P}{P_0}, \% \right\}_{10}$  数据比较, 其值极小。它比普通热强压的抗松弛效果还要好得多, 可以说它非常接近理想水平。受到国内外重视。

(5) 目前纺织行业要求摇架加压前簧的抗应力松弛性能指标为: 工作十年后的负荷损失率  $\leq 5\%$  由表 5-48 中数据可知, 用 Ⅱ<sub>A</sub>、65 及 50CrVA 油淬火钢丝、50CrVA 形变热处理钢丝卷制的摇架弹簧经合适的热强压处理后均能满足上述要求。但从材料来源及生产成本考虑, 选用 Ⅱ<sub>A</sub> 冷拔钢丝来制造该类弹簧是比较合适的, 但必须通过热强压处理来保证。如对 Ⅱ<sub>A</sub> 弹簧采用先进的电脉冲强热或热磁场中强压, 还可达到更好的抗松弛性能 (见该表中 12、13 行中有关数据), 并接近 50CrVA 形变热处理钢丝的应力松弛水平, 显然, Ⅱ<sub>A</sub> (或 C 组冷拔硬钢丝) 的成本比形变热处理 50CrVA 钢丝者低得多。

图 5-66 为 T9A 冷拔钢丝制液压元件中的调压弹簧和 1Cr18Ni9 冷拔不锈钢丝制的摇架弹簧经不同强压处理后在不同温度下的松弛曲线, 这些曲线的松弛 Ⅱ阶段的特性指标见表 5-49。由图 5-66 及表 5-49 可知, 如松弛温度为 80°C, 两种冷拔态钢丝 (T9A 和 1Cr18Ni9) 卷制的两种弹簧, 其抗应力松弛特性指标的变化规律与图 5-65 及表

5-48 相似，热强压处理的效果最显著，工频电强压次之、只经去应力退火者最差。从松弛曲线看，热或电强压过的弹簧只有松弛第Ⅰ阶段：如提高松弛温度（由 80℃提高到 200℃），均使  $a$ 、 $b$  及  $\left(\frac{\Delta P}{P_0}, \%\right)_{10}$  值明显升高，即松弛性能急剧恶化。由该图还可判断，T9A 高强度钢丝制的液压件弹簧的松弛曲线均在 1Cr18Ni9 者的上方，说明不锈钢弹簧钢的 1Cr18Ni9 的抗应力松弛性能明显优于 T9A。

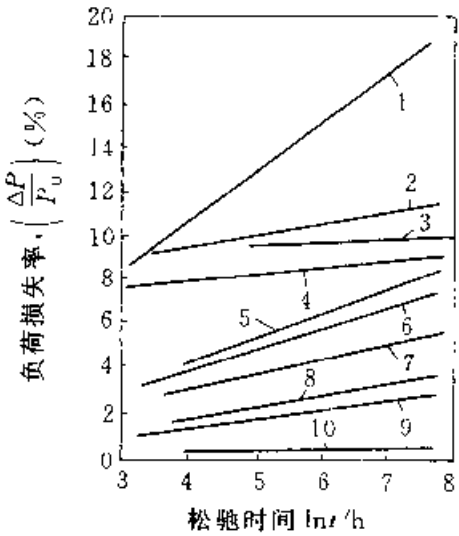


图 5-66 冷拔 T9A 和 1Cr18Ni9 钢丝制弹簧的松弛曲线

5.4.3.3 片弹簧的抗应力松弛处理（强弯）

试验材料有马氏体时效不锈钢（00Cr12Co12Ni4Mo4TiAl）及铜合金（黄铜 H68 及磷青铜 QSn6.5-0.1），前者用于子母弹中的皇冠尾翼，后者用于制造精密仪器仪表中的弹性元件。

1. 皇冠尾翼片簧的抗应力松弛处理

（1）皇冠尾翼片簧的结构特点、性能要求及制造工艺路线。尾翼片簧宏观外形酷似一顶皇冠，其侧视图见图 5-67a，它是用厚度为 0.75mm 马氏体时效不锈钢（00Cr12Co12Ni4Mo4TiAl）带材冲制成片簧的展开形状（见图 5-67b），卷成筒形，在对接处焊好，再将 12 片尾翼加工并向外伸展，使其外形酷似皇冠，故称该弹性元件为皇冠尾翼。它和子弹相联的小端外圆  $\phi 71.6\text{mm}$ ，散开端为  $\phi 137\text{mm}$ ，高度为 146mm，一颗子母弹内共存放 147 个小子弹，每个小子弹都安置一个皇冠尾翼片簧。子弹存放时将尾翼约束在罩盖内（图 5-67c）中的位置 2，它相当应力松弛状态。投弹时，顶开尾翼的罩盖，12 片均布的簧片能自动张开，起导向作用，保证引爆雷管垂直向下撞击目标。不使用子母弹时（即长期储存），则簧片均约束在罩盖内，其技术要求，储存十年后，所有弹簧片在松开时的回弹量保持 95%（或挠度损失率小于 5%）以上。

表 5-49 冷拔 T9A 及 1Cr18Ni9 钢丝制弹簧经不同强压处理后在不同温度下的松弛特性（Ⅱ阶段）

线号	弹簧丝	钢丝种类	处理方法		松弛温度 °C	松弛Ⅰ阶段特性指标		方程拟合误差 (%)	$\left(\frac{\Delta P}{P_0}, \%\right)_{10}$
						a	b (v <sub>1</sub> )		
1	调压弹簧	T9A 丝径 2.8mm	均经最佳去应力退火	未强压	160	3.162	1.948	2.07	25.33
2					80	9.025	0.110	0.26	10.38
3				电强压 (Ⅰ)	80	~0	0.921	0.99	10.28
4						热强压	~0	0.699	1.33
5	摇架弹簧	1Cr18Ni9 线径 2.5mm	均经最佳去应力退火	未强压	200	8.292	0.447	0.02	13.33
6					80	6.959	0.305	0.22	10.43
7				电强压 (Ⅰ)	200	~0	1.440	2.08	13.82
8					80	0.972	0.280	0.52	4.16
9				热强压	200	~0	0.498	0.92	5.33
10					80	0.119	0.046	0.02	0.64



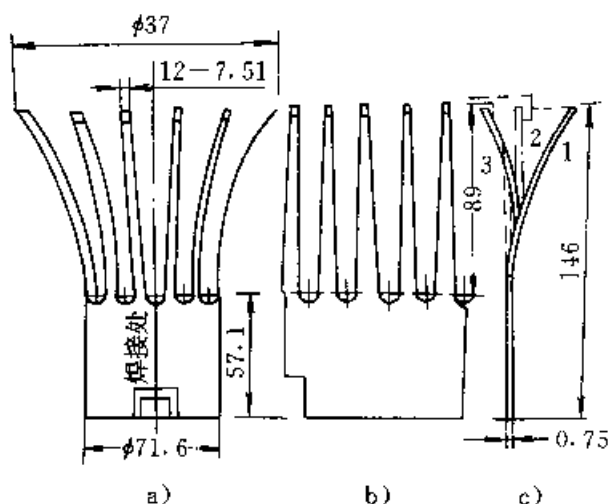


图 5-67 子母弹中皇冠尾翼片簧  
的外形及结构示意图

a) 侧视图 b) 片簧展开图  
c) 单片伸开端的三种状态

皇冠尾翼片簧的制造工艺路线：固溶处理（950~1100℃）→片材冲孔落料（展开形）→卷圆→焊接→尾部加工成形→时效处理→强弯处理→检验→成品包装入库。

(2) 片簧的时效处理及强弯处理，00Cr12-Co12Ni4Mo4TiAl 钢中含有 1/3 以上的贵重金属元素，故其价格昂贵。它经固溶处理后的片材有优异的冷成形性能，通过合适的时效处理能达到满意的综合力学性能。不同温度（保温时间皆为 3h）时效后片簧的硬度（HRC）及负荷损失率  $\left(\frac{\Delta P}{P_0}, \%\right)$  的变化见图 5-68。由该图可见，在 540~570℃时效处理后，材料的强化效果最显著，此时，硬度达最大值，而片簧的负荷损失率相应降低到最小值。故最佳时效工艺为 (540~570)℃×3h。

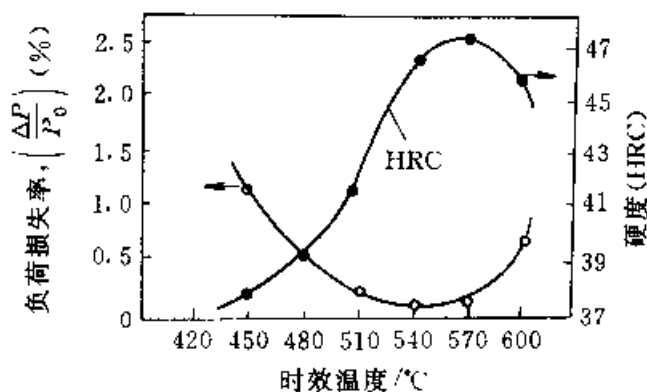


图 5-68 片簧的负荷损失率及硬度  
随时效温度的变化曲线

松弛及强弯处理均模拟皇冠尾翼实际工作情况进行。松弛试验（参看图 5-67c 中的位置 2）及强弯处理时相当该图中片散开端弯到位置 3，即松弛试验时加在片簧尾节的负荷应在材料的弹性极限以内，而强弯时所加负荷应稍超过该材料的屈服强度（ $\sigma_s$ ），可近似地看成一个简单的悬臂梁来计算片簧的受力情况。该片簧根部承受的最大弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{2Eh}{2l} \cdot y$$

式中  $y$  最大挠度，松弛时， $y=35\text{mm}$ ，强弯时， $y=50\text{mm}$ ；

$E$ ——该材料的弹性模量，取  $E=210\text{GPa}$ ；

$h$ ——片簧材料厚度， $h=0.75\text{mm}$ ；

$l$ ——片簧有效长度， $l=89\text{mm}$ 。

用此式计算出，松弛时的  $\sigma_{\max}=1044\text{MPa} < \sigma_s=1288\text{MPa}$ （ $\sigma_b=1610\text{MPa}$ ）；强弯时的  $\sigma_{\max}=1505\text{MPa} > \sigma_s=1288\text{MPa}$ 。由此可见，两种处理时所选负荷均可满足技术要求。

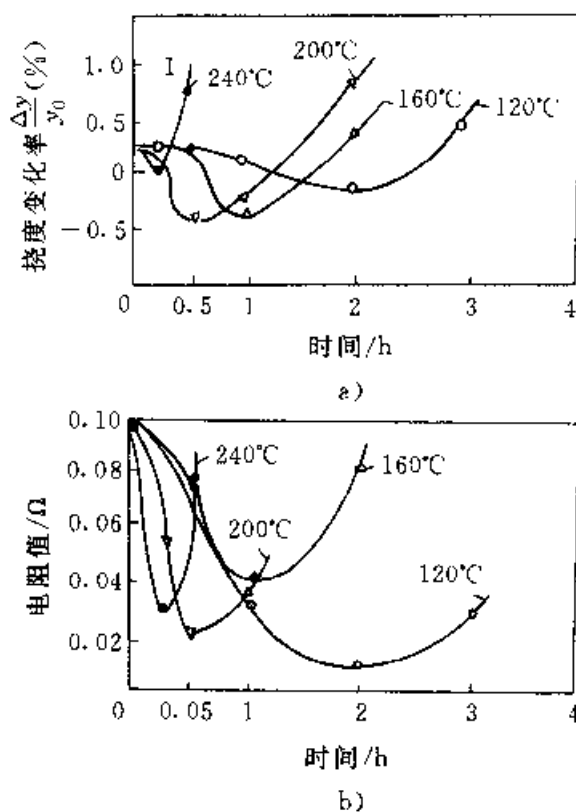


图 5-69 不同温度下强弯处理时的  
挠度变化率 (a) 和电阻值  
(b) 和时间的关系

热强弯处理是将该片簧放在恒温炉中、在不同温度下强弯不同时间后取出测量其挠度变化率(见图 5-69a), 图 5-69b 为相应电阻值的变化曲线。由该图可见, 在每一个温度下强弯时, 挠度变化率随强弯时间的延长均存在一个极小值; 而且, 处理温度升高时使达到极小值的时间提前。电阻值的变化现象也类似。电阻值降低, 表明材料基体内部的畸变程度和挠度变化率减小, 这是弥散相析出的结果, 表明马氏体时效不锈钢片簧在强弯处理时析出的弥散相仍然起着改善抗松弛性能的作用, 此现象可称为应变诱发时效。最佳的热强弯工艺为  $200^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$ 。

工频电接触加热强弯处理的较佳工艺为: 60A (电流) 保持 6~8s。此法由于通电加热很短, 片簧受热不易均匀, 材料内部的组织结构转变不够充分和均匀, 故对抗应力松弛性能的改善不如普通热强弯者。

图 5-70 为 00Cr12Co12Ni4Mo4TiAl 片簧在  $25^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$  及  $160^{\circ}\text{C}$  的应力松弛曲线, 图中曲线 1 为仅进行过时效处理、2 为工频电强弯处理、3 为热强弯处理。这些曲线均可分为瞬态松弛 (I 阶段) 和稳定态松弛 (II 阶段)。一般用稳定态松弛动力学方程来预测长时间片簧的应力松弛量 (或挠度损失量), 从而预测其应力松弛失效寿命。

著名的松弛动力学拟合方程是 Li 方程<sup>[51, 48]</sup>,

$$(\sigma_0 - \sigma)/\sigma_0 = K(t + a)^{-1/(m^* - 1)}$$

对于片簧,  $y \propto \sigma_{\max}$ , 故可将上式改写成

$$y - y_i = k(t + a)^{-1/(m^* - 1)}$$

式中  $\sigma$ ——负荷应力 (MPa);

$\sigma_0$ ——原加负荷应力 (MPa);

$t$ ——松弛时间 (h);

$K$ 、 $k$ 、 $m^*$ ——皆为常数;

$y_i$ ——片簧散开端的最大挠度 (mm);

$y_i$ ——片簧散开端的第  $i$  次挠度 (mm)。

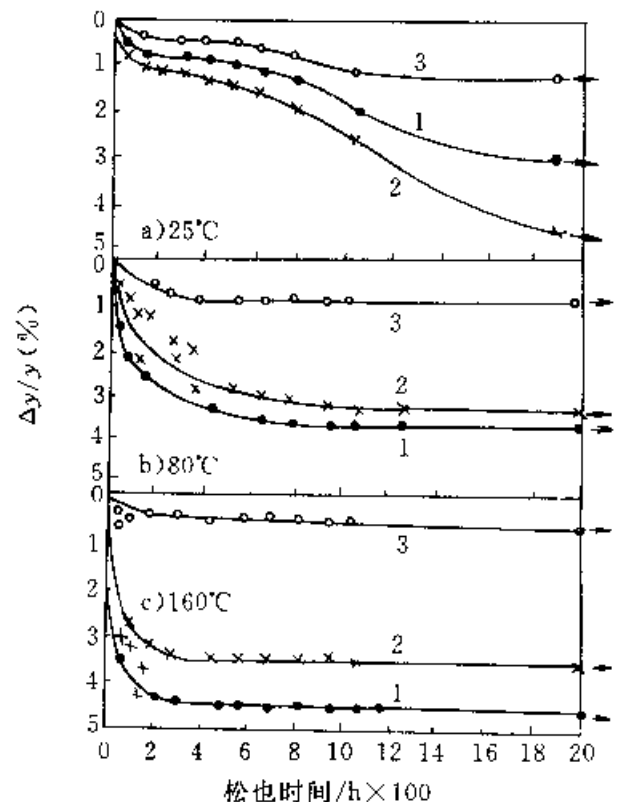


图 5-70 不同温度下片簧经不同强弯处理后的松弛曲线

1—时效后未强弯 2—工频电接触加热后强弯  
3—时效后热强弯

表 5-50 不同强弯工艺不同温度下片簧的松弛动力学方程

松弛温度 / $^{\circ}\text{C}$	处理工艺	片簧松弛动力学拟合方程	均平根差 $s$	储存十年后挠 度损失率(%)
25 (室温)	时效	$y - 26.0 = 120.0(t + 7081.9)^{-1/(5.4-1)}$	0.11	6.24
	电强弯	$y - 26.0 = 132.1(t + 4454.3)^{-1/(5.2-1)}$	0.27	10.59
	热强弯	$y - 32.5 = 65.7(t + 7799.8)^{-1/(5.3-1)}$	0.15	1.44
80	时效	$y - 60.2 = 3.6 \times 10^7(t + 81500)^{-1/(1.4-1)}$	0.18	3.88
	电强弯	$y - 59.7 = 677.7(t + 254.6)^{-1/(2.0-1)}$	0.15	3.86
	热强弯	$y - 58.5 = 6.0(t + 1.3 \times 10^{-3})^{-1/(1.7-1)}$	0.09	0.98
160	时效	$y - 54.8 = 1747.3(t + 66.2)^{-1/(1.6-1)}$	0.15	5.17
	电强弯	$y - 56.4 = 5.50(t + 1.0 \times 10^{-2})^{-1/(2.19-1)}$	0.09	3.36
	热强弯	$y - 57.0 = 1.9 \times 10^{10}(t + 69.4)^{-1/(1.17-1)}$	0.13	1.75

利用 IBM -PC/XT 微机和解非线性最小二乘优化法拟合实验数据, 所得松弛动力学方程见表 5-50。表中列出了计算值与试验值的均方根差  $s$ , 其值都很小, 说明该方程拟合良好。表中还列出了片簧在约束条件下储存十年后挠度损失率的数值。由此可见, 三种工艺处理的尾翼片簧在 25~160℃进行对比试验时, 证明经热强弯者具有最佳的抗应力松弛性能, 皇冠尾翼片簧在约束条件储存十年后, 其挠度损失率均小于 5%, 不会发生应力松弛失效现象, 完全满足其设计和使用寿命要求。

2. 铜合金片弹簧的抗应力松弛处理 根据 ASTM E328-78 标准, 设计了等应力松弛试样(梯形), 将片材用线切割成形。松弛和强弯处理时加负荷装置是自行设计制造的, 使试样的预加挠度和实际施加于试样的应力呈线性关系, 将应变片贴在试样表面上, 用静态应变仪测量其相应的应变值、再换算成应力。

图 5-71 为铜合金片试样经不同强弯处理 (H68; 外加应力 450MPa, 分别在 100~140℃强弯 1h; QSn6.5-0.1; 外加应力 516MPa、分别在

100~140℃强弯 1h) 后在 80℃测得的松弛曲线。由该图可看出: 在所选温度下强弯处理均可改善铜合金片材的抗应力松弛性能, 但在 120℃强弯 1h 的效果最好。和未热强弯者比较时, 经热强弯处理的松弛曲线不呈曲线变化, 试验数据基本上均匀分布在直线附近, 其回归方程通式

$$\sigma_{sh} = a - b \ln t$$

式中  $\sigma_{sh}$  剩余应力 (MPa);  
 $t$ ——松弛处理时间 (h);  
 $a$ ——应力坐标轴上的截距, 即  $\sigma_0$ ;  
 $b$ ——应力松弛率, 即  $v_s$ 。

回归结果见表 5-51。

显然,  $b$  ( $v_s$ ) 值越小, 其抗应力松弛性能越好。

总之, 无论哪种弹簧材料制造的弹簧或弹性元件, 在长期使用过程中都会发生应力松弛现象。通过适当的热强压(强弯等)处理可以获得最佳的抗应力松弛性能, 从而有效地提高其工作稳定性, 这对于弹簧生产具有普遍意义, 对于汽车工业, 仪器仪表工业、宇航业、轻纺工业及家用电器中某些弹性元件具有重要意义。

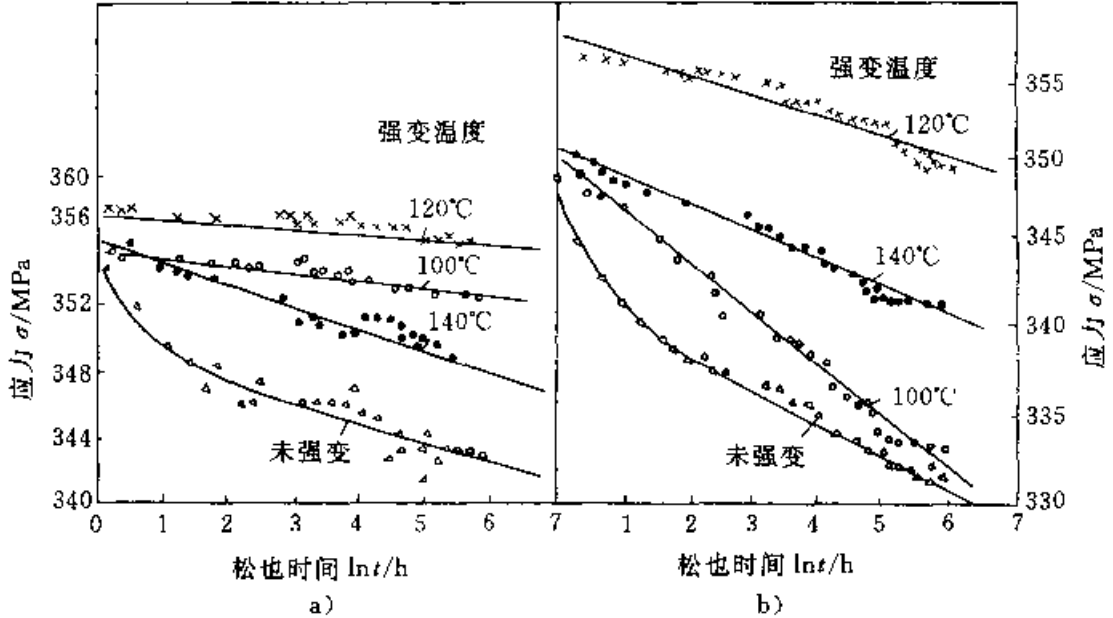


图 5-71 黄铜 (H68) (a) 及锡磷青铜 (QSn6.5-0.1) (b) 在 80℃ 时的应力松弛曲线

表 5-51 两种铜合金热强弯后 80℃ 时的应力松弛方程

材料名称	强弯处理工艺	松弛动力学回归方程	标准方差, $s$	相关系数, $R$
黄铜片 (H68)	140℃, 1h	$\sigma_{sh} = 355.8 - 1.32 \ln t$	0.618	0.969
	120℃, 1h	$\sigma_{sh} = 357.6 - 0.36 \ln t$	0.362	0.870
	100℃, 1h	$\sigma_{sh} = 355.3 - 0.50 \ln t$	0.507	0.860

(续)

材料名称	强弯处理工艺	松弛动力学回归方程	标准方差, $s$	相关系数, $R$
锡磷青铜片 QSn6.5-0.1	140°C, 1h	$\sigma_{sh} = 350.8 - 1.60 \ln t$	0.416	0.989
	120°C, 1h	$\sigma_{sh} = 358.0 - 1.25 \ln t$	0.762	0.941
	100°C, 1h	$\sigma_{sh} = 350.4 - 3.14 \ln t$	0.727	0.969

## 参考文献

- 张英会主编. 弹簧. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 罗辉主编. 机械弹簧制造技术. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 殷仁龙编著. 机械弹簧设计理论及其应用. 北京: 兵器工业出版社, 1993
- 苏德达等. 弹簧的失效分析. 北京: 机械工业出版社, 1988
- Harold Carlson. SPRINGS Troubleshooting and Failure Analysis. MARCEL DEKKER, INC. New York and Basel (U. S. A), 1980
- 陈复民, 李国俊, 苏德达. 弹性合金. 上海: 上海科技出版社, 1986
- 苏德达等. 碳素钢丝铅淬火及其组织转变的研究. 金属制品, 1987 (2): 2~10
- 李志康等. 在铅浴炉表面采用 SRQF 覆盖剂的尝试. 金属制品, 1987 (2): 41~42
- 李晓红等. 弹簧钢丝的抗拉强度与其丝径关系的回归分析及其应用. 弹簧工程, 1996 (1): 17~21
- 苏德达. 弹簧钢丝的强韧化热处理及其应用. 天津大学学报, 1980 (1): 74~83
- 苏德达等. 弹簧钢丝的低温形变热处理. 北京: 第一届全国热处理年会论文集, 1966-1
- 苏德达等. 碳钢的低温形变热处理. 金属科学与工艺, 1983, 2 (1): 21~31
- 朱达明等. 形变热处理弹簧钢丝的研究. 冶金建筑工程学院学报, 1978 (8)
- 朱达明等. 超细晶粒形变热处理钢丝及其弹性性能. 洛阳: 第四届全国弹簧学术会议论文, 1991
- Margaret O'Molloy BSC. Stress relaxation of springs. Wire industry, 1988 (2): 808~813
- 山田朗朗著. 日本气门弹簧用钢丝. 陈立译. 弹簧工程, 1994 (3): 18~29
- 苏德达编译. 瑞典 Garphyttan 的弹簧钢丝及弹簧制造. 天津, 1979
- 刘诚勇等. 弹簧工. 天津: 铁道部工业总局, 1981, 58~62
- 胡家骅等. 热卷弹簧的计算机程序编制和形变热处理. 全国五届弹簧学术会议论文集, 扬州, 1993, 184~188
- 孙希发. 电站锅炉安全阀弹簧的工艺研究. 弹簧工程, 1996 (4): 26~32
- 周平刚. 喷油器调压弹簧加工工艺分析及改进. 无锡: 全国三届弹簧学术会议论文, 1989
- 马鸣图等. 汽车板簧生产工艺—设备的研究进展. 泰安: 全国六届弹簧学术会议论文集, 1995, 149~158
- 吴武川等. 扭杆弹簧的应用与发展. 洛阳: 全国四届弹簧学术论文, 1991
- 曾林. 车用稳定杆及其发展前景. 弹簧工程, 1993 (2): 2~8, 1993 (3): 2~7
- 刘诚勇. 扭杆弹簧制造. 1998 (1): 13~14
- 丹下彰, 小山博. 扭杆的高频淬火. [日] 特殊钢, 1981, 30 (3): 26
- 项松年. 轿车螺旋悬架弹簧的设计和制造. 弹簧工程, 1989 (3): 1~12
- 本間達. [日] 特殊钢, 1989, 38 (7): 17~22. 董洪业译. 弹簧材料的最新动向——冷卷成形圆的弹簧钢丝. 弹簧工程, 1993 (2): 29~33
- 祖荣祥. 高弹性减退抗力弹簧钢的研究. 弹簧工程, 1990 (1): 16~23
- 胡家骅等编译. 碟形弹簧尺寸质量要求 DIN2093—90. 弹簧工程, 1991 (2): 39~45, 1991 (3): 33~39
- 王建强. 碟形形变淬火工艺的发展及特点. 上海: 弹簧工程, 1990 (1): 27~30
- 王建强. 碟簧中频加热形变淬火的应用与分析. 厦门: 全国三届弹簧钢学术会议论文, 1986
- 谭驭民等. 大型膜片弹簧的制造. 弹簧工程, 1989 (2): 49~53
- 夏长高等. 汽车离合器膜片弹簧强压处理的分析研究. 泰安: 全国六届弹簧学术会议论文集, 1995, 98~103
- 苏德达等. 汽车平衡弹簧的热处理及疲劳寿命. 弹簧工程, 1985 (3): 18~25
- 杨永强. 空压机弹簧片阀片材料的强韧化工艺及疲劳性能的研究. [硕士论文] 天津: 天津大学, 1987

- 37 姚家襄等. 汽车风挡玻璃雨刮器胶条弹簧用材料及其热处理工艺. 机械工程材料, 1983 (5): 52~54
- 38 张成杰. 高速工具钢 W18Cr4V 制做耐热弹簧的热处理工艺. 扬州: 全国五届弹簧学术会议论文集, 1993, 215~221
- 39 薛宗源等. GH4169 (Inconel-718) 合金的热处理、组织和性能. 大冶钢厂技术资料, 1980, 25~52
- 40 韩立民等. 恒弹性合金 3J58 热处理工艺对时间稳定性影响. 天津大学科技资料, 1980
- 41 严惠新译. DIN2089 84 圆弹簧丝及条制圆柱螺旋弹簧计算及设计. 弹簧工程, 1988 (2): 56~63
- 42 魏拔鳌等. 不锈钢压缩螺旋弹簧喷丸强化对疲劳性能的影响. 中国航天科技文献, HJZ840019
- 43 王仁智等. 汽车板簧的热处理与表面强化工艺. 阳泉: 全国七届弹簧学术会议论文集 1997, 70~79
- 44 王海棠. 喷丸强化对汽车钢板弹簧寿命的影响. 厦门: 全国三届弹簧钢学术论文, 1988
- 45 田洪大等. 高应力高周压簧国产化初探. 弹簧工程, 1989 (2): 35~39
- 46 吴秉民. 高应力弹簧热处理技术及其对疲劳性能影响的研究. [硕士论文], 天津: 天津大学, 1991
- 47 苏德达等. 压缩螺旋弹簧应力松弛性能和组织结构的研究. 金属热处理学报, 1990 (3): 1~12
- 48 苏德达等. 去应力退火与加温强压处理对液压弹簧应力松弛性能的影响. 弹簧工程, 1993 (4): 5~9
- 49 武凤. 高合金不锈钢弹簧钢松弛处理工艺及松弛机理研究. [硕士论文] 天津: 天津大学, 1988
- 50 朱知寿. 弹簧应力松弛测试技术及松弛机理研究. [硕士论文] 天津: 天津大学, 1989
- 51 苏德达等. 马氏体时效不锈钢片簧抗应力松弛处理及松弛失效寿命预测. 天津大学学报, 1998 (2): 234~240
- 52 I. J. C. M. Canada, J. Phys. 1967 (45) 498
- 53 苏德达等. 铜合金应力松弛性能及其影响因素的研究. 天津大学学报, 1991 (3): 86~92
- 54 肖林. 铜合金应力松弛性能及其组织变化的研究. [硕士论文] 天津: 天津大学, 1990

## 第 6 章 紧固件的热处理

贵州高强度螺栓厂 张文典

紧固件是机械、冶金、电器、仪表、石油、化工、建筑和交通运输等设备及工具上不可缺少的通用零部件。主要种类有螺纹紧固件、垫圈、挡圈、销和铆钉等。随着工业的发展,新型紧固件不断出现,性能要求越来越高,因而热处理的重要性更为突出。

### 6.1 螺纹紧固件的热处理

#### 6.1.1 通用螺纹紧固件

通用螺纹紧固件系指国标 GB3098.1、

GB3098.2 和 GB3098.4 所对应的螺栓、螺钉、螺柱和螺母。这类紧固件的用量最大,使用范围最广。

##### 6.1.1.1 力学性能分级

根据国际 GB3098.1,螺栓类的力学性能分级见表 6-1。

根据国际 GB3098.2,粗牙螺母的力学性能分级见表 6-2。细牙螺母的力学性能分级与粗牙螺母相似,可详见 GB3098.4,这里不再一一列举。

表 6-1 螺栓、螺钉和螺柱的力学性能

力 学 性 能		性 能 等 级											
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9	
								≤M16	>M16				
抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	公 称	300	400		500		600	800	800	900	1000	1200	
	大 于	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220	
维氏硬度 (HV <sub>30</sub> )	大 于	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	
	小 于	250						320	335	336	380	435	
布氏硬度 (HBS) $P=30D^2$ (HBS<140 时 $P=10D^2$ )	大 于	90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366	
	小 于	242						304	318	342	361	414	
洛氏硬度 (HR)	最小	HRB	52	67	70	80	83	89	—				
		HRC	—						22	23	28	32	39
	最大	HRB	100						—				
		HRC	—						32	34	37	39	44
表面硬度 (HV <sub>0.3</sub> )		—						比芯部高出不超过 30HV <sub>0.3</sub>					
屈服点 $\sigma_s$ /MPa	公 称	180	240	320	300	400	480	—	—	—	—	—	
	大 于	190	240	340	300	420	480	—	—	—	—	—	
屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	公 称	—						640	640	720	900	1080	
	大 于	—						640	660	720	940	1100	
保证应力 $S_p$ /MPa	$S_p/\sigma_s$ 或大于 $S_p/\sigma_{0.2}$	0.94	0.94	0.91	0.94	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.88	0.88	
	$S_p$ 大于	180	230	310	280	380	440	580	600	660	830	970	

(续)

力 学 性 能		性 能 等 级											
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9	
								≤M16	>M16				
伸长率 $\delta_5(\%)$	大 于	25	22	14	20	10	8	12	12	10	9	8	
楔载荷强度		螺栓、螺钉(不包括螺柱)的数值等于最小抗拉强度											
冲击功 $A_k/\text{J}$	大 于				25	—		30	30	25	20	15	
头部坚固性		头部及钉杆与头部交接的圆角处不应产生任何裂纹											
螺纹未脱碳层的最小高度, $E$		—						$1/2H_1$		$2/3H_2$	$3/4H_1$		
全脱碳层的最大深度, $G/\text{mm}$								0.015					

表 6-2 螺母力学性能(粗牙螺母)

螺纹直径 /mm	性能等级								
	04			05			4		
	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC
≥3~4	380	188~302	<30	500	272~353	27.8~36	—	—	—
>4~7	380	188~302	<30	500	272~353	27.8~36	—	—	—
>7~10	380	188~302	<30	500	272~353	27.8~36	—	—	—
>10~16	380	188~302	<30	500	272~353	27.8~36	—	—	—
>16~39	380	188~302	<30	500	272~353	27.8~36	510	117~302	<30
>39~100	—	188~302	<30	—	272~353	27.8~36	—	117~302	<30

螺纹直径 /mm	性能等级								
	5			6			8		
	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC
≥3~4	520	130~302	<30	600	150~302	<30	800	170~302	<30
>4~7	580	130~302	<30	670	150~302	<30	810	188~302	<30
>7~10	590	130~302	<30	680	150~302	<30	830	188~302	<30
>10~16	610	130~302	<30	700	150~302	<30	840	188~302	<30
>16~39	630	146~302	<30	720	170~302	<30	920	233~353	<38
>39~100	—	128~302	<30	—	142~302	<30	—	207~353	<38

螺纹直径 /mm	性能等级								
	9			10			12		
	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC	$S_p$ /MPa	HV	HRC
≥3~4	900	170~302	<30	1040	272~353	28~38	1150	295 <sup>①</sup> <sub>272<sup>②</sup></sub> ~353	31 <sup>①</sup> <sub>28<sup>②</sup></sub> ~38
>4~7	915	<302	<30	1040	272~353	28~38	1150		
>7~10	940	188~302	<30	1040	272~353	28~38	1160		
>10~16	950	188~302	<30	1050	272~353	28~38	1190		
>16~39	920	188~302	<30	1060	272~353	28~38	1200	272 <sup>②</sup> ~353	28 <sup>②</sup> ~38
>39~100	—	—	—	—	272~353	28~38	—	—	—

① 1型螺母。

② 2型螺母。

有关螺纹紧固件力学性能的一些技术术语说明如下:

(1) 保证应力 ( $S_p$ ) 系指螺栓或螺母应保证的承载能力。用规定的螺纹夹具在试验机上, 载荷加到试件要求应力下保持 15s, 去除应力后螺栓的残余伸长量  $\leq 12.5\text{mm}$  为合格; 螺母以可用手拧下或用扳手旋松不过半圈后用手可拧下为合格。

(2) 楔负载强度, 用规定斜度的垫片垫着螺栓头部进行拉力试验, 头杆结合处不应有裂纹或掉头现象。

(3) 头部坚固性试验, 对  $\leq M16$  且长度太短不能进行楔负载试验的螺栓, 要求作这项试验。把螺栓插到支撑平面和孔轴线成一定角度的孔板中 (板的厚度应大于螺栓直径的两倍), 用锤打击螺栓头部, 使头部支撑面和模具的支撑面相贴合, 头杆结合处不应有裂纹或掉头现象。

(4)  $E$ 、 $G$  和  $H_1$  值的含意, 是金相法测量脱碳层时的表示方法。见图 6-1。

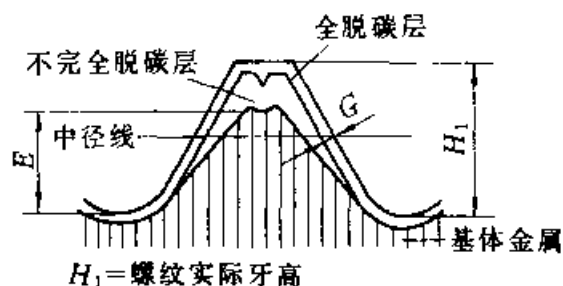


图 6-1 脱碳层

$E$ : 基体金属高度

$G$ : 全脱碳层深度

$H_1$ : 螺纹牙高度

(5) 螺母的级别中, 04、05 表示螺母公称高度为螺纹公称直径的 0.5~0.8 倍之间的螺母。前面不带“0”的级别表示螺母的公称高度大于或等于螺纹公称直径的 0.8 倍。

#### 6.1.1.2 常用材料

根据螺纹紧固件成形方法的不同, 对材料的要求和选择也不同。冷墩或冷挤压成形的要求材料的塑性好, 形变抗力小, 表面质量高, 以保证冷作成形并且不会开裂, 要选用冷墩用钢。热压热锻成形的要求材料具有良好的热塑性, 不产生裂纹, 要选用热加工用钢。切削成形的紧固件要求材料的切削性能好, 要求材料为片状珠光体组织。甚至要求用易削钢。

1. 用于冷作成形的钢材 国际 GB715 中列出了标准件用碳素热轧圆钢, GB6478 中给出了冷墩用钢 (仍沿用铆螺二字的拼音“ML”表示, 如 ML10, ML40Cr, ML15MnVB 等)。

用于冷作成形的钢材 S、P、Si、Mn 一般要比同类牌号的一般用钢低, 铸锭和材料的表面质量控制比较严格, 以减小变形抗力和防止变形开裂。表 6-3、表 6-4 和表 6-5 分别列出这些钢的化学成分和力学性能。

表 6-3 普通碳素铆螺用钢化学成分和力学性能

钢号	化学成分(质量分数)(%)					试样处 理规范	$\sigma$	$\delta_5$	$\psi$	冷顶锻	热顶锻 试验	
	C	Mn	Si	S	P		MPa	(%)				$x=\frac{h_1}{h}$
			不大于				不小于					
BL2	0.09~0.15	0.25~0.55	0.07	0.040	0.040	热轧状态	335~410	33	—	0.4	1/3 高度	
BL3	0.14~0.22	0.30~0.60	0.07	0.040	0.040		370~460	28	—	0.5	1/3 高度	

表 6-4 冷墩用钢的化学成分

序号	钢号	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Si	Mn	Cr	V	B	Ti	Mo	P (不大于)	S (不大于)
1	ML08	0.05~0.12	$<0.030$	0.20~0.50	—	—	—	—	—	0.035	0.035
2	ML10	0.07~0.14	$<0.030$	0.20~0.50	—	—	—	—	—	0.035	0.035
3	ML15	0.12~0.19	$<0.070$	0.20~0.50	—	—	—	—	—	0.035	0.035
4	ML20	0.17~0.24	$<0.070$	0.20~0.50	—	—	—	—	—	0.035	0.035
5	ML25	0.22~0.30	$<0.200$	0.30~0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.035



(续)

序号	钢 号	化学成分(质量分数)(%)									
		C	Si	Mn	Cr	V	B	Ti	Mo	P (不大于)	S (不大于)
6	ML30	0.27~0.35	<0.20	0.30~0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.035
7	ML35	0.32~0.40	<0.20	0.30~0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.035
8	ML40	0.37~0.45	<0.20	0.30~0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.035
9	ML45	0.42~0.50	<0.20	0.30~0.60	—	—	—	—	—	0.035	0.035
10	ML25Mn	0.22~0.30	<0.25	0.50~0.80	—	—	—	—	—	0.035	0.035
11	ML30Mn	0.27~0.35	<0.25	0.50~0.80	—	—	—	—	—	0.035	0.035
12	ML35Mn	0.32~0.40	<0.25	0.50~0.80	—	—	—	—	—	0.035	0.035
13	ML40Mn	0.37~0.45	<0.25	0.50~0.80	—	—	—	—	—	0.035	0.035
14	ML45Mn	0.42~0.50	<0.25	0.50~0.80	—	—	—	—	—	0.035	0.035
15	ML15Cr	0.12~0.18	<0.30	0.40~0.70	0.70~1.00	—	—	—	—	0.035	0.035
16	ML20Cr	0.17~0.24	<0.30	0.50~0.80	0.70~1.00	—	—	—	—	0.035	0.035
17	ML40Cr	0.37~0.44	<0.30	0.50~0.80	0.80~1.10	—	—	—	—	0.035	0.035
18	ML15MnB	0.14~0.20	<0.30	1.20~1.60	—	—	0.0005~ 0.0035	—	—	0.035	0.035
19	ML15MnVB	0.12~0.18	<0.30	1.20~1.60	—	0.07~ 0.12	0.0005~ 0.0035	—	—	0.035	0.035
20	ML20MnTiB	0.17~0.24	<0.30	1.30~1.60	—	—	0.0005~ 0.0035	0.04~ 0.10	—	0.035	0.035
21	ML30CrMo	0.26~0.34	<0.30	0.40~0.70	0.80~1.10	—	—	—	0.15~ 0.25	0.035	0.035
22	ML35CrMo	0.32~0.40	<0.30	0.40~0.70	0.80~1.10	—	—	—	0.15~ 0.25	0.035	0.035
23	ML42CrMo	0.38~0.45	<0.30	0.50~0.80	0.90~1.20	—	—	—	0.15~ 0.25	0.035	0.035

表 6-5 冷锻用钢的力学性能

序 号	钢 号	试样热处理制度	力学性能					硬 度			
			$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta_5$	$\psi$	$a_K$	热 轧		退 火	
			MPa		(%)		J/cm <sup>2</sup>	压痕 直径 /mm	HBS	压痕 直径 /mm	HBS
			不小于					不小于	不大于	不小于	不大于
1	ML08	加热到比 $A_{c3}$ 高 30~50℃ 的 温度,保温时间不少于 30min. 空冷	324	196	33	60	—	5.2	131	—	—
2	ML10		333	206	31	55	—	5.1	137	—	—
3	ML15		373	226	27	55	—	5.0	143	—	—
4	ML20		412	245	25	55	—	4.8	156	—	—
5	ML25		451	275	23	50	—	4.6	170	—	—
6	ML30		490	294	21	50	—	4.5	179	—	—
7	ML35		530	314	20	45	—	4.4	187	—	—
8	ML40		569	333	19	45	—	4.1	217	4.4	187
9	ML45		598	353	16	40	—	4.0	229	4.3	197
10	ML25Mn		451	273	23	50	—	4.6	170	—	—
11	ML30Mn		490	294	21	50	—	4.5	179	—	—
12	ML35Mn		530	314	20	45	—	4.4	187	—	—
13	ML40Mn		569	333	19	45	—	4.1	217	4.4	187
14	ML45Mn		598	353	16	40	—	4.0	229	4.3	197

(续)

序 号	钢 号	试样热处理制度	力学性能					硬 度			
			$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta_5$	$\psi$	$a_K$	热 轧		退 火	
			MPa		(%)		J/cm <sup>2</sup>	压痕 直径 /mm 不小于	HBS 不大于	压痕 直径 /mm 不小于	HBS 不大于
			不小于								
15	ML15Cr	一次淬火 880°C, 二次淬火 800°C, 水、油冷。回火 200°C, 水、空冷	686	490	10	45	69	—	—	4.5	179
16	ML20Cr		785	588	10	40	59	—	—	4.5	179
17	ML40Cr	850°C 油淬, 520°C 回火, 水、油冷	981	785	9	45	59	—	—	4.2	207
18	ML15MnB	880°C 水淬, 200°C 回火, 水冷	1128	932	9	45	69	—	—	—	—
19	ML15MnVB	880°C 油淬, 200°C 回火, 水、空冷	1079	883	10	45	69	4.2	207	—	—
20	ML20MnTiB	860°C 油淬, 200°C 回火, 水、空冷	1128	932	10	45	69	—	—	4.4	187
21	ML30CrMo	880°C 水淬或油淬, 540°C 回火, 水、油冷	932	785	12	50	78	—	—	4.0	229
22	ML35CrMo	850°C 油淬, 550°C 回火, 水、油冷	981	834	12	45	78	—	—	4.0	229
23	ML42CrMo	850°C 油冷, 560°C 回火, 水、油冷	1079	932	12	45	78	—	—	4.1	217

2. 用于切削和热压成形的钢材 国标中所列各种牌号的普通碳钢、碳素结构钢和合金结构钢都可以用于切削成形。为了提高切削速度, 6.8 级和低于 6.8 级的螺栓以及 4、5、6、04 级螺母允许使用易切削钢。

热压、热锻成形时应选用热作用钢。即保证热顶锻性能的钢。

3. 材料的选择和力学性能的关系 GB3098.1、GB3098.2 和 GB3098.4 各标准中都推荐了各级别的螺栓、螺母用钢的成分范围, 可详见标准。

为了选择方便, 表 6-6 给出了不同强度级别、不同直径的螺栓推荐选用的常用钢号。

表 6-6 不同强度级别、不同直径的螺栓所对应的钢号

公称螺纹直径/mm	强 度 等 级					
	3.6, 4.6, 4.8	5.6, 5.8	6.8	8.8	10.9	12.9
	钢 号					
<6	Q215-A(A2), Q235-A(A3)	20, 30, 35	30, 35, 45	35, 45, 15MnB ML35, ML45	35, 45, 15MnVB ML35, ML45, ML15MnVB	40Cr 35CrMo
6~12	Q215-B(B2), Q235-B(B3)	ML35	ML35 ML45	ML15MnB	40Cr, 20MnTiB 20MnVB	ML35CrMo
12~24	10, 15, 20 BL2, BL3 (DL2, DL3) (TL2, TL3)			35, 45, 15MnB ML35 <sup>①</sup> , ML45 <sup>①</sup> ML15MnVB	ML20MnTiB ML20MnVB ML40Cr	
24~30	ML10, ML15 ML20 Y12			20Cr, 20MnTiB 20MnVB ML20MnTiB ML20MnVB	40CrMn 35CrMo ML35CrMo	40CrMnMo 30CrMnSiA

- ① 选用这些材料时应先作淬透性试验, 按相同材料、相近规格螺栓热处理工艺淬火并回火, 然后在距试杆端头 1 倍直径处切开, 在其横截面上自表面向心部 1/4 直径处测量硬度, 三点都能达到 GB3098.1 规定的硬度范围时, 这批材料可以用于制造本栏的螺栓材料, 如果只是表面能达到, 而 1/4 直径处达不到规定硬度时, 该批材料只能改作制造比本栏直径小一级或强度级别低一级的螺栓用。

## 6.1.1.3 预备热处理

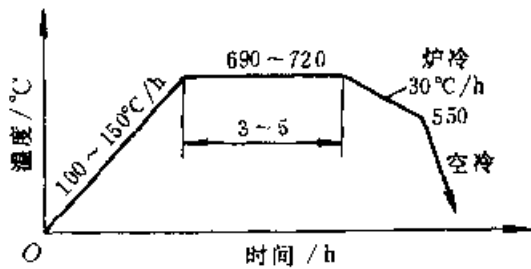
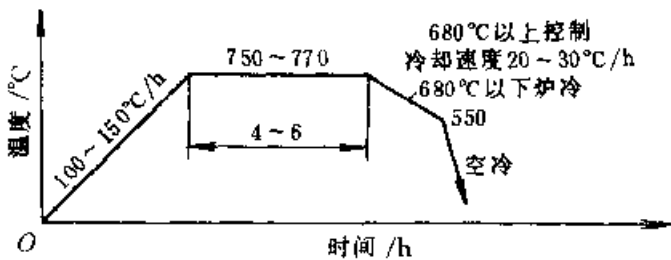
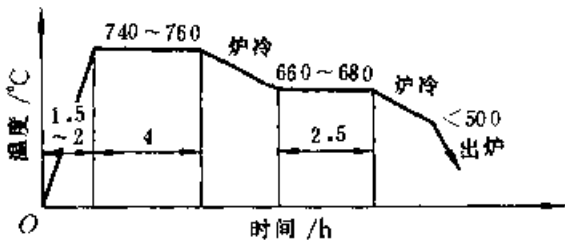
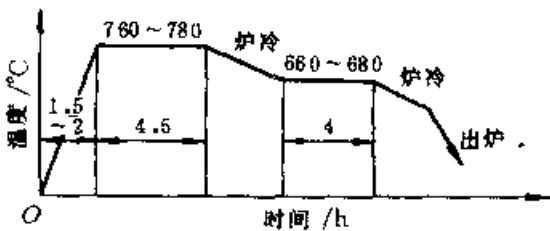
坯料预备热处理的目的是为以后的加工成形作好显微组织准备。成形的方法不同,要求的组织也不同,因而热处理工艺也不同。

1. 球化退火 冷作用钢要求进行球化退火,以得到铁素体基体上均匀分布的球状碳化物组织。球化组织硬度低、塑性好,冷作成形时不易产

生裂纹。表 6-7 列举了一些钢材的常用退火工艺。

2. 改善切削性能的热处理 为了改善切削性能,要求钢材具有片状珠光体组织,这种组织易断屑、不粘刀、表面光洁。碳素钢、低碳低合金钢一般采用正火,而中碳合金钢要求完全退火,详见表 6-8。

表 6-7 钢材球化退火工艺

退火类型	钢 号	退 火 工 艺
普通球化退火	(ML) 10、15、20、25 15Cr、20Cr 15MnB、15MnVB 20MnTiB	
	(ML) 35、40、45 40Cr、35CrMo 42CrMo	
等温球化退火	(ML) 35、40、45	
	(ML) 40Cr、35CrMo 42CrMo	

注:应根据炉型、炉子大小适当调整工艺参数。



及12级的细牙螺母一般都要求经过调质处理,才能达到力学性能规定中的各项要求。

根据螺栓和螺母的螺纹精度、硬度、加工方法、工艺路线和用户具体要求,或进行成品热处理,或进行半成品热处理。成品热处理是在零件全部加工成形(含螺纹)后进行淬火和回火。螺纹精度为6H、6g的一般规格的螺栓和螺母可以进行成品热处理,以减少滚丝轮、搓丝板、丝锥等工具的消耗量,提高生产率和降低成本。半成品热处理是在加工螺纹之前或下料之后的坯料状态下进行淬火和回火。螺纹精度高于6H、6g或加工工艺、粗糙度和畸变等有特殊要求的螺栓和螺母以及切削加工的小批零件常进行这种方式的热处理。

切削成形的螺栓和螺母在加工时原材料表面的脱碳层已基本切除,可以在脱氧良好的盐浴炉中加热淬火。但是采用冷锻成形时,原材料的脱碳层不但仍然存在,而且被挤向牙尖。见图6-1。尽管在严格脱氧的盐浴炉中或在一般保护气氛炉中加热,也无法克服原材料造成的脱碳。因此E和G值往往超过标准规定的允许范围。只有采用可以严格控制碳势的可控气氛炉,才可以在加热的同时,对脱碳的表面进行适度的复碳,以保证E和G值都在合格范围之内。

2. 热处理设备的选择 通用紧固件生产量大、价格低廉、利润微薄,但是螺纹部分又是比较

细微相对精密的结构。因此要求热处理设备必须具备生产能力大、自动化程度高、热处理质量好的能力。同时,要求设备造价和运行费必须尽可能低。进入90年代以来,带有保护气的连续式热处理生产线已占主导地位。炉型有震底炉机组、网带炉机组和铸链炉机组等。其中以震底炉的设备造价最低,热效率最高,维修费用又最低。因此热处理成本也最低。网带炉居中,铸链炉最高。在网带炉中无马弗式又优于马弗式的。震底炉、网带炉适用于中小规格紧固件;铸链炉适于较大的紧固件。

3. 热处理工艺的确定 各种材料制造的螺栓和螺母的热处理规范可参考表6-10、6-11、6-12。具体编制热处理工艺时,还应根据所使用的设备、装载方式、零件的尺寸和结构特点结合工艺试验来制定。一般来说,淬火加热的保温时间,盐浴炉中工件装筐的为0.4min/mm,单件吊装的为0.3min/mm(按有效厚度),气体加热炉堆装的按料层计算为1.2~1.5min/mm,散装的为1~1.2min/mm(按散装零件的有效厚度)。在连续式淬火炉的额定生产率下,零件在炉内有效加热区中通过的时间一般为20~60min。直径小或料层薄的取下限,直径大或料层厚的取上限。震底炉热效率比网带炉、链板炉高,加热时间可以短些。需要复碳的零件可根据气氛的类型、炉子性能、原材料脱碳层深度等情况确定合适的加热时间,一般可以等于或略长于正常淬火加热时间。

表 6-10 35、45 钢螺栓和螺母热处理规范

钢 号	螺栓、螺母名义直径/mm	淬火温度/℃	淬火介质(质量分数)	回火温度/℃	冷却介质	硬 度(HRC)
35	<M16	830~850	5%盐水	140~460	空 气	30~36
				160~520	空 气	25~30
				520~580	空 气	18~25
	>M16	840~860	5%盐水	110~460	空 气	30~36
				460~520	空 气	25~30
				520~580	空 气	18~25
45	<M16	810~830	5%盐水	420~460		35~40
				460~490		30~36
				190~540		25~30
				540~590		18~25
	>M16	820~840	5%食盐水	410~450		35~40
				450~490		30~36
				490~540		18~30
30Mn		850	3%食盐水	550	空 气	18~25

○ 6H 为内螺公差 6 级, 6g 为外螺纹公差 6 级 - GB2316-81。

表 6-11 螺栓和螺母用部分合金钢热处理规范和力学性能

钢 号	螺栓名义 直径或试 样截面 /mm	热 处 理 规 范				力 学 性 能					硬度 (HRC)	备 注
		淬火温度 /°C	淬火介质	回火温度 /°C	冷却介质	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_K$ /J·cm <sup>-2</sup>		
30CrMnSi	25	880	油	540	水或油	≥1078	≥882	≥10	≥45	≥49		
	60	880	油	540~560	水或油	≥882	≥735	≥15	≥45			~φ50 可 水淬
	≤25	890	370°C 硝酸盐浴			1357.3	1073.1		57	109.8		适用于 M24 最终热 处理件
30CrMo 和 38Cr	≤20	860~880	水淬油冷	600~630	水或油	≥784	≥588	≥15	≥50	≥78.4		也可用 880~900°C 油淬
	22~36	860、880	水淬油冷	570~590	水或油	≥784	≥588	≥15	≥50	≥78.1		
35CrMo 和 40Cr	≤20	840~860	油	620~650	水或油	≥784	≥588	≥13	≥50	≥78.1	24~32	硬度供 参考(下 同) > φ50 可水淬
	20~39	840~860	油	600~630	水或油	≥784	≥588	≥15	≥50	≥78.1	24~32	
	>39~90	860~880	油	580~610	水或油	≥784	≥588	≥15	≥50	≥78.1	24~32	
40Cr	25	850	油	500	水或油	≥980	≥784	≥9	≥45	≥58.8		
	≤20	840~860	油	540~560	水或油	≥980	≥784	≥9	≥45	≥58.8	28~33	
35CrMo	25	850	油	500	水或油	≥980	≥784	≥12	≥45	≥78.4		
42CrMo	60	840	油	570~600	水或油	≥980	≥784	≥10	≥45		30~35	可用于大 截面螺栓
40B	25	840	水	550	水	≥784	≥637	≥12	≥45			
25Cr2MoVA	25	900	油	620	空气	≥931	784	≥14	≥55	≥78.4		
	55~85	900	油	620	空气	833	686	14		58.8		
	>85~130	900	油	620	空气	784	833	14		58.8		
40Cr2MoV	25	860	油	600	油	≥1127	≥931	≥10	≥45	≥58.8		
	55~85	860	油	600	油	882	686	15		58.8		
	>85~130	860	油	600	油	833	647	15		58.8		

表 6-12 螺栓和螺母低碳低合金钢的热处理和力学性能

钢 号 (含 ML)	试样毛 坯直径 (mm)	热 处 理 规 范				力 学 性 能					硬度 (HRC)
		淬火温度 /°C	淬火介 质(质量 分数)	回火温 度 /°C	冷却 条件	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_K$ /J·cm <sup>-2</sup>	
15MnB(成分、质量分数) (C0.15, Si0.16, Mn1.26, B0.007 P0.019, S0.013) (%)	6	880	10%食 盐水	稳定化处理 状态		1575.8	1189.7	13.0	59.3	62.82	
				200	空冷	1476.9	1251.5	12.7	60.7	62.72	
				350	空冷	1156.4	1127	12.7	65.0	63.7	
				400	空冷	1058.4	1009.4	13.4	65.0	117.6	

(续)

钢 号 (含 ML)	试样毛 坏直径 (mm)	热 处 理 规 范				力 学 性 能					硬度 (HRC)
		淬火 温度 /°C	淬火介 质(质量 分数)	回火 温度 /°C	冷却 条件	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$\alpha_K$ (J·cm <sup>-2</sup> )	
15MnVB(成分、质量分 数) (C0.16,Mn1.53 V0.10,B0.0027 Si0.12,P0.016, S0.019)(%)	15	880	10%食 盐水	淬火	状态	1366.1	974.1	13.04	47.0	—	45
				200	空冷	1325.9	1110.3	12.63	50.9	—	43
				250	空冷	1294.6	1124.1	12.90	57.4	—	41
				300	空冷	1227.0	1111.3	12.43	60.7	—	39
				400	水冷	1089.8	1048.8	14.67	64.2	—	34
				500	水冷	912.4	884.8	17.56	68.7	—	27
20MnTiB	15	860	油	200	空冷	$\geq 1127.0$	$\geq 931$	$\geq 10$	$\geq 45$	$\geq 68.6$	
		870	油	200	空冷	$\geq 1241.6$	$\geq 1009.5$	$\geq 14$	$\geq 62$	$\geq 100.9$	
		890	油	200	空冷	$\geq 1205.4$	$\geq 1089.8$	$\geq 12.5$	$\geq 60.5$	$\geq 112.7$	

淬火介质的选择首先应保证足够的冷却能力。冷锻用钢的淬透性一般低于相同牌号的非冷锻钢,因此淬火介质的冷却能力应选用高一些的。还应考虑畸变和开裂,含碳量大于0.4%(质量分数)的碳素钢,开裂倾向严重。特别是淬火介质的冷却能力和零件直径(厚度)达到最不利的配合的时候,开裂特别严重。曾经有这样的事例,45钢制造的M10的螺栓,按正常温度加热淬火,无论是盐水或清水,都产生相当比例的裂纹,当直径增大到M16时,用同批钢材制造的零件,以相同条

件淬火,则没有裂纹产生。当把上述淬火介质换成25%NaOH(质量分数)水溶液时,M10的螺栓也不出现裂纹。长杆零件应当注意弯曲问题,必要时可增加校直工序。螺母淬火后容易出现内径胀大,应根据淬火后内径胀大的统计数据在螺母加工时相应减小内径尺寸。

零件的回火温度应按力学性能要求适当选择。表6-10~表6-12已给出一些参考数据,但不能低于表6-13给出的最低回火温度。特别是低碳合金钢。

表 6-13 各级螺栓用钢成分范围及最低回火温度

性能等级	材 料 和 热 处 理	化学成分(质量分数)(%)				最低回 火温度 /°C
		C		P	S	
		最低	最高	最高	最高	
3.6	低碳钢	—	0.20	0.05	0.06	—
4.6	低碳钢或中碳钢	—	0.35	0.05	0.06	—
4.8						
5.6						
5.8						
6.8	低碳合金钢(合金元素如硼或锰或铬)淬火、回火	0.15	0.35	0.04	0.05	425
8.8						
	中碳钢淬火、回火	0.25	0.55	0.04	0.05	450

(续)

性能等级	材 料 和 热 处 理	化学成分(质量分数)(%)				最低回火温度 /°C
		C		P	S	
		最低	最高	最高	最高	
9.8	低碳合金钢(合金元素如硼或锰或铬)淬火、回火	0.15	0.35	0.01	0.05	410
	中碳钢、淬火、回火	0.25	0.55	0.04	0.05	410
10.9	低碳合金钢(合金元素如硼或锰或铬)淬火、回火	0.15	0.35	0.04	0.05	340
	中碳钢、淬火、回火	0.25	0.55	0.04	0.05	425
	低、中碳合金钢(合金元素如硼或锰或铬)淬火、回火	0.20	0.55			
	合金钢	0.20	0.55	0.035	0.035	
12.9	合金钢	0.20	0.50	0.035	0.035	380

对于允许表面较粗糙的螺栓,如电杆螺栓和建筑上使用的螺栓,在可控气氛炉中加热后可直接落入热镀锌槽中进行贝氏体等温淬火,同时完成热镀锌工序,省去回火工序。

对性能优良的可控气氛热处理生产线,螺栓或螺母的氧化工序可在回火炉中与回火工序一道完成,省去化学氧化(发蓝、发黑)工序。也可以配制一定成分的氧化液,从回火炉中出来的零件直接落入这种氧化液中完成氧化处理工序。

4. 炉气及气氛控制 吸热式气氛、滴注式气氛和氮基气氛(包括空分氮、氨燃烧气氛、净化放热式气氛等)都可以用于紧固件淬火加热的保护气氛或复碳气氛。甲醇滴注或炉外裂解形成的气氛,理论含氢量为 $w(H)$ 为66.7%,对处理件有产生氢脆的危险,又易爆炸,成本又高,应尽量不选用。吸热式气氛使用的历史较长,也比较普遍,但不适合回火保护,因为700℃以下,一氧化碳不稳定,将析出大量碳黑。氮基气氛含氢量低,没有氢脆和爆炸危险,低温下也不析出碳黑,不但可以作为淬火加热时的保护气氛,还可以用于回火的保护加热,原料来源广。

淬火加热和气体渗碳相比,加热周期较短,尤其是连续式炉、零件不停地进入炉中,空气和水分也随之带入炉中,增加了气氛的氧化和脱碳趋势。炉气和零件的含碳量根本无法建立平衡状态。为了防止零件的脱碳,必须增加碳氢化合物的添加量。以实际测量炉气成分可以看到,炉气中 $CH_4$ 的含量远远高于炉气平衡时对应零件含碳量碳势

相应的 $CH_4$ 含量,由此证明炉气是处于非平衡状态。因此也就不能应用炉气平衡理论用碳势控制仪表来控制炉内气氛。除非是把生产过程放的非常缓慢,实际的生产过程,零件脱、渗碳的控制是借助于随炉金相分析的结果与炉气中 $CH_4$ 含量或对应的露点或氧势值建立经验曲线,确定合理的控值范围,以此指导生产中调整碳氢化合物的添加量,从而使 $CH_4$ 或露点或氧势达到规定的范围,保证零件的表面含碳量达到合格范围。

螺纹的脱碳会导致螺栓在未达到力学性能要求的拉力时先发生脱丝,使螺纹紧固件失效。因此规定了各个级别的 $E$ 和 $G$ 值。前面已经谈到原材料的脱碳,如果退火不当,更会使原材料脱碳加深。另外,由于淬火加热炉气控制不当,也会造成螺纹脱碳超差。对于 $E$ 和 $G$ 值超差的脱碳螺纹件,在淬火加热的同时,必须采取复碳工艺。这是一项比较复杂的热处理工艺。在复碳时除了按淬火时控制炉子气氛之外,还要掌握好复碳时间和炉气碳势的搭配关系。图6-2代表在非平衡条件下复碳过程的示意图。分图a表示螺纹牙的原始脱碳状态, $E$ 和 $G$ 值均已超差;分图b表示一般渗碳过程。复碳则相当这两种情况的叠加。分图c表示经过时间 $t_1$ 后的结果。复碳不足;分图d表示经过时间 $t_2$ 后的结果。复碳适当;分图e表示经过时间 $t_3$ 的结果,复碳过渡。大量的生产实践证明,经过以上的复碳过程,尽管在热处理前螺纹的 $E$ 和 $G$ 值已超差,都可以在最终热处理后使其都达到合格范围。



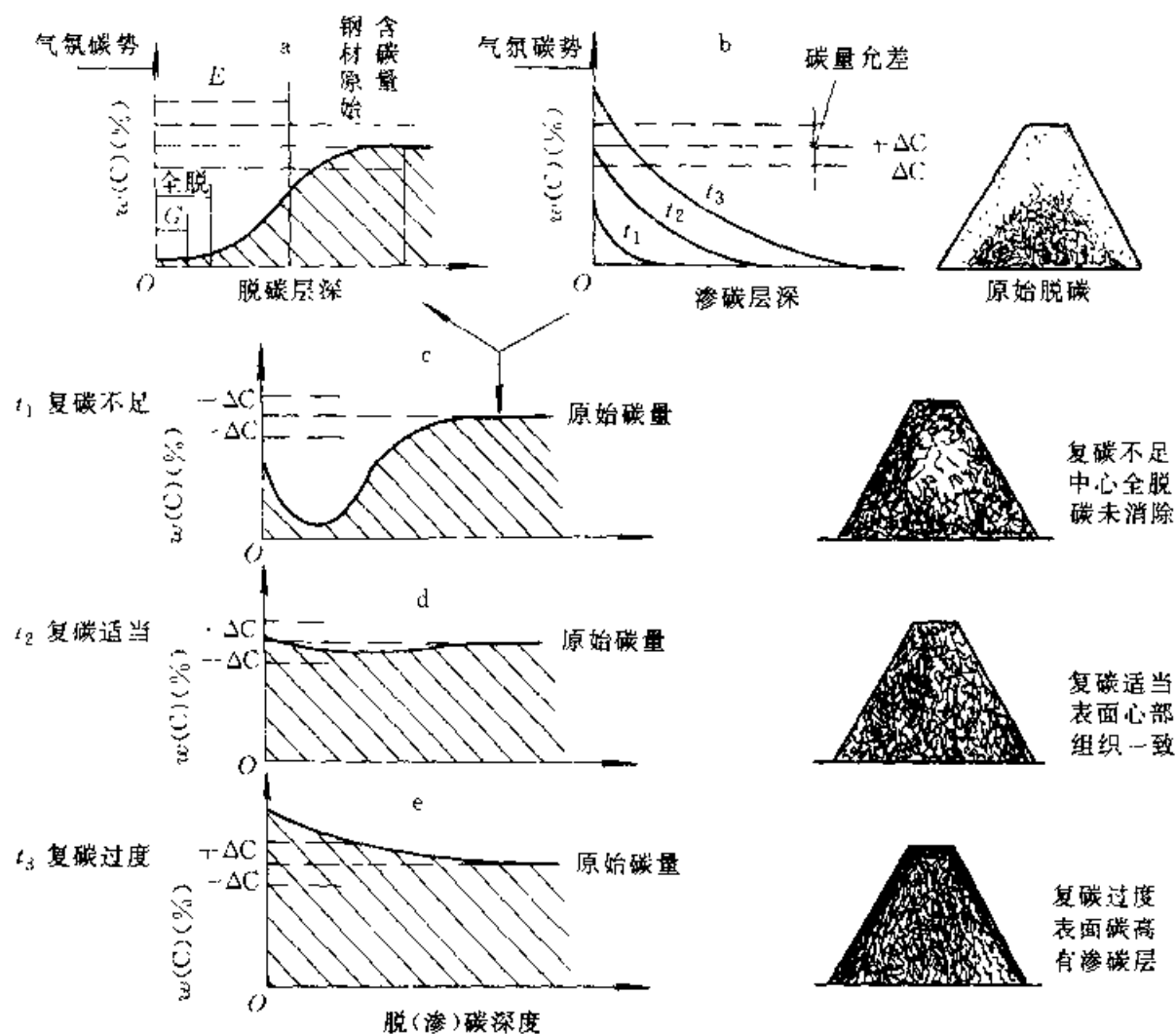


图 6-2 复碳过程示意图

### 6.1.2 专用螺纹紧固件

见表 6-14。紧定螺钉的用材和热处理方法与通用螺纹紧固件基本相同，可以参照通用螺纹紧固件的热处理工艺进行。

#### 6.1.2.1 紧定螺钉

GB3098.3—82 中紧定螺钉的力学性能等级

表 6-14 紧定螺钉的力学性能要求

力 学 性 能		性 能 等 级				
		14H	22H	33H	45H	
维氏硬度(HV)	大于	140	220	330	450	
	小于	290	300	440	560	
布氏硬度 HBS( $P=30D^2$ )	大于	133	209	314	428	
	小于	276	285	418	532HBW	
洛氏硬度	HRB	大于	75	95	—	—
		小于	105	—	—	—
	HRC	大于	—	—	33	45
		小于	—	30	44	53
螺纹未脱碳层的最小高度 $E$ , 大于		—	$1/2H_1$	$2/3H_1$	$3/4H_1$	
全脱碳层的最大深度 $G_{\max}/\text{mm}$		—	0.015	0.015	不允许有全脱碳层	
表面硬度(HV <sub>0.05</sub> )	小于	—	320	450	580	

注：内六角紧定螺钉没有 14H、22H 级。

### 6.1.2.2 自攻螺钉、自攻锁紧螺钉和自钻自攻螺钉

这几种螺钉都是用渗碳钢制造,经浅层渗碳(或碳氮共渗)后淬火并低温回火,达到其力学性能要求。它们的力学性能要求详见 GB3098.5、GB3098.7、和 GB3098.11。现把这些标准中有关渗层深度、硬度要求以及荐用材料综合于表 6-15 中。

这类螺钉由于要求具备能自攻、自钻低碳钢板性能,因此要求高硬度的表面以实现切削和挤压能力,与此同时还必须有足够的芯部强度和韧性的配合,以防止在工作中发生扭曲或折断。

这类螺钉的渗碳属于浅层渗碳。因此国内外大都选用网带炉或震底炉连续生产线。热处理工艺可参考 6.1.1.1、(4)的控制方法,根据不同渗

层深度确定合适的渗碳时间。

### 6.1.2.3 耐腐蚀紧固件

一般在常温下防止大气腐蚀的紧固件,可以用普通钢材制造,然后经表面镀锌或镀铬,也可以采用化学热处理来提高表面的耐蚀性。但是当耐蚀性要求更高时,应选用不锈钢制造。

1. 不锈钢螺栓、螺钉、螺柱和螺母的材料和力学性能 根据 GB3098.6 规定,不锈钢紧固件的材料用英文字母 A、C 和 F 以及其后的数字表示,英文字母放在前面,中间用一字线隔开,后面用数字表示力学性能的级别,该数字对应其抗拉强度的 ( $\sigma_b$ /MPa) 1/10。详见表 6-16。材料的化学成分和对应的钢种见表 6-17。马氏体和铁素体不锈钢紧固件的力学性能见表 6-18。奥氏体不锈钢紧固件的力学性能见表 6-19。

表 6-15 自攻螺钉、自攻锁紧螺钉和自钻自攻螺钉的  
渗碳层深度、硬度和材料

名 称	螺 纹 规 格	渗碳层深度/mm		硬 度		材 料
		min	max	表 面	心 部	
自攻螺钉 GB3098.5	ST2.2 和 ST2.6	0.04	0.12	$\geq 15\text{HRC}$ 或 $\geq 450\text{HV}0.3$	26~10HRC 或 270~390HV0.3	渗碳钢 16Mn、20Mn 15MnB 等
	ST2.9~ST3.5	0.05	0.18			
	ST3.9~ST5.5	0.10	0.25			
	ST6.3~ST8	0.15	0.28			
自攻锁紧螺钉 GB3098.7	M2、M2.5	0.04	0.12	$\geq 450\text{HV}0.3$	285~425HV0.3	A 20Mn、15MnB
	M3、M3.5	0.05	0.18			
	M4、M5	0.10	0.25			
	M6、M8	0.15	0.28			B 10、15
	M10、M12	0.15	0.32			
自钻自攻螺钉 GB3098.11	ST2.9、ST3.5	0.05	0.18	$\geq 360\text{HV}0.3$	270~425HV5	20Mn、15MnVB
	ST3.9~ST5.5	0.10	0.23			
	ST6.3	0.15	0.28			

表 6-16 不锈钢紧固件的性能标记

材 料		性 能 等 级				
类 别	组 别	45	50	60	70	80
A 奥氏体	A1	—	A1—50	—	A1—70	A1—80
	A2	—	A2—50	—	A2—70	A2—80
	A4	—	A4—50	—	A4—70	A4—80

(续)

材 料		性 能 等 级				
类 别	组 别	45	50	60	70	80
C 马氏体	C1	—	C1-50	—	C1-70	—
	C3	—	—	—	—	C3-80
	C4	—	C1-50	—	C4-70	—
F 铁素体	F1	F1-45	—	F1-60	—	—

表 6-17 不锈钢紧固件材料

类别	组别	化学成分(质量分数)(%)									钢 号
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	其 他	
A 不锈钢	A1	0.12	1	2	0.02	0.15~ 0.35	17~ 19	0.6	8~ 10	Ti: $5 \times C\% \sim 0.8\%$	1Cr18Ni9Ti(易切削)
	A2	0.08	1	2	0.05	0.03	17~ 20	—	8~ 13	Ti: $5 \times C\% \sim 0.8\%$	Cr18Ni9Ti
	A4	0.08	1	2	0.05	0.03	16~ 18.5	2~ 3	10~ 14	Nb: $10 \times C\% \sim 1\%$	Cr18Ni12Mo2Ti
C 马氏体 不锈钢	C1	0.09~ 0.15	1	1	0.05	0.03	11.5~ 14	—	1	—	1Cr13
	C3	0.17~ 0.25	1	1	0.04	0.03	16~18	—	1.5~ 2.5	—	1Cr17Ni2 2Cr17Ni2
	C4	0.08~ 0.15	1	1.5	0.06	0.15~ 0.35	12~ 14	0.6	1	—	2Cr13(易切削)
F 铁素体 不锈钢	F1	0.12	1	1	0.04	0.03	15.5~ 18	—	0.5	Ti: $5 \times C\% \sim 0.8\%$ Nb: $10 \times C\% \sim 1\%$	Cr17Ti(Nb)

表 6-18 马氏体和铁素体不锈钢紧固件力学性能

材 料		性能 等级	螺栓、螺钉和螺柱			螺母	螺栓、螺钉、螺柱和螺母					
类 别	组 别		$\sigma_L$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$S_p$	硬 度					
			MPa	MPa	(%)	MPa	HV		HBS		HRC	
			大于	大于	大于		大于	小于	大于	小于	大于	小于
C 马氏体	C1	50	500	250	0.2 <i>d</i>	500	—	—	—	—	—	—
		70	700	410	0.2 <i>d</i>	700	220	330	209	314	20	34
	C2	80	800	640	0.2 <i>d</i>	800	240	340	228	323	21	35
	C4	50	500	250	0.2 <i>d</i>	500	—	—	—	—	—	—
70		700	410	0.2 <i>d</i>	700	220	330	209	314	20	34	
F 铁素体	F1 <i>d</i> ≤24mm	45	450	250	0.2 <i>d</i>	450	—	—	—	—	—	—
		60	600	410	0.2 <i>d</i>	600	—	—	—	—	—	—

注: d 为螺纹直径。



(续)

钢 号	热 处 理 规 范				力 学 性 能					硬度 (HBS)	备 注
	淬火温度 /°C	淬火介质	回火温度 /°C	冷却介质	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ (%)	$\phi$ (%)	$a_K$ /J·cm <sup>-2</sup>		
2Cr13	1000~1050	水或油	700~790	空气	≥647	≥441	≥16	≥55	≥78.4		
	1050	空气	500	空气	1225	931	7	45	49		
	1050	空气	600	空气	833	637	10	55	68.6		
	1050	油	660	空气	847.7	695.8	19	63.5	127.4		
	再结晶退火规范:780°C, 2h 炉冷至 500°C 出炉										供中间退火参考
Cr17Ni2	950~975	油	275~300	油	≥1078		≥10		≥49		
	1030	油	680	油	940.8	$\sigma_{0.2}=754.6$	17	59			
	再结晶退火规范:780°C, 2h 炉冷至 500°C 出炉										供中间退火参考
1Cr18Ni9Ti	1100~1150	水	—	—	539~637	196~343	50~60	60~70	>196		退火
	1000~1150	水	时效:800°C, 10h		641.9	303.8	55	75	245		时效
	850	水									供中间退火参考

不锈钢热处理应尽可能在可控气氛中进行。奥氏体和铁素体不锈钢以及 Cr17Ni2 等马氏体不锈钢,因其含铬量较高,应选用氢气或氨分解气体保护,炉子要求有耐热钢炉罐,炉气露点应控制在-60°C以下。对于 Cr13 型不锈钢推荐采用含氢量高于 18%(质量分数)的氨燃烧气体保护,露点也要控制在-60°C 以下。CO 对铬是氧化性气氛,因此含有 CO 的各种保护气氛都不能用于不锈钢的热处理。

#### 6.1.2.4 耐高温和低温的螺纹连接副

GB/T3098.8 规定了耐热用螺纹连接副。这类连接副既要承受高温、交变载荷,又要在相当大的程度上保持预紧力和耐疲劳强度的工况条件下使用。要求具有高的抗松弛性、足够的强度、低的缺口敏感性、一定的持久强度、小的蠕变脆化倾向和良好的抗氧化性。表 6-21 列出了不同温时耐热螺纹连接副的材料选用。表 6-22 为几种钢材的高温力学性能。表 6-23 为几种钢材的抗松弛性能。

表 6-21 不同温度时耐热螺纹连接副的材料选用

持续工作的极限温度(参考)/°C	螺栓、螺母		螺母	
	材料牌号	标准编号	材料牌号	标准编号
400	35A 45	GB699	35	GB699
500	30CrMo 35CrMo 35CrMoA	GB3077	35, 45 20CrMoA	GB699 GB3077
510	21CrMoV		20CrMoA 35CrMoA	GB3077
550	20CrMoV 21CrMoV		30CrMo 35CrMo	GB3077
570	20CrMoVTiB 20CrMoVNbTiB		20CrMoV 21CrMoV	
600	2Cr12WMoVNbB	(YB/28)	20CrMoV	
650	GH2132	GBn177	21CrMoV	

注: 1. 螺栓、螺母应比螺母的硬度高(如高 30~50HBS)。

2. 受力套管的材料,推荐采用与螺母相同的材料。

表 6-22 几种钢材的高温力学性能

钢 号	热处理条件	高 温 力 学 性 能 /MPa														使用范围		
		高温短时力学性能						蠕 变 极 限				持 久 极 限						
		$\sigma_b$	20℃	200℃	300℃	400℃	500℃	$\sigma_1/10^4$		450℃	500℃	550℃	$\sigma_b/10^4$					
30CrMo	880℃ 淬 油 550℃ 回 火		725.2	656.6	715.4	629.2	558.6		—	—	139.2	57.8	$\sigma_b/10^4$	294	186.2	107.8	<450℃ 螺栓 <500℃ 螺母	
		$\sigma_s$	588	490	519.4	480.2	421.4	$\sigma_1/10^5$	—	107.8	68.6	34.3	$\sigma_b/10^5$	225.4	132.3	75.5		
35CrMo	880℃ 淬 油 550℃ 回 火	$\sigma_b$	20℃	400℃	450℃	500℃			450℃	500℃	550℃						<480℃ 螺栓 <510℃ 螺母	
			877.1	733	669.3	545.9		$\sigma_1/10^4$	156.8	83.3	49							
		$\sigma_{0.2}$	771.3	575	554.7	487.1		$\sigma_1/10^5$	102.9	49	24.5							
25Cr2MoV	930℃ 淬 油 620 ~ 650℃ 回火	$\sigma_b$	20℃	300℃	400℃	500℃	550℃		450℃	500℃	525℃	550℃	$\sigma_b/10^4$	500℃	525℃	550℃	600℃	<530℃ 螺栓 <570℃ 螺母
			882	744.8	700.7	637	558.6	$\sigma_1/10^4$	—	—	88.2		254.8~ 284.2	98	49			
		$\sigma_{0.2}$	784	656.6	607.6	588	480.2	$\sigma_1/10^5$	225.4	78.4	49	29.4	$\sigma_b/10^5$	186.2~ 205.8	107.8	58.8	29.4	
25Cr2Mo1V	第 一 次 正 火 1030 ~1050℃ 第 二 次 正 火 950~ 970℃ 650 ~ 680 回 火 6h	$\sigma_b$	20℃	500℃	525℃	600℃							$\sigma_b/10^4$	550℃			<570℃ 螺栓	
			872.2	695.8	666.4	656.6							215.6					
		$\sigma_{0.2}$	764.4	646.8	597.8	558.6							$\sigma_b/10^5$	147~ 176.4				
40Cr2MoV	855℃ 淬 油 750℃ 回 火	$\sigma_s$	20℃	100℃	200℃	300℃	350℃	DVM	400℃	450℃	500℃						<550℃ 大截 面螺栓	
			882	833	764.4	680	637		392	235.2	127.4							

(续)

钢 号	热处理条件	高 温 力 学 性 能 /MPa														使用范围	
		高温短时力学性能								蠕 变 极 限				持 久 极 限			
		$\sigma_b$	20°C	200°C	400°C	500°C	600°C	$\sigma_b/10^4$	400°C	450°C	500°C	593°C	$\sigma_b/10^4$	170°C	500°C		530°C
1Cr13	1030 ~ 1050°C 淬油, 750°C 回火	$\sigma_b$	602.7	529.2	490	362.6	225.4	$\sigma_b/10^4$	—	—	93.1	—	$\sigma_b/10^4$	254.8	215.6	186.2	<500°C 但在 375 ~ 175°C 略有脆性
		$\sigma_{0.2}$	406.7	367.5	362.6	274.4	176.4	$\sigma_b/10^5$	120.5	102.9	55.9	34.3	$\sigma_b/10^5$	215.6	186.2	156.8	
2Cr13	1000 ~ 1020°C 空冷, 720 ~ 750°C 回火	$\sigma_b$	705.6	543.9	519.4	431.2	343	$\sigma_1/10^4$	—	—	156.8	66.6	$\sigma_b/10^4$	284.2	205.8	186.2	<500°C
		$\sigma_{0.2}$	509.6	392.0	396.9	357.7	274.4	$\sigma_1/10^5$	127.4	78.4	49	29.4	$\sigma_b/10^5$	254.8	176.4	156.8	
		$\sigma_b$	607.6	441	392	274.4	176.4	$\sigma_1/10^4$	172.5	89.2	32.3	5.88	$\sigma_b/10^4$	186.2 ~ 235.2	127.4 ~ 166.6	58.8 ~ 98	
1Cr18Ni9Ti	1050°C 淬水, 持久极限经 800°C, 10h 时效	$\sigma_{0.2}$	274.4	176	176.4	156.8	98	$\sigma_1/10^5$	—	86.2	18.6	—	$\sigma_b/10^5$	137.2 ~ 196	88.2 ~ 127.4	39.22 ~ 68.6	<600°C
		$\sigma_b$	607.6	441	392	274.4	176.4	$\sigma_1/10^4$	172.5	89.2	32.3	5.88	$\sigma_b/10^4$	186.2 ~ 235.2	127.4 ~ 166.6	58.8 ~ 98	
20Cr1Mo1VTiB	1050°C 淬油, 680°C 回火 6h	$\sigma_b$	1006.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_b/10^5$	570°C	—	—	<570°C 螺栓
		$\sigma_s$	955.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\sigma_b/10^5$	172.5 ~ 211.7	—	—	
20Cr1Mo1VNBH	1000°C 正火, 670°C 回火 6h, 1050°C 油淬, 680°C 回火 6h	$\sigma_b$	1015.3	742.8	713.4	662.5	—	—	—	—	—	—	$\sigma_b/10^5$	570°C	(光滑)	—	<570°C 螺栓
		$\sigma_s$	928.1	693.8	676.2	632.1	—	—	—	—	—	—	$\sigma_b/10^5$	235.2	(缺口)	—	
		$\sigma_s$	928.1	693.8	676.2	632.1	—	—	—	—	—	—	$\sigma_b/10^5$	230.7	—	—	

&lt;500°C 但在 375 ~ 175°C 略有热脆性

&lt;600°C

&lt;570°C 螺栓

&lt;570°C 螺栓

表 6-23 几种钢材的抗松弛性

钢 号	热处理状态	试验温度 /°C	初应力 /MPa	在下列时间(h)内的残留应力/MPa										
				25	100	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000
35CrMo	880°C 正火, 650°C 回火 2h	450	147.0	100.9	96.0		83.3	81.3	77.4	73.5		69.6 <sup>①</sup>		56.8 <sup>①</sup>
			245.0	161.7	147.0		127.4	120.5	114.7	110.3		100.0 <sup>①</sup>		80.4 <sup>①</sup>
	1000°C 正火, 650°C 回火 2h	450	147.0	111.7	106.8		99.0	96.0	92.1	90.2		81.3 <sup>①</sup>		68.6 <sup>①</sup>
			245.0	193.1	178.4		167.9	158.8	149.0	196.0		129.4 <sup>①</sup>		102.9 <sup>①</sup>
	880°C 淬油, 650°C 回火 2h	400	147.0	100.0	87.2		66.6	63.7	57.8	55.9		51.9 <sup>①</sup>		44.1 <sup>①</sup>
			245.0	161.7	125.2		103.9	97.0	86.2	82.3		73.5 <sup>①</sup>		62.7 <sup>①</sup>
			343.0	219.5	186.2		133.3	117.6	108.8	106.8		96.8 <sup>①</sup>		80.4 <sup>①</sup>
			147.0	92.1	81.3		64.7	60.3	55.9	52.9		46.1 <sup>①</sup>		32.3 <sup>①</sup>
			245.0	144.1	120.5		91.1	85.3	79.4	76.4		66.6 <sup>①</sup>		51.0 <sup>①</sup>
			117.6	93.1	89.2		86.2	77.4	73.5	72.5		68.6		55.9
25Cr2MoV	920°C 正火, 650°C 回火 2h	500	245.0	193.1	100.3		165.6	156.8	149.9	137.2		122.5		90.2
			343.0	250.9	235.2		214.6	200.9	196.0			176.4		147.0
	920°C 淬油, 650°C 回火 2h		117.6	98.0	93.1		81.3	76.4	70.6	67.6		55.7		37.2
			345.0	154.8	145.0		125.4	117.6	107.8	101.9		91.1		70.6
	1000°C 正火, 650°C 回火 2h		343.0	212.7	193.1		167.6	156.8	148.0	137.2		122.5		92.1
			117.6	98.0	95.1		89.2	86.2	83.3	81.3		76.4		68.6
	980°C 正火, 650°C 回火 1.5h		245.0	201.9	192.1		179.3	171.5	164.6	158.8		149.0		127.4
			343.0	264.0	252.8		237.2	230.3	225.4	217.6		210.7		186.2
						181.3	170.5	156.8	143.1	136.2				
						210.7	196.0	185.2	156.8	127.4				



(续)

钢 号	热处理状态	试验温度 /°C	初应力 /MPa	在下列时间(h)内的残留应力/MPa												
				25	100	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000	20000	
25Cr2Mo1V	1040°C×1h 正火, 960°C×1h 正火 670°C×6h 回火	525	298.0			194.0	179.3	165.6		132.3	128.4					
			343.0			219.5	198.0	180.3		143.1	131.3					
		550	294.0			173.5	155.8	114.7		85.3						
			343.0			200.9	187.3	129.4		99.0						
	1030~1050°C 正火, 650°C 回火 6h	525	245.0			176.4	164.6	147.0	127.4	122.5			98.0 <sup>①</sup>	90.2 <sup>①</sup>		
			294.0			205.8	196.0	166.6	137.2	129.4			107.8 <sup>①</sup>	100.9 <sup>①</sup>		
		550	343.0			245.0	225.4	205.8	183.3	166.6			127.4 <sup>①</sup>	117.6 <sup>①</sup>		
			245.0			142.1	127.4	107.8	84.3	73.5			51.0 <sup>①</sup>	42.1 <sup>①</sup>		
	1030~1050°C 正火, 950~ 970°C 正火 680°C 回火 6h	525	294.0			186.2	156.8	129.4	98.0	88.2			58.8 <sup>①</sup>	49.0 <sup>①</sup>		
			345.0			205.8	181.2	140.1	112.7	98.0			68.6 <sup>①</sup>	58.8 <sup>①</sup>		
		550	382.0			215.6	200.9	174.4	149.0	134.2			78.4 <sup>①</sup>	63.7 <sup>①</sup>		
			245.0			182.3	147.0	142.1	133.3	127.4			112.7 <sup>①</sup>	105.8 <sup>①</sup>		
	525	294.0			205.8	193.1	176.4	156.8	151.9			132.3 <sup>①</sup>	125.4 <sup>①</sup>	159.7~ 178.9		
		343.0			211.7	198.0	186.2	166.6	161.7			142.1 <sup>①</sup>	132.3 <sup>①</sup>			
	550	245.0			142.1	127.4	117.6	102.9	98.0			71.5 <sup>①</sup>	65.7 <sup>①</sup>			
		294.0			162.9	156.8	142.1	122.5	107.8			78.4 <sup>①</sup>	68.6 <sup>①</sup>			

(续)

钢 号	热处理状态	试验温度 /°C	初应力 /MPa	在下列时间(h)内的残留应力/MPa												
				25	100	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000	20000	
25Cr2Mo1V	1030~1050°C 正火, 950~970°C 正火 680°C 回火 6h	550	343.0			193.1	173.5	156.8	137.2	122.5			83.3 <sup>①</sup>	73.5 <sup>①</sup>	159.7~178.9	
			392.0			210.7	196.0	176.4	156.8	147.0			102.9 <sup>①</sup>	88.2 <sup>①</sup>	178.9	
20Cr1Mo1VTiB	1050°C 淬油, 680°C 回火 6h	520	294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	-	159.7~178.9	
		570	294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	58.8~88.2		
20Cr1Mo1VNB	1050°C 淬油, 680°C 回火 6h	520	294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	196.0 <sup>①</sup>	188.2 <sup>①</sup>	
			343.0			-	-	-	-	-	-	-	-	220.5 <sup>①</sup>	210.9 <sup>①</sup>	
		540	294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	175.4 <sup>①</sup>	166.6 <sup>①</sup>	
			343.0			-	-	-	-	-	-	-	-	189.1 <sup>①</sup>	177.4 <sup>①</sup>	
		570	393.0											210.7 <sup>①</sup>	196.0 <sup>①</sup>	
			294.2				-	-	-	-	-	-	-	88.2 <sup>①</sup>	68.6 <sup>①</sup>	
		540	343.0				-	-	-	-	-	-	-	102.9 <sup>①</sup>	88.2 <sup>①</sup>	
			294.0				-	-	-	-	-	-	-	173.5 <sup>①</sup>	166.6 <sup>①</sup>	
		1030°C 淬油, 700°C 回火 6h	540	294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	156.8 <sup>①</sup>	151.9 <sup>①</sup>
				294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	200.9 <sup>①</sup>	196.0 <sup>①</sup>
				294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	206.8 <sup>①</sup>	203.8 <sup>①</sup>
				294.0			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

① 系外推值。

表 6-24 几种钢材低温冲击值

钢 号	热处理规范	常温抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	$a_K/J \cdot cm^{-2}$									
			试 验 温 度 / $^{\circ}C$									
			-20	0	-20	-50	-80	-100	-140	-188	-196	-253
30CrMo	800 $^{\circ}C$ 退火	637.0	117.6	98.0	82.3	56.8	25.5	—	—	—	—	—
	860 $^{\circ}C$ 淬油 700 $^{\circ}C$ 回火	705.6	189.1	184.2	178.4	159.7	117.6	—	—	—	—	—
	860 $^{\circ}C$ 淬油 620 $^{\circ}C$ 回火	891.8	152.9	151.9	149.9	146.0	135.2	—	—	—	—	—
35CrMo	830 $^{\circ}C$ 淬油 640~650 $^{\circ}C$ 回火	829.1	171.5	—	172.5	159.7	132.3	93.1	53.9	50.0	—	—
	830 $^{\circ}C$ 淬油 580 $^{\circ}C$ 回火	971.2	143.1	—	135.2	134.7	73.5	59.8	44.1	36.3	—	—
42CrMo	380 $^{\circ}C$ 淬油 580 $^{\circ}C$ 回火	105.8	114.7	—	114.7	99.0	82.3	56.8	46.1	45.1	—	—
1Cr18Ni9Ti	1100~1150 $^{\circ}C$ 淬水 800 $^{\circ}C$ 时效	641.9	245.0	—	335.2	220.5	205.8	186.2	166.6	137.2	127.4 >176.4	缺口试样 光滑试样

在低温条件下工作的螺栓和螺母,当工作温度低于某一临界值时,钢材的韧性急剧下降而产生脆断。所以应选用适当的钢材和热处理工艺,使在较低的工作温度下仍能保持一定的韧性。一般钢(除硼钢外)在-30 $^{\circ}C$ 以上工作时的 $a_K$ 值降低不大。目前国标中还没有对低温下工作的螺纹连接副作专门的规定。本处仅根据有关资料作简单的介绍。表 6-24 介绍了几种钢材,这些钢材适用于制造在-30 $^{\circ}C$ 以下工作的螺纹连接副。

#### 6.1.2.5 耐磨螺栓和螺母

某些螺栓和螺母(如调节螺栓和螺母、部分轮胎螺栓和标形螺母等),经常需要调整或装卸,应采取增加耐磨性措施,如渗碳、碳氮共渗或高频淬火。

这些螺栓和螺母常选用 Q235A(A3)、Q235B(B3)、10、20、15Cr、20Cr 等,也有用 Y12 易切削钢制造,经过渗碳或碳氮共渗,达到表面耐磨的目的。一般螺距在 1mm 以下的,渗层深度选 0.05~0.15mm;在 1mm 以上选 0.15~0.30mm。表面硬度为 76~85HRA。

有些 40Cr、35CrMo 或 42CrMo 螺栓,经高频表面淬火,使表面硬度达到 50~55HRC,以达到耐磨的目的。

1Cr13、2Cr13 及 1Cr18Ni9Ti 等不锈钢螺栓和螺母,为达到耐磨或防止咬死,常进行渗氮处理。为了防止脆性过大,可采用较高的温度(如 620 $^{\circ}C$  左右)的气体渗氮、碳氮共渗或离子渗氮。

## 6.2 垫圈、挡圈、销和铆钉的热处理

### 6.2.1 垫圈和挡圈

一般垫圈和挡圈,不经热处理而直接使用。要求高的可采用中碳钢或中碳合金钢经调质后使用。目前尚未制定有关标准。

弹性垫圈(包括弹簧垫圈、齿形或锯齿形锁紧垫圈、鞍形或波形弹性垫圈三种)和弹性挡圈大多数都用弹簧钢制造,热处理工艺和弹簧热处理相似。表 6-25 列举了它们的主要技术要求。

表 6-25 弹性垫圈及弹性挡圈的技术要求

名称及标准编号	材 料	力 学 性 能			
		硬度(HRC)	弹 性	韧 性	抗氢脆性
弹簧垫圈 GB94.1	65Mn 70 60Si2Mn	42~50	按 GB94.1 表 3 规定的载荷连续加载三次,自由高度 $\geq 1.67S_{公称}$	按 GB94.1 规定扭转 90°不断裂	按 GB94.1 表 3 规定的载荷加压放置 48h,去载后不断裂
齿形、锯齿锁紧垫圈 GB94.2	65Mn	10~50	压缩到 $S + 0.12\text{mm}$ ,松开后高度 $> S + 0.12\text{mm}$	切开,固定一端拉另一端至一倍内径,不得断裂	压缩到 $S - 0.12\text{mm}$ ,48h 后松开不断裂
鞍形、波形弹性垫圈 GB94.3	65Mn	40~50	按 GB94.3 表 2 规定的载荷压缩并松开 $H \geq H_{min}$	-	按 GB94.3 表 2 规定的载荷压缩 48h 松开不断裂
弹性挡圈 GB959.1	65Mn 60Si2Mn	$d \leq 48\text{mm}$ 47~54 $d > 48 \sim 200\text{mm}$ 44~51	用定位夹钳缩外径至小于 $0.99d_0$ (孔用)扩内径至 $1.01d_0$ (轴用)连续 5 次、不超差	把挡圈装在直径等于沟槽尺寸的 1.1 倍的试验轴上 48h 不断裂	

弹簧垫圈是用梯形弹簧钢丝卷制而成;齿形或锯齿锁紧垫圈、鞍形或波形弹性垫圈和弹性挡圈等都是用弹簧钢板冲压成形的。材料的供货状态要求经过球化退火,保证细晶粒的球状碳化物组织。

这类零件的淬火工艺为:65Mn 淬火温度为  $820 \sim 840^\circ\text{C}$ ,60Si2Mn 为  $860 \sim 880^\circ\text{C}$ ,70 钢为  $780 \sim 830^\circ\text{C}$ 。因为都是小件或薄形零件,淬火介质一般都用油淬。回火温度一般在  $380 \sim 450^\circ\text{C}$ ,可以根据每个品种的要求及材料的不同而作相应调整。淬火加热时必须严格防止脱碳和氧化。大批量生产都是在带有保护气氛的震底炉或网带炉淬火—清洗—回火自动线中进行。零星小批零件可在盐浴炉中加热淬火,一般回火炉中回火。盐浴炉必

须要严格脱氧,当原材料脱碳超差时,必须进行复碳淬火。

这类零件的硬度检查方法为:有的可以直接在洛氏硬度计上测量,有的由于尺寸过细或过薄,只能在显微硬度计上测量。弹性、韧性和氢脆检查,可参考表 6-25 并详细按所列标准检查。这里不一一介绍了。

### 6.2.2 销

销的种类很多,根据使用条件不同,其材料选择和热处理要求也各不相同。GB121 规定了各种锥销及柱销的技术条件,材料选用和热处理要求见表 6-26。

表 6-26 销的材料选用及热处理

材 料			热处理(淬火并回火)	表面处理
种 类	牌 号	标准编号		
碳 素 钢	35	GB699	28~38HRC	氧化镀锌钝化 (磨削表面除外)
	45		38~46HRC	
合 金 钢	30CrMnSiA	GB3077	35~41HRC	
铜及其合金	H62	GB4424	—	
	HPb59-1	GB4425		
	QSi3-1	GB4431		
特 种 钢	1Cr13、2Cr13	GB1220	—	
	Cr17Ni2		—	
	1Cr18Ni9Ti		—	

碳素结构钢和合金结构钢制造的销类,一般经调质处理,其热处理工艺和设备基本上与螺纹紧固件相同。为防止大气或海水腐蚀,对受力不大的可选用铜或铜合金。在高温或耐蚀条件下使用的可根据具体工作条件选用 1Cr13、2Cr13、Cr17Ni2 或 1Cr18Ni9Ti 等。

### 6.2.3 铆钉

根据 GB116 规定,铆钉用材及热处理见表

6-27。

碳素钢铆钉的原材料要经球化退火(参见表 6-7)。锻制后由于产生了冷作硬化,为便于铆接,应进行再结晶退火。再结晶退火工艺可参照表 6-9 进行。由于铆钉已是成品,应在保护气氛中进行。

奥氏体不锈钢要消除冷作硬化,应加热到 1000~1050℃ 后在水中淬火,以达到软化的目的。

表 6-27 铆钉用材料、热处理及表面处理

种 类	材 料		热 处 理	表 面 处 理
	牌 号	标准编号		
碳素钢	Q215、Q235	GB700	退火 (冷锻产品)	无
	ML3、ML2	GB715		镀锌钝化
	10 15	GB699	退火 (冷锻产品)	无
	ML10 ML20	GB6478		镀锌钝化
特殊钢	0Cr18Ni9	GB1220	无	无
	1Cr18Ni9Ti		淬火	
铜及其合金	T2	GB3117	无	无
	T3			钝化
	H62		退火	无 钝化

## 6.3 质量检查和控制

紧固件的热处理,除了一般的质量检查和控制外,还有一些特殊的质量检查和控制。

### 6.3.1 脱碳与渗碳

前面已经谈到螺纹紧固件的脱碳可按图 6-1 进行金相检查。由于金相检查受观察者的观察误差限制,难以定量判断,当产生争议时,国标 GB3098.1 和 GB3098.3 还规定了用硬度法仲裁。硬度法规定用 0.3kgf 载荷的显微硬度计测量检查是在相邻的两个螺纹牙上进行,见图 6-3。测出 HV0.3 (1), HV0.3 (2) 和 HV0.3 (3) 三点的显微硬度值,当:

$$HV0.3(2) \geq HV0.3(1) - 30 \quad \text{—— ①}$$

$$HV0.3(3) \leq HV0.3(1) + 30 \quad \text{—— ②}$$

时为合格。

以上两式实际上给出零件表面脱碳和渗碳的公差带。由式①规定了在 2 点处因脱碳造成的硬度降低不得超过 30HV0.3;由②式可知,3 点因渗碳造成的硬度升高不得超过 30HV0.3。

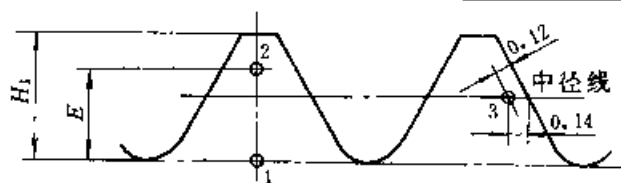


图 6-3 脱碳层的硬度测量法

在大批量热处理生产过程中,金相法也好,显微硬度法也好,只能是定时抽检。因为其检查时间长,成本高。为了及时判断炉子的控碳情况,可以用火花检测和洛氏硬度检测对脱碳和渗碳作初步判断。火花检测是把淬过火的零件,在砂轮机上由表及里轻轻磨火花判别表层和心部的碳量是否一致。当然这要求操作者要有熟练的技巧和火花鉴别能力。洛氏硬度检测是在六角螺栓的一个侧面上进行。先把淬过火的零件的一个六角平面用砂纸轻轻磨光,测第一次洛氏硬度。然后再把这个面在砂轮机上磨去 0.5mm 左右,再测一次洛氏硬度。如果两次的硬度值基本相同,说明即不脱碳、也不渗碳。前次硬度低于后次时,说明表面脱碳。前次硬度高于后次硬度时,说明表面渗碳。在一般情况下,两次硬度差在 5HRC 以内时,用金相法

或显微硬度法检查时,零件的脱碳或渗碳基本在合格范围之内。

### 6.3.2 硬度与强度的关系

在螺纹紧固件检测中,不能简单地根据硬度值,查有关手册,折合成强度值。这中间有一个淬透性因素的影响。因为GB3098.1和GB3098.3中规定仲裁硬度是在零件横截面的 $1/2$ 半径处测量。拉力试样也是从 $1/2$ 半径处截取。因而不排除零件中心部分有低硬度、低强度部分存在。

一般情况下,材料的淬透性好,螺杆部横截面上硬度能均匀分布。只要硬度合格,强度和保证应力也能达到要求。但是当材料的淬透性差时,虽然按规定的部位检查,硬度是合格的,但强度和保证应力往往达不到要求。尤其是表面硬度趋于下限时。

为了把强度和保证应力控制在合格范围之内,往往提高硬度的下限值。如8.8级的硬度控制范围:对M16以下各规格为26~31HRC,M16及以上规格为28~34HRC为宜;10.9级控制在36~39HRC为宜。

### 6.3.3 再回火试验

8.8~12.9级的螺栓、螺钉和螺柱,应进行比表6-13规定的最低回火温度低 $10^{\circ}\text{C}$ 保温30min的再回火试验。在同一试样上,试验前后三点硬度

平均值之差不得超过20HV。

再回火试验可以检查因淬火硬度不足,用过低的温度回火来勉强达到规定的硬度范围的不正确操作,保证零件的综合力学性能。特别是低碳马氏体钢制造的螺纹紧固件,采用低温回火,尽管其他力学性能可以达到要求,但在测量保证应力时,残余伸长量波动很大,远远大于 $12.5\mu\text{m}$ 。而且在某些使用条件下会发生突然断裂现象。在一些汽车及建筑用螺栓中,已出现过突然断裂事故。当采用高于表6-13的最低回火温度回火后,可以消除上述现象。但是用低碳马氏体钢制造10.9级螺栓时,应当特别慎重。

### 6.3.4 氢脆的检查和控制

氢脆的敏感性随紧固件的强度增加而增加。对10.9级及其以上的外螺纹紧固件或表面淬硬的自攻螺钉以及带有淬硬钢制垫圈的组合螺钉等在电镀后应进行除氢处理。

除氢处理一般是在烘箱或回火炉中,在 $190\sim 230^{\circ}\text{C}$ 下保温4h以上。使氢扩散出来。

弹性垫圈和弹性挡圈在各自的标准中都规定了防止氢脆的技术要求和检查规程。

螺纹紧固件可用旋紧的办法,在专用夹具上,旋到使螺杆承受相当保证应力的拉力下,保持48h,松开后螺纹紧固件不产生断裂。这种方法就作为氢脆的检查方法。

## 参考文献

- 1 机械工程手册编委会. 机械工程手册: 第5卷. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 2 杨黎明等. 机械零件设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1995

## 第7章 大型锻铸件的热处理

燕山大学 康大韬 廖波

第二重型机器厂 杨正汉

大型锻件通常指需用1000t或更大吨位水压  
机生产的锻件。它们大多是国民经济与国防建设  
所必需的各种大型关键设备的主要基础零部件,  
如:大型汽轮机的发电机转子,大型轧机的工作辊  
与支承辊,大型高压容器的筒体与封头,大型舰船  
的主轴、尾轴与舵杆,大型火炮的身管等。这些锻  
件都是由钢锭直接锻成的,因而在热处理中必须  
考虑冶炼、铸锭、锻造等过程对锻件内部质量的影  
响,主要影响因素是:

- 1) 化学成分不均匀与多种冶金缺陷的存在。
- 2) 晶粒粗大且很不均匀。
- 3) 较多的气体与夹杂物。
- 4) 较大的锻造应力和热处理应力。

一般说,锻件的尺寸和重量愈大,钢中的合金  
成分含量愈高,这些问题就愈严重。

大型锻件在生产中往往要进行好几次热处  
理,其中在锻造成形后立即进行的热处理称为锻  
后热处理,或预备热处理;经切削加工后进行的热  
处理称为最终热处理。

### 7.1 大型锻件的锻后热处理

大型锻件锻后热处理的目的是:防止白点与  
氢脆、改善锻件内部组织、消除锻造应力、降低硬  
度提高锻件的被切削加工性、细化晶粒提高锻件  
的超声波探伤性能、使锻件获得良好的力学性能  
或为后续热处理过程准备良好的组织条件。对于  
不再进行最终热处理的锻件,通过锻后热处理必  
须保证锻件达到技术条件规定的组织与性能。

#### 7.1.1 大锻件中的白点与氢脆

白点是钢中的一种内部裂纹,在锻件的纵向  
断面上呈现为边缘清晰的圆形或椭圆形银白色  
斑点;在横向低倍试片上为发纹状小裂纹,长度数  
毫米,最大数十毫米。见图7-1a、b。在扫描电镜  
下,白点的微观形貌为由撕裂岭和解理小平面构

成的穿晶准解理,见图7-2。

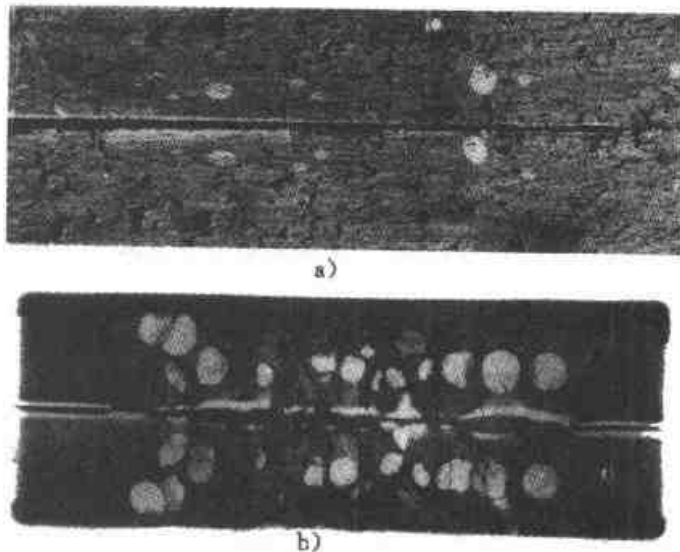


图7-1 白点的宏观照片

a) 横向试样照片 b) 纵向试样照片

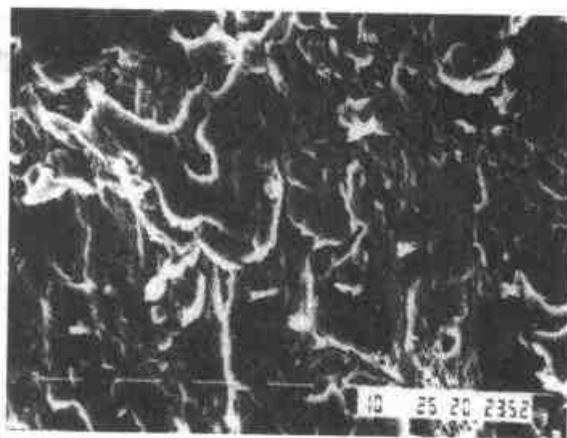


图7-2 34CrNi3Mo钢中白点的  
扫描电镜照片

白点的出现将导致锻件横向性能(主要是塑  
性、韧性)急剧降低并成为最危险的断裂源,严重  
降低零件的使用性能与寿命。因而,一旦发现白  
点,锻件即应报废或改锻为较小尺寸的锻件。

白点是在钢中的氢与应力联合作用下产生的。  
白点的形成温度约为200~50℃,基本上不随钢的

化学成分而变。白点的形成需要孕育期,使钢中的氢形成足够程度的偏聚和使金属脆化。白点多形核于晶界、亚晶界、夹杂物表面及其他晶体缺陷处。

为防止白点的形成,必须将钢中残留氢限制在钢的无白点极限含氢量以下。钢的无白点极限含氢量受控于钢的白点敏感性,并与钢的化学成分、组织状态等因素有关。Ni、Mn、Ni-Cr等合金元素使钢的白点敏感性增高;Zr、Nb、Mo、W、V、Ti、单独存在的Cr及稀土元素Ce等可使钢的白点敏感性有所下降。在各种组织中,白点敏感性下降的顺序是:珠光体、贝氏体、马氏体;混合组织比单一组织更易出现白点。细化晶粒、碳化物质点的细化与片状化、位错密度增加等因素可加大结构缺陷对氢的捕获作用,可减小钢的白点敏感性。

按照白点敏感性的不同,可将生产中常用的钢号分为以下四组:

第一组 白点敏感性较低的碳素结构钢和低合金钢,如25、15CrMo、20CrMo、20MnMo等,其无白点极限含氢量可取为 $3.5 \times 10^{-6}$ 。

第二组 白点敏感性中等的中合金钢,如40Cr、35CrMo、34CrMo1A等,其无白点极限含氢量可取为 $3 \times 10^{-6}$ 。

第三组 白点敏感性较高的中、高合金钢,如40CrNi、34CrNi1Mo、5CrNiMo、70Cr3Mo与9Cr2Mo等,其无白点极限含氢量可取为 $2.7 \times 10^{-6}$ 。

第四组 白点敏感性很高的高合金钢,如12CrNi3MoV、18Cr2Ni4WA、34CrNi3Mo、26Cr2Ni4MoV等,其无白点极限含氢量可取为 $1.8 \times 10^{-6}$ 。

还应特别注意,少量残留奥氏体的出现可急剧增大钢的白点敏感性。因为,残留奥氏体不仅阻碍氢的扩散逸出,而且有吸引和储存氢的作用,使氢在钢中局部地区高度富集。随后,当残留奥氏体转变为马氏体时,高度富集的氢与巨大的相变应力相结合,形成白点的危险性便大大增加了。

白点所造成的脆性,随钢在加载时应变速率的升高而急剧增加,这种现象称为钢的第一类氢脆。

当钢中的氢不足以形成白点时,钢的塑性、韧性亦随钢中含氢量的增加而降低,但下降程度随加载时应变速率的升高而减小,这一现象称为钢的第二类氢脆。随着第二类氢脆的出现,钢的塑性

指标可减少一半以上,并在持久加载时导致钢的延迟断裂。因而对于多种重要大锻件必须考虑第二类氢脆所造成的危害。为避免第二类氢脆,重要大锻件中的剩余氢应降至 $1 \sim 1.5 \times 10^{-6}$ 以下。

### 7.1.2 大锻件的扩氢计算

大型锻件用钢中的原始含氢量因钢的冶炼方法不同而异。据多年统计资料,在正常情况下的含氢量是:

碱性平炉钢	$5.5 \sim 6.5 \times 10^{-6}$
碱性电炉钢	$4 \sim 5 \times 10^{-6}$
酸性平炉钢	$3.5 \sim 4.5 \times 10^{-6}$
经一次真空处理后	$2 \sim 3 \times 10^{-6}$
经两次真空处理后	$1 \sim 1.5 \times 10^{-6}$ 或更低。

不难看出,只有经过两次真空处理之后,大型锻件用钢方能完全免除白点与氢脆的危害。无以上条件时,为防止白点与氢脆,大型锻坯应在锻后热处理中,通过等温退火将钢中含氢量降低至允许的数字之内。

圆柱形大锻件的扩氢效果可利用如下准数方程进行定量计算

$$U = \frac{H}{H_0} = \phi \left( \frac{Dt}{R^2}, \frac{PR}{Q}, \frac{r}{R} \right) \quad (7-1)$$

式中  $U$ ——锻件中氢的浓度准数;

$H_0$ ——去氢退火前锻件中的原始含氢量;

$H$ ——去氢退火后锻件中的含氢量;

$Dt/R^2$ ——为达到浓度准数 $U$ 所必须的时间准数,通常称为福氏准数,以 $F_0$ 表示。其中 $D$ 为氢的扩散系数,可由表7-1查出; $t$ 为扩散时间(h), $R$ 为圆柱形锻件的半径(cm);

$PR/Q$ ——毕氏准数,通常以 $B_0$ 表示。其中 $P$ 为渗透性系数, $Q$ 为透过性系数。在计算毕氏准数时,比值 $P/Q$ 可近似取为 $1/2.5 \text{ cm}^{-1}$ ;

$r/R$ ——位置准数, $r$ 为计算位置的半径(cm)。

计算时,应先确定毕氏准数与位置准数。若已知退火时间与退火温度,即可算出时间准数,然后由表7-2求得相应的浓度准数 $U$ ,进而算出经退火后锻件中指定部位的剩余含氢量。若已知所必须达到的浓度准数 $U$ ,即可算出为此所必需的退火时间 $t$ 。



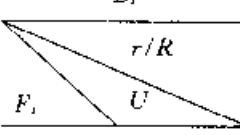
表 7-1 氢在  $\alpha$ -Fe 及  $\gamma$ -Fe 中的扩散系数

(续)

温 度 /°C	扩散系数( $\text{cm}^2/\text{h}$ )	
	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe
1500	1.43	1.90
1400	1.38	1.49
1300	1.31	1.19
1200	1.25	0.90
1100	1.19	0.684
1000	1.11	0.468
900	1.02	0.313
800	0.97	0.205
700	0.84	0.112
690	0.8295	—
660	0.798	—
650	0.7875	—

温 度 /°C	扩散系数( $\text{cm}^2/\text{h}$ )	
	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe
645	0.777	—
630	0.7665	—
620	0.756	—
610	0.7455	—
600	0.735	0.056
500	0.612	0.023
400	0.497	0.007
300	0.360	0.002
200	0.240	—
100	0.008	—
50	0.004	—
20	0.001	—

表 7-2 圆柱形锻件的  $B_1$ 、 $F_1$ 、 $\frac{r}{R}$  与  $U$  之间的关系

$B_1$  $F_1$ $U$	4		6		10		15		30	
$r/R$	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
0.02	0.99931	0.99266	—	0.99563	—	0.99176	—	0.99043	—	—
0.04	0.99786	0.96237	0.99886	0.95236	0.99758	0.93678	0.99810	0.92769	0.99839	0.91186
0.06	0.98970	0.90998	0.98805	0.88792	0.98335	0.85918	0.98104	0.84133	0.97798	0.82559
0.10	0.93439	0.79640	0.91635	0.75542	0.89935	0.70956	0.88723	0.68210	0.87109	0.64907
0.20	0.69869	0.55632	0.65034	0.49689	0.59981	0.43926	0.57119	0.40740	0.54186	0.37398
0.30	0.49164	0.38697	0.43206	0.32655	0.37361	0.27301	0.34668	0.24545	0.31547	0.21751
0.40	0.34242	0.26898	0.28441	0.21460	0.23430	0.16977	0.20906	0.14788	0.18369	0.12663
0.50	0.23806	0.18095	0.18696	0.14103	0.14574	0.10559	0.12654	0.08910	0.10695	0.07373
0.60	0.16547	0.12993	0.12286	0.09268	0.09064	0.06567	0.07589	0.05368	0.06227	0.04292
0.80	0.07992	0.06275	0.05306	0.04003	0.03506	0.02540	0.02754	—	0.02111	0.01455
1.00	0.03860	0.03031	0.02291	0.01729	0.01356	0.00982	0.01000	—	0.00716	—
1.20	0.01865	0.01464	0.00900	0.00747	0.00524	0.00380	0.00363	—	0.00243	—
1.40	0.00900	0.00707	0.00427	0.00322	0.00203	0.00147	0.00132	—	—	—
1.50	0.00626	0.00491	0.00281	0.00212	0.00126	0.00092	—	—	—	—

对于非轴类锻件, 扩氢计算准数方程将变为式 (7-2) ~ 式 (7-4) 的形式。

板形件

$$U = \frac{H}{H_0} = \phi_1 \left( \frac{D\tau}{S^2}, \frac{PS}{Q}, \frac{x}{S} \right) \quad (7-2)$$

式中  $S$  —— 板厚之半 (cm);

$x$  —— 计算位置至平板中性面的距离 (cm);

短圆柱体

$$U = \frac{H}{H_0} = \phi_1 \left( \frac{D\tau}{R^2}, \frac{PR}{Q}, \frac{r}{R} \right) \cdot \phi_2 \left( \frac{D\tau}{L^2}, \frac{PL}{Q}, \frac{x}{L} \right) \quad (7-3)$$

式中  $R$  —— 圆柱体的半径 (cm);

$L$  —— 短圆柱体长度之半 (cm);

$r, x$  —— 分别为计算位置的半径和至短圆柱体长度之半处的距离 (cm)。

平行六面体

$$U = \frac{H}{H_0} = \phi_1 \left( \frac{D\tau}{S^2}, \frac{PS}{Q}, \frac{x}{S} \right) \cdot \phi_2 \left( \frac{D\tau}{B^2}, \frac{PB}{Q}, \frac{y}{B} \right) \cdot \phi_3 \left( \frac{D\tau}{L^2}, \frac{PL}{Q}, \frac{z}{L} \right) \quad (7-4)$$

式中  $S, B, L$  —— 平行六面体的厚度、宽度与长度之半 (cm);

$x, y, z$  —— 计算位置至厚度、宽度与长度方向中性面的距离 (cm)。

计算时,  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  等函数的数值可自参考文献 [4] 中查出。

### 7.1.3 大锻件的晶粒细化问题

大型锻件由于: 原始钢锭尺寸较大, 结晶缓慢; 锻造时间长, 加热次数多, 而且锻造比小, 变形不均匀; 加热速度慢, 保温时间长; 某些大锻件用钢的奥氏体晶粒遗传严重等原因, 往往晶粒十分粗大而且不均匀。

晶粒粗大不仅使大锻件的性能低劣、寿命下降, 而且使其在作超声波探伤时出现草状波, 声波信号迅速衰减, 底波消失, 以至无法探伤。为了提高大锻件的性能水平和改善其探伤性能, 必须细化其晶粒组织。

对于大多数锻件来说, 通过退火、正火、调质等处理可使大锻件中粗大的晶粒得到细化。对于奥氏体晶粒遗传比较严重的钢种 (如 26Cr2Ni4MoV、34CrNi3Mo 等), 往往要通过多次正火 (或退火) 和提高重结晶时的加热速度等方法才能使锻件的晶粒获得细化, 或一定程度的细化。

典型工艺见图 7-11。

### 7.1.4 锻后热处理工艺制订原则与工艺参数

大型锻件在完成锻造工序后应立即进行锻后热处理。在制订工艺时, 应遵守以下原则:

(1) 使锻件尽快地、充分地由奥氏体转变为铁素体—碳化物组织, 这样作不仅有利于氢的脱溶与扩散, 而且有利于晶粒的调整与细化。应根据钢的过冷奥氏体稳定性并充分考虑锻件中成分与组织不均匀性的影响, 合理确定锻件的冷却速度、过冷温度及过冷保温时间等工艺参数。

(2) 通过去氢退火将锻件中的氢降至极限含氢量以下并使其分布均匀, 以免除白点、氢脆的危害。对多数大锻件来说, 这是锻后热处理的首要任务, 必须完成。去氢退火的关键工艺参数是:

1) 退火温度通常取  $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 具体数值见表 7-3, 因退火温度与高温回火温度相近, 故有时将它们列在一起。

2) 保温时间参看典型工艺曲线或由式 (7-1) ~ 式 (7-4) 算出。

3) 冷却速度应足够缓慢, 以减少锻件中的残留应力。

(3) 经过一次或多次重结晶使晶粒细化、组织改善、性能提高。

多数碳钢锻件和部分低合金钢锻件的锻后热处理就是最终热处理。对于这类锻件, 在锻后热处理中均需安排一次正火和回火, 以使其获得必要的组织与性能。对于含合金元素较多、性能要求较高的锻件, 尽管还要进行最终热处理, 锻后也要进行一次甚至多次重结晶, 以便改善锻件的组织与性能, 为最终热处理准备良好的组织条件和提高锻件的超声波探伤性能。

在重结晶中, 关键工艺参数是:

1) 加热速度, 在  $\approx 600^\circ\text{C}$  以下, 钢处于冷硬状态, 要限制加热速度; 在  $\approx 600^\circ\text{C}$  以上可以快些。对于尺寸较大或合金元素较多的锻件, 可在  $\approx 650^\circ\text{C}$  加一个保温台阶, 以减小锻件中的内外温差和内应力。

2) 加热温度 (见表 7-3)。

3) 在可能的情况下, 过冷温度应尽量低一些, 以使组织转变更彻底和获得更细的组织。具体数值见典型工艺曲线。

表 7-3 常用大锻件用钢的正火(退火)、高温回火温度(°C)

钢 号	正火或退火温度		高温回火温度	
	单独生产	配 炉	单独去氢	考虑性能
15	900~920	880~920	620~660	580~660
25	870~890	870~900	620~660	580~660
35	860~880	850~870	620~660	580~660
45	830~860	820~850	620~660	580~660
55	810~830	810~840	820~660	580~660
40Mn	840~860		580~620	560~640
50Mn	820~840		580~620	560~640
20SiMn	910~930	900~930	630~660	560~660
35SiMn	880~900	880~920	630~660	560~660
35SiMnMo	880~900	880~920	630~660	560~660
60SiMnMo	820~840	810~840	630~660	
37SiMn2MoV	880~900	880~920	630~660	560~660
20MnMo	880~900	870~900	630~660	660~660
18MnMoNb	920~640	900~950	640~660	
42MnMoV	870~890	870~900	640~670	
30CrMnSi	880~900	870~920	630~660	660~600
18CrMnTi	880~900		620~660	
15CrMo	900~920	890~920	630~660	560~660
20CrMo	890~910	880~910	630~660	560~660
30CrMo	870~890	850~900	630~660	560~600
34CrMo1A	860~380	850~900	630~660	560~660
35CrMo	880~900		630~660	560~660
42CrMo	850~870		640~660	
18CrMnMoB	880~900		680~710	
20Cr2Mn2MoA	870~890			
60CrMnMo	830~850	820~860	680~660	
24CrMoV	880~900	870~920	630~660	
30Cr2MoV	940~960		690~720	
35CrMoVA	710~920		630~660	
20Cr	880~900	870~920	630~660	560~660
40Cr	850~870	840~880	630~660	560~660
55Cr	820~840	820~850	630~660	
34CrNiMo	860~880	850~920	630~660	560~660
34CrNi2Mo	860~880	850~920	630~660	560~660
34CrNi3Mo	860~880	850~920	630~660	560~660
18Cr2Ni4WA	700~920	890~920	630~660	
20Cr2Ni4A	870~890		610~650	
35CrNiW	860~880	850~900	630~660	560~660
6CrW2Si	780~800(退火)			
5CrMnMo	840~860	830~860	620~660	
5CrNiMo	840~860	830~860	620~660	
5CrNiW	840~860	830~860	620~660	
5CrSiMnMoV	870~890		640~660	
2Cr13	1000~1050			
3Cr13	1000~1050			
GCr15	790~810(退火)			
GCr15SiMn	790~810(退火)			
Cr5Mo	1000~1050	1000~1050		730~750

### 7.1.5 大锻件锻后热处理的基本工艺类型与典型工艺曲线

根据大锻件所用钢种、截面尺寸、组织性能要

求及装炉情况的不同,可将在生产中经常采用的大锻件锻后热处理工艺分为以下十种类型,其工艺曲线如图 7-3~图 7-12 所示。

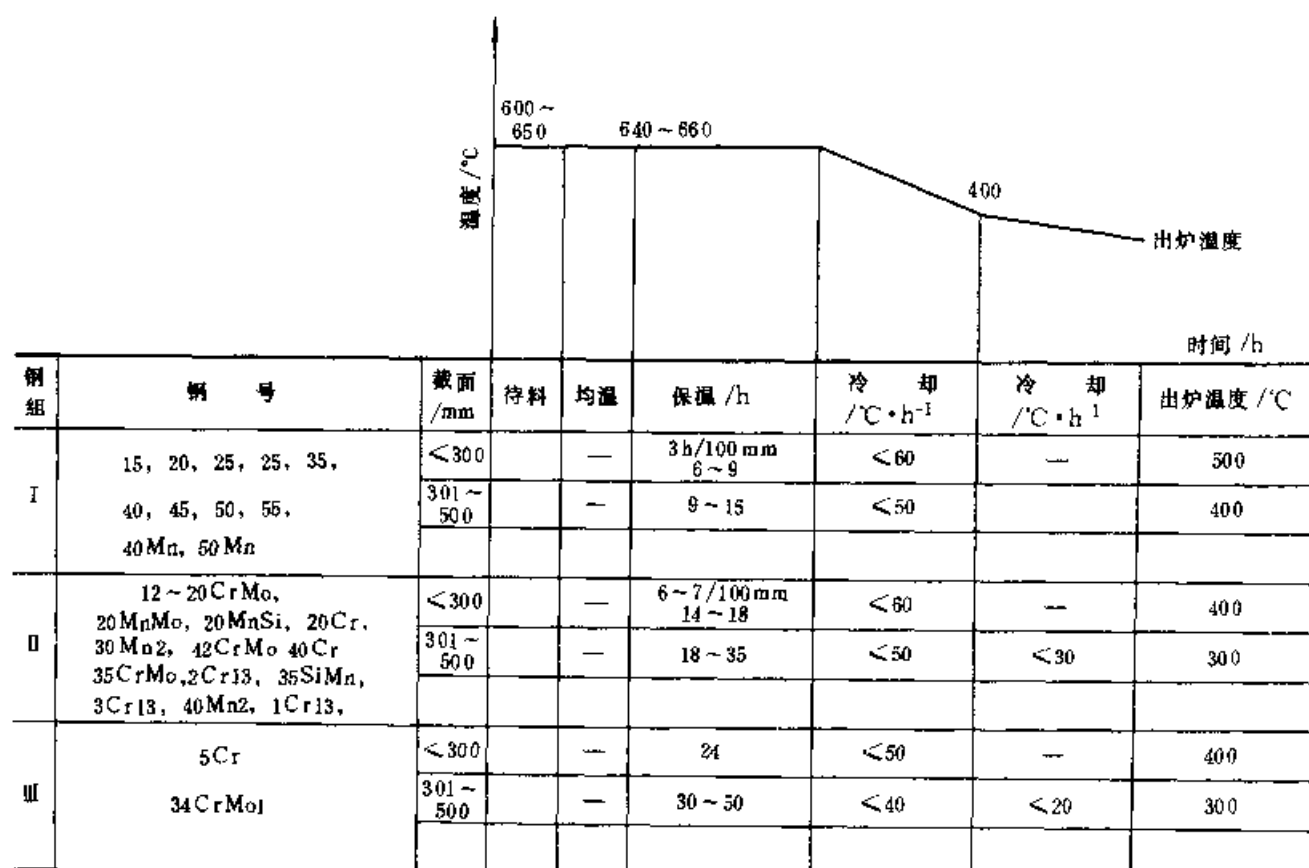


图 7-3 等温炉冷 (一般用于坯料)

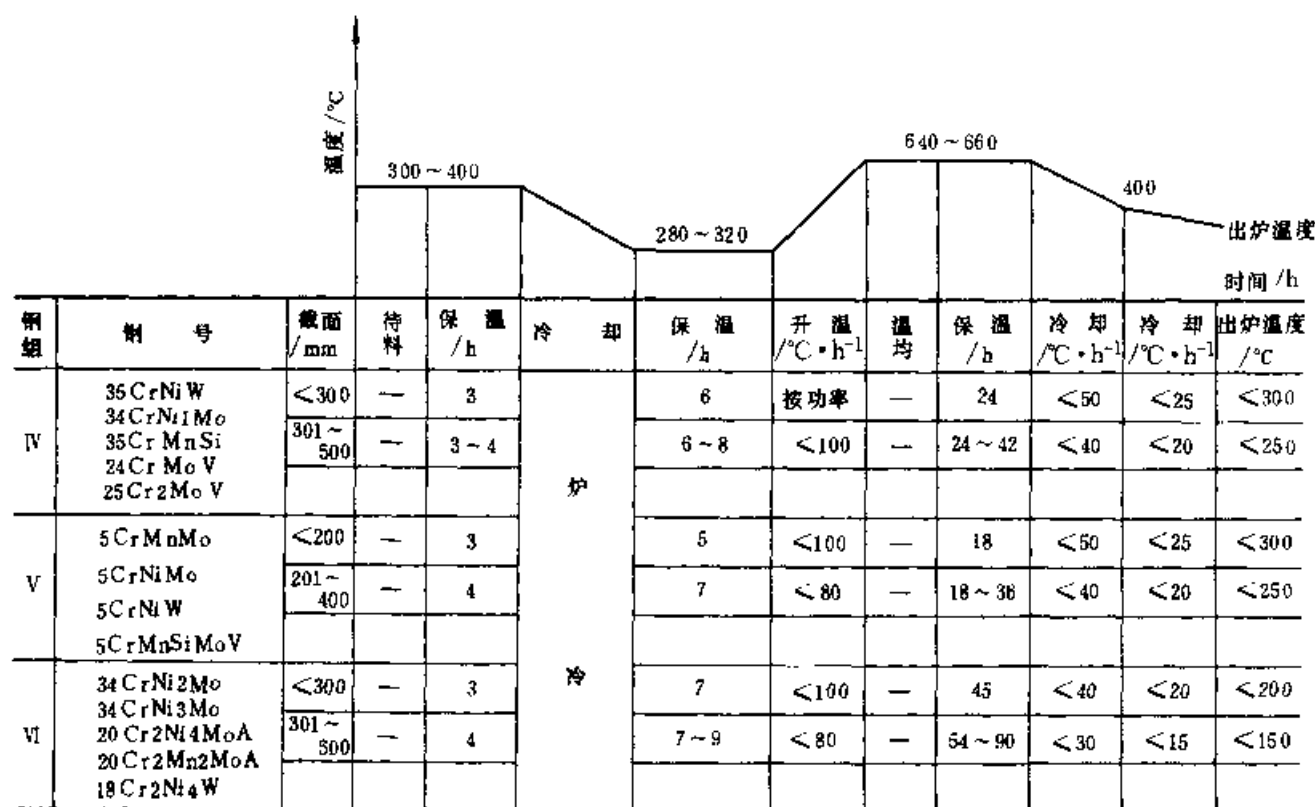


图 7-4 起伏等温退火

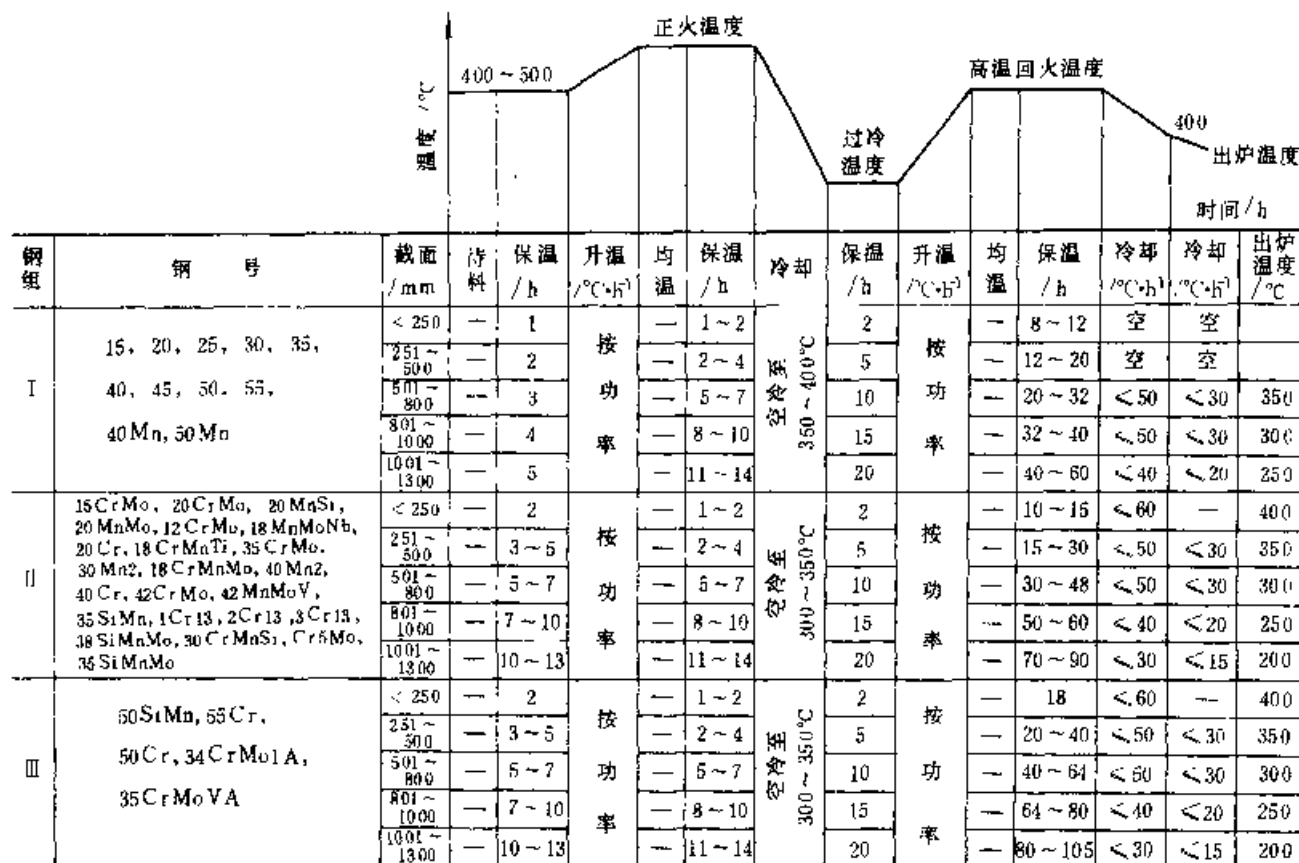
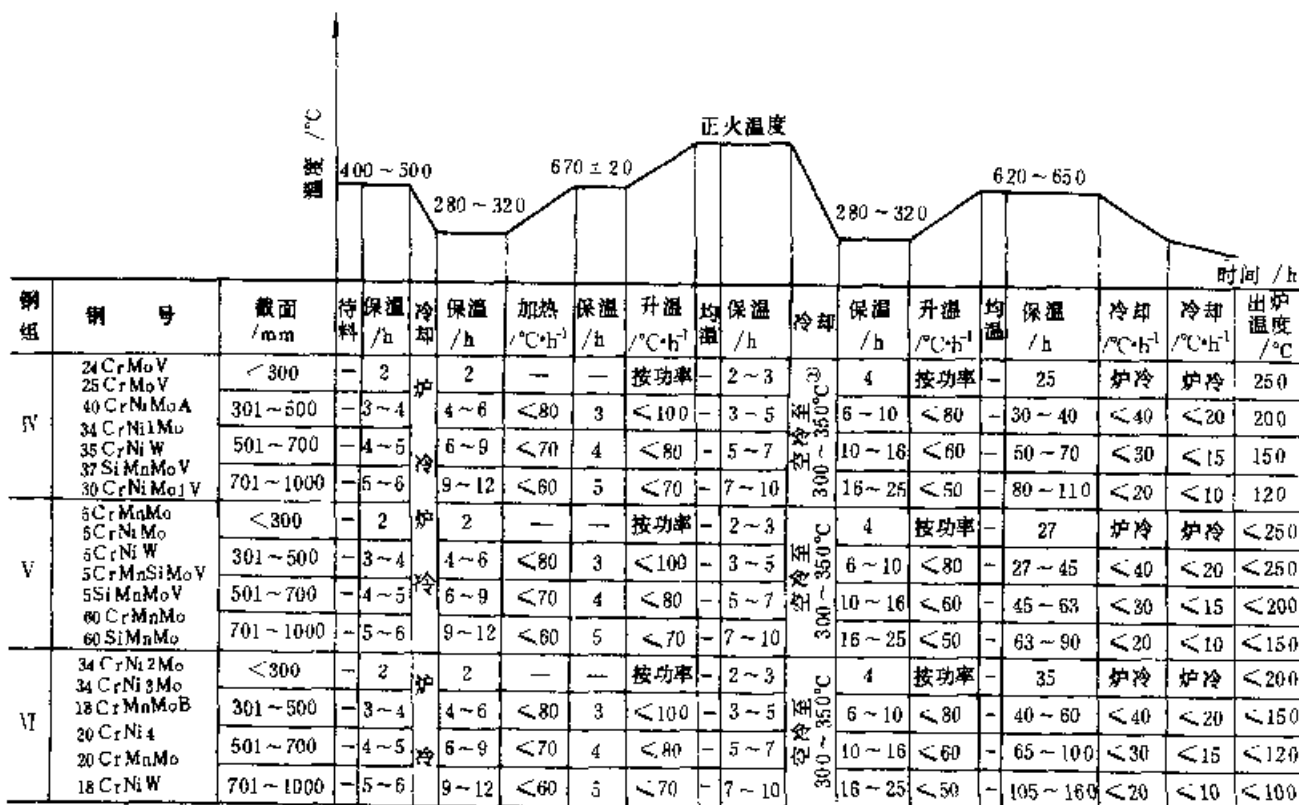


图 7-5 热装炉正火、高温回火 (I 组钢过冷温度 400~500°C, II、III 组钢 350~400°C)



①在严格测温下,小截面可空冷至300°C,入炉后,如温度回升,可拉台车调整,待炉温稳定后,开始计算保温时间。

图 7-6 热装炉过冷、正火、高温回火

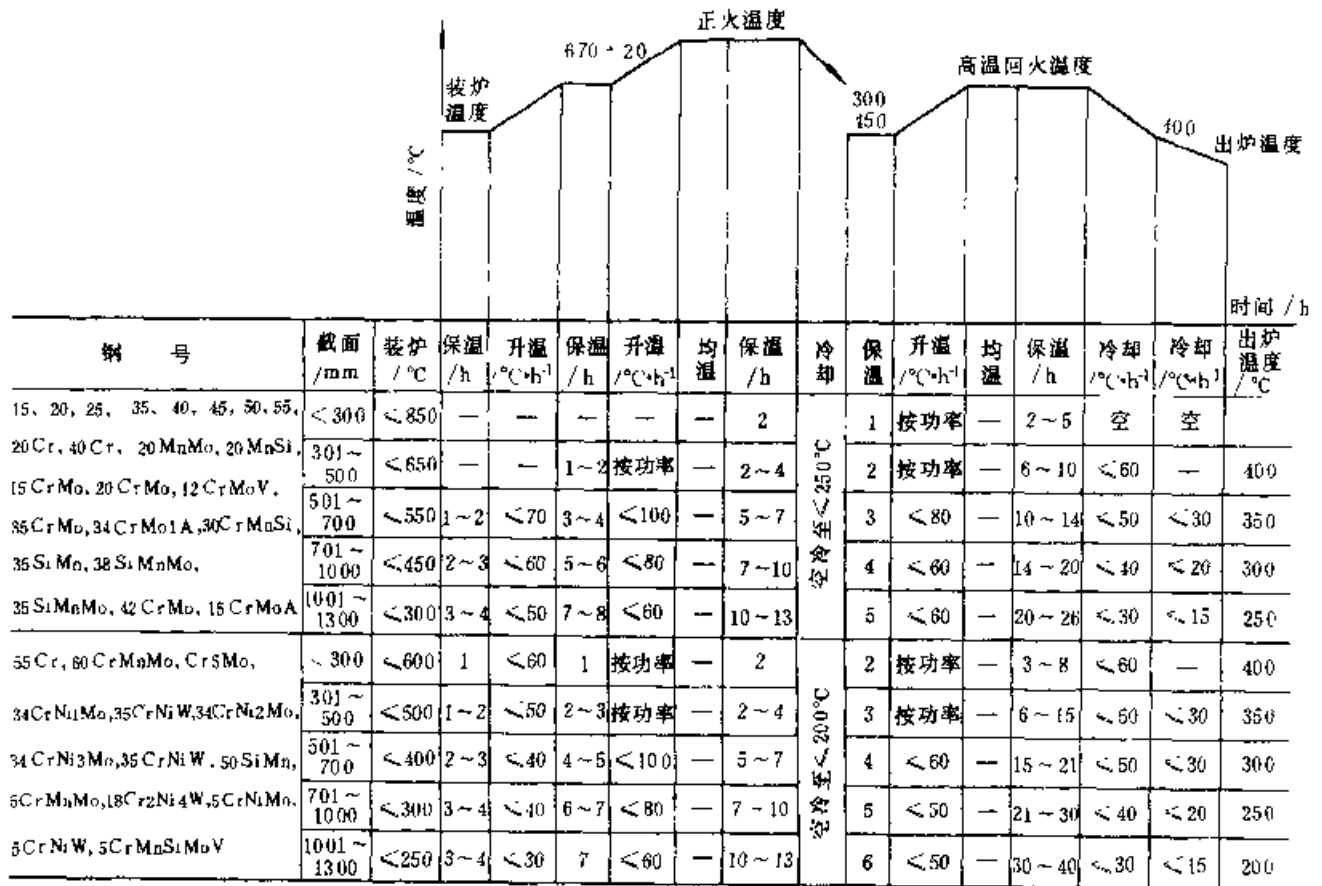


图 7-7 冷装炉正火、高温回火

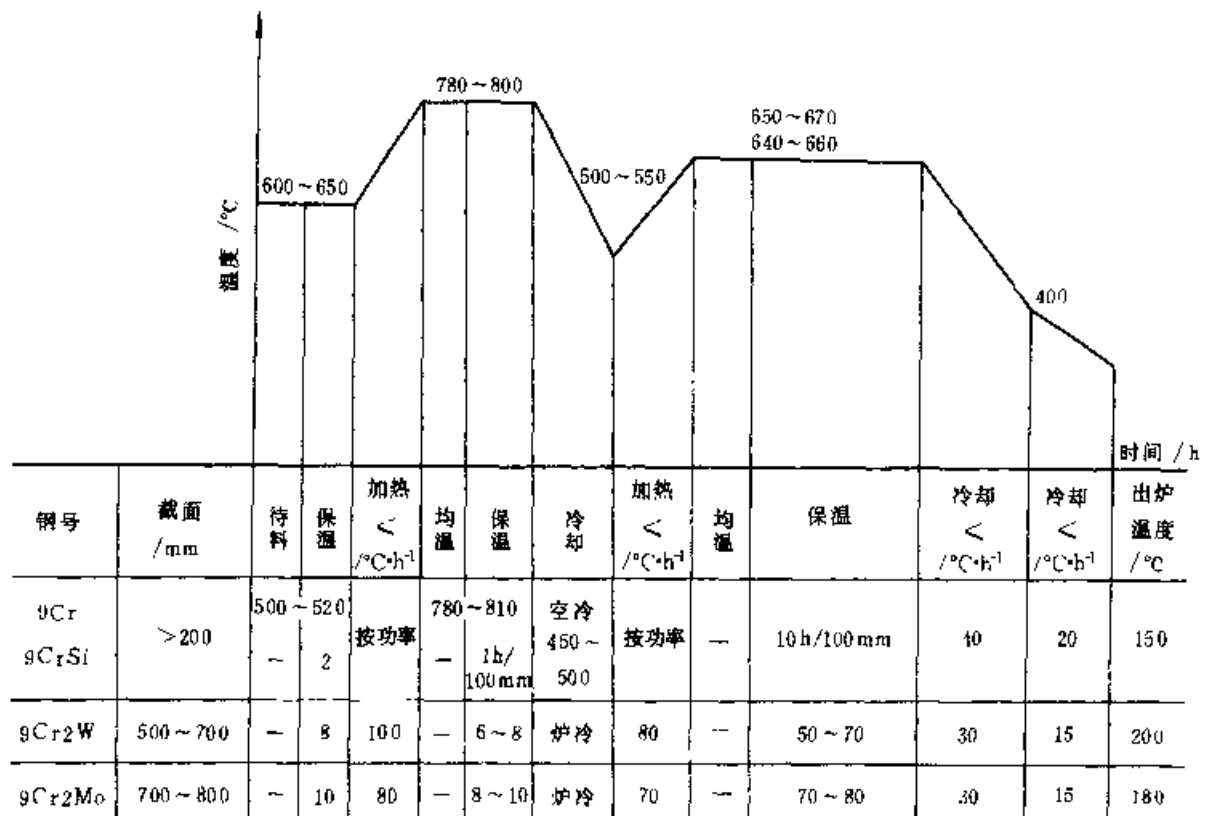


图 7-8 热装炉球化退火

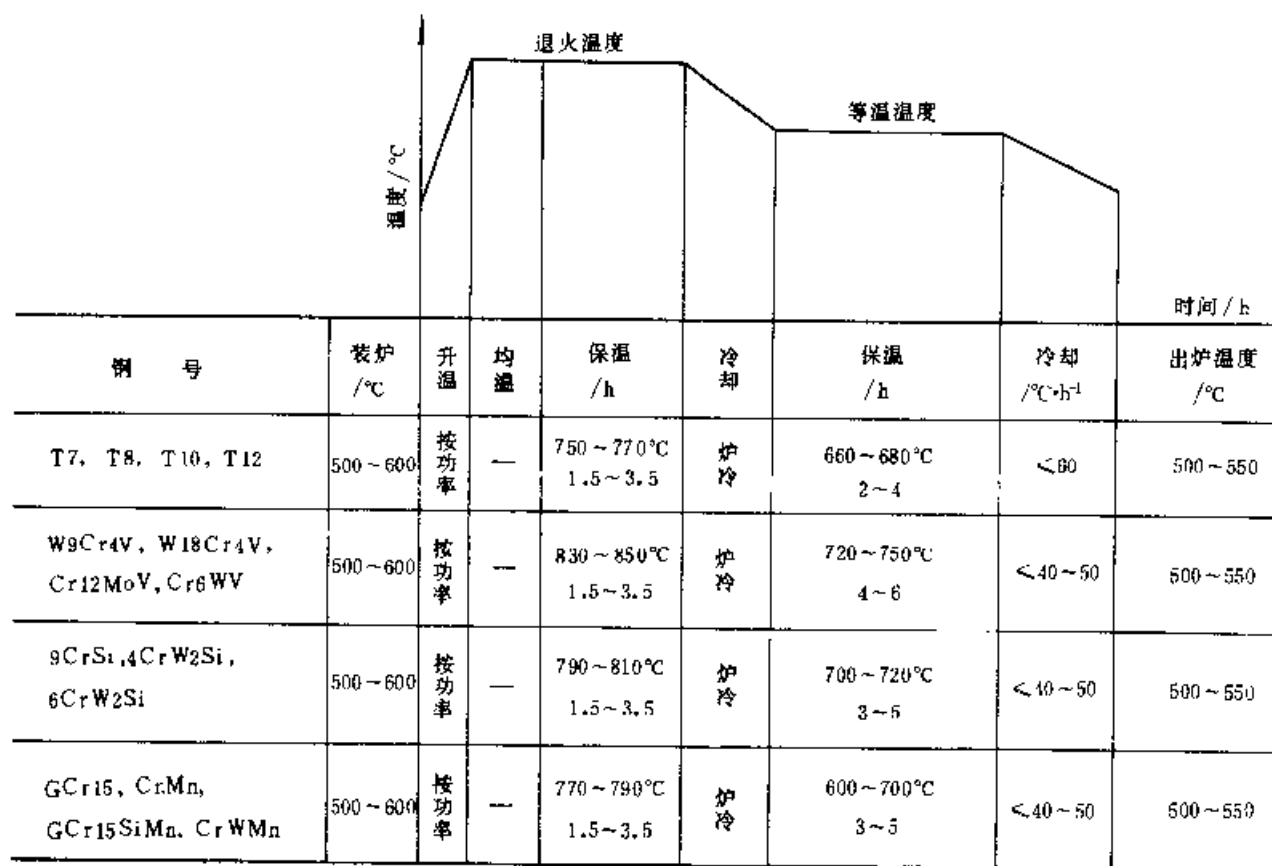


图 7-9 冷装炉球化退火

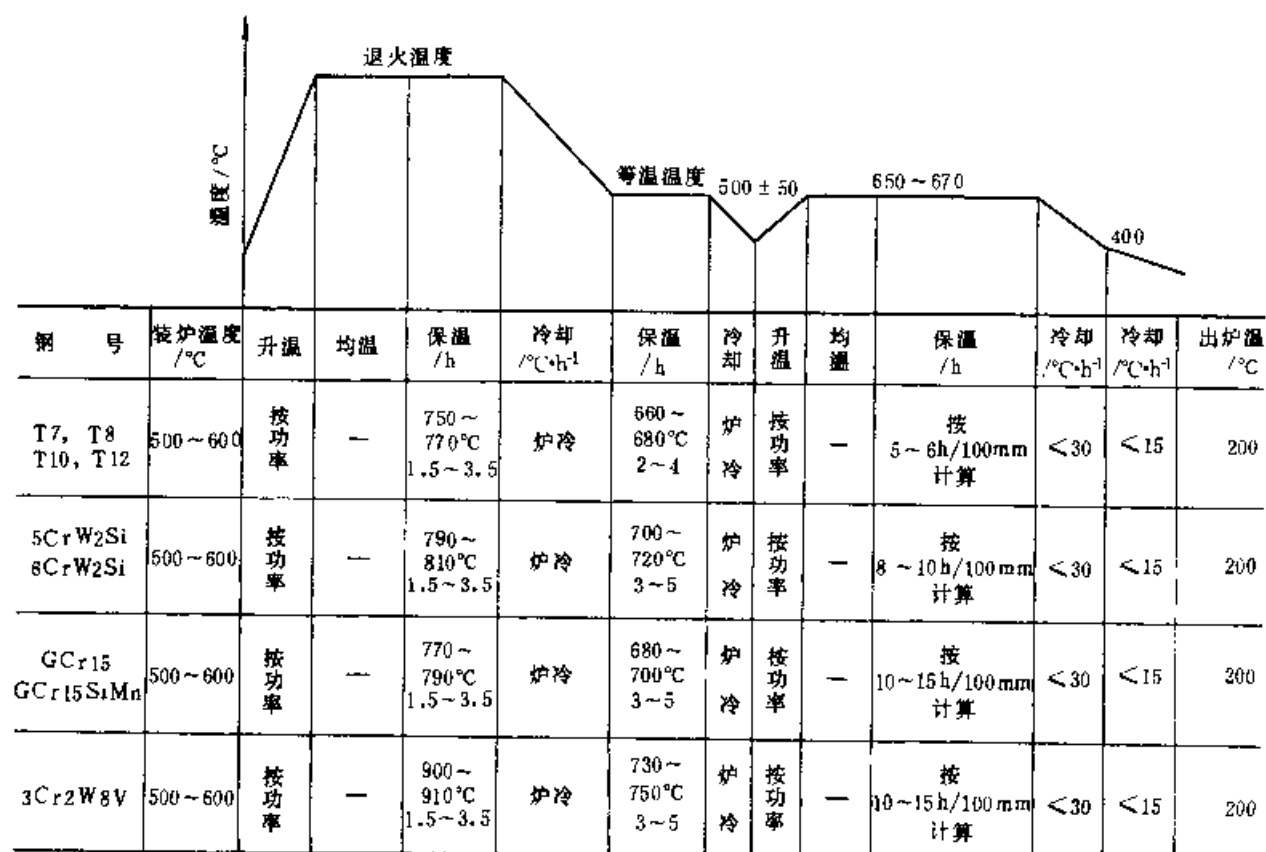
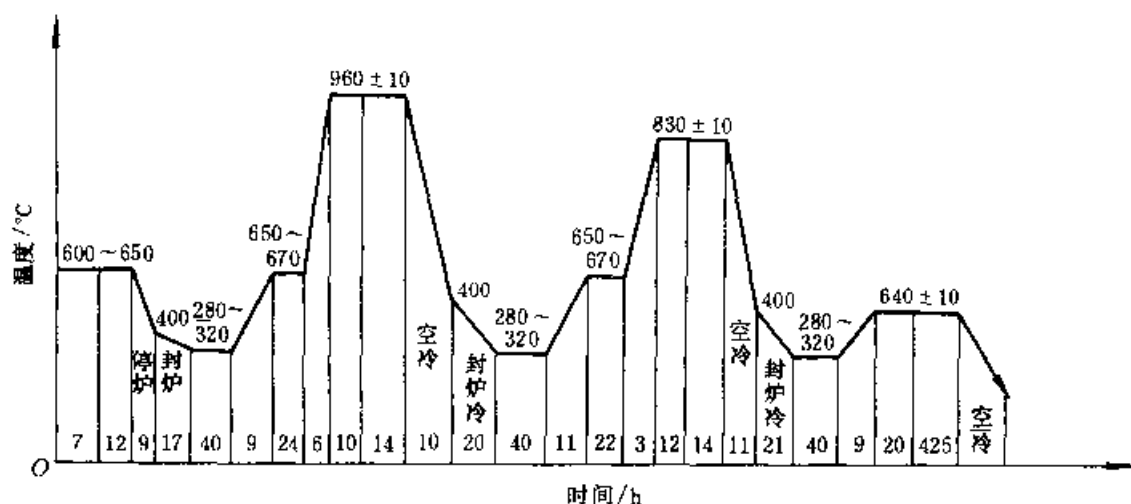
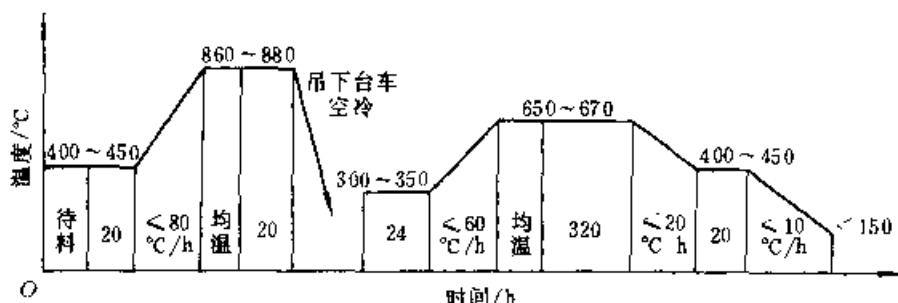


图 7-10 工具钢经冷装炉球化退火后热处理

图 7-11 巨型汽轮发电机转子锻件 (26Cr2Ni4MoV,  $\phi 1200\text{mm}$ ) 锻后热处理工艺曲线图 7-12 大型支承辊锻件 (70Cr3Mo,  $\phi 1500\text{mm}$ ) 锻后热处理工艺曲线

## 7.2 大型锻件的最终热处理

(续)

大型锻件经粗加工后进行的热处理称为最终热处理,多采用淬火、正火及随后的高温回火等工艺,以达到技术条件所要求的性能,或为后续热处理过程准备良好的组织条件。

### 7.2.1 大锻件淬火、正火时的加热

#### 7.2.1.1 加热温度

为使负偏析区在加热时达到淬火或正火温度,大锻件的淬火或正火温度应取规定温度的上限。对于碳偏析比较严重的锻件,可根据不同碳节的实际化学成分,采用不同的加热温度。大锻件用钢的淬火、正火加热温度如表 7-3、表 7-4 所示。

表 7-4 常用大锻件用钢的淬火加热温度(°C)

钢 号	温 度	钢 号	温 度
25	850~880	50Mn	800~820
35	850~870	60Mn	800~820
45	830~850	65Mn	800~820
55	800~830	35Mn2	800~850

钢 号	温 度	钢 号	温 度
45Mn2	810~840	35CrMnSi	850~870
50Mn2	810~840	18CrMnTi	800~870
20SiMn	880~900	15CrMo	890~910
35SiMn	860~880	20CrMo	880~900
42SiMn	840~860	30CrMo	860~880
50SiMn	820~840	34CrMo1A	850~870
55Si2Mn	860~880	35CrMo	850~870
60Si2MnA	850~870	42CrMo	840~860
70Si3MnA	850~870	18CrMnMoB	870~890
35SiMnMo	870~890	20Cr2Mn2MoA	870~890
42SiMnMo	850~870		800~820
60SiMnMo	830~850	34Cr3WMoV	850~860
37SiMn2MoV	850~870	30CrMn2MoB	870~890
42SiMnMoV	860~880	32Cr2MnMo	870~890
55Si2MnV	850~870	35CrMnMo	850~870
20MnMo	890~910	38CrMnNi	850~870
18MnMoNb	910~930	40CrMnMo	850~870
32MnMoVB	850~870	60CrMnMo	830~850
42MnMoV	860~880	24CrMoV	870~890
24CrMnN	870~890	30CrMoV9	850~870
30CrMnSi	850~870	30Cr2MoV	840~850



(续)

钢 号	温 度	钢 号	温 度
35CrMoVA	890~910	4CrW2Si	910~930
50CrMoV	840~860	6CrW2Si	850~900
20Cr	280~320	Cr12MoV	1020~1040
10Cr	810~860		1130~1150
55Cr	820~840	5CrMnMo	830~860
10CrNi	840~860	5CrNiMo	830~860
45CrNi	830~850	5CrNiW	830~860
31CrNiMo	850~870	5CrSiMnMoV	850~870
34CrNi2Mo	850~870	5SiMn2W	860~890
34CrNi3Mo	850~870	3Cr2W8	1040~1060
18Cr2Ni4WA	890~910	3Cr2W8V	1040~1060
20Cr2Ni4A	870~890	4CrWMo	850~870
	800~820	4SiMnMoV	900~920
30Cr2Ni2Mo	860~880	2Cr13	980~1000
35CrNiW	850~870	3Cr13	1000~1050
45CrNiMoV	850~870	GCr15	820~860
9Cr2	840~870	GCr15SiMn	820~840
9Cr2W	860~880	1Cr18Ni9Ti	1100~1150
9SiCr	840~860	Cr5Mo	1000~1050

### 7.2.1.2 加热方式

大锻件加热时,为了避免过大的热应力,应该控制装炉温度和加热速度。截面大、合金元素含量高的重要锻件,多采用阶梯式加热。即在低温装炉后按规定速度加热,在升温中间进行一次或两次中间保温。有些锻件采用较低的加热速度而不进行中间保温。只有截面尺寸较小、形状简单、原始残留应力较小的碳钢和低合金结构钢锻件,才允许高温装炉、不限制加热速度或在低温装炉后采用最大功率升温。

高温装炉直接加热时,锻件中不同部位的升温曲线如图 7-13 所示。可以看出,在这种情况下锻件表面与中心的最大温差很大,出现最大温差时工件心部温度低于 200°C,钢仍处于冷硬状态,易因巨大的温差应力而产生内部裂纹。

阶梯式加热时锻件中不同部位的升温曲线如图 7-14 所示。可以看出,由于采取了中间保温,在加热中出现了两次最大温差。第一个出现在心部温度为 $\approx 350^{\circ}\text{C}$ 时,数值仅为图

7-13 曲线的 1/3。出现第二个最大温差时,锻件心部温度已升高至 $\approx 700^{\circ}\text{C}$ ,钢已处于塑性状态,无开裂危险了。当锻件尺寸很大时,加热中第一个最大温差的数值仍会较大,这时要在 $\approx 400^{\circ}\text{C}$ 等温一段时间,待工件表面和心部都升至较高温度时再继续加热。这样可以减小第一个最大温差的数值和使其在更高些的温度范围出现。

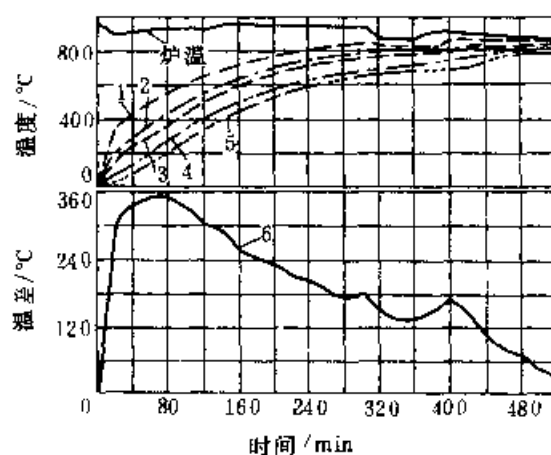


图 7-13  $\phi 800\text{mm}$  40CrNi 钢坯加热曲线  
(炉温  $950^{\circ}\text{C}$  装炉)

1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 130mm 4—距表面 260mm 5—距表面 400mm 6—表面与中心温差

### 7.2.1.3 升温速度

锻件在加热过程的低温阶段,升温速度要控制在  $30\sim 70^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。经中间保温后,整个截面上塑性较好,升温速度可以快些,一般取  $50\sim 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

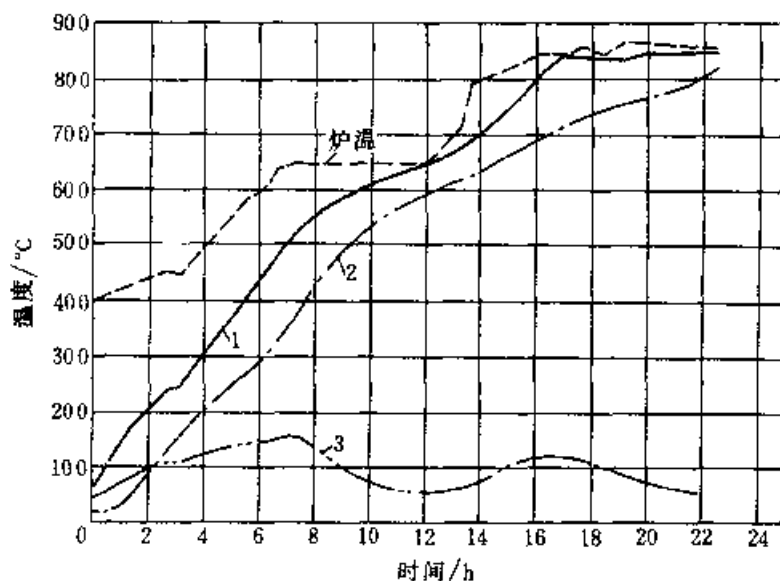


图 7-14  $\phi 900\text{mm}$  40Cr2MoV 锻件加热曲线  
1—距表面 15mm 2—中心处 3—表面与中心温差

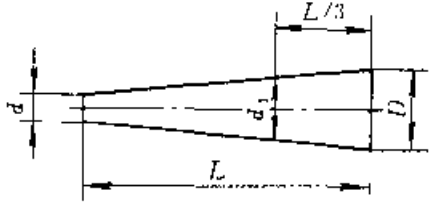
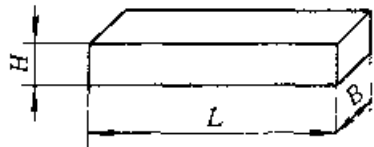
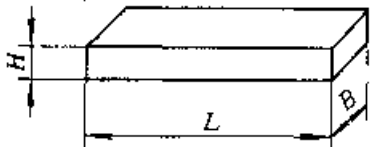
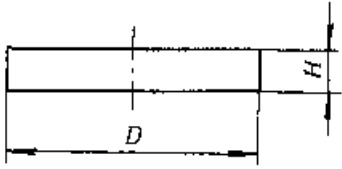
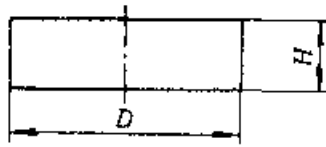
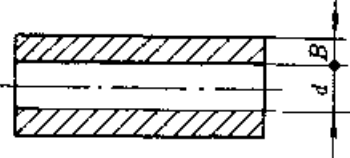
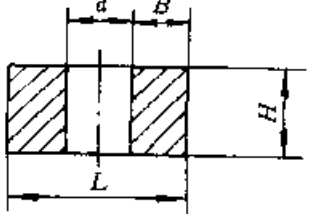
## 7.2.1.4 均温与保温

当加热炉主要测温仪表（一般台车式炉指炉顶测温仪表，井式炉指各段炉壁仪表）指示炉温到达规定温度时，即为均温开始，至测工件火色均匀并与炉墙颜色一致时为均温终了。

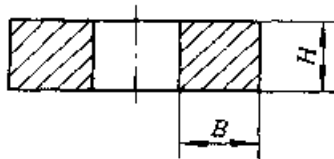
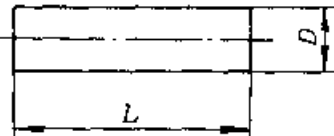
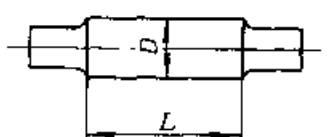
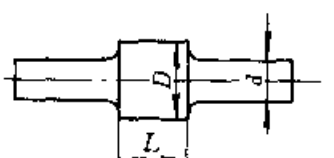

为使工件心部达到规定温度、完成奥氏体转

变并使其均匀化，锻件在均温后尚需进行保温。保温时间根据工件有效截面确定。对碳素结构钢与低合金结构钢锻件，保温时间按  $0.6 \sim 0.8\text{h}/100\text{mm}$  计算。对中、高合金钢锻件，按  $0.8 \sim 1\text{h}/100\text{mm}$  计算。各种形状锻件有效截面计算方法见表 7-5。

表 7-5 有效截面计算方法

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	$d < D$	$d_1$
	$H < B \leq 1.5H$	$H$
	(1) $1.5H < B \leq 3H$ (2) $B > 3H$	(1) $(1 \sim 1.5)H$ (2) $1.5H$
	$3H < D$	$1.5H$
	(1) $1.5H < D \leq 3H$ (2) $H < D \leq 1.5H$	(1) $(1 \sim 1.5)H$ (2) $H$
	(1) $d > B$ (2) $d < B$	(1) $1.5B$ (2) $(1.5 \sim 2)B$
	(1) $d < B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B < H \end{cases}$ (2) $d > B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B < H \end{cases}$	(1) $\begin{cases} (1 \sim 1.5)B \\ (1.5 \sim 2)B \end{cases}$ (2) $\begin{cases} B \\ (1 \sim 1.5)B \end{cases}$

(续)

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	(1) $H < B \leq 1.5H$ (2) $B \geq 1.5H$	(1) $(1 \sim 1.5)H$ (2) $1.5H$
	$D < L$	$D$
	$D < L$	$D$
	$d < L < D$	$L$
	$L < d < D$	$d$

### 7.2.2 大锻件淬火、正火时的冷却

在大锻件淬火、正火冷却过程的工艺参数中,最关键的是选择恰当的冷却速度和终冷温度。

对于性能要求很高的高合金钢大锻件,必须选择能够保证工件心部奥氏体完全躲过珠光体和上贝氏体转变的冷却速度,以使锻件沿整个截面获得下贝氏体或下贝氏体加马氏体组织。终冷温度的选择主要取决于锻件的冶金质量。对于夹杂物、气体含量都很少,化学成分十分均匀的优质电站大锻件,终冷温度可选择为  $40 \sim 60^\circ\text{C}$  或  $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 。对于冶金质量较差的锻件,终冷温度可提高至  $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 。在终冷温度下的保持时间,应以使锻件心部完成所规定的组织转变为准。

对于大型碳钢和低合金钢锻件,冷却后获得下贝氏体的要求有时难于达到。这时应将心部奥氏体过冷到

防止出现粗大珠光体和铁素体的温度,对低合金钢锻件终冷温度可选为  $400 \sim 450^\circ\text{C}$ ; 碳钢件可选为  $450 \sim 500^\circ\text{C}$ 。

对照相应锻件的冷却曲线和所用钢种的过冷奥氏体连续转变曲线,可获得锻件尺寸、冷却速度、冷却时间、终冷温度以及转变产物与性能水平等方面的完整资料。从图 7-15 所示实例可以看出,为使锻件心部无珠光体,应保证锻件心部冷却速度

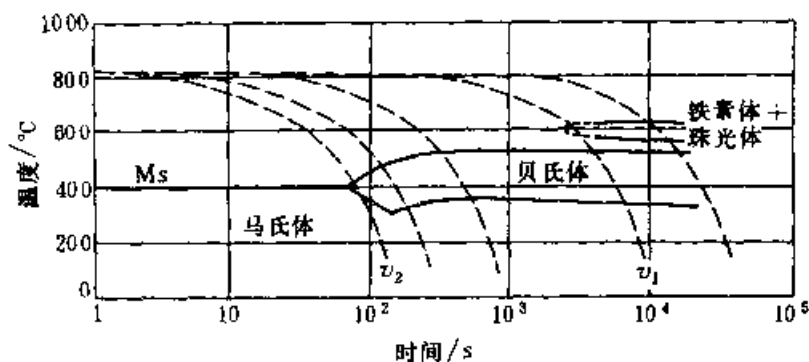


图 7-15 3.5%Ni-Mo-V 钢奥氏体连续冷却转变曲线示意图

不小于  $v_1$ , 终冷温度不高于  $450^{\circ}\text{C}$ 。如要使锻件心部获得马氏体组织, 必须保证锻件心部冷却速度不低于  $v_2$ , 且应过冷到  $300^{\circ}\text{C}$  以下。在确定终冷保持时间时, 必须充分考虑组织转变热效应的影响。

### 7.2.2.1 冷却方式及冷却曲线

大锻件常用的冷却方式有: 静止空气冷却、鼓风冷却、喷雾冷却、油冷、水冷、喷水冷却及水淬油冷、空—油冷却(延迟淬冷)、水—油双介质淬火、油—空双介质淬火等。这些冷却方式并不能完全满足大锻件冷却的要求, 还有待于寻求新的淬火介质和冷却方法。对形状复杂、截面变化较大的工件, 为使冷却均匀和减小淬火应力, 有时采用工件在炉内稍降低温度后再出炉淬火的方法。

1. 水冷 水冷工件经高温回火后的强度、塑性、韧性和脆性转变温度等力学性能都比油冷好(特别是心部性能)。因此, 在不引起缺陷扩大的前提下, 应采用水冷。但是这时工件截面上的最大温差可达  $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ , 如锻件冶金质量不好, 巨大的内应力会使工件产生裂纹甚至断裂。图 7-16~图 7-19 是锻件的不同截面水冷曲线。

在判断锻件在淬火冷却中能否采用水冷时,

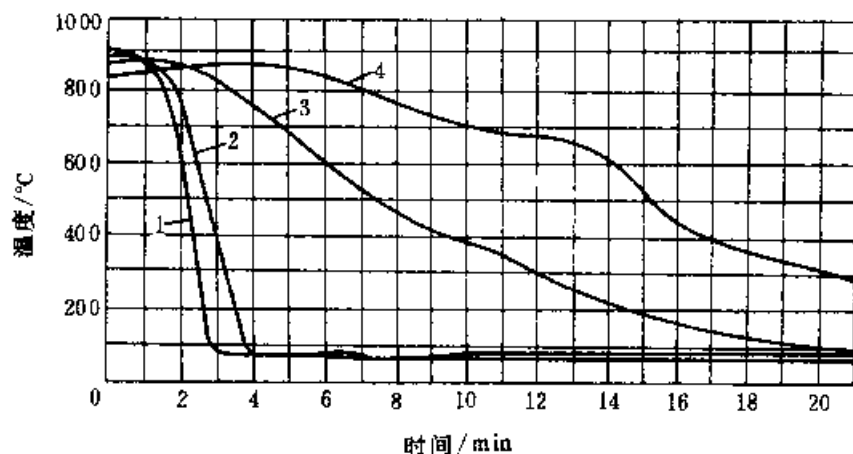


图 7-16  $\phi 300\text{mm} \times 2000\text{mm}$  9Cr 钢锻件水冷曲线 (水温  $20^{\circ}\text{C}$ )

1—距表面 15mm 2—距表面 30mm 3—距表面 75mm  
4—距表面 150mm

首先应考虑锻件化学成分和基础性能的影响, 按式 (7-5) 计算出锻件的碳当量  $CE$ 。

$$CE = C\% + \frac{Mn\%}{20} + \frac{Ni\%}{15} + \frac{Cr\% + Mo\% + V\%}{10} \quad (7-5)$$

当计算结果(成分为质量分数)为:

1) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE \leq 0.75\%$ , 正偏析区的含碳量  $\leq 0.31\%$  时, 锻件可以毫无危

险地采用水淬。

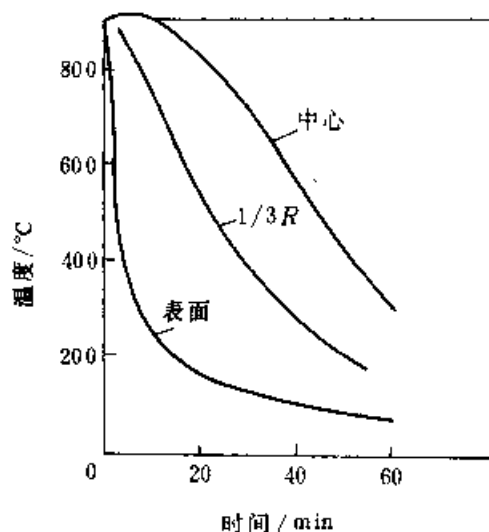


图 7-17  $\phi 450\text{mm}$  42SiMn 钢锻件水冷曲线

2) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE = 0.75\% \sim 0.88\%$ , 正偏析区的含碳量  $= 0.32\% \sim 0.36\%$  时, 锻件可以采用水淬, 但需特别小心。

3) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE \geq 0.88\%$ , 正偏析区的含碳量  $\geq 0.36\%$  时, 若无特殊的指示与指导, 禁止水淬。

随着大锻件用钢含碳量的逐步降低和电渣重熔、钢包精炼、真空除气、真空碳脱氧等先进冶炼工艺的采用, 大锻件的冶金质量有了明显提高, 承受较大淬火应力而不引起开裂的可能性有所增加, 应当扩大急冷和深冷的应用。

2. 油冷 油冷时锻件中最大温差比水冷小, 一般不超过  $500^{\circ}\text{C}$ 。图 7-20~图 7-23 是不同截面锻件的油冷冷却曲线。采用空—油冷却(延迟淬冷)可显著降低工件内外温差(见图 7-24)。

3. 空冷 空冷或鼓风冷的冷却能力比水冷、油冷小得多, 故在一定程度内可避免锻件内部缺陷的扩大, 但空冷时锻件的性能潜力不能充分发挥。图 7-25、图 7-26 是大锻件的空冷曲线。

4. 水淬油冷 图 7-27、图 7-28 是水淬油冷冷却曲线。

5. 双介质淬火 水—空—水、油—空—油双介质淬火方式, 可使心部热量向外层传播, 以减少锻件截面上的温差, 使冷却比较均匀, 降低淬火应力。

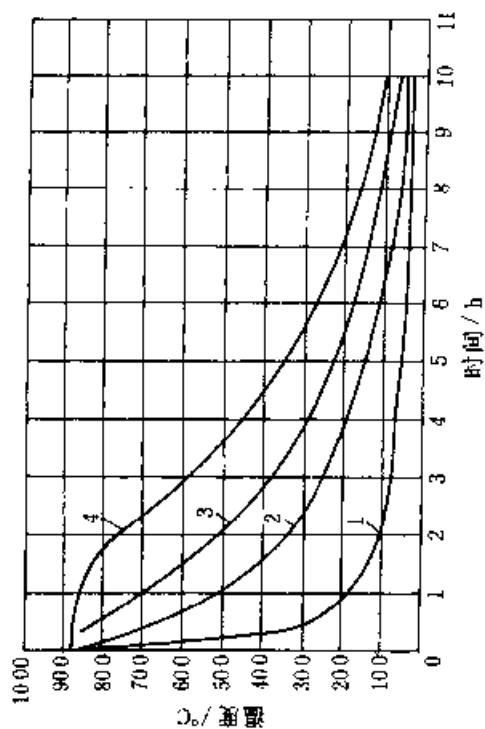


图 7-19  $\phi 1350\text{mm}$  NiCrMoV 钢锻件水冷曲线

1—表面 2—距表面 225mm 3—距表面 450mm 4—中心

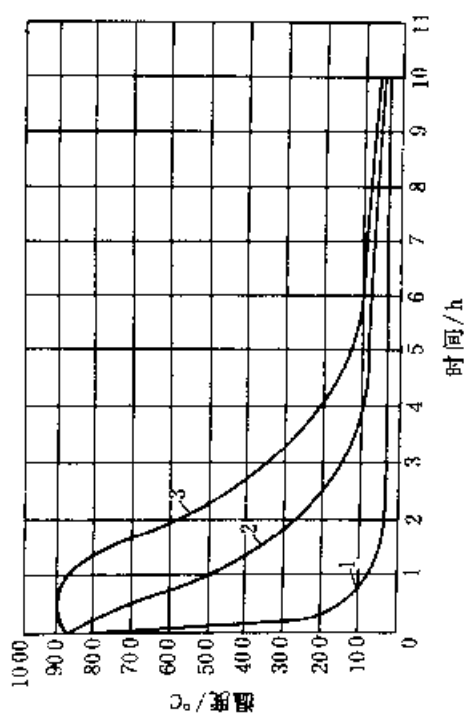


图 7-18  $\phi 920\text{mm}$  NiCrMoV 钢锻件水冷曲线

1—表面 2—距表面 230mm 处 3—中心

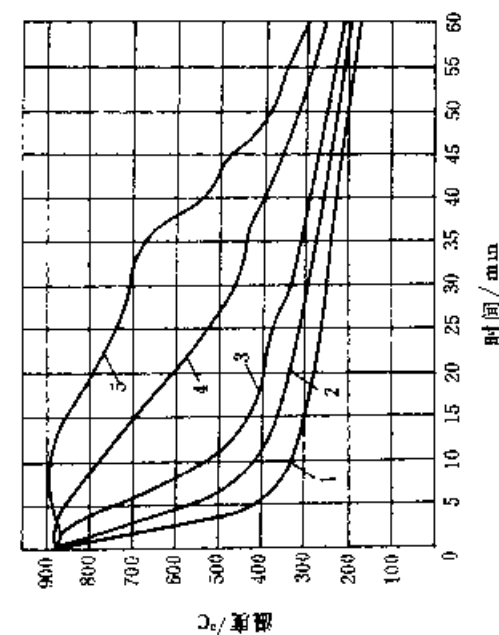


图 7-21  $\phi 460\text{mm} \times 2000\text{mm}$  50Mn2 钢锻件油冷曲线 (油温  $50^\circ\text{C}$ )

1—距表面 15mm 2—距表面 30mm 3—距表面 65mm  
4—距表面 120mm 5—距表面 200mm

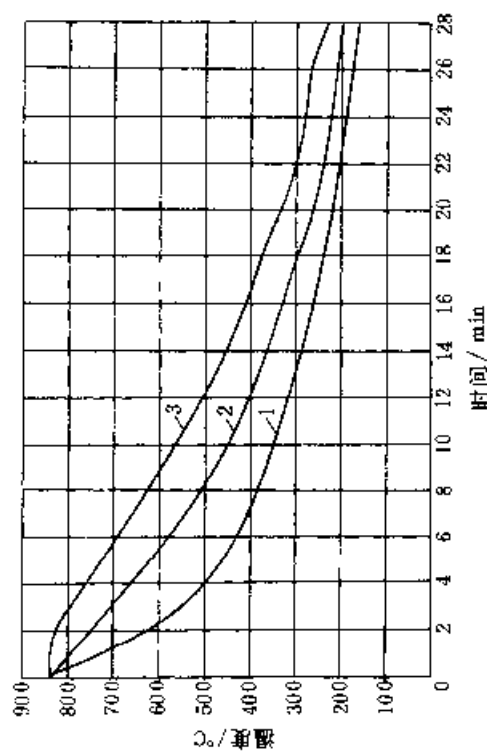


图 7-20  $\phi 200\text{mm}$  40Cr2MoV 钢锻件油冷曲线

1—表面 2—距表面  $1/3$  半径处 3—中心

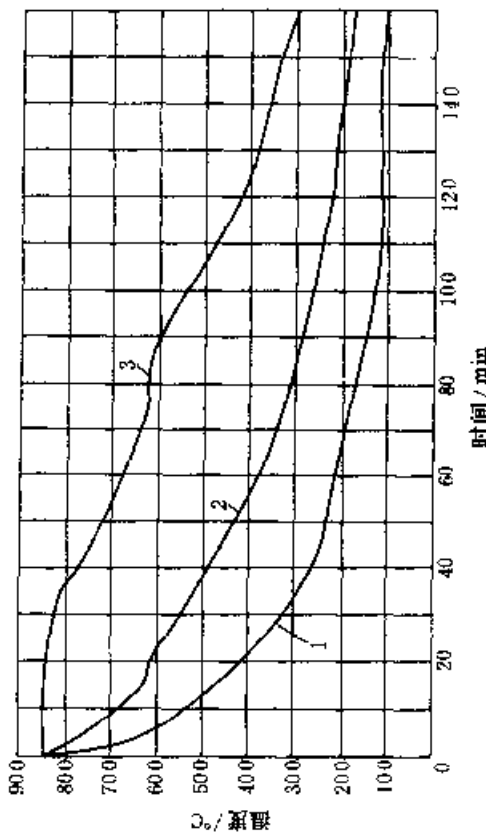


图 7-22  $\phi 700\text{mm}$  40Cr2MnV 钢锻件油冷曲线  
1—表面 2—距表面 1/3 半径处 3—中心

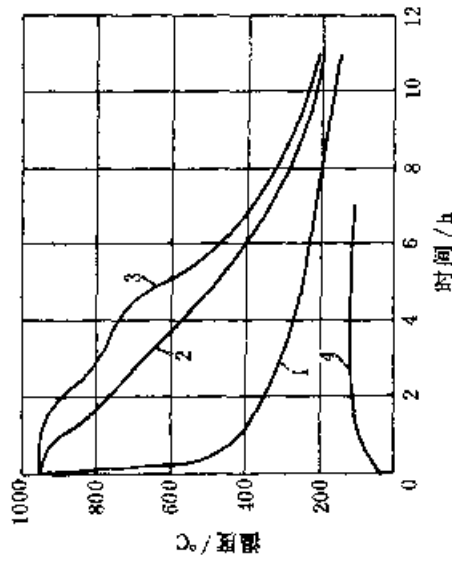


图 7-23  $\phi 1270\text{mm}$  钢件油冷曲线  
1—表面 2—距表面 1/2 半径处 3—中心 4—油温

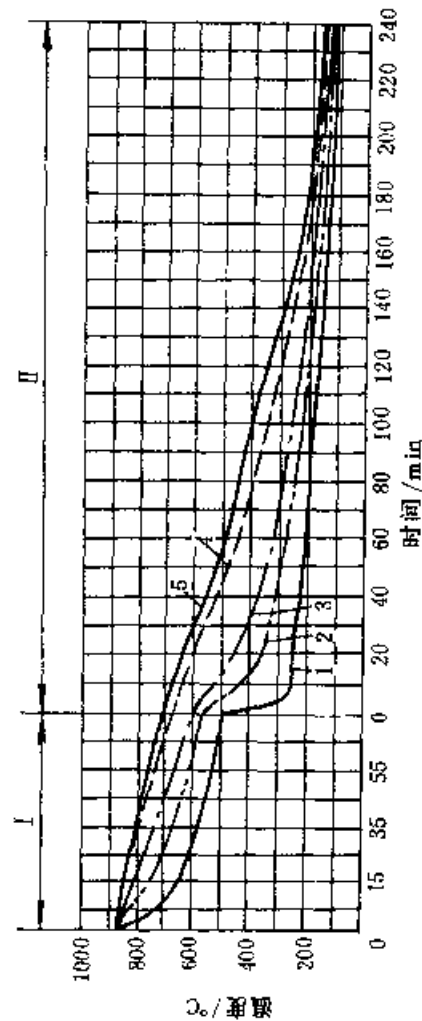


图 7-24  $\phi 600\text{mm}$  34CrNiMo 钢锻件空冷 (I)

随后油冷 (II) 的冷却曲线

1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 105mm  
4—距表面 200mm 5—距表面 300mm

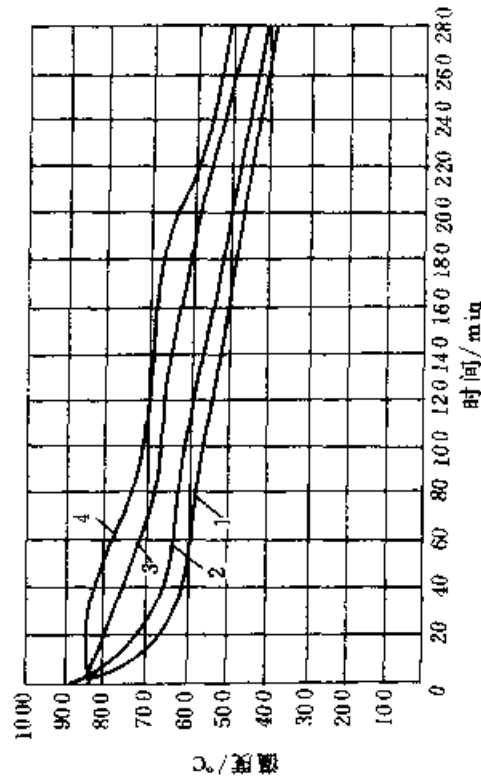


图 7-25  $\phi 650\text{mm}$  45Cr 钢锻件空冷曲线 (静止空气),  
加热温度: 表面  $900^{\circ}\text{C}$

1—距表面 20mm 2—距表面 50mm 3—距表面 105mm 4—中心

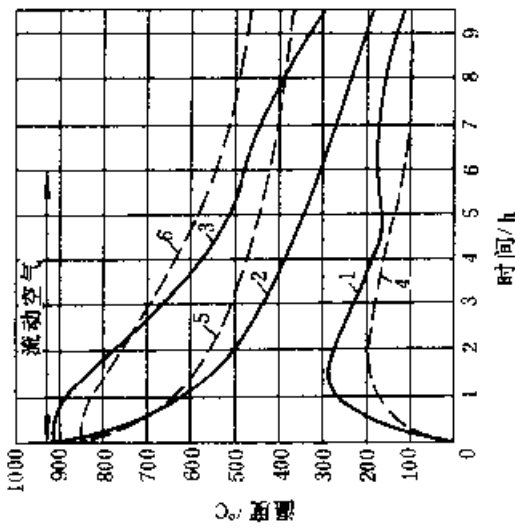


图 7-26  $\phi 950\text{mm}$  28CrNiMoV7.4 钢件空冷曲线  
1、4—表面和中心温差 2、5—表面温度 3、6—中心温度  
---虚线为静止空气冷却 --实线为鼓风冷却

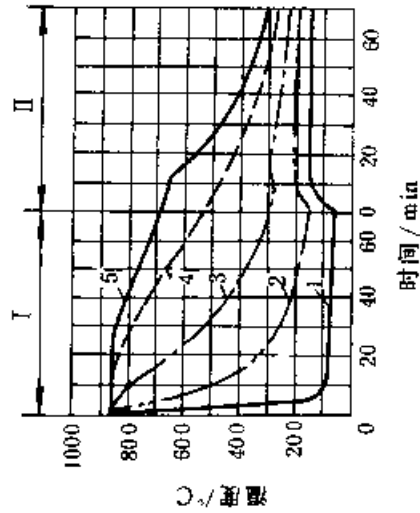


图 7-28  $\phi 800\text{mm}$  40CrNi 钢钢件先在水中(I)后在油中(II)冷却曲线  
1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 130mm 4—距表面 360mm 5—距表面 400mm

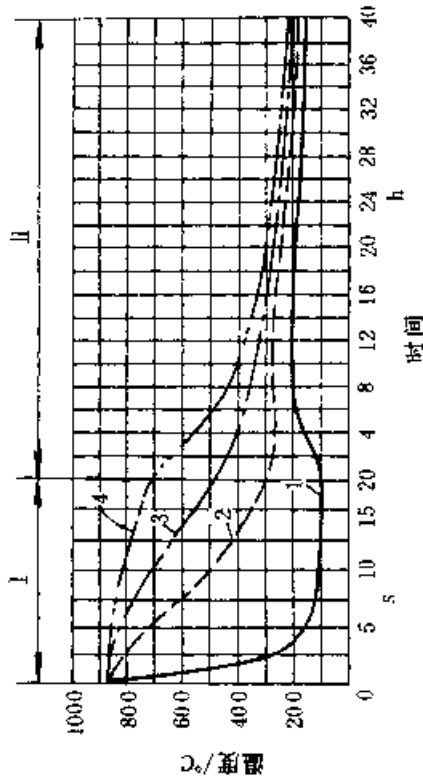


图 7-27  $\phi 400\text{mm}$  40Cr 钢钢件先在水中(I)后在油中(II)冷却曲线  
1—距表面 10mm 2—距表面 75mm 3—距表面 130mm 4—距表面 200mm

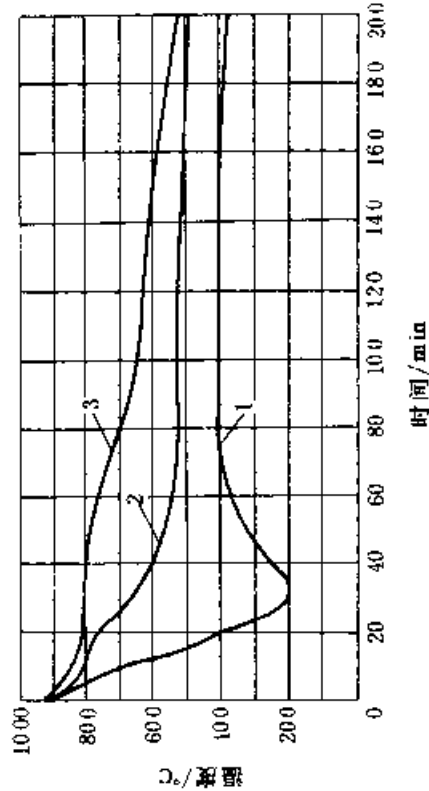


图 7-29  $\phi 870\text{mm}$  31CrMoA 钢钢件水—空双介质淬火曲线  
1—表面 2—距表面 1/3 半径 3—中心

图 7-29 所示为水—空双介质淬冷曲线。工件在空气中预冷 12min 后, 随即水冷 2min、空冷 3min 再交替冷却至 35min, 然后空冷。

6. 喷雾、喷水冷却 喷雾冷却是利用压缩空气与压力水的共同作用, 使之成为细雾状向工件表面喷射的冷却方法。喷水冷却是将高压水直接向工件表面均匀喷射的冷却方法。在喷射冷却时, 工件要旋转, 以便冷却均匀。这种冷却方式的优点是在冷却过程中可以改变风量、水量及水压, 以达到调节冷却速度的效果, 使在不同冷却阶段得到不同的冷却速度。对有阶梯的工件, 在不同截面处可以调节得到不同的冷却能力, 使之获得相同的冷却速度。喷水冷却的冷却能力很强烈, 高压水还可以猛烈冲刷工件加热时表面形成的氧化皮。

图 7-30 所示为喷雾冷却曲线, 图 7-31 所示为喷水冷却曲线。

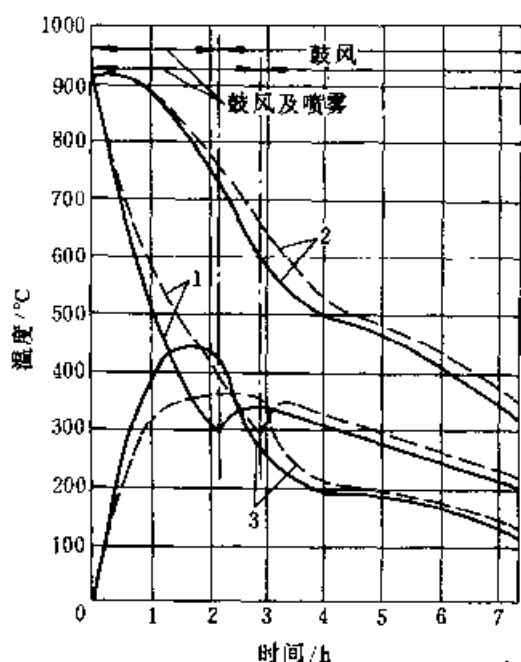


图 7-30  $\phi 950\text{mm} 28\text{CrNiMoV}7.4$  钢锻件在鼓风和喷雾冷却时的冷却曲线

1—表面温度 2—中心温度 3—表面与中心的温差  
实线水压为 4.6MPa 的喷雾冷却  
虚线水压为 2.5MPa 的喷雾冷却

### 7.2.2.2 冷却时间的确定

冷却时间是指工件在冷却介质中停留的时间。冷却时间过短, 会达不到要求的性能, 而冷却时间过长、终冷温度过低, 会增大淬裂的危险性。所以, 确定适当的冷却时间及终冷温度, 是大锻件热处理工艺中的一个重要问题。

在生产中的淬火冷却主要是控制冷却时间,

而工件表面的终冷温度仅作为参考。冷却时间一般根据实测的各种冷却曲线, 理论计算以及长期生产经验来确定。必须注意, 即使相同截面的工件, 在相同的淬火介质及冷却时间内冷却, 也会由于冷却设备容量、淬火介质的温度、介质循环条件及工件在介质中的移动方式等情况不同, 造成工件心部温度的显著差别。所以, 在规定冷却时间的同时, 还要严格控制冷却条件。

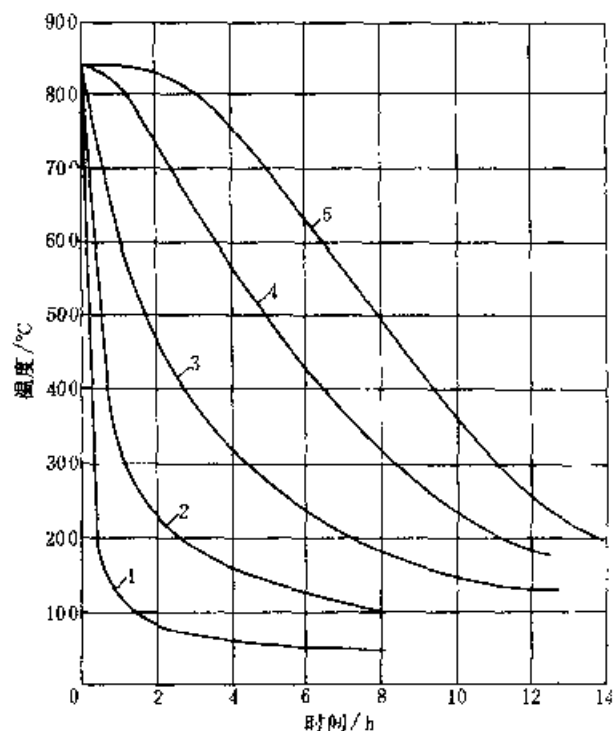


图 7-31  $\phi 1800\text{mm Cr-Ni-Mo-V}$  钢锻件喷水冷却曲线

1—距表面 15mm 2—距表面 100mm 3—距表面 200mm 4—距表面 450mm 5—中心

图 7-32 及图 7-33 所示为不同直径钢件在水冷、油冷、空冷时, 心部冷却到 450°C 和 300°C 时所需的冷却时间(淬火温度取为 860°C, 淬火介质温度取为 40°C), 曲线是由实测数据整理而得到的。表 7-6 列出一些具体冷却工艺可供参考, 生产中根据工件形状、材质及生产条件, 在制订具体冷却工艺时, 作适当调整。

另外, 也可采用简化公式来估计冷却时间

$$\tau = a \times D (\text{s}) \quad (7-6)$$

式中  $\tau$ ——冷却时间 (s);

$a$ ——系数 (s/mm); 油冷时,  $a=9\sim 13$ ; 水冷时,  $a=1.5\sim 2$ ; 水淬油冷时, 水淬:  $a=0.8\sim 1$ , 油冷:  $a=7\sim 9$ 。

$D$ ——工件有效截面 (mm)。



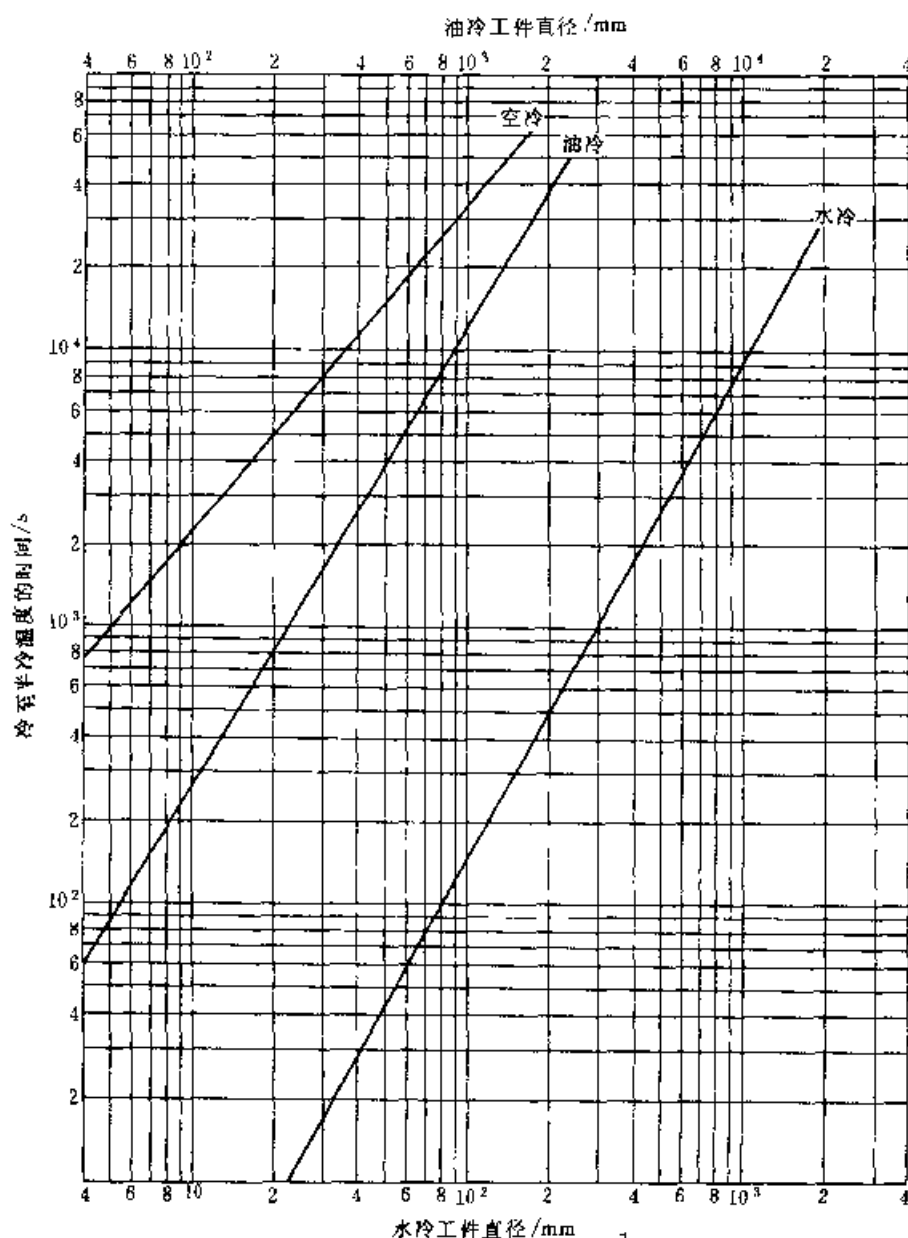


图 7-32 不同直径锻件心部冷却至温度  $t = \frac{1}{2}(t_{\text{空}} + t_{\text{介}})$  的时间

工件正火时,一般规定表面终冷温度为:碳素结构钢、低合金结构钢不高于  $250 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ;高、中合金结构钢、模具钢,不高于  $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 。

### 7.2.3 大锻件的回火

大锻件回火的目的是消除或降低工件淬火或正火冷却时产生的内应力,得到稳定的回火组织,以满足综合性能要求。在回火过程中还可继续去氢和使氢分布均匀,对降低或去除氢脆的影响是有利的。

大锻件淬火后应及时回火,规定时间间隔如下:

(1) 碳素结构钢、低合金结构钢锻件直径不大于  $700\text{mm}$  者,小于  $3\text{h}$ ;直径大于  $700\text{mm}$  者小

于  $2\text{h}$ 。

(2) 中、高合金结构钢锻件,不超过  $2\text{h}$ 。

(3) 水淬、水淬油冷锻件,模具钢、轧辊钢及其他重要锻件,均应立即回火。

#### 7.2.3.1 回火温度的选择

大锻件的回火温度应根据对锻件性能、组织的要求和每个锻件的具体情况确定。用小试样作出的回火温度与性能之间的关系曲线,只能作为选择大锻件回火温度时的参考。

表 7-7 是各种大锻件用钢的硬度与回火温度间的关系,表 7-8 是屈服强度与回火温度间的关系,可作为选择回火温度的依据。但应指出,由于各工厂的实际生产条件和生产经验不同,同一钢号锻件的回火温度不必完全一致。

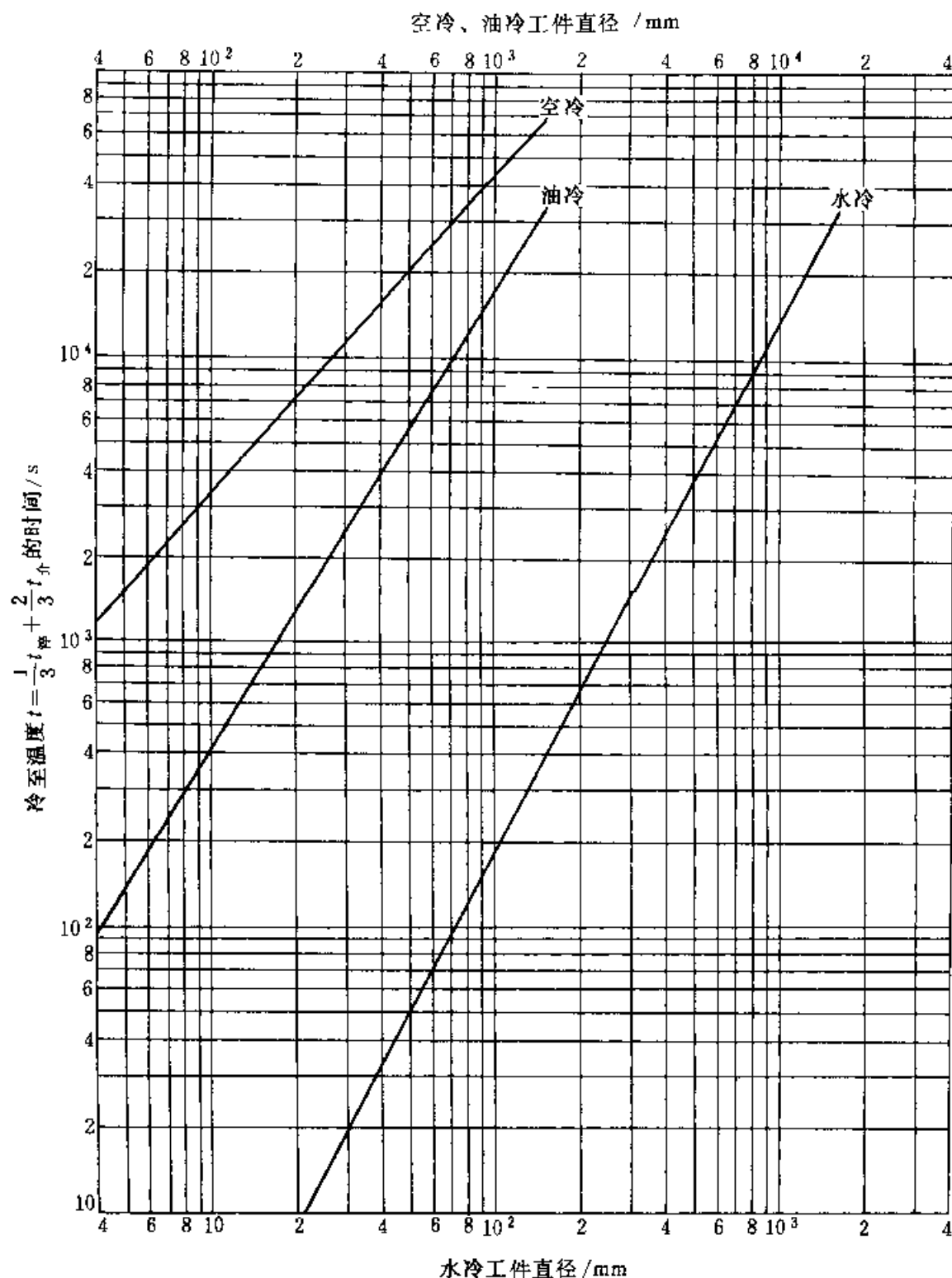

 图 7-33 不同直径锻件心部冷却至  $t = \frac{1}{3}t_{\text{共}} + \frac{2}{3}t_{\text{介}}$  的时间

表 7-6 具体冷却工艺举例

截面/mm		~100	101~250	251~400	401~600	601~800	801~1000
冷却	淬火介质	油	油	油	油	油	油
	淬冷时间/min	20	20~50	45~80	70~120	110~160	150~220

(续)

冷却		截面 /mm		~100		101~250		251~400		401~600		601~800		801~1000	
水淬油冷	淬火介质	水	油	水	油	水	油	水	油						
	淬冷时间 /min	1~2	~15	1~3	15~30	2~5	25~60	3~6	50~100						
水冷	淬火介质	水		水		水									
	淬冷时间 /min	1~3		3~10		10~16									
双介质淬冷	淬火介质			水	空	水	水	空	水			油	空	油	油
	淬冷时间 /min			1~32		33~64	83~56		~8			80~100	5~10	30~60	100~140

注: 1. 碳钢及低合金钢冷却时间采用下限, 中合金钢采用上限。

2. 截面 401~600mm“水-油”冷却仅适用于碳素结构钢及低合金结构钢。

3. 工件装在垫板上淬冷时, 应适当延长冷却时间。

4. 淬冷前油温不大于 80°C, 水温为 15~35°C

表 7-7 各种大锻件用钢的硬度与回火温度的关系

回火温度/°C	硬度	160~	180~	197~	217~	229~	241~	269~	280~	320~	50~	60~	≥75HS
钢号		220HBS	220HBS	241HBS	255HBS	269HBS	285HBS	302HBS	320HBS	340HBS	70HS	80HS	
35		640	570	510 <sup>①</sup>									
45			590	550~590 <sup>②</sup>	530~560 <sup>③</sup>	530 <sup>④</sup>	510 <sup>⑤</sup>						
55					590	570							
65Mn								540					
40Cr				590	560~610 <sup>①</sup>	530~590 <sup>②</sup>	510~560 <sup>③</sup>	540 <sup>④</sup>					
55Cr						600	570						
35SiMn					580								
20CrMo	660												
20CrMo9			650										
34CrMo1			670	640	620	590	550~620 <sup>①</sup>	520					
35CrMo			660	610	580	560	530~580 <sup>②</sup>	560 <sup>③</sup>					
24CrMo10			680										
40CrNi			660	570									
35CrMnMo					610	580							
40CrMnMo					620	600	570						
60CrMnMo				650 <sup>④</sup>		630			570				
32Cr2MnMo							610	590	580				
30CrMnSi					610	580							
34CrNiMo					630								
34CrNi2Mo						620							
34CrNi3Mo					630 <sup>⑤</sup>	620	590	560	550	530			
30Cr2Ni2Mo					640		590~620 <sup>⑥</sup>	600 <sup>⑦</sup>	560				

(续)

回火温度 °C 钢号	硬度	160~ 220HBS	180~ 220HBS	197~ 241HBS	217~ 255HBS	229~ 269HBS	241~ 285HBS	269~ 302HBS	280~ 320HBS	320~ 340HBS	50~ 70HS	60~ 80HS	≥75HS
30Cr2Ni3Mo						640 <sup>2</sup>							
24CrMoV							660						
35CrMoV						590	560						
30CrMoV9							620						
30Cr2MoV					690 <sup>1</sup>		680						
35CrNiW					630	600	580~ 630 <sup>1</sup>						
18MnMoNb						610							
18CrMnMoB							580						
30CrMn2MoB								580					
50SiMnMoB						630							
9Cr2									640				320 <sup>1</sup>
9CrV								590 <sup>3</sup>	560 <sup>3</sup>			350 <sup>1</sup>	
9Cr2W					690							350 <sup>1</sup>	
9Cr2Mo										390			320
5CrMnMo							640		560				
5CrNiMo							570					460	
6CrW2Si						670							
2Cr13						630	600						
3Cr13				670 <sup>1</sup>			600 <sup>1</sup>						
Cr5Mo			610										

注: 1. 回火温度偏差为  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

2. 淬火、正火冷却方式: ①水淬油冷; ②水淬; ③空冷; ④鼓风冷却。

3. 无标注者为油冷。

表 7-8 根据屈服强度选择回火温度参考表

钢号 温度/°C	$\sigma_s/\text{MPa}$	250	300	350	400	450	500
510							
520							
530						40Cr • 300	
540						45CrNi • 150	
550					40Cr • 300	35CrMo • 250	35CrMo • 400 <sup>2</sup> 35CrMo • 150
560	20MnMo <sup>1</sup> 35 • 750 <sup>3</sup>			35 <sup>1</sup> 40 • 150 <sup>2</sup>	20MnMo <sup>2</sup> 35CrMo • 500	40 • 60 <sup>2</sup>	20CrMo <sup>1</sup> 34CrMo1 • 700
570			35 20MnMo 35 • 250				40Cr 35CrMo • 300
580	45 • 800 <sup>3</sup>		40 • 300	20MnMo <sup>1</sup> 40Cr • 500	40Cr • 200	20CrMo <sup>1</sup> 35CrMo • 150	40Cr • 200 <sup>1</sup>
590	20MnSi <sup>1</sup>			45 45 • 150	15CrMo	15CrV 50SiMn 35CrMo • 450 <sup>1</sup>	35CrMo 34CrMo1 • 500



(续)

$\sigma_s$ /MPa 温度/ $^{\circ}\text{C}$	550	600	650	700
550	45CrNi	35CrMo	40Cr <sup>1</sup> 34CrMo1	35CrMo • 100 <sup>d</sup>
560	55 • 150	18MnMoNb 40Cr • 100 <sup>c</sup>	35CrMo • 140	34CrNiMo • 300
570	35CrMo	34CrMo1 12CrMo 35CrMo • 100 <sup>f</sup>	35CrMo <sup>1</sup> 31CrMo1 • 150 <sup>e</sup> 18CrMnMoB • 400	30CrMn2MoB • 350
580	18MnMoNb 40Cr • 150 <sup>a</sup>	34CrMo1 • 100 <sup>b</sup> 18CrMnMoB • 400 <sup>c</sup>	34CrNiMo • 300 35CrMnMo • 400	5CrMnMo 18CrMnMo1 • 350
590	34CrMo1 35CrMo • 250 <sup>a</sup>	34CrMo1 • 150 <sup>b</sup> 31CrNiMo • 300 18CrMnMoB • 350 32Cr2MnMo • 650	35CrNiW • 250 32Cr2MnMo • 400	35CrMo • 50 <sup>c</sup> 32Cr2MnMo • 300
600	42CrMo 55Cr • 400 40CrNiMo • 600	40Cr <sup>b</sup> 34CrNiMo • 250 35CrMnMo • 300	5CrMnMo 32Cr2MnMo • 300 30CrMn2MoB • 500	34CrNi3Mo (30Cr2Ni2Mo) • 170 <sup>d</sup>
610	34CrMo1 • 150 35CrMnMo • 500 32Cr2MnMo • 750	40CrV <sup>1</sup> 1Cr13 40CrV • 150 <sup>1</sup> 32Cr2MnMo • 350	(30Cr2Ni3Mo) • 220 <sup>4</sup>	32Cr2MnMo 32Cr2MnMo • 220
620	40Cr <sup>b</sup> 32Cr2MnMo • 600 50SiMnMoB • 250 <sup>b</sup>	35CrNiW 35CrNiW • 350 34CrNi3Mo • 550 50SiMnMoB • 650		
630	2Cr13 40CrV • 200 <sup>1</sup> 35CrNiW • 250 <sup>1</sup>	45CrV <sup>1</sup>	32Cr2MnMo	
640	35CrMnMo 50SiMnB • 250 <sup>1</sup>	14CrMnMoVB		
650	30CrMn 2MoB • 200	34CrNiMo		
660			34Cr3WMoV	
670		24CrMov		30Cr2MoV
680				
690	21CrMoV	30Cr2MoV		

(续)

钢号 温度/°C $\sigma_s$ MPa	750	800	850	900
510				
520				34CrNi3Mo
530	25CrNi4 • 30			
540			34CrNi3Mo	
550	18CrMnMoB 18CrMnMoB • 400		15CrNi <sup>①</sup> 18CrNiW • 300	34CrNi3Mo • 500 <sup>②</sup> 18CrNiW • 200
560	30CrMn2MoB • 150	34CrNi3Mo	34CrNi3Mo • 300	34CrNiMo • 60
570	45CrNi 18CrNiW • 300		34CrNiMo • 60	
580	34CrNi3Mo 34CrNi3Mo • 200	34CrNi3Mo • 200		
590	32Cr2MnMo • 200 30Cr2Ni2Mo • 250	34CrNi3MoV		
600				
610		45CrNiMoV		34Cr3WMoV
620			34Cr3WMoV	34CrNi3Mo • 70
630	34Cr3WMoV • 400			
640	34Cr3WMoV			
650		30Cr2MoV		
660				
670				
680				
690				

注：1. 钢号后有数字者，表示是纵向性能，其数字为截面尺寸(mm)，有括号者为横向性能，只写钢号者为切向性能。

2. 淬火、正火冷却方式：①水淬油冷；②水淬；③空冷；④鼓风冷却。

3. 无标明者为油冷。

### 7.2.3.2 回火中的加热与冷却

1. 入炉温度及升温前的停留时间 高合金钢大锻件淬冷终了时, 心部尚有未充分转变的过冷奥氏体, 在回火入炉温度下停留时, 表面温度升高, 心部温度则继续降低, 使心部尚未转变的奥氏体继续分解。所以, 在回火入炉的低温下长时间停留, 实际上是心部继续冷却的过程。回火入炉温度应根据钢的 TTT 曲线来确定, 一般选择在 Ms 点附近, 停留时间应保证使过冷奥氏体得到充分转变。

碳钢和低合金钢锻件在淬火冷却中, 过冷奥氏体转变已基本完成, 回火入炉后的停留只是为了减少锻件中的内外温差, 以降低锻件中的内应力。

2. 升温、均温和回火保温 回火加热时所产生的热应力与淬火后的残留应力叠加, 可促使工件中的缺陷扩大, 所以回火加热速度应比淬火加热速度低一些, 一般控制在  $30 \sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

高温回火时, 炉测温表到温后即均为温开始, 当锻件表面火色均匀且与炉膛颜色一致时即为均温终了。低温回火时无法判断火色, 应根据实际经验, 选择足够的回火时间。

均温结束即为保温开始。实际上, 保温时心部继续升温到回火温度, 并完成回火转变过程。淬火后的回火保温时间可选为  $\approx 2\text{h}/100\text{mm}$ , 而正火后的回火为  $\approx 1.5\text{h}/100\text{mm}$ 。

3. 回火后的冷却与残留应力 大锻件高温回火后快冷, 会引起大的残留应力, 其数值主要取决于该钢的弹-塑性转变温度 (碳钢和低合金钢为  $400 \sim 450^\circ\text{C}$ , 合金钢为  $450 \sim 550^\circ\text{C}$ ) 以上阶段的冷却速度。为了减小锻件中的残留应力, 应尽量降低锻件在高温阶段的冷却速度。为了缩短回火冷却时间以提高生产率, 锻件在弹-塑性转变温度以下区域可以采取较快的冷却速度。

调质大锻件中的残留应力是热残留应力, 沿工件截面的分布规律是: 表面受压、心部受拉, 由中心到表面近似为一条不对称的余弦曲线, 中心处的轴向应力约比切向应力大一倍。必要时可根据锻件用钢的物理参数与回火工艺过程对应力分布曲线进行定量计算。

当只须控制锻件表面残留应力时, 可利用以下经验公式进行估算

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 0.48\Delta t \\ \sigma_r &= 0.42\Delta t\end{aligned}\quad (7.7)$$

式中  $\sigma_x, \sigma_r$  分别为锻件表面的轴向与切向残留应力 (MPa);

$\Delta t$ ——锻件在高温阶段冷却时, 工件中的最大温差 ( $^\circ\text{C}$ )。

通常对重要锻件规定为, 经高温回火后工件表面的残留应力值不得高于其屈服强度的 10% 或 40MPa, 即可由上式算出在高温回火中应当采取的冷却速度。

4. 回火脆性 (第二类回火脆性) 用对回火脆性敏感的钢材制造大型锻件时, 为获得较高的冲击韧度, 要求回火后快冷。但这将引起大的残留应力。在不引起回火脆性的温度下 ( $450^\circ\text{C}$ ) 再进行补充回火, 可使残留应力降低 50% 左右。为了保证冲击韧度符合要求而残留应力又较小, 大锻件应采用对回火脆性不敏感的碳钢或添加钼 ( $0.25\% \sim 0.5\%$ ) 或钨 ( $0.5\% \sim 1\%$ ) 的合金钢来制造, 并尽量降低钢中砷和锡等杂质的含量。

采用合金化的方法来消除大锻件用钢的第二类回火脆性, 是有局限性的, 关键在于提高钢液的纯净度, 尽量减少有害杂质磷、砷、锡、锑的含量及其在晶界上的偏析程度。

### 7.2.4 大锻件最终热处理工艺举例

一般常用大型锻件用钢, 按其导热性能, 碳化物溶解的难易以及对终冷温度的要求, 可划分为以下四组:

第一组 含碳量 (质量分数) 小于 0.45% 的碳素结构钢及低合金结构钢;

第二组 含碳量 (质量分数) 大于 0.45% 的碳素结构钢及低合金结构钢;

第三组 中、高合金结构钢;

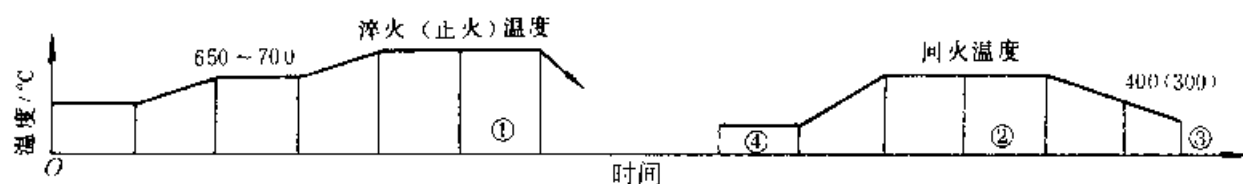
第四组 工模具钢。

一般大型锻件的第二热处理工艺规范可归纳为如表 7-9、表 7-10 所列。各组按工件截面大小具体选定工艺参数。对截面更大、合金元素很高的重要锻件应参考专门著作慎重制定。

### 7.2.5 大锻件热处理后的力学性能

常用的不同截面的优质碳素钢、合金结构钢大型锻件, 在调质处理后的力学性能列于表 7-11 及表 7-12。不锈钢及耐酸钢锻件热处理后的力学性能见表 7-13。各表中的性能数据皆指轴类锻件在距表面  $1/3$  半径处切取纵向试样的性能。





组别	截面 /mm	装炉 温度 /℃	保温 /h	升温 ≤ /℃ ·h <sup>-1</sup>	保温 /h	升温 ≤ /℃ ·h <sup>-1</sup>	均温 /h	保温 h	冷却	装炉 温度 ℃	保温 /h	升温 ≤ /℃ ·h <sup>-1</sup>	均温 /h	保温 /h	冷却 /℃ ·h <sup>-1</sup>	冷却	出炉温度 /℃						
I	≤100	加热 温度	—	—	—	—	目 测	—	—	350~ 400	—	—	目 测	1.5~2 100mm, 但不小 于4	空冷	—	—						
	101~250																						
	251~400																						
	401~600																						
	601~800	600~	650	—	3~4	100	0.6~0.8 /100mm	空冷或 按表 7-6 冷却	—	—	1~2	100	目 测	炉冷	冷	500~400 450~350							
	801~1000	650			4~5	80					2~3	80											
											3~1	60											
	≤100	加热 温度	—	—	—	—	目 测	—	—	350~ 400	—	—	目 测	—	空冷	—	—						
	101~250																						
	251~400																						
	401~600	600~	650	—	2~3	100					1	80	目 测	炉冷	冷	500~400 450~350							
	601~800	650			3~4	80					1~2	60											
	801~1000	400~ 450			2~3	50					4~5	60					2~4	50	3~5	40	50	40	炉冷
II	≤100	加热 温度	—	—	—	—	目 测	—	—	250~ 350	—	—	目 测	1.0~2.5 100mm, 但不小 于4	空冷	—	—						
	101~250																						
	251~400																						
	401~600	600~	650	—	2~3	100	0.8~1.0 /100mm	空冷或 按表 7-6 冷却	—	—	2	100	目 测	炉冷	冷	500~400 450~350							
	601~800	650			3~4	80					2~3	80											
	801~1000	400~ 450			2~3	50					4~5	60					2~4	60	3~5	50	4~6	40	40
	IV	≤100	加热 温度	—	—	—	—	目 测	—	—	250~ 350	—	—	目 测	1.0~2.5 100mm, 但不小 于4	空冷	—	—					
101~250																							
251~400																							
401~600																							
601~800																							
≤100		1	70	1~2	100	0.8~1.0 /100mm	空冷或 按表 7-6 冷却	—	—	1~2	80	目 测	封炉冷	空冷	≤400								
101~250	1~2	60	1~2	100	1~3					60	40					炉冷	350~300						
251~400	1~2	50	2~3	80	2~3					50								30	冷	300~250			
401~600	2~3	40	3~4	60	3~5					40											20	冷	250~200
601~800	2~3	30	4~5	50	4~6					30													

① 对截面很小的工件,保温时间可增长至 1.3~1.5 倍。

② 小截面工件或在较低温度回火时,保温时间可增长至 1.3~1.5 倍。

④ 出炉温度上限适用于畸变倾向小的一般工件,畸变倾向大或重要工件出炉温度采用下限。

(4) 18CrNiW 的回火入炉保温时间为规定的 1.5 倍

表 7-10 1Cr13、2Cr13、3Cr13、Cr5Mo 锻件热处理工艺规范

截面 /mm	装炉温度 /°C	保温 /h	升温 $\leq$ /°C·h	均温 /h	保温 /h	冷却	装炉温度 /°C	保温 /h	升温 $\leq$ /°C·h	均温 /h	保温 /h	冷却
$\leq 50$	550~650	0.5	—	—	0.75	按表 7-6 或空冷	350~400	1	100	—	1~2	空冷
51~100	400~500	1.0	—	—	1.0	按表 7-6 或空冷	300~350	1	100	目	3~4	油冷
101~150	350~450	1.5	—	—	1.5	按表 7-6 或空冷	300~350	1.5	100	测	4~6	油冷
151~1300 <sup>②</sup>	350~450	2~3	80	—	2~3	空冷	300~350	2~3	60	—	6~10	炉冷至 250 出炉

① 740~760°C 为 Cr5Mo 钢的回火温度。

② 截面 150~300mm 工艺参数仅适用于 Cr5Mo 钢锻件。

表 7-11 优质碳素钢锻件热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能						热 处 理		
				$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\phi$ (%)	$a_K$ /J· cm <sup>-2</sup>	HBS	类型	温度/°C	冷却
15	$\leq 100$	纵向	正火	350	200	27	55	65	99~143	正火	900~920	空
	>100~300		正火、正火+回火	340	170	25	50	60		回火	600~680	空、炉
	>300~500		正火+回火	330	150	24	45	55				
20	$\leq 100$	纵向	正火	400	220	24	53	60	103~156	正火	880~900	空
	>100~300		正火、正火+回火	380	200	23	50	60		回火	600~650	空、炉
	>300~500		正火+回火	370	190	22	45	60				
	>500~700		正火+回火	360	180	20	40	50				
25	$\leq 100$	纵向	正火	430	240	22	50	50	110~170	正火	870~890	空
	>100~300		正火、正火+回火	400	220	20	48	40		回火	600~650	空、炉
	>300~500		正火+回火	390	210	18	40	40				
	>500~750		正火+回火	390	210	18	40	40				
30	$\leq 100$	纵向	正火	480	250	19	48	40	126~179	正火	860~880	空
	>100~300		正火、正火+回火	470	240	19	46	35		回火	600~650	空、炉
	>300~500		正火+回火	460	230	18	40	35				
	>500~750		正火+回火	450	220	17	35	30				
35	$\leq 100$	纵向	正火	520	270	18	43	35	128~187	正火	860~880	空
	>100~300		正火、正火+回火	500	260	18	40	30		回火	600~650	空、炉
	>300~500		正火+回火	480	240	17	37	30				
	>500~750		正火+回火	460	230	16	32	25		淬火 回火	860~880 600~680	水、油 炉、空
	$\leq 100$		正火	560	300	19	48	60				
	>100~300		正火+回火	540	280	18	40	50				

(续)

钢号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能					HBS	热 处 理		
				$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_{K1}$ /J· cm <sup>2</sup>		类型	温度/°C	冷却
10	≤100	纵向	正火	560	280	17	40	30	≤207	正火	840~860	空
	>100~300		正火、正火+回火	540	270	17	36	30		回火	600~650	炉、空
	>300~500		正火+回火	520	260	16	32	25				
	>500~750		正火+回火	500	250	15	30	25				
	≤100		淬火+回火	630	350	18	40	30	170~217	淬火	830~850	水
	>100~300			600	300	17	35	40		回火	580~640	炉、空
45	≤100	纵向	正火	600	300	15	38	30	≤207	正火	830~860	空
	>100~300		正火、正火+回火	580	290	15	35	25		回火	580~630	炉、空
	>300~500		正火+回火	560	280	14	32	25				
	>500~750		正火+回火	540	270	13	30	20				
	≤200		淬火+回火	650	360	17	35	40	187~229	淬火	820~850	水、油
	>200			600	300	15	32	25		回火	600~640	炉、空
50	≤100	纵向	正火	620	320	13	35	30	≤229	正火	830~860	空
	>100~300		正火、正火+回火	600	300	12	32	25		回火	600~650	炉
	>300~500		正火+回火	580	290	12	30	25				
	>500~750		正火+回火	560	270	12	28	20				
	≤100		淬火+回火	700	400	13	34	25	≤211			
	>100~300			660	360	12	32	20				
60	≤300	纵向	正火+回火	660	330	10	25	30	175~228	正火 回火	800~820 640~660	空 炉、空
50Mn	≤100	纵向	正火+回火	650	340	13	35		≤255	正火	820~840	空
	>100~300			620	320	12	33			回火	600~650	空
	≤60		淬火+回火	800	550	8	40	35	≥229	淬火	820~840	油
	>60~100			780	500	7	35	30		回火	600~650	空

表 7-12 合金结构钢锻件热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能					HBS	热 处 理		
				$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_{K1}$ /J· cm <sup>2</sup>		类型	温度/°C	冷却
30Mn2	≤100	纵向	正火	600	300	20	50	80	≤241	正火	840~860	空
	>100~300			560	280	18	48	60				
35Mn2	≤100	纵向	正火	630	320	18	45		≤241	正火	840~860	空
	>100~300		正火+回火	590	300	18	13	30		回火	600~650	空、炉
	≤60		淬火+回火	800	650	16	50	60	229~269	淬火 回火	800~820 620~640	水 水
	>60~100			760	600	16	50	60				
	>100~300			700	500	16	15	60				
	>100~300			700	500	16	15	60				

(续)

钢号	截面尺寸 /mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能						热 处 理		
				$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_K/J \cdot$ $cm^{-2}$	HBS	类型	温度/°C	冷却
45Mn2	$\leq 100$	纵向	正火	700	360	16	38			正火	830~850	空
	$>100 \sim 300$		正火、正火 + 回火	680	340	15	35		$\leq 241$	回火	590~650	空、炉
	$\leq 60$		淬火 + 回火	850	700	15	45			淬火	830~850	油
										回火	550~650	水
50Mn2	$\leq 100$	纵向	正火	750	400	14	35			正火	820~840	空
	$>100 \sim 300$		正火、正火 + 回火	730	380	13	33		187~241	回火	590~650	空、炉
	$>300 \sim 500$		正火 + 回火	700	360	12	30					
20MnMo	$\leq 150$	切向	正火 + 回火	480	270	14	40	50	179~217	正火	900~920	空
	$100 \sim 300$		淬火 + 回火	510	310	14	40	50	197~228	回火	580~600	水、
										淬火	890~910	水 + 油
										回火	580~600	空
22MnMo (20MnMo1)	$\leq 130$	切向	正火 + 回火	500	300	15	40	50	145~190	正火	860~880	空
										回火	590~610	空、炉
18MnMoNb	$\leq 115$	切向	正火 + 回火	600	450	16	40	70		正火	940~960	空
	$\leq 300$			650	500	16	40	70	187~228	回火	630~650	空、炉
	$301 \sim 500$		淬火 + 回火	600	450	16	40	60		淬火	910~930	油、
	$501 \sim 800$			550	400	15	35	50		回火	600~620	水 - 油 空、炉
20SiMn	$\leq 120$	纵向	正火 + 回火	550	340	32	72	80		正火	930~950	空
	$>120 \sim 250$			540	320	30	68	80		回火	560~610	空、炉
	$>250 \sim 400$			500	280	16	35	60				
35SiMn	$\leq 100$	纵向	淬火 + 回火	850	550	15	45	60	228~269	淬火	870~900	油
	$>100 \sim 300$			750	450	14	35	50	217~269			水 + 油
	$>300 \sim 400$			700	400	13	30	40	217~255	回火	580~600	油、炉
	$>400 \sim 500$			680	380	11	28	40	197~255			
55Si2MnV	$\leq 100$	纵向	淬火 + 回火	950	800	12	40	50	241~286	淬火	850~870	油
										回火	620~640	空
40Cr	$\leq 100$	纵向	淬火 + 回火	750	520	15	45	60		淬火	840~860	水、油
	$>100 \sim 200$			750	500	14	42	50	$\leq 285$			
	$>200 \sim 300$			700	450	13	40	40	$\leq 269$			
	$>300 \sim 500$			630	380	10	35	30	$\leq 255$	回火	540~580	空
	$>500 \sim 800$			600	350	8	30	25				
35CrMo	$\leq 100$	纵向	淬火 + 回火	750	550	15	45	60		淬火	840~860	油
	$>100 \sim 300$			700	500	15	45	50	228~269			
	$>300 \sim 500$			650	450	15	35	40	217~255	回火	600~620	空
	$>500 \sim 800$			600	400	12	30	30				

(续)

钢号	截面尺寸 mm	试样 方向	试验状态	力 学 性 能					热 处 理			
				$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_{k-1}$ cm <sup>-2</sup>	HBS	类型	温度, °C	冷却
34CrMo1	≤1000	纵向	正火+回火	580	350	17	40	60	179~229	正火	870~890	空
										回火	640~660	炉、空
30CrMnSi	≤100	纵向	正火+回火	650	400	16	40	30	≤229			
	>100~200			600	350	16	40	30	≤229	正火	860~880	水、油
	≤100			850	600	16	35	60	241~285	回火	620~640	水
	>100~200			720	470	16	35	50	229~269			
45CrV	400~600	纵向	淬火+回火	800	600	12	40	30	241~285	淬火	850~870	油
	>600~900			750	520	10	38	25	229~269	回火	540~590	炉
37SiMn2MoV (35SiMnMoV)	≤100	纵向	淬火+回火	900	750	14	40	50	241~286	淬火	870~890	油
	>100~300			850	700	14	40	50				
	>300~500			800	650	14	40	50	220~269	回火	630~650	空
	>500~700			750	600	14	40	40				
42MnMoV	≤100	纵向	淬火+回火	800	650	12	40	50		淬火	830~850	油
	>100~300			750	600	12	40	50	241~286			水、油
	>300~500			700	550	12	35	40	228~269	回火	580~650	空
	>500~700			650	500	12	35	30				
34CrNiMo	≤100	纵向	淬火+回火	870	750	15	45	70		淬火	850~870	油
	>100~300			780	650	14	40	60	≤321			
	>300~500			700	550	11	35	50		回火	560~640	炉
	>500~800			650	500	14	32	40				
34CrNi3Mo	≤100	纵向	淬火+回火	920	800	14	40	70	表面	淬火	850~870	油
	>100~300			870	750	14	38	60	264~341			
	>300~500			820	700	13	35	50	表面	回火	560~640	炉
	>500~800			750					262~321			
	>800~1000			700					表面	回火	560~640	炉
									241~302			
18CrNiW	25	纵向	一次淬火+ 二次淬火+回火	1150	850	12	50	100		一次 淬火	950	空
										二次 淬火	850	空
										回火	160	空
	≤150	纵向	淬火+回火	1150 1100	850 800	11 12	40 50	90 90	表面	淬火	860~870	空
									332~387	回火	150~170	油
										淬火	860~870	空
										回火	550~570	油

表 7-13 不锈钢和耐酸钢热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 (mm)	试样 方向	力 学 性 能					HBS	热 处 理		
			$\sigma_b$ MPa	$\sigma_s$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_{K1}$ J/cm <sup>2</sup>		类 型	加热温度 ℃	冷 却
1Cr13	≤60	纵向	600	420	20	60	90	187~217	淬火+回火	1000~1050 700~790	油、水 油、水、空
2Cr13	≤100	纵向	560	450	16	55	80	97~248	淬火+回火	1000~1050 680~720	油、空 空
3Cr13	≤100	纵向	850	650	12	45	50	≥241	淬火+回火	1000~1050 600	油 空
		切向	850	650	10	30	40				
2Cr18Ni9	≤60	纵向	650	250	40	50	100	207~341	淬 火	1100~1150	水
	>60~100		600	240	35	45	80				
	>100~200		580	220	30		60				
1Cr18Ni9Ti	≤60	纵向	550	220	40	55	100	≤192	淬 火	1100~1150	水
	>60~100		540	200	38	50	80				
	>100~200		500	200	25	30	60				

### 7.3 大锻件的化学热处理

随着对大型重载齿轮、大型齿轮轴及其他人型耐磨、耐压件使用寿命和承载能力要求的不断提高,化学热处理(主要是渗碳和渗氮)在大锻件生产中的应用日趋广泛,并已取得成效。

#### 7.3.1 大型重载齿轮的深层渗碳

##### 7.3.1.1 主要技术要求

为了防止齿轮表面硬化层被压碎和防止齿面剥落,大型重载齿轮的渗碳层深度应为齿轮模数的0.15~0.25倍,并保证在硬化层过渡区中剪应力与剪切强度之比不大于0.55。为使齿轮具有较高的接触疲劳强度和弯曲疲劳强度,齿轮表层碳的质量分数应控制在0.75%~0.95%之间。经最终热处理后,对齿轮表面硬度要求分为4级:58~62、55~60、54~58和52~56HRC,心部硬度为30~46HRC。渗碳层中的碳化物颗粒应接近球形、直径小于1μm并且比较均匀。渗层与心部间过渡平缓,自 $w(C)$ 为0.4%处至心部组织的深度应占整个渗碳层的30%。经长时间渗碳处理后心部晶粒度不应低于6级。

##### 7.3.1.2 典型工艺

(1) 在大型滴注式气体渗碳炉中渗

碳,典型工艺如图7-34所示。

(2) 在普通台车炉、井式炉、罩式炉中采用涂覆渗碳,典型工艺如图7-35所示。

渗层深度与渗碳扩散时间的关系如式(7-8)所示

$$\delta = K \sqrt{\tau} \quad (7-8)$$

式中  $\delta$  —— 渗碳层深度 (mm);

$\tau$  —— 渗碳扩散时间 (h);

$K$  —— 计算系数,根据生产经验确定。据介绍在925℃渗碳扩散时, $K$ 值可取为0.63;930℃时, $K=0.648$ ;950℃时, $K=0.727$ 。

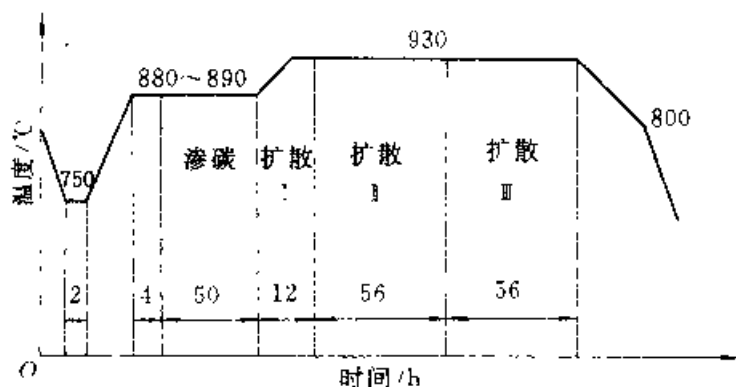


图 7-34 20CrNi2Mo 钢人字齿轮的深层渗碳工艺曲线

(经球化退火、淬火、回火处理后,达到:有效硬化层深6mm,齿面硬度75~77HRC)

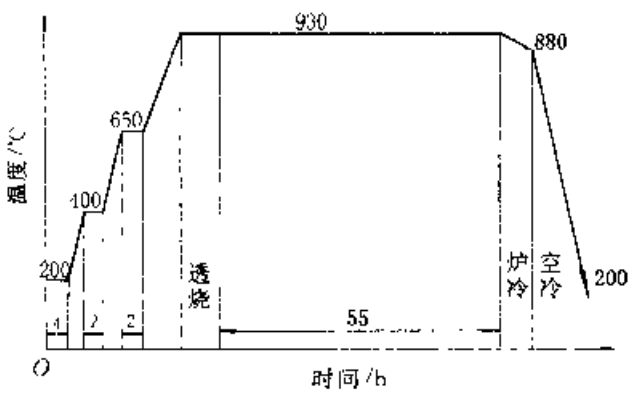


图 7-35 20CrNi2Mo 钢  $\phi 1695\text{mm}$  大齿轮涂覆渗碳工艺曲线  
(经高温回火、淬火、回火处理后, 达到: 有效硬化层深度 4.6mm、齿面硬度 57~60HRC、碳化物 1~2 级)

7.3.2 大锻件的渗氮处理

对于轻载、高速齿轮, 形状尺寸精度要求很高的齿轮和难于加工的磨损件, 渗氮处理是一种比较理想的工艺。典型工艺如图 7-36、图 7-37 所示。

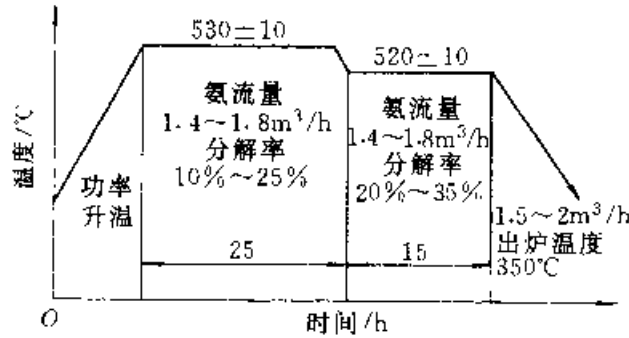


图 7-36 42CrMo 钢大型缸体内孔气体渗氮工艺  
要求: 渗氮层深度 0.4~0.45mm, 表面硬度 530HV10 脆性: 1 级

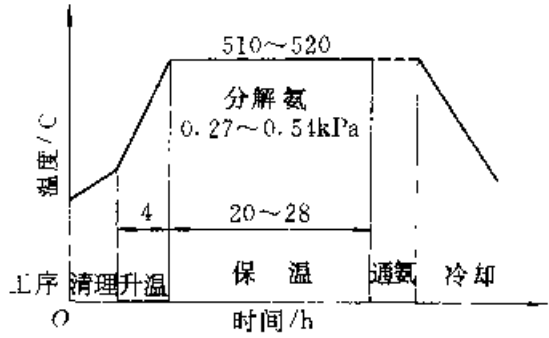


图 7-37 转盘齿轮 (35CrMo) 离子渗氮工艺  
要求: 渗氮层深度 0.4~0.5mm, 表面硬度  $\geq 500\text{HV}$  表面脆性: 1 级 脉状组织 < 1 级

7.4 热轧工作辊的热处理

7.4.1 热轧工作辊的种类、材质及技术要求

热轧工作辊按其在轧钢过程中的作用分为开坯辊、型钢轧辊、板带材热轧工作辊。

开坯辊把钢锭轧成扁坯或方坯, 要承受巨大的冲击力和轧制力作用, 同时还受到热钢锭的高温加热作用, 和强制冷却的作用。因此, 开坯辊首先应具有高的强度和韧性, 保证在工作中不断辊, 其次是良好的抗热裂性。热轧工作辊为使被轧钢材成为半成品或成品板带材, 必须保持良好的表面状态。因此, 热轧工作辊除了要求抗热裂性之外, 还必须具有良好的耐磨性和抗表面粗糙能力。型钢轧辊的工作条件和要求介于开坯辊和热轧工作辊之间。

热轧工作辊常用钢号及其化学成分示于表 7-14, 力学性能示于表 7-15。

表 7-14 常用热轧工作辊钢号及其化学成分

型 号	质量分数(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
60CrMnMo	0.55~0.65	0.25~0.40	0.70~1.00	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	0.80	$\leq 0.25$	0.20
						1.20		0.30
50CrNiMo	0.45~0.55	0.20~0.60	0.50~0.80	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	1.40	1.00	0.20
						1.80	1.50	0.60
50CrMnMo	0.45~0.55	0.20~0.60	1.30~1.70	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	1.40	—	0.20
						1.80		0.60

表 7-15 热轧工作辊用钢的力学性能

钢 号	表面硬度 (HBS)	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$A_k$ /J
60CrMnMo	229~302	932	490	9	25	24.5
50CrNiMo	217~286	755				
50CrMnMo	229~302	783	441	9	25	24.5

## 7.4.2 锻后热处理（正火+回火）

锻后热处理的主要目的是消除锻造应力，细化晶粒，改善被切削加工性。在钢液氢含量较高的

情况下，防止白点形成是最重要的任务之一。为此，要适当延长扩氢时间。锻后热处理工艺规范见图 7-38。

## 7.4.3 调质

热轧工作辊的最终热处理是调质。调质前热处理余量一般为单边 10~15mm，尖角要倒钝，尽可能圆滑过渡。对于槽口较大的热轧工作辊，粗加工时要预开槽。调质的目的是保证轧辊表层具有细珠光体或索氏体组织，规定的硬度和力学性能，以及心部具有足够的韧性。调质的工艺规范见图 7-39。

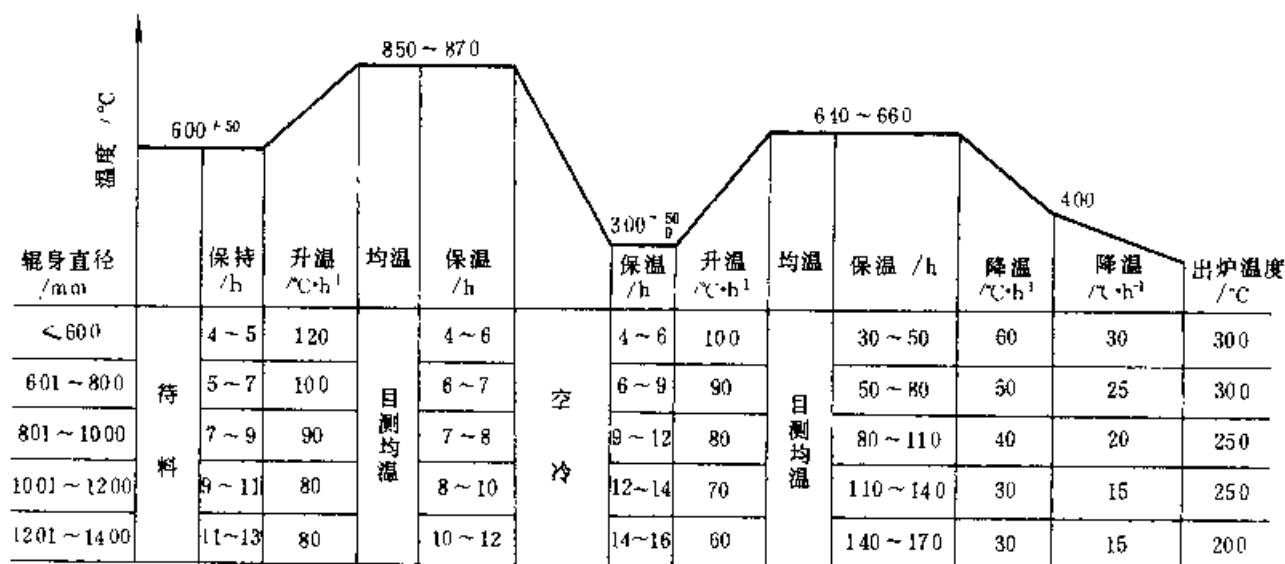


图 7-38 热轧工作辊锻后热处理工艺规范

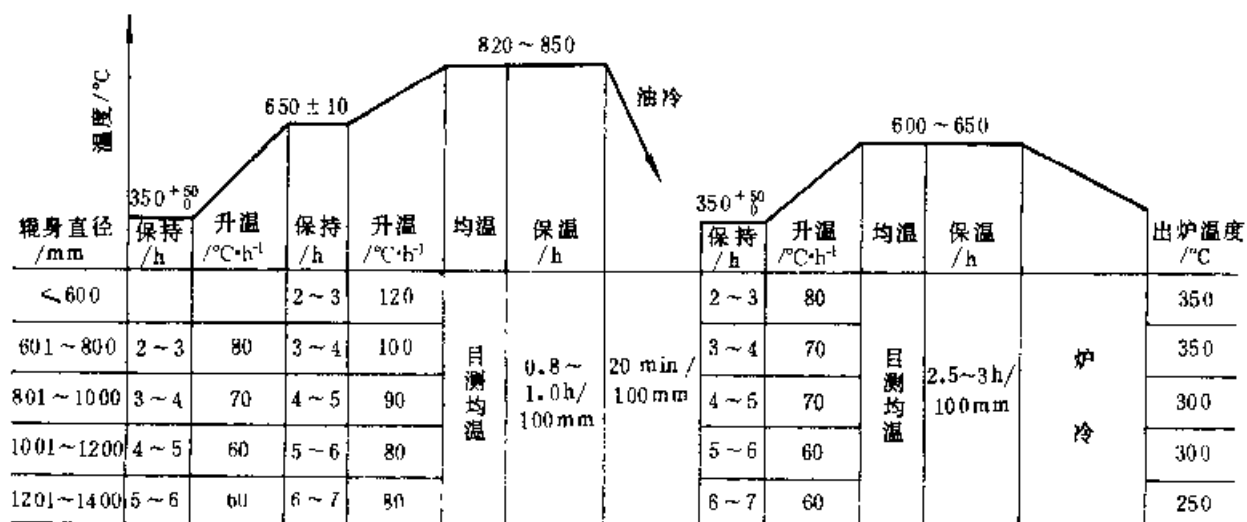


图 7-39 热轧工作辊调质工艺规范



## 7.5 冷轧工作辊的热处理

### 7.5.1 冷轧工作辊的种类和技术要求

冷轧工作辊按所轧制产品可分为：冷轧钢铁用、冷轧有色金属用、冷轧特种合金用；按轧机类型可分为：连轧机、可逆轧机、平整机和多辊轧机用的冷轧工作辊。

大型冷轧工作辊主要尺寸见表 7-16。

表 7-16 典型冷轧工作辊尺寸范围

轧机名称	辊身直径 mm	辊身长度 mm	轧辊总长 mm	单重 t
1200 冷轧机	400	1260	2920	1.575
1700 冷轧机	500	1760	3690	3.226
2300 冷轧机	550	2300	5000	5.321
1700 冷连轧机	660	1700	3745	6.06
双机架平整机	610	1700	3745	5.395
铝板轧机	650	2800	5060	8.85

冷轧工作辊在轧钢时，辊身表面承受巨大的接触应力、交变应力和摩擦力。因此冷轧工作辊应具有很高的强度、硬度和耐磨性、足够的韧性。

冷轧工作辊的技术要求主要有：

1) 表面硬度和有效淬硬深度见表 7-17。

表 7-17 冷轧工作辊表面硬度和有效淬硬深度

级别	辊身表面 硬度(HS)	辊身有效淬硬深度/mm			辊颈表面硬度 (HS)
		直径 $\leq 300$	直径 301~600	直径 601~900	
I	$\geq 95$	6	10	8	35~50
II	90~98	8	12	10	
III	80~90	10	15	12	

2) 辊身表面两端软带允许宽度见表 7-18。

表 7-18 辊身两端软带宽度(mm)

辊身长度	$\leq 600$	601~1000	1001~2000	$\geq 2000$
允许软带宽度 $\leq$	40	50	60	70

3) 辊身表面除两端软带外，硬度不均匀性不大于 $\pm 1.5\text{HS}$ 。

### 7.5.2 冷轧工作辊用钢

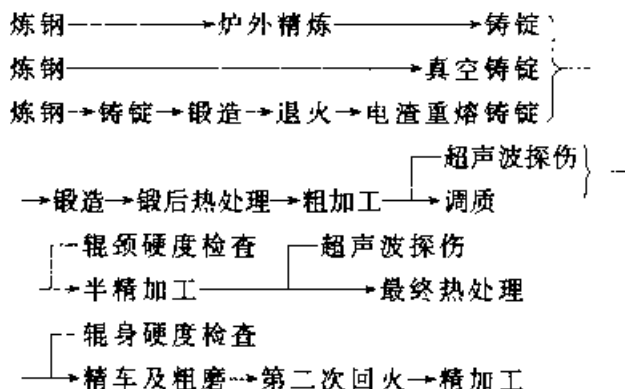
冷轧工作辊常用钢号及其化学成分见表 7-19。前苏联一些厂家已开发和应用含碳量较低的钢，如 75XCMΦ (75CrSiMoV)，60X2CMΦ (60Cr2SiMoV)。日本已开发含 $w(\text{Cr}) 5.0\%$ 的高碳铬钼钢。

表 7-19 冷轧工作辊常用钢号及其化学成分(质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	其他
9Cr2	0.85~0.95	0.25~0.45	0.20~0.35	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.70~2.10		
9Cr2Mo	0.85~0.95	0.25~0.45	0.20~0.35	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.70~2.10	0.20~0.40	
9Cr2W	0.85~0.95	0.25~0.45	0.20~0.35	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.70~2.10		W 0.30~0.60
9Cr2MoV	0.83~0.90	0.20~0.40	0.20~0.40	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.60~1.90	0.20~0.35	V 0.08~0.12
9Cr3Mo	0.85~0.95	0.25~0.45	0.20~0.35	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	2.50~3.50	0.20~0.40	
85CrMoV	0.8~0.9	0.25~0.45	0.2~0.3	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.8~2.4	0.2~0.4	V 0.05~0.10

### 7.5.3 冷轧工作辊制造工艺路线

冷轧工作辊制造工艺路线如下:



### 7.5.4 锻后热处理

冷轧工作辊的锻后热处理目的和热轧辊的相同, 只是冷轧工作辊用钢是白点敏感性较高的钢

种, 因而防止白点形成就成为最重要任务之一。

锻后热处理规范如图 7-40 所示。若要求热处理后得到球状珠光体, 则应将等温温度从 650~660℃ 提高到 700~720℃; 若发现组织中有碳化物网, 则应延长在 790~810℃ 的保温时间或提高温度至 820~840℃; 若轧辊直径在 600mm 以上或锻造情况不良, 则在等温退火之前应增加一次正火处理, 如图 7-41 所示。也有采用两次正火和回火处理的, 在这种情况下, 可以取消调质工序, 但平整机冷轧工作辊除外。

### 7.5.5 调质

冷轧工作辊调质的目的是彻底消除网状碳化物, 细化碳化物, 得到细珠光体或索氏体组织, 提高屈强比, 满足辊颈硬度要求, 为最终热处理作好组织准备。

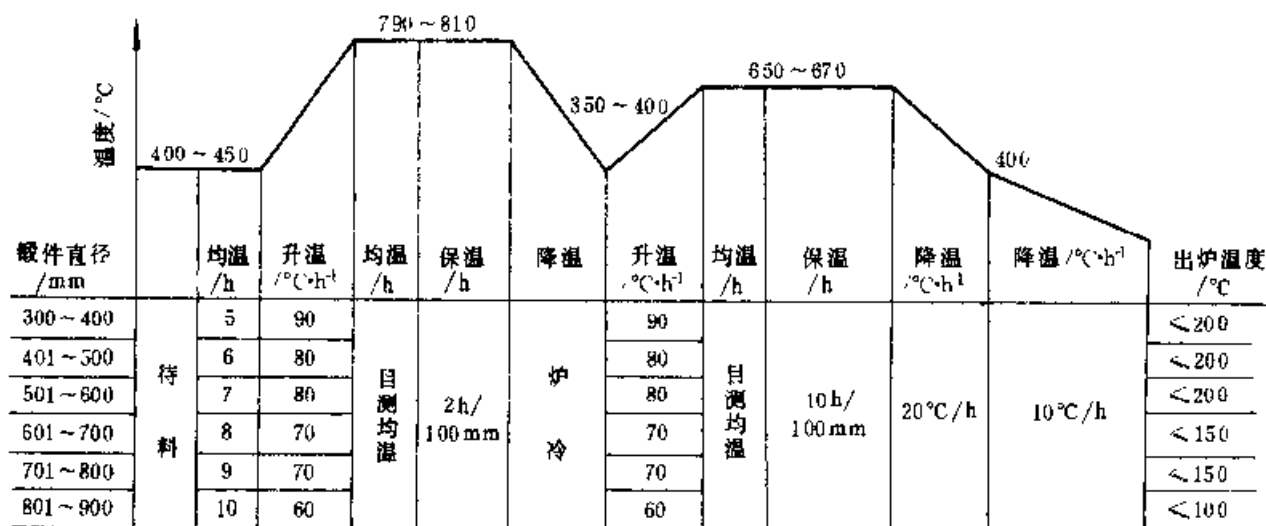


图 7-40 冷轧工作辊锻后热处理工艺规范例一

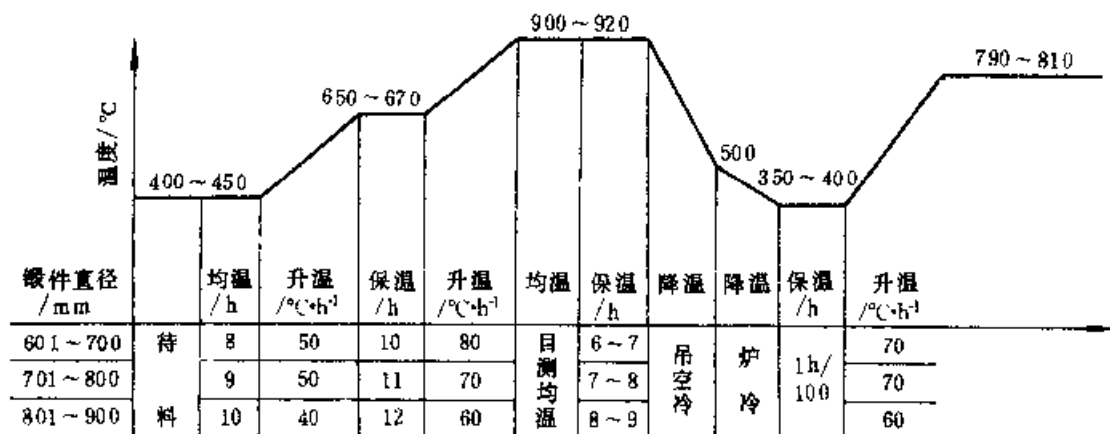


图 7-41 冷轧工作辊锻后热处理工艺规范例二

9Cr2Mo 钢冷轧工作辊的调质规范如图 7-42 所示。9Cr2Mo 钢在 900℃ 保温 3h 后, 只有微量未溶碳化物; 在 930℃ 保温 3h 后, 碳化物全部溶解, 但晶粒急剧长大, 淬冷时易开裂。直径大于 700mm 的 9Cr2Mo 钢冷轧工作辊一般不进行油淬调质热处理, 因为调质效果差, 而且容易开裂。

### 7.5.6 淬火与回火

冷轧工作辊最终热处理要达到辊身所要求的表面硬度及硬度均匀度, 有效淬硬层深度, 平缓的

硬化过渡区, 较好的残留应力状态和组织状态。

淬火方法有整体加热淬火、差温加热淬火和感应淬火三种。

#### 7.5.6.1 整体加热淬火

炉内整体加热淬火是冷轧工作辊淬火最早使用的方法。淬火工艺规范如图 7-43 所示。表 7-20 为淬火时中心孔冷却时间。加热前辊颈要进行绝热。安装中心孔通水冷却用导管, 辊身表面涂防氧化脱碳剂。加热结束后, 先将软管与导管连接好, 清除辊身表面氧化皮, 然后立即投入水槽中的激冷圈内进行淬冷, 如图 7-44 所示。

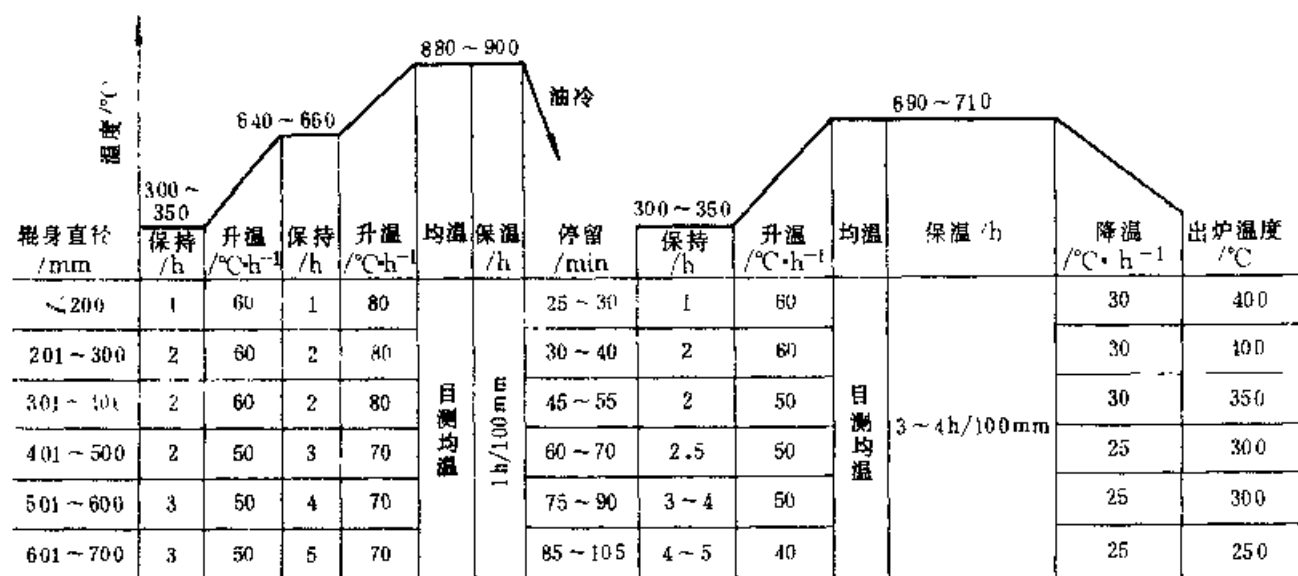


图 7-42 9Cr2Mo 冷轧工作辊调质工艺规范

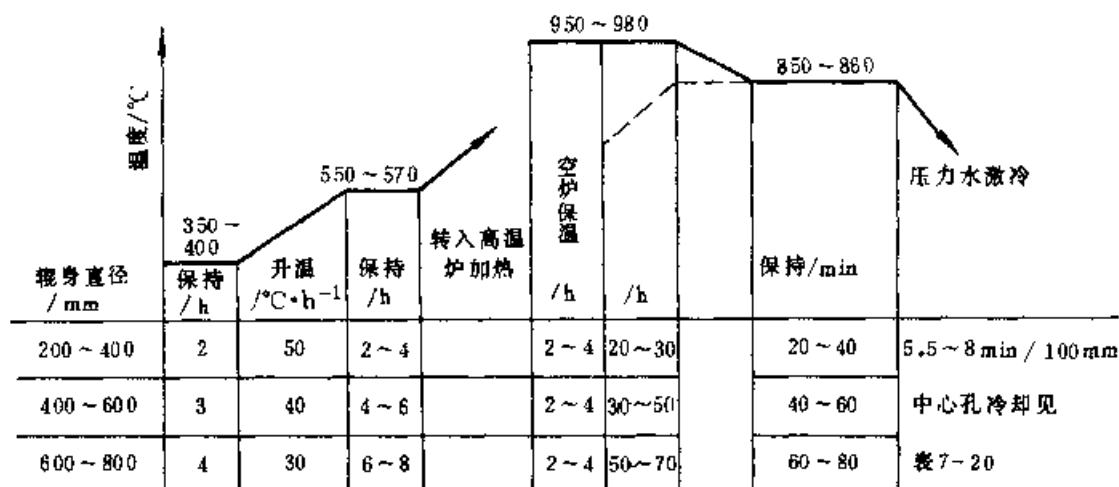


图 7-43 冷轧工作辊整体淬火工艺规范 (虚线为辊身表面温度) 即表面加热到 850~860℃ 以后应立即降低炉温)

表 7-20 冷轧工作辊中心孔冷却时间

辊身直径 /mm	中心孔通水规范 /min	备 注
200	2/3, 3/x	分子为通水时间 分母为停止通水时间 x 为停水后不再通水
250	2/3, 4/x	
300	2/4, 3/3, 3/x	
400	3/6, 4/5, 4/x	
500	3/5, 3/4, 4/3, 3/x	
501~600	3/5, 4/4, 5/3, 5/x	
601~700	3/6, 4/5, 5/3, 6/x	
701~800	3/5, 4/6, 5/5, 5/5, 4/x	

## 7.5.6.2 差温加热淬火

这种方法是将冷轧工作辊辊身置于开合式差温炉内, 辊颈处于炉外, 在加热过程中轧辊以一定速度自转。差温加热淬火工艺如图 7-45 所示。

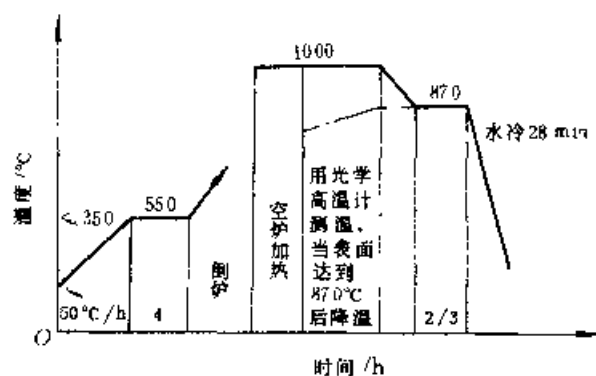


图 7-45 在开合式差温热处理炉内的冷轧工作辊的淬火工艺 (点划线表示轧辊表面温度)

中心孔: 通/停 3/4, 4/5, 4/x

## 7.5.6.3 感应淬火

冷轧工作辊感应淬火方法有: 工频连续感应淬火、中频同时感应淬火、双频连续感应淬火、工频双感应器连续感应淬火、工频无导磁体高感应器连续感应淬火等。

1. 工频连续感应淬火 这种方法的淬火装置如图 7-46 所示。

操作程序如下:

(1) 预热, 冷轧工作辊在感应淬火前要进行预热, 其目的为改善淬火后的残留应力状态, 增加有效淬硬层深度。

预热方法有: 1) 在淬火机床上用连续感应加热法预热。2) 在普通热处理炉内整体加热。3) 先炉内预热, 后感应预热。炉内预热规范见图 7-47。感应预热规范见表 7-21。

(2) 连续感应淬火, 冷轧工作辊的工频连续感应淬火的基本规范如表 7-22 所示。

冷轧工作辊工频连续感应淬火的主要操作过程如表 7-23 所示。

2. 中频同时感应淬火 这种方法是将冷轧工作辊辊身置于高度大于辊身长度的高感应器内进行感应加热, 然后将冷轧工作辊吊入置于水槽中的激冷圈内进行淬冷, 如图 7-48 所示。中频频率的选择, 应根据轧辊直径确定, 表 7-24 可供参考。

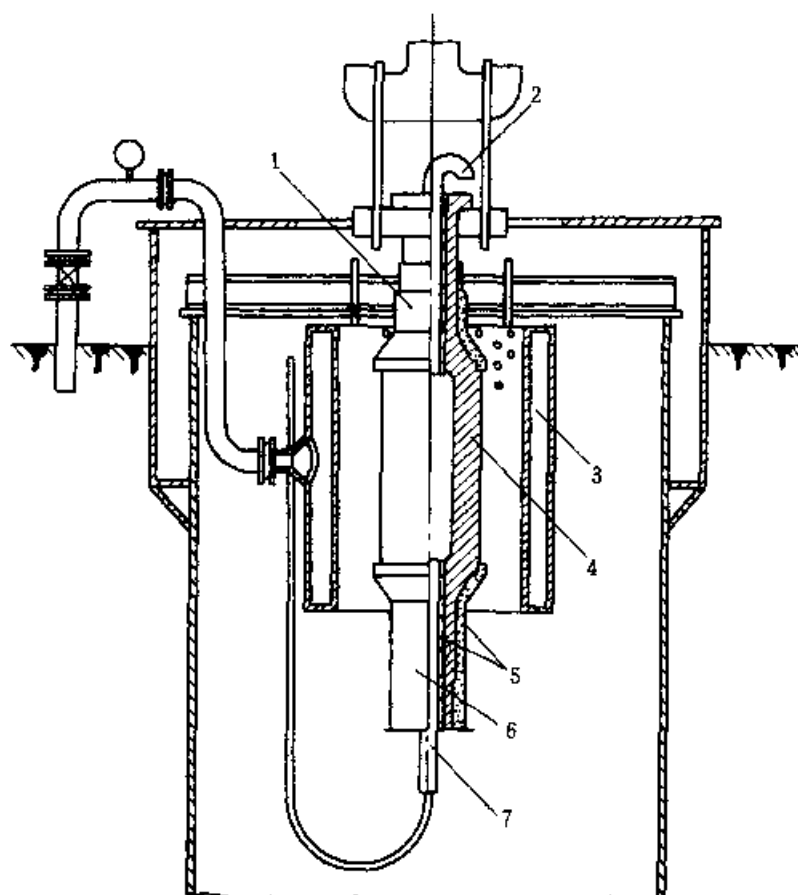


图 7-44 冷轧辊整体淬火示意图

1—上部绝热罩 2—上部内孔导水管 3—淬火激冷圈 4—轧辊  
5—绝热材料 6—下部内孔导水管 7—下部绝热罩

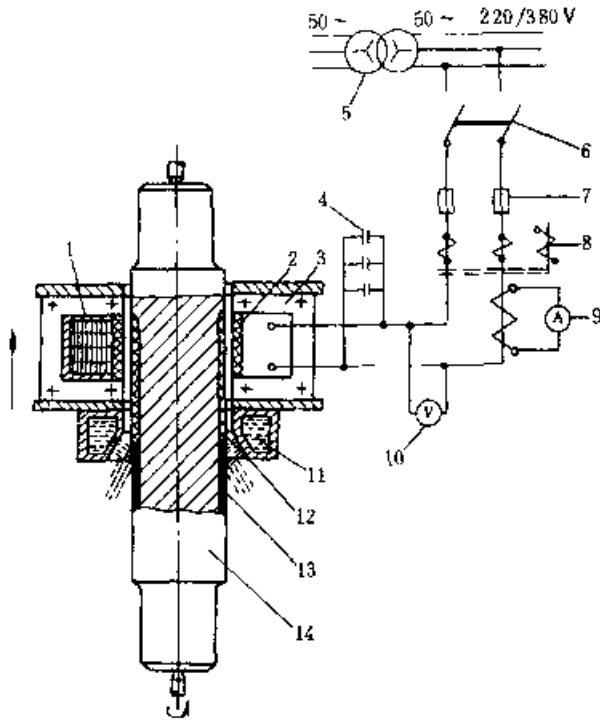


图 7-46 冷轧辊工频淬火装置原理图

- 1—感应器绕组 2—隔热层 3—感应器导磁体  
4—电容器组 5—变压器 6—开关 7—保险丝  
8—接触器 9—电流互感器 10—电压表  
11—喷水器 12—淬火加热层  
13—已淬火层 14—轧辊

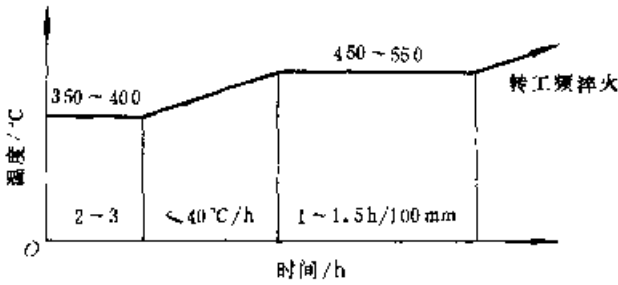


图 7-47 冷轧工作辊预热规范

表 7-21 冷轧工作辊感应预热规范

预热 次数	感 应 器			两次加热	辊身表
	电 压 /V	电 流 /A	上升速度 /mm·s <sup>-1</sup>	间隔时间 /min	面温度 /°C
A. 辊身尺寸:φ510mm×1680mm,无中心孔					
1	370	1800	4.0	3	400
2	370	1800	3.2	3	550
3	375	1800	3.0	3	650
4	375	1850	1.8	3	750

(续)

预热 次数	感 应 器			两次加热 间隔时间 /min	辊身表 面温度 /°C
	电 压 /V	电 流 /A	上升速度 /mm·s <sup>-1</sup>		
B. 辊身尺寸:φ500mm×1200mm,有中心孔					
1	370	1800	2.0	3	500
2	375	1900	1.3	10	800
3	340	1750	1.2	10	820
C. 辊身尺寸:φ400mm×1200mm					
1	400	1800	2.5		715
2	400	1800	2.5		785

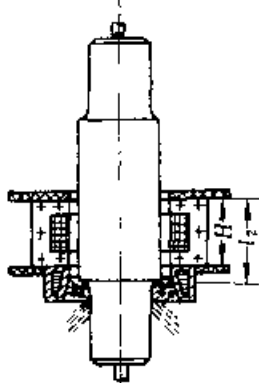
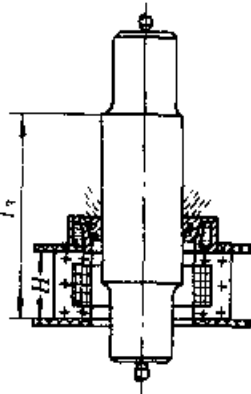
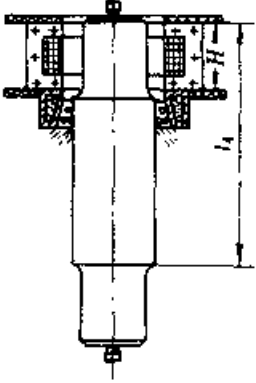
表 7-22 冷轧工作辊工频连续感应加热淬火基本规范

加热温度/°C	900~940
感应器比功率/kW·cm <sup>-2</sup>	0.1~0.2
感应器上升速度/mm·s <sup>-1</sup>	0.8~1.2
淬火用水水温/°C	≤25
淬火用水水压/MPa	0.1~0.3
淬火用水消耗量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	~5(指每100mm辊径)
淬火续冷时间/min	~5(指每100mm辊径)

表 7-23 轧辊工频感应淬火主要操作过程

操作步骤	操作过程	感应器与工件的相对位置
下部预热	1) 调整感应器, 使与轧辊保持一定相对位置 $l_1$ ; $l_1 = \frac{2}{3}H(\text{mm})$ 2) 绕组通水轧辊自转(10~20r/min) 3) 通电加热至规定时间后, 感应器上升, 开始连续加热	

(续)

操作步骤	操作过程	感应器与工件的相对位置
喷水淬火	感应器上升至规定距离 $l_2$ 后, 喷水冷却轧辊。 $l_2 = H + (70 \sim 100)(\text{mm})$	
停止加热	1. 感应器上升至 $l_3$ , 切断电源, 继续喷水 2. 感应器以最大速度上升 $l_3 = \text{辊身长} + l_2 + (20 \sim 50)(\text{mm})$	
感应器停止上升	1. 感应器上升至 $l_4$ , 停止上升, 继续喷水至规定时间; $l_4 = l_3 + (50 \sim 100)(\text{mm})$ 2. 停止喷水, 感应器下降, 卸下轧辊	

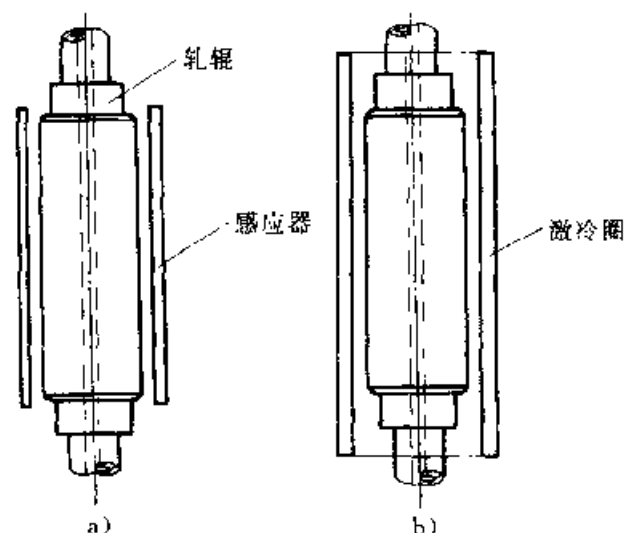


图 7-48 冷轧工作辊同时感应淬火示意图

表 7-24 不同频率适用范围

中频频率/Hz	8000	2500	1200
辊身直径/mm	<200	<350	350~500

感应器比功率的选择, 应根据感应电流的频率确定, 生产中使用的数据如表 7-25 所示。

举例: 辊身尺寸为  $\phi 175\text{mm} \times 375\text{mm}$  的冷轧工作辊采用 8000Hz 中频同时感应淬火工艺如下:

加热温度:  $880 \sim 900^\circ\text{C}$

感应器输出功率:  $38 \sim 45\text{kW}$

加热时间:  $16 \sim 17\text{min}$

淬冷: 空冷  $70 \sim 90\text{s}$ , 喷水冷却  $8\text{min}$ 。

3. 双频连续感应淬火 这种方法是在工频连续感应淬火的感应器和喷水器之间, 增加一个中频感应器。中频电源以 250Hz 为佳, 也有使用 500、1000、1200 和 2500Hz 的。

中频感应器高度一般为  $150 \sim 250\text{mm}$ 、频率较低的取下限, 频率较高的取上限。

中频感应器的功率一般为工频感应器的  $1/2 \sim 1/4$ 。中频感应器和工频感应器之间的间距为  $90 \sim 120\text{mm}$ 。感应器上升速度为  $0.5 \sim 0.6\text{mm/s}$ 。

双频感应淬火前, 冷轧工作辊要在炉中预热, 或用工频感应器进行连续感应加热预热。

4. 工频双感应器连续感应淬火 这种方法是在工频连续感应淬火的感应器和喷水器之间, 增加一个工频感应器, 这两个单相感应器并联接

入电源。

上、下感应器功率之比一般在1.5~2.5范围内。上、下感应器之间的距离为60~80mm,感应器上升速度为0.6~1.0mm/s。

淬火加热前,冷轧工作辊要在炉中预热或感应加热预热。

举例:一根直径为500mm的冷轧工作辊的淬火操作记录见表7-26。上、下感应器的匝数分别为19和33,感应器内径535mm,高度200mm,感应器之间的距离为80mm。

表 7-25 中频同时感应淬火感应器比功率

电流频率/Hz	8000	2500	1000
感应器比功率/ $W \cdot cm^{-2}$	18~22	25~31	15~18

5. 工频无导磁体高感应器连续感应淬火  
这种工频感应器如图7-49所示,没有导磁体,用耐火水泥固定线圈。线圈高度一般为450mm或更高一些。线圈的匝间间距是不相同的。用这种方法加热可以得到较深的有效淬硬层,例如对直径400mm的冷轧工作辊的高感应器连续工频感应淬火的操作记录如表7-27。

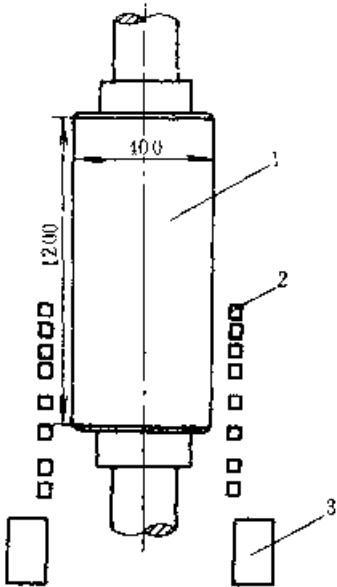


图 7-49 无导磁体高感应器示意图

1—轧辊 2—线圈 3—喷水器

表 7-26 工频双感应器感应淬火操作记录

操 作 项 目	预 热	淬火加热
感应器起始位置/mm	130	130
下部预热时间/s	30	20

(续)

操 作 项 目	预 热	淬火加热
高压电压/V	6500~6600	6400~6500
感应器端电压/V	430	430
感应器电流/A	1750~2000	1750~2050
感应器移动速度/ $mm \cdot min^{-1}$	102	40
冷却水压/MPa		$19.6 \times 10^6$
续冷时间/min		70

表 7-27  $\phi 400$  冷轧辊工频感应淬火记录

项 目	预 热	淬火加热
感应器起始位置/mm	270	270
感应器停电位置/mm	1510	1510
高压电压/V	9250	3800
感应器端电压/V	360	340
感应器电流/A	2700	3600
感应器移动速度/ $mm \cdot min^{-1}$	上 180, 下 300	60
轧辊转速/ $r \cdot min^{-1}$	100	100
喷水淬冷位置/mm		690
续冷位置/mm		1860
续冷时间/min		30

7.5.6.4 冷处理

冷轧工作辊淬火后淬火层中有一部分残留奥氏体,如图7-50所示。残留奥氏体的分布状态和数量与淬火工艺有直接关系,而且在低温回火后不发生变化。冷处理的目的是将残留奥氏体含量降低至一定数值,从而提高冷轧工作辊表面硬度和有效淬硬层深度。

中、小型冷轧工作辊一般用干冰加酒精进行冷处理,大型冷轧工作辊则用液氮或液态空气。当冷轧工作辊温度降至冷处理介质的温度后,即将冷轧工作辊取出空冷。

7.5.6.5 回火

冷轧工作辊淬火后或经冷处理后应及时回火,其目的是减少淬火后的残留应力。

冷轧工作辊回火后残留应力减少的幅度主要取决于回火温度的高低和回火次数,而与回火时间的长短关系不大。但是,回火温度和回火时间对冷轧工作辊表面硬度的影响却很明显。图7-51所

示为 9Cr2 钢淬火后在不同温度 and 不同时间回火后的硬度变化曲线。

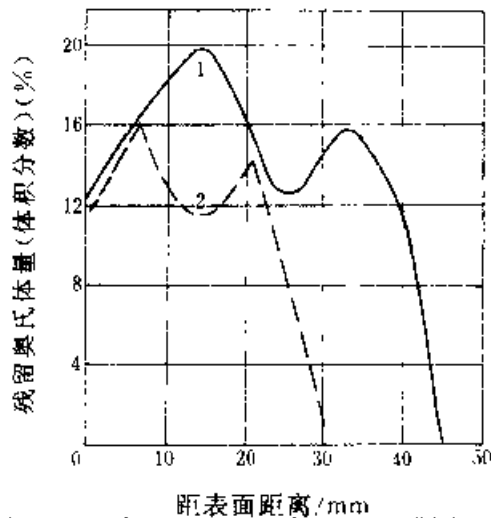


图 7-50 直径 500mm 的 9Cr2MoV 钢冷轧辊淬火层中残留奥氏体的分布  
1— 在 650°C 的炉中预热 2— 四次感应预热

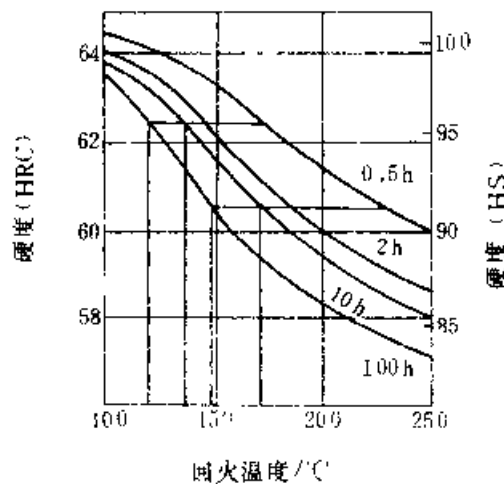


图 7-51 9Cr2 钢的硬度与回火温度和回火时间的关系

冷轧工作辊在 200°C 以下回火时，主要是马氏体比容减小，残留奥氏体量变化不大。在 200°C 以上回火时，残留奥氏体量才明显减少。

冷轧工作辊的回火，一般在油槽中进行。工频连续感应淬火的冷轧工作辊的回火规范见图 7-52。

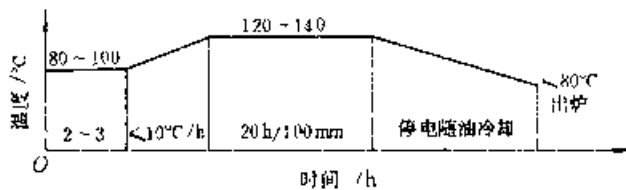


图 7-52 冷轧工作辊回火规范

#### 7.5.6.6 第二次回火

对于要求辊身硬度大于 95HS 的冷轧工作辊在精车和粗磨后应进行第二次回火。其目的是进一步降低淬火残留应力和磨削应力，其回火温度比第一次回火低 10°C。回火保温时间为第一次回火的一半。

#### 7.5.6.7 冷轧工作辊热处理质量检查

冷轧工作辊锻后热处理后一般只进行超声波探伤检查，有时也用于锤式布氏硬度计抽检硬度。调质后沿两条对称母线检查两端辊颈硬度，每条母线不少于两个测定点。最终热处理后首先进行目测外观检查，然后进行辊身硬度检查。当辊身直径  $\leq 300\text{mm}$  时，检查两条母线，当直径  $> 300\text{mm}$  时检查四条母线，每条母线上相邻两点的间距应大致相等，当辊身长度  $\geq 1200\text{mm}$  时，不应超过 200mm， $< 1200\text{mm}$  时，不应超过 150mm，且每条母线上测定点数不少于 4 点，采用肖氏硬度计进行测量。至于有效淬硬层深度，由于至今国内尚缺可用的仪器，可不进行检测，由工艺保证或在轧辊使用过程中进行考核。最终热处理后可能出现的质量缺陷和防止措施见表 7-28。

表 7-28 最终热处理缺陷和防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
硬度低	1) 淬火温度低 2) 淬冷水压低、水量不够	1) 通过调整电压或机械参数提高淬火温度 2) 增大水压或水量
硬度不均匀	1) 喷水器反水 2) 感应器、喷水器不正	1) 降低水压，改变喷水角度 2) 调整好感应器、喷水器
辊身下端软带过宽	1) 感应器起步位置太高 2) 供水过迟	1) 降低起步位置 2) 提前喷水
辊身上端软带过宽	1) 感应器停电过早 2) 感应器停止位置过低	1) 提高感应器停电位置 2) 提高感应器停止位置
辊身上端边缘脱落(掉边)	1) 感应器停电过晚 2) 感应器停止位置过高	1) 降低感应器停电位置 2) 降低感应器停止位置 3) 加保护环(外径与辊身直径相同)



## 7.5.6.8 与热处理质量有关的失效和损坏形式

冷轧工作辊在使用中损坏和失效的主要形式有:

- 1) 辊身表面产生粘辊、辊印、压痕(坑)。
- 2) 辊身表面剥落、掉块、鱼鳞、裂纹。
- 3) 折断、压碎。
- 4) 使用到规定尺寸。

这些损坏和失效的原因很多,如钢的质量差、热处理质量不佳、使用不合理或出现轧制事故、修磨不彻底或不及时、设计结构强度不够等,但与热处理质量有关的失效和损坏的形式有如下一些:

1) 从辊身或辊身与辊颈之间的过渡区折断,可能由于热处理残留应力过大所致。

2) 裂纹源不在辊身表面的疲劳剥落,可能是淬硬区过渡层残留应力过大,淬硬层薄。

3) 辊身中间表面掉块、压碎,可能是有效硬化层太薄,而且淬火过渡区很陡。

4) 辊印、压痕(坑),可能是淬硬层硬度不足。

5) 辊身表面出现裂纹,可能是马氏体针太粗,表面压应力过大,残留奥氏体量过高。

## 7.6 支承辊的热处理

## 7.6.1 支承辊的种类和技术要求

支承辊按所属轧机可分为冷轧支承辊和热轧支承辊。热轧支承辊又可分为板、带材轧机支承辊、中厚板轧机支承辊和特厚板轧机支承辊。按其制造方法,又有整锻和镶套之别。支承辊的特点之一是尺寸大、重量大,如表7-29所示。支承辊直接与热轧或冷轧工作辊相接触,与冷轧工作辊受力情况相似。其技术要求为:表面硬度见表7-30,辊身有效淬硬层深度见表7-31,辊身两端允许软带宽度见表7-32,辊身表面硬度不均匀性不大于 $\pm 2\text{HS}$ ,辊颈表面硬度不均匀度不大于 $\pm 5\text{HS}$ 。

表 7-29 典型支承辊尺寸范围

轧机名称	辊身直径 mm	辊身长度 /mm	轧辊全长 /mm	单重 /t
1700 热连轧机粗轧	1550	1670	4942	36.3
1700 热连轧机精轧	1570	1700	4800	36.6
铝板轧机	1400	2800	5850	47.4
中厚板轧机	1500	2450	5380	42.8
4200 特厚板轧机	1810	4250	8640	104.1
3300 特厚板轧机	2000	3300	7460	107.7
八辊可逆轧机	1250	1400	5200	24.8
1700 冷轧机	1300	1700	4500	24.1
1700 冷连轧机	1525	1700	4495	33.5

表 7-30 支承辊表面硬度(HS)

项 目	辊 身			辊 颈
	一 级	二 级	三 级	
热 轧	60~70	50~60	40~50	35~50
冷 轧	65~75	60~70	55~65	

表 7-31 辊身有效淬硬层深度/mm

辊身表面硬度(HS)	50~60	55~65	60~70	65~75
有效淬硬层深度	$\geq 55$	$\geq 50$	$\geq 45$	$\geq 40$

表 7-32 辊身两端允许软带宽度/mm

辊身长度/mm	<1500	1500~2000	>2000
允许软带宽度	$\leq 10$	$\leq 80$	$\leq 100$

## 7.6.2 支承辊用钢

支承辊常用钢号及其化学成分见表7-33。有时也使用3CrV、60CrMnMo等钢。

表 7-33 常用支承辊的化学成分(质量分数)

(%)

钢 号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	用 途
9Cr2Mo	0.85~0.95	0.25~0.45	0.20~0.40	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	1.70~2.10		0.20~0.40	整锻辊
70Cr3Mo	0.67~0.75	0.40~0.70	0.50~0.80	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	2.00~3.00	$\leq 0.60$	0.25~0.60	镶套辊、辊套
12CrMo	0.38~0.45	0.20~0.40	0.50~0.80	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	0.90~1.20		0.15~0.25	镶套辊
35CrMo	0.32~0.40	0.20~0.40	0.40~0.70	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	0.80~1.10		0.15~0.25	芯轴

### 7.6.3 锻后热处理

支承辊用钢是白点敏感性较高的钢种,而且支承辊截面很大,在钢锭氢含量较高时,防止白点形成就成为锻后热处理的首要任务。另外,还要细化奥氏体晶粒,消除网状碳化物和使珠光体球化。

9Cr2Mo 钢整锻支承辊和辊套锻后热处理规范参照图 7-40 和图 7-41 进行;42CrMo 和 35CrMo 钢心轴按合金结构钢大锻件热处理规范进行,70Cr3Mo 钢整锻支承辊锻后热处理规范见图 7-53。

### 7.6.4 预备热处理

整锻支承辊粗加工后进行预备热处理,为最终热处理作好组织准备,满足辊颈硬度要求,细化晶粒。其热处理工艺规范如图 7-54 所示。

### 7.6.5 最终热处理

最终热处理要达到辊身所要求的表面硬度、硬度均匀性和有效淬硬层深度。

#### 7.6.5.1 整锻支承辊的最终热处理

整锻支承辊的最终热处理常用以下三种方法。

1. 正火、回火 对于辊身表面硬度要求为 40~50HS 的支承辊,一般用 9Cr2Mo 钢制造,最终热处理为正火加回火。其热处理工艺规范可采用图 7-54 所示,但回火温度应降至 600~650℃。

2. 工频连续感应淬火和回火 对于辊身要求硬度大于 50HS 的 9Cr2Mo 钢支承辊,一般采用工频连续感应淬火和回火。

(1) 预热,先按图 7-47 在炉中预热,然后再进行一到两次感应预热。

(2) 感应淬火,采用比功率为 0.07~0.10kW/cm<sup>2</sup> 的三相感应器,感应器上升速度为 0.6~1.0mm/s,淬火续冷时间为 35~45min。

(3) 回火,工艺规范见图 7-55。回火后表面硬度与回火温度的关系见图 7-56。

3. 差温淬火和回火 采用差温淬火的支承辊在淬火前要留有较大的热处理裕量,一般单边为 3~5mm。

在进行差温加热之前,支承辊要在差温炉或者普通热处理炉中进行中温预热,以便减少快速

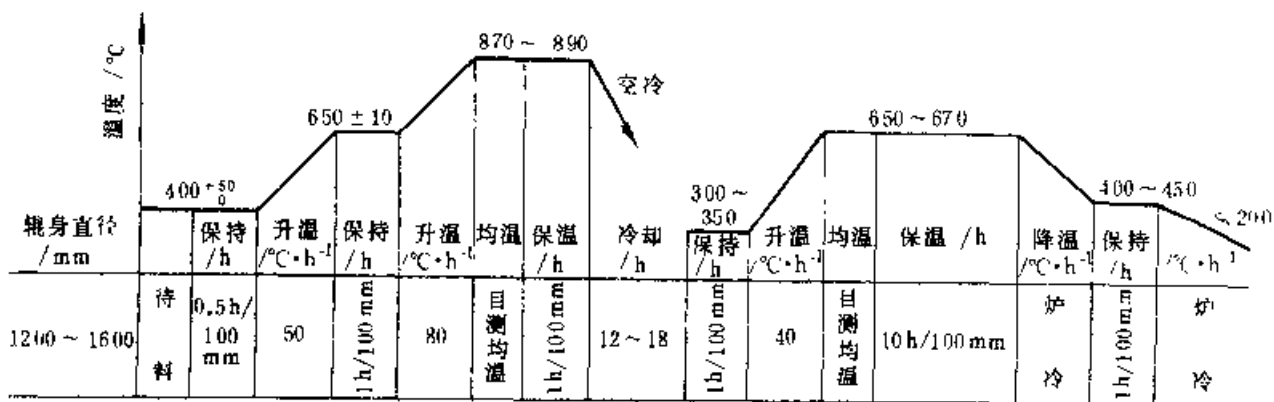


图 7-53 70Cr3Mo 钢支承辊锻后热处理规范

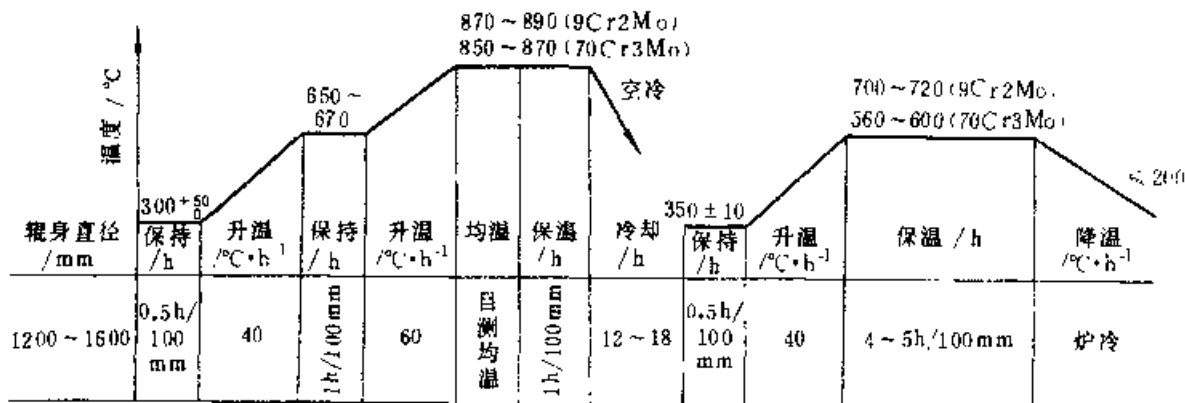


图 7-54 支承辊预备热处理工艺规范

加热过程中的热应力, 淬火后得到较好的残留应力状态。预热温度一般为  $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。在差温炉中预热取上限, 在普通热处理炉中预热取下限。预热时间以支承辊辊身表里温度大体一致为准。

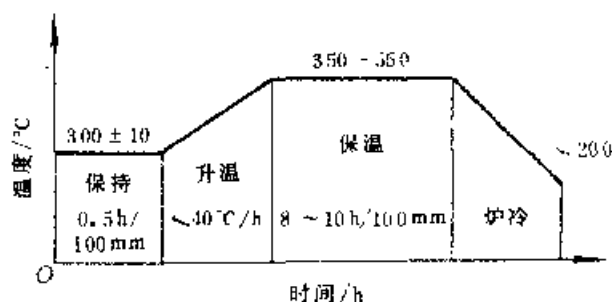
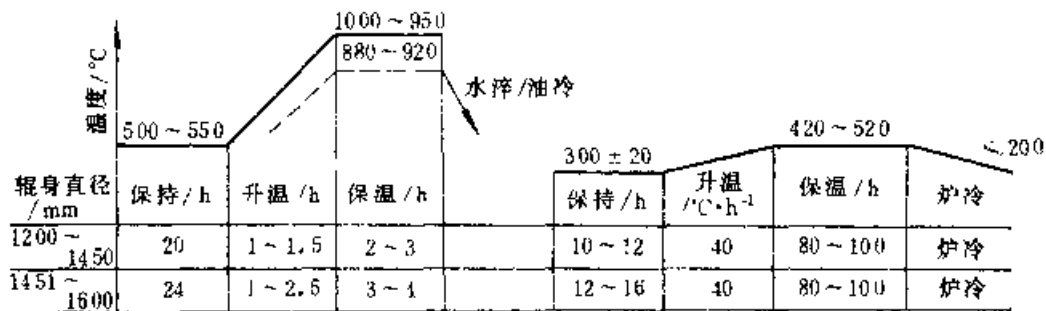


图 7-55 回火工艺规范

在快速升温过程中, 炉温为  $950\sim 1000^{\circ}\text{C}$ , 辊身表面升温速度为  $150\sim 250^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。当辊身表面达到  $880^{\circ}\text{C}$  时开始计算保温时间。在保温过程中, 辊身表面温度要控制在  $880\sim 930^{\circ}\text{C}$  范围内, 并以此调节炉温。在保温过程中, 每保温一个小时, 有效加热层大约增加  $25\sim 30\text{mm}$ 。

从快速升温开始到高温保温结束, 辊身心部或中心孔表面温度大约要升高  $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。为了确保差温加热结束时, 中心孔表面温度不超过  $700^{\circ}\text{C}$ , 要适当降低预热温度或提高升温速度。否则从快速加热开始到保温结束要进行中心冷却。



注: 虚线上的数字为辊身表面温度, 以此控制炉温

图 7-57 支承辊差温热处理工艺规范

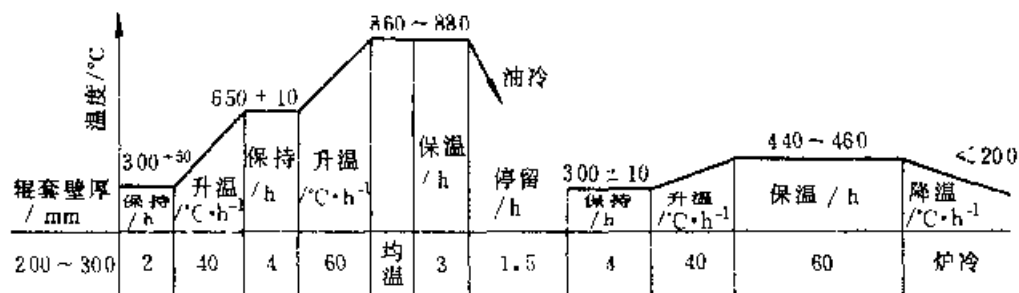


图 7-58 辊套最终热处理工艺

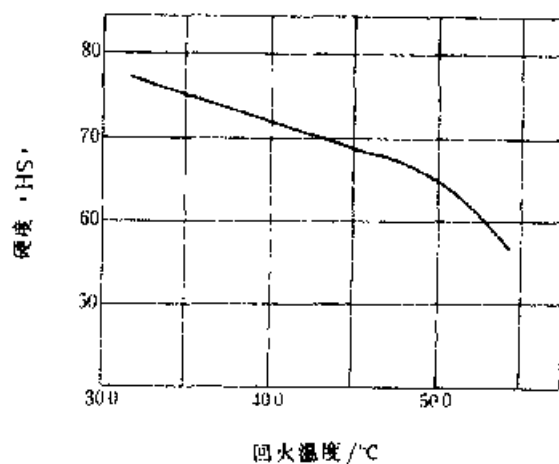


图 7-56 支承辊回火后表面硬度与回火温度的关系

为了避免过大的热处理应力, 又能得到要求的有效淬硬层深度, 差温加热支承辊淬火采用水淬油冷方式。

淬火结束后, 允许进行粗略的硬度检查, 并应尽快入炉回火。70Cr3Mo 钢支承辊差温热处理工艺规范见图 7-57。

#### 7.6.5.2 镶套辊辊套的最终热处理

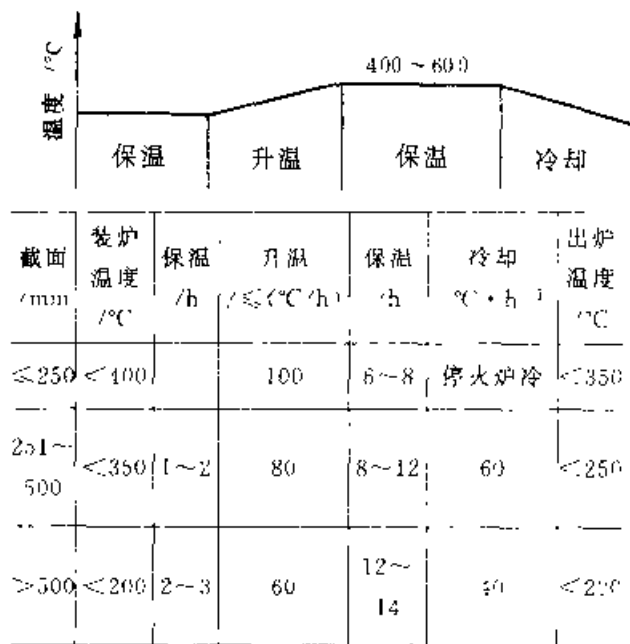
9Cr2Mo 钢制镶套支承辊辊套最终热处理工艺见图 7-58。

## 7.7 大锻件的其他热处理工艺

### 7.7.1 锻件切削加工后的去应力退火

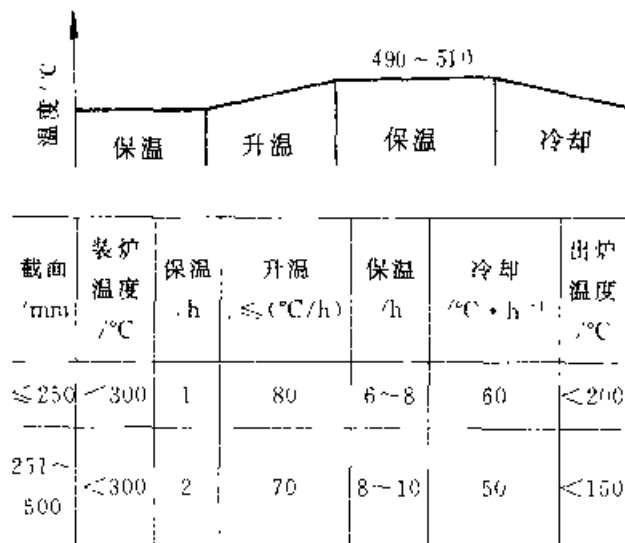
一般锻件的去应力退火工艺列于表 7-34。

表 7-34 一般锻件粗加工后去应力退火工艺



细长比大于 10 的轴及板类锻件的去应力退火工艺如表 7-35 所列。

表 7-35 细长比大于 10 的轴及板类零件  
(锻件)去应力退火工艺



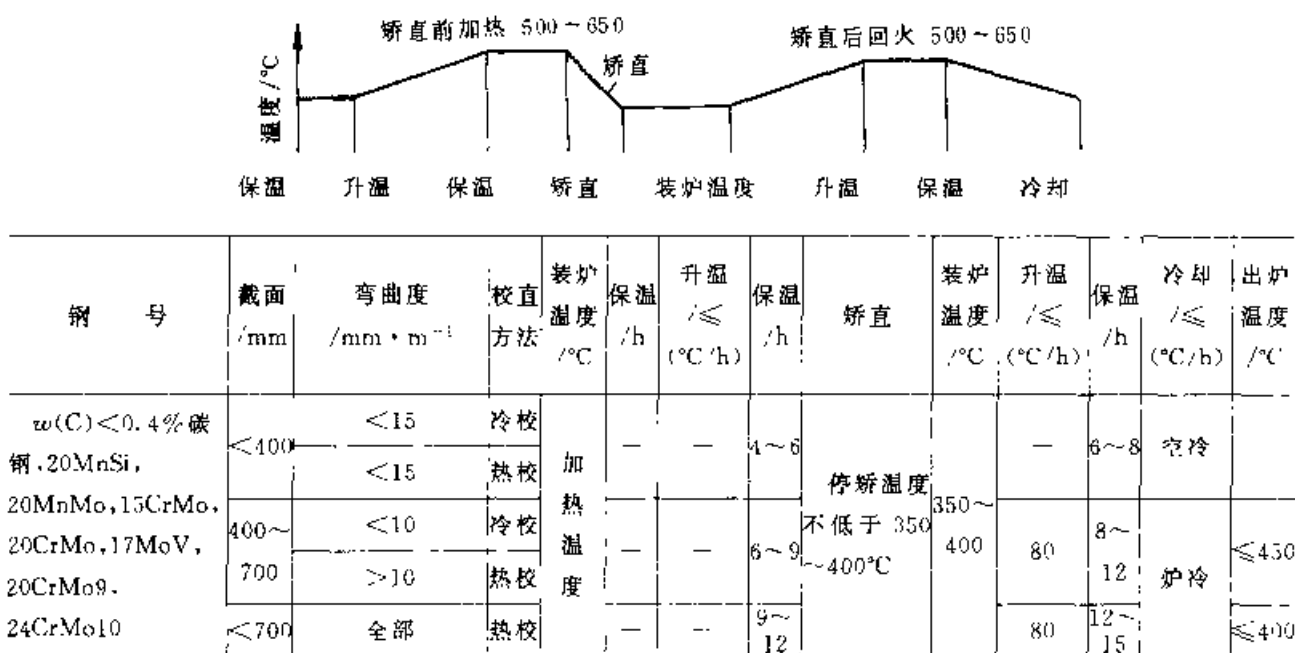
(1) 对有硬度及力学性能要求的零件，消除应力温度应比最后热处理回火温度低 20~30℃。

(2) 对有回火脆性的钢，消除应力温度宜采用 100~150℃，但保温时间应适当加长。

### 7.7.2 锻件矫直加热与回火工艺

锻件热处理后的矫直加热与回火工艺示于表 7-36。

表 7-36 锻件热处理后加热矫直及回火工艺



(续)

钢 号	截面 mm	弯曲度 mm·m	校正 方法	装炉 温度 ℃	保温 h	升温 ≤ (°C/h)	保温 h	矫直	装炉 温度 ℃	升温 ≤ (°C/h)	保温 h	冷却 ≤ (°C/h)	出炉 温度 ℃
35CrMo, 35Si- Mn, 34CrMo1A, 15MnCr 以及 II、 III 组合金结构钢	<400	<10, <60 全长	冷校	加热 温度 —	—	—	4~6	停矫温度 不低于 350 ~400℃	350~ 400	80	6~8	炉冷	≤100
		>10, <60 全长	热校										
	400~700	<6, <30 全长	冷校				6~			60	8~		≤350
	700	>6, >30 全长	热校				10				12	50	≤300
55Cr, 60Mn, 60SiMn, 60CrNi 及 I、II 模具钢	<400	<3	冷校	400~	2~3	50	4~7		350~	50	6~8	50	≤350
		>3	热校	450					400				
	>400	全部	热校	400~ 450	2~3	10	7~ 14			40	8~ 15	40	≤250

注: 1. 经第二次热处理的锻件均采用热矫(碳钢及低合金钢截面<150mm者可冷矫)。

2. 阶梯轴类锻件截面过渡区大于80mm者一律热矫。

3. 矫直前加热温度及矫后去应力退火温度, 均应低于上件回火温度。

表 7-37 电渣焊接件热处理工艺

35, 850 ~ 870  
20MnMo, 870 ~ 890

600 ~ 650

500 ~ 610

温度/°C

升温 保温 升温 均温 保温 冷却 装炉温度 升温 均温 保温 冷却

焊缝厚度 /mm	装炉温度 /°C	升温 ≤ (°C/h)	保温 /h	升温 ≤ (°C/h)	均温 /h	保温 /h	冷 却	装炉温度 /°C	升温 ≤ (°C/h)	均温 /h	保温 /h	冷 却 ≤ (°C/h)	出炉温度 /°C
≤100	450	70	2	120	目 测	2	空冷至 300 ~350°C入 炉回火	300~350	80	目 测	4	炉冷	400
101~160	400	60	2	100		3		300~350	80		6	炉冷	400
161~220	350	60	3	100		4		300~350	70		8	60	350
221~300	350	50	3	80		5		300~350	70		10	50	350

注: 本规范适用于 35、20MnMo 钢制电渣焊接件。

表 7-38 焊接件去应力退火工艺

保温 升温 保温 冷却					
装炉温度 ℃	保温 h	升温 ≤ (°C/h)	保温 h	冷却 ≤ (°C/h)	出炉温度 ℃
≤300 <sup>①</sup>	2	60	6~8	40	<250
≤350 <sup>②</sup>	—	80	3~4	停火炉冷	<350

① 适用于形状复杂、容易产生变形的焊接件。

② 适用于形状简单、不容易产生变形的焊接件。

### 7.7.3 电渣焊焊接件的热处理工艺

筒体或其他零件电渣焊接后需进行热处理, 以改善焊缝及热影响区的显微组织, 消除焊接应力, 获得良好的力学性能。35 钢、20MnMo 钢电渣焊焊接件热处理工艺可参见表 7-37。去应力退火工艺参阅表 7-38。

## 7.8 大型铸件的热处理

大型铸钢件的强度水平与锻钢件相近, 但塑性、韧性较差, 内部组织不均匀、不致密, 内部化

学成分偏差较大,导热性较差而且形状复杂。因此,在热处理中要特别注意减少内部应力,防止开裂的问题,但不必考虑氢的危害。在制订热处理工艺时,可参考相同钢号的TTT曲线、CCT曲线和淬透性曲线。但必须注意到化学成分不均匀、晶粒粗大及其他铸造缺陷的影响。

### 7.8.1 大型铸钢件热处理的种类与目的

1. 扩散退火(高温均匀化退火) 其目的在于消除或减轻铸钢件中的成分偏析,改善某些可溶性夹杂物(如硫化物等)的形态,使铸件的化学成分、内部组织与力学性能趋于均匀和稳定。

2. 正火、回火 通过重结晶细化内部组织,提高强度和韧性,使铸件得到良好的综合力学性能,并使工件的切削加工性得到改善。

3. 退火 稳定铸件的尺寸、组织与性能,使铸件的塑性、韧性得到明显提高。退火过程操作简便,热处理应力很小,但工件的强度、硬度稍低一些。

4. 调质 由于淬火(油冷或喷雾)时热处理应力很大,要慎重采用。只用于对铸件性能要求很高的情况,而且只能在铸件经过充分退火之后进行。通过调质可使铸件的综合力学性能得到较大幅度的提高。

5. 消除应力退火 其目的在于消除铸件中的内应力,主要用于修补件、补焊件、焊接件及粗加工应力的消除,以防止缺陷并使工件尺寸稳定。消除应力退火的温度必须低于工件回火温度 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ ;保温时间一般为 $\delta\cdot 25$ 小时以上( $\delta$ 为工件最大壁厚,mm),随后在炉内缓冷。

### 7.8.2 典型工艺

1. 轧钢机机架 典型热处理工艺如图7-59所示。

2. 汽轮机缸体 典型热处理工艺如图7-60所示。

3. 水轮机叶片 典型热处理工艺如图7-61所示。

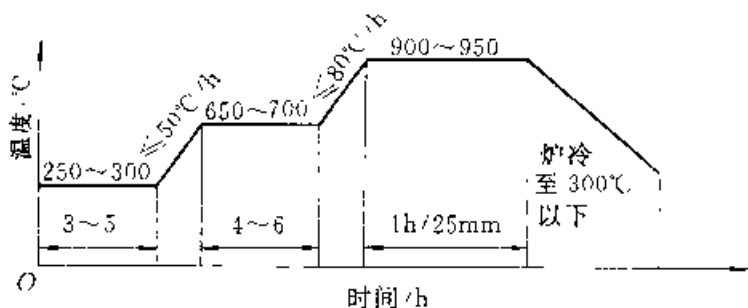


图 7-59 ZG230-450 轧钢机机架的高温退火

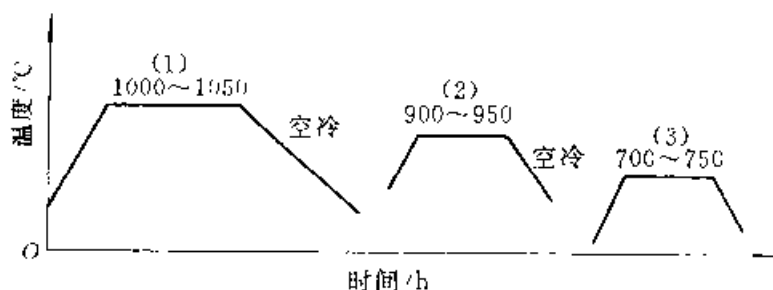


图 7-60 ZG20CrMoV 汽轮机缸体的热处理

(1) 均匀化热处理

(2)、(3) 正火、回火

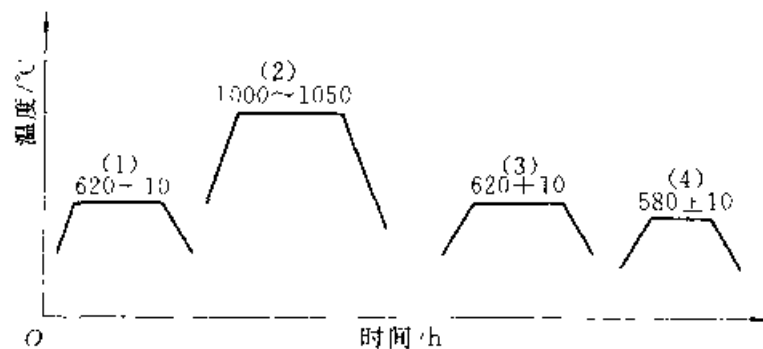


图 7-61 ZG0Cr13Ni6Mo 水轮机叶片的热处理

(1) 软化退火 (2) 高温正火

(3) 一次回火 (最大限度地得到稳定的诱导奥氏体)

(4) 二次回火 (为了得到回火马氏体和诱导奥氏体)

### 参 考 文 献

- [1] Складен П. В. Водород и Флокены в крупных Поковки-  
ах. Москва: Машина 1963
- [2] 康大韬, 叶国斌. 大型锻件材料及热处理. 北京: 科  
学出版社, 1998
- [3] Складен П. В., 《МКТМ》1983, 4стр:58~63
- [4] ГайН. Ю., Технология нагрева Стали, Москва: Мет-  
аллургиядаг 1962, 131~181
- [5] 东北重型机械学院, 第一重机厂等. 大锻件热处理.  
北京: 机械工业出版社, 1974
- [6] 康大韬等. 金属热处理学报 1983 (2): 61~77
- [7] 仲复欣. 大型重载齿轮的深层渗碳. 金属热处理  
1985 (3): 28~33
- [8] 石康才等. 金属热处理 1987 (4): 26~28

## 第 8 章 工具的热处理

成都工具研究所 李惠友

### 8.1 工具的工作条件及失效特征

#### 8.1.1 工具的工作条件

本章所叙述的工具包括机床上使用的各种切削工具和各种手用的五金工具，主要用于加工钢铁、有色金属及木材等材料。

工具的工作条件比较复杂，各种工具的工作条件又有较大差异。手用工具属于低速切削，加工时往往以摩擦为主，常有较大冲击。机用工具通常切削速度较高，会产生大量切削热，有时会发生切削刃软化现象。

作为机床上使用的金属切削工具，其主要工作部分是刀刃或刀尖。刀具在进行切削时，刀尖与工件之间，刀尖与切除的切屑之间要产生强烈的摩擦，刀尖要承受挤压应力，弯曲应力，还要承受不同程度的冲击力。同时伴随摩擦会产生高温。

金属切削工具首先应具备高的硬度和耐磨性，在一定条件下，工具的硬度越高，其耐磨性也越高。同时切削工具还必须具备足够的韧性，否则可能因为脆性过大，在外力作用下产生崩刃、折断、破碎等现象。红硬性也是切削工具的重要性能，特别是高速切削的工具和切削难加工材料的工具，红硬性尤为重要。

由于切削方式、切削速度等方面的差异，各种切削工具对耐磨性、韧性、红硬性的要求也有所侧重。如表 8-1 所示，对铣刀、铰刀、齿轮滚刀及剃齿刀，第一位的性能要求是耐磨性，对钻头、丝锥、插齿刀和拉刀，第一位的性能要求是韧性。

有些切削工具对材料的工艺性能有些特殊要求，如作为热成形钻头的材料必须具备高的热塑性，作为齿轮滚刀及剃齿刀等需磨削的刀具的材料必须具备良好的可磨削性。

表 8-1 各种切削工具性能要求举例

刀具 种类	切 削 方 式					性能要求顺序			
	连 续	断 续	高 速	低 速	重切 削	轻切 削	耐磨 性	韧性	高温 硬度
钻头	0			0	0		2	1	2
铰刀	0			0		0	1	3	3
丝锥	0			0		0	2	1	3
铣刀、 滚刀	0		0		0		1	2	2
插齿刀		0	0		0		2	1	3
拉刀		0		0		0	2	1	3
剃齿刀	0		0			0	1	1	3

#### 8.1.2 工具的失效特征

由于工具种类不同及使用条件的差异，其失效形式也有所不同。切削工具失效主要是由于磨损、崩刃、断裂、破碎或加工的工件达不到技术要求等原因造成的。

1. 磨损 磨损是切削工具在正常使用情况下最常见的失效形式。当切削工具发生严重磨损时，工具与被加工工件之间摩擦力增大，表现为切削时发出尖叫声或产生严重的振动，甚至无法切削。磨损的产生大都是由于工具的切削刃与被切削工件或切屑之间的摩擦所产生的磨粒磨损造成的。有时也可能是由于在工具表面形成积屑瘤，形成粘合磨损所造成的。

造成切削工具耐磨性不高的主要原因是工具的硬度不足或红硬性（高温下抗软化能力）不足。热处理时造成工具表面脱碳、元素贫化，致使表面性能变坏，也可能降低耐磨性。为提高工具的耐磨性，减少磨损，首先应选用高耐磨性、高红硬性材料；热处理时在不使切削刃脆化的前提下尽量提高工具的硬度。工具进行表面处理，提高工具的表



面硬度,减少切削刀与工件之间的摩擦系数,减少积屑瘤的形成,也可以有效地减少工具切削刃的磨损量。

2. 崩刃 崩刃也是切削工具常见的失效形式,其中包括微小崩刃、大块崩刃、掉牙、掉齿等现象。很多崩刃现象的产生,是由于切削时切削刃长期承受周期性循环应力所造成的一种疲劳破坏现象。崩刃现象的产生与工具切削时承受的冲击载荷较大或工具材料的脆性较大及韧性较低有关。因此在提高工具耐磨性的同时,如何使工具保持足够的韧性,对避免崩刃是极为重要的。

对间断切削的工具或切削时承受较大冲击载荷的工具如何提高韧性,减少崩刃非常重要。这类工具要求材料组织均匀,不应有严重的碳化物偏析,热处理硬度不宜过高,不能产生淬火过热及回火不足等增加工具脆性的现象。

3. 断裂、破碎 切削工具由于受到较大的冲击力或因工具自身的脆性较大有时会产生整体断裂、破碎现象。如钻头的扭断、折断,拉刀的拉断,锯条的折断,锯片铣刀的破碎等都属于这一类。工具断裂、破碎现象的产生与工具本身的韧性不足有关,但不是所有的断裂、破碎现象都是因为工具脆性较大而引起的。如拉刀的断裂有时是由于强度不够或因内裂纹的存在而引起的。据统计仪表小钻头大都以折断形式失效,但进一步分析表明,钻头折断不完全是因为钻头本身脆性大造成的,很多情况下是因为钻头不耐磨,磨损以后继续加力钻削,切削阻力增大,致使钻头折断。

4. 被加工工件达不到技术要求 在切削过程中,由于工具产生了严重的磨损或工具的切削刃上有明显的崩刃现象,这时工具虽然可以继续加工,但由于被加工工件的尺寸精度或表面粗糙度达不到技术要求,因而工具不能再继续使用。

## 8.2 工具用钢

### 8.2.1 工具用钢的选择

工具用钢主要有普通工具钢和高速钢两大类。

普通工具钢中不含合金元素的钢种有T7、T8、T10、T12等碳素工具钢。这类钢热处理可以得到较高的硬度,有较高的耐磨性和良好的可加

工性能,且价格低廉。但这类钢红硬性差,淬透性低,淬火畸变和开裂倾向性大,因此这类钢适用于制造要求硬度高、形状简单的工具。其中T7钢有较高的强度和韧性,适用于制造承受冲击载荷的工具;T8、T10、T12钢耐磨性高,韧性较低,适用于制造要求耐磨性较高而承受冲击载荷较小的工具。

普通工具钢中含合金元素的钢种有9SiCr, CrWMn, Cr12MoV等。这类钢含有一定数量的合金元素,因而具有较高的力学性能,较高的淬透性和稍高的耐回火性能,以及有较小的淬火畸变和较小的淬火开裂倾向。这类钢适用于制造形状比较复杂的手工工具和红硬性要求不高的切削工具。其中Cr12型高碳高铬钢具有很高的淬透性、耐磨性,较高的耐回火性,以及很小的淬火畸变,适用于制造截面较大、形状复杂、耐磨性要求较高的工具。

高速钢含有大量合金元素,具有更高的耐磨性、红硬性,更高的强度和更大的淬透性,主要用于制造生产效率高、耐磨性好及在较高切削温度下仍能保持其切削性能的工具。

从性能和成分上来划分,高速钢主要包括通用高速钢,高碳高速钢,高碳、高钒高速钢和含钴高性能高速钢。通用高速钢用于制造各类普通工具。高碳高速钢耐磨性和切削性能高于普通高速钢。高碳高钒高速钢耐磨性极好,但可磨削性差,只能用于制造形状简单或热处理后不再作磨削加工的工具。含钴高速钢具有很高的红硬性和耐磨性,主要用于制造加工各种热强合金等难加工材料的工具。

含合金元素较少的低合金高速钢价格稍低,在某些使用条件下可以作为高速钢的代用品,制造一些不太重要的切削工具。常见的国产低合金高速钢有W2Mo5Cr4V、W3Mo2Cr4VSi, W4Mo3Cr4VSiN等牌号。

用粉末冶金法制造的粉末高速钢克服了冶炼法制造高速钢的碳化物偏析的缺陷,提高了钢的韧性,可磨削性。提高了钢中的碳、钒等合金元素的含量以后,钢的耐磨性和切削性能也大幅度提高。粉末高速钢在国外已大量应用,齿轮刀具等重要切削工具大都可采用粉末高速钢制造(参考本章8.3.2.8粉末高速钢的热处理)。

各种高速钢由于所含合金元素的种类和数量

不同,其耐磨性、韧性、红硬性、可磨削性、可切削性及冷热塑性等工艺性能会有很大差别。表8-2列举了几种典型高速钢实用性能的相对指数其中耐磨性以W12Cr4V5Co5(T15)为最好,相对耐磨性指数为92,W18Cr4V(T1)耐磨性最差,相对耐磨性指数只有40。韧性以W2Mo9Cr4V2(M7)为最好,相对韧性指数为75,W12Cr4V5Co5(T15)韧性最差,相对韧性指数只有27。可磨削性以W18Cr4V(T1)为最好,相对可磨削性指数为80,W12Cr4V5Co5(T15),W6Mo3Cr4V4(M1)两种钢的可磨削性指数只有20。

在选择切削工具的材料时,首先应根据工具的类型、切削方式、被加工材料的可加工性,以及切削规范等因素确定耐磨性、韧性和红硬性中哪

种性能对这种工具最重要(参考表8-1),再根据表8-2或其他类似资料确定哪种材料可以满足这些性能要求。此外材料的工艺性能和价格也应作为考虑的因素。

表8-3列举了各种工具常用的材料。表中有些工具同时选择了多种材料,列在前面的材料为首推材料或使用比率较高的材料。列在后面的材料可作为代用品或在某些特殊情况下应该选用的材料,例如高速钢用于制造手工工具,是由于耐磨性等方面的特殊要求。表中所列材料仅为一般情况下的正常选择。如果工具有特殊的使用条件或要求特殊的性能,应根据具体情况选择更适用的工具材料。

表8-2 高速钢实用性能举例

钢 种	W6Mo5-Cr4V2	W6Mo5-Cr4V4	W2Mo9-Cr4V2	Mo8Cr,V2	W5Mo5-Cr4V2Co8	W18Cr4V	W12Cr4V5Co5	W2Mo8-Cr4V2Co8
相当美国牌号	M2	M4	M7	M10	M36	T1	T15	M42
相对耐磨性	52	80	58	54	52	40	92	90
相对红硬性	40	68	11	45	75	40	80	92
相对韧性	72	48	75	72	40	60	27	40
相对可磨削性	60	20	52	50	60	80	20	10

表8-3 制造各类工具常用的钢种

工具种类	工 具 名 称	常 用 材 料
钳工五金工具	锻工锤、锻工钳子	T7
	钳子、扳子、锤子、克丝钳、平口钳	T7、T8
	手用锯条、锉刀、金属带锯	T10、T12、GCr6、W6Mo5Cr4V2
	剪刀刀片	T12、Cr12MoV、Cr6WV
	剃刀、刮刀、雕刻刀	T13、CrW5
	机用锯条	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V
木工工具	木工圆锯、手锯、凿	T8、T10、8MnSi、W
	木工铣刀、钻头、刨刀、切刀	T8、T10、W、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V
金属切削工具	丝锥、圆板牙	9SiCr、Cr06、GCr15、T10、T12、W6Mo5Cr4V2
	滚丝轮、搓丝板	Cr12MoV、9SiCr、W6Mo5Cr4V2
	铣刀、钻头、铰刀	W6Mo5Cr4V2、W2Mo9Cr4V2、W18Cr4V、CrWMn9SiCr
	齿轮刀具	W6Mo5Cr4V2、W6Mo5Cr4V2Co5、W2Mo9Cr4V2Co8、Asp23、Asp30、Asp60
	拉刀	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、CrWMn
	车刀	W6Mo5Cr4V2、W12Cr4V5Co5、W6Mo5Cr4V3、W6Mo5Cr42Al、CrW5

\* W9Mo3Cr4V 钢可作为 W6Mo5Cr4V2 钢的代用品。

## 8.2.2 工具用钢的质量要求

### 8.2.2.1 普通工具钢的质量要求

供制造切削工具用的普通工具钢应具有良好的退火组织,网状碳化物不能太严重,具体的技术要求如表 8-4。

表 8-4 碳素工具钢、合金工具钢的主要技术条件

钢 号	珠光体组织	网状碳化物
T7, T8, T8Mn, T9	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 1~5 级	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 $\leq 2$ 级
T10, T11, T12, T13	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 2~4 级	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 $\leq 2$ 级 $\phi > 60 \sim 100\text{mm}$ 者 $\leq 3$ 级
9SiCr, Cr06, CrWMn, CrMn	$\leq 5$ 级	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 $\leq 3$ 级
供作丝锥用 9SiCr	2~4.5 级	$\phi \leq 60\text{mm}$ 者 $\leq 2$ 级

碳素工具钢与合金工具钢的退火珠光体组织和网状碳化物分别按 GB1298 和 GB1299 的第一级别图和第二级别图评定(合格级别如表 8-4)。Cr12 型高铬钢的共晶碳化物组织按 GB1299 第三级别图评定,其合格级别为:产品直径  $\leq 50\text{mm}$ ,  $\leq 3$  级;直径  $50 \sim 70\text{mm}$ ,  $\leq 4$  级;直径  $70 \sim 120\text{mm}$ ,  $\leq 5$  级;直径  $> 120\text{mm}$ ,  $\leq 6$  级。

球化组织良好的钢淬火过热敏感性小,可切削性能好,工艺性能好,严重的网状碳化物使钢的塑性降低,淬火开裂倾向增大,增加刀尖的脆性,降低刀具的使用寿命。

### 8.2.2.2 高速钢的质量要求

1. 碳化物不均匀度 高速钢碳化物不均匀度按 GB9313 第一、第二级别图评定,应符合表 8-

5 之规定。碳化物不均匀度过高,钢的强度和红硬性下降,脆性增大,工具容易产生崩刃,断齿等现象,显著降低工具的使用寿命,同时碳化物不均匀度的增加会造成淬火时钢的晶粒不均匀长大,增加钢的淬火过热敏感性,增加工具的淬火开裂倾向。

高速钢中的碳化物尺寸不应过大,否则也会降低工具的使用寿命,甚至造成工具切削时,产生崩刃现象。高速钢中大块碳化物的尺寸应符合 GB1162 之规定。

表 8-5 高速钢碳化物不均匀度级别

刀具种类	钢材尺寸/mm	碳化物级别	备 注
齿轮刀具 螺纹刀具 拉刀	$\phi \leq 40$	$\leq 3$	钻头、铣刀、车刀等 通用刀具的 碳化物级别 可以放宽 1 级。
	$\phi > 40 \sim 60$	$\leq 4$	
	$\phi > 60 \sim 80$	$\leq 5$	
	$\phi > 80 \sim 100$	$\leq 6$	
	$\phi > 100 \sim 120$	$\leq 7$	

高速钢材料经用户反复锻拔锻打后,碳化物会发生弯曲折叠现象,此时碳化物级别应按 JB1290(高速钢锻打技术条件)评定。

2. 宏观组织 高速钢宏观组织按 GB1979 I 组之规定,中心疏松、一般疏松、偏析均不得大于 1 级。

## 8.3 工具钢的热处理工艺

### 8.3.1 普通工具钢的热处理工艺

#### 8.3.1.1 退火

为了改善普通工具钢的可加工性和热处理工艺性能,通常要进行退火处理,其退火规范如表 8-6 所示。

表 8-6 普通工具钢退火规范

钢 号	加 热 规 范		冷 却 规 范			硬度 (HBS)
	温 度 /°C	保温时间 /h	缓 冷	等 温		
				温度/°C	保温时间/h	
T7	740~750	1~2	以<30°C/h 炉冷 到 500~600°C 出炉	650~680	6~4 等温后炉冷 到 500~600°C 出炉	≤187
T8	740~750			650~680		≤187
T9	740~750			650~680		≤192

(续)

钢 号	加 热 规 范		冷 却 规 范			硬 度 (HBS)
	温 度 /°C	保温时间 /h	缓 冷	等 温		
				温度/°C	保温时间/h	
T10	750~760	4~2	以<30°C/h 炉冷 到 500~600°C 出炉	680~700	6~4 等温后炉冷 到 500~600°C 出炉	≤197
T11	750~760			680~700		≤207
T12	760~770			680~700		≤207
T13	760~770			680~700		≤217
9SiCr	790~810			700~720		179~241
CrWMn	770~790			680~700		207~255
CrMn	780~800			700~720		197~241
Cr2	770~790			680~700		179~229
9Mn2V	750~770			670~690		≤229
GCr6	780~800			700~720		179~207
GCr15	780~800			700~720		179~207
CrW5	800~820			680~700		229~285
Cr6WV	830~850			720~740		≤235
Cr12	850~870			730~750		217~269
Cr12MoV	850~870			730~750		207~255

对不易球化的钢可以采用循环退火的方法,即第一次等温后重新加热到退火温度,而后再冷却到等温温度保温,这样反复多次,以增进球化效果。

### 8.3.1.2 正火

正火的目的是细化过热钢的晶粒或消除过共析钢的网状碳化物。普通工具钢的正火规范如表8-7。细化晶粒可采用中下限加热温度,消除网状碳化物应采用上限加热温度,促使碳化物完全溶入奥氏体。普通工具钢正火后通常为片状珠光体组织,一般还要进行球化退火,使珠光体球化。

表 8-7 普通工具钢正火规范

钢 号	加热温度 /°C	保温时间系 数(s/mm)	冷却方式	硬 度 (HBS)
T7	800~820	盐浴炉 20~25 空气炉 50~80	视工件 尺寸大小 可采取空 冷、空气 吹冷,硝 盐(400°C 左右)冷 却、油冷	241~302
T8	760~780			241~302
T9	780~800			241~302
T10	830~850			255~329
T11	840~860			255~329

(续)

钢 号	加热温度 /°C	保温时间系 数(s/mm)	冷却方式	硬 度 (HBS)
T12	850~870	盐浴炉 20~25 空气炉 50~80	视工件 尺寸大小 可采取空 冷、空气 吹冷,硝 盐(400°C 左右)冷 却、油冷	269~341
T13	860~880			269~341
Cr2	930~950			302~388
9SiCr	900~920			321~415
CrMn	900~920			321~415
CrWMn	970~990			388~514
GCr6	900~950			270~390
GCr15	900~950			270~390

### 8.3.1.3 调质

为了使工件加工后得到较好的表面粗糙度,细化淬火前钢的组织,减少最终热处理畸变,并得到高而均匀的淬火硬度,可以采用调质作为预备热处理工序。常用普通工具钢的调质规范如表8-8。

表 8-8 普通工具钢的调质规范

钢 号	淬 火		回 火		硬度 HBS
	温度/°C	冷却	温度/°C	时间/h	
T8	770~780	水	640~680	2~3	183~207
T10	780~810	水	640~680	2~3	183~207
T12	800~830	水	640~680	2~3	183~207
9SiCr	860~890	油	700~720	2~3	197~241
CrMn	850~880	油	700~720	2~3	197~241
CrWMn	830~860	油	700~720	2~3	207~245
GCr15	840~870	油	700~720	2~3	197~241
GCr6	810~840	油	700~720	2~3	197~241

## 8.3.1.4 去应力退火

去应力退火用于消除由于冷塑性变形产生的加工硬化或消除切削加工产生的内应力。去应力退火常用温度为 600~700°C, 保温时间为 0.5~3h, 采用空冷或炉冷。Cr12MoV 钢消除应力的退

火温度可采用 760~790°C。为消除磨削加工, 特别是精磨加工产生的内应力, 去应力加热温度可以采用 500°C, 甚至可以降低到 200°C。

## 8.3.1.5 淬火

1. 加热 普通工具钢制工具多在盐浴炉中进行淬火加热。盐浴的成分及脱氧剂等详见第一卷第二章。盐浴炉必须在脱氧状态良好的条件下才能进行工具的淬火加热。通常盐浴中的氧化物含量应控制在 0.3% 以下, 以避免工具加热时产生氧化脱碳。

在可控气氛或真空中加热也可避免工具的氧化脱碳。工具表面涂硼砂等保护涂料可减少在空气中加热时氧化脱碳的产生。

工具在淬火加热之前应进行预热, 特别是形状复杂或大尺寸工具预热工序必不可少。预热温度应在 500~650°C。Cr12MoV 类高碳高铬钢工具应增加一次 800~850°C 的预热。通常预热保温时间与淬火加热保温时间相同。

普通工具钢的淬火规范如表 8-9。

表 8-9 普通工具钢的淬火回火规范

钢 号	淬 火			回 火	
	加热温度/°C	冷却介质	硬度(HRC)	加热温度/°C	硬度 $\psi$ (HRC)
T7	780~800	盐或碱的水溶液	62~64	140~160	62~64
	800~820	油或熔盐	59~61	160~180	58~61
				180~200	56~60
T8	760~770	盐或碱的水溶液	63~65	140~160	60~62
	780~790	油或熔盐	60~62	160~180	58~61
				180~200	56~60
T10	770~790	盐或碱的水溶液	63~65	140~160	62~64
	790~810	油或熔盐	61~62	160~180	60~62
				180~200	59~61
T12	770~790	盐或碱的水溶液	63~65	140~160	62~64
	790~810	油或熔盐	61~62	160~180	61~63
				180~200	60~62
T13	770~790	盐或碱的水溶液	63~65	140~160	62~64
	790~810	油或熔盐	62~64	160~180	61~63
				180~200	60~62
Cr2	830~850	油	62~65	130~150	62~65
	840~860	硝盐	61~63	150~170	60~62

(续)

钢 号	淬 火			回 火	
	加热温度/°C	冷却介质	硬度(HRC)	加热温度/°C	硬度 <sup>①</sup> (HRC)
9SiCr	850~870	油, 硝酸盐	62~65	140~160	62~65
				160~180	61~63
CrMn	840~860	水, 油	63~66	130~140	62~65
				160~180	60~62
CrWMn	820~840	油	62~65	140~160	62~65
	830~850	硝酸盐	62~64	170~200	60~62
SiMn	780~800	水	62~65	150~160	62~64
	800~840	油, 硝酸盐			
9Mn2V	780~800	油, 硝酸盐	≥62	150~200	60~62
CrW5	820~860	水, 油	64~66	150~170	61~65
				200~250	60~64
Cr6WV	950~970	油	62~64	150~170	62~63
	990~1010	硝酸盐	62~64	190~210	58~60
				第一次 500 第二次 190~210	57~58
Cr12MoV	1000~1040	油, 硝酸盐	62~63	150~170	61~63
	1115~1130	油, 硝酸盐	45~50	200~275	57~59
				510~520 多次	60~61
GCr6	800~825	油, 硝酸盐	62~65	160~180	≥61
	790~810	水	63~65		
GCr15	830~850	油	62~65	160~180	≥61
	840~860	硝酸盐	61~63		

① 碳素工具钢为在盐或碱水溶液中淬冷并经相应温度回火的硬度。

(1) 淬火加热温度, 淬火加热温度根据表 8-9 进行选择, 应根据加热介质、工具的形状、材料的原始组织等因素作相应的调整。

在空气炉中加热时, 淬火加热温度应比盐浴炉提高 10~20°C。工具形状复杂、截面尺寸变化大时, 为减少淬火畸变和开裂, 可采用下限淬火加热温度。具有片状珠光体或细粒状珠光体组织钢的过热倾向大, 宜采用下限淬火加热温度。贝氏体等温淬火或马氏体分级淬火的工具可采用上限淬火加热温度。

对尺寸较大 (≥φ25mm) 需要水淬的碳钢工具, 为避免因淬硬层浅, 硬度梯度陡而产生弧状裂纹, 应适当提高淬火加热温度。例如 T12 钢大规格手用丝锥, 淬火温度可以提高到 800~820°C。

淬火加热时应注意保持钢的晶粒不宜过分粗大, 否则增加淬火开裂的危险。如图 8-1 所示, 随着晶粒尺寸的增大, 工件淬火开裂比例上升。普通工具钢淬火晶粒大小常以马氏体针的长度来衡量, 通常马氏体针应小于 3 级。

(2) 淬火加热时间, 工具淬火加热时间的长短与工具的尺寸大小, 钢材的种类等因素有关, 通常以工具的有效厚度乘以加热系数来确定。工具的有效厚度计算方法和普通工具钢的加热系数如表 8-10 所示。

按表 8-10 选择加热系数时, 较小尺寸的工具宜选择上限加热系数。选择上限淬火温度时应选择下限淬火加热系数。某些五金工具常采用快速加热或高频感应加热, 淬火加热温度远远高于正

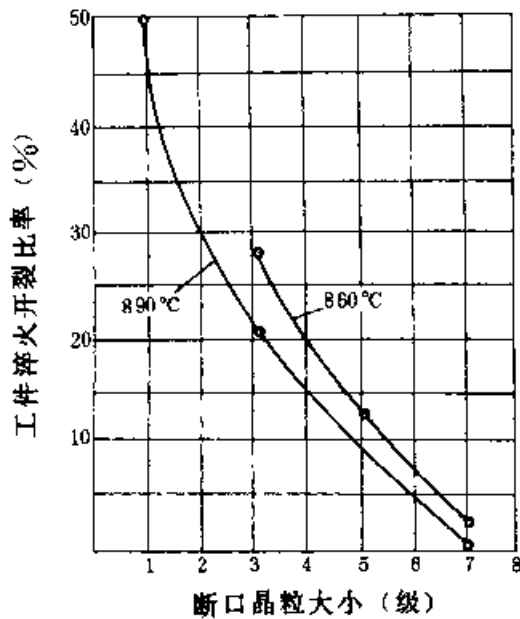


图 8-1 两种奥氏体化温度下，碳素钢工

具断口晶粒大小对淬火开裂倾向的影响

常淬火加热温度，这时加热系数应大大缩小。此外，在选择淬火加热系数时还应考虑加热设备的类型、容量、装炉量和装卡方式以及予热情况等因素。

表 8-10 工具有效厚度计算和碳素工具钢的淬火加热系数

工 具 类 型	有效厚度	加热系数(s/mm)
圆棒形工具(如钻头、铰刀、圆拉刀等)	外 径	空气炉 50~80 盐浴炉 20~25
扁平形工具(如锯片、圆板牙、搓丝板、扁拉刀)	厚 度	
空心圆柱形工具	$\frac{\text{外径}-\text{内径}}{2}$	
不规则形状工具	主要部分	

在一定的淬火加热温度下，保温时间的长短，必须以奥氏体均匀化为目标。图 8-2 表明完成奥氏体化以后，还必须有一定的保温时间才能使奥氏体成分均匀化。

2. 冷却 普通工具钢淬火冷却介质根据工件材料、硬度要求、变形要求及工件尺寸大小来选

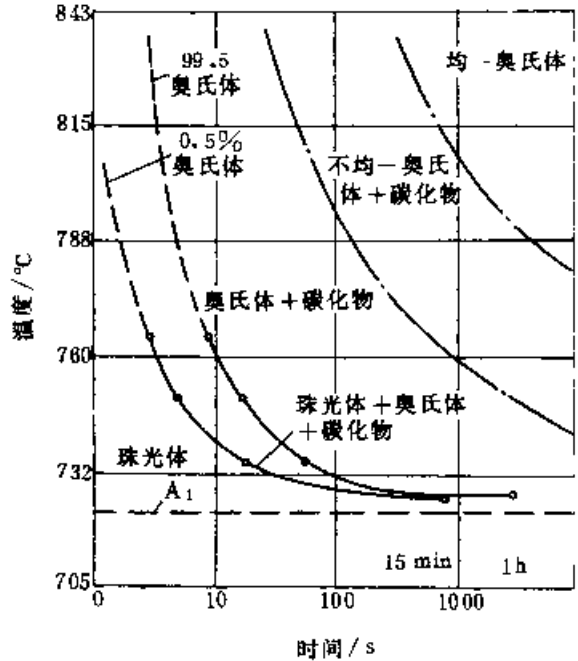


图 8-2 淬火温度和保温时间

对 T8 钢组织转变的影响

择。不含合金元素的碳素工具钢一般都采用水溶液、水—油或水—硝酸盐（或碱浴）双介质淬火。含合金元素的普通工具钢或小尺寸的碳素工具钢可采用油冷或硝酸盐（或碱浴）冷却。普通工具钢淬火冷却方法的选择可参考表 8-11。

表 8-11 普通工具钢的淬火冷却方法

冷却方法	常用冷却介质 (质量分数)	介质温度/°C	适用范围
单液淬火	水溶液; 40%~50%NaOH 5%~10%NaOH (或 NaCl)	≤40	>12mm 形状简单的碳素工具钢
	N15,N32 淬火油	20~120	合金工具钢,<5mm 碳素工具钢
双介质淬火	水溶液—油		>12mm 形状复杂的碳素工具钢
	水溶液—硝酸盐(或碱浴)		>12mm 形状复杂的碳素工具钢

(续)

冷却方法	常用冷却介质 (质量分数)	介质温度 /℃	适用范围
马氏体 分级 淬火	50%KNO <sub>3</sub> + 50%NaNO <sub>2</sub>	150~200	合金工具钢, < 12mm 的碳素工具钢
	85%KOH + 15%NaNO <sub>2</sub> 以及总重量3%的水	150~180	合金工具钢, ≤ 25mm 的碳素工具钢
贝氏体 等温 淬火	硝盐	150~200	合金工具钢, < 12mm 的碳素工具钢
	碱浴	150~180	合金工具钢, ≤ 25mm 的碳素工具钢

含  $w(\text{NaOH})$  40%~50% 的饱和水溶液的冷却能力比含有  $w(\text{NaOH})$  ( $\text{NaCl}$ ) 5%~10% 的水溶液为好, 工件产生畸变和开裂的倾向也小。对某些易畸变工件, 有时可采用 150℃ 的热油淬火。油温在 80~120℃ 时既有较高的冷却能力, 又有利于减少畸变。马氏体分级淬火和贝氏体等温淬火适用于含合金元素的普通工具钢和小尺寸的碳素工具钢。分级或等温温度的高低和保温时间的长短, 可根据工具的硬度要求、性能要求及畸变和开裂倾向的大小来确定。

### 8.3.1.6 回火

普通工具钢的回火温度可根据表 8-9 作大致选择, 也可根据第 4 卷所列的“淬火钢在不同回火温度后的力学性能曲线”的有关章节来选择。贝氏体等温淬火的工具可采用下限回火温度。

在硝盐中或油中回火时, 回火保温时间为 1h 左右。而在空气炉中回火时, 回火保温时间为 1.5~2h。工具尺寸较大或装炉量较多时, 回火时间应适当延长。

普通工具钢一般都进行一次回火。Cr12Mo 型工具钢采用二次硬化法(高温淬火)时, 淬火后钢中存在大量残留奥氏体, 应进行多次回火。

## 8.3.2 高速钢的热处理

### 8.3.2.1 退火

高速钢是一种含碳量较高的空气硬化型高合

金工具钢, 轧材和锻材都具有较高的硬度, 如何通过退火使其尽量软化, 得到较好的可切削性能是十分重要的。同时退火工艺还会影响到最终制成工具的切削寿命。图 8-3 表明随着退火保温时间的增长, 几种高速钢制成的刀具的切削寿命都会下降, 因此要制造高质量的切削工具, 必须重视退火工序。

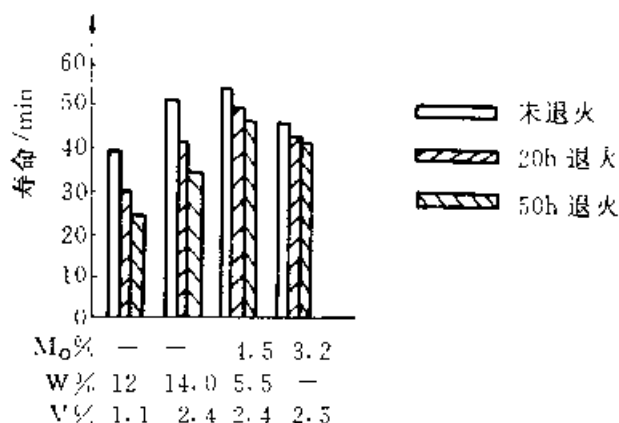


图 8-3 退火时间对刀具寿命的影响

常用高速钢的退火温度如表 8-13 所示。高速钢退火保温时间应在 3~4h 以上。保温后可采用 10~20℃/h 的速度冷却至 500℃ 以下出炉, 也可采用冷却至 710~760℃ 停留 1~6h, 再冷却至 600℃ 以下出炉的等温退火法。

高温退火是一种新的退火方法, 可以大大缩短退火周期, 提高退火质量。高温退火方法的加热温度为  $A_{r1} + (10 \sim 20^\circ\text{C})$ , 即退火温度由普通退火的 840~860℃ 提高到 880~920℃。老的退火方法在  $A_{r1}$  点以下保温, 虽然保温时间长, 但也不能进行充分再结晶, 钢材不能充分软化。高温退火时保温温度在  $A_{r1}$  点以上, 相变可以瞬间完成, 相变进行得很充分, 进行了完全再结晶, 因而钢材充分软化。

图 8-4 为高温退火工艺曲线与普通退火工艺曲线的比较。由图可见, 高温退火工艺保温时间大大缩短, 冷却阶段的保温时间也几乎被取消, 因而退火周期大大缩短。高温退火的钢材退火硬度更低, 切削加工性更好, 切削效率可以提高 20%, 制成工具的切削寿命比采用普通退火的工具提高 15%~20%。

### 8.3.2.2 改善切削性能的热处理

为改善钢的可切削性能, 改善工具表面的粗糙度, 可按表 8-12 对高速钢进行预备热处理, 使



毛坯硬度达到 280~370HBS。

表 8-12 中一次处理 (I、II) 的方法比调质处理 (III) 的效果更好, 在较大切削用量条件下, 加工表面的粗糙度可达  $R_{a1.6\mu m}$ 。

一次处理方法的加热温度较低, 随后淬火加热时奥氏体晶粒不均匀长大的倾向小。淬火前进行 720~760°C 的退火, 可避免晶粒不均匀长大。

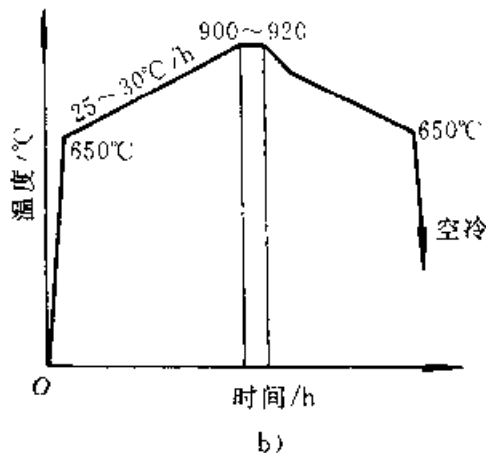
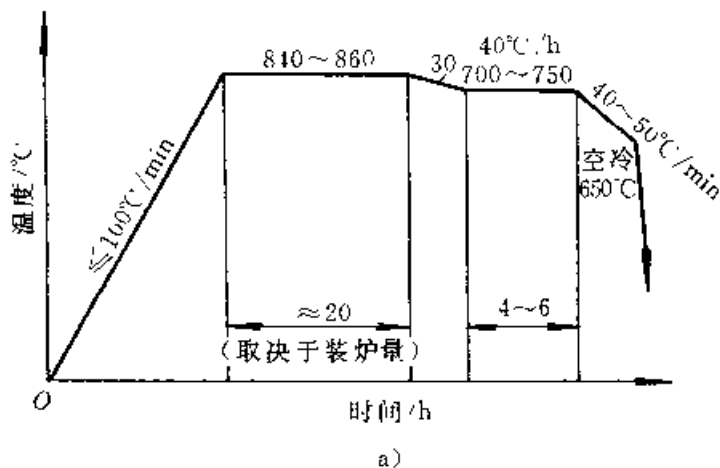


图 8-4 高速钢新旧退火工艺曲线

a) 原退火工艺 (K. A. Гурьев 建议) b) 新退火工艺

表 8-12 改善被切削性的热加工工艺

工艺方法	加热温度/°C		加热系数 (s/mm)	冷却方法	回火
	W18Cr4V	W6Mo5Cr4V2			
I	850~870	840~860	25~35	空气吹冷或油冷	—
II	880~890	870~880	20~30	720~730°C 停留 60~90s 后空冷	—
III	900~920	880~900	15~20	空冷或油冷	620~700°C 0.5~2h

### 8.3.2.3 去应力

经塑性变形方法加工的毛坯, 如冷拉、冷挤的各种工具的原材料或毛坯, 为消除钢的冷作硬化现象, 采用 720~760°C 的低温退火法。对形状复杂、切削加工量较大或细长、薄片状工具, 为了减少畸变或减少淬火裂纹, 常用 600~650°C 高温回火法消除应力。为消除磨削加工应力可在 200~500°C 回火 1~2h。粗磨后可在 500°C 去应力, 精磨后可在 200°C 去应力。

### 8.3.2.4 淬火

高速钢工具的淬火加热, 国内大都采用盐浴炉。近年来用于高速钢淬火的真空炉数量在不断增加。本章仍然以盐浴炉为主叙述各项热处理技术参数。

#### 1. 预热

高速钢导热性较差, 淬火加热前必须进行预热, 通常为两次预热:

低温预热: 450~500°C, 保温 1~1.5min/mm (空气炉); 600~650°C 保温 0.8~1.0min/mm (盐浴炉)。

中温预热: 800~850°C 保温 0.4~1.0min/mm (盐浴炉)。

一般工具可采用一次中温预热, 形状复杂的工具或大型工具采用低中温两次预热。此外, 也可采用三次预热, 即增加一次 1050~1100°C 的高温预热。高温预热时间与淬火加热时间相同。高温预热后, 可适当缩短淬火加热保温时间。

#### 2. 淬火加热

(1) 淬火加热温度, 高速钢淬火温度的选择: 从增加碳化物溶入量、提高奥氏体合金化程度的角度来说, 奥氏体化温度越高越好, 以便增加钢的耐磨性和红硬性。但从晶粒度、强度的角度来说, 随着奥氏体化温度的升高, 钢的晶粒粗化, 到达一定限度以后, 钢的强度和韧性就会下降。而这两方面都与工具的使用寿命有密切的关系, 因此正确地选择淬火温度, 对工具的使用寿命有极大的影响。

高速钢的淬火规范可参考表 8-13 选择。

表 8-13 高速钢的热处理规范

钢 号	退火温度/°C	退火硬度(HBS)	淬火温度/°C	回火温度/°C	回火硬度(HRC)
W18Cr4V	850~870	≤255	1270~1285	550~570	≥63
9W18Cr4V	810~860	≤262	1260~1280	550~570	≥63
W9Mo3Cr4V	840~870	≤255	1220~1240	550~570	≥63
W12Cr4V5Co5	850~870	≤277	1220~1240	530~550	≥65
W6Mo5Cr4V2	810~860	≤255	1210~1230	540~560	≥63
9W6Mo5Cr4V2	840~860	≤255	1190~1210	540~560	≥63
W6Mo5Cr4V2Al	840~860	≤269	1230~1240	540~560	≥63
W6Mo5Cr4V3	810~860	≤255	1190~1210	540~560	≥64
W2Mo9Cr4V2	840~860	≤255	1190~1210	540~560	≥63
W6Mo5Cr4V2Co5	840~860	≤269	1190~1210	540~560	≥61
W6Mo5Cr4V2Co8	810~860	≤269	1190~1210	540~560	≥61
W7Mo4Cr4V2Co5	870~890	≤269	1180~1200	530~550	≥66
W2Mo9Cr4VCo8	870~890	≤269	1170~1190	530~550	≥66

随着淬火加热温度的升高,碳化物不断溶入,高速钢的基体中,钢中的残留碳化物数量不断下降。图 8-5 显示了 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 两种高速钢中残留碳化物数量与淬火温度的关系。

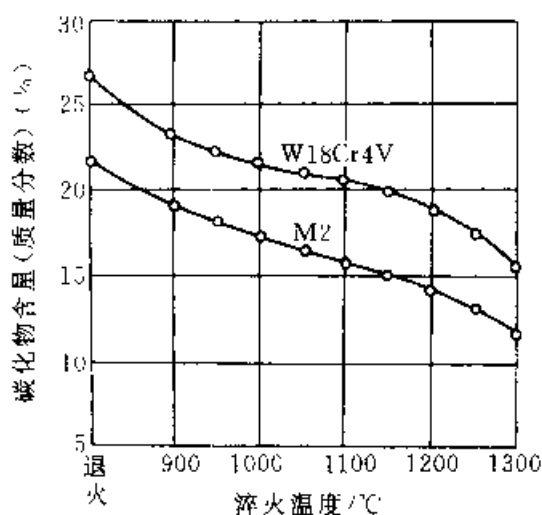


图 8-5 W18Cr4V 钢和 M2 钢淬火温度与未溶碳化物量的关系

随着碳化物不断溶入基体,基体中的 C 及 W、Mo、Cr、V 等合金元素的含量不断升高,这有利于淬火后形成的马氏体的耐磨性和红硬性提高,也有利于工具切削寿命的提高。图 8-6 为 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V 两种高速钢基体中 C

及 W、Mo、Cr、V 含量随着淬火加热温度升高而升高的情况。基体中 C 的含量几乎随着淬火加热温度的升高而直线上升。Cr 的碳化物在 1100°C 时全部溶入基体,因而 1100°C 以上基体中 Cr 的含量不再增加。W、Mo、V 的含量随着淬火加热温度的升高而不断上升,直到 1300°C 其含量还在增加,说明此时这些碳化物只是部分溶入基体,尚未完全溶解。

从合金化的角度来说,希望尽量提高淬火温度,使尽可能多的碳化物溶入基体,但随着淬火温度的升高,钢的晶粒尺寸长大。随着晶粒尺寸长大,钢的强度下降,脆性增加。晶粒度对工具寿命的影响情况比较复杂,对间断切削的工具,这种影响规律性比较显著,即晶粒越细,工具的寿命越高(图 8-7)。这可能与间断切削工具切削时承受一定冲击,要求工具有较高的韧性有关,对连续切削的工具,晶粒度对工具寿命的影响,有些试验数据认为粗晶粒工具切削寿命高,另一些试验数据却得到相反的结论。

对不同种类、不同规格、不同使用条件的切削工具,选择淬火温度就是把碳化物的溶解度和晶粒度控制到最佳状态,以便得到耐磨性、韧性和红硬性的良好配合,从而得到最佳的工具使用寿命。

对切削载荷不大,承受冲击力小的工具,如车刀等应选用较高的淬火加热温度。对重载荷,承受冲击力较大的间断切削工具应选择较低的淬火加热温度。为了防止形状复杂和细长、薄刃刀具的淬火开裂和减少淬火畸变,宜采用稍低的淬火加热温度。

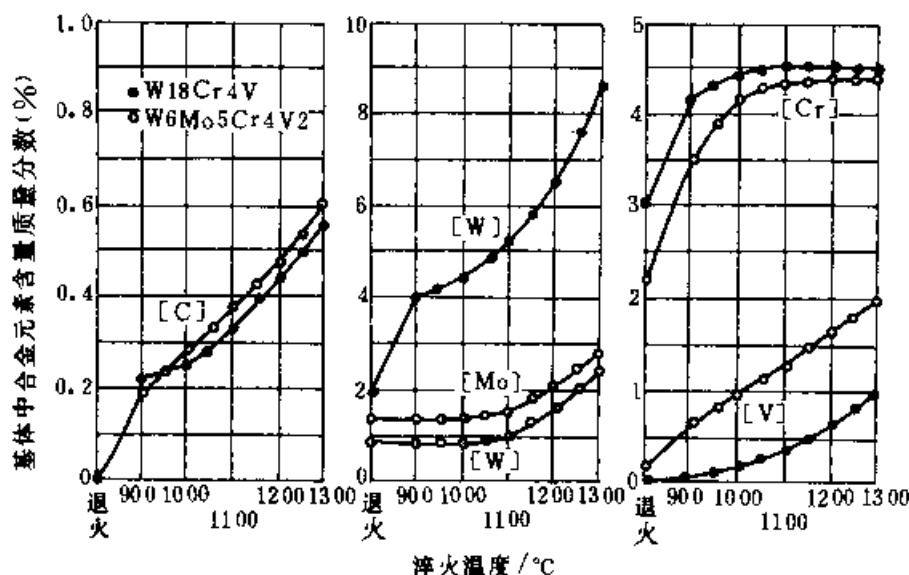


图 8-6 两种高速钢基体合金含量与奥氏体化温度的关系

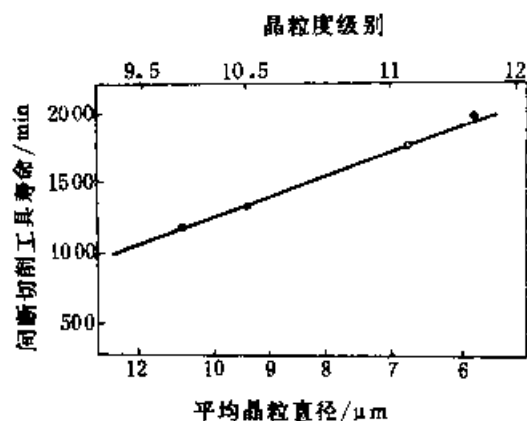


图 8-7 晶粒度对 W6Mo5Cr4V2 钢  
工具间断切削寿命的影响

工厂在制造自刀具时可以根据使用条件来选择淬火加热温度。如同一种刀具在切削难加工材料时或在高速小进给量的切削条件下,应选择稍高一些的淬火温度。如果切削时有较大冲击力或设备振动较大应选择稍低的淬火加热温度。必要时可以通过切削试验来确定某种刀具在本厂具体使用条件下的最佳淬火加热温度。

(2) 淬火加热时间, 高速钢工具的淬火加热时间以工具的有效厚度乘以加热系数来计算。工具

有效厚度计算方法参考表 8-10。高速钢在盐浴中的加热系数与淬火加热温度有关, 在 1150~1240°C 加热时可选用 10~12s/mm, 在 1250~1300°C 加热时可选用 8~10s/mm。刀具的种类、规格不同, 加热系数也应作适当调整, 可参阅工具热处理举例。

加热系数只是以单件加热来计算加热时间的依据, 在实际生产大量装炉时, 必须考虑到加热炉的类型、结构、功率、升温速度以及工具的装卡方式、装卡量大小、予热情况等因素来确定最终的加热保温时间。

高速钢淬火加热时, 要达到碳化物比较充分的溶解, 得到较高的奥氏体化程度, 淬火加热温度和保温时间都很重要, 只是温度的作用更大一些。两者作用的综合考虑可以用淬火参量公式来表达

$$P = t(37 + \log \tau)$$

式中  $P$ ——淬火参量;

$t$ ——淬火加热温度;

$\tau$ ——淬火加热保温时间。

公式中淬火参量  $P$  代表了淬火加热温度和保温时间的综合作用, 只是保温时间的作用稍小。在淬火加热过程中无论加热温度和保温时间怎样变化, 只要两种作用的最终结果, 淬火参量相同, 那么奥氏体化的程度就应该是相当的。图 8-8 表示了淬火参量对淬火后钢中的碳化物量和残留奥氏体量的影响。

3. 冷却 高速钢在淬火冷却时必须有足够的冷却速度以保证在冷却过程中不会有碳化物自过饱和的奥氏体中析出, 以免降低奥氏体的合金度, 降低淬火后的红硬性, 甚至降低淬火硬度。如果淬火冷却过程中碳化物沿晶界析出, 则会降低钢的韧性。

在盐浴中加热的高速钢工具的淬火冷却方法大都采用盐浴分级淬火。微小尺寸的工具可以采用空冷。车刀等要求红硬性较高的工具通常采用油冷。形状复杂的大型工具或淬冷畸变要求较严

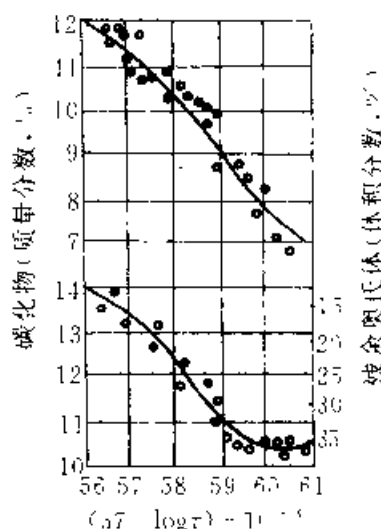


图 8-8 淬火参变量与碳化物量及残留奥氏体量的关系

的工具则采用盐浴等温淬火。

分级淬火冷却温度通常为 550℃ 或 600℃，分级淬火保温时间与淬火加热保温时间相同。当分级淬火保温温度超过 650℃ 时会使间断切削工具的切削寿命下降（见图 8-9），这是由于分级温度过高，分级停留过程中碳化物沿晶界析出，降低了钢的韧性。因此对间断切削的工具，分级淬火温度以不超过 650℃ 为好。对连续切削的工具，由于切削时承受很小的冲击，对韧性要求不高，因此提高分级温度虽然增加了碳化物析出量，但对工具的切削寿命影响不显著。

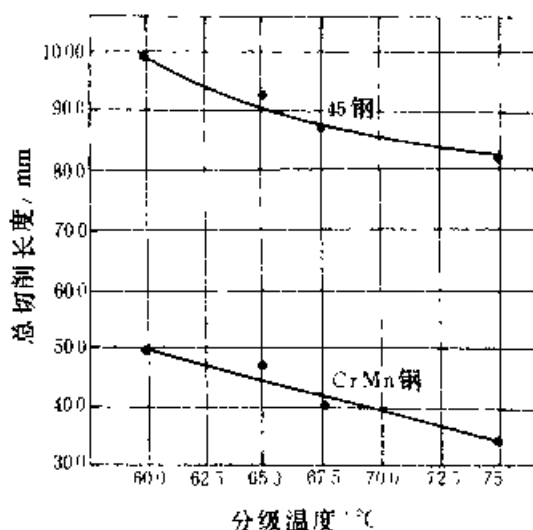


图 8-9 分级冷却温度对间断切削工具寿命的影响  
进行贝氏体等温淬火的工具，应先在分级盐

浴中冷却，然后再冷却到贝氏体区作等温停留，通常是在 240~260℃ 等温 60~240min。由表 8-14 可见，W18Cr4V 高速钢从淬火加热的奥氏体状态在 260℃ 停留（等温）60min 以上，可以形成大量贝氏体，随着停留时间的延长，贝氏体含量增加。大量贝氏体的形成可以显著提高钢的强度和韧性。

表 8-14 等温时间对 W18Cr4V 钢组织和硬度的影响(1220℃ 加热, 260℃ 等温)

等温时间 h	等温后冷却 的马氏体点 ℃	室温下的相组成 (体积分数%)				硬度 (HRC)
		碳化物	贝氏体	马氏体	奥氏体	
0	240	5	0	75	20	65.6
1	160	0	25	45	25	65.5
2	90	0	35	20	35	61.2
3	60	0	50	0	15	57.8
4	0	0	55	0	10	59.1

### 8.3.2.5 回火

高速钢回火应达到最佳的碳化物二次析出硬化效应、残留奥氏体充分转变和残留应力彻底消除的三大目标。

普通高速钢的回火硬化峰值均在 560℃ 左右，所以大多数高速钢通常选择 560℃ 回火。回火硬度峰值的位置与回火保温时间有一定的关系。图 8-10 为回火保温时间从 0.5h 增加 100h 时，回火硬度峰值变化情况。由图可见，随着回火保温时间的增长，回火硬度峰值的位置向低温方向移动。反之回火温度的升高也可缩短回火保温时间。回火温度与回火保温时间的关系，可以用回火参量公式来说明。其表达式如下

$$P = (20 + \log \tau) t$$

式中  $P$ ——回火参量；

$t$ ——回火温度；

$\tau$ ——回火保温时间。

尽管回火温度，回火保温时间有所不同，只要回火参量  $P$  相同，回火的效果就相当。

形状简单的一般高速钢工具可以采用二次回火，形状复杂的大型工具可以采用三次，甚至四次回火。贝氏体等温淬火的高速钢工具、高碳高速钢

及钴高速钢制工具, 由于淬火后残留奥氏体量较多, 可适当增加回火次数。切削试验表明, 普通高速钢 2 次回火以后工具的切削寿命已经达到最高值, 再进一步增加回火次数并不能进一步提高工具的切削寿命 (见图 8-11)。由此可见, 大多数普通高速钢工具以两次回火为好。

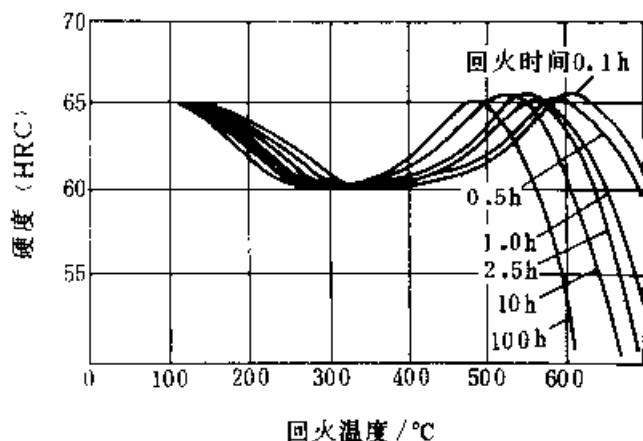


图 8-10 回火温度时间与硬度

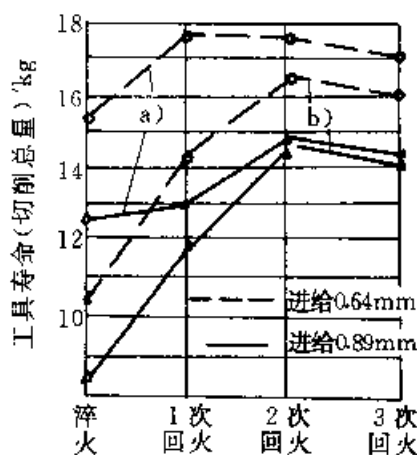


图 8-11 回火次数对工具寿命的影响

a—W18Cr4V 钢 b W6Mo5Cr4V2 钢

低高温回火法, 即先在  $320\sim 380^{\circ}\text{C}$  回火 1 次, 然后在  $560^{\circ}\text{C}$  回火 2 次, 可以使 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 高速钢的硬度增加  $0.5\sim 2\text{HRC}$ , 冲击韧性提高  $20\%\sim 30\%$ , 工具的切削寿命提高  $40\%$ , 这是由于低温回火时有渗碳体型碳化物析出, 促进了高温 ( $560^{\circ}\text{C}$ ) 回火时  $\text{M}_2\text{C}$  碳化物的大量均匀析出, 减少了碳化物沿晶界析出。低温回火时也有部分残留奥氏体转变成贝氏体。由于上述原因, 低高温回火的高速钢比普通回火的高速钢有较高的硬度和韧性, 切削寿命也有所提高。

在单件加热或自动线上回火时可以采用  $380^{\circ}\text{C}$ , 20min 或  $600^{\circ}\text{C}$ , 10min 的快速回火法。

为了防止回火过程中奥氏体陈化稳定, 回火后应尽快冷却至室温。形状复杂的大型刀具, 第一次回火时必须缓慢加热 (可在  $400^{\circ}\text{C}$  预热) 或在  $500^{\circ}\text{C}$  以下入炉, 然后缓慢上升至回火温度保温, 冷却时也应缓慢 (可置于铁筒中冷却), 以防开裂。

### 8.3.2.6 高速钢工具的同步热处理

同步热处理是指高速钢工具在盐浴热处理时实现淬火工序、回火工序采用同样的保温时间, 即以相同的节拍进行生产。

高速钢同步热处理实际上是为包括淬火的预热、加热、冷却及回火等工序在内的热处理自动线准备的热处理工艺。它的优点在于实现了高速钢工具热处理的全盘自动化, 大大缩短了生产周期, 同时保证了产品质量的一致性和稳定性。生产实践证明, 自动化热处理的工具比普通热处理的工具切削寿命可以提高  $20\%\sim 30\%$ 。

实现同步热处理的关键是正确选择回火温度与回火保温时间, 以便能和淬火保温时间相匹配, 实现同节拍生产。图 8-12 提供了 W6Mo5Cr4V2 和 W6Mo5Cr4V2Co5 两种高速钢高温回火时回火温度与回火保温时间的关系, 以便选择正确的回火规范, 使之与淬火工序同节拍。

图 8-12 中在 I 区内任何一点的回火温度与回火时间的搭配, 组成的回火规范均可使高速钢工具达到正常回火。在 II 区内选择回火工艺时会

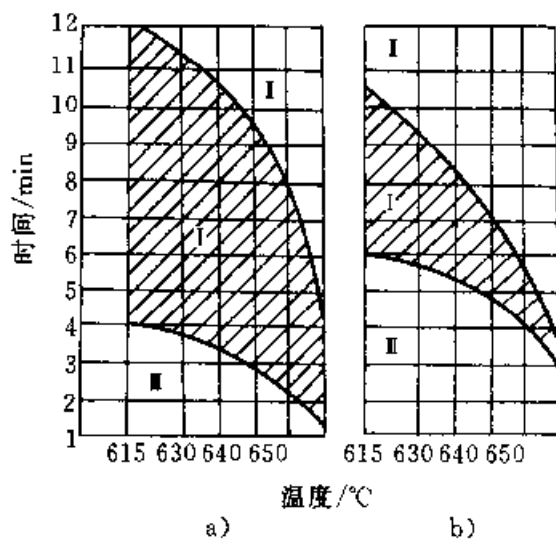


图 8-12 高温回火时回火温度

与保温时间的关系

a) W6Mo5Cr4V2 ( $1220^{\circ}\text{C}$  加热淬火)

b) W6Mo5Cr4V2Co5 ( $1235^{\circ}\text{C}$  加热淬火)

造成过回火。在Ⅲ区内选择回火工艺时会造成回火不足。

### 8.3.2.7 高速钢工具的真空热处理

高速钢工具在真空炉中进行热处理畸变小,表面光洁,无氧化脱碳,车间工作环境好,采用微机控制可减少手工操作,工艺重复性好。高压气淬真空炉在国外正在取代盐浴炉,逐步成为高速钢热处理的主要设备。高压气淬真空炉的缺点是一次性投资大,消耗高纯氮,要有高纯氮源或有制氮设备,对实际生产的成本合算,真空淬火并不比盐浴炉淬火成本高。

工件在真空中加热只靠辐射传热,加热速度比盐浴炉慢得多,必须采用多段预热,长时间保温。可采用3~4段预热,4段预热的温度可选用700℃,850℃,1050℃,1150℃。加热系数可以延长到40~60s/mm。在装炉量不太大时可以采用接近或稍低于盐浴炉中的淬火加热温度,例如W6Mo5Cr4V2钢可采用1200~1220℃。在装炉量较大时,应注意到炉中心部位的工件被遮挡,热量辐射不到,即形成“阴影”,造成较大的温差,因此应适当延长淬火加热保温时间。

高速钢工具在真空炉中淬火的冷却方式,现在大都采用高纯氮气冷却(氮气纯度:99.999%)。油冷已较少采用,这是由于在真空中高温加热后高速钢工件表面处于活化状态,浸入油中会发生瞬时渗碳现象,高速钢表面形成5~50μm的白亮层(其中存在大量残留奥氏体),降低工具的使用寿命。

采用高纯氮作为冷却介质时,随着炉内气体压力的增大,其冷却能力增加。

真空加热后采用常压氮气冷却时冷却速度很小,只适用于尺寸很小或红硬性要求不高的高速钢工具的淬火。常压气淬的工具畸变小,韧性好。但由于冷却速度不够快,冷却过程中有碳化物自钢的基体中析出,因此钢的硬度和红硬性显著下降(图8-13)。

采用0.2MPa的压力真空淬火时,高速钢工具的尺寸也不能太大,否则也会产生硬度和红硬性下降的现象。

采用0.5MPa的压力真空淬火时,高速钢工具的淬硬尺寸可达100mm,接近盐浴分级淬火的冷却能力。

也有的真空炉不增加或少增加冷却气体的压

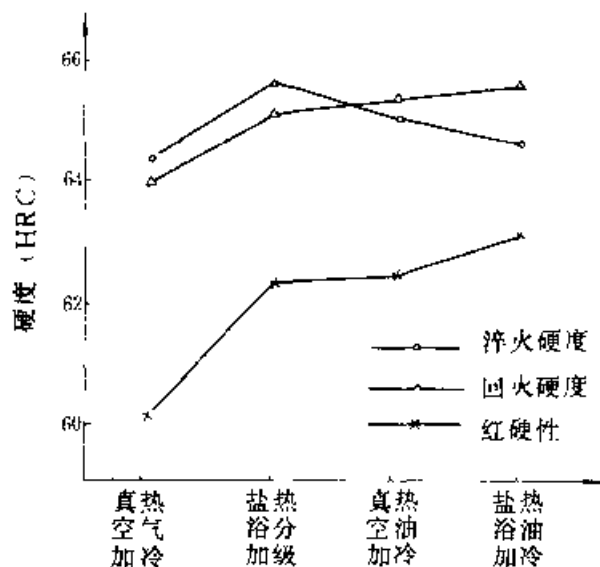


图 8-13 冷却方式对高速钢红硬性的影响  
力,而是增加气体的流量,这样也可以同样达到高速冷却的效果。关于气淬真空炉的类型可参考第3卷的有关章节。

高速钢在真空炉中淬火时容易产生混晶现象,即晶粒尺寸大小相差悬殊,有时也会因冷速不足而产生碳化物析出,造成硬度和红硬性不足的现象。工件表面脱元素也是高速钢真空淬火时容易产生的表面缺陷。

### 8.3.2.8 粉末高速钢的热处理

粉末高速钢采用熔融钢液高压气雾化制粉,经过筛、分选、装罐压实、抽真空密封及热等静压等制成钢锭,再锻造、轧制成粉末冶金钢材。

粉末高速钢开发于20世纪70年代,在国外已大量用于制造金属切削工具,特别是齿轮刀具已广泛应用,国内也开始应用。

目前粉末高速钢主要由美国坩埚钢公司(Crucible)和瑞典索德伏斯钢厂(Soderfors)两厂家生产。这两厂家生产的常用粉末高速钢的牌号如表8-15所示。

粉末高速钢由于碳化物颗粒细小,且分布均匀,因此它克服了冶炼高速钢碳化物偏析所带来的一系列缺点。

(1) 克服了由于碳化物不均匀引起的工具断面上性能的巨大差异及材料脆性大的缺陷,材料韧性大大提高,从而提高了工具的使用寿命。

(2) 克服了由于碳化物偏析而引起的淬火时容易产生过热和淬裂以及锻打时容易开裂的缺点。

表 8-15 国外常用粉末高速钢  
牌号的成分(质量分数)(%)

生产 厂家	牌 号	C	W	Mo	Cr	V	Co	硬度 (HRC)
美国 肯纳 金属公 司	CPMM4	1.3	1.25	1.5	1.25	1.5	—	65
	CPMM12	1.1	1.5	9.5	3.75	1.15	8	67.5
	CPMT15	1.55	12.5	—	3.0	5.0	5	67
	CPMRex76	1.5	10	5.25	3.75	3.1	9	68
瑞典 索德 夫斯 特	ASP23	1.28	6.1	5.0	1.2	3.1	—	66
	ASP30	1.28	6.1	5.0	1.2	3.1	6.5	67
	ASP60	2.3	7.0	6.5	4.0	6.5	10.5	69

(3) 大大提高了材料的可磨削性, 齿轮刀具等磨削加工时的生产效率可以大大提高。

(4) 可以提高 C 及合金元素加入量, 制造出性能更高的高速钢。例如所有粉末高速钢含碳量(质量分数)均在 1.1% 以上, 含 V 量(质量分数)大都在 3% 以上, 最高达 6.5%。

粉末高速钢的价格比普通高速钢高, 但目前仅稍高于进口钴高速钢。因此对齿轮刀具或加工难切削材料的刀具可以采用。

粉末高速钢的淬火温度, 以 ASP 系列为例:

ASP23 1160~1180°C; ASP30 1150~1180°C; ASP60 1150~1180°C。

粉末高速钢淬火后一般都采用 560°C 三次回火, 每次保温 1h 以上。

粉末高速钢工具热处理后也可以进行渗氮、蒸汽处理、氧化钛涂层等表面处理。

部分粉末高速钢热处理后的硬度、韧性、耐磨性、可磨性数据如表 8-16 所示。

表 8-16 部分粉末高速钢的性能数据

序 号	钢 号	淬火回 火硬度 (HRC)	夏氏 冲击 值 J	抗弯 强度 MPa	磨削 比*	耐磨性 ( $N \cdot m^2 \cdot 10^{-1}$ )
1	普通 M12	58	9.8	2600	1.8	52
	CPMM42	68	12.0	4060	5.0	59
2	普通 T15	66	5.1	2200	0.6	380
	CPM115	65.5	28.5	3740	2.2	380
3	普通 M4	64	13.5	3840	1.1	170

(续)

序 号	钢 号	淬火回 火硬度 (HRC)	夏氏 冲击 值 J	抗弯 强度 MPa	磨削 比*	耐磨性 ( $N \cdot m^2 \cdot 10^{-1}$ )
3	CPMM4	64	43.4	5450	2.7	264
4	CPMRex76	69	13.6	4150	3.8	380
5	普通 M2	65	17.6	3880	3.9	62

\* 磨削比 = 金属磨除的体积 / 砂轮磨损体积

### 8.3.2.9 深冷处理

通常人们把工件在干冰或氟里昂气体中冷却至 -80°C 以下称为冷处理。深冷处理则是把工件冷却到更低的温度, 一般都是采用液态氮使工件冷却到 -190°C 以下。也有人把两者均称作深冷处理。

采用液氮冷却时, 最初是直接把手件放入盛液氮的容器中保温, 后来为了减少骤冷的冲击, 防止工件开裂和更精确地控制深冷规程, 开发了深冷处理箱。在深冷处理箱中, 工件不直接与液氮接触, 并且深冷处理箱可以采用微机对温度进行精确的程序控制。

深冷处理通常采用较长的保温时间, 例如采用上述深冷处理箱处理高速钢工具时常采用下列程序: 工具缓慢下降到 -193.9°C, 保温 10~40h, 然后再升温到 50°C, 最后缓慢冷却到室温, 这些升降温过程均由微机控制完成。

采用液氮的深冷处理比干冰的冷处理对提高高速钢的耐磨性有更好的效果(见表 8-17)。

表 8-17 深冷处理效果比较

被处理材料	冷却介质	处理温度 / °C	耐磨性变化
W18Cr4V (T1)	干冰	-78.5	比未处理件 提高 1.5 倍
	液氮	-190	比未处理件 提高 2.25 倍
W2MoGCr4V (M1)	干冰	-78.5	比未处理件 提高 1 倍
	液氮	190	比未处理件 提高 1.75 倍

采用液氮的深冷处理在国外已应用 20~30 年, 很多工业国家都已采用, 特别是用于工厂自制

刀具效果更好。深冷处理的高速钢钻头、车刀、铣刀、丝锥、拉刀及齿轮刀具等效果很好,大都可以提高刀具寿命2~4倍,高者可达5倍以上。

深冷处理后工具的硬度、韧性、强度变化不大,之所以能够提高工具的寿命,主要是由于深冷处理后高速钢中的残留奥氏体彻底转变,同时钢的基体中析出极为细小的碳化物,使钢的耐磨性大为提高。

### 8.3.2.10 高速钢刀具的表面强化

高速钢刀具表面强化方法种类很多。蒸汽处理和氧氮共渗是目前国内在商品钻头上大量采用的方法。QPQ盐浴复合处理是目前国外应用较多、强化效果很好的方法。PVD氮化钛涂层是强化效果最高的方法,成本高和设备投资太大是其缺点,它比较适用于贵重精密刀具。液体硫氮共渗、电解渗硫、电火花强化、超声波强化等方法对自用工具有较好的强化效果。激光表面强化,离子注入等新技术也正在引起人们的重视。

1. 蒸汽处理 蒸汽处理是很老、也很实用的刀具表面强化方法,直到现在国内外在直柄钻头等刀具上的应用仍然很普遍。蒸汽处理是使刀具在过热的水蒸气中加热,表面形成1~5 $\mu\text{m}$ 厚的致密的蓝黑色 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 氧化膜(见图8-14)。氧化膜不仅使刀具有了漂亮的商品外观,增加了表面的防锈能力,而且刀具切削时还可以储存切削液,减少摩擦,延长刀具的使用寿命。通常蒸汽处理可以提高刀具寿命30%左右。

蒸汽处理的温度为540~560 $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为60~90min。进汽压力为0.04~0.06MPa;正常处

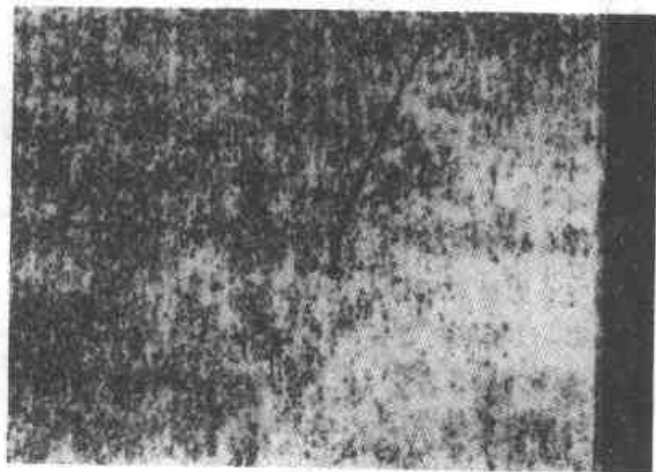


图8-14 蒸汽处理形成的氧化膜

抛光,未侵蚀 500 $\times$

理时炉膛压力为0.03~0.05MPa。处理次数为一次或二次。预先表面清理是得到良好氧化膜的关键之一,可以采用化学脱脂法,必要时可用三氯乙烯气相脱脂。蒸汽处理后刀具应浸入淬火油或锭子油。蒸汽处理后刀具表面色泽应比较均一,不应有明显的花斑、锈迹或发红。经10% $\text{CuSO}_4$ 溶液侵蚀,10min内刀具表面不得析出铜。

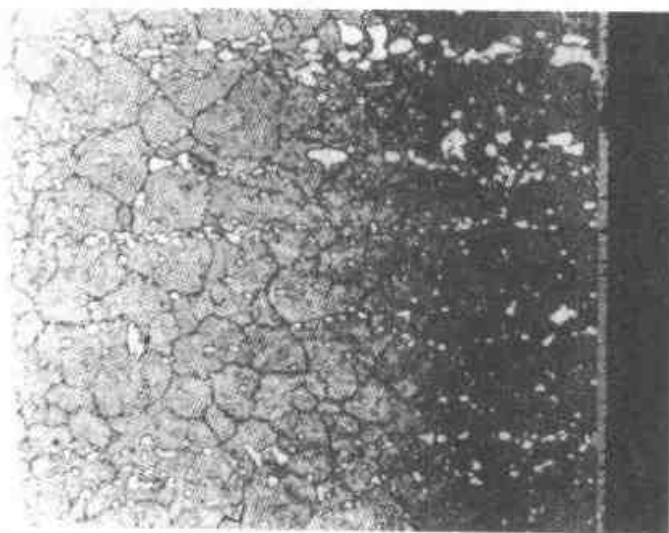


图8-15 氧氮共渗层组织

侵蚀剂: 甲醇、盐酸、

硝酸=100:10:3 500 $\times$

2. 氧氮共渗(氮氮化) 氧氮共渗是目前国内在直柄钻头上应用最多的表面强化方法。它是在含氮和氧的气氛中作氧氮共渗,渗层内部为氮的扩散层,外层为氧化膜(图8-15)。渗氮层具有高的耐磨性,氧化膜主要起防锈作用,对切削性能也有一定好处。JB3912对氧氮共渗质量及检查方法作了规定。高速钢直柄钻头氧氮共渗层深度应为15~45 $\mu\text{m}$ ,硬度应为900~1150HV,氧化膜厚度为1~5 $\mu\text{m}$ 。氧氮共渗一般可提高钻头寿命50%~100%。

氧氮共渗根据原料不同可分很多种,目前国内应用较多是氨水气化法和氨气、水蒸气混合法。

氨水气化法:以25%左右浓度(质量分数)的氨水滴入渗氮炉中分解。以45kW电炉为例,其工艺方法为:工件于350 $^{\circ}\text{C}$ 入炉,以140~160滴/min的速度滴入氨水,排气30min左右。升温到540~560 $^{\circ}\text{C}$ 以后,以200滴/min的速度滴入氨水(800~1000mL/h),保温90~120min。出炉后空冷,浸油。该法的特点是设备简单,投资少。缺点



是氮的浓度无法调节,如氨水来源及浓度不稳定,将影响渗层质量的稳定性。

**氨气、水蒸气混合法:**由液氨汽化和锅炉水蒸气混合,通过过热炉使混合气体的温度达到250℃以上,然后再通入氨氮共渗炉中,通过控制氨气和水蒸气的比例可以控制渗层中氮的浓度。通常氨水与水蒸气的比例为1:1。氨氮共渗的温度为540~560℃,时间根据装炉量不同为1.5~3h。该法的优点是可以在较大范围内调节氮的浓度。缺点是质量不容易控制稳定,管道设备较复杂,投资大。

**3. QPQ 盐浴复合处理** QPQ 盐浴复合处理是国外近些年来在盐浴氮碳共渗基础上发展起来的新工艺,它是目前国外在高速钢刀具上应用最多的表面强化方法。

QPQ 盐浴复合处理的刀具经去油后在350~400℃空气炉中预热15~20min,然后在渗氮盐浴中保温10~40min,渗氮温度为530~550℃,最后侵入到350℃左右的氧化盐浴中保温15min,出炉后空冷、清洗、干燥、浸油。

在渗氮炉中工件、表面形成氮的扩散层,其深度为10~45μm,硬度可达1200HV,但脆性很小。工件在氧化炉中处理后,在渗氮层外面形成1~3μm的黑色氧化膜,增加了刀具的防锈能力。

渗氮盐浴中氰酸根含量的控制非常重要,通常应控制在30%~35% (质量分数) 范围内。该技术中的氧化工序具有消除公害作用,该技术完全达到了无公害。

QPQ 盐浴复合处理技术设备投资少,生产成本低,强化效果好,无公害,产品质量稳定。

QPQ 盐浴复合处理技术用于钻头、铣刀、铰刀、丝锥、齿轮滚刀及拉刀等刀具均可提高寿命2倍以上。对于加工耐热合金和难加工材料的刀具效果尤佳。

这种方法不仅大幅度提高刀具寿命,而且可以大大降低刀具寿命的分散度,提高刀具寿命的稳定性。表8-18为同一盒10支钻头对比试验的结果,QPQ 处理钻头寿命为未处理钻头的414%。未处理钻头寿命的分散度(最高钻孔数/最低钻孔数)为15.2,处理后则降低到1.98。多次试验说明,不管处理前钻头寿命分散度有多大,QPQ 盐浴复合处理后钻头寿命分散度均降低到2左右,说明这种方法对稳定钻头寿命非常有效。

表 8-18 QPQ 盐浴复合处理前后  
钻头寿命比较

钻头状态	钻头 编号	钻孔 数	钻头寿命 分散度	平均钻 孔数	提高寿命 (%)
未作 QPQ 处理	1	5	15.2	34.4	100
	2	7			
	3	20			
	4	64			
	5	76			
QPQ 处理	6	106	1.98	112.4	414
	7	113			
	8	117			
	9	160			
	10	210			

**4. 无污染硫碳氮共渗** 无污染硫碳氮共渗也称硫氮共渗,渗层中除氮碳以外还含有硫,硫在刀具表面上还有润滑和减摩作用。这种工艺通常可提高刀具寿命1~2倍。

硫碳氮共渗盐浴含30%~34% (质量分数) 的氰酸根,含氰根0.8% (质量分数) 以下,盐浴中加入硫化钾,活性硫含量控制在 $2\sim5\times10^{-6}$ ,为提高盐浴的活性,要向盐浴中通空气,通空气以100kg盐浴剂为1.5~3L/min。高速钢刀具硫碳氮共渗的温度为550~570℃,时间为10~60min。

由于硫碳氮共渗的盐浴中含有氰根,因此共渗处理后清洗工件的水,必须经过消毒处理才能排放。

**5. 物理气相沉积 (PVD)** 目前,物理气相沉积在刀具上应用的主要是氮化钛的离子镀技术。按沉积过程中金属离子形成的原理,其镀层方法主要有反应溅射、空心阴极离子镀、热阴极等离子弧源离子镀及多弧离子镀等。各种方法有其特点。空心阴极离子镀与热阴极弧源离子镀镀层组织致密,过程控制较容易,对中小件特别合适。多弧离子镀沉积速度快,生产效率高,结合强度高,大小件均适合。反应溅射镀层性能较好,沉积速率较低。

PVD 涂层设备类型不同,工艺参数也不同,现以空心阴极离子镀为例,对其原理和工艺参数

作简要说明。

空心阴极离子镀的原理示意如图 8-16 所示。它由空心阴极离子、电子枪系统 (图中 1、2、3、4)、水冷蒸发系统 (7、8)、基体与加热系统 (5), 以及相应的电源、测温, 气体流量控制系统等组成。

施加电位的空心阴极钽管通入氩气电离, 逸出电子, 使充氮的真空室电离, 形成空心阴极放电等离子电子束。电子束经偏转、集中后轰击 Ti 蒸发片, 使金属 Ti 气化, 且离子化, 与氩离子相互碰撞, 在电场作用下, 在工件表面形成氮化钛镀层。

高速钢刀具空心阴极离子镀的工艺参数可参考表 8-19。

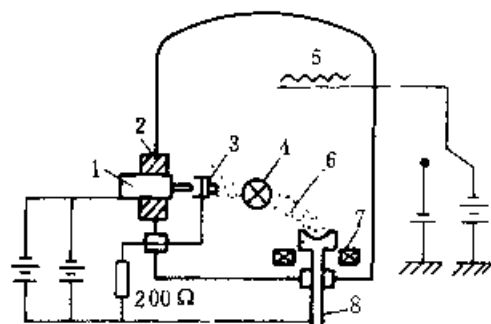


图 8-16 空心阴极离子镀原理示意图

1—空心钽管 (Ta) 2—水冷阴极 3—辅助阳极 4—偏转磁场 5—加热器 (工件)  
6—轰击粒子 7—集束磁场 8—水冷阳极 (Ti 蒸发片)

表 8-19 空心阴极离子镀刀具涂层的工艺参数

1	2	3	4	5	6		7
预抽真空	1. 件轰击电压	氩气压力	工件预热功率	温 度	引束条件		1. 件偏压
1. 33×10 <sup>-3</sup> Pa	600~1200V	1. 33~2. 66×10 <sup>-1</sup> MPa	3~4kW	300~400℃	电 压	电 流	30~40V
					500~600V	10~20A	3~5A
8			9	10	11		12
引束条件			氩气流量	氮气流量	沉积速度		沉积时间
电 压	电 流	功 率	20~40mL/min	50~80mL/min	0. 1~0. 5μm/min(固定)		视涂层厚度要求
50~55V	100~150A	5~8kW			0. 04~0. 1μm/min(转动)		

PVD 涂层后通常在刀具表面形成 2~5 $\mu\text{m}$  TiN 层, 其硬度达 2000HV 左右。该层具有很高的耐磨性, 一般可提高高速钢刀具切削寿命 2~5 倍, 可提高切削效率 30% 左右, 尤其适用于齿轮滚刀、插齿刀等精密贵重刀具。该技术的缺点是设备投资大, 生产成本较高。

6. 激光表面强化 激光表面强化是世界各国都大力开发应用的金属表面改性新技术, 刀具表面强化是其中重点研究开发的内容之一。刀具的激光表面强化技术可分为激光相变硬化、激光熔化、激光合金化和激光涂层等分支。

(1) 激光相变硬化 (激光淬火), 激光淬火就是利用激光束的高密度能量, 使刀具表面快速加热相变, 然后依靠刀具本身的自然快速冷却, 使刀具淬硬。快速加热、快速冷却的结果, 在刀具表面形成高硬度淬硬层 (1000HV), 从而提高工具的耐磨性。

激光淬火的工具实际上是一种表面硬化, 形成马氏体与碳化物的混合物的淬硬层。通常刀具需要预先淬火才能有较好的效果。

(2) 激光熔化, 激光熔化与激光淬火不同, 它是利用激光快速加热, 使工件表面相当薄的一层组织快速熔化。高速钢快速熔化区的组织为精细的孪晶马氏体、残留奥氏体、未溶碳化物和  $\delta$  铁素体的混合物, 回火后析出枝晶状的 M<sub>6</sub>C 碳化物。激光表面熔化区在高温回火, 如 600°C 回火时才能达到硬度峰值, 最高硬度可达 1200HV (图 8-17)。

W6Mo5Cr4V2 高速钢车刀采用 800WCO<sub>2</sub> 激光器熔化后, 于 560°C, 2h 回火, 熔化区深达 600~800 $\mu\text{m}$ , 结果提高了钢的硬度和韧性, 车削时切削寿命提高了 200%~500%。

(3) 激光合金化, 激光合金化是在工件表面上涂上合金元素粉末, 然后利用高能激光束使其快

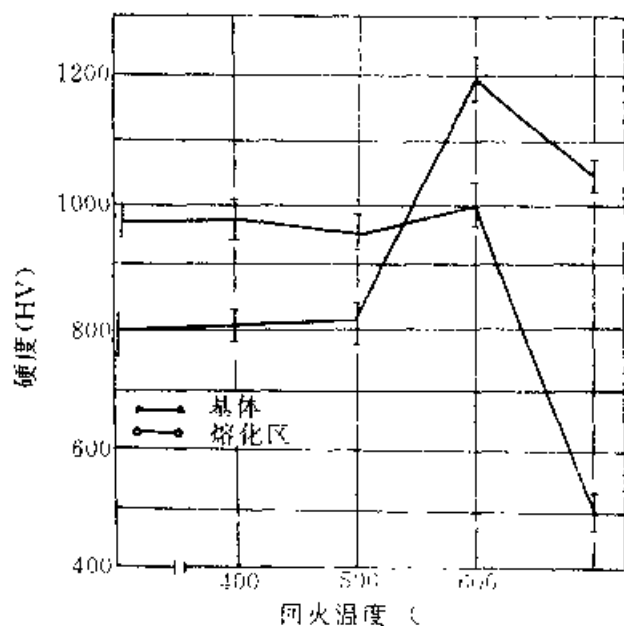


图 8-17 重熔区正常淬火区  
回火后的显微硬度

速熔化，在工作表面上形成一层合金层，以提高钢的耐磨性和热稳定性。用于激光合金化的常用元素和化合物有 C、WC、Co、BC 等粉末，再加添添加剂、粘结剂、混合后作成饱和涂料。

激光合金化的涂层厚度一般不超过 80~100μm，最好利用 10~40J 钹激光器熔化。用 Co（钴）激光合金化后，Co 溶入基体，提高了 α→γ 转变温度和回火稳定性，同时形成金属间化合物，并析出 M<sub>6</sub>C 碳化物，促进了弥散硬化，提高了一次硬化作用。表面软化温度比普通淬火提高了 350℃，比激光淬火提高了 70~100℃，刀具可承受 675~680℃ 的高温。

用 1KWCO<sub>2</sub> 激光器在 W6Mo5Cr4V2 高速钢表面采用 W 粉激光合金化，可以形成 80~100μm 的合金层，进行 560℃ 两次回火以后，把合金层磨削到 40~50μm。经这样处理的单刃车刀，切削寿命可以提高 600%。

## 8.4 工具热处理后的金相组织

几种有代表性的工具钢淬火及回火后的相组成如表 8-20。

### 8.4.1 普通工具钢热处理后的金相组织

#### 8.4.1.1 普通工具钢热处理后的相组成（体积分数）

亚共析钢 T7，共析钢 T8 由于没有过剩碳化

物，淬火后的组织中 91%~98% 为马氏体，仅有 2%~5% 的残留奥氏体。回火后钢中的残留奥氏体的数量没有变化，但有 3%~5% 的碳化物析出。这种钢的耐磨性主要取决于马氏体基体。

表 8-20 工具钢热处理后的相组成

钢 号	相组成 <sup>1</sup> (体积分数)			
	淬 火 后		回 火 后	
	碳化物	残余奥氏体	碳化物	残余奥氏体
T7	-	2~3	3	2~3
T8	-	2~3	1~5	4~7
T12	3~5	5~8	10~12	5~8
CrWMn	4~6	16~18	12~14	15~18
Cr12Mo	8~9	18~20	13~16	18~20
W18Cr4V	18~19	22~25	22~24	1~1
W6Mo5Cr4V2	13~16	20~22	20~22	1

1 基体为马氏体。

过共钢 T12 淬火后有 3%~5% 的碳化物未溶入奥氏体而保留下来，同时还有 5%~8% 的残留奥氏体未发生转变。回火后残留奥氏体数量不变，但有碳化物析出，使碳化物的数量增加到 10%~12%。碳化物数量的增加提高了钢的耐磨性。

CrWMn、Cr12MoV 等合金工具钢的情形与 T12 钢相似，只是淬火残留的碳化物与残留奥氏体数量更多。残留碳化物的数量达到 4%~9%，残留奥氏体的数量达到 16%~20%。回火后这两种钢的碳化物数量增加到 12%~16%，而残留奥氏体的数量不变（Cr12MoV 钢采用 1000℃ 淬火）。由于碳化物数量的增加，且碳化物为合金碳化物，因而这类钢比碳素工具钢有更高的耐磨性。

#### 8.4.1.2 普通工具钢热处理后的金相检验

碳素工具钢热处理后的金相检验主要是检查马氏体针的大小，用以衡量淬火加热是否恰当，有无淬火过热或淬火不足现象发生。图 8-18 为碳素工具钢淬火马氏体级别图。丝锥、铰刀淬火后的马氏体级别不应大于 3 级；手用锯条不应大于 2.5 级。马氏体级别过高，例如达到 4 级以上，说明淬火温度过高，工具的韧性下降。如果刀具的刃部发现有托氏体，说明淬火加热不足，这是不允许的。

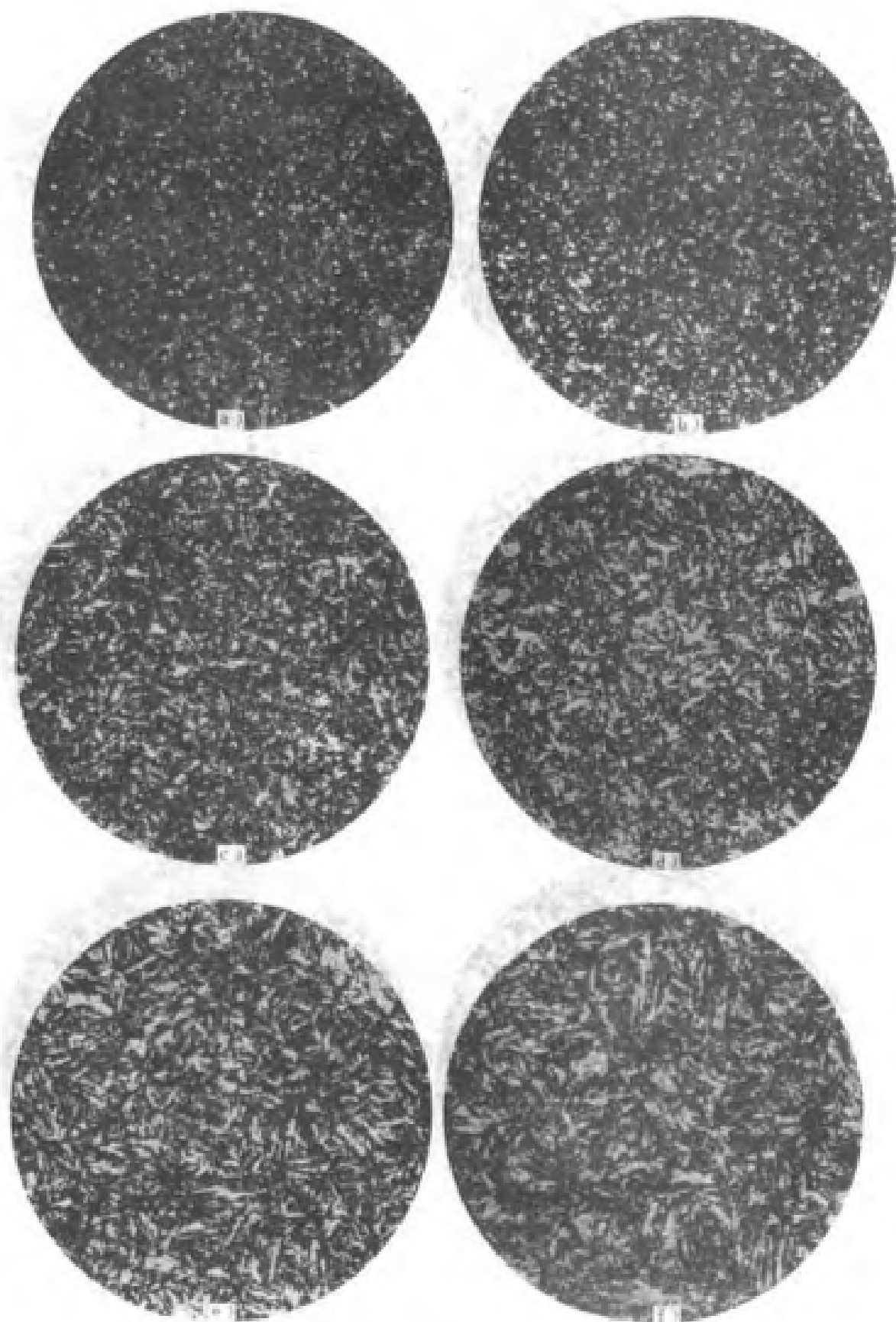


图 8-18 破索工具钢淬火马氏体级别  $m_0$  (硝酸酒精) 4% 侵蚀 500 $\times$   
a) 1 级 b) 2 级 c) 3 级 d) 4 级 e) 5 级 f) 6 级

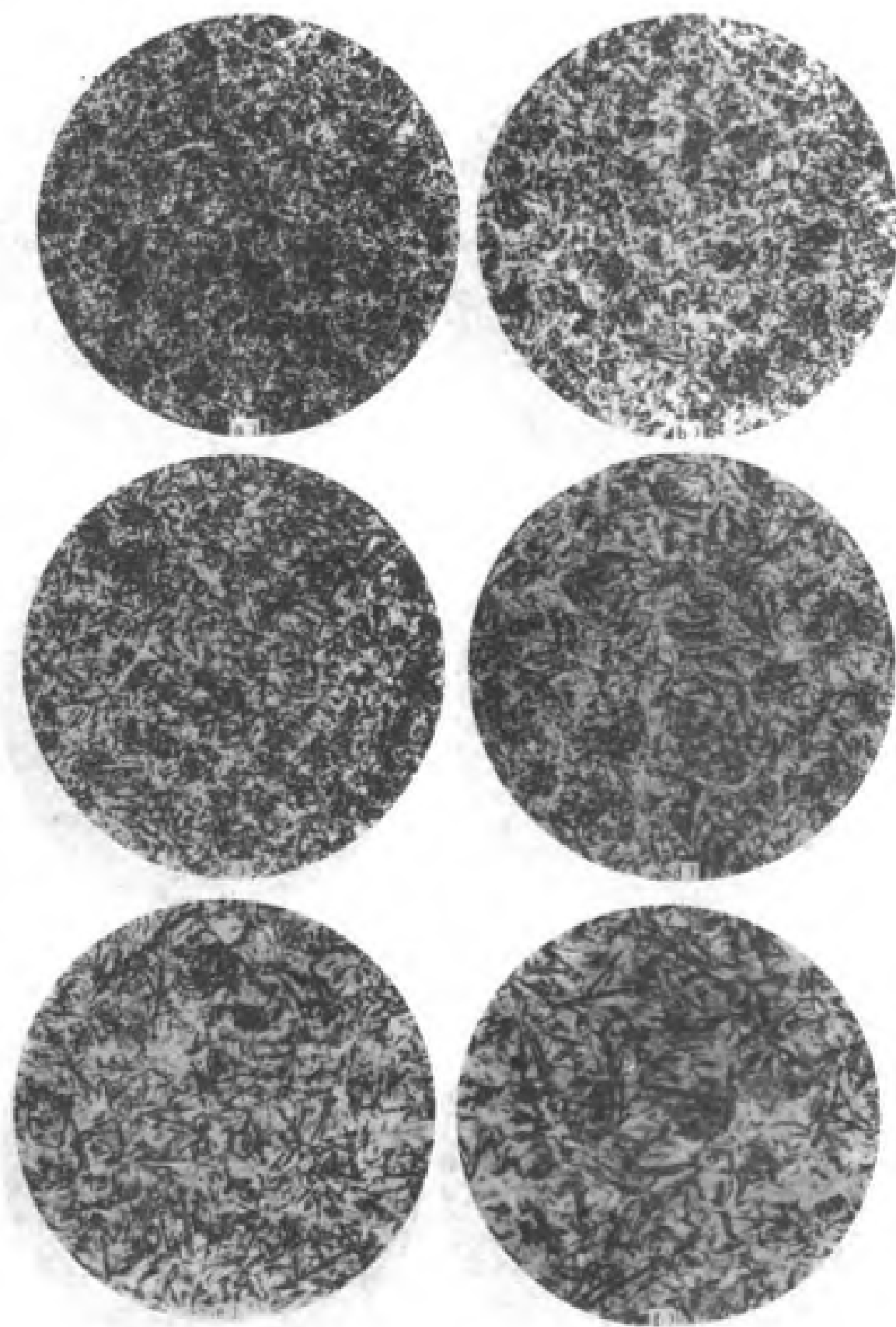


图 8-19 合金工具钢淬火马氏体级别 500×  
w (硝酸酒精) 4% 侵蚀  
a) 1 级 b) 2 级 c) 3 级 d) 4 级 e) 5 级 f) 6 级

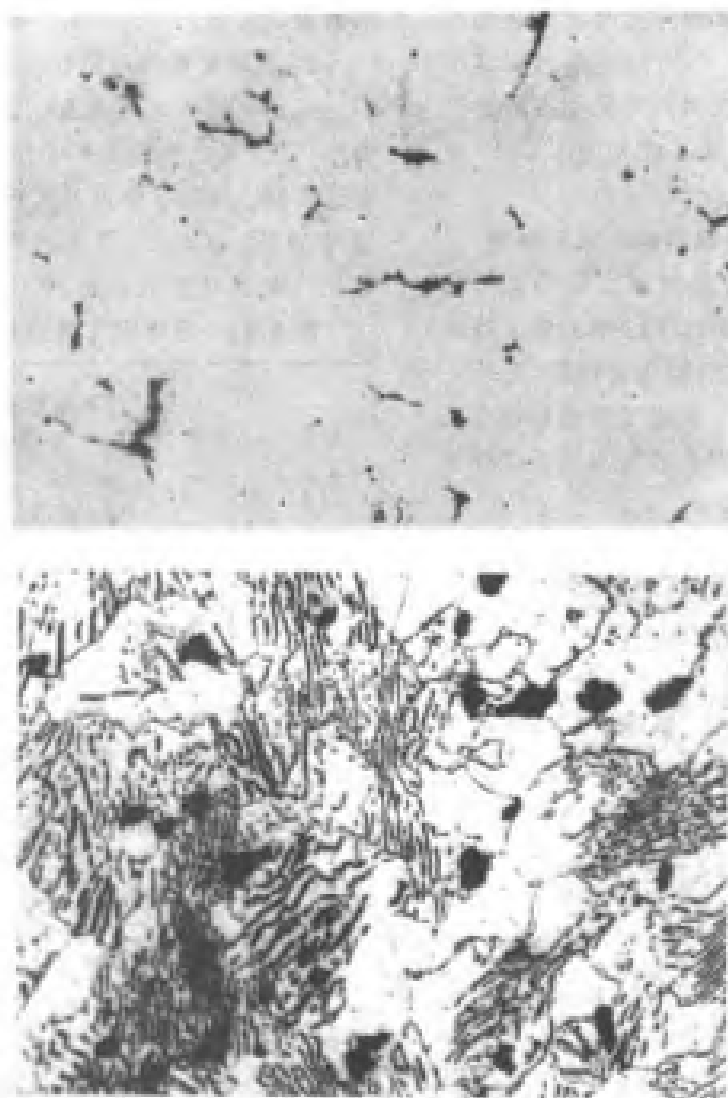


图 8-20 T12 钢退火石墨化 500×  
a) 未侵蚀 b) w (硝酸酒精) 4% 侵蚀

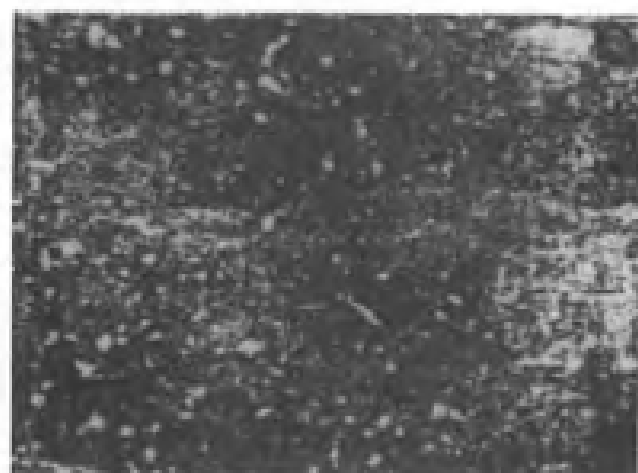


图 8-21 T12 钢淬火回火 (经回火) 500×  
w (硝酸酒精) 4% 侵蚀

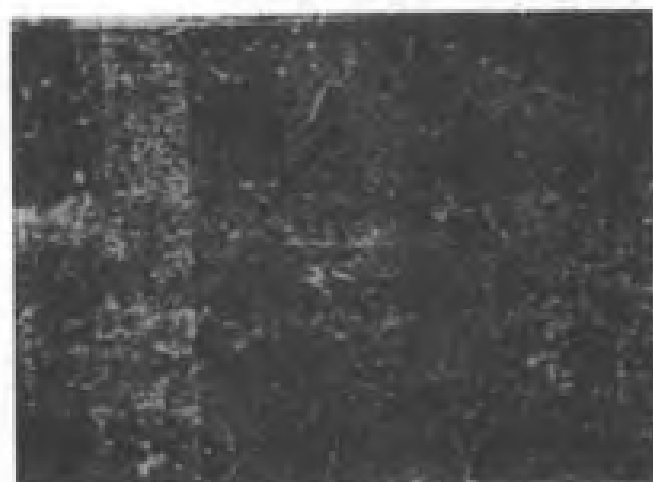


图 8-22 9SiCr 钢碳氮共渗 500×  
w (硝酸酒精) 4% 侵蚀

9SiCr 一类低合金工具钢淬火组织的金相检验仍以检验淬火后马氏体针的大小作为衡量标准。合金工具钢的淬火马氏体针的尺寸按图 8-19 来评定,丝锥、板牙、搓丝板不应大于 3.5 级;较刀不应大于 3 级。

#### 8.4.1.3 普通工具钢热处理后组织缺陷举例

普通工具钢热处理常见的组织缺陷如 T12 钢的退火石墨化(见图 8-20),T12 钢的淬火脱碳(见图 8-21),以及 9SiCr 钢的碳化物网等(见图 8-22)。图 8-18 和图 8-19 中,碳素工具钢和合金工具钢在淬火时形成的 1 级以上的粗大马氏体针也应视为淬火过热缺陷组织。

### 8.4.2 高速钢热处理后的金相组织

#### 8.4.2.1 高速钢热处理后的相组成

W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 两种高速钢淬火后的相组成如表 8-19 所示,在隐针马氏体基体上还保留有 14%~19% 的未溶碳化物及 20%~24% 的残留奥氏体。回火后碳化物量增加到 20%~24%,残留奥氏体减少到 1% 以下,碳化物数量的增加是由于回火时析出了二次碳化物,通常为  $M_2C$  和  $M_6C$ 。

高速钢淬火形成的隐针马氏体非常细小,在显微镜下难以评定,所以通常以晶粒的大小来评定。

#### 8.4.2.2 高速钢热处理后的金相检验

1. 淬火晶粒度 高速钢淬火晶粒度的评级图可参阅 ZBJ36003,其中 W6Mo5Cr4V2 等 Mo 系高速钢的晶粒度评级图如图 8-20。

高速钢淬火晶粒度的大小是淬火加热温度和保温时间的直接反映,它与钢的强度、韧性、耐磨性、红硬性和工具的使用寿命有密切关系,对车刀、大规格锥柄钻头要求耐磨性、红硬性较高且承受冲击较小的刀具,淬火晶粒度可以稍粗大些。对小规格钻头、中心钻、丝锥、细长拉刀等要求较高强度和韧性的刀具,淬火晶粒度可以稍细小些。

各种高速钢刀具的淬火晶粒度的参考数据如表 8-21,可根据刀具的生产和使用情况,从中选择最佳晶粒度范围。

在检查淬火晶粒度时,尚需考虑碳化物溶解情况。碳化物溶解情况目前尚无较好的检验方法,通常以淬火后每个晶粒内残留碳化物颗粒的多少

来衡量。

#### 2. 高速钢淬火过热程度的检验

高速钢淬火过热程度以碳化物形貌的变化来确定。根据碳化物沿晶界的伸长、拖尾及呈网状程度的不同,过热程度可分为 5 级,图 8-21 选择了适用 W6Mo5Cr4V2 等 Mo 系高速钢的 1 级过热图片(W 系高速钢参阅 ZBJ36003)。

表 8-21 高速钢工具金相检验技术要求

工具名称	规格 mm	淬火晶粒度级别 (号)		过热 程度 允许 级别	回火程 度允许 级别 (号)
		Mo 系	W 系		
直柄钻头	$\phi 3$ $\phi 3 \sim 20$	10.5~12 9.5~11	12~13 10~10.5	$\leq 1$ $\leq 2$	
中心钻		10~11 9.5~11		$\leq 1$	
锥柄钻头	$\phi 30$ $\phi 30$	9.5~11 9~10.5	9~10.5 8.5~10	$\leq 2$ $\leq 2$	
切刀、 锯片铣刀		10~11.5 9.5~11	9.5~11	$\leq 2$	$\leq 2$
铰、较刀		9.5~11	9~10.5	$\leq 2$	
车刀	$\leq 16 \times 160$ $> 16 \times 160$	8~10 8~10	8~10	$\leq 2$ $\leq 3$	
内轮刀具		9.5~11	9~10.5	$\leq 2$	
螺纹刀具		10~11.5	9.5~11	$\leq 1$	
拉刀		9.5~11	9~10.5	$\leq 1$	

高速钢刀具产生严重淬火过热时,脆性增加,容易产生崩刃,甚至不能切削。各种刀具的允许过热级别见表 8-21。

高速钢过热程度的检验,在回火后进行较好。回火后钢的基体侵蚀后变黑,能更准确地判断过热级别。

3. 高速钢回火程度的检验 高速钢正常回火后,基体组织为黑褐色。回火不充分时基体颜色变淡,甚至有时会出现晶界。根据基体组织对侵蚀的接受能力,可以判断回火是否充分。

回火程度的检验受侵蚀剂的浓度、侵蚀温度和时间影响较大。对 1% 的硝酸酒精(质量分数)溶液规定侵蚀规范为:

20~27°C, 3~5min

26~30°C, 1~2min

> 30°C, < 1min

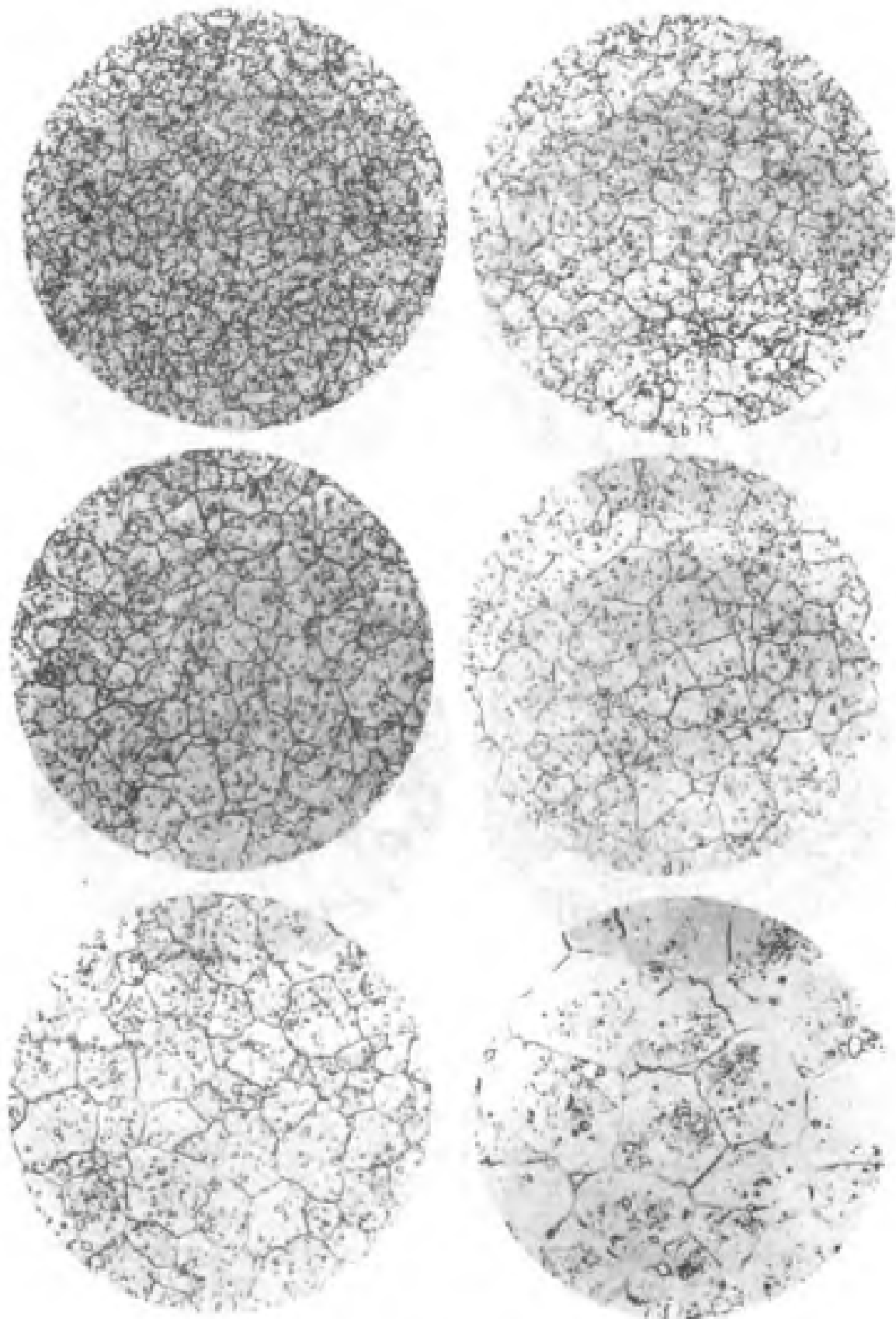


图 8-23 高速钢淬火晶粒度 (Mo 系) 500×  
 w (硝酸酒精) 4% 侵蚀  
 a) 11 号 b) 10.5 号 c) 10 号 d) 9.5 号 e) 9 号 f) 8 号



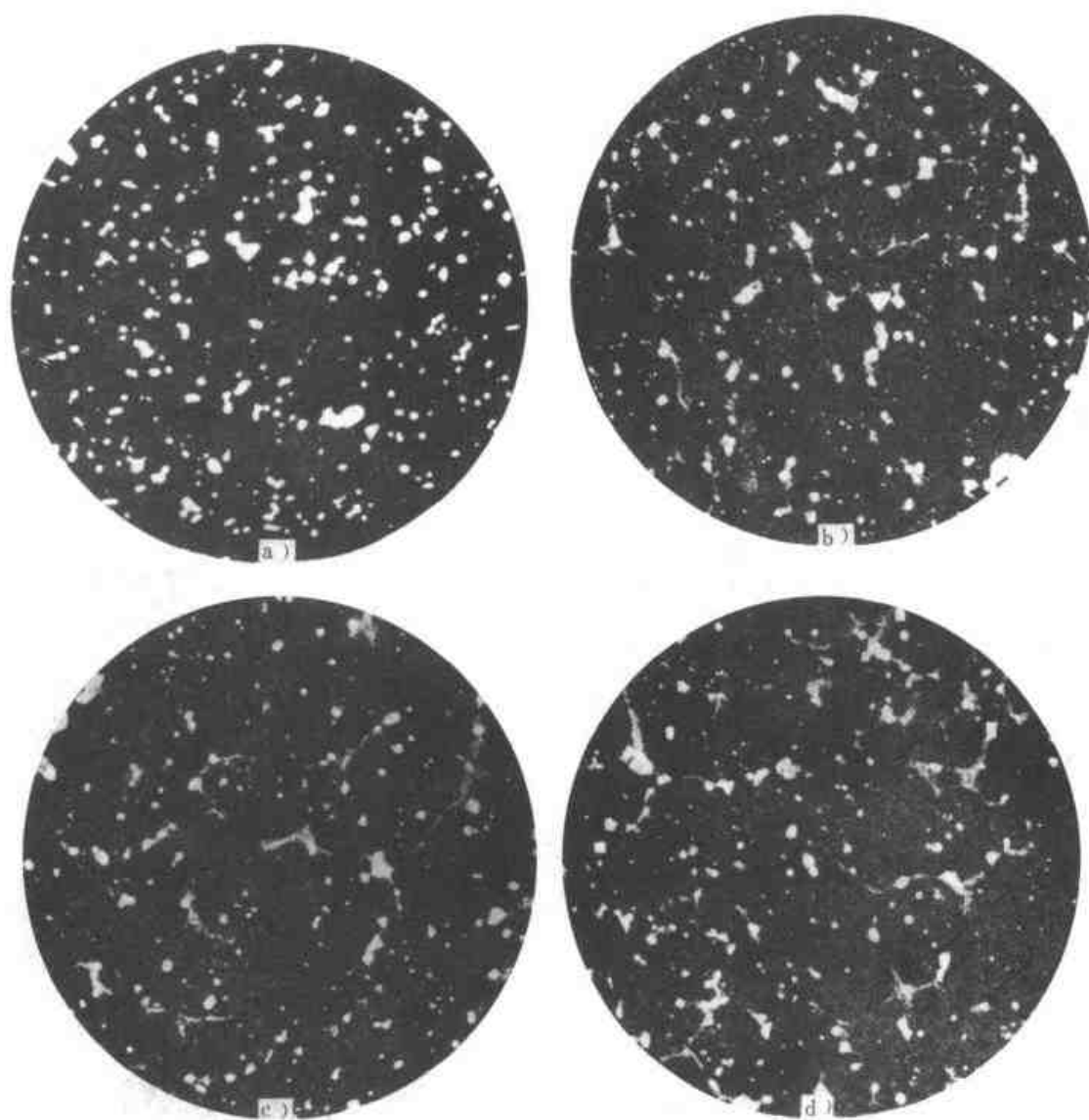


图 8-24 高速钢过热级别图 (Mo 系) 500×

$w$  (硝酸酒精) 4% 侵蚀

a) 1 级 b) 2 级 c) 3 级 d) 4 级

图 8-25 为 W6Mo5Cr4V2 等 Mo 系高速钢回火程度级别图, 1 级和 2 级为回火充分和正常回火, 3 级为不回火充分。W 系高速钢和大尺寸高速钢回火级别图另有规定。大规格高速钢碳化物偏析严重, 碳化物聚集处, 奥氏体的合金化程度高, 不易受侵蚀, 容易显示回火不充分。

#### 8.4.2.3 高速钢热处理后的组织缺陷举例

高速钢热处理后常见的组织缺陷如图 8-26 所示的淬火脱碳组织、图 8-27 所示的淬火过烧组织及图 8-28 所示的淬火蔡状断口组织。蔡状断口组织的重要特征是晶粒大小不均, 有个别粗大晶粒。图 8-24 中的严重过热也属于组织缺陷。

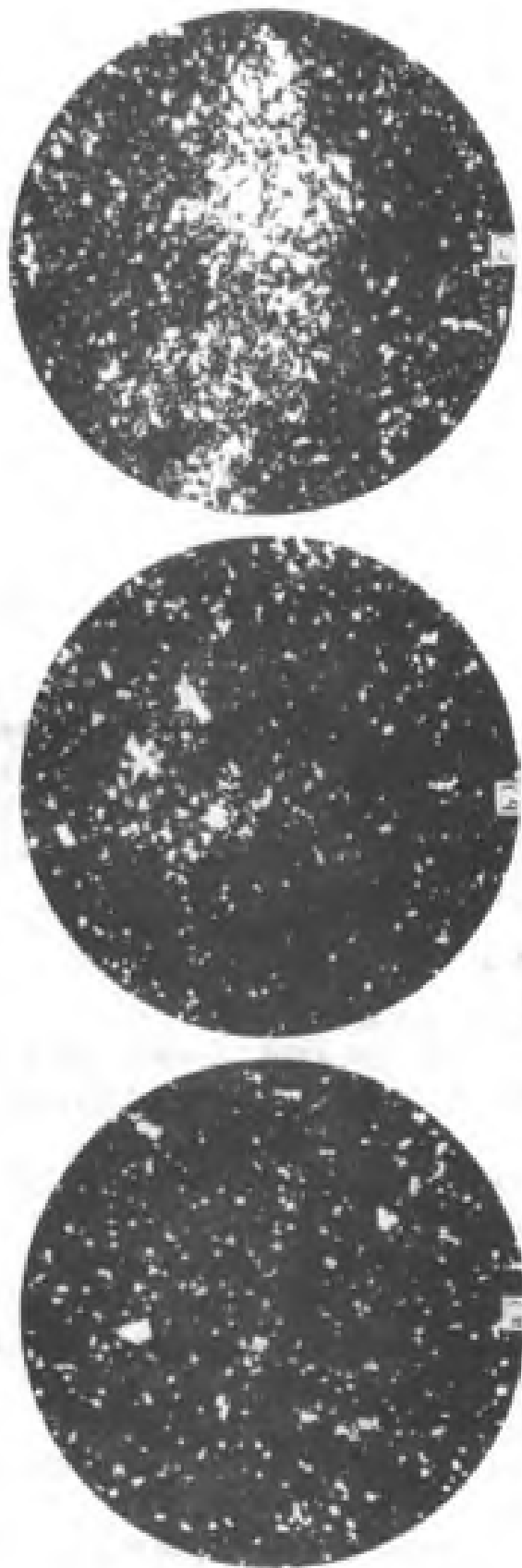


图 8-25 高速钢四次程度组织图(Mn 系) 500×  
w(硝酸酒精)4%侵蚀  
a)1级 b)2级 c)3级

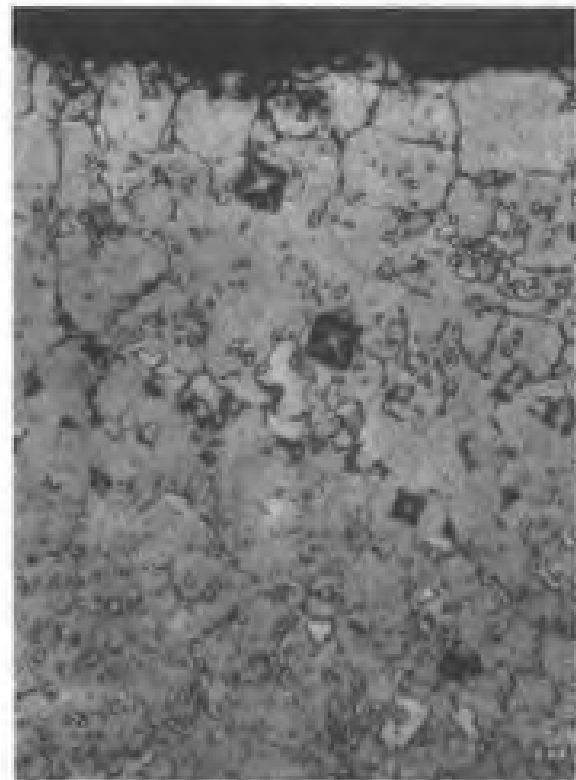


图 8-26 W18Cr4V 钢淬火回火组织 500×  
w(硝酸酒精)4%侵蚀

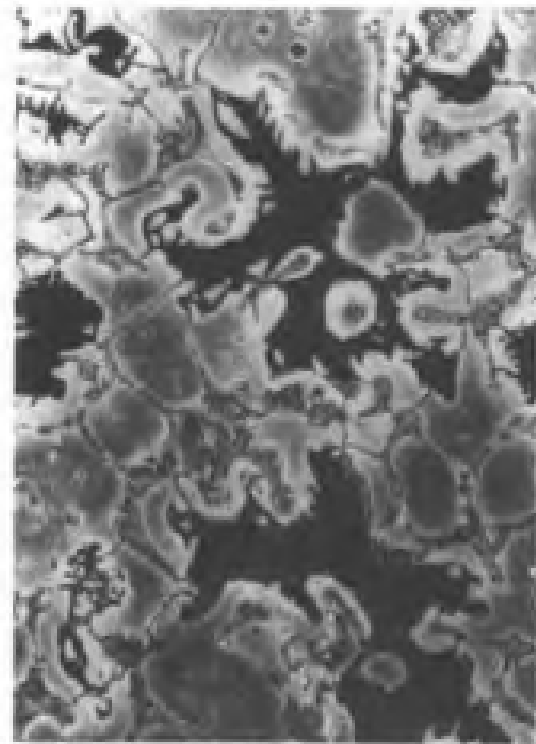


图 8-27 W18Cr4V 钢淬火回火组织 500×  
w(硝酸酒精)4%侵蚀

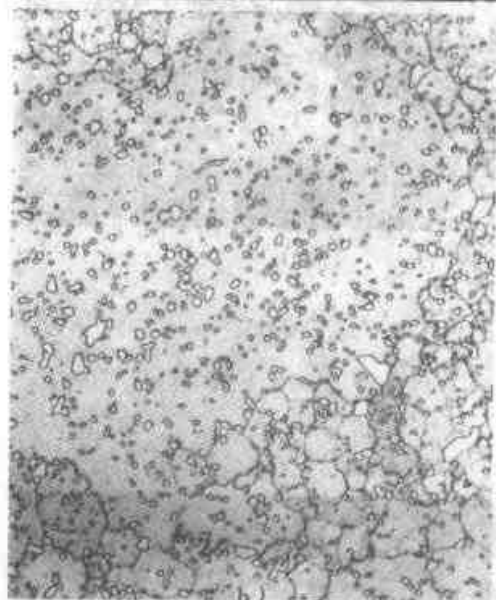


图 8-28 高速钢的钻头断口 500×  
a) 钻头断口 b) 断口的金相组织  
w(硝酸酒精) 4% 侵蚀

## 8.5 典型工具的热处理

### 8.5.1 锉刀的热处理

#### 8.5.1.1 技术要求

锉刀要求高的硬度和耐磨性。通常用 T12 钢制造。热处理的关键是防止齿部淬火脱碳和要求有熟练的矫直技术。

锉刀的技术要求如下:

硬度: 刃部 64~67HRC, 柄部  $\leq 35$ HRC。

淬硬深度: 齿尖以下  $> 1$ mm。

金相组织: 马氏体  $< 3$  级, 齿部无脱碳层。

畸变: 弯曲  $< 0.1$ mm/100mm。

#### 8.5.1.2 热处理工艺

锉刀的热处理工艺路线为: 加热→冷却→热矫直→冷透→清洗→回火→清洗→检查。

为防止锉刀淬火加热时氧化、脱碳, 可采用高频感应快速加热或在含有黄血盐的盐浴中进行加热, 也有的在含有氰盐的盐浴中加热。

含氰盐的盐浴成分见“手用锯条的热处理”。含黄血盐的盐浴成分(质量分数)为: 黄血盐 35% + 碳酸钠 15% + 氯化钠 50%。其中黄血盐成分可在 10%~40% 范围内选择, 但一般盐浴中的氰根 ( $\text{CN}^-$ ) 需控制在 5% 以上, 以免产生脱碳。

锉刀的热处理工艺:

淬火温度: 750~790℃。

冷却介质: 低于 30℃ 的盐水或清水。

回火: 160~180℃, 45~60min。

#### 8.5.1.3 工艺说明

(1) 小锉刀采用较高的淬火温度, 在碱浴中冷却。

(2) 淬火热矫直系指锉刀在水中冷却到 180~200℃, 取出在水槽边手工矫直的方法。要准确掌握水中冷却时间, 出水过早, 会因自热回火降低表面硬度; 出水过晚, 则因锉刀完全淬硬, 增加矫直困难, 甚至造成裂纹或折断。锉刀应在短时间内矫直好, 然后完全浸入水中冷透。

### 8.5.2 手用锯条的热处理

#### 8.5.2.1 技术要求

手用锯条要求高硬度、高耐磨性、较好的韧性和弹性, 通常用 T10、T12 钢或 20 钢渗碳制成。

硬度: 齿部 82.5~84.5HRA, 销孔处:  $< 74$  HRA。

显微组织: 马氏体  $< 3$  级。

畸变: 侧面弯曲  $< 1.2$ mm, 平面弯曲  $< 1.5$  mm, 锯条弯成直径 200mm 的半圆不断, 畸变不超差。

#### 8.5.2.2 热处理工艺

T10、T12 钢手用锯条的热处理规范如表 8-22 所示。

锯条材料如用 20 钢, 可采用液体渗碳直接淬火。渗碳剂的盐浴配方(质量分数):

尿素 40% + 碳酸钠 28% + 氯化钾 20% + 氯化钠 12%。

表 8-22 高碳钢锯条热处理规范

预热	加热	冷却	回火	销孔处理	备 注
					为防止淬火加热时氧化、脱碳,可用下列成分(质量分数)盐浴加热: NaCN20%, NaCl60%, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 20%,CN控制在5%~6%
650~720℃	770~790℃	油淬	175~185℃ 45min	550~650℃ 5~10s 回火	

手用锯条淬火时,为减少侧弯,应采用合适的夹具,使锯条处于张紧状态下冷却淬硬。淬冷时产生的平面弯曲,可置于压紧的夹具中,在回火时压平。

大量生产时,可采用高频感应淬火。由于高频淬火只淬硬锯齿和齿背,锯条韧性好可大大减少锯条使用时的折断现象。同时高频淬火容易实现机械化、自动化,提高生产效率、改善劳动条件,也有采用双金属锯条,和试用低碳钢锯条,刃口进行表面离子渗钨、铬等高速钢成分元素,效果颇好。

### 8.5.3 手用丝锥的热处理

#### 8.5.3.1 技术要求

手用丝锥是在手工和低速加工条件下使用的刀具。齿部要求高的硬度和耐磨性,心部要求高的强度和韧性。材料为 T12A 钢。

刃部硬度: M1~3 丝锥 59~61HRC; M3~8 丝锥 60~62HRC; >M8 丝锥 61~63HRC。

柄部硬度: 30~45HRC (< M12, 30~55HRC)。

淬火马氏体≤3 级。

#### 8.5.3.2 热处理工艺

手用丝锥的热处理工艺如表 8-23 所示。

#### 8.5.3.3 工艺说明

(1) 在原材料与机械加工滚丝尺寸正常的情况下,较大规格(>M8)的手用丝锥采用较高的淬火温度和较低的等温温度,以得到较高的淬火硬度和淬透深度。较小规格的丝锥采用较低的淬火温度和较高的等温温度,以得到较高的韧性。

表 8-23 手用丝锥的热处理工艺规范

预热	加热	冷 却			柄部处理	回火
		≤M12	M12~25	>M25		
600~650℃	770~790℃	200~220℃ 硝盐等温 30~40min	180℃碱浴分级后 在硝盐中 等温	水油双介 质淬火	600℃ 10~60s 水冷	180~220℃ 90~120min

(2) 滚压后中径尺寸接近公差上限的丝锥,应在保证硬度的前提下,采用下限淬火温度和上限等温温度,以减少中径尺寸淬火、回火后的增量。中径尺寸接近公差下限者,应在保证显微组织合格的前提下,采用上限淬火温度和下限等温温度,以增加淬火、回火后的尺寸增量。

(3) 应控制好等温时间,等温后冷至室温检查硬度,根据淬火硬度确定回火工艺。

(4) 由于手用丝锥淬火时柄部和刃部一起硬化,淬火后必须进行柄部退火。柄部退火可以采用高频或盐浴加热。盐浴加热采用快速回火,加热后水冷,加热位置,只准柄部的 1/2~1/3 浸入盐浴中。

### 8.5.4 圆板牙的热处理

#### 8.5.4.1 技术要求

圆板牙要求较高的耐磨性和韧性,常用 9SiCr 钢制造。

硬度: 60~63HRC。

淬火马氏体<3 级。

螺纹中径控制在要求范围之内。

#### 8.5.4.2 热处理工艺

圆板牙热处理工艺路线为:

预热→加热→冷却→检查→回火→清洗→检查→发黑→外观检查。

工艺规范如表 8-24。

#### 8.5.4.3 工艺说明

(1) 由于大直径钢材的中心组织比小直径的差,因此大规格圆板牙常采用稍低的淬火温度。

(2) 提高等温温度,易使板牙螺纹中径胀大,反之则缩小。在实际生产中,大规格的圆板牙趋向于缩小,小规格趋向于胀大。因此,大规格圆板牙的等温温度比小规格的高。通过等温温度可以控制螺纹中径尺寸。

表 8-24 圆板牙热处理工艺规范

预 热	加 热	冷 却 方 法 (规 格)					回 火
		M1~2.5	M3~5	M6~9	M10~15	M16~24	
600~650℃	850~870℃	160~170℃ 30~45min	170~180℃ 30~45min	180~190℃ 30~45min	190~200℃ 30~45min	200~210℃ 30~45min	190~200℃ 90~120min

(3)根据圆板牙的淬火硬度,确定回火工艺规范。

### 8.5.5 手用铰刀的热处理

#### 8.5.5.1 技术要求

手用铰刀常用材料为 9SiCr 钢。

硬度:  $\phi 3 \sim 8$  62~64HRC;  $> \phi 8$  63~65HRC。

柄部硬度: 30~45HRC。

手用铰刀的弯曲畸变量根据直径和长度不同,定为 0.15~0.3mm。

#### 8.5.5.2 热处理工艺

热处理工艺路线为:

预热→加热→冷却→矫直→回火→清洗→硬度检查→发黑→外观检查。

手用铰刀可采用整体淬火,然后进行柄部退火。柄部退火可采用 600℃ 硝盐加热 20~40s 水冷或在 820~830℃ 盐浴中加热 8~20s,淬入 150~180℃ 硝盐,冷却 30s 以上,也可采用高频加热。

铰刀的热处理工艺如表 8-25。

表 8-25 手用铰刀热处理工艺规范

预 热	加 热	冷 却		回 火	
		$\phi 3 \sim \phi 13$	$\phi 13 \sim \phi 50$	$\phi 3 \sim \phi 8$	$\phi 10 \sim \phi 50$
600~650℃	850~870℃	160~180℃ 硝盐	$\leq 80^\circ\text{C}$ 油冷至 100~150℃	170~180℃ 90~120min	140~160℃ 90~120min

#### 8.5.5.3 工艺说明

(1)为了减少铰刀淬火弯曲,淬火前可作去应力退火。

(2)为减少直径小于 13mm 铰刀的畸变,淬火温度可取下限,采用在硝盐浴中进行马氏体分级淬火。对于直径大于 13mm 的铰刀,为提高其

淬透性,可采用上限淬火温度,热油冷却。

(3)对切削部分较长、淬火弯曲超差的铰刀可采用下列方法矫直:

1)淬火矫直:铰刀淬火后利用余热进行矫直,适用于小批量或大规格铰刀的矫直。

2)夹具矫直:把畸变超差的铰刀置于夹具中(图 8-29),给弯曲部分加压,然后连同夹具一起浸到 140~160℃ 的硝盐中,加热 10min 取出水冷。经检查合格后作稳定化处理。此方法适用于大量生产或对淬火矫直后未合格铰刀的稳定化处理。

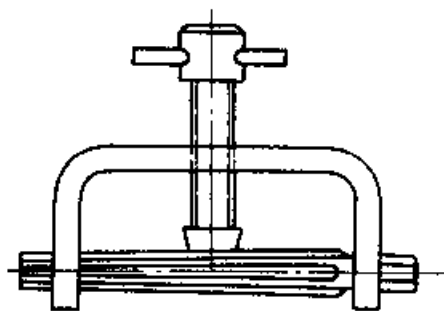


图 8-29 铰刀夹具矫直示意图

### 8.5.6 搓丝板的热处理

#### 8.5.6.1 技术要求

搓丝板是滚压螺纹的工具,工作时内部受强烈的冲击载荷和挤压力,通常因磨损或疲劳失效。搓丝板常用 9SiCr 或 Cr12MoV 钢制造。

硬度:齿部以下 3~5mm 为 58~61HRC。

基体:淬火马氏体<3 级。

齿面无脱碳。畸变在公差范围内。畸变是热处理过程中的关键问题。

#### 8.5.6.2 热处理工艺

9SiCr 钢或 Cr12MoV 钢搓丝板都可以采用盐浴炉或真空炉热处理。

1. 9SiCr 钢搓丝板盐浴炉热处理 热处理工艺路线为:

预热→加热→冷却→清洗→回火→清洗→硬度检查→发黑→外观检查。

热处理工艺规范如表 8-26。

表 8-26 9SiCr 钢搓丝板盐浴炉  
热处理工艺规范

预 热	加 热	冷 却		回 火
		$\leq M6$	$> M6$	
600~ 650℃	860~ 870℃	170~ 180℃ 硝盐	$\leq 80^\circ\text{C}$ 油冷	210~230℃ 2~3h

### 2. Cr12MoV 钢搓丝板真空热处理

Cr12MoV 钢搓丝板具有较高的耐磨性,采用真空热处理畸变小,容易满足齿高畸变的要求。真空热处理也减少了齿面脱碳的可能性,有利于提高搓丝板的使用寿命,是先进的热处理方法。具体热处理规范如表 8-27。

表 8-27 Cr12MoV 钢搓丝板的  
真空热处理工艺规范

第一次预热	第二次预热	淬火加热	冷却	回火
850℃, 10min 真空度: 0.133Pa	980℃, 10min 真空度: 1.33Pa	1650℃, 10min 真空度: 13.33Pa	真空 油	170℃ 1.5h、 2次

### 8.5.6.3 工艺说明

1. 盐浴淬火畸变的控制 搓丝板在滚压齿形过程中,由于金属塑性流动阻力的影响,使齿面形成中部外凸的形状。淬火时希望齿面产生内凹趋向,以抵消成形时造成的外凸形状。

盐浴淬冷时,常借提高齿面冷却速度的方法使齿面产生内凹,这可借助于图 8-30 的夹具。由于两块搓丝板相背,齿面向外,在背部垫有一定厚度的铁板,从而使齿面形成比背面较快的冷却速度。一般通过背部垫不同厚度的铁板来达到调节冷却速度的目的。一般大规格的搓丝板应采用较薄的铁板,动块又稍薄于静块。

2. 畸变超差的矫正 搓丝板通常由于纵向平行度超差而不合格。对轻微超差者可在磨底平面时,垫些纸片作少量修正。对超差过多者则必须矫正。

(1) 内凹超差,搓丝板内凹齿面超差,可采用背面热点法矫正(图 8-31)。为防止热点引起裂纹,搓丝板应先在 180℃ 硝盐中预热 30~60min,

然后取出擦去附着的盐,悬空放置。以后用氧-乙炔火焰热点,热点处表面的温度和热影响区以不影响齿部硬度为原则。热点后空冷。经 180~200℃ 去应力回火 1~2h 后,清洗、上油防锈。

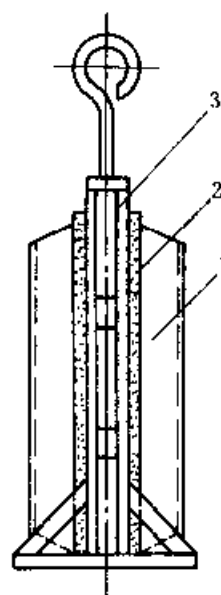


图 8-30 搓丝板淬火夹具示意图

1—搓丝板 2—铁板 3—夹具

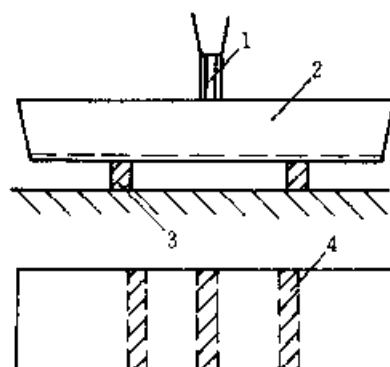


图 8-31 齿面内凹热点矫直示意图

1—火焰 2—搓丝板 3—垫块 4—热点位置

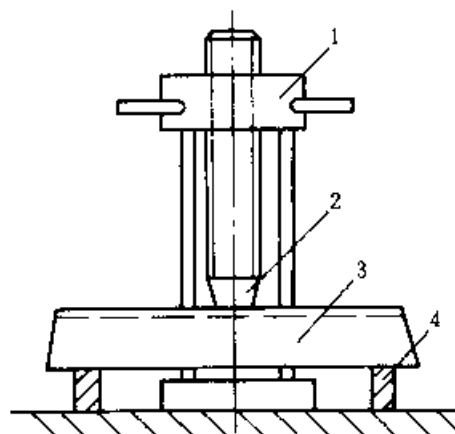


图 8-32 齿面外凸热点矫直示意图

1—矫直机 2—螺纹压头 3—搓丝板 4—垫块

(2) 外凸超差, 搓丝板外凸超差时, 可在背面局部加热, 将背面向上, 在矫直机上加压矫正 (图 8-32), 保持压力至室温。为避免加压时损伤齿部, 压头应作成与搓丝板螺距相同的螺纹压头。

### 8.5.7 滚丝轮的热处理

#### 8.5.7.1 技术要求

滚丝轮是外螺纹滚压工具, 工作时刃部承受冲击和摩擦, 要求高强度、高耐磨性和好的韧性。滚丝轮一般用热处理畸变小, 淬透性好, 耐磨性高的 Cr12 型钢制造, 目前应用较多的是 Cr12MoV 钢。

硬度: 59~62HRC。要求表面不脱碳、无麻点。

#### 8.5.7.2 热处理工艺

根据螺纹成形方法的不同, 滚丝轮可分为滚制和磨制的两种, 其热处理工艺与设备也随之不同。

1. 滚制滚丝轮 由于螺纹滚压成形后不再进行磨削加工, 因此热处理操作中, 要减少畸变和防止腐蚀麻点。盐浴加热容易在齿部形成麻点, 早期采用箱式电阻炉装箱封闭 (以木炭为保护介质) 加热, 近来已为较先进的真空加热、氮气冷却的真空空气淬所代替。真空热处理的工艺规范如表 8-28。

表 8-28 滚丝轮热处理工艺规范

工艺	滚制滚丝轮 (真空加热)	磨制滚丝轮 (盐浴加热)
预热	800~850°C, 60s/mm 真空度: 6.7~ 1.3×10 <sup>2</sup> Pa	600~650°C 60s/mm 800~850°C 30s/mm
加热	1020~1040°C, 40~60s/mm 真空度: 6.7~ 5.3×10 <sup>1</sup> Pa 氮	1090~1110°C 15~20s/mm
冷却	真空度: 8.1~ 8.8×10 <sup>1</sup> Pa 氮, ≤180°C 出炉	180~250°C 硝盐 20min (或 ≤120°C 热油)
回火	第一次 200~220°C 3h 第二次 180~200°C 2h	① 450~520°C 硝盐 2h ② -70~ -80°C 30~40min ③ 450~520°C 硝盐 2h

#### 2. 磨制滚丝轮 热处理工艺路线:

预热→加热→冷却→回火→清洗→冷处理→回火→清洗→硬度检查→发黑 (或喷砂)→外观检查。

由于热处理后才磨制螺纹, 因此对表面质量要求不太高。热处理加热可以在盐浴炉中进行, 常采用淬火和高温回火, 以得到二次硬化的效果。二次硬化的工具脆性稍大, 因此应当降低淬火加热温度, 其规范如表 8-28。

#### 8.5.7.3 工艺说明

滚制滚丝轮的热处理采用真空热处理寿命高、外观好。如条件暂不具备, 仍采用木炭装箱方法, 其工艺大体为: 800~850°C 预热, 900~950°C 二次预热, 1010~1030°C 保温 50~60min 后淬火, 180~250°C 硝盐冷却 20~30min 或油冷。200~240°C 2~4h 回火。

### 8.5.8 车刀的热处理

#### 8.5.8.1 技术要求

车刀要求高的耐磨性、红硬性, 热处理硬度在 64HRC 以上, 通常以高硬度为好。

热处理后车刀的弯曲允许量, 依规格不同为 0.15~0.30mm。

为了满足车刀的高耐磨性、高红硬性的要求, 尤其是切削用量较大及切削难加工材料和切削长工件时中间不得换刀等情况, 应采用高碳、高碳高钒、甚至含钴高速钢, 如 9W6Mo5Cr4V2、W12Cr4V5Co5, W6Mo5Cr4V2Al, W6Mo5Cr4V3 等。加工软材料时可用一般高速钢或合金钢。

#### 8.5.8.2 热处理工艺

车刀热处理工艺路线为:

预热→加热→冷却→(矫直)→清洗→回火→清洗→表面整理→检查。

1. 淬火加热 车刀淬火加热通常使用盐浴炉。在 850°C 左右预热。加热温度和加热时间可参考表 8-29 和图 8-33 (系指在足够功率的盐炉中, 装炉量较大情况下的加热时间系数)。

车刀淬火加热的特点是温度高, 最高温度约在钢的熔点以下 20°C 左右, 因此小颗粒碳化物充分溶解; 晶粒粗大, 具有轻度过热组织, 但不允许出现碳化物网、莱氏体等严重过热或过烧组织, 以免力学性能过分降低。

2. 淬火冷却 车刀淬火通常采用油冷或在

580~620℃的盐浴中等温冷却。对厚度 $\leq 12\text{mm}$ 、长度达205mm的车刀,为减少畸变,可在240~280℃,保温1.5~2h,作分级淬火。

表 8-29 几种高速钢车刀淬火加热温度

钢 号	车刀断面尺寸 /mm	加热温度 /℃	晶粒度
W6Mo5Cr1V2	$\leq 9 \times 9$	1235~1245	9~9.5
	$9 \times 9 \sim 26 \times 26$	1240~1250	8.5~10
W18Cr4V	$\leq 9 \times 9$	1290~1300	8.5~9.5
	$9 \times 9 \sim 26 \times 26$	1300~1310	8~9
CW6Mo5Cr4V	$\leq 9 \times 9$	1215~1225	9~9.5
	$9 \times 9 \sim 26 \times 26$	1220~1230	8.5~10

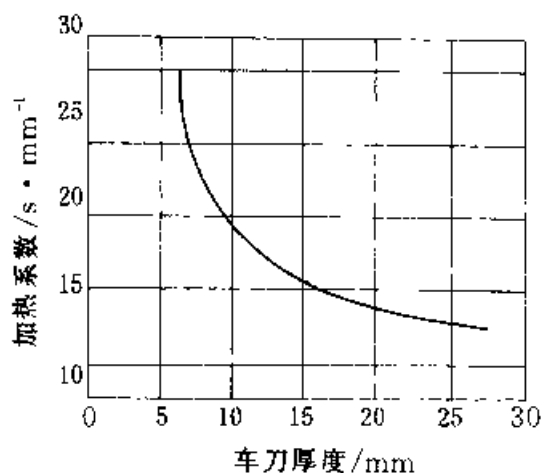


图 8-33 车刀淬火加热系数

车刀在直立装卡时,一般淬火后不经矫直就能达到畸变限度。对细长车刀,可在油冷或分级淬火后于室温下冷矫直。

3. 回火 一般采用560℃二次回火,每次保温1~1.5h。也可在560℃二次回火,每次保温2~2.5h。

在淬冷后进行-70~-80℃深冷处理,然后作两次回火,可提高车刀的切削性能。

## 8.5.9 拉刀的热处理

### 8.5.9.1 技术要求

拉刀是低速切削的工具,要求有较高的力学性能、耐磨性和适当的红硬性。拉刀通常用高速钢制造,热处理后硬度要求为:切削齿、精切齿部分63~67HRC;前后导向部分 $\geq 50\text{HRC}$ ;柄部为40~52HRC。

拉刀热处理后畸变限度如表 8-30

表 8-30 拉刀热处理后偏摆允许量

全长/mm	直 径 /mm		
	$\leq 50$	50~90	$> 90$
	偏 摆 量 /mm		
$\leq 900$	0.25	0.30	0.35
900~1200	0.30	0.35	0.40
$> 1200$	0.35	0.40	0.40

### 8.5.9.2 热处理工艺

拉刀热处理工艺路线为:

预热→加热→冷却→热矫直→(清洗)→回火→(热矫直)→回火→柄部处理→清洗→检查→表面处理。

淬火加热通常用盐浴炉,回火用电阻炉或盐浴炉。

1. 预热 一般拉刀在800~870℃预热一次,时间为加热时间的2~3倍。直径 $\geq 60\text{mm}$ 时,需经550~600℃低温预热,保温1h以上(空气炉),然后进行中温预热。

2. 加热 在保证硬度合格的前提下,为减少畸变应选用较低的淬火温度和较长的保温时间。具体加热温度和加热系数可参考表 8-31 和图 8-34。

表 8-31 拉刀淬火加热温度

钢 号	拉刀直径/mm	加热温度/℃
W18Cr4V	$\leq 50$	1270~1280
	50~90	1265~1275
	$> 90$	1260~1270
W6Mo5Cr4V2	$\leq 50$	1215~1225
	50~90	1210~1220
	$> 90$	1205~1215

3. 冷却 按生产条件和需要可选用以下方式:

(1) 油冷,加热后的拉刀在60~120℃油中冷却,待表面冷却到200~300℃后(小拉刀的温度应在上限),取出热矫直。为减少拉刀畸变,应注意油槽温度的均匀性,并使用静止的油淬。

(2) 短时间等温,拉刀在580~620℃的氯化盐中分级,待表面温度冷却到650~700℃时,转



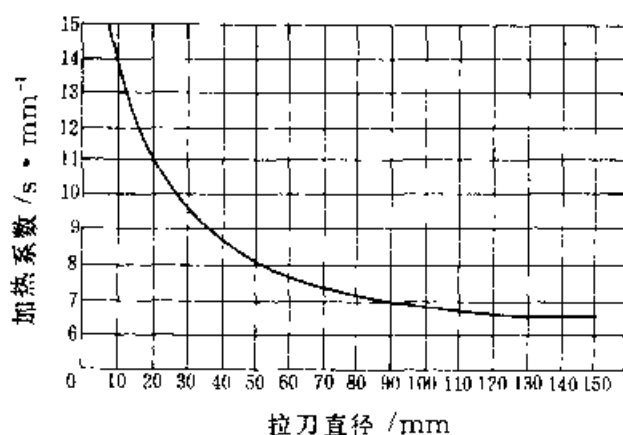


图 8-34 拉刀淬火加热系数

入 240~280℃ 硝盐中等温 30~40min, 再取出热矫直。直径较大的拉刀 ( $\geq \phi 70\text{mm}$ ) 应采用二次等温, 即在 580~620℃ 保持后转入等温炉前, 需在 450~550℃ 硝盐中保持。

(3) 长时间等温, 拉刀分段冷却后, 在 240~280℃ 等温 3h, 空冷至室温, 清洗后冷矫直。

1. 述油冷和短时间等温的大型拉刀, 在冷却到 200℃ 左右时, 将导向部分浸入中温盐浴中加热 (浸入深度 20mm), 可减少顶针孔开裂的危险。同时, 在拉刀冷至室温前, 不能清洗, 清洗时应将水煮沸, 以防产生裂纹。

4. 回火 拉刀回火温度为 550~570℃, 保温 1~3h, 一般回火 3 次。长时间等温冷却的拉刀回火 4~5 次。回火应及时, 一般拉刀冷至室温后在 2~4h 内进行回火。易裂的大型拉刀应在冷至室温前 (150℃ 左右) 就回火, 需回火 4 次。

5. 柄部处理 加热温度为 890~910℃, 保温时间按 12~18s/mm 计算, 油冷或在 250℃ 左右的硝盐中冷却, 小型拉刀可进行空冷。

### 8.5.9.3 矫直

拉刀矫直前, 先正确找出弯曲位置, 弯曲方向和弯曲量。然后按拉刀的尺寸和工序选择不同类型的压力机。

1. 淬火后的热矫直 油冷拉刀冷到约 200℃, 经短时间等温的拉刀冷到约 150℃, 即可开始热矫直。

(1) 单方向弯曲的拉刀 一般可按表 8-32 的步骤矫直。最大弯曲量多位于前导向部和刃部的前几个齿。每次加压时, 拉刀受力点应沿同一方向 (各截面偏摆最高点的连线), 并自精切齿向柄部移动。刃部长度在 1000mm 左右者压 4 点, 750mm 压 3 点,

表 8-32 单方向弯曲的拉刀热矫直顺序

序号	弯曲示意图	矫直时拉刀温度 /℃	弯曲方向	加压后弯曲量
1		约 150~200	原弯曲方向	—
2		约 150~200	第一次压后方向	原弯曲量的 1/2~1/3
3		约 100	恢复到原弯曲方向	—
4		约 100	第二次压后方向	根据弯曲恢复量确定
5		约 50	恢复到原弯曲方向或平直	—
6		约 50	第三次压后方向	留出弯曲恢复量可为 0.3~1.5mm

注: 1. 细长拉刀或大直径拉刀应增加矫直次数为 4~5 次。

2. 油冷却的拉刀, 第一次加压后应达到平直, 以观察弯曲恢复方向, 并增加一次矫直。

500mm 压 2 点, 500mm 以下压 2 点或 1 点。

(2) S 形 (波形) 弯曲的拉刀, 拉刀开始矫直时, 可按表 8-33 的步骤压成单方向弯曲, 然后按表 8-32 的步骤继续矫直。

表 8-33 S 形 (波形) 弯曲的拉刀热矫直开始顺序

序号	弯曲示意图	矫直时拉刀温度 /℃	弯曲方向	加压后弯曲量
1		约 150~200	原弯曲方向	—
2		约 150~200	单方向弯曲	成倍增加
3		约 150~200	平直	—

2. 回火后热矫直 拉刀回火后弯曲会恢复, 可在出炉后, 在螺杆式压机上作持压热矫直。回火热矫直的效果以第一次回火后进行矫直为最好, 以后逐次减弱。一般拉刀回火后冷至  $100^{\circ}\text{C}$  左右 (细长拉刀的温度可高些) 开始加压, 拉刀在压力下冷却使弯曲得到矫直, 通常在冷至室温前卸去压力。

如在回火热矫直后有回火工序, 则应将拉刀向弯曲反方向压过一些, 以备在再次回火后弯曲的恢复。

3. 精修矫直 回火和柄部处理后的拉刀, 如仍未达到弯曲允差时, 可选择以下方法精矫:

(1) 将直径与弯曲最基本相同的两支拉刀, 凸面对凸面靠拢, 在最高点中间垫以淬硬的钢块, 然后用铁丝将柄部和精切齿部扎紧, 使拉刀产生与原弯曲方向相反的弹性变形, 在回火过程中即发生部分塑性变形而达到矫直的目的。

(2) 利用在柄部与前导向部间未淬硬部位加压的方式, 使拉刀形成波形弯曲, 从而保证刃部和柄部偏差均在公差范围之内。

(3) 用淬火回火后的钢锤敲击拉刀凹面的容屑槽底部, 可使弯曲矫正, 但易损坏刃齿和引起裂纹, 因此只限于弯曲量较小的中小型拉刀的精矫。

## 8.5.10 齿轮刀具的热处理

### 8.5.10.1 技术要求

齿轮刀具 (包括插齿刀、齿轮滚刀、剃齿刀等) 要求较高的耐磨性和较好的红硬性, 精密齿轮刀具要求较高的内孔尺寸稳定性。齿轮刀具的热处理硬度, 一般高速钢为  $63\sim 66\text{HRC}$ , 高性能高速钢为  $65\sim 68\text{HRC}$ 。

齿轮刀具一般都由高速钢制造, 对切削难加工材料或在较高切削速度下使用的齿轮刀具, 常采用  $\text{W6Mo5Cr4V2Co5}$ 、 $\text{W2Mo9Cr4VCo8}$  等含钴高速钢制造。

### 8.5.10.2 热处理工艺特点

齿轮刀具的热处理与一般高速钢刀具基本相同, 不同之处在于:

(1) 由于齿轮刀具, 特别是大规格齿轮刀具碳化物聚集较严重, 刀具尺寸大, 形状复杂, 因此热处理过程中容易产生过热和裂纹。

(2) 部分大型刀具内孔尺寸较大, 尺寸精度要求较高, 如在制成成品后长期存放, 由于残留奥氏

体的转变和内应力的变化, 常发生内孔胀大, 精度超差。

为了避免上述缺陷的产生, 经常采用以下措施:

#### (1) 防止开裂的措施

①适当降低淬火温度, 延长加热时间, 通常大规格齿轮刀具采用淬火温度的下限。例如  $\text{W18Cr4V}$  钢为  $1265\sim 1275^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{W6Mo5Cr4V2}$  钢为  $1210\sim 1220^{\circ}\text{C}$ , 加热系数可参考图 8-35。

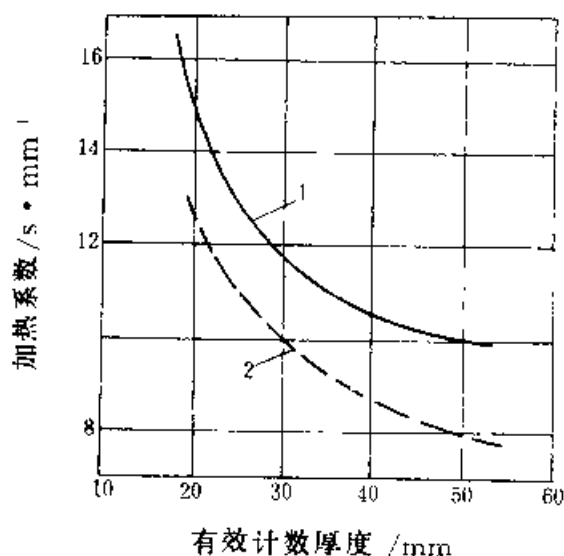


图 8-35 大规格齿轮刀具加热系数

1 盘形刀具 2—筒体刀具

②等温处理, 大型刀具经多次分级冷却后, 于  $240\sim 280^{\circ}\text{C}$  等温  $2\sim 4\text{h}$ , 可以有效地防止淬冷开裂。对容易开裂的刀具, 应在第一次回火加热后, 立即转入等温槽进行等温处理, 其方法与淬冷等温处理相同。经等温处理的刀具, 需经  $4\sim 5$  次回火。

③及时回火, 大规格刀具的淬冷裂纹, 一般产生于冷却至马氏体点以下的温度。因此对未经等温处理的刀具, 可在其表面温度冷至  $100^{\circ}\text{C}$  左右时即入炉回火, 可减少开裂倾向。此时需增加一次回火。

④对特大规格的齿轮刀具可采用电渣重熔高速钢, 这种钢沿断面尺寸由里向外, 碳化物偏析差别较小, 可以有效地防止淬冷开裂。

#### (2) 稳定尺寸的措施

①冷处理, 淬冷后冷处理可促进残留奥氏体的转变, 防止长时间放置变形。为防止开裂, 冷处理可在第一次或第二次回火后进行。冷处理温度

为 $-70\sim-80^{\circ}\text{C}$ ，保温60min左右。

②人工稳定化处理，刀具在磨削后于 $500^{\circ}\text{C}$ 1h回火或 $200^{\circ}\text{C}$ 2h回火，可消除磨削应力，提高刀具储存期间的尺寸稳定性。必要时可把最终磨削工序分为粗、精磨两次进行，粗磨后于 $500^{\circ}\text{C}$ 回火1h，精磨后于 $200^{\circ}\text{C}$ 作1h稳定化处理，彻底消除磨削应力，尺寸更加稳定。

### 8.5.10.3 齿轮刀具的真空热处理

齿轮刀具采用真空淬火可以得到无氧化脱碳的光洁表面，省去酸洗、喷砂等工序。齿轮滚刀真空油淬可比盐浴加热马氏体分级淬火减少畸变30%。

模数3的W6Mo5Cr4V2高速钢的齿轮滚刀真空热处理工艺如下：

#### 1. 淬火加热

预热： $800^{\circ}\text{C}$ 20min 真空度 0.133Pa。

预热： $1000^{\circ}\text{C}$ 20min 真空度 133Pa（充氮气）。

加热： $1220^{\circ}\text{C}$ 25min 真空度 133Pa（充氮气）。

2. 冷却 在真空淬冷油中淬冷或在高压真空气淬炉中，采用 $50\times 10^4\text{Pa}$ 压力冷却。氮气的纯度（体积分数）要求在99.999%以上。

3. 回火 真空淬火以后为保持其光亮外表，可采用真空回火。为增加热传导能力，回火炉抽真空后应回充 $6.7\times 10^4\text{Pa}$ 的氮气。

真空回火每次保温2h，可回火3次。

### 8.5.11 小型高速钢刀具的热处理

小型刀具这里指直径3mm以下的杆状刀具和厚度在0.5mm以下的片状刀具。

小型刀具由于体积小，刃薄，虽然切削量不大，但要求具有高的强度和韧性，在热处理畸变、表面腐蚀以及脱碳等方面，比一般刀具有更高的要求。

小型刀具常用材料有W6Mo5Cr4V2和W18Cr4V钢。在正常热处理后，W6Mo5Cr4V2钢有更高的强度和韧性，淬火温度较低，有利于减少淬火畸变。因此，以选择W6Mo5Cr4V2钢为好。

#### 8.5.11.1 热处理工艺

1. 盐浴热处理 小型刀具对红硬性要求不高，在达到相同硬度的前提下，采用较低的淬火温度和正常或稍高的回火温度，比用正常温度淬火

和高温回火（ $\geq 600^{\circ}\text{C}$ ）可得到更高的强度和韧性。工艺规范可参考表8-34。

表 8-34 小型刀具的热处理工艺规范

钢 号	淬 火		回 火			硬度 HRC
	温度 $^{\circ}\text{C}$	时间 /s	温度 $^{\circ}\text{C}$	时间 /h	次数	
W6Mo5Cr4V2	1200~	50~	560~	1~	3	61~
	1210	80	580	1.5		63
W18Cr4V	1240~	40~	560~	1~	3	61~
	1260	60	580	1.5		63
W6Mo5Cr4V2	1200~	40~	560~	1~	3	62~
	1220	80	580	1.5		65
W18Cr4V	1250~	40~	560~	1~	3	62~
	1270	60	580	1.5		65

2. 真空热处理 高速钢小钻头采用真空热处理可以提高生产效率，避免淬火加热脱碳，减少热处理畸变。W6Mo5Cr4V2高速钢小钻头真空淬火方法：用 $\phi 20\text{mm}$ 左右的不锈钢套筒装钻头，筒高于钻头长度5~10mm，装量松紧应适当。套筒放在料盘上，可放3~4层。装量可达1000~1500件。工艺规范大体为： $750^{\circ}\text{C}$ 预热 20min 真空度 0.133Pa； $850^{\circ}\text{C}$  预热 20min 真空度 0.133Pa； $1050^{\circ}\text{C}$  预热 20min 真空度 133.3Pa； $1205\sim 1210^{\circ}\text{C}$  加热 20min 真空度 133.3Pa；冷却： $6.7\times 10^3\text{Pa}$  氮气冷却。

#### 8.5.11.2 工艺说明

1. 去应力退火 如果原材料是盘钢丝或薄钢带，则毛坯下料后，应在加压状态下，于 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ 加热4~6h（可用木炭作保护介质），以消除内应力和矫正毛坯的畸变。

2. 盐浴淬火 盐浴淬火时，小型刀具因尺寸甚小，可以不经预热。

图8-36是小钻头淬火加热夹具及其夹持方式。钻头柄部吸附于磁性夹具，刃部浸入盐浴中加热。夹具每次使用后用水降温，以免丧失磁性。

图8-37是切口铣刀的淬火夹具及其夹持方式。刀具为小槽所固定，保持垂直的加热状态，使其不易畸变。

3. 回火 小型刀具允许的热处理畸变甚小，

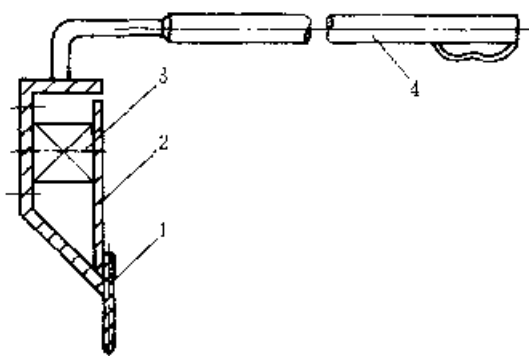


图 8-36 小钻头磁性淬火夹具  
1—钻头 2—铁板 3—磁铁 4—手柄

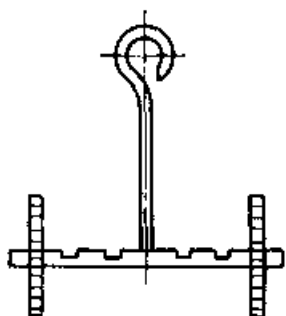


图 8-37 小切口铣刀淬火夹具

淬火产生的畸变难在冷状态下矫正，因此应采用回火热矫正的方法。

杆状刀具可采用图 8-38 所示的预加压力的方法。刀具整齐地排列在正三角形铁盒中，用楔铁插入施压，装卡后在硝盐或空气介质中进行回火。

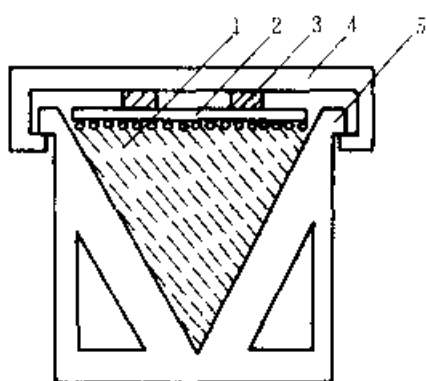


图 8-38 小钻头回火矫直夹具

1—钻头 2—压板 3—楔铁 4—框架 5—三角盒

片状刀具按一致的弯曲方向重迭，用螺栓压板夹紧（图 8-39）。第一次回火加热到 350~400℃，保温 1~2h，取出拧紧螺母，使其压平，然后再入炉升温继续回火。

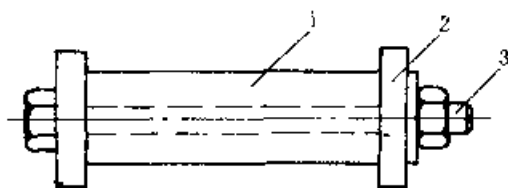


图 8-39 切口铣刀回火夹具

1—铣刀 2—压板 3—螺栓

4. 清洗 盐浴加热的小型刀具，必须经反复多次的沸水清洗，彻底清除表面残存盐，以防发生腐蚀。

5. 表面处理 盐浴加热易造成表面颜色不均，有碍外观和降低防锈能力。由于小型刀具不宜喷砂，可作发黑处理和蒸汽处理。处理前在稀盐酸中（加入 0.2%~0.5% 尿素（质量分数）），浸 30~60s，以除去工件表面的锈斑。

### 8.5.12 高速钢对焊刀具的热处理

为节约高速钢，杆状刀具非切削部分使用结构钢（45 钢或 40Cr 钢）。结构钢部分与高速钢部分，通过电弧焊或摩擦焊焊接。由于焊缝的存在以及焊接高温的影响，使其热处理方法与整体高速钢刀具有些不同。

1. 对焊后的冷却 对焊时在焊缝两侧很小区域内，被加热到很高温度。焊后如直接空冷，高速钢一侧将发生马氏体相变，结构钢的柄和未受热影响的高速钢部分则仍为索氏体—珠光体组织（图 8-40）。由于显著的比容差将引起巨大的组织应力，以致产生裂纹。这种裂纹一般都发生在高速钢一侧自淬硬区到未受热影响区的过渡层。对圆棒料来说，此裂纹呈环形并与焊缝相平行。

为此，对焊刀具焊接后应立即投入 650~750℃（珠光体转变区）的炉中保温，待料罐装满后再保温 1~2h，然后直接升温到退火温度进行退火。如果保温后没有条件继续作退火处理，则保温的温度，应在珠光体转变速度最大的范围（740~760℃），保温时间延长至 2~3h，使焊缝两侧都充分地转变为珠光体—索氏体组织，随后空冷时可避免开裂。

2. 退火 焊接毛坯的退火规范可参考表 8-13，但退火温度宜提高 10~20℃，以强化扩散作用，提高焊缝强度。

3. 淬火 刀具盐浴淬火加热的长度，应离焊

缝10~15mm。加热长度太短,会减少切削部分的有效长度;加热超过焊缝,易产生裂纹。因为加热超过焊缝时,高速钢一侧将全部淬硬成马氏体组织,而结构钢一侧为过热的魏氏组织(图8-41),焊缝两侧悬殊的比容产生巨大的组织应力,应力峰值出现在焊缝截面上高速钢部分脱碳层(对焊加热时氧化所致)的里侧。因此,裂纹通常出现在邻近焊缝的高速钢部分,并呈圆弧状。如果在焊缝以下加热,则马氏体分级淬火后焊缝一侧的高速钢组织为托氏体过渡到马氏体(图8-42),缓和了组织的比容差,使应力减小

有些刀具由于结构上的特点,不得不超焊缝加热,为了防止裂纹,应采用以下作法:采用短时间或长时间等温淬火;淬火冷却到100°C左右立即回火;淬火后不宜直接进行冷处理和冷矫直;不要进行酸洗处理。

对焊刀具的淬火开裂,更多的是焊接不良所致。这种裂纹的特征与热处理不当引起的裂纹有所不同。前者往往是沿焊缝截面发生的,断口处常见莱氏体、黑色氧化物夹杂、絮状断口或者焊缝外缘表面存在脱碳层等缺陷。

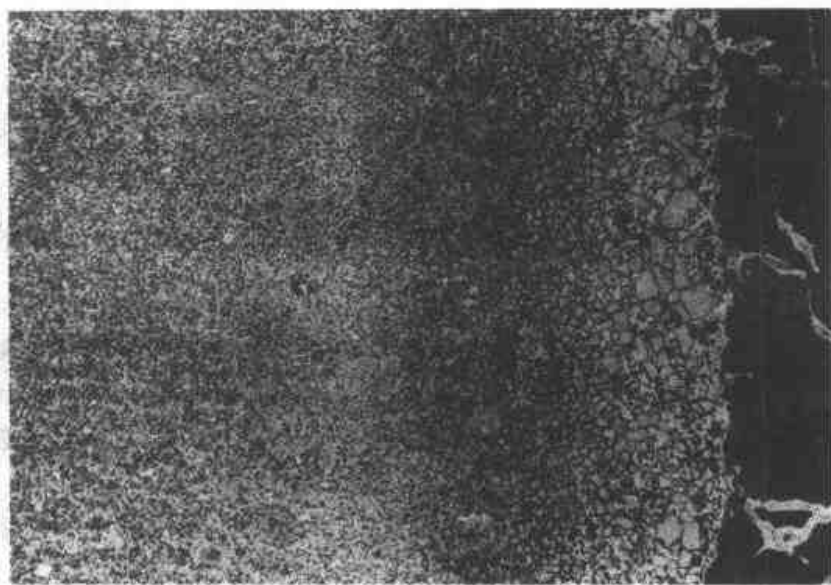


图8-40 W18Cr4V钢(右)-45钢(左)对焊组织(空冷) 200×  
w(硝酸酒精)4%侵蚀

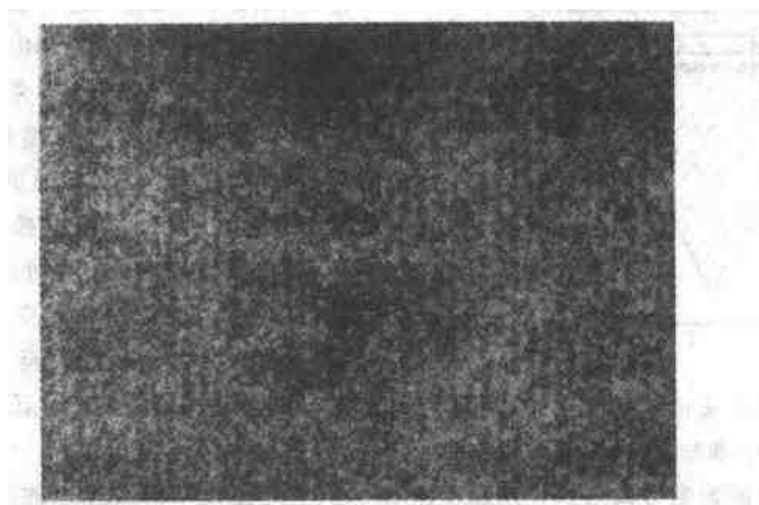


图8-41 W18Cr4V钢(右)-45钢(左)对焊后淬火组织 250×  
w(硝酸酒精)30%侵蚀

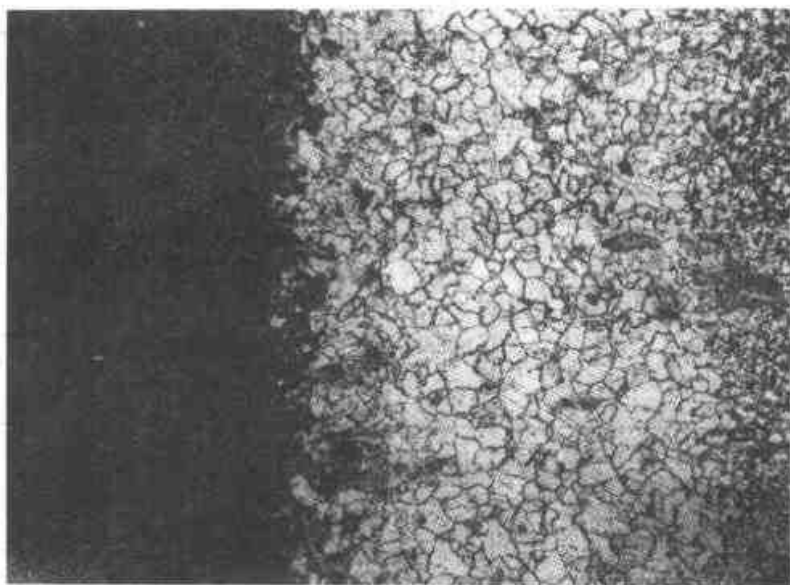


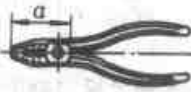
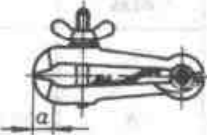


图 8-42 W18Cr4V 钢 (左) -45 钢 (右) 对焊后淬火、回火组织 100×  
w (硝酸酒精) 4% 侵蚀

### 8.5.13 常用五金和木工工具的热处理


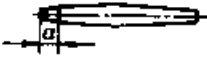





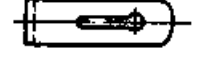

加热方式、淬火加热温度及回火温度等列于表 8-35。

常用五金和木工工具的材料、硬度要求、淬火

表 8-35 常用五金、木工工具热处理一览表

工具名称、简图	材 料	硬度(HRC)		淬火加热方式	淬火加 热温度 /°C	冷却介质	回火温度 /°C
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 克丝钳	T7、T8	52~56		大量生产: 气体 保护炉 少量单件: 盐浴 炉局部加热	780~800	钳口油冷 3~4s 后, 全部油冷、 水冷或淬碱 浴	200~200
 手虎钳	45、50	42~50		整体加热局部淬 火或局部加热整体 淬火	810~840	水	300~380
 中心冲	T7、T8	53~57	32~40	整体加热 a、b 段 分别淬火, a 段回 火后, b 段局部高 温快速回火	770~780	水	270~300
 钳工錾子	T7、T8	53~57	32~40	整体加热 a、b 段 分别淬火, a 段回 火后, b 段局部高 温快速回火	770~780	水	270~300

(续)

工具名称、简图	材 料	硬度(HRC)		淬火加热方式	淬火加 热温度 /°C	冷却介质	回火温度 /°C
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 销工锤	50	49~56		专业生产厂,连续式加热炉,局部淬火 少量单件:盐浴炉局部加热淬火	810~840	水	250~300 270~350
	T7、T8				770~780		
 一字(十字)旋具	50、60	48~52		局部加热淬火或整体加热局部淬火	820~850	水	250~320 300~350
	T7、T8				770~780		
 大锤	T7	49~56		局部加热淬火或整体加热局部淬火	790~810	水	270~350
 铁皮剪	T7	52~60		局部加热淬火或整体加热局部淬火	780~800	水	200~320
 呆扳手	50	全部		盐浴炉或连续式加热炉	820~840	水	380~420
	40Cr	41~47			840~860	油 硝酸盐	400~440
 活扳手	50	全部		盐浴炉或连续式加热炉	810~830	水油分级	380~420
	40Cr	41~47			840~860	油 硝酸盐	400~440
 鲤鱼钳	50	48~54		局部加热淬火或整体加热局部淬火	820~840	水	290~310
 木工刨刀片	轧焊刀片 GCr15 刀体:20	61~63		整体加热全淬或局部淬火	840~860	油	150~170
	T8、T9	57~62			770~790	水	220~230
 木工凿子	T8、T9	57~62		局部加热淬火或整体加热局部淬火	770~780	水	200~230

(续)

工具名称、简图	材 料	硬度(HRC)		淬火加热方式	淬火加 热温度 /°C	冷却介质	回火温度 /°C
		工作部分 (a)	其他部分 (b)				
 木工斧头	T7、T8	50~56		局部加热淬火或 整体加热局部淬火	770~790	水	270~350
 木工手锯	T10	42~47		盐浴炉或保护气 体炉	770~790	油	450~470
 木工钻头	T7、T8	44~48		局部加热淬火或 整体加热局部淬火	770~780	水	360~420
 木工钳子	T7	43~50		局部加热淬火或 整体加热局部淬火	770~780	水	300~400

## 参 考 文 献

- 1 吴元昌. 工具技术, 1995 (1); 33~35
- 2 李惠友. 工具技术, 1996 (5); 24~26, 1996 (6); 34~37
- 3 王春祥. 金属热处理, 1985 (11); 3~15
- 4 大和久重雄. 金属, 1988 (2); 17~18
- 5 小川喜代一. 特殊钢, 1968 (6); 12~21
- 6 佐藤馨一. 特殊钢, 1968 (6); 28~31
- 7 西村富隆. 特殊钢, 1973 (3); 12~20
- 8 Б. А. Смольников. Металлургия, 1988 (3); 26~30
- 9 Смольников Е. А., Металлургия, 1988 (3); 26~30
- 10 Заблудный В. К., Металлургия, 1988 (3); 42~43
- 11 Адашкин. А. М. Сталь. 1975. 11, СТР 419
- 12 Геллер Ю. А.; 《Инструментальные Стали》, Москва, Металлургия, 1983; 130
- 13 Roberts. G. A Tool steels. ASM OHIO, 1980; 316
- 14 payson. P. The Metallurgy of Tool steels. New York, London, John Willey and Sons Inc, 1962; 19
- 15 Hsu. M. J.; Wear. 11. 1988. 123 (3); 253~268
- 16 Nevmeyer. T. A., Metallurgic Transactions, 1972 (8); 2281~2287
- 17 ASM Hand book Committee, Heat Treater's Guide 1982 (9); 377
- 18 Neiderman J. M. Industial Heating. 1985 (6); 20~25
- 19 Kusinski J; Metallurgical Transactions. 1988, 19A (2); 377~382



# 第 9 章 模具的热处理

北京机电研究所 陈再良 王德文

## 9.1 模具材料的分类及性能要求

模具是实现少、无加工先进制造技术中的重要工艺装备,在现代工业生产中得到广泛应用,并得到重视和发展。这是因为模具产品的质量不仅关系到生产制品的质量和性能,而且直接影响着工业的生产效率和成本。

从模具使用情况统计分析表明,模具的质量在很大程度上取决于模具材质和热处理工艺。根据模具的使用条件,正确地选择模具材料和制定合理的热处理工艺是非常重要的任务。

### 9.1.1 模具材料的分类

通常按模具的用途可分为:冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢及其他模具材料(硬质合金、钢结硬质合金、铸铁等)。这里所指的模具材料均指模具工作部分用材。

1. 冷作模具钢 冷作模具钢是用于制造冲裁模、挤压模、拉深模、冷镦模、弯曲模、成形模、剪切模、滚丝模和拉丝等模具。按工艺性能和承载能力可将冷作模具钢分类如表 9-1 所示。

表 9-1 冷作模具钢分类表

类 型	钢 号
低淬透性钢	T7A、T8A、T9A、T10A、T11A、T12A、MnSi、Cr2、9Cr2、GCr15、CrW5
低变形钢	9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、9Mn2、MnCrWV、SiMnMo
高耐磨微变形钢	Cr12、Cr12MoV、Cr5Mo1V、Cr4W2MoV、Cr2Mn2SiWMoV、Cr6WV、Cr6W3Mo2.5V2.5
高强度高耐磨性钢	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N

(续)

类 型	钢 号
高强韧性钢	6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNB、7Cr7Mo2V2Si、7CrSiMnMoV、6CrNiMnSiMoV、8Cr2MnWMoVS
抗冲击性钢	1CrW2Si、3CrW2Si、6CrW2Si、9CrSi、60Si2Mn、5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV
特殊用钢	9Cr18、Cr18MoV、Cr14Mo、Cr14Mo1、1Cr18Ni9Ti、5Cr21Mn9Ni1W、7Mn15Cr2Al3V2WMo

2. 热作模具钢 根据合金元素的含量和热处理工艺性能可将热作模具钢分类如表 9-2 所示。

3. 塑料模具钢 塑料制品工业迅速发展促进了塑料模具制造业的迅速增加。塑料模具用钢与冷作、热作模具用钢性能要求有很大差别,目前已形成塑料模具钢系列,其分类如表 9-3 所示

表 9-2 热作模具钢分类表

类 型	钢 号
高强韧热作模具钢	5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV、5SiMnMoV、5Cr4Mo、5CrSiMoMoV、4SiMnMoV、5Cr2NiMoV、3Cr2WMoVN
高热强热作模具钢	3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、5Cr4Mo3SiMnVA1、3Cr3Mo3W2V、5Cr1W5Mo2V、4Cr5Mo3SiV、4Cr4MoWSiV、4Cr4Mo2W-SiV、4Cr5WMoSiV、25Cr3Mo3VN1、3Cr3Mo3V、5Cr4W2Mo2VSi、5Cr4W5-Mo2VNB
高耐磨热作模具钢	8Cr3、7Cr3

(续)

类 型	钢 号
特殊 用热 作模 具钢	奥氏体 耐热钢 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、7Mn10Cr8- Ni10Mo3V2、Cr14Ni25Co2V、4Cr14- Ni14W2Mo
	超高 强钢 40CrMo、40CrNi2Mo、30CrMnSiNi 2A
	马氏体 时效钢 18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350)
	高速钢 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2

4. 其他模具材料 其他模具材料主要有硬质合金、钢结硬质合金、铸铁、有色金属及非金属材料等。

为了适应高耐磨，高抗压，高精度、高寿命制造需要，如冷冲、裁、冷镦及挤压模等，特别是多功位级进冲模的凸凹模部分常选用硬质合金或钢结硬质合金材料制做模具。常用的硬质合金和钢结硬质合金成分和性能见表 9-4 和表 9-5。

表 9-3 塑料模具钢分类表

类 型	钢 号
渗 碳 型	10、20、20Cr、12CrNi3A
调 质 型	45、55、40Cr、5CrNiMo、5CrMnMo、 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1
淬 硬 型	T10A、T12A、9Mn2V、CrWMn、Cr2、 GCr15、Cr12、Cr12MoV、Cr6WV、 9SiCr、MnCrWV、9CrWMn 等
预 硬 型	3Cr2Mo、5CrNiMnMoVSCa、3Cr2 NiMnMo、4Cr5MoS:VS、8Cr2MnW- MoVS
耐 蚀 型	2Cr13、4Cr13、1Cr18Ni9、3Cr17Mo
时 效 硬 化 型	18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350)、 06Ni6CrMoVTiAl、23CrNi3MoAl

表 9-4 硬质合金的化学成分和性能

牌 号	化学成分 (质量分数) (%)			物 理 力 学 性 能				
	WC	Co	TiC	密度 'g·cm <sup>-3</sup>	硬度 (HRA)	抗弯 /MPa	抗压 'MPa	弹性模量 E /MPa
YG6	94	6	—	14.6~15.0	89.5	1400	4600	62000
YG6X	93.7	6	0.3	14.6~15.0	91.0	1450	4600	—
YG6A	92.0	6	2.0	14.6~15.0	92.0	1150	4600	—
YG8	92.0	8	—	14.5~14.9	89.0	1500	4470	—
YG15	85.0	15.0	—	13.9~14.1	87.0	2100	3660	54000
YG20	80	20	—	13.4~13.7	85.6	2600	3500	—
YG20C	80	20	—	13.4~13.9	82~84	1800	3600	50000

表 9-5 钢结硬质合金的化学成分和性能

合金牌号	硬质相类及含量 (质量分数) (%)	硬度 (HRC)		抗弯强度 /MPa	冲击韧度 'J·cm <sup>-2</sup>	密 度 'g·cm <sup>-3</sup>
		加工态	工作态			
TCMW50	WC50	35~42	66~68	2000	8~10	10.2
DT	WC40	32~38	61~64	2500~3600	1.8~2.5	9.8
GW50	WC50	35~42	66~68	1800	1.2	10.2
GW40	WC40	34~40	63~64	2600	9	9.8

(续)

合金牌号	硬质相类及含量 (质量分数)(%)	硬度(HRC)		抗弯强度 MPa	冲击韧度 $J \cdot cm^{-2}$	密 度 $g \cdot cm^{-3}$
		压入态	工作态			
GJW50	WC50	31~38	65~66	2000	7	10.2
GT33	TiC33	33~35	67~68	1400	4	6.5
GT35	TiC35	35~36	67~69	1400~1800	6	6.5
GTN	TiC25	32~36	64~68	1800~2400	8~10	6.7
TM6	TiC25	35~38	65	2000		6.6

### 9.1.2 模具材料的性能要求

根据不同用途的模具材料,在使用性能和工艺性能方面应主要考虑以下几方面。

1. 硬度和热硬性(热稳定性) 模具在压应力的作用下应能保持其形状和尺寸不会迅速发生变化,硬度是模具钢的重要性能指标。因此,经过热处理后的模具应具有足够高的硬度,如冷作模具一般硬度在60HRC左右,而热作模具硬度可适当降低,一般在42~50HRC范围内。

热硬性是指模具在受热或高温工作条件下保持组织和性能稳定,具有抗软化的能力。钢的热硬性主要决定于钢的化学成分和热处理制度,它是热作模具钢的重要性能指标之一。

2. 耐磨性 模具在工作中承受相当大的压应力和摩擦力,要求模具在使用中应能保持其尺寸及形状不变,持久耐用,所以模具材料应具有良好耐磨性。模具的耐磨性不仅取决于钢的成分、组织和性能,而且与工作温度、载荷(压力)状态、润滑介质等有较大的关系。提高钢的硬度有利于提高钢的耐磨性,但到了一定硬度值之后,对提高耐磨性的作用就不显著了。

3. 强度和韧性 模具在工作中承受很大负荷以及冲击、振动、扭转和弯曲等复杂应力。重负荷的模具往往由于强度不够、韧性不足,造成模具边缘或局部断裂而提前损坏,因此要求模具材料具有良好的强度和韧性配合。钢的晶粒度和钢中碳化物的数量、大小及分布情况以及残留奥氏体量等,对钢的强度和韧性有很大的影响。实践表明,根据使用条件和性能要求,合理地选择模具钢的化学成分、组织状态及热处理工艺,能够得到足够高的强度和韧性的最佳配合。

此外,根据各种模具的工作条件,还应分别考

虑高温强度、热疲劳、导热性及耐腐蚀等性能。

由于模具钢多,是在高硬度、高强度、高耐磨性及足够韧性的状态下使用,所以要求模具钢的冶金质量高,应尽量减少钢中气体含量、非金属夹杂物和有害元素(硫、磷等)含量;同时,为了保证钢材具有良好的性能,还要经过正确的热压力加工(锻、轧),以改变断面形状、改变铸态组织和性质,然后经冷切削加工而制成一定形状的模具,再进行最终热处理(正火、淬火及回火),这样才能得到模具所要求的使用性能。因此,模具钢的工艺性能对模具制造同样十分重要。

4. 加工性 加工性是指锻、轧热加工性能以及切削、研磨等形式的冷加工性能,它们与钢的化学成分、冶金质量、组织状态及硫、磷含量等有关。模具钢大部分是含有多种合金元素,尤其是高碳、高合金钢,在进行热加工时要严格控制加热制度及冷却方式,以避免或减少热加工废品;而在冷加工之前,应改善组织状态,以减少在冷加工过程中刀具的磨损,并提高模具的表面质量。

5. 热处理变形和淬火温度 制成的模具,进行最终热处理时要求模具的尺寸与形状越小越好,因此,在热处理时对模具所产生的变形程度要求很严;同时,要求淬火温度范围足够宽,以减少出现过热现象。

6. 硬性和淬透性 淬硬性和淬透性是模具钢的一个主要指标要求。淬硬性主要与钢的化学成分特别是含碳量有关。还与钢在淬火前的原始组织有关。模具钢对这两种性质的要求,根据不同模具的使用条件各有侧重。例如,对于要求表面具有高硬度的冲裁模具和拉深模具用钢,淬硬性显得较为重要;而对于要求整个截面具有均匀一致性能的热锤锻模具钢,则淬透性显得更为重要。

7. 脱碳敏感性 模具表面发生脱碳,会使模

其表面层的性能降低。因此,要求模具钢的脱碳敏感性越低越好。在相同的加热条件下,钢的脱碳敏感性主要决定于钢的化学成分,特别是含碳量。

## 9.2 冷作模具的热处理

### 9.2.1 冷作模具的工作条件和要求

冷作模具主要用于完成金属或非金属材料冷态成形,包括冲裁模、弯曲模、拉深模、挤压模和锻模等。

(1) 冲裁模工作部位是刃口,要求工作中刃口不易崩刃,不易变形,不易磨损和不易折断。

(2) 弯曲和拉深模用于板材料的成形,工作应力一般不大,拉深模要求工作面保持光洁,不易发生粘附磨损和擦伤;弯曲模除以上要求外,还要求有一定的抗断裂能力。

(3) 挤压模和锻模主要用于材料体成形,工作应力大,其中挤压模具应力更大。材料在型腔中剧烈变形同时产生热量,模具在反复的应力和温度约 300℃环境中工作。要求模具工作时不易变形,不易开裂,不易磨损。

几种典型冷作模具工作应力和模具硬度比较如图 9-1 所示。

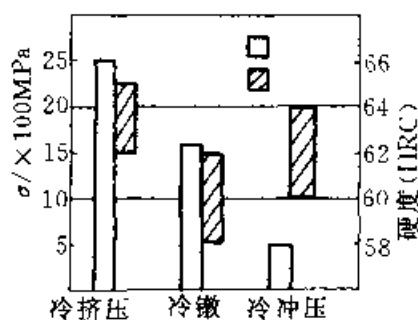


图 9-1 典型冷作模具工作应力和使用硬度比较

### 9.2.2 冷作模具的主要失效形式

冷作模具主要失效形式有过载失效、磨损失效、咬合失效和疲劳失效四种形式。

(1) 过载失效 模具材料本身承载能力不足以抵抗工作载荷作用引起的失效。当材料韧性不足易产生脆断和开裂,当强度不足易产生变形和锻粗失效。冷挤压和冷锻模具易产生此类失效。

(2) 磨损失效 模具工作部位与被加工材料之间的摩擦损耗,使工作部位(刃口、冲头)形状和尺寸发生变化而引起失效。对工作表面尺寸和质量要求高的冲裁模、挤压模易产生此类失效。

(3) 咬合失效 模具工作部位与被加材料在高压摩擦下,润滑膜破裂发生咬合——被加工材料“冷焊”到模具表面,引起被加工产品表面质量出现划痕等失效。在拉深、弯曲模及冷挤压模中易发生此类失效。

(4) 多冲疲劳失效,冷作模具承受的载荷都是以一定冲击速度和能量反复作用,其工作状态与小能量多冲疲劳试验相似。由于模具材料硬度高,多冲疲劳寿命多在 1000~5000 次左右,而且裂纹萌生期占绝大部分,疲劳源和裂纹扩散区不明显。多冲疲劳失效常见于重载模具,如冷挤压、冷锻冲头模具。

### 9.2.3 冷作模具钢的选用

为了满足冷作模具高应力、高耐磨和使用寿命需要,通常多选用高碳钢或高碳合金钢。选材时应依据模具结构、服役条件、被加工材料性质、设备及润滑条件、产品批量等综合考虑。即根据“满足使用性能、发挥材料潜力、经济合理”原则选材。

常用冷冲模具和冷锻模具用材参见表 9-6 和表 9-7。

表 9-6 常用冷冲模具材料选用表

模具类型	使用条件	推荐材料	工作硬度 (HRC)
冲裁模	轻载 ( $\delta \leq 2\text{mm}$ )	T10A、9SiCr、CrWMn、9Mn2V、Cr12	54~62 (凸模) 58~64 (凹模)
	重载 ( $\delta > 2\text{mm}$ )	Cr12MoV、Cr4W2MoV、5CrW2Si、7CrSiMnMoV、6CrNiMnSiMoV	56~62 (凸模) 58~64 (凹模)
	精冲	Cr12、Cr12MoV、Cr4W2MoV、W6Mo5Cr4V2、8Cr2MnWMoVS	58~62 (凸模) 59~63 (凹模)

(续)

模具类型	使用条件	推荐材料	工作硬度 (HRC)
冲裁模	易断凸模	W6Mo5Cr4V2、6Cr4W3Mo2VNb、6W6Mo5Cr4V、7Cr7Mo2V2Si	54~62
	高寿命、高精度模	Cr12MoV、8Cr2MnWMeVS (或硬质合金类)	58~62 (凸模) 60~64 (凹模)
弯曲模	一般模	T8A、T10A、15、9Mn2V、Cr2、6CrNiMnSiMoV	54~62 (凸模) 58~62 (凹模)
	复杂模	CrWMn、Cr12、Cr12MoV、Cr4W2MoV	56~62 (凸模) 58~64 (凹模)
拉深模	一般模	T8A、T10A、CrWMn、Cr12、7CrSiMnMoV	54~62 (凸模) 58~64 (凹模)
	重载长寿命模	Cr12MoV、Cr4W2MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 (或硬质合金类)	56~62 (凸模) 58~64 (凹模)

表 9-7 常用冷锻模具材料选用表

模具类别	模具名称	使用条件	推荐材料	工作硬度 (HRC)
冷挤压模	轻载冷挤模	铝合金	Cr2、MnCrWV (小型)、	60~62
		挤压力 ≤ 1500MPa	Cr6WV、Cr12MoV (中型)、YG15	56~61
	重载冷挤压模	钢件: 挤压力 1500~2000MPa	凸模: 6W6Mo5Cr4V、W6Mo5Cr4V2	60~62
		钢件: 挤压力 2000~2500MPa	凹模: Cr12MoV、6Cr4W3Mo2VNb、YG20C 凸模: W6Mo5Cr4V、W18Cr4V	58~60 60~63
	模具型腔冷挤压凸模	一般中、小型	Cr2、9SiCr、T10A	59~61
		大型复杂件 成批压制, (挤压力 2000~2500MPa)	5CrW2Si Cr12MoV、6Cr4W3Mo2VNb W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V、W18Cr4V	59~61 59~61 61~63
初冷锻模	切料模	低碳钢	T10A、Cr2、9SiCr、Cr12MoV	58~61
		中碳钢、合金结构钢	Cr12、Cr12MoV、W18Cr4V、7Cr7Mo2V2Si	58~61
	初锻冲头	低碳钢、中碳钢、合金结构钢	T10A、Cr2	58~61
	初锻凹模	低碳钢、中碳钢、合金结构钢	T10A、Cr12MoV、YG20C	59~61
	终锻冲头	低碳钢	T10A、60Si2Mn、7CrSiMnMoV	53~57
		中碳钢、合金结构钢	6Cr4W3Mo2VNb、7Cr7Mo2V2Si、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2	61~63

(续)

模具类别	模具名称	使用条件	推荐材料	1作硬度(HRC)
初冷 锻模	终锻凹模	低碳钢	T10A、6Cr4W3Mo2VNB、7Cr7Mo2V2Si、5Cr4Mo3SiMnVAI	60
		中碳钢, 合金结构钢	Cr12MoV、6Cr4W3Mo2VNB、7Cr7Mo2V2Si、7CrSiMnMoV、YG20C	55~61
	内外六角十字槽凸模	低碳钢 中碳钢, 合金钢	60Si2Mn、9SiCr 6W6Mo5Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6Cr4W3Mo2VNB	54~61 56~61
冷 锻模	切边冲头	低碳钢	9SiCr、Cr12MoV	60~63
		中碳钢, 合金结构钢	5Cr4Mo3SiMnVAI、6Cr4W3Mo2VNB、7Cr7Mo2V2Si	59~62
	切边凹模	低碳钢	T10A	61~63
		中碳钢, 合金结构钢	Cr12MoV、7Cr7Mo2V2Si	61~63
	冲孔冲头	低碳钢, 中碳钢, 合金结构钢	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2	57~62
	冲孔凹模	低碳钢, 中碳钢, 合金结构钢	W18Cr4V	60~63
粉末 冷压模	冲头凹模	有色金属粉末	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、YG20、Cr12、Cr12MoV	59~63
		黑色金属粉末	Cr4W2MoV、6W6Mo5Cr4V	
冷 精 压 模	平面精压模	有色金属	T10A	59~61
		钢件	Cr2、Cr12MoV	59~61
	刻印精压模	有色金属、钢件	9Cr2、Cr12MoV	58~60
		不锈钢、高强度材料	6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNB、5CrW2Si	
	立体精压模	浅型腔	Cr2、9Cr2	60~62
		复杂型	5CrW2Si、5CrNiMo、5CrMnMo、9SiCr	54~60

注: 可以选用性能相近的其他材料; 可以采用适当的表面改性处理技术。

#### 9.2.4 冷作模具的热处理工艺

模具热处理一般包括模具预备热处理和模具最终热处理两类。此外还有模具加工中的热处理和使用中的恢复热处理等。

##### 9.2.4.1 模具的预备热处理

模具预备热处理主要包括退火、正火和调质处理。主要目的是消除毛坯残留组织缺陷, 有利后续冷热加工处理, 提高使用性能和寿命。

(1) 正火的目的是消除碳素工具钢、合金工具钢的残余碳化物网, 细化不均匀的片状珠光体。

常用模具钢的正火规范如表9-8所示。

表9-8 几种冷作模具钢的正火规范

钢 号	Ac <sub>m</sub> /°C	正火温度/°C	硬度(HBS)
T7A	770	800~820	229~285
T8A	710	800~820	241~302
T10A	800	830~850	255~321
T12A	820	850~870	269~341
Cr2	900	900~920	362~388
9CrWMn	900	880~900	302~388

(续)

钢 号	Ac <sub>cm</sub> /°C	正火温度/°C	硬度(HBS)
9SiCr	870	900~920	320~415
CrWMn	940	970~990	388~514
9Mn2V	860	860~880	—
5CrMnMo	760	870~890	≤227
5CrNiMo	770	870~890	≤227

(2) 去应力退火的目的是消除模具淬火或精加工前的残留应力, 或避免高速钢返修淬火时出现的淬状断口。其规范如表 9-9 所示。

表 9-9 去应力退火工艺规范

碳素工具钢及合金工具钢	加热至 630~650°C, 保温 1~2h
高合金工具钢	加热至 680~700°C, 保温 1~3h

(3) 球化退火的目的是 获得满意的被加工性, 并为淬火作好组织准备。球化退火组织对最终

热处理后的强韧性、畸变、开裂倾向、耐磨性、断裂韧度有显著的影响。

球化温度以选在 Ac<sub>1</sub> 以上 20~50°C 为宜。要避免在退火过程出现有残存的原片状碳化物或新的片状及棱角状碳化物, 应保留许多未溶的细小碳化物颗粒以作为球化的结晶核心, 保证能加速球化过程和形成均匀的球化体。球化退火的等温温度和保持时间要选择在不出现片状或片、球状混合组织, 并有合适的球化速度范围为宜。

冷作模具钢的球化退火加热温度及成批毛坯等温球化退火规范如表 9-10 所示。

(4) 调质的目的是 获得细珠光体和超细碳化物, 消除碳化物网、带, 消除加工后的残留应力, 改善组织, 便于机加工, 防止淬火开裂和减小淬火畸变。

冷作模具钢的调质工艺, 可采用在常规加热温度淬火后进行 640~680°C 高温回火的工艺。调质后的硬度一般 ≤229HBS。

表 9-10 冷作模具钢毛坯成批等温球化退火规范

钢 号	加热温度×保温时间	等温温度×保持时间	退火硬度(HBS)	显微组织
T7A, T8A	750~770°C×1~2h	680~700°C×2~3h	163~187	珠光体 1~5 级
T10A, T12A			179~207	珠光体 2~4 级, 碳化物网 ≤2 级
9Mn2V	750~770°C×3h	680~700°C×4~5h	≤229	珠光体 2~5 级, 碳化物网 ≤2 级
Cr2	790~810°C×2~3h	700~720°C×3~4h	≤229	珠光体 2~5 级 碳化物网 ≤2 级
9Cr2			≤217	
9SiCr			≤229	
CrWMn			≤241	
9CrWMn	780~800°C×2~3h	670~720°C×2~3h	≤229	共晶碳化物 ≤3 级
8Cr3	790~810°C×2~3h	700~720°C×3~4h	≤241	
Cr12	850~870°C×2~3h	730~750°C×3~4h	≤255	
Cr12MoV	850~870°C×2~4h	740~760°C×4~6h	≤241	
W18Cr4V	850~870°C×2~4h	740~760°C×4~6h	≤241	
W6Mo5Cr4V2	840~860°C×2~4h	740~760°C×4~6h	≤229	
Cr4W2MoV	860~920°C×3~4h	740~760°C×6~8h	≤255	
6Cr4W3Mo2VNb	850~870°C×4h	730~750°C×6~8h	≤229	
7Cr7Mo3V2Si	840~860°C×2~4h	730~750°C×4~6h	≤225	
7Mn15Cr2Al3V2WMo	880~900°C×3~6h		<290	
6W6Mo5Cr4V	850~860°C×2~4h	740~750°C×4~6h	197~229	

## 9.2.4.2 模具的最终热处理

1. 淬火工艺 冷作模具常用的淬火工艺见表9-11所示,常规的加热系数,预冷温度,冷却时间分别见表9-12所示。

模具淬火处理时的脱碳、氧化、内应力及组织

不均匀性对磨损、开裂、疲劳强度及抗咬合性能均有显著的影响。对要求耐磨或需随后进行电加工的模具,应采用上限的加热温度和保温时间系数;对要求强韧性的模具可采用下限的加热温度和保温时间系数。

表9-11 冷作模具常用的淬火工艺规范

模具类别	钢号	淬火温度/°C	冷却方法	要求回火后硬度(HRC)
小型模具	T7A~T12A	760~780	盐水→热油	>58
大中型模具		800~850	盐水→热油	
微畸变淬火		810~830	碱浴(160~180°C)	
厚度<20mm 模具	Cr2, 9Cr2, GCr15	840~880	热油、冷油	>58
厚度20~60mm 模具			碱浴	
微畸变淬火			二元硝酸盐	
大中型重载模具	Cr2, 9Cr2, GCr15	810~850	水喷淬或碱水淬	>58
厚度<15~20mm 模具	60Si2MnA	860~880	热油	≥58
大中型重载模具			碱浴或碱水	
小型模具	9Mn2V	760~780	冷油或热油	≥58
中型模具		790~810	碱浴	
中型模具	9CrWMn	820~840	碱浴、油、三元硝酸盐	62~64
简单模具	Cr12	960~1000	160~180°C 热油	62~64
复杂模具		1080~1100	250°C 硝酸盐	40~50
重载模具	Cr12MoV	1020~1040	硝酸盐、油	60~62
微畸变淬火	Cr12MoV	980~1020	硝酸盐、铝板	58~62
		1100~1020		40~50
高韧性模具	W6Mo5Cr4V2	1140~1160	油、2-3-5 盐浴 <sup>①</sup>	57~61
高抗压、高强度模具	W6Mo5Cr4V2	1150~1200	油、2-3-5 盐浴 <sup>①</sup>	59~62
		1180~1200	油、2-3-5 盐浴 <sup>①</sup>	
高韧性模具	W18Cr4V	1150~1200	油 2-3-5 盐浴 <sup>①</sup>	58~62
高抗压、高强度模具	W18Cr4V	1230~1250		59~64
高耐磨模具	Cr4W2MoV	900~920	硝酸盐、油	58~62
高强韧模具		960~980	空气、油	
		1020~1050	硝酸盐、油、蒸汽	
高强韧模具	7Cr7Mo3V2Si	1100	油	≥60
高强韧模具	6Cr4W3Mo2VNb	1080~1120	油(20~80°C)	≥61
		1120~1160		
		1180~1190		
简单模具	9SiCr	860~880	冷油、热油	≥58
复杂模具	9SiCr	860~880	热油、硝酸盐等温	≥58

① 20%NaCl+30%CaCl<sub>2</sub>(KCl)+50%BaCl<sub>2</sub>。



表 9 12 冷作模具的常用加热系数

钢 种	加 热 温 度 /°C	加 热 系 数 $K/\text{min} \cdot \text{mm}^{-1}$	
		盐 浴 炉	电 阻 炉
碳素工具钢	550~620	1	—
	760~840	0.4~0.5	1~1.5
低合金模具钢	550~620	1	—
	820~950	0.5~0.6	1~1.5
中、高合金模具钢	550~620	1	—
	800~850	0.5	1~1.5
	950~1100	0.3~0.4	0.6~0.8
	950~1100 (不预热)	—	1~1.3

表 9 13 常用冷作模具钢的回火温度与硬度

钢 号	淬火硬度 (HRC)	达到下列硬度 (HRC) 范围的回火温度/°C				
		45~50	52~56	54~58	58~61	60~63
T7A	62~64	330	250	220	170	150
T8A	62~64	350	270	230	190	160
T10A, T12A	62~64	370	290	250	210	70
9Mn2V	62.0	380	300	250	220	150~180
Cr2	62	450	290	300	200	150
9SiCr	65	450	350	320	250	190
5CrW2Si		420	280	250	—	—
Cr12 (980°C 淬火)	63	—	—	320~350	250	180~190
Cr12MoV (1030°C 淬火)	63	—	540	400	230	170
5CrMnMo		380	250	200	—	—
W6Mo5Cr4V2	>60	—	—	—	620	560
W18Cr4V	>62	—	—	—	620	560
6W6Mo5Cr4V		—	—	—	—	560
Cr4W2MoV	60~62	—	—	—	520~540	—
7Cr7Mo3V2Si		—	—	—	—	530~540
6Cr4W3Mo2VNb		—	—	540~580	—	—
60Si2Mn		400	—	300~350	—	—

表 9-14 冷作模具钢的回火脆性温度范围

钢 号	CrWMn	9Mn2V	GCr15	9SiCr	Cr12	Cr12MoV
温 度/°C	250~300	190~230	200~250	200~240	290~330	325~375

2. 回火工艺 冷作模具淬火后应立即回火。回火温度要根据钢种和对模具的硬度要求选定,如表 9-13 所示。回火时间根据模具的钢种和尺寸大小而定,一般碳素工具钢与低合金工具钢为 90~180min,高合金模具钢为 120~180min。

冷作模具钢应避免在表 9-11 所示的回火脆性范围内回火。回火温度对抗压强度的影响见图 9-2。

对于高精度、高合金钢制模具为提高硬度,稳定尺寸,减少磨裂倾向和提高使用寿命,在淬火后可采用 -40~-80℃(干冰+酒精冷却剂)或 -180℃(液氮冷却剂)的冷处理。冷处理时间为 30~120min。为减少冷处理的内应力可分级冷却。冷处理后立即进行回火处理。

### 9.2.4.3 冷作模具的热处理工艺举例

冷作模具的热处理举例见表 9-15。精密及性能要求较高的模具,应采用保护气氛加热。

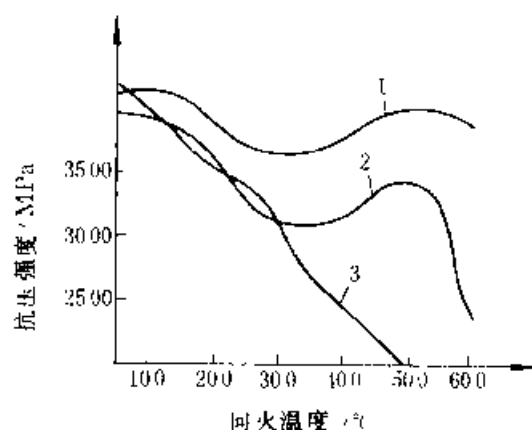


图 9-2 回火温度对典型冷作模具钢的抗压强度的影响

1- W6Mo5Cr4V2 钢 2- Cr12MoV 钢  
3- C-WMn 钢

表 9-15 冷作模具热处理工艺示例

模具名称	材 料	模 具 简 图	热 处 理 工 艺	备 注
凹 模	T8A			碱水硝盐复合分级淬火, 刃口 59~62 HRC, 其余 50~55 HRC
碳素工具钢薄板冲模 (小型)	T10A			低温淬火、低温回火微变形处理

(续)

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
薄板冲模	CrWMn			增加工艺孔及局部包扎铁皮(加阴影处)低畸变处理。 A 缩-0.05 ~ -0.1mm 60 ~ 62 HRC
精密凹模	Cr6WV			铁板夹冷有最小的畸变, 畸变 +0.02mm
冲裁模	9Mn2V			热油淬, 型腔尺寸基本无变化, 总寿命高(42万) 58 ~ 62 HRC
凹模	CrWMn			硝盐淬火型孔胀 (+0.03 ~ -0.07mm)

(续)

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
凸凹模	CrWMn			铜板夹冷, 孔距畸变量 $L < 0.02\text{mm}$
凸凹模	Cr12MoV			下限加热, 空冷淬火, $L$ 畸变率 $0.02\%$
凹模	Cr12MoV			风冷、空冷淬火, 适于截面厚 $20 \sim 30\text{mm}$ 的 Cr12 及 $50 \sim 60\text{mm}$ 的 Cr12MoV 钢
凹模	CrWMn			冷油淬火: 型腔侧壁畸变凸出: 先硝盐及油冷淬火: 型孔胀大过多: 按左图工艺处理: 型孔均匀胀大 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$

(续)

模具名称	材料	模具简图	热处理工艺	备注
落料凹模	CrWMn			58~62 HRC
落料凸模 凹模	Cr12			58~62 HRC
冷锻六角凸模	6Cr4W3- Mo2VNb			59~61 HRC

## 9.3 热作模具的热处理

### 9.3.1 热作模具的工作条件和要求

热作模具主要用于加热金属或液态金属制品的成形,这类模具可分为机锻模、锤锻模、挤压模和压铸模等。

(1) 压力机锻模是用各种压力机下进行毛坯成形的工具,其模具承受载荷近于静态。

(2) 锤锻模是用各种吨位锤产生巨大的冲击功进行毛坯变形的工具,毛坯在短时间内快速成形,模具承受很大冲击载荷和热磨损。

(3) 热挤压模是加热金属到一定温度后毛坯的挤压成形,模具(冲头)承受巨大压力、弯矩、

拉力以及与金属毛坯的摩擦。

(4) 压铸模是液态金属制品成形的工具,要求有一定强韧性、耐热疲劳性和抗蚀性能

### 9.3.2 热作模具的主要失效形式

热作模具失效形式主要有变形失效、热疲劳失效、热磨损失效和断裂失效四种。

(1) 变形失效是指在高温下毛坯与模具长期接触使用后模具出现软化而发生塑性变形。对于黑色金属成形,当模具表面软化后硬度低于30HRC时容易发生变形而堆塌。工作载荷大、工作温度高的挤压模具和锻模凸起部位易产生这类失效。

(2) 热疲劳是指在环境温度发生周期性变化条件下工作的模具表面出现网状裂纹。热作模具工作温差大,急冷急热反复速度快的热压铸模具、锻模等易出现热疲劳裂纹,此裂纹属于表面裂纹,一般较浅,在机械应力作用下向内部扩展,最终产生断裂失效

(3) 断裂是指材料本身承载能力不足以抵抗

工作载荷而出现失稳态下的材料开裂,包括脆性断裂、韧性断裂、疲劳断裂和腐蚀断裂。热作模具断裂(特别是早期断裂),与工作载荷过大、材料处理和选材不当及应力集中等有关。挤压冲头及模具凸起部位根部等易出现断裂失效。

(4) 热磨损失效是指模具工作部位与被加工材料之间相对运动产生的损耗,包括尺寸超差和表面损伤两种形式。模具工作温度、材料的硬度、合金元素及润滑条件等都影响模具磨损。相对运动剧烈和凸起部位的模具,如热挤压冲头等易产生磨损失效。

### 9.3.3 热作模具材料的选用

影响热作模具寿命的因素很多,例如模具的受力情况、工作温度、冷却方式、被加工材料的性质、变形量、变形速度以及润滑条件等。因此在选择材料时,应根据模具的类型及具体工作条件合理地选用。各种类型热作模具材料的选用参照表9-16。

表 9-16 热作模具材料的选用

模具类型	零件名称和工作条件		推荐材料	使用硬度(HRC)
锤锻模	高度小于 275mm(小型)		5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV、4SiMnMoV	38~42(模面)
	高度 275~325mm(中型)		5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV、4SiMnMoV	33~38(模尾)
	高度 325~375mm(大型)		5CrNiMo、5CrMnSiMoV、4CrMnSiMoV、5CrNiTi	34~40(模面)
	高度大于 375mm(特大型)		5CrNiMo、5CrMnSiMoV、4CrMnSiMoV、5CrNiTi、5CrNiW	28~35(模尾)
	堆焊模块		5Cr2MnMo	350~400HBS
	镶块式		4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4CrMnMoSiV	
机锻模	整体式		5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnMoSiV、5CrMnMoSiV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2SiV、3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V、5Cr4Mo2W2SiV	28~34
	镶拼式	镶块	4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4Cr5W2SiV、3Cr2W8V、5Cr4W2Mo2SiV	
		模体	5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnMoSiV	
热挤压模	冲头		3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr5W2SiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4CrMnMoSiV	44~55
	凹模		3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、硬质合金、钢结硬质合金、高温合金	

(续)

模具类型	零件名称和工作条件	推荐材料	使用硬度(HRC)
温压挤模	冲头凹模	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb	50~62
高锻速模	凸、凹模	4Cr5W2SiV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr3Mo3W4VTiWb	44~55
热边切模	凸、凹模	6CrW2Si、5CrNiMo、3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1、4CrMnSiMoV、8Cr3、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、硬质合金	35~55
压铸模	锌及其合金	40Cr、30CrMnSi、40CrMo、CrWMn、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、3Cr2W8V、20钢(碳氮共渗)	50~60
	铝、镁及其合金	3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2SiV、3Cr3Mo3W2V、马氏体时效钢	42~50
	铜及其合金	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3Co3V、3Cr2W9Co5V、18Ni(250)、18Ni(350)	290~375HBS
	黑色金属	3W23Cr4MoV、3Cr2W8V(表面渗金属 Cr—Al—Si)	400~690HV

### 9.3.4 热作模具的热处理工艺

热作模具的工作条件恶劣,特别是工作温度高,性能要求苛刻。为了适应不同状态下使用,热作模具的材料和热处理工艺要求都比较高。下面主要对锤锻模、热挤压模、金属压铸模具用钢的热处理工艺分别进行论述。

#### 9.3.4.1 锤锻模的热处理工艺

1. 锤锻模用钢 用于锤锻模的钢主要有5CrNiMo、5CrNiW、5CrNiTi、5CrMnMo、5Cr2MnMo、5Cr2NiMoV钢等。这类锤锻模用钢的淬透深度及600~700℃时的硬度见表9-17所列。硬度与冲击值的关系如图9-3所示。

#### 2. 锤锻模的热处理工艺

(1) 退火,锤锻模钢须在锻后进行完全退火或等温退火。退火加热温度如表9-18所示,不同尺寸的模块退火工艺规范如表9-19所示。

对于含有NiCr等易形成白点的模块,需进行防止白点退火,见图9-4所示。

(2) 淬火,模具在淬火前应检查和清除刀痕等加工缺陷。为避免氧化、脱碳,应采用保护气氛加热或装箱保护。锤锻模的淬火工艺如表9-20所示。

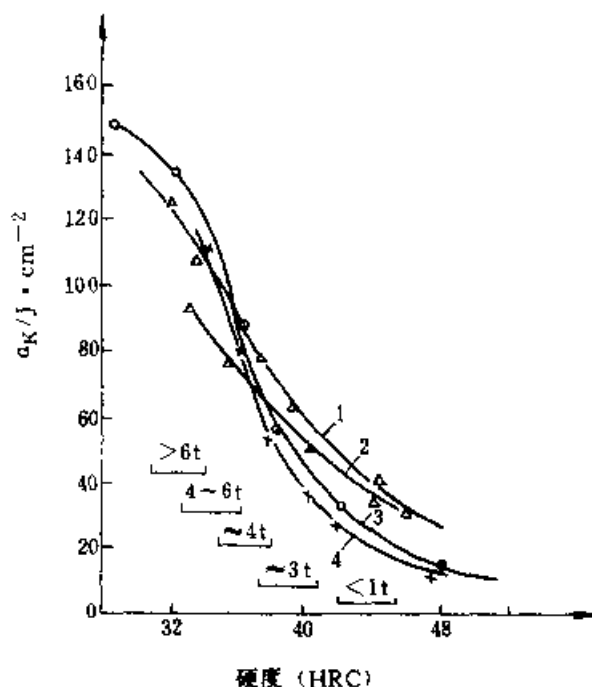


图9-3 锤锻模用钢的硬度与冲击韧度的关系

1—5CrNiW钢 2—5CrNiTi钢 3—5CrNiMo钢  
4—5CrMnMo钢

注:所标吨数系指锻锤的吨位。

表 9-17 锤锻模用钢的淬透深度和 600~700℃ 时的硬度

钢 号	淬 透 深 度	在 600~700℃ 时的硬度 (HBS)
5CrNiMo	300mm / 300mm × 400mm 经 820℃ 加热淬火, 650℃ 回火 10h 后, 整个截面硬度一致	207~125
5CrMnMo	90~100mm	175~115
5CrNiW	350mm 正方体, 经 830~880℃ 加热后淬火, 有 65~75mm 深度的高硬度区	202~120
5CrNiTi	350mm 正方体, 830~880℃ 加热淬火后, 有 70~100mm 的高硬度区	179~165
5Cr2NiMoV	160mm × 200mm 截面可淬透	

表 9-18 锤锻模用钢退火工艺

钢 号	加 热		等 温		硬度 (HBS)	冷却方式
	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h		
5CrMnMo	850~870	4~6	650~680	2~4	197~241	以 50℃/h 炉冷至 500℃ 出炉
5CrNiMo	760~780	4~6	650~680	2~4	197~241	
5Cr2NiMoV	790~810	4~6	720~730	2~4	220~230	
5CrNiW	780~800	4~6			197~241	

表 9-19 不同尺寸模块的退火工艺规范

锤锻模规格/mm	600~650℃ 预热时间/h	升温	保温温度/℃	保温时间/h	冷 却
250 × 250 × 250	2	随炉缓慢升温	830~850	4~5	随炉冷却 (以 50℃/h) 至 500℃ 以下出炉空冷
300 × 300 × 300	3		830~850	5~6	
350 × 350 × 350	4		830~850	6~7	
400 × 400 × 400	5		840~860	7~8	
450 × 450 × 450	6		840~860	8~9	
500 × 500 × 500	7		840~860	9~10	

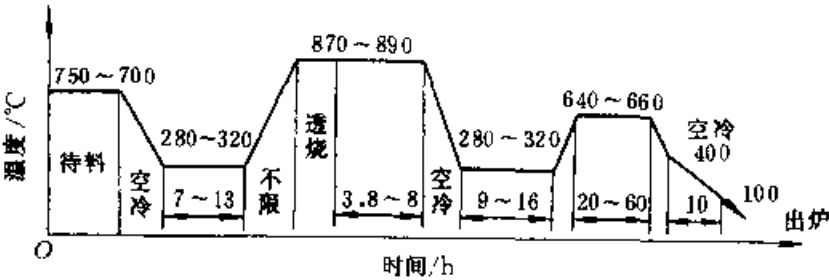


图 9-4 5CrMnSiMoV 钢模块普通退火与防止白点退火工艺曲线



表 9-20 锤锻模用淬火工艺

钢 号	淬火温度/℃	冷却介质	硬度 (HRC)
5CrNiMo	830~860	油	58~60
5CrNiW	840~860	油	55~59
5CrNiTi	830~850	油	55~58
5CrMnMo	820~850	油	52~58
5Cr2NiMoV	910~970	油	60~61

锤锻模具在淬火加热时,要进行一次或二次预热。锤锻模具常规的淬火温度是选在奥氏体晶粒不长大的温度范围,以保证有较高冲击韧度。对热锻模具钢组织与断裂韧度之间关系的深入研究表明,采用较高温度淬火,有助于提高锻模的断裂抗力,减少锻模的开裂。

锤锻模在常规温度淬火后,一般在钢中残留着(约10%体积分数),残留奥氏体。在箱式电炉中加热时,加热系数按2~3min/mm选用。盐浴炉加热时则为1min/mm。尺寸较大的锤锻模在淬火要冷到780~800℃后再淬冷。小模块的预冷时间为3~5min,大模块约为5~8min。淬冷油的允许温度范围为30~80℃。

一般锤锻模在冷至150~200℃时,就应从油槽中取出后立即装炉回火。

(3)回火,模具的回火温度,要按模具的工作条件和不发生脆断来确定。锤锻模的燕尾因应力集中较大,要求有高的韧性,其硬度要低于型腔的硬度。

锤锻模的回火温度与硬度的关系如表9-21所示。

锻模回火的时间应充分,否则会造成模具心部硬度偏高,产生开裂。

锻模回火后的冷却应注意防止第二类回火脆性,同时应进行二次回火,第二次回火温度低于第一次回火温度约10℃,保持时间可缩短20%~25%。

锻模燕尾的回火可在专用的燕尾回火炉中进行,也可采用降低燕尾冷却速度及燕尾预冷的淬火方法,有时可用燕尾自回火法。

3. 堆焊锻模的热处理工艺 堆焊锻模可以用45Mn2钢做铸钢基体,用5Cr2MnMo钢做堆焊层。

表 9-21 锤锻模用钢的回火  
温度与硬度的关系

钢 号	回火温度/℃	回火硬度 (HRC)
5CrMnMo	460~490	42~47
	490~520	38~42
	520~550	34~38
5CrNiTi	475~485	45~41
	485~510	43~39
	600~620	37~33
5CrNiW	520~540	45~41
	530~550	43~39
	590~610	37~38
	670~690	30~25
5Cr2NiMoV	500	50.5
	550	49.5
	640~660	41~45
	660~680	37~41

5Cr2MnMo钢经880℃淬火,620℃回火后硬度为388~354HBS,  $\alpha_K \geq 30\text{J/cm}^2$ ,  $\sigma_b$  为1350MPa,其性能与5CrNiMo钢相近,但高温性能要高一些。堆焊锻模的寿命与5CrNiMo钢锻模相当。

堆焊锻模的退火工艺如图9-5所示,淬火、回火工艺如表9-22所示。

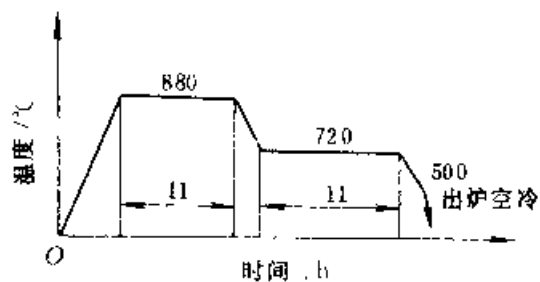


图 9-5 堆焊锻模的退火工艺曲线

### 9.3.4.2 热挤压模具的热处理工艺

1. 热挤压模具用钢 热挤压模具用钢要求有高的断裂抗力,抗压、抗拉及屈服强度,冲击及断裂韧度,抗回火软化能力及高温强度,室温和高温硬度。此外,还要求具有高的导热性、小的热胀系数、高的高温相变点和抗氧化能力。热挤压模具的主要用钢见表9-23所示。

表 9-22 5Cr2MnMo 钢堆焊锻模的淬、回火工艺

堆焊锻模类型及高度 $H$ mm		小型 $\leq 275$	中型 $\leq 325$	大型 $\leq 375$	特大型 $\leq 500$
硬 度 (HBS)		334~398	388~354	363~321	341~309
淬 火	加热时间 h	3~3.5	4~4.5	5~5.5	5~6
	加热温度 $^{\circ}\text{C}$	880	880	880	880
	保温时间 h	3~3.5	1~1.5	5~5.5	5~6
	出炉后预冷时间 min	3~1	1~5	5~5	6~7
	油冷时间 min	0.30~0.35	0.45~0.50	60~80	90~100
	出油温度 $^{\circ}\text{C}$	150~180	150~180	150~180	150~180
回 火	回火温度 $^{\circ}\text{C}$	580	600	620	630~640
	回火时间 h	3~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0

表 9-23 热挤压模具用钢

模具名称	钢 号	工 作 硬 度 (HRC)	备 注
机械压 力机及水 压机冲头	3Cr2W8V	44~50	水冷却
	3Cr3Mo3W2V	44~50	
	6Cr4Mo3Ni2WV	48~52	
	3Cr3Mo3VNb	44~48	
	5Cr4Mo3SiMnVAI	48~52	
	5Cr4W5Mo2V	48~52	
机械压 力机及水 压机凹模	4Cr5W2VSi	43~47	水冷却
	4Cr5MoSiV1	43~47	
	3Cr2W8V	48~52	
	3Cr3Mo3W2V	43~46	
	3Cr3Mo3VNb	43~46	
	6Cr4Mo3Ni2WV	48~52	
	4Cr3Mo3W1VTiNb	48~52	
	4Cr5MoSiV	43~47	
	4Cr5MoSiV1	43~47	

## 2. 热挤压模具的热处理工艺

(1) 退火。热挤压模具在锻后须经良好的球化退火,以改善组织,消除内应力、降低硬度,为最终热处理作好组织准备。

热挤压模具的退火工艺如表 9-21 所示。为确保模具钢具有良好的耐磨性、韧性和小的热处理

畸变倾向,退火后要注意碳化物的形状、大小及分布状态。

3Cr2W8V、3Cr3Mo3VNb、5Cr4W5Mo2V 等热模具钢还可采用如图 9-6 所示的快速球化退火工艺。该工艺由一次加热油淬(温度可为淬火温度)和二次加热后随炉冷却两个工序组成。特点是在两次加热时不需保温和等温时间,只需均温即可。炉冷的冷却速度可在较大的范围内变化,而对组织和退火的硬度影响不大。图 9-7 为二次加热温度与硬度的关系。三种钢在快速球化退火后,硬度均可控制在 220HBS 以下,球化组织均匀,可避免链状碳化物的出现。表 9-25 为三种热作模具钢快速球化退火后的硬度。

(2) 调质。为获得均匀的圆、细碳化物分布,热挤压模具可采用调质作为预备热处理。3Cr3Mo3W2V 锻后经 1150  $^{\circ}\text{C}$  油淬,730  $^{\circ}\text{C}$  高温回火后可显著提高断裂韧性。

(3) 正火。中碳高合金、大截面( $>\phi 100\text{mm}$ )热挤压模具钢易出现沿晶链状碳化物,在球化退火时难以消除,还须用正火予以消除。3Cr3Mo3W2V 锻后经 1130  $^{\circ}\text{C}$  正火和球化退火后,可消除链状碳化物。

(4) 淬火。淬火温度要按模具的工作条件、结构及形状、制造工艺和性能要求来确定。对断裂韧性、抗热疲劳和抗热磨损要求较高及淬火处理后需电加工的模具要采用上限和较高的温度淬火。对要求畸变小、晶粒细、冲击韧性高的模具,应用低限的温度淬火。表 9-26 所列为推荐的热作模具钢的淬火工艺。

表 9-24 热挤压模具钢的退火工艺

钢 号	退 火 工 艺	退火后硬度 (HBS)
3Cr2W8V	840~880°C→720~740°C 等温, 炉冷至 500°C 出炉	≤241
3Cr3Mo3W2V	870°C 加热→730°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	229~197
3Cr3Mo3VNb	840°C 加热→710°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	187
5Cr4W5Mo2V	850°C 加热→750°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	212~197
4Cr3Mo3W4VTiNb	850°C 加热→720°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	229~170
4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1	860~890°C 加热, 炉冷至 500°C 以下出炉	≤223
4Cr5W2VSi	860~880°C 加热, 炉冷至 500°C 出炉	≤229
5Cr4Mo3SiMnVA1	860°C 加热→720°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	≤229
5Cr4W2Mo2VSi	920°C 加热→790°C 等温, 炉冷至 500°C 以下出炉	≤229

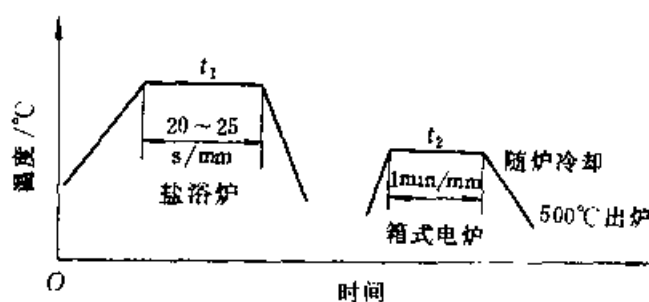


图 9-6 快速球化退火工艺

$t_1$ : 3Cr2W8V, 1050°C; 3Cr3Mo3VNb, 1030°C;  
5Cr4W5Mo2V, 1100°C

$t_2$ : 3Cr2W8V, 850~870°C; 3Cr3Mo3VNb,  
850~870°C; 5Cr4W5Mo2V, 850~870°C

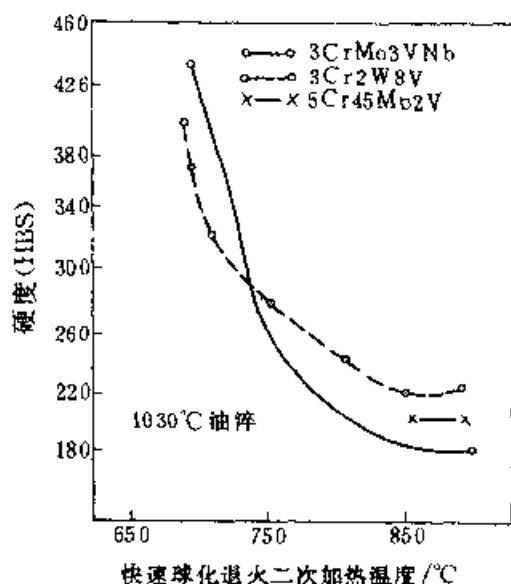


图 9-7 3Cr3Mo3VNb 钢快速球化退火二次加热温度与硬度的关系

表 9-25 三种热挤压模具钢快速球化退火后的硬度

钢 号	快速球化退火的加热温度/°C		硬 度 (HBS)
	一次加热 ( $t_1$ )	二次加热 ( $t_2$ )	
3Cr2W8V	1050	850~870	220
3Cr3Mo3VNb	1030	850~870	180~200
5Cr4W5Mo2V	1100	850~870	200

表 9-26 热挤压模具钢的淬火工艺

钢 号	淬火加热温度 /℃	淬火冷却介质	淬火后硬度 (HRC)
3Cr2W8V	1050 ~ 1100	油	50
	1150 ~ 1180	油	53 ~ 55
3Cr3Mo3W2V	1030 ~ 1090	油	52 ~ 55
3Cr3Mo3VNb	1060 ~ 1090	油、盐水	46 ~ 48
5Cr4W5Mo2V	1130 ~ 1150	油	56 ~ 60
4Cr3Mo3W4VTiNb	1160 ~ 1200	油	55 ~ 57
4Cr5MoSiV	1090 ~ 1050	油、空气	56 ~ 58

淬火加热保温时间的选择应保证组织转变的完成和可获得要求的合金元素固溶程度。淬火加热保温时间过短,将降低钢的热硬性及耐回火性,如表 9-27 所示。

中碳合金钢制热作模具的淬冷一般可采用油淬。对于畸变要求较高的模具,还可采用 80 ~ 150℃ 的热油冷却。3Cr2W8V 钢制模具按图 9-8 所示工艺处理后,畸变量可在 0.03mm 以下。对于要求高强韧性的模具,要采用高的淬冷速度以抑制碳化物的沿晶析出和出现上贝氏体,提高其强韧性和回火抗力,但其冷速必须控制在不出现淬火开裂和畸变在允许的范围

内。

(5) 回火,热挤压模具回火温度的选择应是在不影响模具的抗脆断能力及抗热疲劳性能的前

提下,尽可能提高模具的硬度。因此,应根据模具的工作条件和具体的失效形态来确定具体的回火温度和硬度。热挤压模具钢的回火工艺见表 9-28。

9.3.4.3 金属压铸模具的热处理

压铸金属用模具根据被压铸材料性质的不同,可分为压铸锌合金用模具,压铸铝合金(或镁合金)用模具、压铸铜合金用模具以及压铸铁合金用模具。由于使用条件特别是工作温度不同,所用的模具材料及热处理工艺也不同。

1. 压铸锌合金用模具的热处理 压铸锌合金用模具型腔的工作温度不超过 400℃,用一般结构钢制的模具寿命已可达 20 ~ 10 万次,优质模具钢制的模具寿命可高达 100 万次以上。

表 9-27 淬火加热保温时间对 3Cr3Mo3VNb 钢硬度的影响

处 理 状 态	硬 度 (HRC)					
	淬 火 加 热 保 温 时 间 /min					
	1	2	3	6	8	20
1060℃ 油淬	42.0	45.0	47.0	47.0	47.5	48.0
600℃ 第一次回火后	43.0	45.0	48.0	48.5	48.6	49.0
570℃ 第二次回火后	42.5	45.5	47.5	48.0	48.5	48.5

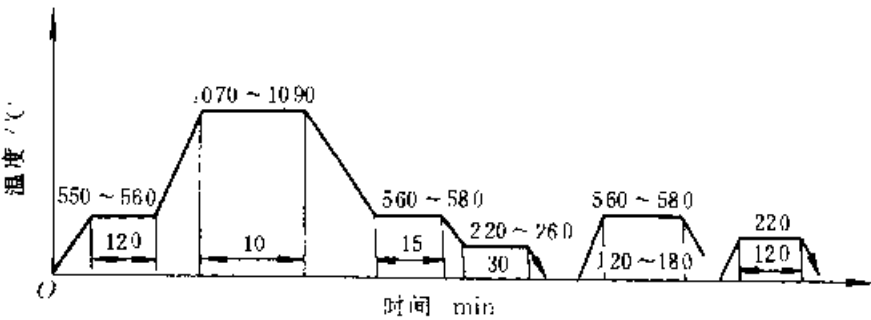


图 9-8 3Cr2W8V 钢制热挤压模具的热处理工艺曲线

(1) 压铸锌合金用模具用钢有合金结构钢: 40Cr、30CrMnSi、40CrMo; 模具钢: CrWMn、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、3Cr2W8V 等。

(2) 压铸锌合金用模具的热处理工艺, 见表 9-29。

2. 压铸铝合金用模具的热处理 压铸铝合金用模具型腔的工作温度高达 600℃左右, 其主要失效形式为粘模、热疲劳、拐角和尖角及锐边处开裂(粗裂纹或劈裂)、磨损或腐蚀。

(1) 压铸铝合金用模具用钢, 常用的模具钢有 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1 钢等。此外, 也有使

用马氏体时效钢 18Ni250 钢的。3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3VNb 钢在压铸铝合金用模具上应用获得良好的效果。

(2) 压铸铝合金用模具的热处理工艺, 工艺路线: 锻造→球化退火→粗加工→去应力处理(650℃)→精加工→最终热处理→钳修→打光→渗氮(或氮碳共渗)→装配。

压铸铝合金用模具的淬、回火工艺见表 9-30。热处理后的硬度一般不超过 48HRC, 过高易产生热裂。图 9-9 为 3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3VNb 的热处理工艺曲线。

表 9-28 热挤压模具钢的回火工艺

钢 号	淬火温度/℃	回 火 工 艺				回火后硬度 (HRC)
		温度/℃	时间/h	次 数	冷却方式	
3Cr2W8V	1050~1100	560~580	>2	>1	空、油	44~48
		600~640	>2	>1	空、油	40~44
	1100~1150	600~620	≥1	≥2	空、油	44~48
		640~660	≥1	≥2	空、油	40~44
4Cr5W2VSr	1050~1100	580~620	≥2	≥2	空、油	48~52
		520~560	≥2	≥2	空、油	52~56
3Cr3Mo3W2V	1030~1050	650~660	≥2	≥2	空、油	38~44
		600~620	≥2	≥2	空、油	48~52
5Cr4Mo3SiMnVA1	1090~1100	580~600	≥2	≥2	空、油	53~55
4Cr3Mo3W4VNb	1170~1190	620~640	≥2	≥2	空、油	50~52
3Cr3Mo3VNb	1070~1090	610~630	≥2	≥2	空、油	45~47
5Cr4W3Mo2V	1120~1140	620~640	≥2	≥2	空、油	49~51

表 9-29 压铸锌合金用模具的热处理工艺

模具名称	模具材料	热 处 理 工 艺	硬 度 (HRC)
小衬模	CrWMn	800~820℃盐炉加热, 淬油(油温 80~100℃); 410~430℃×1h 回火	56
小模数齿轮压铸模(冷挤压成形)	DT1 工业纯铁	中温固体碳氮共渗后直接淬火 渗剂(质量分数): 黄血盐 15%+碳酸钡 15%+木炭 70%, 用少许锭子油拌匀 工艺: 820~840℃×4~5h, 出炉开箱直接油冷, 180~200℃回火 1~2h	表面硬度: 58~63

表 9-30 压铸铝合金用模具的淬、回火工艺

钢 号	淬、回 火 工 艺	硬 度 (HRC)
3Cr2W8V	550~600℃ 预热, 1050℃ 加热, 预冷至 850℃ 油淬, 在 610℃、580℃ 进行两次回火 (结合进行渗氮或氮碳共渗)	40~45 (渗氮表面为 56~58HRC)
1Cr9W6	1120~1140℃ 加热, 油淬, 再进行 560~570℃ 回火	42~45
18Ni250	固溶温度 820℃, 时效温度为 482℃	50
2Cr10MoSiVWNiN	1010~1050℃ 加热, 油淬, 再在 565~590℃ 回火	35~39

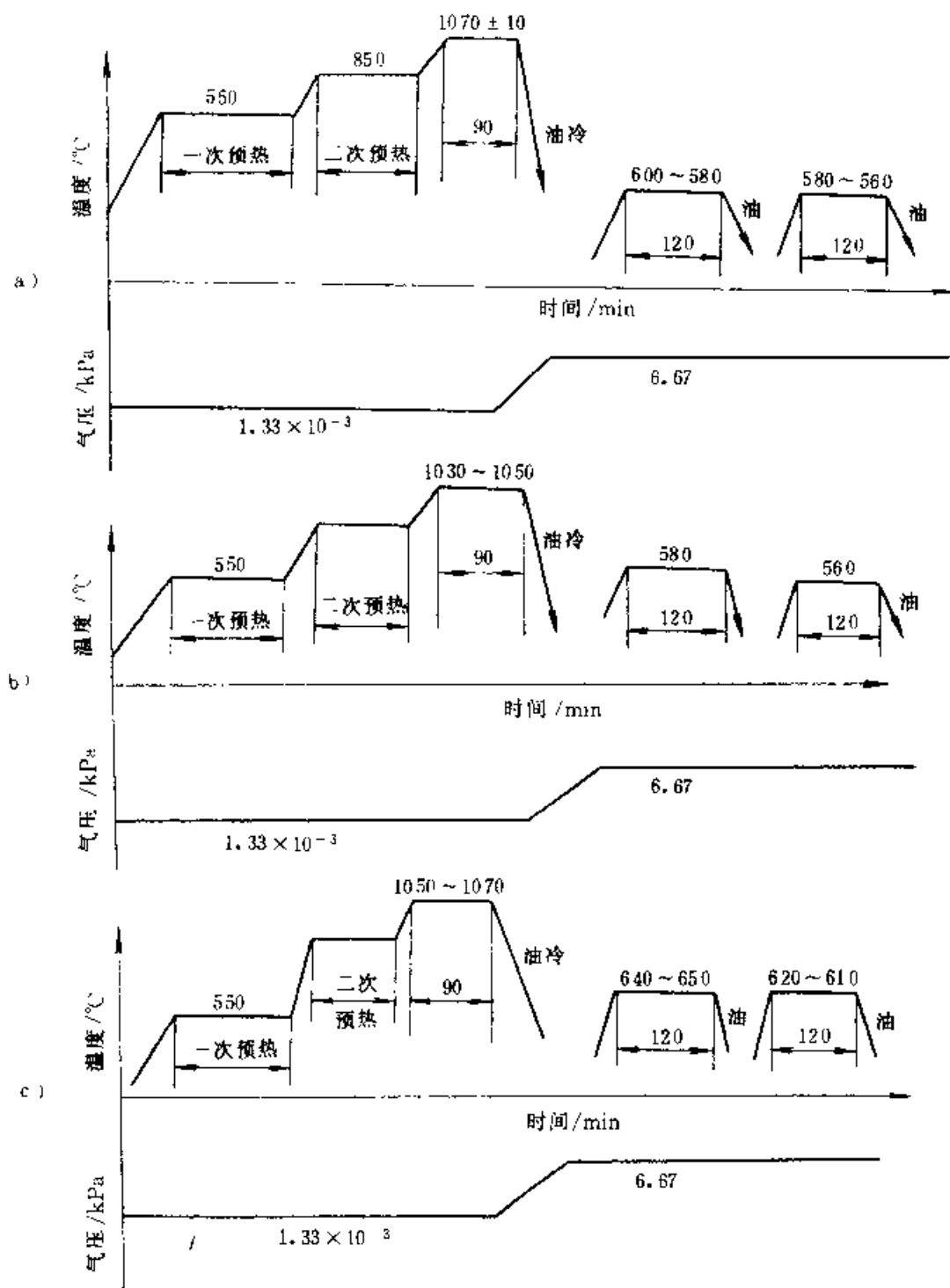


图 9-9 几种压铸铝合金用模具的热处理工艺曲线

a) 3Cr2W8V b) 3Cr3Mo3W2V c) 3Cr3Mo3VNB

为保证压铸铝合金用模具的热处理质量,要避免出现畸变、开裂、脱碳、渗碳、氧化或腐蚀等弊病,应在脱氧良好的盐浴中,或在有保护气氛的炉中,或装箱保护加热,或在真空炉中热处理。淬火加热时宜采用 150~500℃和 850~850℃的两次预热。装箱加热时应在 500℃以下入炉。

模具加热后淬冷过程的冷却速度,对模具性能和寿命的影响至关重要。冷速低,尺寸稳定性好,畸变、开裂倾向小,但显微组织会出现晶界碳化物或上贝氏体,从而降低断裂韧性。

模具淬火后应立即回火,以免开裂。回火温度根据工作硬度和钢的回火温度-硬度曲线来选定。通常推荐 3Cr2W8V 钢制压铸模型腔的硬度为 42~48HRC,4Cr5MoSiV 和 4Cr5MoSiV1 钢制的硬度为 44~50HRC。实际生产中选用 13~45HRC 的硬度时,可获得高的使用寿命。模具硬度过硬时,易产生热裂或热疲劳。

(3) 压铸铝合金用模具的防粘模处理。粘模是压铸铝合金用模具常见的失效形式,采用渗氮或氮碳共渗处理是防粘模的有效措施,也可采用涂层处理以提高抗粘模的能力。

液体氮碳共渗 可在尿素、碳酸钠、碳酸钾、苛性钾的混合盐浴中进行。盐浴温度为 570℃,保温性,表面硬度为 1150HV,渗层深度为 0.025mm。

离子氮碳共渗 在离子渗氮炉中,通以 1:1 的氨和乙醇,进行离子氮碳共渗,处理时间为 1h,化合物层厚度为 0.021mm,扩散层厚度为 0.212mm,表面硬度为 965HV。

保护膜 在型腔表面涂敷矿物油或石墨润滑剂后,在 500~550℃炉中加热 30~60min,可在模腔表面形成黑色保护膜。

3. 压铸铜合金用模具的热处理工艺 铜合金的熔点在 850~920℃之间,压铸铜合金用模具型腔的最高工作温度可达 750℃以上,因此对模

具用料要求有更高的热强性和热疲劳抗力。

(1) 模具材料。压铸铜合金用模具用材料如表 9-31 所示。一般的压铸铜合金的模具寿命为 3~8 万次。

表 9-31 压铸铜合金的模具  
材料和使用寿命

模具材料	被压铸材料	使用寿命(参考)
3Cr2W8V	黄铜	1.0~3.5 万次
3Cr2W3Co5V	黄铜	3.0~3.5 万次
3Cr3Mo3V	黄铜	1.0~5.0 万次
3Cr2W3Co5MoV	黄铜	4~6.5 万次
1Cr9W8	黄铜	3.1 万次
1Cr5MoSiV	黄铜	0.5 万次

(2) 压铸铜合金用模具的热处理工艺。压铸铜合金用模具的热处理规范如表 9-32 所示。

在采用气体渗氮以防铜合金粘模现象时,渗氮后要经 520℃×1h 的扩散处理,使表面硬度降至 700HV 左右,以免发生剥落开裂。

4. 压铸铁金属用模具的热处理 压铸铁金属用模具的型腔表面温度可达 1000℃以上。模具寿命很低,仅几百次就会因腐蚀、热裂、畸变而失效。

(1) 模具材料。表 9-33 为压铸铁金属用模具材料及其热处理。

(2) 模具的热处理工艺。3Cr2W8V 钢制压铸模可用渗铝、三元共渗来提高模具的表面性能。渗铝时可用 98% (质量分数) 铝铁合金+2% (质量分数) 氯化铵的渗剂,铝铁合金含铝量为 50% (质量分数)。将零件埋在渗剂中共同装入箱内加热。加热温度为 950℃,保温 15h。开箱后,模具重新装炉升温到 990℃,保温 3h 后,出炉空冷。渗铝层深度为 0.3mm,表面硬度为 105~386HV。

表 9-32 压铸铜合金用模具的热处理工艺参数

钢 号	退火温度 /℃	淬 火		回火温度 /℃	硬 度 (HBS)
		温 度/℃	冷 却 介 质		
3Cr2W8V	850	1100~1150	油、空气、500℃盐浴等温淬火	600~700	290~375
3Cr2W3Co5V	780~800	1100~1150	油、空气、500℃盐浴等温淬火	570~700	290~375
3Cr3Mo3V	710~750	1020~1150	油、空气、500℃盐浴等温淬火	600~700	290~375

表 9-33 压铸黑色金属用模具材料及其热处理

材料及热处理	压铸零件及材料	寿命(次)	失效原因
3Cr2W8V 常规热处理	18 钢胎自制 (重量 127g)	数十至数百次	大裂纹
3Cr2W8V + 表面渗铝	18 钢胎自制 (重量 127g)	1100 次	网状裂纹
	2Cr13, 汽轮机叶片	100 余次	网状裂纹
3Cr2W8V + Cr-Al-Si 三元共渗	2Cr13, 汽轮机叶片	160 余次	网状裂纹
3W23Cr4MoV	15 钢内轮 (重量 300g)	100 余次	

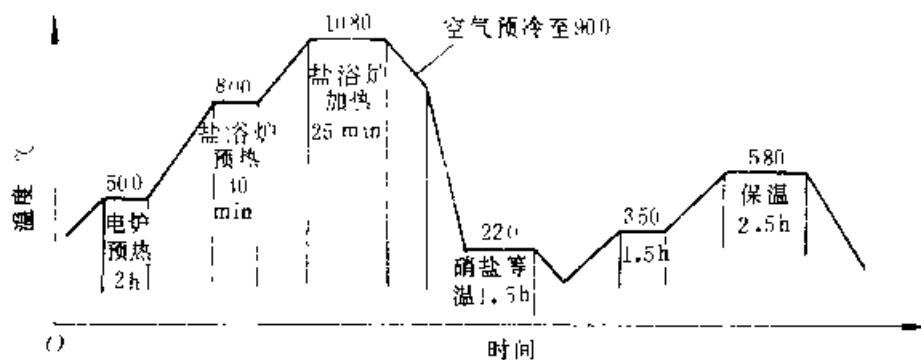


图 9-10 经 Cr-Al-Si 三元共渗后的 3Cr2W8V 钢制模具的热处理工艺 (压铸叶片模具尺寸为 300mm×120mm×60mm)

Cr-Al-Si 三元共渗可用 (质量分数) 铬粉 40%、硅铁粉 10%、铝铁粉 20%、三氧化二铝粉 30%，另加氯化铵 1% (质量分数) 的渗剂。将零件埋在渗剂中装入箱内，在炉内 1050℃ 的温度加热 10h 后，渗层深度为 0.08~0.20mm，渗层硬度为 500~690HV。模具在三元共渗后需再进行淬火、回火处理，如图 9-10 所示。

## 9.4 塑料模具的热处理

### 9.4.1 塑料模具的工作条件和分类

按塑料制品不同，可将塑料模具分为热塑性和热固性两类模具。其工作条件见表 9-34。

(1) 热固性模具 在加热和一定条件下，能直接固化成不溶或不熔性的塑料制品的工具。成形材料主要是酚醛树脂、三聚氰胺树脂等。

(2) 热塑性模具 在加热温度内可反复软化和冷凝成形制品的工具。成形材料主要是聚乙烯、尼龙等。

表 9-34 塑料用模具的工作条件

名称	工作条件	工作特点
热固性塑料用压模	受热 (200~250℃)，受力大，易磨损，易浸蚀。手工操作的模具还受到脱模的周期性冲击和碰撞	压制各种胶木粉，一般含有大量固体填充剂，多以粉末直接加入。模，热压成形，热机械载荷及磨损较重
热塑性塑料注射模	受热、受压、受磨损，但不严重。部分品种含有氯及氟，在压制时，析出腐蚀性气体，对型腔表面有较大侵蚀作用	塑料中通常不含固体填料，以软化形态注入型腔，当含有玻璃纤维填料时会加剧对型腔的磨损

### 9.4.2 塑料模具的主要失效形式

(1) 表面损伤失效，模具型腔表面粗糙度恶化，尺寸超差及表面侵蚀；热固性模具成形中固体



添加剂、热塑性模具成形材料中的 Cl、F 元素都会加剧表面损伤。

(2) 塑性变形失效, 模具在持续加热、受压力作用下局部发生塑性变形, 提高模具表面强度、硬度可改善使用性能。

(3) 断裂失效, 塑料模具形状复杂, 存在应力集中, 易产生断裂。复杂型腔, 大中型可选用合金钢类材料 (如渗碳钢或预硬钢)。

### 9.4.3 塑料模具材料的选用

塑料模具形状复杂, 加工难度大, 一般说来价格比较昂贵。为保证模具使用的高寿命, 防止早期损坏, 合理地选择模具材料是十分重要的。塑料模具的材料选择可参照表 9-35。

表 9-35 塑料模具材料的选用

工作条件	推荐材料
小批量、低精度、小尺寸模具	45、55 或 10、20 钢渗碳、40Cr 低熔点合金、锌基合金、有色金属及其合金等
较大载荷、较大批量的模具	20Cr、12CrNi3A (渗碳)
大型、复杂大批量的注射模和挤压成形模	3Cr2Mo、5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1
热固性塑料模和高耐磨的注射模等	T10A、T12A、9Mn2V、CrWMn、9CrSi、MnCrWV、Cr2、GCr15、8Cr2MnWMoVS、Cr2Mn2SiWNbV、Cr12、Cr12MoV、Cr6WV 等
耐腐蚀高精度	2Cr13、4Cr13、9Cr18、Cr18MoV、1Cr18Ni9
复杂、精密、高耐磨	5CrNiMnMoVSCa、8Cr2MnW-MoVS、4Cr5MoSiVS、6Ni6CrMoV、25CrNi3MoAl、18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350)

### 9.4.4 塑料模具的热处理工艺

塑料模具热处理包括预备热处理和最终热处理。要求处理后模具材料有适中的工作硬度易于加工; 有足够的强度和韧性; 较小的淬火变形量, 型腔表面容易抛光; 及一定的耐蚀性和耐热性。

1. 退火 表 9-36 为塑料模具钢的退火工艺。对冷压成形模用钢, 要求硬度  $\leq 150\text{HBS}$ ,  $\delta \geq 35\%$ ; 型腔复杂的深型腔, 要求硬度  $\leq 130\text{HBS}$ ,  $\delta \geq 45\%$ 。

2. 调质 45、10Cr 塑料模具可在调质态使用。调质工艺见表 9-37。

3. 淬火 塑料模具淬火时, 要采取防氧化、脱碳、侵蚀和畸变的措施。塑料用模具的硬度要求如表 9-38 所示, 淬火工艺如表 9-39 所示。要求高韧性的塑料用模可采用低碳钢或低碳合金钢进行渗碳或碳氮共渗处理。

4. 回火 塑料模具钢回火温度与硬度关系见表 9-10。

5. 渗碳型塑料模具用钢的热处理工艺 对渗碳层的要求, 一般渗层厚度为 0.8~1.5mm, 渗层含碳量为 0.7%~1.0% (质量分数) 为佳; 渗层不允许有粗大的未溶碳化物、网状碳化物、晶界内氧化等缺陷。

渗碳温度一般在 900~920℃, 保温时间为 5~10h。也可采用分段渗碳法, 第一段为高温渗入阶段 (900~920℃, 5~8h), 第二段为中温扩散阶段 (820~840℃, 2~3h)。12CrNi3A 渗碳后可直接空冷淬火而达到满意之效果, 其工艺为 910℃ 渗碳后随炉冷至 800~850℃, 出炉风冷, 然后 200~250℃ 回火 2~4h, 其硬度可达 53~56HRC, 变形轻微。

6. 预硬型塑料模具钢的热处理工艺 预硬型塑料模具钢的热处理工艺规范可参照表 9-41。

7. 时效塑料模具钢的热处理工艺 马氏体时效钢 18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350) 的热处理工艺规范可参照表 9-42 实施。我国自己研制的时效硬化钢的热处理工艺规范也可参照表 9-42。

8. 塑料模具的热处理工艺举例

(1) 20Cr 钢制的胶木用模, 硬度要求为 50~54HRC, 畸变量要求为 0.1mm。模具简图及热处理工艺如图 9-11 所示。

(2) 12CrNi3A 钢制的胶木用模, 硬度要求为 53~56HRC, 合面间隙小于 0.05mm。模具简图和热处理工艺如图 9-12 所示。

(3) CrWMn 钢制胶木用模, 要求硬度为 51~55HRC, 畸变要求为  $B=0$ ,  $A=0.07\text{mm}$ 。模具简图和热处理工艺如图 9-13 所示。

表 9-36 塑料模具用钢的退火工艺

钢 号	加 热		等 温		冷 却 方 式	退火后硬度 (HBS)
	温度/°C	时间/h	温度/°C	时间/h		
16、20	890~910	4~6	—	—	炉冷至 200°C, 出炉空冷	≤131
15Cr、20Cr	860~880	6~8	—	—	炉冷至 200°C, 出炉空冷	≤140
40、40Cr	820~840	1~2	—	—	炉冷至 500°C, 出炉空冷	≤163
T7A~T12A	760~780	3~4	680~700	5~6	炉冷至 500°C, 出炉空冷	187~207
CrWMn	780~790	2~4	680~700	4~6	炉冷至 300°C, 出炉空冷	207~255
5NiSCa	760~780	2	670~690	6~8	炉冷至 550°C, 出炉空冷	217~220
8Cr2MnWMoVS	790~810	2~3	690~710	4	炉冷至 550°C, 出炉空冷	≤229
25CrNi3MoAl	740~760	2~4	680~700	4~6	出炉空冷 (或水冷)	240

表 9-37 45、40Cr 塑料模具的调质工艺

钢 号	淬 火 加 热				淬火介质	回 火		硬 度 (HRC)
	箱 式 电 炉		盐 浴 炉			温 度	时 间	
	温度/°C	时间/min·mm <sup>-1</sup>	温度/°C	时间/min·mm <sup>-1</sup>		/°C	/h	
45	830~850	0.8~1.0	820~840	0.4~0.5	盐水→油	500~540	1~2	24~28
						540~580	1~2	20~21
						580~600	1~2	18~20
40Cr	850~870	1.0~1.2	840~860	0.5~0.6	油	470~500	1~2	24~28
						500~540	1~2	20~21
						540~580	1~2	18~20

表 9-38 塑料用模具的工作硬度

模 具 类 型	模具材料	工作硬度 (HRC)	说 明
形状简单, 压制加有无机填料的塑料用模	Cr12MoV 5CrW2Si 渗碳	56~60	在高压下要求有高的耐磨性
形状简单的高寿命塑料用模 (小型)	CrWMn, Cr2	54~58	在保证具有较好的耐磨性的前提下具有适当的强韧性
形状复杂、精度较高, 要求微畸变的塑料用模	T7A、T10A 5CrMnMo	45~50	用于易折断的型芯等部件
一般软质塑料注射模	碳素工具钢等	28~30 HBS	无填充剂的软质塑料
一般胶木用模及高强度热塑性塑料注射模	T10A、20Cr (渗 C) 12CrNi3A、CrWMn	52~56	包括尼龙、聚甲醛、聚碳酸酯等硬性塑料及光学塑料用模

表 9-39 塑料模具钢的淬火工艺

钢 号	预热温度 /℃	加热温度 /℃	淬 火 介 质
40Cr	盐浴炉加热 前, 以 2 : ~ 300℃ 烘烘; 箱 式电炉加热时, 可不另行预热	840~880	碱水
T10A		780~790	水
		800~820	碱水
Cr2, GCr15		830~850	油
9Mn2V		780~800	油
9CrWMn		800~820	油
CrWMn		800~820	油
5CrMnMo		830~850	油
5CrNiMo		840~860	油
5CrW2Si		840~900	油
Cr12MoV	850	950~980	油
25CrNi3MoAl		580~600 (固溶热处理)	硬度为 50HRC
7Mn15Cr2Al3V2WMo	550, 850	1180~1200 (固溶热处理)	水或 10% (质量分数) NaCl 水溶液冷却 (20~24HRC)
5CrMnMoMoVSCa	-	860~920	油
8Cr2MnWMoVS	-	860~880	空气 (60~63HRC)
3Cr2Mo		810~870	油或 180~220℃ (盐浴)
3Cr2NiMnMo		850~870	油或 180~220℃ (盐浴)

表 9 40 塑料模具用钢回火温度与硬度关系

钢 号	达到下列硬度的回火温度 /℃					
	模 具 硬 度 (HRC)					
	28~32	30~35	35~40	40~45	45~50	52~54
45	470~500	130~180	370~430	310~370	260~310	160~180
40Cr	420~480	100~440	340~400	270~340	210~270	160~180
8Cr2MnWMoVS	-	-	~650	~630	~580	~500
25CrNi3MoAl	680℃ 时效			520~540℃ 时效		
7Mn15Cr2Al3V2WMo				650℃ × 15~20h		
3Cr2Mo	~700	~65	~55	400~500	300~400	~200
3Cr2NiMnMo	-	~650	~600	~550	400~450	~150

表 9-41 预硬型塑料模具钢热处理规范

钢 号	退火温度/℃	硬度 (HBS)	淬火温度/℃	介 质	硬度 (HRC)	回火温度/℃	硬度 HRC
5CrNiMnMoVSCa	780	$\leq 255$	880	油或空	$>58$	200	57
						300	54
						400	50.5
						500	48
						600	43.5
3Cr2NiMnMo	850~700	$\leq 255$	850~870	油或 180~200℃ 盐浴	52	650	36
						250	40.5
						400	17.0
						550	11.5
						600	37.0
3Cr2Mo	710~740	$\leq 235$	840~870	油或 180~200℃ 盐浴	51	650	35.0
						200	50
						300	48
						400	46
						500	42
8Cr2MnWMoVS	800±10	$\leq 255$	880~920	空冷	63	600	36
						200	62.3
						300	53.7
						550	51.1
						600	47.1
						650	36.7

表 9-42 时效硬化模具钢的工艺规范

钢 号	固溶温度/℃	时效温度/℃	硬度 (HRC)	强度/MPa
18Ni (250)	815	482	50~52	1850
18Ni (300)	816	482	53	2060
18Ni (350)	816	510	57~60	2490
06Ni6CrMoV	800~850 (油冷)	500~520 (6~8h)	42~47	
25CrNi3MoAl	850~900 (油冷)	510~530 (8~10h)	40~42	

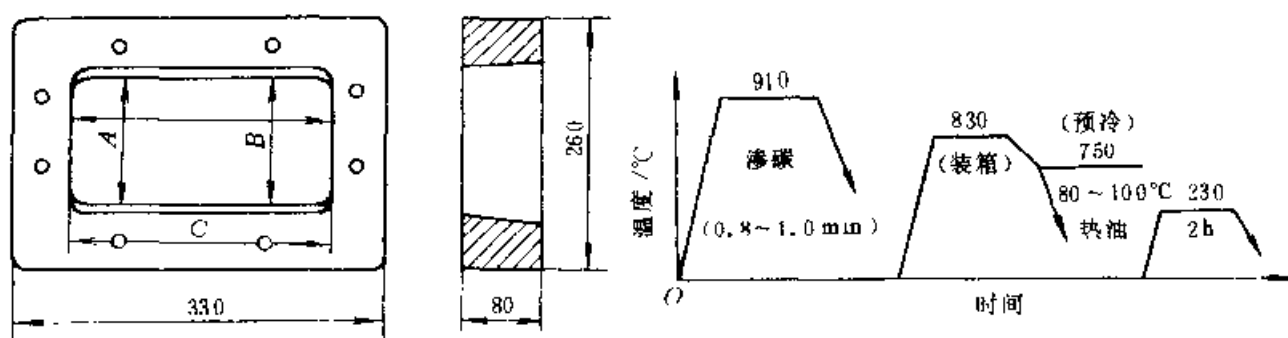


图 9-11 20Cr 钢制胶木用模的简图和热处理工艺

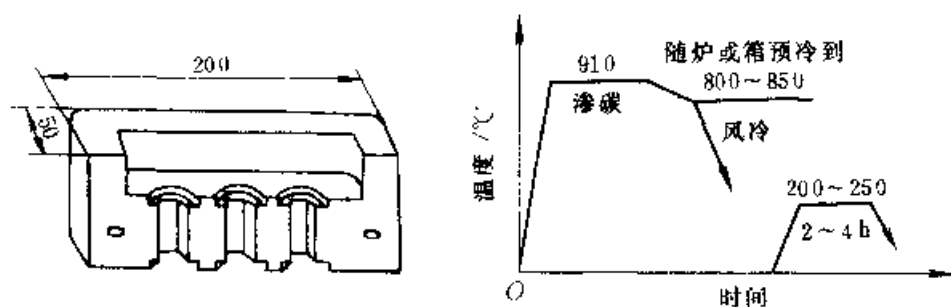


图 9-12 12CrNi3A 钢制胶木用模简图和热处理工艺

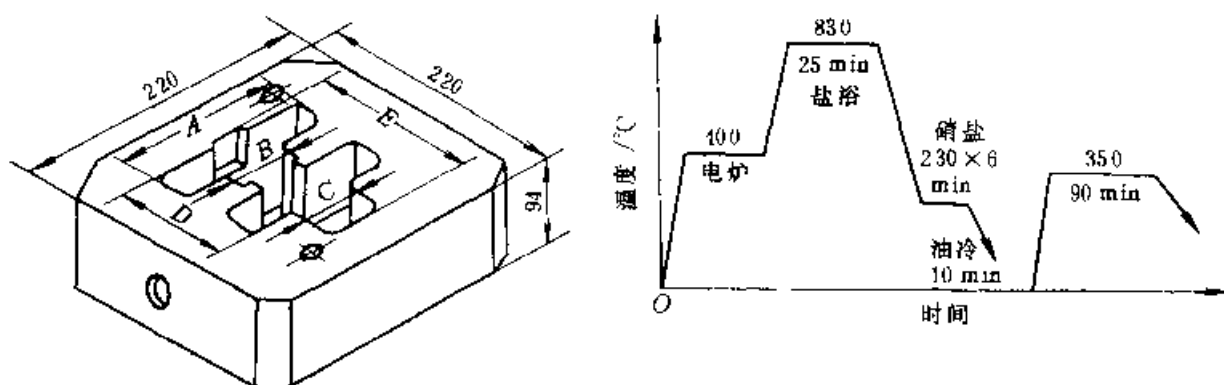


图 9-13 CrWMn 钢制胶木用模简图和热处理工艺

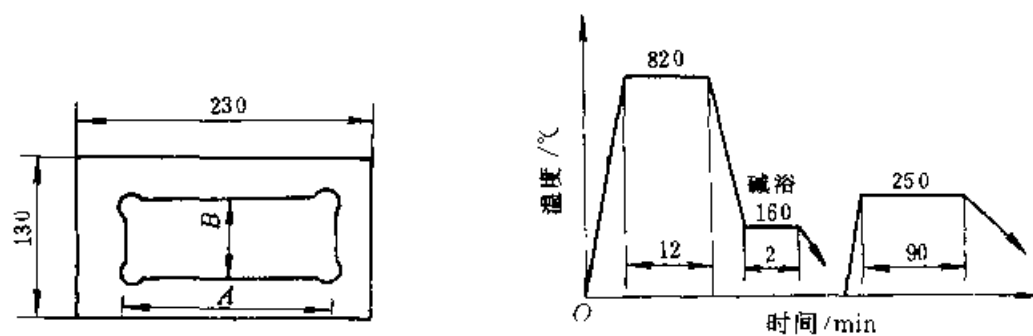


图 9-14 T10A 钢制塑料用模简图和热处理工艺

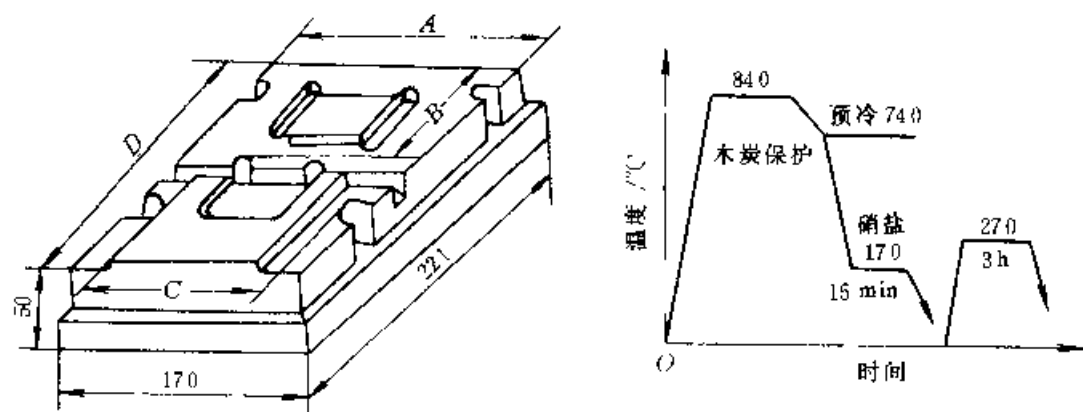


图 9-15 5CrMnMo 钢制塑料用压模简图和热处理工艺

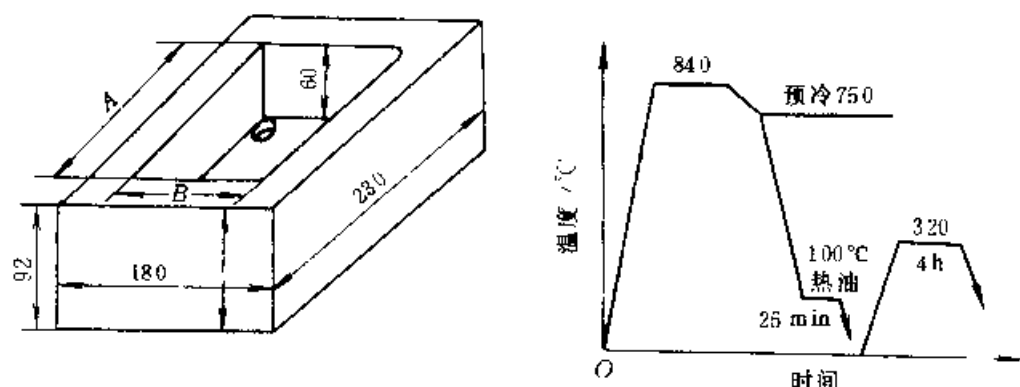


图 9-16 5CrMnMo 钢制塑料用凹模简图和热处理工艺

(4) T10A 钢制塑料用模, 要求硬度为 52~56HRC, 畸变量 -0.05mm。模具简图和热处理工艺如图 9-14 所示。

(5) 5CrMnMo 钢制塑料用压模要求硬度 50~52HRC, 畸变量 A 处为 -0.08mm, D 处为 0.04mm, C 处为 0.06mm。模具简图和热处理工艺见图 9-15, 热处理时装箱保护加热, 硝盐中进行马氏体分级淬火。

(6) 5CrMnMo 钢制塑料用凹模要求硬度为 50~53HRC, 畸变量为 A 处 -0.06mm, B 处 -0.04mm。模具简图和热处理工艺见图 9-16。

## 9.5 提高模具性能和寿命的途径

采用高强韧模具材料和强韧化处理及表面强化工艺, 是提高模具使用性能和延长模具使用寿命的十分重要的措施。但由于模具的尺寸、形状的复杂程度和工作条件及失效类型的差异极为悬殊, 因此, 在选材, 确定热处理工艺和使用硬度时, 要十分注意模具的具体使用条件。

### 9.5.1 高强韧模具材料的应用及效果

高强韧模具材料的应用及效果实例见表 9-43。

表 9-43 高强韧模具材料的应用及效果实例

例 号	热 处 理 工 艺	模 具	应用效果/次	备 注
3Cr3Mo3W2V (HMI)	550°C 第一次预热, 800°C 第二次预热, 1030~1060°C 加热油淬, 600~620°C 回火三次, 硬度为 44~48HRC	轴承套圈热挤 压凸凹模	1~3 万	
	550°C 第一次预热, 800°C 第二次预热, 1110~1130°C 加热油淬, 640~660°C 回火二次, 硬度为 38~42HRC	高强度钢形状 复杂锻件精锻模	约 1000	

(续)

钢 号	热 处 理 工 艺	模 具	应用效果/次	备 注
3Cr3Mo3VNb (HM3)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1040~1060℃ 加热油淬, 560~640℃ 回 火, 硬度为 48~42HRC	易脆裂的轴承 套圈热挤压模	1~3 万	该钢属超高强 韧热模具钢, 在 600℃ 以上强韧 性超过常用高强 韧热模具钢
		连杆辊锻模	1~2 万	
		压铸铝合金模 具	15~20 万	
	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1040~1060℃ 加热油淬, 560~600℃ 回 火二次, 硬度为 48~46HRC	耐热不锈钢制 弯管头、支板销、 叶片锻件等热作 模具		
5Cr4W5Mo2V (RM2)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1120~1140℃ 加热油淬, 610~630℃ 回 火二次, 硬度为 50~52HRC	轴承套圈热锻 冲模	1~2 万	
5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1090~1110℃ 加热油淬, 520~540℃ × 2h 回火三次硬度为 60~62HRC	M12 六角螺 母下冲	11 万	
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1150~1170℃ 加热油淬, 540~570℃ 回 火三次, 硬度为 58~60HRC	M10 螺栓冷 锻顶模	16~20 万	
		平圆头十字槽 冲模	9 万	
		不锈钢异形件 冷锻模	2~2.5 万	
Cr4W2MoV	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 980~1000℃ 加热油淬, 400~420℃ 回火 二次, 硬度为 56~58HRC	钢板弹簧冲孔 凸模	约 800	
8Cr2MnWMoVS	预硬态使用, 860~880℃ 加热空冷, 硬 度为 60~64HRC, 560~620℃ 回火硬度 为 36~44HRC, 560℃ 离子渗氮 8h, 硬度 为 1000~1100HV0.1	胶木模, 陶土 模		
	在高硬态使用, 550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 860~900℃ 空淬, 160 ~250℃ 回火, 硬度为 58~60HRC	电阻连接复合 模	60~150 万	
		倒顺开关级进 模		
7Cr7Mo3V2Si (LD)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1090~1100℃ 加热油淬, 520~540℃ 二 次回火, 硬度为 58~60HRC	M10 六角螺 母下冲	18 万	
		M12 六角螺 栓冷锻模	40 万	
		3/4in 轴承钢 球冷锻模	3.5~4 万	

注: 模具的热处理工艺及使用硬度要按模具的尺寸大小、形状复杂程度及工作条件选定。

### 9.5.2 模具的强韧化处理工艺及应用实例

模具的强韧化处理及应用实例见表 9-44。

对于高精密,要求尺寸和性能稳定的模具,常

常采用真空热处理工艺。常见模具钢真空热处理工艺见表 9-45。

真空热处理的模具往往比常规热处理的模具的使用寿命有显著提高。图 9-17 为几种冷作模具应用实例结果比较。

表 9-44 模具强韧化处理应用实例

模具名称	模具材料	强韧化工艺及方法	应用效果及使用寿命/次
枪管座锻模	3Cr2W8V	高温淬火, 高温回火; 1130~1150℃油淬, 640~660℃回火, 硬度 38~42HRC	0.8~0.1 万
一字槽光冲模	60Si2MnA	贝氏体等温淬火: 850~870℃加热, 230~240℃×25min 等温后空冷 280~300℃回火, 硬度为 56~58HRC	2~3 万
六角螺母冷镦下冲模			10~15 万
分电器螺塞螺纹滚丝模	Cr12MoV	贝氏体等温淬火: 980~1000℃加热, 270~280℃×4h 等温空冷, 400~420℃回火, 硬度为 54~56HRC	5~8 万
硅钢片冲孔冲模 (φ10mm)		1030~1050℃空冷淬火到室温, 再在 -70℃冷处理 60min, 取出后温度回升到室温后进行 180~200℃的回火	刃磨寿命 12 万 (未冷处理的为 5 万次)
不锈钢餐具中温热辊轧模具	5Cr4W5Mo2V	中温回火: 1130~1140℃加热油淬, 440~450℃回火, 硬度为 54~58HRC	15~25 万
微细冷冲模	CrWMn	贝氏体等温淬火: 820~840℃加热, 在 230~240℃等温后空冷, 230~250℃回火, 硬度为 54~56HRC	8~10 万
表壳热冲模	W18Cr4V	1210~1230℃加热油淬, 600~610℃回火二次, 硬度为 58~60HRC	2.5~4.0 万
滚花轮			0.8~1 万
螺钉冷镦模	W6Mo5Cr4V2	1170~1180℃加热油淬, 200~220℃回火, 硬度为 60~62HRC	10~15 万

表 9-45 常用模具钢真空淬火工艺参数

钢材牌号	预 热		淬 火			回火温度 /℃	硬 度 (HRC)
	温 度 /℃	真空度 /Pa	温 度 /℃	真空度 /Pa	冷 却		
9CrSi	500~600	0.1	850~870	0.1	油 (40℃以上)	170~190	61~63
CrWMn	500~600	0.1	820~840	0.1	油 (40℃以上)	170~185	62~63
9Mn2V	500~600	0.1	780~820	0.1	油	180~200	60~62
5CrNiMo	500~600	0.1	840~860	0.1	油或 N <sub>2</sub> 气	480~500	39~44.5
Cr5MoV	一次 500~550 二次 800~820	0.1	970~1000	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	160~200	60~62
3Cr2W8V	一次 480~520 二次 800~850	0.1	1050~1100	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	560~580 600~640	42~47 39~44.5



(续)

钢材牌号	预 热		淬 火			回火温度 /°C	硬 度 (HRC)
	温 度 /°C	真空度 Pa	温 度 /°C	真空度 Pa	冷 却		
4Cr5W2SiV	一次 180~520 二次 800~850	0.1	1050~1100	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	600~650	38~44
7CrSiMnMoV	500~600	0.1	880~900	0.1	油或 N <sub>2</sub> 气	450 200	52~54 60~62
4Cr5MoSiV1	一次 500~550 二次 800~820	0.1	1020~1050	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	560~600	45~50
Cr12	500~550	0.1	960~980	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	180~240	60~64
Cr12MoV	一次 500~550 二次 800~850	0.1	980~1050 1080~1120	10~1	油或 N <sub>2</sub> 气	180~240 500~540	60~64 58~60
W6Mo5Cr4V2	一次 500~600 二次 800~850	0.1	1100~1150 1150~1250	10	油或 N <sub>2</sub> 气	200~300 540~600	58~62 62~66
W18Cr4V	一次 500~600 二次 800~850	0.1	1000~1100 1240~1300	10	油或 N <sub>2</sub> 气	180~220 510~600	58~62 62~66

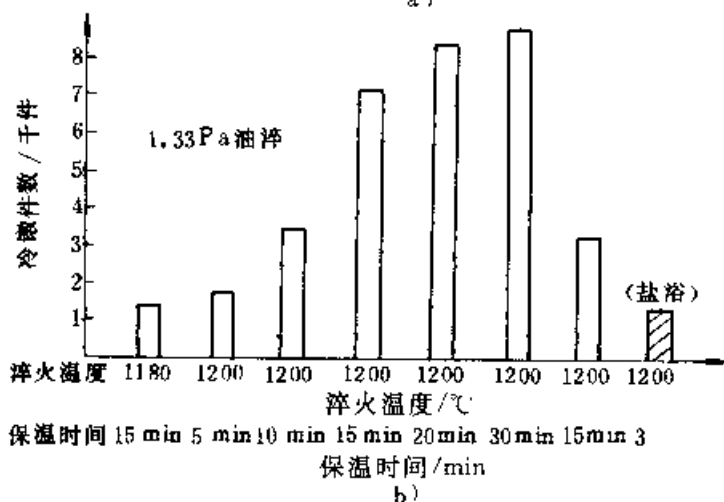
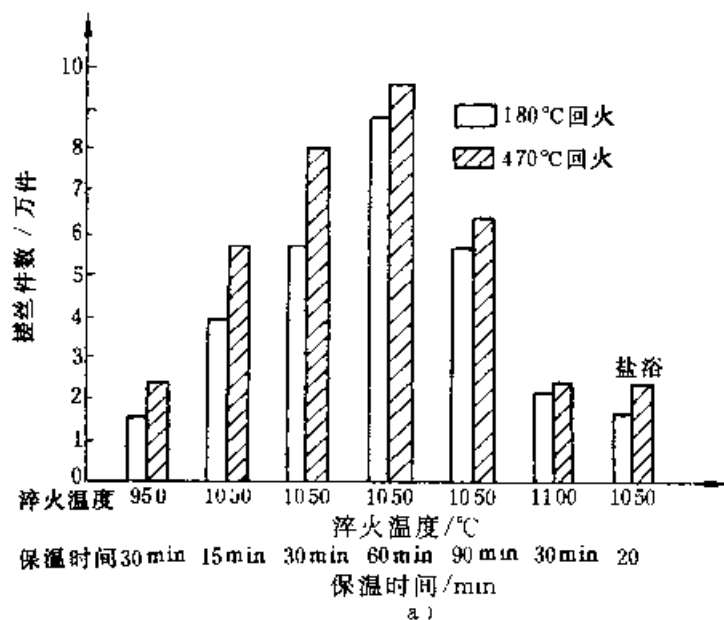


图 9-17 真空淬火对模具寿命的影响

a) Cr12MoV 钢搓丝板 (真空) 淬火工艺: 1010~1030°C 加热油淬, 真空度为 13.33~6.65Pa 160~180°C 回火, 61~63HRC

b) W6Mo5Cr4V2 钢十字槽成形冲头

### 9.5.3 模具表面强化技术及应用实例

随着模具在现代工业生产中的应用越来越广泛,对模具的质量及使用寿命提出了更高的要求。由于模具的种类繁多,使用状态十分复杂,应根据不同模具的服役条件,科学地寻求提高模具使用寿命的途径。模具表面强化处理是提高使用性能和寿命的重要措施。目前改善模具表面性能的主要方法分为三类:

(1) 不改变表面化学成分的方法,主要有高频加热淬火、火焰加热淬火、电子束相变硬化、激光相变硬化和加工硬化等。

(2) 改变表面化学成分的方法,有渗碳、渗氮、渗硼、渗硫、渗金属、复合渗(多元共渗)、TD法和离子注入等。

(3) 表面形成覆盖层的方法,有镀金属、堆焊、电火花强化、化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)等。

各种表面强化方法的主要特性比较如表9-46所示。

#### 9.5.3.1 表面强化方法的选择原则

1. 提高模具表面的耐磨性 无论是冷作模具、热作模具还是塑料模,均有由于磨损而失效的。模具的表面硬度不足是造成模具早期失效的重要原因之一。模具钢的耐磨性与钢中碳化物的类型与数量有关,即便是高碳高铬类模具钢其耐磨性乃不能满足要求。采用表面强化的方法来提高模具表面的耐磨性是行之有效的。有关资料表明,气体氮碳共渗可使高速钢表面的耐磨性提高2~5倍。渗硼层、渗钒层、碳化钛层的耐磨性就

更高。

2. 耐磨性与强韧性的良好配合 对大多数模具材料来说,提高强韧性往往要损失耐磨性。解决这个矛盾的方案是选择合适的模具材料,进行适当的热处理使其获得最佳的强韧性,然后通过表面强化的方法提高表面耐磨性。例如缝纫机梭子的冷挤压凸模,采用高速钢W18Cr4V制造,模具经常碎裂,使用寿命极不稳定;改用基体钢6Cr5W3Mo2VNi后韧性大大改观,但耐磨性不足,寿命仅1.6万件;用6Cr5W3Mo2VNi淬火后加气体氮碳共渗处理,其寿命达到2.68万件,基体的强韧性与表面耐磨性达到了良好的配合。

3. 提高抗咬合能力 在拉伸、挤压等类模具中,常发生“冷焊”现象,解决这类问题的方法是通过表面处理降低模具表面的摩擦系数。有的表面处理方法使其表面疏松、内有微孔、塑性好,不但有利于降低表面摩擦系数,而且微孔中的油还可以改变润滑状况,提高抗拉毛、烧伤和抗咬合能力。表面渗硫、渗氧就具有这类特性。

4. 改变表面应力状态 模具钢经过淬火、回火后,表面处于拉应力状态,这将促使裂纹的早期形成。很多表面处理可以改变模具表面的这种应力状态,变拉应力为压应力。由于表面形成了较大的残余压应力,从而延迟了疲劳裂纹的产生和扩展,有利于提高模具的冲击疲劳失效抗力,延长了模具使用寿命。这是仅采用模具新钢种和改变热处理工艺方案所不能作到的。例如电子束相变强化表面和表面真空渗氮处理后均可使模具表面形成600~800N/mm<sup>2</sup>的残余压应力。

表 9-46 表面强化方法

表面处理方法 性 能	镀		N-C 共渗	离子 渗氮	真空 渗氮	渗硫	渗硼	CVD TiC	PVD TiC	TD法			超硬 合金	工模 具钢
	Cr	Ni-P								VC	NbC	Cr7C3		
硬 度	良	良	良	良	良	一般	优	优	优	优	优	优	优	标准
耐磨性	良	良	良	良	良	一般	良	优	优	优	优	良	优	标准
抗热粘着性	良	良	良	良	良	良	良	优	优	优	优	优	优	标准
抗咬合性	良	良	良	良	良	良	良	优	优	优	优	优	优	标准
抗冲击性	一般	一般	一般	一般	一般	标准	一般	标准	标准	标准	标准	标准	一般	标准
抗剥落性	一般	一般	良	良	良	优	一般	良	良	良	良	良	—	—
抗变形开裂	一般	一般	优	良	良	优	良	良	良	良	良	良	—	—

5. 提高抗氧化性和抗腐蚀性 有些热作模具和塑料模均有氧化和腐蚀问题, 仅仅靠模具材料本身固有的性能来满足使用要求, 往往感到不足。因此常常需要用表面强化处理的方法来弥补。例如表面镀铬就具有较好的抗腐蚀性。

### 9.5.3.2 表面强化技术的应用

1. 渗碳 典型的渗碳工艺如表 9-47 所示。

2. 渗氮 模具的典型渗氮工艺如表 9-48 所示。

3. 渗硫 低温电解渗硫法: 以工件为阳极, 坩埚或辅助工具为阴极, 在硫氰酸盐浴中, 通过电场的作用, 熔盐发生电解电离产生  $S^-$  离子并推

向阳极, 与  $Fe^{++}$  离子结合形成硫化层。

熔盐成分 (质量分数) 75%  $KCN$  + 25%  $NaCN$  + 1% ~ 3%  $K_2Fe(CN)_6$ 。

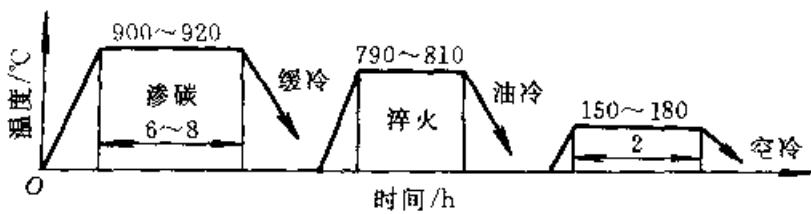
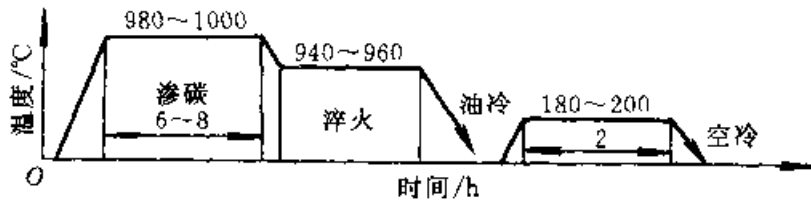
处理温度为 180 ~ 200 °C, 时间 10 ~ 25 min, 工作电压 0.8 ~ 4 V, 工作电流 2 ~ 7 A。

工艺流程: 脱脂酸洗 → 水清洗 (干燥) → 装夹 → 烘干 (预热) → 电解渗硫 → 清洗 → 烘干 → 浸油 → 检验。

4. 渗硼 渗硼是模具制造中比较有效的化学热处理工艺。渗硼层硬度高 (1500 ~ 2000 HV)、耐磨性好, 耐热性能显著提高。

常用的渗硼工艺规范如表 9-49 所示。

表 9-47 典型渗碳工艺

渗碳类型	工 艺 规 范
固体渗碳	<p>1) 9CrSi、CrWMn 渗碳处理工艺:</p>  <p>2) 2Cr13 渗碳处理工艺:</p> 
液体渗碳	<p>1) 无毒盐浴渗碳工艺:</p> <p>将盐放入炉内熔化, 升至 900 °C 以后逐渐加入配好的渗碳剂, 并使温度升至 <math>(930 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 即可放入工件进行渗碳。渗碳时间厚度为 0.4 ~ 0.6 mm; 2h; 为 0.6 ~ 1.0 mm; 4h; 为 1.0 ~ 1.4 mm; 6h。</p> <p>2) 电解液体渗碳工艺:</p> <p>在中性盐浴中插入一石墨电极作为阳极, 工件作为阴极并通入直流电。例如在 25% (质量分数) <math>CH_3COOK</math> 的甘油液中, 电流密度 0 ~ 1.3 A/cm<sup>2</sup>, 电压 180 ~ 250 V, 迭加 350 kHz 高频及磁场 5 ~ 10 mm 渗层厚度为 0.3 ~ 0.5 mm</p>

(续)

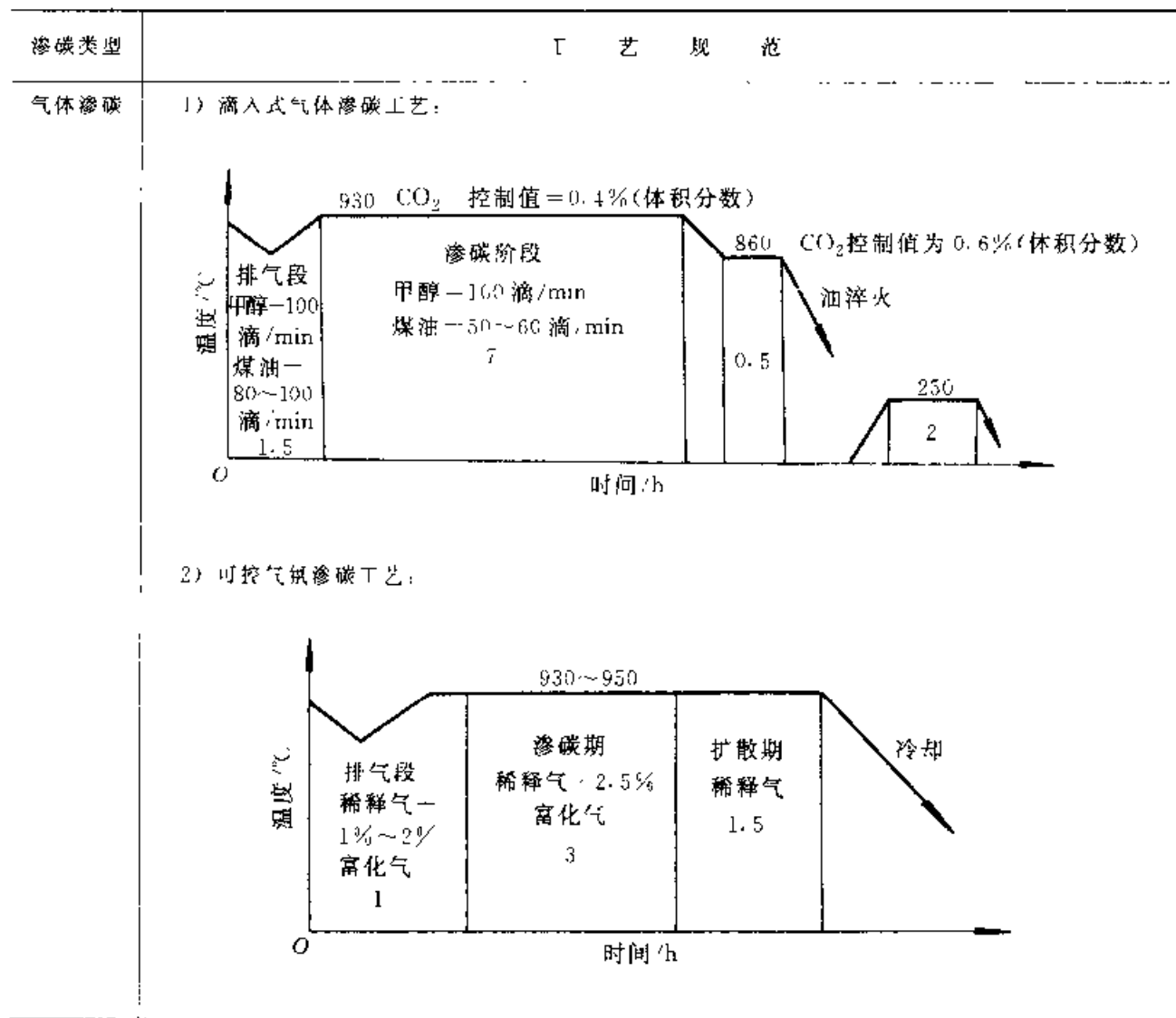


表 9-48 模具的渗氮工艺

渗氮类型	工 艺 规 范						
气体渗氮	钢 号	渗 氮 工 艺				渗氮层深 /mm	表面硬度 (HV)
		阶 段	温度 /°C	时间/h	分解率 (%)		
	3Cr2W8V	I	480~490	20~22	15~25	0.20~0.35	≥600
		II	520~530	20~24	30~50		
		III	600~620	2~3	100		
Cr12MoV	I	490~500	15	15~25	0.15~0.25	≥750	
	II	520~530	30	35~50			
	III	540~550	2	100			
10Cr	I	470~480	10	15~25	0.20~0.28	≥480	
	II	510~520	25	30~50			
	III	550~560	2	100			

(续)

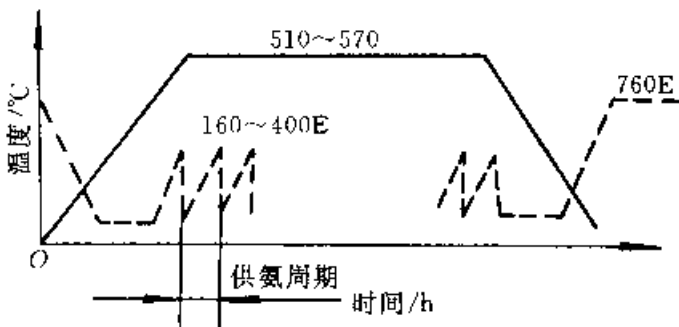
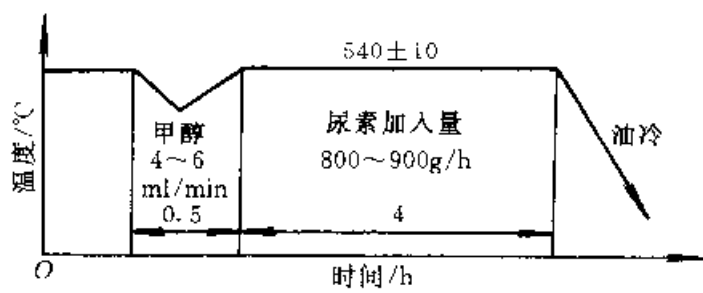
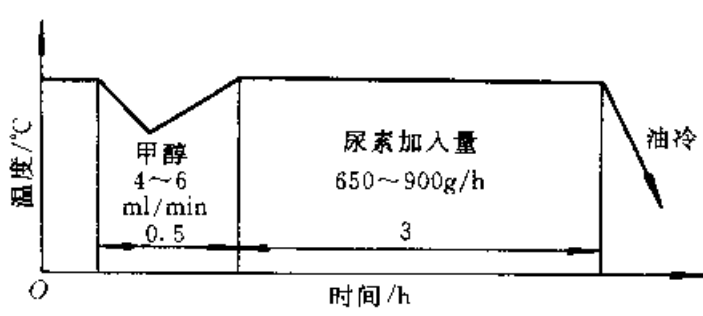
渗氮类型	工 艺 规 范																								
气体氮碳共渗	<p>滴入式气体氮碳共渗工艺规范</p> <p>1) Cr12MoV</p>  <p>2) 3Cr2W8V</p> 																								
离子渗氮	<p>部分模具钢的渗氮工艺与使用效果</p> <table><tr><th>模具名称</th><th>模具材料</th><th>渗氮工艺</th><th>使用效果</th></tr><tr><td>冲 头</td><td>W18Cr4V</td><td>500~520°C×6h</td><td>提高 2~4 倍</td></tr><tr><td>铝压铸模</td><td>3Cr2W8V</td><td>500~520°C×6h</td><td>提高 1~3 倍</td></tr><tr><td>热 锻 模</td><td>5CrMnMo</td><td>480~500°C×6h</td><td>提高 3 倍</td></tr><tr><td>冷挤压模</td><td>W6Mo5Cr4V2</td><td>500~550°C×2h</td><td>提高 1.5 倍</td></tr><tr><td>压 延 模</td><td>Cr12MoV</td><td>500~520°C×6h</td><td>提高 5 倍</td></tr></table>	模具名称	模具材料	渗氮工艺	使用效果	冲 头	W18Cr4V	500~520°C×6h	提高 2~4 倍	铝压铸模	3Cr2W8V	500~520°C×6h	提高 1~3 倍	热 锻 模	5CrMnMo	480~500°C×6h	提高 3 倍	冷挤压模	W6Mo5Cr4V2	500~550°C×2h	提高 1.5 倍	压 延 模	Cr12MoV	500~520°C×6h	提高 5 倍
模具名称	模具材料	渗氮工艺	使用效果																						
冲 头	W18Cr4V	500~520°C×6h	提高 2~4 倍																						
铝压铸模	3Cr2W8V	500~520°C×6h	提高 1~3 倍																						
热 锻 模	5CrMnMo	480~500°C×6h	提高 3 倍																						
冷挤压模	W6Mo5Cr4V2	500~550°C×2h	提高 1.5 倍																						
压 延 模	Cr12MoV	500~520°C×6h	提高 5 倍																						
真空渗氮	<p>采用了真空技术后,简化了渗氮工艺的控制过程,缩短了渗氮时间,改善了渗氮层组织。典型渗氮工艺曲线如下</p> 																								

表 9-49 渗硼工艺

渗硼类型	工 艺 规 范					
固体渗硼	工件埋入渗硼剂中,放入加热设备加热到 800~1050℃ 保温几到十几小时渗硼剂的典型配方和工艺					
	序号	配 方 (质量分数)	处理材料	工 艺	层厚/ $\mu\text{m}$	组织
	1	20%~30%木炭粉+5% $\text{KBF}_4$ +0.5%~3% $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ ,余为硼铁合金	45 钢	700~900℃ $\times$ 3h	40~184	双相
	2	5% $\text{KBF}_4$ +5% $\text{B}_4\text{C}$ +90% $\text{SiC}$	45	700~900℃ $\times$ 4h	20~200	双相
	3	10% $\text{KBF}_4$ +50%~80% $\text{SiC}$ ,余为硼铁合金	45	850℃ $\times$ 1h	90~100	单相 Fe-B
	4	5%~20% $\text{KBF}_4$ ,余为硼铁合金	S55C	750~950℃ $\times$ 6h	40~230	双相
	5	80% $\text{B}_4\text{C}$ +20% $\text{Na}_2\text{CO}_3$	S20C	900~1100℃ $\times$ 3h	90~320	
	6	90%硼铁+10%碱金属的碳酸盐(膏剂)	S55C	900~1100℃ $\times$ 5h	75~340	单相 Fe-B
	7	9% $\text{B}_4\text{C}$ +2.5% $\text{Al}_2\text{O}_3$ +2.5% $\text{NH}_4\text{Cl}$	45	950℃ $\times$ 5h	160	双相
	8	80%B 粉+16% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ +4% $\text{KBF}_4$	40Cr	900℃ $\times$ 1h~2h	130~160	双相
盐浴渗硼	典型操作工艺					
	1. 45 钢 400~450℃ 预热 (2h) + 920~950℃ 渗硼 (3~5h) 空冷至淬火温度水或油冷-160~180℃ 回火 (1~1.5h) + 清洗 (100℃)					
	2. Cr12MoV, 400~600℃ 预热 (2h) + 940~950℃ 渗硼 (3~5h) + 980℃ 保温后油淬+清洗 (100℃) + (250 $\pm$ 10)℃ 回火 (1~2h)					
	盐浴渗硼剂的配方					
	① 70%硼砂+20% $\text{SiC}$ +10% $\text{NaCl}$					
	② 85%硼砂+10%Al 粉+5% $\text{NaCl}$					
	③ 50%硼砂+10% $\text{SiC}$ +10% $\text{KCl}$ +20% $\text{Na}_2\text{AlF}_6$ +5% $\text{B}_4\text{C}$ +5% $\text{Cr}_2\text{O}_3$					

5. TD 法 利用硼砂作为盐浴向金属表面扩散 V、Nb、Ti、Cr 等金属元素。由于硼砂熔点为 740℃,其分解温度高达 1573℃,在渗金属的温度范围内 (850~1000℃) 极为稳定,而且熔融态的硼砂又能使金属表面洁净,有利于金属元素的吸附。

TD 法的盐浴配比见表 9-50。

表 9-50 TD 法的盐浴配比

渗入元素	盐浴组成 (质量分数)	渗层/ $\mu\text{m}$	流动性
渗铬	10%金属铬粉+90%无水硼砂	17.5 <sup>①</sup>	好
渗钒	10%钒铁+90%无水硼砂	22.0 <sup>②</sup>	好
渗铌	7%Nb+93%无水硼砂	17.2 <sup>③</sup>	好
	3%Nb+97%无水硼砂	14.7 <sup>④</sup>	

① T8A 材料温度为 1000℃ 保温 6h。

② T12A 材料温度为 1000℃ 保温 5.5h。

6. LT 新工艺 武汉材料保护研究所研制的再生盐 J-1 用于 LT 处理新工艺,可以实现金属表面的氮、硫、碳、氧四元共渗。提高了金属表面的抗咬合性、耐磨性、抗疲劳性和耐腐蚀性等。在模具上应用取得良好的效果。

LT 新工艺处理温度低 (500~580℃)、工艺时间短 (1~1.5h),渗层可达 8~12 $\mu\text{m}$ 。设备仅需一个中温外热式盐浴炉。

其工艺流程为:脱脂→预热→LT 处理 (500~580℃,10~180min)→冷却→沸水去盐→沸水烫十→浸热油。

7. 离子注入 金属的离子注入工艺是将高能束流的离子轰入金属材料表面,形成极薄的近表面合金化层,从而改变了金属表面的物理、化学和力学性能。部分模具离子注入后的使用寿命参照表 9-51。

8. 表面强化应用举例 模具的表面强化工艺及应用效果举例见表 9-52。

表 9-51 部分模具离子注入后的使用寿命

模 具	材 料	注入元素	使用寿命
钢 丝 模	YG8	N	提高 3 倍
铜 丝 模	YG3	N	提高 5 倍
冲 模	Cr 钢	N	提高 2 倍
丝 锥	M2	N	提高 2 倍

表 9-52 模具的表面强化及应用效果示例

模 具 名 称	模具材料	表 面 强 化 工 艺	应用效果 (次)
磁性材料粉末压制模	Cr12MoV	粉末渗硼: 渗剂: 93%SiC, + 5%KBF <sub>4</sub> +2%B <sub>4</sub> C 工艺: 900~920°C×4h 渗硼, 油冷, 200°C 回火	6 个月
钢管冷拔模	45	盐浴渗硼: 渗剂: 80%~85%Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> +10%NaF+5%~10%Al 屑 工艺: 920~950°C×3~5h 渗硼淬火, 160~180°C×1.5~2h 回火	寿命高于渗碳淬火模具
拉伸冲模	10Cr	盐浴渗硼: 渗剂: 6%NaCl+12%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +7%Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> +12%SiC 工艺: 930~950°C×3~4h 渗硼, 850°C 预冷, 油淬, 200°C×1h 回火	约 1 万次
M14 螺母冷锻模	Cr12MoV	氮碳共渗 渗剂: 甲醇、氨 (2~3: 8~7) 工艺: 540~560°C×3~4h, 空冷或油冷	10~15 万次
级进式连续拉伸凹模	Cr12	盐浴渗钒 渗剂: 10%V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +5%Al+85%Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> 工艺: 940~950°C×3~4h 渗钒, 油冷, 200°C 回火	一次拉伸寿命可达 8 万次

注: 表面强化工艺中渗剂成分均为质量分数。

## 9.6 模具热处理的缺陷分析及防止措施

### 9.6.1 模具热处理的畸变方式及控制

#### 9.6.1.1 模具热处理的畸变方式

模具壁厚均匀性、形状对称性、结构刚性等对淬火畸变有显著的影响。合理的模具结构是实现模具微畸变淬火的主要条件之一。图 9-18 为热处理畸变的基本特征。图 9-19 为凹模的壁厚对型腔淬火畸变的影响。几种常用冷作模具的淬火畸变见表 9-53。

#### 9.6.1.2 模具热处理畸变影响因素

模具热处理过程所产生的尺寸和形状畸变主要是由相变应力和热应力的作用引起的, 受多种因素的影响, 例如钢的含碳量、模具的尺寸形状、钢的基本特性及热处理工艺等。表 9-54、表 9-55 分别为模具钢的基本特性及工艺因素对淬火畸变倾向的影响。

#### 9.6.1.3 控制和减少热处理畸变的措施

采取正确的热处理工艺和相应的防畸变措施, 可使模具的热处理畸变控制在最小限度内。已畸变的模具也可采取热矫正方法予以矫正。

生产中可采用如下的一些防止热处理畸变的措施。

项 目	轴 类	立方体	圆盘形	圆环形	开口形	长槽形	长方形
原始状态							
热应力对畸变作用							
相变应力对畸变作用							
各向异性对畸变作用							

图 9-18 热处理畸变的基本特征

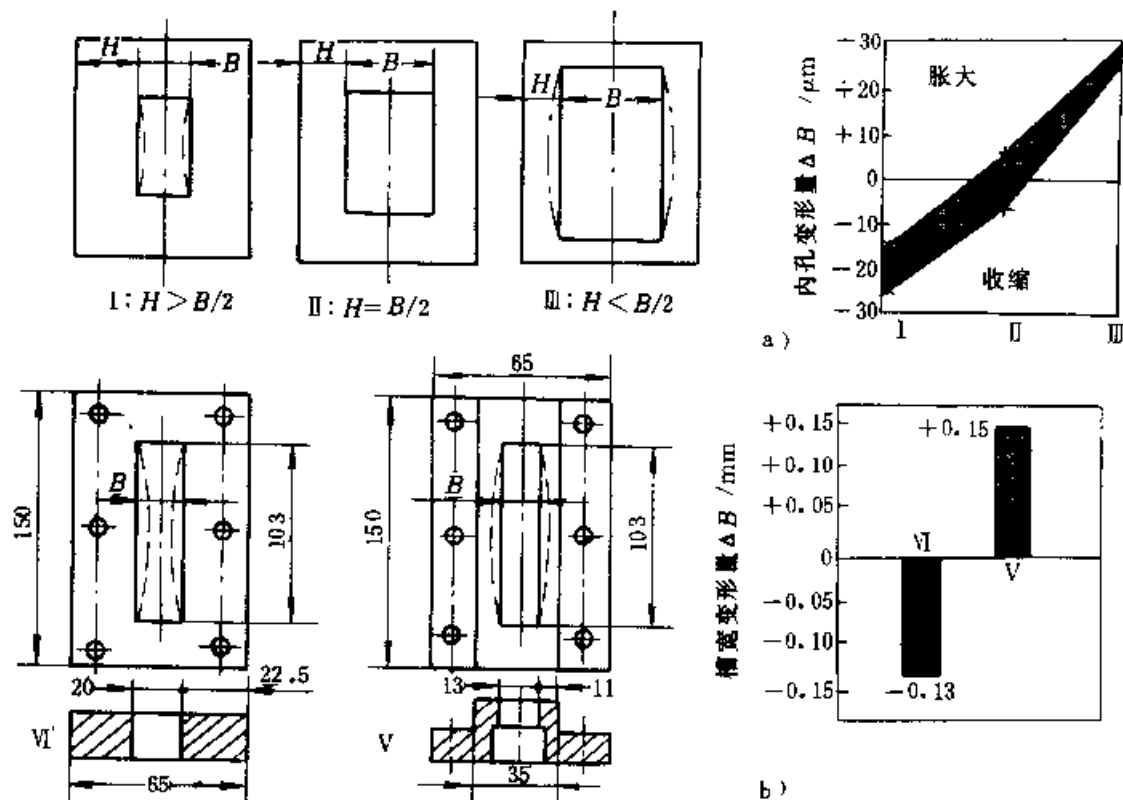


图 9-19 凹模壁厚对型腔淬火畸变的影响

a) 不同壁厚比的 T10A、CrWMn 钢试样 b) T10A 钢不同壁厚凹模



表 9-53 几种常用冷作模具钢的淬火畸变

钢 号	试样尺寸 /mm	淬 火 工 艺	残留奥氏体量 $\varphi(A)(\%)$	体积变化率 (%)	平均尺寸变化率 (%)
T10	$\phi 9.5 \times 28.6$	785℃ 淬盐水	~9	-0.94	+0.3
	$\phi 28.6 \times 76.2$			-0.47	0.15
	$\phi 12.7 \times 76.2$			-0.24	0.08
9CrWMn	12.7×12.7×25.4	800℃ 淬油	~10	+0.63	+0.21
60Si2Mn	12.7×12.7×25.4	885℃ 淬油	—	+0.55	+0.18
Cr12MoV	12.7×12.7×25.4	1010℃ 油淬	~25	-0.07	-0.03

表 9-54 模具钢基本特性对热处理畸变倾向的影响

钢 的 特 性	特 性 的 变 化	对 畸 变 倾 向 的 影 响
M <sub>s</sub> 点	高	马氏体转变量多, 组织应力占主导, 使型腔趋胀
	低	残留奥氏体多, 热应力占主导, 型腔趋缩
淬透性	高	可采用缓和的淬火介质, 有利于减少翘曲与畸变
	低	须用强烈的淬火介质, 但畸变大, 且难控制
碳化物均匀性	优	各向畸变均匀, 可减少翘曲程度
	劣	通常畸变大, 加重翘曲及各向胀缩
相成分的影响	马氏体量增多	增加体积膨胀量, 增大组织应力, 不利于减小畸变
	残留奥氏体量增多	能补偿马氏体的体积膨胀, 有利于减小畸变或实现微畸变
	贝氏体量增多	有利于减小畸变
	碳化物量增多	对体积变化无影响
回火转变	残留奥氏体分解成马氏体	使体积膨胀
塑性变形抗力	强韧性高	有利于减小热应力引起的畸变
	马氏体转变区强度高	有利于减小组织应力引起的畸变
锻造纤维方向	垂直于型孔	型孔趋于缩小
	平行于型孔	型孔趋于胀大

表 9-55 工艺因素对冷作模具型腔畸变趋势的影响

工 艺 因 素	中碳钢 (45、50)	碳素工具钢 (T10A)	低合金工具钢 (CrWMn, 9Mn2V)	高合金工具钢 (Cr12, Cr12MoV)
常规淬火	显著趋胀	显著趋胀	趋胀为主	趋 缩
淬火温度	上限时多胀	上限时剧缩	上限时多胀	上限时剧缩
	下限时少胀	下限时少缩	下限时少胀	下限时少缩

(续)

工艺因素		中碳钢 (45、50)	碳素工具钢 (T10A)	低合金工具钢 (CrWMn, 9Mn2V)	高合金工具钢 (Cr12, Cr12MoV)
淬火 介质	盐水	胀	缩	—	—
	油	缩	缩	①	①
	碱浴	胀	②	胀	—
	硝盐	胀	胀	②	②
深冷处理		—	—	趋 胀	明显趋胀
回火影响		收 缩	显著收缩	200~300℃ 回火区 趋胀, 其他区回火趋缩	<450℃ 趋缩 500~550℃ 趋胀
流线的影响		—	—	—	纵向趋胀 横向趋缩
工件形状		厚壁少缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩	薄壁趋胀 厚壁趋缩

① 合金工具钢用热油作淬火介质时, 会增大模具型孔胀大的趋向, 用冷油时, 则型孔收缩的趋向。

② 碳素工具钢、合金钢淬碱浴或硝盐时, 碱浴或硝盐中水分多, 碱浴或硝盐的使用温度低, 在碱浴或硝盐中停留时间短, 都易使型孔趋向于胀大。

1. 正确选用模具材料 碳素工具钢淬透性低, 淬火畸变大; 合金工具钢淬透性高, 畸变小。此外, 模具钢的纤维流向对畸变有显著影响, 平行于纤维流线方向的畸变要大于垂直方向的畸变。正确选用模具材料可减少畸变。

例如, 用 T10A 钢制的陶瓷模型芯凹模, 双介质淬火后, 口部呈喇叭口, 畸变大 (0.12mm), 根

部易开裂, 改用 CrWMn 钢后, 质量达到要求。

2. 采用合理的模具设计 模具设计时, 对壁厚不均匀的模具要增开工艺孔, 对形状复杂的模具, 要采用镶拼块结构, 不用整体结构; 对有薄壁、尖角的模具, 要改用圆角过渡和增大圆角半径。采用加工艺孔、增加冷却均匀性来减少畸变的方法见图 9-20。

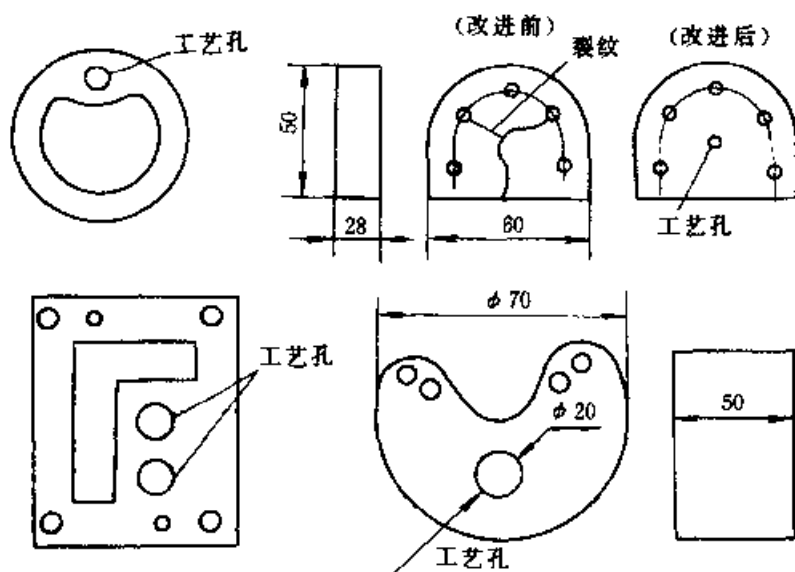


图 9-20 模具增加工艺孔减少畸变的示意图

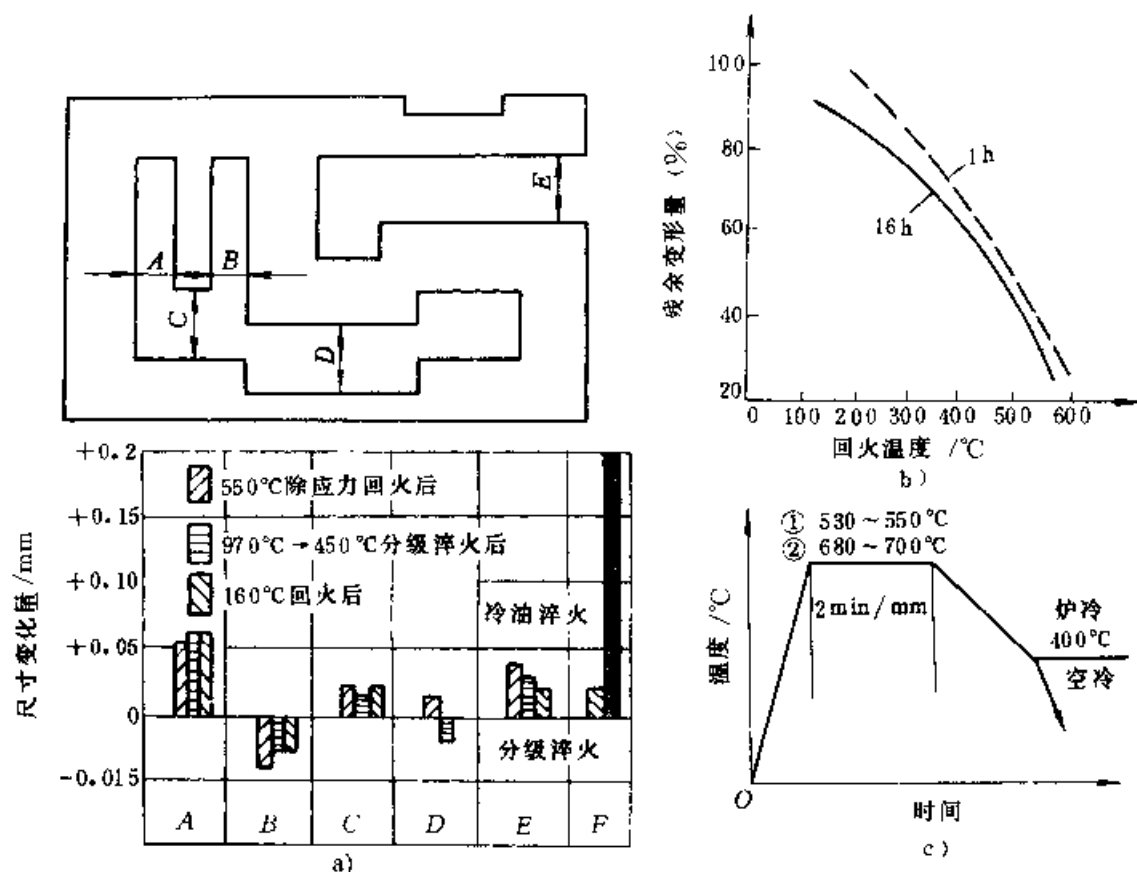


图 9-21 工具钢冷加工后的去应力退火对减少淬火畸变的作用

a) 去应力退火及淬火介质对 Cr12 钢试样畸变的影响 b) 去应力退火对残余畸变的影响 c) 去应力退火工艺曲线

3. 采用去应力退火 模具冷加工后淬火前采用去应力退火可减少淬火畸变。图 9-21 示出了工具钢冷加工后的去应力退火对减少淬火畸变的作用。

4. 做好淬火前原始组织的预处理 模具钢采用六面锻造、反复锻拔、预先正火、快速球化退火等工艺,可消除碳化物网、带及链,并获得均匀、细分布的碳化物,在淬火时,可获得最小的畸变。

5. 采用合理的热处理工艺 以下热处理方法可以减少畸变:

A: 采用预热和预冷工艺,以减少热应力; B: 采用下限淬火加热温度; C: 用马氏体分级淬火或贝氏体等温淬火; D: 在  $M_s$  点以下进行缓冷并及时回火。

6. 采用机械加固以减少热处理畸变 采用机械加固以减少热处理畸变的方法见图 9-22。

7. 采用合理的进入淬冷槽的方向与冷却方式 模具进入淬冷槽的方向及冷却方式合理是减少模具热处理畸变的有效措施。

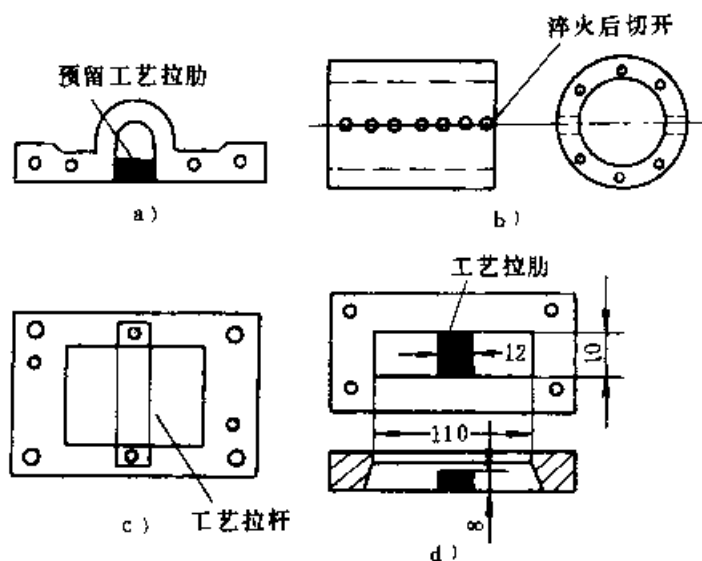


图 9-22 模具机械加固以减少热处理畸变的措施示意图

a) 加工时预留工艺拉肋 b) 成对加工后淬火 c) 加工艺拉杆 d) 长槽凹模预留工艺拉肋

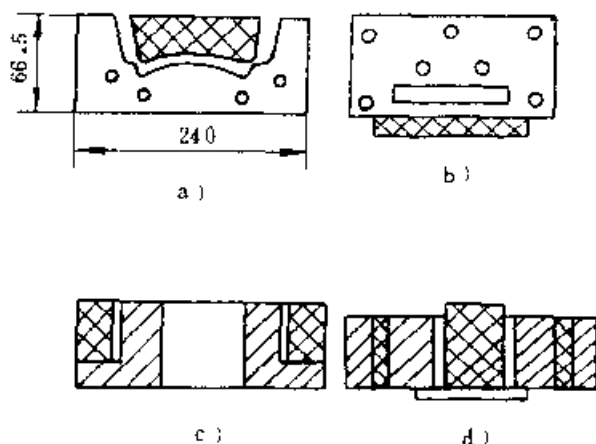


图 9-23 减少热处理畸变  
应用热平衡辅具

- a) 安置在型腔中 b) 安置在背面  
c) 安置在孔外 d) 安置在内孔中

8. 采用热平衡辅具减少热处理畸变 图 9-23 为热平衡辅具的应用。模具在冷却过程中, 还可应用压力机或其他机械夹具, 对模具施加限制, 以减少翘曲。

9. 低温调质预缩处理 低温调质预缩处理是在稍高于  $A_1$  点的温度预淬火并进行高温回火 ( $350 \sim 650^\circ\text{C}$ )。其体积可小于退火状态, 以此抵消淬火时马氏体转变的膨胀效应。其效果可以削弱高速钢的异常畸变倾向, 可使 Cr12MoV 钢的纵横向淬火畸变胀缩率差异降低 50%, 减轻翘曲作用。

### 9.6.2 模具热处理常见缺陷分析及防止措施

模具热处理中常见的缺陷、产生原因以及防止措施, 如表 9-56 所示。

表 9-56 模具热处理中常见的缺陷、产生的原因及防止措施

缺陷类型	产生原因	防止措施
球化组织粗大不均, 球化不完善, 组织中有网状、带状和链状碳化物	1) 锻造工艺不佳, 如锻造加热温度过高, 变形量小, 停锻温度高, 锻后冷速缓慢等, 使锻造组织粗大, 并有网、带及链状碳化物存在, 球化退火时难以消除 2) 球化退火工艺不佳, 如退火加热温度过高或过低、等温温度或等温时间短等, 可造成退火组织不均或球化不完善	1) 改进锻造工艺或采用正火预备热处理, 消除网状和链状碳化物及碳化物不均匀性 2) 采用双重热处理, 快速均匀球化退火工艺 3) 正确制定球化退火工艺规范 4) 合理装炉保证炉料温度的均匀性 5) 采用以调质处理代球化退火
淬火过热或过烧, 淬火组织粗大化	1) 球化组织不良 2) 淬火加热温度过高, 或高温保持时间过长 3) 工件放置位置不当, 在靠近电极或加热元件区产生过热 4) 对截面变化较大的模具, 淬火工艺参数选择不当, 在薄截面和尖角处产生过热	1) 正确制定淬火工艺, 严格控制淬火温度和加热时间 2) 定期检测和校正测温仪表, 保证仪表的正常运行 3) 工件与电极或加热元件间应保持足够的距离
硬度低或不均	1) 原始组织中碳化物偏析严重、或球化组织粗大不均 2) 模具表面残留有退火脱碳层或淬火加热时产生脱碳 3) 工件截面大, 淬透性差 4) 淬火温度过高, 残留奥氏体量多, 或淬火温度过低, 加热时间不足, 相变不完全 5) 淬冷速度慢, 分级、等温温度过高或时间过长, 冷却剂选用不当 6) 碱浴水分过少或淬火油老化 7) 工件出淬火介质时, 温度过高, 冷却不足 8) 高速钢回火不充分 9) 回火温度过高	1) 保证有良好的预备热处理组织 2) 彻底消除模具表面的氧化皮 3) 进行良好的盐浴脱氧 4) 选用淬透性高的钢 5) 正确制定淬火、回火工艺参数 6) 采用真空加热淬火, 保护气氛加热淬火 7) 严格控制碱浴水分含量 8) 选用淬火介质和冷却方式 9) 回火要充分 10) 采用冷处理 11) 进行表面强化处理

(续)

缺陷类型	产生原因	防止措施
脱碳	1) 盐浴老化, 脱氧不良 2) 工、夹具向盐浴中带进铁锈 3) 在箱式炉中加热时保护不良	1) 盐的质量必须符合标准的要求, 并经 300~500°C×2~4h 的烘干脱水 2) 盐浴定期脱氧, 严格控制盐浴中氧化物含量: BaO (或 Na <sub>2</sub> O) ≤0.2%~0.5% (质量分数) FeO ≤0.3%
裂纹	1) 钢中存在有严重的网状、带状及链状碳化物或显微裂纹 2) 钢中存在有大的机加工或冷塑性变形应力 3) 热处理操作不当 (加热或冷速过快, 淬火介质选择不当, 冷却温度过低) 4) 淬火加热时过热, 过烧 5) 模具形状复杂, 厚薄不均, 热应力和组织应力过大 6) 返修淬火加热时, 未经中间退火处理 7) 回火不及时或回火不足 8) 磨削工艺不当 9) 电火花加工层存在有大的拉应力和大量的显微裂纹	1) 改进锻造和球化退火工艺, 消除网状、带状、链状碳化物, 改善球化组织的均匀性 2) 进行淬火前的去应力退火 (>600°C) 3) 严格控制淬火加热温度和时间, 防止过热过烧 4) 采取预热和预冷措施 5) 淬火后即时回火, 回火要充分
腐蚀	1) 盐浴中碳酸盐或硫酸盐的含量过高 2) 在 400~500°C 的硝酸盐中且按分级冷却时所产生的氧化腐蚀 3) 模具和夹具向盐浴中带进氧化物	1) 控制盐浴中碳酸盐含量, 不用黄血盐作高温盐浴脱氧剂, 加活性碳除硫酸盐 2) 避免向盐浴中带入氧化物 3) 用硝酸盐作分级冷却介质 (不宜用氯化钙) 4) 模具淬火、回火后及时清除表面残盐

## 参 考 文 献

- 冯晓曾等著. 模具用钢和热处理. 北京: 机械工业出版社, 1982
- Geller Yu. Tool steels. Moscow, MIR, publishers, 1978
- 特殊钢. 1978, 27 (2): 34
- 白彰五译. 《热处理》. 1975, (3)
- 王荣滨. 《模具科技》. 1987, (9)
- 贾萍. 《金属热处理》. 1981, (2)
- 谢燮授译. Die Casting Engineer. 模具工业, 1987 (4)
- 上海材料研究所. 上海金属. 钢铁分册, 1986 (6)
- 汤志强. 《金属热处理》. 1982 (6) 51
- 日本热处理技术协会. 工具钢の热处理. 日刊工业新闻社, 1970
- 平原民雄等. 金属プレス. 1986, (1)
- 塚本哲治. 金属. 1985, (9) (增刊号)
- 吕耀坤. 金属热处理. 1984, (10) 29
- 上海市机械制造工艺所. 铸锻热- 热处理实践. 1986 (1) 34
- Horvath E, et al. 《Thin Solid Films》, 1980 (3). 309
- 染谷博幸. 《金属プレス》. 1984 (10)
- 染谷博幸. 交流资料. 李强, 杨安静译. 国际模具信息, 1986, 3: 56
- Atamassora J. R. 国外化学热处理. 杜廣林译. 1983, (5): 40
- Young Millian. 王德文译. 工模具失效文选. 金属热处理, 1985 增刊

- 20 林松祯. 孔冲的渗钒-真空热处理. 金属热处理, 1988, (8): 33
- 21 北京电机工程学会模具专业委员会陈景裕, 王德文等译编. 工模具材料应用手册. 北京: 轻工出版社, 1984
- 22 王德文等. 热模具钢快速均匀球化退火新工艺. 兵器材料科学与工程, 1986, (9): 32~33
- 23 王德文等. 热压模具新材料—HM1 (3Cr3Mo3W2V), HM3 (3Cr3Mo3VNb) 钢. 金属热处理, 1977 (2): 39
- 24 王德文等. 《金属热处理》, 1985 (2): 16
- 25 樊东黎. 《金属热处理》, 1982 (6): 53
- 26 林松祯. 《金属热处理》, 1982 (9): 11
- 27 许发铤主编. 模具标准应用手册. 北京: 机械工业出版社, 1994 年
- 28 《模具制造手册》编写组. 模具制造手册 (第二版). 北京: 机械工业出版社, 1997 年
- 29 蒋昌生. 模具材料及使用寿命. 江西: 江西人民出版社, 1982 年
- 30 雷廷权. 热处理工艺方法 300 种: (第二版). 北京: 机械工业出版社, 1993 年
- 31 王德文, 朱雅年. 模具实用技术 200 例. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- 32 冯晓曾等. 提高模具寿命指南. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 33 JB T6058—1992. 冲模用钢及其热处理技术条件. 1992
- 34 JB T7715—1995. 冷锻模具用钢及热处理技术条件. 1995
- 35 JB/T6057—1992. 塑料模具用钢及其热处理技术条件. 1992
- 36 JB T8431—1996. 热锻模具用钢及其热处理技术条件. 1996
- 37 姜祖荫等. 模具钢. 北京: 冶金工业出版社, 1988
- 38 王广生等编. 金属热处理缺陷分析及案例. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 39 陈蕴博. 热作模具钢的选择与应用. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 40 肖继美. 金属的韧性与韧化. 上海: 上海科技出版社, 1980
- 41 陈再良等. 全国失效分析预测预防战略研讨会论文集 (下). 中国机械工程学会论文 1992 (12): 282~287.
- 42 王德文. 新编模具实用技术 300 例. 科学出版社, 1996
- 43 冯晓曾. 模具失效分析. 北京: 机械工业出版社, 1985

# 第 10 章 量具热处理

成都量具刀具厂 雷仲眉

## 10.1 量具用钢

### 10.1.1 对量具用钢的要求

选择量具用钢应着重考虑对量具耐磨性、尺寸稳定性、切削加工性和抗蚀性等方面的影响。

1. 耐磨性 量具工作面必需有高度耐磨性才能在长期使用中,保持精度、为此淬火硬度高、耐磨性好的过共析钢常在人选之列。

2. 尺寸稳定性 量具在使用和存放过程中应能保持最小的尺寸变化,因此量具中应尽量减少残留奥氏体(Ar)量和残留应力值。一般认为含Cr、W、Mn等合金元素的钢对减小时效变形有良好作用。

3. 切削加工性 良好的切削加工性可保证批量生产中热处理的高生产率;减少热处理后磨削加工时受损伤的可能性。为此,应选用切削加工性好、材质均匀、组织良好及退火硬度适当的钢材。

4. 抗蚀性 为提高量具对大气、手汗等的抗腐蚀能力,许多量具采用镀铬等表面处理方法或

采用马氏体不锈钢。例如,千分尺的某些零件用无光泽镀铬;千分表量杆则因表面处理不能保证齿条精度而选用不锈钢 9Cr18;卡尺零件则采用 3Cr13 或 4Cr13 不锈钢板冲裁制成。在量具生产中,为保证抗蚀性已越来越多地采用可淬硬的不锈钢。

以上各项要求应根据各种量具的不同特点、精度等级、制造方法和单件或批量生产等因素综合考虑,其他如淬透性、强度、热胀系数等,根据产品性能要求加以考虑。

### 10.1.2 量具常用钢种及质量要求

表 10-1 列出了量具常用钢种及其特点,可供参考。

量具工作面都要求高度光洁,如对钢中非金属夹杂物和碳化物液析等不加控制,可能在量块等极小粗糙度的表面上产生细小的点状缺陷;夹杂物还可能引起区域性的残留应力分布,导致力学性能的各向异性助长不均匀的变形;较严重的碳化物偏析则可能造成残留奥氏体 Ar 的不均匀分布,影响尺寸稳定性。因此量具用钢对于钢材的原始组织往往有一定要求。表 10-2 可供参考。

表 10-1 量具常用钢种及其特点

钢 号	用 途 举 例	特 点
GCr9	中、小型高精度量规及量具零件	1) 碳化物颗粒均匀细小,退火及淬火硬度均匀 2) 含硫量低,夹杂物少 3) 经适当热处理后尺寸稳定性好 4) GCr9 淬透性尚好, GCr15 较好, GCr15SiMn 淬透性更好
GCr15 (Cr2)	各种量规、量块及其他高精度量具零件,如千分尺螺纹量杆,正弦规工作台及滚柱等	
GCr15SiMn	尺寸较大或厚实的高硬度、高精度的量具零件和量规如石油量规、正弦规工作台等	
CrWMn	要求高硬度、高耐磨性的量规和量具零件	1) 淬火硬度高,耐磨性好,淬透性好 2) 碳化物细小,淬火后晶粒细 3) 退火易生成碳化物网、磨削性较差,磨削时较易出现裂纹 4) 退火硬度较高

(续)

钢 号	用 途 举 例	特 点
9Mn2V	要求淬火畸变小、量规、卡板及其他一般量具	1) 淬火畸变小, 淬透性好 2) 淬火硬度稍低于其他合金工具钢
9Cr18MoV	耐磨及耐锈蚀的量具零件 (如百分表量杆等)	1) 抗锈蚀性好、耐磨性好 2) 碳化物分布不均匀 3) 切削加工性及抛光性尚好
3Cr13 4Cr13	耐磨及抗锈蚀的量规及量具零件 (如卡尺尺身、尺框等, 亦可用于渗氮量块)	1) 抗锈蚀性好、耐磨性好、淬火回火后硬度低于 9Cr18MoV 2) 碳化物分布较均匀 3) 切削加工性及抛光性好
T8A T10A	尺寸不大, 具有一定韧性和耐磨性的量具零件 (如卡尺尺身、尺框、宽座角尺长边、百分表销子等)	1) 退火硬度低、切削加工性好, 磨削及抛光性好 2) 随含碳量升高、耐磨性也提高 3) 淬透性低, 淬火易出现软点, 淬火畸变大, 耐磨性不如含铬钨等元素的合金工具钢
T12A	尺寸不大, 高耐磨性的量具零件 (如百分表齿轮、下轴套等)	
65Mn	卡尺平弹簧、卡尺深度尺及其他量具用弹性零件	1) 价格便宜 2) 容易过热
45	中硬度量具零件 (如千分尺微分筒体, 螺纹轴套, 百分表上轴套等)	1) 价格便宜, 容易购得 2) 加工性好, 热处理容易 3) 耐磨性稍差, 韧性较好

表 10-2 对量具用钢的原材料显微组织的级别要求

钢 种	退火组织			残余碳化物网			带状组织	非金属夹杂物 (YB9)			
	YB9	GB1299	GB1298	YB9	GB1299	GB1298	YB9	氧化物	硫化物	碳化物液析	点状不变形夹杂
铬轴承钢	1~4			≤3			≤2.5	≤2	≤2.5	≤1	≤2.5
合金工具钢		≤5			≤3						
碳素工具钢			T8	1~5							
			T10	2~4							
			T12	2~4		≤2					

注: 1. 除量块等特高精度和极细表面粗糙度的工件外, 一般量规和量具零件对非金属夹杂物可不作特殊要求。其他钢种用作量块等工作时, 对非金属夹杂物的要求可参照表中铬轴承钢标准。

2. 如条件许可, 对量块等工件, 带状组织及塑性夹杂物的标准, 可分别按 2 级要求。

3. 合金工具钢的退火组织按 GB1299 规定为 ≤5 级, 但对不再经预备热处理 (如调质等) 的量具用钢, 最好要求退火组织 ≤4 级。



## 10.2 量具热处理工艺

量具工作时受外加应力小,工作环境一般都较好。量规和量具零件的热处理原则上与一般工具钢和结构钢的热处理相似,只是根据要求的不同需更多的考虑尺寸稳定性、工作面耐磨性及抗蚀能力等。

### 10.2.1 量具制造工艺路线简介

锻造——退火——正火或调质——切削加工——淬火——热矫直——冷水冲洗——冷处理——回火——人工时效——清洗——发黑处理(或喷砂)——磨削加工——人工时效——精磨(或研磨)

根据不同产品的要求选用全部或部分工序,或者另外安排工艺路线。

### 10.2.2 预备热处理(或第一次热处理)

1. 退火 退火规范举例见表10-3。

2. 正火 为改善一些中碳钢量具零件的原始组织,减小机械加工粗糙度和提高强度,可用正火做为预备热处理或最终热处理。例如用45钢制造的千分尺微分筒体,为减小拉削内孔的粗糙度和提高强度,采用正火做最终热处理(见表10-11)。

3. 消除网状碳化物 如果过共析钢中网状碳化物较严重或组织粗大,淬火时易产生裂纹,磨削时也容易产生裂纹。淬火前这类金相组织上的缺陷可以用适当的预备热处理来减轻或消除,方法是将钢加热到稍高于或接近于 $A_{cm}$ 温度,保持一定时间使碳化物网全部或大部分溶入A中并适当均匀化,然后快冷,使碳化物不致沿晶界析出,再在 $A_{c1}$ 以下合适的温度回火或正常退火,以调整到所需的硬度和组织(见表10-4)。

消除网状碳化物的处理只是一种补救措施,关键仍在于正确掌握钢的停锻温度和冷却速度,使退火后不存在碳化物网。

表 10-3 量具退火规范

钢 号	加 热		冷 却			硬 度 (HBS)
	温度/°C	时间/h	缓慢冷却	温度/°C	等温时间/h	
T8	740~750	2~6	以 $<30^{\circ}\text{C/h}$ 炉 冷至 $500\sim600^{\circ}\text{C}$ 出炉	650~660	等温4~6h 后炉冷到 $500\sim600^{\circ}\text{C}$ 出炉	$\leq 187$
T10	740~750			680~700		$\leq 197$
T12	760~770			680~700		$\leq 207$
GCr9	780~800			710~720		170~207
GCr15	780~800		空 冷 以 $<20^{\circ}\text{C/h}$ 炉 冷至 $500\sim600^{\circ}\text{C}$ 出炉	710~720		179~207
GCr15SiMn	790~810			710~720		179~207
CrWMn	770~790			680~700		207~255
9Mn2V	750~770			670~690		$\leq 229$
9Cr18MoV	700~750 <sup>①</sup> 850~880 <sup>②</sup>		空 冷 以 $<20^{\circ}\text{C/h}$ 炉 冷至 $500\sim600^{\circ}\text{C}$ 出炉	680~700		$\leq 230$
3Cr13, 4Cr13	760~800 <sup>①</sup> 850~870 <sup>②</sup>					$\leq 200\sim 240$ $\leq 217$

① 为高温回火软化。

② 为完全退火。

二者可根据情况选用。

表 10-4 常用量具用钢消除碳化物网及调质处理规范

钢 号	消 除 碳 化 物 网 处 理				调 质 处 理			
	除网温度 <sup>a</sup> /°C	冷 却	回火温度 <sup>a</sup> /°C	冷 却	淬火温度 /°C	冷 却	回火温度 /°C	冷 却
GCr9	880~900	油	700~720	炉 冷 至  ≤500℃ 出 炉	830~860	油	700~720	炉 冷 至  ≤500℃ 出 炉
GCr15	900~920	油	700~730		840~870	油	700~720	
GCr15SiMn	880~900	油	700~730		830~860	油	700~720	
CrWMn	930~950	油	710~730		830~860	油	700~720	
T10	800~820	油或水	700~720		780~810	油或水	690~710	
T12	820~840	油或水	700~720		790~820	油或水	690~710	

① 碳化物网粗、厚、完整的,采用上限除网温度;细、薄、不完整的碳化物网选用较低的除网温度。

② 也可用常规退火工艺代替除网处理后的回火。退火规范见第十四章中表 2-14-6 及表 2-14-13。

4. 调质 为改善机械加工粗糙度,细化淬火前的组织,消除机械加工应力,减小热处理变形并得到均匀而稍高的硬度,可用调质处理作为预备热处理。方法是,加热到稍高于正常淬火温度使碳化物较充分的溶解于奥氏体中,然后淬冷,再加热到  $A_{c1}$  以下适当温度保持一段时间后慢冷,以调整到适宜加工的组织 and 硬度。例如,用 GCr15 钢制造的螺纹环规,热处理后内孔只能用铸铁棒蘸金刚砂研光,因此淬火前必需先得到尽可能小的内螺纹铰孔粗糙度并且还应尽量减少淬火后内孔的畸变,为此可采用调质处理作为预备热处理(见表 10-12)。对于粗粒或大小不均的球状珠光体,在低速切削时(如铰孔或拉削),表面加工粗糙度特别粗,这种组织不易改善,只能用调质处理进行一些调整。

在批量生产和最终热处理后不便于用磨床加工的量规和量具零件,淬火前的表面加工粗糙度往往是生产过程中的关键问题之一,必须予以重视。淬火前的加工粗糙度按加工方法不同(精车、铰孔、拉削等)与显微组织有直接关系,因此常需要选用适当的预备热处理工艺来调整显微组织。

### 10.2.3 最终热处理(或第二次热处理)

1. 淬火 根据产品技术要求或加工制作的需要,量规和量具零件可以选用盐浴炉、真空炉、可控气氛炉、流态化炉或感应加热设备进行加热。百分表量杆(表 10-9),两头端部有螺纹不通孔,杆身有垂直于中心线的横孔,如采用盐浴炉加热,熔盐渗入小孔,淬火后极不易洗净,造成日后内孔

生锈,因此以选用箱式电阻炉、可控气氛炉等为宜。卡尺尺框只需在测量面局部淬火因此常采用感应加热,也可用激光淬火。针形塞规直径小可在专用夹具上直接通电加热自冷淬火。

淬火夹具的设计应不用或少用量具工作面作为与夹具接触的支承面;夹具及装载的工件应不致影响熔盐、气体或冷却介质的畅通流动;长形工件应沿轴线方向直立装载;装载的工件尽量不相互接触;工件在夹具上装卸方便又不易滑落;夹具本身有足够的强度并便于修理。单件或少量生产时工件用铁丝绑扎,铁丝横竖相交处要打结,否则加热后铁丝伸长,工件易脱落。

量具、量规淬火加热温度参考表 10-5。原始组织为极细的片状或点状珠光体的零件和返修品取下限或较低的淬火温度,反之则取表中上限或较高的淬火温度。

加热时间根据炉型、装炉量、工件尺寸及形状因素来确定。在盐浴炉中一般为  $0.4 \sim 0.8 \text{ min/mm}$ ;辐射电阻炉选用  $1 \sim 2 \text{ min/mm}$ ;流态化炉可在  $0.5 \sim 1 \text{ min/mm}$  范围中选用。

淬火冷却介质可选用淬火油、低温硝盐、聚合物淬火介质或食盐水,根据不同产品及钢的牌号选择。对于量规,为减少尺寸不稳定因素,一般不选用分级或等温淬火,如用油淬火,油温也以保持在室温为宜。使用水溶性聚合物淬火介质,淬火槽中需安装搅拌装置(用其他淬火介质,淬火槽中也应有搅拌装置,但对于聚合物淬火介质要特别强调这一点),介质温度以不超过  $30^\circ\text{C}$  为好,介质浓度则根据钢种及工件尺寸而定。

表 10-5 常用量具钢的淬火及回火温度

钢 号	淬火温度/℃	常用冷却介质	淬火后硬度 (HRC)	回火温度/℃	回火后硬度 (HRC)
GCr9	820~850	油、硝酸盐、碱浴	62~66	130~170	62~65
GCr15	830~860	油、硝酸盐、碱浴	62~66	130~170	62~65
GCr15SiMn	820~850	油、硝酸盐、碱浴	62~66	130~170	62~65
CrWMn	820~850	油、硝酸盐、碱浴	62~66	130~170	62~65
9Mn2V	780~810	油、硝酸盐、碱浴	≥62	130~170	≥60
T8A	750~780	水、硝酸盐、碱浴	62~65	130~150	≥62
T10A	760~790	水、硝酸盐、碱浴	62~65	150~160	≥62
T12A	760~790	水、硝酸盐、碱浴	62~65	130~160	≥62
9Cr18MoV	1050~1070	油	>55	200~300	53~58
				550~580	43~46
65Mn	790~820	水、油	>56	300	52
				400	45
				500	37

有些量具零件对尺寸稳定性并无严格要求,为减少淬火变形可以采用低温硝酸盐分级或等温淬火。

2. 回火 以在热浴(硝酸盐或热油)中回火为宜。辐射加热炉低温时加热效率很低,如用于回火,炉内需有风扇强制对流传热,而且回火保温时间至少应比热浴回火长1~2倍或更多,并宜适当提高回火温度。一般只要回火温度选择适当,回火时间稍长并无不利之处,而回火保温时间不足则对量具可能产生不良影响。

量规的回火温度可参考表10-5。一些结构钢制的量具零件可根据钢的牌号及产品硬度要求按一般结构钢工件选择回火温度。

回火时间根据设备装炉方式和装炉量以及工件大小来确定。热浴回火保温时间应不少于1h,截面尺寸在50mm以上者需2~4h。有时将回火与稳定化处理合并进行则需更长时间。

不进行冷处理的量具淬火后应立即进行回火,以免发生裂纹。批量生产时,特别是对正弦规工作台之类的方形或矩形的实心工件,装炉时应避免密实地重叠堆放,以防止加热时不易透烧而造成回火不足。在低温硝酸盐中回火时装量不宜太多或过密,否则入炉时工件会使硝酸盐槽中的温度下降过多,凝固在工件上的硝酸盐较长时间才能完全熔化,不但降低了生产效率,还可能导致回火不足。

3. 冷处理 对尺寸稳定性要求高的工件,淬

火冷至室温后应立即(最好在半小时以内)进行冷处理,将工件冷至-70~-80℃或-196℃,使残留奥氏体尽可能多地转变为马氏体(M),工件硬度会相应地有所提高。随后进行的回火(或人工时效处理)则促使合金元素重新分配,降低应力,使组织结构趋于稳定。

-70~-80℃的冷处理可在专用冷冻机或在加有干冰的酒精(或丙酮)中进行,酒精置于绝热的容器中,如一次装入量稍多可用金属管插入容器底部,缓缓吹入空气,能使温度均匀。-196℃的深冷处理在液氮中进行。冷处理过程中冷至规定温度后应保持0.5~1h,以保证工件都达到此温度。工件淬冷后应冷至室温再进行冷处理,以防止急冷产生裂纹。形状复杂或厚薄悬殊的工件,冷处理前宜将细薄部分用石棉包扎,冷处理完毕后待工件温度升至室温立即进行回火或人工时效。操作时应带手套等防护用品以防止冻伤。冷处理前应擦干工件上的水分及杂物。

4. 时效处理 人工时效宜在热浴中进行。一般量规(硬度≥62HRC者)可在淬火后以140~160℃进行8~10h人工时效(与回火合并进行)。要求硬度≥63HRC的量块等产品则在回火后再进行120℃,48h的人工时效处理;或冷处理与时效处理反复数次的热循环处理。

工件在精磨后宜在120℃时效10h,以消除磨削应力。工件精磨后留出少量研磨余量,然后在

室温存放半年或一年(时间越长越好)进行自然时效,最后再研磨成成品,这是保持尺寸稳定性的最佳方案。

#### 5. 矫直 矫直有两类方法

(1) 热矫直,工件未冷透时趁热矫直;或对淬火后需用较高温度回火的工作用专用夹具进行回火矫直,工件夹紧后送进回火炉中,待工件及夹具加热后取出再次夹紧,然后缓慢冷却(如卡尺测尺等工件,参见表10-10)。

(2) 冷矫直,工件淬火及回火后冷压或冷敲(常用反压法)矫直。冷矫直后的工件需进行去应力回火,回火温度不应超过原来的回火温度。这种措施不能保证消除全部矫直应力,因此对容易发生扭曲的量具零件应尽量设法减少淬火时的变形,已发生变形的零件则最好采用热矫直。

量具零件在装配过程中不允许再进行敲打,否则经过一段时间可能使量具(如卡尺、千分尺等)使用不灵活、甚至卡住。

### 10.2.4 量具热处理的技术要求

1. 硬度 在国家有关标准中对各种量具的硬度都有明确的规定(见表10-6)。为提高耐磨性,生产厂可以在保证尺寸稳定性的前提下适当提高硬度要求。

表 10-6 量具热处理硬度要求举例

标准号	产品名称	测量面硬度值
GB1214	游标卡尺	碳钢或工具钢 $\geq 664\text{HV}$ ( $\approx 58\text{HRC}$ )
		不锈钢 $\geq 551\text{HV}$ ( $\approx 52.5\text{HRC}$ ) [其他量面 $\geq 382\text{HV}$ ( $\approx 40\text{HRC}$ )]
GB1216	千分尺	工具钢 $\geq 766\text{HV}$ ( $\approx 62\text{HRC}$ ) 不锈钢 $\geq 530\text{HV}$ ( $\approx 51\text{HRC}$ )
GB6093	量块	$\geq 800\text{HV}$ ( $\approx 63\text{HRC}$ )
GB3325	角度量块	$\geq 63\text{HRC}$
GB1957	光滑极限量规	58~65HRC
GB4749	石油钻杆接头 螺纹量规	60~63HRC

2. 显微组织 量具热处理后的显微组织至少应达到我国专业标准 ZBJ36003《工具热处理金相检验标准》(表10-7)中规定的级别。为提高产品质量,生产厂可制定高于 ZBJ36003 规定的厂标

表 10-7 量具热处理的金相组织要求

钢种	马氏体等级	托氏体量	碳化物网等级	脱碳层
碳素工具钢	$\leq 3.5$	测量面	$\leq 3$	测量面
合金工具钢	$< 3$	不允许有托氏体	$\leq 3$	经磨加工后,应保证无脱碳层
铬轴承钢				
不锈钢	$\leq 3$			

注:1. 金相评级图片见 ZBJ36003《工具热处理金相检验标准》。

2. 高频感应淬火后的马氏体级别允许放宽 0.5 或 1 级,例如,碳素工具钢可允许 1 或 4.5 级。

### 10.2.5 量块及高尺寸稳定性量规的热处理特点

量块是长度计量的基准,技术要求也最高。按 GB6093《量块》的规定,量块测量面的硬度不应低于 800HV ( $\approx 63\text{HRC}$ );尺寸稳定性要求见表 10-8 所示。

表 10-8 量块尺寸稳定性技术标准

精度等级	每年长度的最大允许变化
00, 0, K	$\pm (0.02 + 0.5L) \mu\text{m}$
1, 2, (3)	$\pm (0.05 + 1L) \mu\text{m}$

注:1. 表中  $L$  为量块标称长度,以米计。

2. 带 ( ) 的等级根据定货供应。

00 级、0 级和 K 级量块根据用户的特殊定货要求应能供给成套量块中心长度的实测值,亦即标明每块量精确的实际尺寸,故此因时效而发生尺寸变化是不允许的。

量块在 10~30℃ 范围的热胀系数应为  $(11.5 \pm 1.0) \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。此数值为一般钢的热胀系数值,以便在测量钢制件时不会因热胀系数不同而造成误差。

为保证量块之间的研合性,00、0 和 K 级量块量块的表面粗糙度  $R_a$  值应分别不大于  $0.01 \mu\text{m}$ ; 1、2 和 (3) 级不允许大于  $0.016 \mu\text{m}$ 。

从上述技术标准可以看出,量块质量的关键在于在保证硬度和量面粗糙度(量面粗糙度由硬度和研磨质量而定)要求的基础上保证尺寸的时效稳定性。

用硬质合金制成的量块硬度可达70HRC,耐磨性高而研磨粗糙度低,尺寸稳定性好,但材料和加工成本高,而且热胀系数只有 $6.5\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,与GB6093的要求相差甚多。最近出现的陶瓷量块,尺寸稳定性、研磨粗糙度和耐磨性更佳,但也有和硬质合金制造量块所遇到的类似问题。因此目前用于制造量块的材料仍以过共析钢为主。

钢中含有Cr、Mo、W、Co等合金元素对马氏体分解转变的第2阶段(或称“均匀分解”阶段,即马氏体中碳的扩散达到可以觉察的程度)有扼制作用,使钢保持过饱和固溶体加弥散碳化物的状态到较高的回火温度尚不改变(可保持高硬度)。Si、Mn、Cr等合金元素则明显地提高了残留奥氏体转变的温度,使其在较低温度下的转变缓慢下来。这两种作用可阻碍回火马氏体和残留奥氏体的分解,对量块的尺寸稳定性有良好的作用,因此选用含有这些元素的合金过共析钢是合理的。

对材料质量方面的要求比一般量具严格(参见表10-2下注),以保证加热时固溶均匀,不易过热,研磨后量面粗糙度低。

现行的含铬轴承钢标准(YB9)对材质要求高,适宜制造量块。

用3Cr13或4Cr13不锈钢渗氮制成的量块可达到950~1000HV的硬度,研磨后的量面粗糙度和色泽皆优于淬火钢,而且防蚀能力强。这种量块的心部是经过调质处理的索氏体组织,因此尺寸极稳定。缺点是材料和制造成本高于淬火钢。此外热胀系数大约为 $9.98\sim 11\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,比GB6093—85的规定稍低,但差别不大,是可供考虑的量块制造方案之一。

众所周知,淬火、冷处理和回火后量块中马氏体的分解将导致体积(尺寸)缩小,残留奥氏体向马氏体转变会使体积(尺寸)增大,而残留应力(第一类和第2类应力)的松弛或重新分布根据不同条件可能使尺寸涨大或者缩小。从热力学观点看,二者都使系统的自由能降低,因此是长时间放置中的自发过程,其结果是导致量规的尺寸变化

(尽管只是以 $\mu\text{m}/\text{m}$ 计的微小变化)。

上述三个进程互有影响,例如因两种介稳定相(马氏体和残留奥氏体)的转变而导致的微塑性变形会加速相变过程和应力的松弛,同时内应力又对相的转变起激活作用,使其达到较平衡的状态,而三种因素复杂的相互作用对尺寸变化的影响是难以预测的。

根据一般的经验,整体热处理的量块成品在置放过程中的前八、九个月尺寸变化较大,以后逐渐减小。尺寸变化的过程有的是先缩后胀,也有的是先胀后缩,这可能是工艺条件或工艺方法,甚至是实际操作上的差别而造成的组织和应力的差异所产生的后果。总之,量块热处理工艺的要点在于,尽量减少残留奥氏体量,增加马氏体的正方性以及减小残留应力。

对GCr15钢量块可选用 $(850\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 在油中淬火至室温,及时进行 $-78^{\circ}\text{C}$ 冷处理以减少残留奥氏体量,然后进行回火以减小马氏体正方性和残留应力。1985年以前,国内量块标准要求硬度 $\geq 64\text{HRC}$ ,在批量生产中为保证高硬度常在冷处理后选择 $120^{\circ}\text{C}$ 保温48h回火并时效的工艺。GB6093—85将硬度标准定为 $\geq 800\text{HV}$ ( $\approx 63\text{HRC}$ ),这就为提高回火温度以提高尺寸稳定性创造了条件。推荐采用以下工艺:

$(850\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 加热——常温油冷—— $-78^{\circ}\text{C}$ 冷处理—— $140\sim 150^{\circ}\text{C}$ 回火三次,每次保温1h(分三次回火有利于保持高硬度)—— $120^{\circ}\text{C}$ 人工时效48h——精磨—— $120^{\circ}\text{C}$ 保温10h(消除应力回火)——研磨。

国外有冷处理和回火多次交替的工艺以求得到最佳的尺寸稳定性。淬火后残留奥氏体处于多向压缩应力下阻止了马氏体转变,由于奥氏体与马氏体线胀系数不同,这种对奥氏体的压应力随温度降至零度以下而减小,从而促进了马氏体转变。加热回火时因在低温形成的马氏体晶体周围的奥氏体结构的破坏,使转变容易进行而发生附加的马氏体转变。另外,加热时的回复过程使显微组织中位错聚积密度减少,过应力减小以及位错和点缺陷重新分布提高了残留奥氏体和马氏体的稳定性。尽管多次交替反复冷处理和回火的循环的热理效应递减,但总的效果却提高了。其工艺如下:

$(850\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 加热——常温油冷—— $-78^{\circ}\text{C}$

冷处理 - 150℃ 回火两次, 每次 1h -- -78℃  
冷处理 150℃ 回火 1h 78℃ 冷处理  
120℃ 人工时效 48h -- 精磨 120℃ 保  
温 10h -- 研磨。

用 3Cr13 或 4Cr13 钢经调质或高温软化 (参见表 10-3) 得到 240HBS 左右的索氏体组织, 再经气体渗氮而制成的量块, 硬度 > 900HV, 研磨精度高, 尺寸稳定性极佳。推荐的渗氮工艺如下:

表面活化处理 (采用喷细砂等) -- 540 ~ 550℃ 气体渗氮 (氨分解率 25% ~ 30%), ≤ 10mm 量块渗氮 24h (渗层 0.15 ~ 0.18mm); 20 ~ 100mm 量块渗氮 48h (渗层 0.22 ~ 0.24mm)。

长度大于 100mm 的 GCr15 量块, 为保证尺寸稳定可采用两端工作部分局部淬火的方法, 工艺如下:

整体淬火 -- 280 ~ 300℃ 回火 (≥ 55 HRC) 量块端部约 10mm 浸入 820 ~ 825℃ 盐浴中加热 2 ~ 2.5min 在水中淬火。用同样方法对量块另一端淬火 -- 120 ~ 130℃ 回火 24h

也可以先将长量块整体淬火及经 280 ~ 300℃ 回火, 然后用感应加热对两端分别淬火, 最后进行 120 ~ 130℃ 回火 24h。

≤ 5mm 的量块的绝对尺寸变化量很小, 因此不作过多地考虑, 但磨削后常因应力重新分布而发生翘曲变形, 故对小规格量块应注意尽量减少淬火和磨削应力。

如前所述, 淬火钢的马氏体分解和残留奥氏体转变是自发过程, 因此将热处理后的量块坯料经粗加工后留出少量加工余量, 在室温自然时效半年至一年后再进行最后的精磨和研磨是提高量块尺寸稳定性的最佳方案。

上述内容也适用于其他需要尺寸稳定的精密机件的热处理。

### 10.2.6 热处理后机械加工 (磨削) 对量具的影响

量规和量具零件多采用过共析钢, 以期淬火后得到高硬度。热处理后高硬度的工件在磨削时常发生各种弊病, 影响产品质量或造成废品。除磨削时冷却不足或不当、砂轮选择不合适或修磨不及时、磨削规范不当以及机床振动等多种原因外, 有时也和材料或热处理不合适有关, 这类问题在量具生产中常有发生造成冷、热加工之间的问题

混淆不清、互相扯皮。在此将对这类问题的相互影响和关联进行综合分析, 供读者参考。

1. 烧伤 在磨削时的瞬时高温下金属表面可能产生一层极薄的氧化膜, 呈现出不同的回火色, 并造成一定厚度的热影响区使表层硬度下降, 通常称其为烧伤、软化或磨糊。

烧伤变色通常不均匀, 如烧伤很轻或随后的研磨使变色层被除去, 常看不出烧伤的痕迹, 但对表层的耐磨性会有影响, 必须防止。磨削操作不当, 砂轮选择不合适或砂轮磨钝等常成为烧伤的重要因素。一般而言, 材料或热处理质量与烧伤没有太多关系。

2. 裂纹 磨削规范或磨削条件不当, 在被磨削的表面形成一个个较强烈的烧伤中心, 造成不均匀的应力, 在交替的高温与急冷下应力值渐增, 直至产生裂纹。因烧伤中心很多, 相互间距小, 故磨削裂纹呈细小网状, 数量多而深度浅, 裂纹走向垂直于砂轮前进方向, 裂纹断面上一概无氧化色。

淬火温度过高, 回火不足可造成工件残留应力大, 即使在合理的磨削条件下也可能产生磨削裂纹, 这种裂纹相对于纯粹的磨削裂纹来说一般较稀疏, 也较宽而深。较严重的网状碳化物和材料导热性差都能促进磨削裂纹的产生。

钢中残留奥氏体在磨削时可能转变成淬火马氏体, 较脆。所以残留奥氏体量多的工件在磨削时容易发生磨削裂纹。

工件硬度与磨削裂纹的形成有关, 硬度小于 55HRC 的工件虽可能发生烧伤但产生磨削裂纹的情况极少, 60HRC 以上的工件, 都会使磨削裂纹发生的可能性大为增加。磨裂多在表面发生变色后才出现, 烧伤前很少开裂。

3. 变形 (翘曲) 即使磨削状况良好, 因磨削而使磨面呈现拉应力仍是不可避免的。另外, 因为磨去了一层金属使原来处于平衡状态的应力遭受破坏, 使零件处于新的不稳定的应力状态, 磨后的零件会因应力的重新分布而很快发生时效变形 (翘曲), 较长且不厚的零件 (如卡尺尺身等零件) 最为严重。

为减少上述弊病, 各道冷、热加工工序都应尽量减少引入的应力; 在磨削之间插入人工时效; 沿零件合适的长度方向安排磨削方向。另外, 应特别强调磨削过程中应经常翻面, 注意使零件正反两面的磨削量基本一致, 使两面引入的磨削应力尽

量达到平衡,这一点是非常重要的。

### 10.3 典型量具热处理

#### 10.3.1 百分表零件的热处理

百分表、百分表品种规格很多,为适用于不同 故需采取有效防止措施。见表 10-10 中举例。

#### 10.3.2 游标卡尺零件的热处理

游标卡尺零件在热处理过程中易产生畸变,

表 10-9 百分表零件热处理

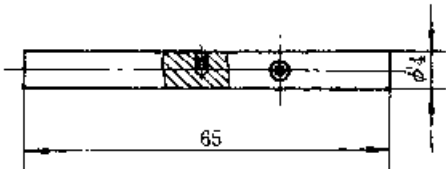
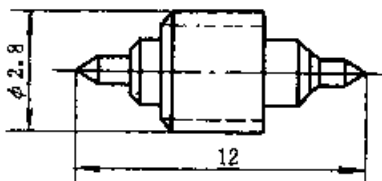
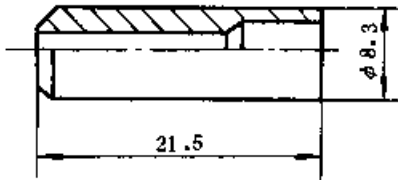
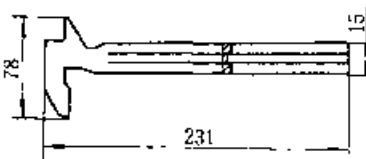
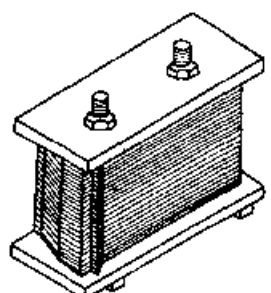
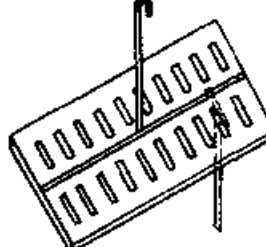
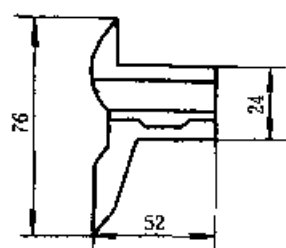
零件名称	零件简图及技术条件	热处理流程	热处理工艺	备 注
测杆	 <p>材料: 9Cr18 要求硬度: 53~57HRC 弯曲度: <math>\leq 0.05\text{mm}</math></p>	清洗→淬火 →回火→清洗 →矫直→稳定 化处理→清洗	<p>淬火(真空炉): 清洗工件后送入 1050~1060°C 炉中, 保温 10min (真空度 13.33~1.33Pa) 通氮冷却</p> <p>回火: 在电炉中加热至 200~250°C, 保温 4h</p> <p>稳定化处理: 在电炉中加热至 180~220°C 保温 4h</p>	<p>1) 也可在可控气氛炉中加热, 油淬</p> <p>2) 淬火夹具应保持测杆直立, 相互间有一定间隔, 使加热均匀, 减少弯曲。夹具使用前应清除一切污物, 保证清洁</p> <p>3) 测杆有中心通孔及不通的槽孔, 残盐不易洗净, 故不可用盐浴加热</p>
轴齿轮	 <p>材料: 2Cr13Ni2 要求硬度: 50~55HRC</p>	清洗→淬火 →回火→清洗	<p>淬火(真空炉): 工件用汽油洗净, 装在洁净的不锈钢小盘中, 允许重叠, 但不可堆放过厚, 在 1050~1060°C 保温 60~80min, 真空度为 13.33~1.33Pa, 保温后通氮冷却</p> <p>回火(油槽): 140~160°C×2h, 回火后用汽油洗净</p>	
下轴套	 <p>材料: T12A 要求硬度: 58~62HRC 淬火马氏体级别<math>\leq 2.5</math>级 (JB2406 第十级别图)</p>	淬火→热水 洗→回火→清 洗→喷砂	<p>淬火(盐浴): 650~700°C 预热 7min 再加热至 780~800°C 保温 7min, 均匀分散地撒入油中冷却</p> <p>回火(盐浴): 210~230°C×2h</p>	

表 10-10 游标卡尺主要零件热处理举例

零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
卡尺尺身	 <p>材料: T8A 或 4Cr13 测量面及距测量面 2mm 处硬度: 59~64HRC (T8A), 53~58HRC (4Cr13), 距测量面 2mm 处以外的尺身硬度为 40~48HRC, 测量面淬火马氏体级别<math>\leq 3</math>级 (T8A) 弯曲度 (平面及侧面) <math>\leq 0.1\text{mm}</math></p>	<p>淬火<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>回火 (装夹具压直)<math>\rightarrow</math>高频感应加热卡爪测量面局部淬火 (淬火<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>淬小爪)<math>\rightarrow</math>回火<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>矫直<math>\rightarrow</math>稳定化处理<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>尺槽喷砂<math>\rightarrow</math>防锈</p>	<p>淬火 (盐浴): 650~700°C 预热 6min (T8A) 或 9min (4Cr13) 再加热到 800~810°C (6min) 或 900~910°C (9min), 加热后淬入 150~170°C 硝酸盐浴中进行分级后, 空冷至室温或油冷</p> <p>回火 (电炉) 用专用夹具 (见下图) 夹紧, 在 380~420°C (T8A) 或 250~300°C (4Cr13) 回火并矫直 3h (T8A) 或 4h (4Cr13)</p>  <p>高频感应淬火: 用专用感应器将卡爪测量部分局部加热至 860~900°C (T8A) 或 1100~1130°C (4Cr13), 保温后送入 150~170°C 硝酸盐浴中分级冷却, 清洗, 再用专用感应器局部加热小爪测量部分 (加热温度同大爪), 再送入 150~170°C 硝酸盐浴中分级冷却</p> <p>回火: 150~170°C <math>\times</math> 2h (盐浴) 稳定化处理: 凡经过冷矫直的尺身须在 150~170°C 进行 2h 的稳定化处理</p>	<p>1) 装入专用夹具淬冷, 见下图, 操作时注意, 尽量减少弯曲</p>  <p>2) 盐浴淬火后, 在专用夹具上压紧回火矫直, 如回火后仍有弯曲超差者, 可进行一次冷矫直, 然后补充一次压紧回火</p> <p>3) 为使高频感应加热卡爪局部淬硬, 达到需要的淬硬深度, 又不使卡爪过热, 加热时应多次断续送电</p> <p>4) 尺身上的深度尺槽易有残盐造成日后工序间或成品生锈, 故采用尺槽喷砂工序, 也可用酸洗中和及防锈处理达到相同目的</p>
卡尺尺框	 <p>材料: T8A 或 4Cr13 技术要求: 同卡尺尺身</p>	<p>大卡爪测量面进行局部高频感应淬火<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>小卡爪测量面进行局部高频感应淬火<math>\rightarrow</math>回火<math>\rightarrow</math>清洗<math>\rightarrow</math>防锈处理</p>	<p>同卡尺尺身高频感应加热卡爪测量面</p>	



### 10.3.3 千分尺零件的热处理

千分尺品种规格较多,其中以中、小尺寸的千分尺使用最广,其主要零件的技术要求及热处理工艺见表10-11。

### 10.3.4 螺纹环规和塞规的热处理

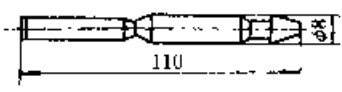
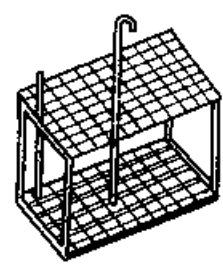
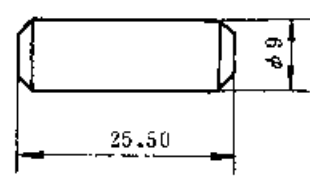
环规和塞规是检查外径和孔径尺寸的量规,螺纹环规热处理后只进行余量极小的研磨加工,

因此要求淬火前有一定的尺寸精度和较低的表面粗糙度,淬火后畸变小、脱碳极少,并有较好的研磨性能。其热处理工艺见表10-12。

### 10.3.5 卡规的热处理

卡规是检查零件外形尺寸的板状量具,常用卡规在成批生产时,多由渗碳钢制成。热处理工艺见表10-13。

表 10-11 千分尺主要零件热处理举例

零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备 注
螺纹测杆	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 58~62HRC 弯曲度: <math>\leq 0.15\text{mm}</math> 淬火马氏体级别: <math>\leq 2</math>级 (JB2406 79 第九级别图)</p>	淬火→回火→清洗→矫直→稳定化处理→清洗→磨削加工→端面磨削→高频感应加热焊硬质合金测头	淬火(盐浴): 650~700°C 预热 7min, 再加热到 850~860°C, 保温 7min, 淬入 200~220°C 硝酸盐浴中进行分级 1min, 再取出空冷至室温 回火(盐浴): 190~210°C×2h 稳定化处理(盐浴): 160~180°C×2h	1) 用专用夹具加热淬火如附图, 夹具设计应使工件直立, 相互间有足够间隙, 以尽量减少弯曲, 并保证淬火冷却均匀, 每夹装数十件, 每炉可装两夹同时加热以满足批量生产需要 2) 淬火后弯曲在允许范围内的, 可免除矫直和稳定化处理工序 
校对量柱	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 62~65HRC 弯曲度: 根据不同长度量柱而定 淬火马氏体级别<math>\leq 2</math>级</p>	淬火→清洗→深冷处理→回火→清洗→中间部分高频感应加热退火→矫直→稳定化处理→清洗	淬火(盐浴): 650~700°C 预热 10min, 再加热到 850~860°C, 保温 10min 油淬, 进行热水冲洗→冷水冲洗后立即进行冷处理 冷处理: -70~-80°C 冷透, 保持 30~60min 回火(盐浴): 130~150°C×8h 中间部分退火(感应加热): 量柱中间部分局部加热到 700~800°C, 空冷	1) 长度 $\geq 75\text{mm}$ 的零件装在专用夹具上直立加热, 相互间有间隙, 每夹装数十件, 以满足批量生产需要 2) 长度 $\geq 75\text{mm}$ 淬火后弯曲超差的中间局部退火以便矫直, 淬火弯曲在允许范围内的可免除局部退火及矫直、稳定化处理等工序

(续)

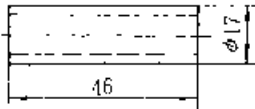
零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备注
微分筒体	 <p>材料: 45 钢 硬度要求: 170~207HBS</p>		铁丝扎成串, 在 860~880°C 盐浴中加热 10min 后吹风冷却 (正火处理)	

表 10-12 螺纹环规和螺纹塞规热处理工艺举例

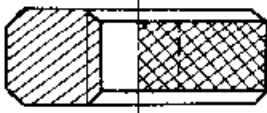
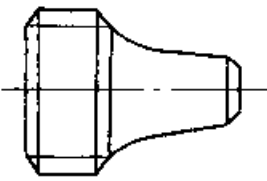
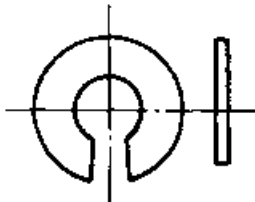
零件名称	零件简图及技术要求	热处理工艺流程	热处理工艺	备注
螺纹环规	 <p>材料: GCr15 硬度要求: 调质后为 170~229HBS 成品为 <math>\geq 58\text{HRC}</math> 显微组织要求: 调质后要求 1~3 级 (YB9 第五级别图) 成品要求马氏体级别 <math>\leq 2</math> 级 (JB2406 第九级别图)</p>	调质 $\rightarrow$ 机加工 $\rightarrow$ 淬火 $\rightarrow$ 清洗 $\rightarrow$ 回火 $\rightarrow$ 清洗 $\rightarrow$ 喷砂 $\rightarrow$ 防锈处理	调质: 淬火时将工件用铁丝绑扎成串在盐浴中预热到 650~700°C, 保持 7min, 再加热到 835~860°C, 保温 7min, 或在电炉中加热 40~60min 后油淬, 然后在电炉中进行 700~720°C $\times 10\text{h}$ 的高温回火 淬火 (盐浴): 650~700°C 预热 8min, 再加热到 850~860°C, 保温 8min 后油淬 回火 (盐浴): 160~180°C $\times 8\text{h}$	
螺纹塞规	 <p>材料: GCr15 硬度要求: <math>\geq 58\text{HRC}</math> 淬火马氏体级别 <math>\leq 2</math> 级</p>	淬火 $\rightarrow$ 清洗 $\rightarrow$ 回火 $\rightarrow$ 清洗 $\rightarrow$ 发蓝	淬火 (盐浴): 650~700°C 预热 8min, 再加热到 850~860°C, 保温 8~9min 后油淬 回火 (盐浴): 160~180°C $\times 8\text{h}$	

表 10-13 卡规的热处理工艺

技 术 要 求	工 艺 流 程	热 处 理 工 艺	备 注
卡规  材料: 15 钢、20Cr 硬度: 80~83HRA 渗碳层深度: 一般卡规: 1.0~1.3mm 样板卡规: 0.7~1.0mm	调质→机 加工→渗碳 →喷砂→ 一次淬火、回 火→二次淬 火、回火→ 清洗→磨→ 时效	调质: 900~950℃ 淬火, 600~650℃ 回火 (组织为索氏体) 渗碳: 920℃ 气体渗碳 一次淬火: 840~860℃ 加热, 水、油 或聚合物淬火 回火: 650~660℃ 保温 1.5~2h 二次淬火: 770~790℃ 加热, 水、油 或聚合物淬火 回火: 170~190℃ 保温 1~1.5h 时效: 140~150℃ 保温 3~4h	1) 样板卡规品种繁多, 用量不大, 为避免渗碳、淬火冗长工序, 除尺寸较大者外, 可用工具钢制造 2) 形状复杂的, 常用于工研磨, 要求热处理变形小 3) 保证高尺寸稳定性的要进行冷处理 4) 大尺寸卡规可进行局部淬火

## 参 考 文 献

- 1 黑色金属产品标准汇编, YB9 铬轴承钢技术条件《钢铁产品表示方法钢号和技术条件》, 北京: 技术标准出版社, 1974
- 2 合金工具钢技术条件, GB1299; 碳素工具钢技术条件, GB1298
- 3 工具专业标准, ZBJ36003
- 4 冶金工业部钢铁研究院, 原第一机械工业部机械科学研究院, 合金钢手册 (下册), 北京: 中国工业出版社, 1964
- 5 冶金工业部《合金钢钢种手册》编写组, 合金钢钢种手册第三册合金工具钢、高速工具钢, 北京: 冶金工业出版社, 1983
- 6 Z. Rogalski, Z. Obuchowicz, Fluidized-bed Heat Treatment Replacing Heat Treatment in Molten Salt Baths Containing Cyanides, Lecture manuscript provided by the authors, Poland, 1987
- 7 K. M. 拉赫金, A. I. 拉赫斯塔德特, 机械制造中的热处理手册 (1980 原著中译本), 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986
- 8 Ioan Alexandru et al. The Change of the Substructure Elements and the Redistribution of the Alloying Elements by Means of Cryotreatments in Alloy Tool Steels, 《Proceedings Vol. II of 5th International Congress on Heat Treatment of Materials》, Budapest, 1986
- 9 雷仲肩, 牛立华, 从热加工观点谈淬硬钢的磨削损伤问题, 机械技术报导, 1964 (6)

# 第 11 章 汽车、拖拉机及柴油机零件的热处理

东风汽车公司 程宗祥 机械局第九设计研究院 林锋

## 11.1 活塞环的热处理

活塞环包括气环和油环,又有整体环和组合环之分。气环主要用来密封气体,一般汽油机设 2~3 道气环,柴油机设 3~4 道气环。油环用来调节(或控制)气缸壁上的润滑油。有些发动机的油环采用螺旋撑簧油环,由铸铁环体和螺旋撑簧组成。有些汽油发动机的油环采用钢带组合油环,由刮环和衬环组成。

### 11.1.1 活塞环的服役条件和失效方式

活塞环在高温、高压的燃气介质中往复运动,在润滑不良的条件下,与气缸套发生激烈的摩擦。随着发动机性能指标的不断提高,压缩比及转速

也相应提高,活塞环的工作条件更为恶劣。

活塞环的主要失效方式是磨损、擦伤和疲劳折断。

### 11.1.2 活塞环的材料

#### 11.1.2.1 对材料性能的要求

活塞环材料应在工作温度下保持足够的强度和弹性,具有一定的抗擦伤性、耐磨性和较小的摩擦系数,并有一定的韧性、抗疲劳能力和良好的抗燃气腐蚀能力,且易于制造。

#### 11.1.2.2 材料类型

GB/T 1149.4《内燃机活塞环 技术要求》,规定了气缸直径小于或等于 200mm 的往复活塞式内燃机活塞环的基本材料规格,见表 11-1。

表 11-1 内燃机活塞环基本的材料规格

级 别	力学性能		适应所要求力学性能的材料			
	典型弹性模量 $E$ / MPa	最低抗弯强度 $\sigma_b$ / MPa	材料类型	最低硬度值	特殊要求	细级别
10	90000	300	灰铸铁	93HRB	不经热处理	11
	100000	350		95HRB		12
20	115000	450	灰铸铁	23HRC	热处理	21
		450		28HRC		22
		450		10HRC		23
	130000	500		32HRC		24
		650		37HRC		25
30	145000	550	碳化物铸铁	25HRC	热处理, 珠光体	31
		500		30HRC	热处理, 马氏体	32
40	160000	600	可锻铸铁	95HRB	热处理, 珠光体	41
		600		22HRC	热处理, 马氏体	42
		600		30HRC	热处理, 马氏体	43
		1000		27HRC	热处理, 碳化物	44

(续)

级 别	力学性能		适应所要求力学性能的材料			
	典型弹性模量 $E/\text{MPa}$	最低抗弯强度 $\sigma_{bt}/\text{MPa}$	材料类型	最低硬度值	特殊要求	细级别
50	160000	1100	球墨铸铁	23HRC	热处理, 马氏体	51
		1300		23HRC	热处理, 马氏体	52
		1300		28HRC	热处理, 马氏体	53
		1300		95HRB	珠光体	54
		—		97HRB	铁素体	55
60	200000		钢	38HRC	铬钼钒合金	61
				40HRC	铬硅合金	62
				48HRC	铬硅合金	63

注: 1. 硬度值是三个测量点(开口、离开口 90°和 180°处各一点)的平均值, HRB 和 HRC 硬度试验按 GB230 的规定进行。

2. 采用 HRB 和 HRC 的硬度测量法受活塞环几何形状和材料的限制, 所列硬度值仅适用于各个细级别规定的材料。其他硬度测量法和其相当值均由供需双方协商决定。

3. 级别 60 所列材料特殊要求属推荐性。ISO 6621/3—83 无本条内容。

1. 铸铁 活塞环常采用灰铸铁和合金铸铁, 石墨形态为片状石墨, 因而具有良好的导热性、减摩性、耐磨性和抗擦伤能力。大量生产中最常用的合金铸铁是铬合金铸铁和钨合金铸铁。加入钼、钒、钛等合金元素可以提高热稳定性、细化晶粒和提高耐磨性。高速柴油机有采用含多合金元素(如镍、铬、钼、钨、钒、铌等)的合金铸铁, 使其在基体组织上形成较多细小硬质点, 从而提高活塞环的耐磨性。

球墨铸铁活塞环具有高的强度、弹性和抗折断能力, 特别适用于要求高载荷、高速运行的发动机。球墨铸铁活塞环的缺点是抗擦伤能力和减摩性不如片状石墨铸铁, 所以应通过镀铬、喷涂钼等表面处理改善早期磨合性能, 提高其表面的抗擦

伤能力和耐磨性。

活塞环材料有时还采用半可锻铸铁。半可锻铸铁的碳、硅含量在可锻铸铁和灰铸铁之间, 高于一般可锻铸铁的上限, 并加有合金元素(主要是铬、钼)。由于高温石墨化退火不完全, 基体组织中留有一部分未分解的碳化物。

此外, 蠕墨铸铁具有介于球墨铸铁和灰铸铁之间的力学性能、物理性能和铸造工艺性能, 亦可望在活塞环生产中得到应用。

常用铸铁活塞环材料的化学成分见表 11-2。使用此表时, 应根据生产条件和零件特征, 通过试验和试生产确定合适的化学成分范围, 以达到预期的材料性能指标。几种铸铁活塞环材料的性能比较列于表 11-3。

表 11-2 常用铸铁活塞环材料的化学成分(质量分数)

(%)

材料名称	C	Si	Mn	P	S	W	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Mg	其他
钨铬钼合金铸铁	3.65~3.90	2.6~2.8	0.85~0.95	0.45~0.50	≤0.1	0.35~0.45	0.15~0.20	0.15~0.20	—	—	—	—	—
钨铬钼合金铸铁	3.6~3.9	2.5~2.9	0.7~1.0	0.4~0.5	≤0.1	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.35	—	—	—	—	—
铬钼合金铸铁	3.7~3.9	2.7~2.9	0.6~0.8	0.3~0.5	≤0.05	—	0.25~0.35	—	—	—	—	—	Nb 0.25~0.35
铬钼铜合金铸铁	2.9~3.3	1.9~2.4	0.9~1.3	0.35~0.65	≤0.1	—	0.2~0.5	0.3~0.6	0.8~1.4	—	—	—	—
铬钼铜合金铸铁	3.0~3.5	1.8~2.2	0.8~1.0	0.4~0.6	≤0.1	—	0.25~0.5	0.35~0.6	0.7~1.0	—	—	—	—

(续)

材料名称	C	Si	Mn	P	S	W	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Mg	其他
铬钼铜合金铸铁	3.6~2.6~ 1.0 2.3	0.6~0.4~ 0.9 0.6	≤0.1	0.2~0.2~ 0.3 0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钨铬合金铸铁	3.5~2.1~ 3.9 2.9	0.6~0.25~ 0.9 0.15	≤0.1	0.4~0.2~ 0.8 0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钨钼钛合金铸铁	3.6~2.2~ 3.9 2.7	0.6~0.35~ 1.0 0.50	≤0.16	0.4~0.6~ 0.65 0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钨钼钛合金铸铁	3.6~2.5~ 3.9 2.9	0.7~0.4~ 1.0 0.5	≤0.1	0.5~0.2~ 0.5 0.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钨钼钛合金铸铁	3.4~2.4~ 3.9 2.9	0.6~0.25~ 0.9 0.15	≤0.1	0.3~0.5~ 0.5 0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钨铬铜合金铸铁	2.8~1.8~ 3.1 2.1	0.8~0.3~ 1.0 0.15	≤0.1	0.35~0.25~ 0.15 0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
球墨铸铁	3.1~2.1~ 3.8 2.6	0.6~0.9~ 0.9 0.9	≤0.1	0.2~0.16~ 0.16 0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
球墨铸铁	3.1~2.5~ 3.6 3.0	≤0.6~ 0.1 0.1	≤0.03	0.1~0.2~ 0.2 0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	RE 0.01~0.025
球墨铸铁	3.6~3.0~ 3.8 3.3	0.7~0.9~ 0.9 0.9	≤0.2	0.03~ 0.03 0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	RE 0.015~0.03
半可锻铸铁	2.5~1.7~ 3.0 2.0	1.7~1.0~ 1.0 1.0	≤0.1	≤0.12~ 0.12 0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 11.3 几种铸铁活塞环材料的性能比较

材料名称 (成分: 质量分数)	抗弯强度 $\sigma_{bh}$ MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ MPa	伸长率 $\delta(\%)$	硬度 (HRB)	冲击值 $a_K/J \cdot cm^{-2}$	弹性模量 $E/GPa$
灰铸铁	≥350	—	—	96~106	—	77~82
合金铸铁(Cr0.3%)	500~550	—	—	96~106	—	90~101
合金铸铁(Cr0.2%, Mo0.2%)	500~530	—	—	100~105	—	85~90
合金铸铁(W0.1%, Cr0.2%, Mo0.2%)	≥400	—	—	98~108	—	90~110
球墨铸铁	1300~1600	650~750	≥3	100~112	≥20	155~175
球墨铸铁	≥1200	≥600	≥2	—	—	160
半可锻铸铁	880	—	—	98~108	—	142~171

2. 钢 钢活塞环具有强度高、抗折断性能好、尺寸小、大量生产时成本低等优点, 用作第一道气环或油环时, 通常配以不同的表面涂层。

钢带组合油环有较好的控油效果, 而且生产方便、成本低, 在大量生产中经常选用, 其材料一般是 T8A 和 65Mn 钢。

螺旋撑簧油环中, 撑簧材料采用碳素弹簧钢丝、65Mn 及 50CrVA 钢等。

第一道气环采用 SAE9254 ( $w(Cr) \leq 1\%$ ) 并经镀铬(或等离子喷钼)处理, 或采用高铬钢 ( $w(Cr)18\%$  钢,  $w(Cr)13\%$  钢) 并经渗氮处理, 这

在国外汽油机中的应用迅速增长。J 型截面油环采用  $w(Cr)13\%$  钢,  $w(Cr)6\%$  钢并经渗氮处理, 与铸铁环相比, 具有径向弹力均匀、减摩、降低油耗, 从而减少排放等优点, 在美国正在进行大功率柴油机的运行试验。

3. 铁基粉末冶金 粉末冶金工艺具有金属利用率高、机械加工量少、降低能耗、材料性能均匀、材料内部孔隙有储油功能等优点。英国在 1979 年已有几种轿车发动机采用铁基粉末冶金活塞环, 对于直径小于 50.8mm (2in) 的活塞环, 生产能力为 300 片/min。制造工艺路线为:

表 11-4 粉末冶金活塞环材料化学成分和力学性能

化学成分 (质量分数) (%)							力学性能			
C	Si	Mn	S	P	Mo	Cu	Fe	$\sigma_b$ /MPa	E/GPa	硬度 (HV)
0.9~2.0	$\leq 0.3$	$\leq 0.5$	$\leq 0.2$	$\leq 0.2$	0.1~1.7	2.0~4.5	余量	385	117	150

混合配料 → 压制 → 烧结 → 再次压制 → 再次烧结 → 浸油 → 精整

材料化学成分和力学性能见表 11-4。

### 11.1.2.3 材料选择

活塞环材料种类较多,选择材料时不仅要根据不同内燃机的各道环的工作要求,还要从气缸

活塞-活塞环摩擦副的材料匹配,以及制造方便和经济合理等诸多方面作综合考虑,以追求最佳的组合和较高的工程效率。

## 11.1.3 活塞环的热处理工艺

### 11.1.3.1 活塞环的制造工艺路线

1. 铸铁活塞环 铸铁活塞环可采用单体铸造和筒体铸造。通常,品种单一、生产量大的活塞环采用单体铸造;而品种多、产量较低的活塞环宜用筒体铸造。它们的工艺路线分别为:

单体铸造 → 机加工 → 去应力退火 → 半精加工

→ 表面处理 → 精加工 → 表面处理 → 成品。

筒体铸造 → 机加工 → 热定形 → 内外圆加工 → 表面处理 → 精加工 → 表面处理 → 成品。

2. 钢带组合油环 刮环的工艺路线是:下料 → 淬火 → 回火 → 拉边 → 绕圆 → 热定形 → 镀铬 → 磷化 → 切口、修口。

衬环有波形环和 U 形环,其工艺路线是:下料 → 成形 → 淬火 → 回火 → 表面处理 → 切口、修口。

### 11.1.3.2 热处理工艺

#### 1. 去应力退火

(1) 铸铁活塞环,凡仿形加工成椭圆形的活塞环,在粗磨两端面后应进行去应力退火,其目的是消除铸造和机加工应力,稳定在加工过程中及使用过程中活塞环的尺寸及精度。可采用图 11-1 中 a 或 b 所示的工艺,经图 11-1a 工艺处理的活塞环的硬度均匀性较好。

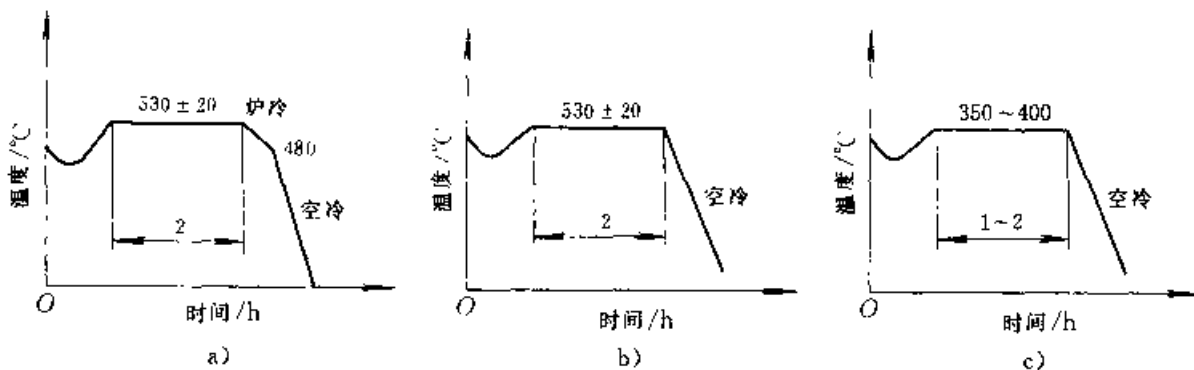


图 11-1 活塞环去应力退火工艺

a)、b) 铸铁活塞环 c) 螺旋弹簧

(2) 螺旋弹簧,去应力退火工艺见图 11-1c。

2. 热定形 筒体铸造正圆形半成品环在没有仿形车设备时,必需进行热定形处理,使活塞环在工作状态时有恰当的弹力。

热定形前将开口的环装夹,使环撑开成一定开口间隙。装夹方法有两种:

(1) 用椭圆形心轴装夹,心轴直径比环的内径稍大些,使切口处形成合适的间隙。

(2) 用 T 形或楔形撑板装夹,把环的开口撑大到合适间距。

铬钼铜合金铸铁及钨铬铜合金铸铁活塞环的热定形工艺见图 11-2,保温时间应随环的尺寸加大而适当延长。灰铸铁的刹车气泵小型环的热定形温度采用 500~550°C。经过这样处理后,环在自由状态下呈椭圆形。

应注意热定形夹具的合理设计和保证炉温均匀,以防止活塞环的硬度不均和开口间隙不一。另外,热定形温度较高,应采取措施防止零件氧化。

3. 钢带环的热处理 刮环用钢带的淬火、回火是在管式炉内进行的,例如某厂采用管子直径

为 25mm, 淬火加热炉长 3m、功率 15kW。回火炉长 6m、功率 5kW。淬火冷却介质为淬火油。回火后在通水冷却的压模中冷却。钢带在炉内的行进速度为 3m/min。

将淬火、回火后的钢带拉边后在绕圆机上绕圆, 随后将它和定形胎套一起放到热定形筒内, 四周用铸铁屑填满封盖后在井式炉内进行光亮热定形处理。其淬火、回火和热定形温度见表 11-5。

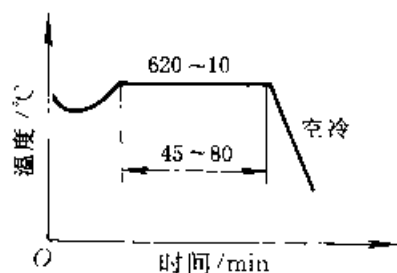


图 11-2 铸铁活塞环热定形工艺

表 11-5 刮环淬火、回火和热定形温度

材 料	淬火温度 /℃	回火温度 /℃
T8A	860±10	380±10
65Mn	870±10	390±10

材 料	热 定 形		
	温度 /℃	时间 /min	硬度 (HRA)
T8A	380±10	120	74~78
65Mn	390±10	120	74~78

衬环的热处理工艺是将 T8A 钢带压成 U 形或波形, 再在滚压淬火设备上进行滚压淬火, 带速为 2.8~3m/min, 再在 380℃的井式回火炉中回火 60min, 回火后空冷。成品硬度为 70~75HRA。

4. 球墨铸铁环的淬火、回火 淬火时将环重叠并在夹具上压紧, 按图 11-3 所示的工艺在有保护气氛的炉内进行加热, 油淬后经碱水清洗并烘干后回火。

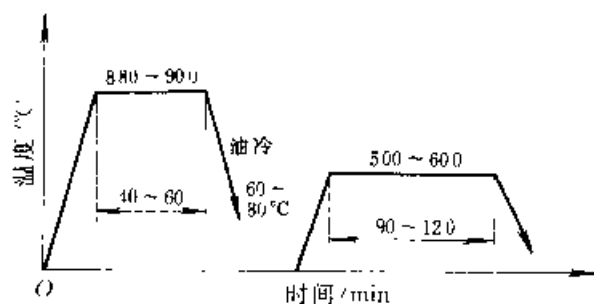


图 11-3 球墨铸铁活塞环淬火回火工艺

#### 11.1.4 活塞环的表面处理

活塞环表面处理的目的是提高耐磨性、耐热性, 改善与气缸壁的走合性能。通常在气环的外圆面上镀铬、喷涂钼或进行渗氮、激光热处理, 端面进行磷化处理。油环一般进行镀锡或磷化处理, 亦可镀铬、喷涂钼。表 11-6 列举了常用的表面处理工艺及其性能特点。

活塞环最常用的表面处理工艺是镀铬, 它能成倍提高耐磨性。为了走合好, 有的厂采用了松孔镀铬或疏型松孔网纹镀铬, 有的厂在镀铬并珩磨后再进行液态喷砂处理, 以产生点状小浅孔铬层, 不仅改善了表面润滑, 而且还平衡了铬层的拉应力, 提高了环的抗疲劳能力。

对于要求更高的耐热性和抗粘着磨损能力的活塞环, 可以采用喷涂钼处理。钼涂层软化温度高, 热稳定性好。多孔的喷涂钼层能储油, 有利于走合、抗拉缸。常用的喷涂钼的方法有钼丝喷涂和等离子喷涂。典型的等离子喷涂工艺参数如下:

喷枪至工件距离	110mm
喷枪输出功率	17.4kW
喷枪工作电压	58V
喷枪工作电流	300A
送粉气流量	600~800L/h
涂层缠绕间距	1.58mm
保护气流量	氮 400~550L/h
	氩 1200~1300L/h
生产能力	70片/40min

表 11-6 表面处理及其性能特点

工 艺	硬化层深 /mm	硬 度 (HV)	耐热性/°C		特 点
			熔 点	软化点	
镀铬	0.15~0.20	≥750	1778	300	耐磨
喷涂钼	0.15~0.25	700~800	2640	500	耐热, 耐粘着磨损
激光热处理	0.15~0.25	800~1000	1560	300	耐磨, 没有剥落



喷涂钼成本高、工艺较复杂,仅在机车等高载荷活塞环上应用。

激光热处理工艺较简单,但由于目前设备尚有待改进,生产效率还比较低,所以目前活塞环激光热处理尚处于试应用阶段。某厂采用500W二氧化碳激光器处理铬钼铜合金铸铁环,每分钟能处理3片,硬化带宽1.8mm,总层深为0.25mm,工艺参数见表11-7。

活塞环表面处理在活塞环制造中占有重要位置,表面处理的方法也较多,应根据使用要求、生产批量和工艺、设备的可靠性综合考虑。目前大量生产中常采用镀铬、磷化和镀锡处理,通常第一道气环外圆面、刮环及螺旋撑簧油环刮油面应镀铬、

其他环则采用磷化、镀锡。

表 11-7 直径 207mm 活塞环激光  
热处理工艺参数

零件	扫描速度 /m·min <sup>-1</sup>	功率密度 /W·cm <sup>-2</sup>	光斑直径 /mm	焦点与环面 间距/mm
气环	1.32	$4.5 \times 10^4$	1	6
油环	1.32	$10^4$	0.5	3

### 11.1.5 活塞环的质量检验

铸铁活塞环的金相检验要求列于表11-8、表11-9,活塞环的力学性能及其他技术要求的检验列于表11-10。

表 11-8 普通合金铸铁单体铸造和筒体铸造活塞环的金相检验

检 验 项 目			标 准 规 定			评 定 方 法	
			JB/T 6016	JB 3934	JB/T 6290		
石 墨	石墨长度 / $\mu\text{m}$	单体环 断面系数	$\leq 150 / \leq 0.8$	$\leq 120 / \leq 0.8$	—	在整个磨面 内选取最长的 石墨进行评 定,不允许有 3 根石墨超出规 定尺寸	
			$\leq 180 / > 0.8 \sim 1.0$	$\leq 150 / > 0.8 \sim 1.1$	—		
			$\leq 200 / > 1.0 \sim 1.2$	$\leq 180 / > 1.1 \sim 1.3$	—		
			$\leq 220 / > 1.2$	$\leq 200 / > 1.3$	—		
	筒体环径向厚度 (mm)	—	—	$\leq 150 / < 4.5$			
		—	—	$\leq 180 / \geq 4.5$			
	E 型石墨 (%)	单体环	$\leq 10$	$\leq 5$	—	有 3 个视场 不合格则判为 不合格	
		筒体环径向厚度 (mm)	—	—	$\leq 20 / < 1.5$ $\leq 10 / \geq 4.5$		
基 体 组 织	磷共晶链长 / $\mu\text{m}$	单体环断面系数	$\leq 150 / \leq 1.0$	$\leq 150 / \leq 1.1$	—	珠光体、磷 共晶、铁素体 在整个磨面选 取最差视场进 行评定,如有 3 个视场不合格 则判为不合格, 游离渗碳体和 莱氏体有 1 个 视场出现则判 为不合格	
			$\leq 180 / > 1.0$	$\leq 180 / > 1.1$	—		
		筒体环	—	—	$\leq 200$		
	单个磷共晶面积/ $\mu\text{m}^2$		$\leq 1000$	$\leq 1000$	$\leq 2000$		
	磷共晶—碳化物 复合物	碳化物长度/ $\mu\text{m}$	$\leq 30$	$\leq 30$	$\leq 50$		
		碳化物面积/ $\mu\text{m}^2$	$\leq 300$	$\leq 300$	$\leq 500$		
	游离铁素体(体积分数)(%)		$\leq 5$	$\leq 3$	$\leq 3$		
珠光体		应为索氏体型珠光体、细片状珠光体,允许有针状组织,不允许有粒状珠光体、游离渗碳体和莱氏体存在					

注:JB/T 6016 内燃机单体铸造活塞环金相检验。

JB 3934 汽车、摩托车发动机单体铸造活塞环金相标准。

JB/T 6290 内燃机筒体铸造活塞环金相检验。

表 11-9 球墨铸铁活塞环的金相检验

检 验 项 目		标 准 规 定		评 定 方 法
		JB/T 6724	ZB/T T12007	
石 墨	球化率(%)	$\geq 75$	$\geq 70$	在整个磨面上选取最差的视场进行评定(每个视场不允许有三颗石墨超过规定尺寸),有三个视场不合格则判为不合格
	球径/ $\mu\text{m}$	$\leq 50$	$\leq 45$	
基 体 组 织	游离铁素体 (体积分数)(%)	铸态、正火	$\leq 15$	在整个磨面上选取最差视场进行评定,如有三个视场不合格则判为不合格
		淬火回火	$\leq 5$	
	磷共晶(%) (体积分数)		$\leq 1$	
	碳化物(%) (体积分数)		$\leq 3$	
	珠光体片间距离/ $\mu\text{m}$		$\leq 0.60$	

注: JB/T 6724 内燃机球墨铸铁活塞环金相检验。

ZB/T T12007 汽车摩托车发动机球墨铸铁活塞环金相标准。

表 11-10 活塞环的力学性能及其他技术要求的检验

检 验 项 目			技 术 要 求			
			GB/T 1149.4	JB 3933	JB/NQ 53.1	TB 1382
硬度 (HRB)	铬合金 铸铁	$D \leq 150\text{mm}$	$98 \sim 108^{\text{①}}$	$98 \sim 108$	$98 \sim 108$	$94 \sim 107$
		$D > 150\text{mm}$	$94 \sim 105^{\text{①}}$		$94 \sim 105$	
	钨合金铸铁		$96 \sim 106^{\text{①}}$	$96 \sim 106$	$96 \sim 106$	—
	球墨铸铁		—	$100 \sim 110$	可锻、半可锻、球墨铸铁 $98 \sim 110$	—
同片环上硬度差(HRB)			$\leq 3^{\text{②}}$	$\leq 4$	合金铸铁 $\leq 3$	$\leq 3 (D \leq 200\text{mm})$
						$\leq 4 (D > 200\text{mm})$
典型弹性 模量 $E$ /GPa	合金 铸铁	单体铸造	$93.163^{\text{①}}$	$98 \pm 14$	$95 \pm 15$	—
		筒体铸造	$112.776^{\text{①}}$		$115 \pm 15$	—
	球墨铸铁及可锻铸铁		160	球墨铸铁 $156.8 \pm 14$	可锻、半可锻铸铁 $150 \sim 160 \pm 15$	—
					球墨铸铁 $160 \pm 15$	
	钢		200	—	$200 \pm 15$	—
抗弯强度 $\sigma_{bb}/\text{MPa}$	合金 铸铁	单体铸造	$\geq 392^{\text{①}}$	$\geq 392$	$\geq 392$	—
		筒体铸造	$\geq 471^{\text{①}}$		$\geq 480$	
	可锻铸铁		$\geq 600 \sim 1000$	—	可锻、半可锻铸铁 $\geq 600$	—
	球墨铸铁		$\geq 1100 \sim 1300$	$\geq 882$	$\geq 900$	—

(续)

检 验 项 目		技 术 要 求			
		GB/T 1149.4	JB 3933	JB/NQ 53.1	TB 1382
弹性模量与抗弯强度极限值的 比值 $E/\sigma_{bb}$			$\leq 240$		$\leq 220 (D, a \leq 24)$ $\leq 240 / (D, a > 24)$
切向弹力消失率(%) (试验温度 $^{\circ}\text{C} \times$ 时间h)	合金铸铁	$\leq 12 (300^{\circ}\text{C} \times 3\text{h})$	$\leq 20 (350^{\circ}\text{C} \times 6\text{h})$	铸铁整体环 $\leq 20 (350^{\circ}\text{C} \times 6\text{h})$	$\leq 15 (350^{\circ}\text{C} \times 1\text{h})$
	球墨铸铁	$\leq 8 (300^{\circ}\text{C} \times 3\text{h})$	$\leq 12 (350^{\circ}\text{C} \times 6\text{h})$		
不镀铬环外圆漏光度 (弧度)	每处检查	$\leq 25^{\circ}$	$\leq 25^{\circ}$	$\leq 25^{\circ}$	$\leq 25^{\circ}$
	同片环总和	$\leq 45^{\circ}$	$\leq 45^{\circ}$	$\leq 15^{\circ}$	$\leq 45^{\circ}$
	开口两侧	各 $30^{\circ}$ 内不许漏光 <sup>①</sup>	各 $15^{\circ}$ 内不许漏光	各 $15^{\circ}$ 内不许漏光	各 $30^{\circ}$ 内不许漏光

注：表中  $D$  为环的外圆直径， $a$  为径向厚度。

① 为 GB 1149 中的数据。

GB/T 1149.4 内燃机活塞环技术要求。

JB 3933 汽车、摩托车发动机活塞环技术条件。

JB/NQ 53.1 内燃机活塞环产品质量分等标准。

TB 1382 内燃机车柴油机用活塞环技术条件。

## 11.2 活塞销的热处理

### 11.2.2 活塞销材料

#### 11.2.1 活塞销的服役条件和失效方式

活塞销连接活塞和连杆小头，在运动时相当于双点支承梁，在较高工作温度下承受非对称交变载荷和一定的冲击载荷，其表面长期在润滑条件较差（一般靠飞溅润滑）的摩擦条件下工作。

活塞销的主要失效方式是表面磨损和疲劳裂纹。

活塞销要求具有足够的强度、韧性、耐磨性及疲劳极限；为减小往复惯性力，还要求重量小。因此，活塞销通常采用渗碳钢制造，渗碳热处理后进行精加工以达到较高的表面粗糙度和精度要求。常用材料及技术要求见表 11-11。

JB/NQ 54.1 规定活塞销内孔、外圆表面渗碳层深度的技术要求列于表 11-12。

表 11-11 活塞销常用材料及技术要求

标准号		JB/NQ 54.1	TB 1461	JT 4031
适用范围		气缸直径为 200mm 以内的内燃机	内燃机车柴油机	船用柴油机
材 料		20, 15Cr, 20Cr, 20Mn2	12CrNi3A, 18Cr2Ni4WA, 20CrMnTi, 20Cr	15, 20 <sup>②</sup> , 15Cr, 20Cr <sup>③</sup>
渗碳层深度 /mm		详见表 11-12	1.1~1.7	0.6~0.8 ( $\delta < 3.5\text{mm}$ ) 0.8~1.2 ( $\delta 3.5 \sim 8\text{mm}$ ) 1.2~1.8 ( $\delta > 8\text{mm}$ )
内孔表面脱碳		贫碳层深度 $\leq 0.03\text{mm}$ (一等品、优等品)	-	
硬度 (HRC)	外圆表面	58~64 57~64 (有体积稳定性要求时)	60~63 (12CrNi3A) 57~62 (其余材料)	56~61
	同一销上 硬度差	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 5$

(续)

标准号	JB NQ 54.1	TB 1461	JT 4031
硬度 (HRC)	20 21~45( $\phi 2 \sim 10\text{mm}$ ) 20~49( $\phi 16 \sim 18\text{mm}$ ) 24~48( $\phi 2 \sim 18\text{mm}$ )	21~42	—
心部硬度	15Cr, 20Cr 20Mn2		

注：表中  $\phi$  为活塞销壁厚。

(1) 20、20Cr 钢的含碳量不得超过 0.22% (质量分数)。

JB NQ 54.1 内燃机活塞销产品质量分等标准质量指标。

TB 1461 内燃机车柴油机活塞销技术条件。

JT 4031 船用柴油机活塞销技术要求。

表 11-12 活塞销内孔、外圆表面渗碳层深度的技术要求

活塞销壁厚/mm	2~3	>3~4	>4~6	>6~8	>8~10	>10
渗碳层深度/mm	外圆表面 $\geq 0.25$ 内孔表面 $\geq 0.05$	$\geq 0.30$	$\geq 0.40$	0.5~1.2	0.6~1.2	0.8~1.7
内外表面渗碳层深度之和占壁厚比例(%)	$\leq 40$	$\leq 35$	$\leq 33$			

注：内孔表面不渗碳时，外圆表面渗碳层深度由产品图样规定。

碳钢及 15Cr、20Cr、20Mn2 等钢渗碳层深度为过共析层加共析层加 1/2 过渡层。外圆表面渗碳层深度小于或等于 0.6mm 时，过共析层加共析层之和应占渗碳层深度的 25%~70%，并允许不出现过共析层。

12CrNi3A、18Cr2Ni4WA、20CrMnTi 等钢渗碳层深度为过共析层加共析层加过渡层，过共析层加共析层深度应为渗碳层深度的 50%~75%。

### 11.2.3 活塞销的热处理工艺

#### 11.2.3.1 活塞销的制造工艺路线

→退火→磷化→冷挤压→渗碳→

棒料→粗车外圆→渗碳→钻内孔→

→感应加热→温挤压→渗碳→

→淬火、回火→精加工→成品。

热轧管→粗车外圆→渗碳

冷拔管→下料→渗碳→

→精加工→成品。

大量生产的活塞销均为冷挤压或温挤压成形，产量较少的活塞销则采用钻削加工成形或管料制造。

#### 11.2.3.2 冷挤压活塞销坯料的退火

冷挤压活塞销坯料退火的目的主要是降低硬

度，提高塑性，为挤压工艺作准备。几种材料的退火要求及典型工艺见表 11-13。

表 11-13 活塞销材料的退火要求及典型工艺

材料	退火工艺	硬度(HBS)
15Cr	(750±10)°C 退火，随炉冷到 550°C 出炉空冷	≤137
20Cr、20CrMo	(850±10)°C 加热，滴甲醇保护，随炉冷到 600°C 出炉坑冷（进行表面保护，防止脱碳和氧化）	≤140
20Cr	(850±10)°C 燃油炉内装箱退火，炉冷到 300°C 以下空冷	≤140
20	(880±10)°C 保温 0.5h 后空冷	≤140

坯料退火后尚需磷化处理，以改善冷挤压条件，减少挤压成形所需的挤压力和提高挤压模具的寿命。

采用温挤压可以取消坯料的退火和磷化处理。某厂采用 2500Hz 中频感应加热，螺旋形的感应圈长达 1500mm。直径 28mm 的活塞销坯料在感应圈内的总加热时间约 1min，坯料加热到 600°C 后逐个挤压成形。

## 11.2.3.3 活塞销渗碳热处理工艺

1. 工艺及设备 渗碳钢活塞销在渗碳后经淬火、低温回火处理。性能要求较高的活塞销采用二次淬火、回火处理,第一次淬火的目的在于消除渗层中的网状渗碳体,并细化心部组织;第二次淬火是为了细化渗层组织并使渗层得到高硬度。合金元素含量较高的活塞销在渗碳淬火后要进行深冷处理,以减少渗层中的残留奥氏体量,特别是要求尺寸稳定的活塞销,更需要进行深冷处理以控制残留奥氏体量。

汽车、拖拉机活塞销生产厂家一般采用20Cr、20CrMo钢冷挤压成形和双面渗碳处理。渗碳层深度一般根据活塞销的壁厚来决定,目前有关标准中的技术要求尚不够准确,应与渗碳工艺过程精确控制的技术水平相适应,进一步优化设计—材料—工艺三方面的组合,在保证零件服役性能的前提下降低成本,提高效率。活塞销渗碳热处理后表面硬度58~61HRC,同一销上的硬度差不大于3HRC,心部硬度24~45HRC。表面显微组织为细针状马氏体,允许有少量块状碳化物,不允许有粗块状或

连续网状碳化物,碳化物1~4级合格。心部显微组织为板条状马氏体和铁素体,不得有大块铁素体。热处理后一般内孔不再进行磨削加工,应控制贫碳层小于0.03mm。

(1) 渗碳工艺及设备,常采用井式渗碳炉滴注式气氛气体渗碳或吸热式气氛气体渗碳。滴注式气体渗碳剂一般采用煤油和甲醇,典型渗碳工艺见图11-4和表11-14。吸热式气氛渗碳常采用吸热式气氛为载气,丙烷或甲烷为富化气,典型渗碳工艺的主要参数为:

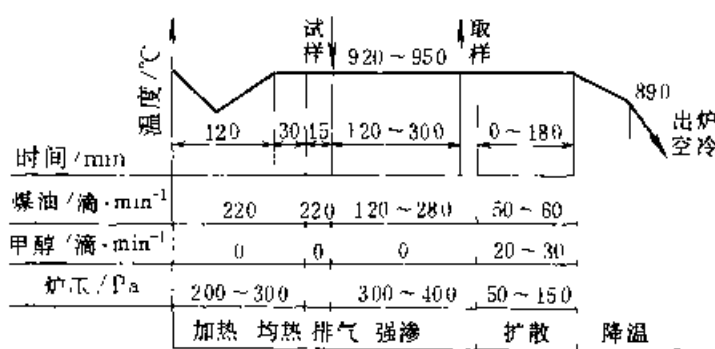


图11-4 20Cr钢活塞销渗碳工艺

(渗碳炉为RJJ-105-9T)

表11-14 20Cr活塞销渗碳工艺参数

渗碳层深度 mm	渗碳温度 °C	试 棒		滴量(d/min)			扩 散 期 时 间 /h	表面含碳量 (质量分数) (%)
		炉内时间 h	要求层深 mm	强 渗 期 煤 油	扩 散 期			
					煤 油	甲 醇		
1.3~1.9	950±10	5	1.4	120		60~70	2.5~3	0.8~1.05
1.0~1.4	940±10	3	1.1	180	50~60	20~30	2	0.8~1.05
0.8~1.1	940±10	2.5	0.8	200	50~60	20~30	1.5	0.8~1.05
0.5~0.8	930±10	2	0.8	280		—	—	0.7~1.0

注: 渗碳设备为RJJ-105-9T井式气体渗碳炉,滴量每100滴为4mL。

渗碳温度(930±10)°C,排气期气氛:RX5~7m<sup>3</sup>/h、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>0.2m<sup>3</sup>/h; 渗碳期气氛:RX2m<sup>3</sup>/h、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>0.15m<sup>3</sup>/h,炉压600Pa; 扩散温度(900±10)°C,扩散期气氛RX2m<sup>3</sup>/h、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>0.15m<sup>3</sup>/h,炉压250~400Pa,降温至850°C出炉风冷,(渗碳设备为RJJ-105-9T)。

(2) 渗碳后的热处理工艺及设备,渗碳后一般在带有水冷却套的冷却井中冷却,把甲醇送入冷却井中保护以避免脱碳。

在小批量生产场合,重新加热淬火设备可采用盐浴炉,典型的淬火加热工艺见表11-15。淬火冷却介质为PZ-2A快速淬火油,淬火硬度高

(>58HRC)且均匀,无淬火软点。采用油浴炉回火,回火温度160~180°C,回火时间3h。

表11-15 活塞销盐浴淬火加热温度和时间

壁厚δ/mm	<3	3~4	4~6	6~8	>8
加热温度/°C	840	840	840	870	870
加热时间/min	0.8δ	0.8δ	0.8δ	0.7δ	0.7δ

在大量生产场合,重新加热淬火设备采用网带式炉或振底式炉。某厂20Cr活塞销振底式炉加热,炉气氛为RX气氛,淬火加热温度为(840±10)°C,保温时间为60min,淬火介质为机械油。回火温度(190±10)°C,回火时间90min。

2. 铬钢活塞销渗碳层的碳化物控制 铬钢活塞销渗碳时如控制不当,易在表层形成粗大碳化物块;当表层含碳量超过共析成分时,渗碳后的冷却速度慢(如炉冷或冷却筒冷却)易析出大块状碳化物和形成网状碳化物。粗大块状碳化物和网状碳化物削弱了渗层与金属基体的联系,易造成应力集中,使渗层变脆,应予严格控制。目前碳势控制基本上已普及,计算机控制渗碳过程技术的应用也日臻完善,缺少碳势控制手段的生产厂为防止出现以上碳化物缺陷,应加速实现碳势控制,并全面优化渗碳工艺(如渗碳、扩散温度、炉气氛和时间控制,渗碳后的冷却控制等),以获得合适的表面含碳量和碳浓度分布、合适的渗层和心部显微组织,为渗碳后的热处理作好准备。

### 3. 内孔渗碳淬硬对活塞销疲劳寿命的影响

内孔渗碳淬硬活塞销比内孔未渗碳淬硬活塞销有较高的疲劳寿命,使用调查表明,双面渗碳不仅提高了活塞销疲劳寿命,还可以大量节约原材料,简化工艺过程,降低生产成本。因此,大量生产活塞销的工厂普遍采用双面渗碳淬硬工艺。只有某些生产批量小,又受到制造工艺限制的活塞销仍采用单面渗碳。

根据光测弹性应力分析的试验结果,在图 11-5 所示的活塞销内孔的 C 点和 D 点或 D' 点之间存在着很大的平面拉应力。内孔表面未经淬硬的活塞销,在内孔 C 点和 D 点或 D' 点之间的某一点上首先产生疲劳损坏。而内孔表面淬硬的活塞销,首先在外表面产生疲劳裂纹。所以,对内孔未渗碳淬硬的活塞销,内孔表面粗糙度很重要,内孔表面粗糙度越低,则疲劳寿命越高。

### 4. 活塞销的稀土低温渗碳直接淬火工艺

稀土低温渗碳直接淬火工艺从 1990 年起在 6 家活塞销生产厂进行了试验和生产应用,渗碳温度  $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$ ,平均渗速  $0.13 \sim 0.16\text{mm/h}$ 。经 2000h 耐久性考核,平均磨损量为  $0.015\text{mm}$ ,最大磨损量为  $0.02\text{mm}$ 。按活塞销的平均磨损量在  $0.1\text{mm}$  时作为报废计算其寿命时,该工艺生产的活塞销的寿命为 12000h。在试验载荷  $(21 \pm 1)\text{kN}$ 、载荷比 0.25 的试验条件下进行失圆应力疲劳寿命对比试验表明,该工艺较常规工艺处理的活塞销的疲劳寿命提高 2.1 倍。

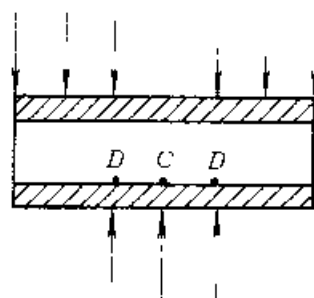


图 11-5 活塞销受力情况示意图

与渗碳后缓冷重新加热淬火工艺相比,该工艺的主要特点有:

(1) 由于稀土的微合金化作用,在渗层中形成弥散分布的碳化物,使其周围基体的碳浓度较低,直接淬火后形成板条状或细针状马氏体,较高碳马氏体有更好的韧性,可能对疲劳寿命有所贡献。

(2) 活塞销内孔表面的脱碳和贫碳都会使其可靠性降低,重新加热淬火很容易引起内孔表面脱碳,而直接淬火工艺可以有效地防止或减轻内孔表面的脱碳现象。

## 11.2.4 活塞销的质量检验

常用钢活塞销的质量检验参见表 11-16。

表 11-16 常用钢活塞销的质量检验

检 验 项 目		检 验 方 法	检 验 要 求
渗碳层深度/mm	JB/NQ54.1	过共析层加共析层加 1/2 过渡层	按产品图样要求
	TB1461	过共析层加共析层加过渡层	按产品图样要求,过共析层加共析层深度应为渗碳层深度的 50%~75%
硬度(HRC)	表 面	不同部位至少测三点,取平均值	按产品图样要求,同一销的工作面硬度差不大于 3HRC
	心 部		
组织	渗碳层	距活塞销两端 20mm 之内横向截取,观察整个截面	细针状马氏体,不允许有粗块状或连续网状碳化物
	心 部		板条状马氏体和铁素体,不允许大块铁素体

(续)

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求
表面质量	观察	无裂纹、锈蚀、麻点、黑斑、刻痕、磨削缺陷、碰撞痕迹、尖角、毛刺、氧化皮
探 伤	磁力探伤	无裂纹,注意退磁
压碎试验	在两平面向压碎或用V形槽	

### 11.2.5 活塞销的常见热处理缺陷及预防补救措施

活塞销的常见热处理缺陷及预防补救措施见表 11-17。

表 11-17 常见热处理缺陷及预防补救措施

缺 陷 名 称	产 生 原 因	预 防 及 补 救 措 施
渗层碳浓度过高,表层有粗块状或连续网状碳化物,淬火后渗层中残留奥氏体级别过高等	1) 渗碳炉气氛碳势过高 2) 强渗后扩散时间不够或扩散温度过低	1) 应控制炉气氛碳势合适 2) 改进扩散工艺,在 900~920°C 扩散以消除过多的碳化物 3) 在 860~880°C 长时间加热后淬火以消除碳化物网 4) 采用深冷处理或二次淬火消除过量的残留奥氏体
渗层碳浓度过低	1) 渗碳时炉气氛碳势过低 2) 炉气氛循环不良 3) 零件装炉量过大	1) 严格控制炉气氛碳势 2) 改进炉气氛循环系统 3) 减少装炉量,保证零件间间隙合适,避免堆放 4) 层深未超上限者允许补渗
渗碳层深度不合格	1) 渗碳温度控制不当 2) 渗碳时间控制不当	1) 健全温度控制管理体系并认真实施 2) 严格控制渗碳时间 3) 渗碳层深度偏浅时允许补渗
渗碳层深度不均匀	1) 零件表面附有脏物或积灰 2) 装炉不当,零件表面相互挤碰	1) 渗碳前应清理 2) 装炉要合理摆放 3) 层深未超上限者允许降低渗碳温度补渗
表面脱碳	1) 渗碳后在空气中冷却时,冷却速度过慢 2) 重新加热淬火时炉气氛碳势过低或盐浴脱氧不良	1) 空冷时避免零件密集堆放 2) 渗碳后在保护气氛中冷却 3) 放在带水套的冷却井中冷却 4) 盐浴及时脱氧 5) 脱碳层深度在磨削余量范围者允许通过,否则报废
材料裂纹	原材料缺陷	报废

## 11.3 连杆的热处理

### 11.3.1 连杆的服役条件和失效方式

连杆由小头、杆身和大头三部分组成。连杆小头与活塞一起作往复运动,大头与曲轴一起作旋转运动,杆身作复杂的平面摆动。连杆在工作中除受交变的拉、压应力外,还承受弯曲应力。

连杆的失效方式主要是疲劳断裂,常发生在

连杆上的三个高应力区,即杆身中间、小头和杆身的过渡区以及大头和杆身的过渡区(螺栓孔附近)。原材料的缺陷,锻造折叠及淬火裂纹的漏检也常常导致连杆的断裂事故。

### 11.3.2 连杆材料

#### 11.3.2.1 连杆常用材料及技术要求

JB 3764—84 规定连杆应采用下列材料:40、50(精选含碳量);40Mn、40Cr、35CrMo、42CrMo。

JB/NQ 64.1 规定连杆应采用 45(精选含碳量(质量分数)为 0.42%~0.47%)或 40Cr、35CrMo 等材料。

由于球墨铸铁和可锻铸铁的切削加工性能优良,在交变载荷作用下的疲劳极限与一般碳钢相近,而制造成本低,有少数机型也使用铸铁连杆。

连杆常用材料及技术要求列于表 11-18。

连杆调质处理后的显微组织应为均匀的细晶粒索氏体,不允许有片状铁素体和非金属夹杂物,脱碳层深度在工字形表面上不得大于 0.10mm。

JB/NQ 64.1 规定连杆经热处理后力学性能为:抗拉强度  $\sigma_b \geq 735\text{MPa}$ ;屈服强度  $\sigma_s \geq 539\text{MPa}$ ;冲击韧度  $\alpha_K \geq 58.8\text{J/cm}^2$ 。

连杆调质后均应进行强化喷丸处理。

### 11.3.2.2 非调质钢

采用铁素体 珠光体型非调质钢制造汽车连

杆、曲轴等零件,由于可取消调质工序、改善切削加工性能,与调质钢相比,具有简化工艺过程、提高材料利用率、改善零件质量、降低能耗和制造成本低等优点,因而可取得良好的经济效益和社会效益。这类钢的化学成分特点是在中碳钢基础上适当提高硅、锰元素含量(含硅量一般在  $w(\text{Si})0.2\%\sim0.5\%$ ,含锰量一般在  $w(\text{Mn})1.5\%$  以下)并添加微量钒、铌、钛等元素,通过相变沉淀析出、晶粒细化以及促进晶内铁素体(IGF)组织形成等途径提高钢的强韧性。此外,为改善钢的切削加工性能,通常加入 0.035%~0.08% 的硫(质量分数)。

我国自“七五”以来,在非调质钢研制及国产化应用上均取得一定成果。表 11-19 和表 11-20 分别列出国内用于制造连杆的几种非调质钢的化学成分和力学性能。

表 11-18 连杆常用材料及技术要求

材 料	技 术 要 求			备 注
	热 处 理	硬 度 (HBS)		
		JB/NQ 64.1	JB 3764	
45	调质	217~293	217~293	JB/NQ 64.1 规定在同连杆上的硬度差应小于等于 40HBS
40Cr	调质	223~280	217~293	
35CrMo	调质	250~320	217~293	
40MnB	调质	229~269		表中硬度范围系某些生产厂的技术规定
55	锻造余热淬火、回火	229~269		
18Cr2Ni4W	调质	321~363		

注:JB/NQ 64.1 内燃机连杆产品质量分等标准。

JB 3764 汽车发动机连杆技术条件。

表 11-19 连杆用非调质钢的化学成分

材 料	化 学 成 分 (质量分数)(%)									
	C	Si	Mn	S	P	V	其 他			
35VS	0.32~0.38	0.17~0.37	0.6~1.0	0.04~0.07	$\leq 0.04$	0.07~0.12	Cr $\leq 0.25$	Ni $\leq 0.25$	Cu $\leq 0.25$	
35MnV(N)	0.32~0.38	0.20~0.50	1.3~1.5	0.02~0.06	$\leq 0.035$	0.07~0.12	Cr $\leq 0.25$	Ni $\leq 0.25$	Cu $\leq 0.25$	(N $\leq 0.0090$ )
35MnVS	0.32~0.38	0.17~0.37	1.1~1.4	0.04~0.08	$\leq 0.04$	0.07~0.12	Cr $\leq 0.25$	Ni $\leq 0.25$	Cu $\leq 0.25$	
40MnV	0.36~0.42	0.20~0.50	1.3~1.5	$\leq 0.04$	$\leq 0.035$	0.07~0.12	Cr $\leq 0.25$	Ni $\leq 0.25$	Cu $\leq 0.25$	
43MnS	0.40~0.46	0.10~0.40	0.95~1.3	0.06~0.09	$\leq 0.025$	—	Al 0.015~0.040	Ti $\leq 0.01$	Cr $\leq 0.25$	Ni $\leq 0.25$
									Mo $\leq 0.05$	Cu $\leq 0.40$



表 11-20 连杆用非调质钢的力学性能

材 料	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$a_K$ J·cm <sup>-2</sup>	HBS
35VS	790~795	520~535	17	33~36	48~54	207~241
35MnV(N)	≥735	≥490	≥15	≥15	≥49	223~262
35MnVS	≥850	≥600	≥18	≥40	≥60	229~269
40MnV	≥720	≥480	≥15	≥40	$A_K \geq 39J$	255~302
43MnS	--	--	--	--	--	217~255

为了保证在大批量连续生产条件下非调质钢零件性能和质量的稳定,不仅要求严格控制钢材化学成分(包括残余元素控制)和冶金质量(如钢的纯净度及晶粒度等),更需严格控制锻坯的加热温度、终锻温度等热加工参数及锻后的控制冷却,以获得要求的珠光体-铁素体组织和性能。

### 11.3.3 连杆的热处理工艺

#### 11.3.3.1 连杆的制造工艺路线

调质钢连杆一般的制造工艺路线为:

锻造→调质→喷丸→硬度及表面检验→矫正→精压→探伤→机加工→成品。

不少工厂采用锻造余热淬火后回火来代替调

质,在回火后趁热矫正代替冷矫正以减少矫正应力。

非调质钢连杆应下锻造后在控制冷却曲线实现控制冷却,以获取稳定的可取代调质的力学性能。

#### 11.3.3.2 连杆的调质工艺

常用碳素钢和合金结构钢连杆的调质工艺见表 11-21。

#### 11.3.3.3 连杆锻造余热淬火、回火工艺

采用锻造余热淬火,不仅可简化工艺、节能,而且还可改善切削加工性能、提高力学性能。40Cr 和 45 钢制造的连杆采用调质和锻造余热淬火、回火工艺处理后的力学性能比较见表 11-22。

表 11-21 常用碳素钢和合金结构钢连杆的调质工艺

用 途	钢 号	淬 火		回 火			硬 度 (HBS)
		加热温度 /°C	冷却方式	加热温度 /°C	保温时间 /min	冷却方式	
轿车、吉普 及小拖拉机	40Cr	860±10	油冷	620±10	60	水冷	241~298
	45	840±10	盐水 12s 后 入油	670±10	30 (盐浴)	空冷	207~241
	45Mn2	840~860	油冷	620~640	162	喷水	228~269
载重车及拖 拉机	45	终锻≥950	60~110°C 热油 35s	610±10	120	空冷	217~289
	45	810~830	盐水 5s 后 空冷 <sup>①</sup>	580~600	120	空冷	228~269
	40MnB	850±10	油冷	650±10	120	空冷	229~269
	55	终锻≥900	油冷	650±10	150	水冷	229~269
重型车	40Cr	850±10	油冷	610±10	210	水冷	223~280
	40CrMoA	860±10	油冷	550±10	180	空冷	
	40SiMn	860±10	油冷	560±10	150	空冷	
大马力柴油 机	42CrMo	870±10	油冷	610~630	240	空冷	298~321
	42CrMo	860±870	油冷	550~580	180	空冷	311~331

① 控制盐水冷却时间的工艺只限于手工操作的小量生产方式。

表 11-22 经不同工艺处理的 40Cr 和 45 钢连杆的力学性能

钢 号	热处理工艺	力 学 性 能				
		$\sigma_s$ (MPa)	$\phi$ (%)	$\delta$ (%)	$a_K$ 纵向/横向 (J·cm <sup>-2</sup> )	硬度 (HBS)
40Cr	1160℃ 锻造余热淬火 → 600℃ 回火	856	65.1	19.5	166/94	252~263
	850℃ 淬火 → 610℃ 回火	799	65.6	20.6	163/59	219~235
45	1180℃ 锻造余热淬火 → 600℃ 回火	914	58.2	19.3	123	246
	850℃ 淬火 → 550℃ 回火	877	57.4	18.2	121	235

$w(C)$  为 0.40%~0.55% 的中碳钢锻件通常采用锻造余热淬火。大批量生产时应注意以下几点:

(1) 锻造加热温度以 1100~1220℃ 为宜,如 45 钢的锻造加热温度可选在 1150~1220℃ 范围内。

(2) 实际生产中,终锻温度即淬火温度,一般为 900~1050℃。操作中应注意控制终锻至入油淬火之间的停留时间,以防析出铁素体。

(3) 应控制淬火油温度及连杆在油中停留时间。

(4) 为了防止淬火后放置时间过长,引起裂纹,应于淬火后及时回火。

对于大批量生产,感应加热是一种既经济又有效的毛坯加热方法。由于控制温度准确,可保证终锻温度稳定,特别适合采用锻造余热淬火工艺。这在工厂设计(新厂设计或老厂技术改造)时,应予以优先考虑。以下介绍应用实例。

某厂生产 488 发动机连杆,采用材料为 40Mn2S,化学成分(质量分数):0.38%C、1.56%Mn、0.074%S、0.018%P、0.33%Si、0.2%Cr。钢材的轧制温度 1180~1210℃,终轧温度 850℃。轧材的规格为  $\phi 40\text{mm}$  及  $\phi 35\text{mm}$  两种,分别用于试制连杆体和连杆盖。锻造生产工艺为:下料→感应加热→辊锻制坯→液压模锻成形→切边→余热淬火→回火→强力喷丸→探伤→精压→硬度检查→重量检查。辊锻温度为 1250~1280℃,淬火温度为 900~950℃,回火温度为 600~610℃。锻件的显微组织为回火索氏体加少量游离铁素体,组织级别为 1 级。热处理后锻件表面脱碳层深为 0.05~0.08mm。金属低倍组织流线外形相符。连杆硬度为 229~255HBS,硬度差为 26HBS。连杆锻件的整体拉伸断裂负荷为 131.0kN。连杆锻

件表面经喷丸强化处理后,表面残余压应力在 240~300MPa 之间。连杆锻件切削性能良好,重量公差合格。试制连杆的拉压疲劳强度极限  $\sigma_{-1}$  为 286.2MPa,连杆杆身的安全系数为 1.87~2.23。发动机台架试验和行车道路试验未发现异常。

某厂生产柴油发动机连杆,采用材料为 40MnB。坯料规格是 55 方钢。锻造加热采用中频感应加热,加热温度为 1200~1250℃,淬火温度约 900℃,回火温度为 620~630℃。淬火介质为淬火油,油温为 40~80℃,油中停留时间不少于 10min。硬度为:淬火后 414~578HBW,回火后 255~302HBS。力学性能为: $\sigma_s=816\text{MPa}$ , $\sigma_b=952\text{MPa}$ , $\delta=18\%$ , $\phi=57.5\%$ 。

### 11.3.3.4 聚合物淬火介质的应用

近年来聚合物淬火介质的应用发展较快,这类介质通过改变浓度、温度和搅拌,可得到水和油之间较大范围的冷速,满足不同的应用。此外,它对改善生产环境(安全、减少污染和排放等)以及节约燃料资源也具有重要意义。在这类介质中,PAG(聚烷撑乙二醇)淬火液应用较广泛,其国产产品有较好的技术特性,并取得生产应用实效。

应用聚合物淬火介质时,应根据介质特性,对淬火冷却装备系统进行必要的技术改造,使冷却工艺参数在受控状态,以保证获得稳定的淬火能力。

某厂生产 42CrMo 连杆及曲轴锻件,调质设备为推杆式连续热处理炉生产线。为解决“水淬开裂,油淬不硬”问题,选择北京华立精细化工公司生产的今禹 8-20PAG 淬火介质。设计了一套与该淬火介质相配套的冷却循环装置,保证淬火液温度严格控制在最佳使用温度 30~60℃,并通过试验优选出较适宜的今禹 8-20 浓度(质量分数):用于连杆为 12%;用于曲轴为 8%~9%。经生产考核表明,两种

零件淬火效果好,产品合格率高。该厂使用今禹8—20 淬火介质已有三年多时间,未发生淬火介质变质,冷却特性变差等质量问题,且使用浓度低,粘度小,淬火时带出量少,消耗费用仅为油淬的50%~60%,可大大减少生产费用及不良品的损失费用

### 11.3.3.5 非调质钢连杆控制冷却工艺

非调质钢应用初期在强韧性配合上表现为韧性稍差、切削加工性能不够稳定等问题,这除与钢材及锻造工艺有关外,更重要的是锻后冷却控制粗放,无法保证稳定得到合适的显微组织和力学性能。

北京机电研究所根据汽车工业规模化生产对连杆性能稳定性的要求,开发研制出非调质钢连杆控制冷却生产线,可用于汽车连杆控制冷却,实现冷速在20~120℃/min范围按设计曲线自动控制。

非调质钢依靠控制锻后冷速来获得合适的组织。非调质钢的组织是铁素体加珠光体,并在铁素体基体上分布着碳化物等沉淀析出相。在750~550℃温度范围内的冷速决定着铁素体与珠光体的相对量。冷速快对铁素体析出有抑制作用,珠光体量多且细化,还可抑制沉淀相的粗化,使其强度高而塑性低。慢冷使铁素体得以充分析出,同时珠光体会相对粗化,使韧性提高而强度下降。因而控制冷速可获得较好强韧性的综合性能。例如,经试验表明:35VS钢锻造加热温度应选在1050~1220℃,锻后冷速应为60~100℃/min。

某厂生产轿车连杆,材料43MnS,锻造加热温度1150~1250℃,终锻温度为900~1100℃。连杆锻后控制冷却在通过式的辊链炉中进行,入炉温度不得低于800℃。设备分三区控温,一、二区具有加热与冷却功能,三区只冷却,温度控制在250~550℃,连杆在炉中运行时间为12~15min,出炉时连杆小头温度应低于400℃,出炉后空冷。控制冷却设备生产率为480~720件/h。经以上“控锻控冷”处理后的连杆锻件硬度为217~255HBS,组织为片状珠光体加网状铁素体(不允

许有贝氏体、马氏体),晶粒度为:小头、大头部分从表面到心部为6~7级到4级;杆身部分为7~6级。

### 11.3.3.6 连杆的强化喷丸

连杆锻件应进行强化喷丸,可以使材料表层产生剧烈的塑性变形,晶体点阵发生畸变,形成高密度的位错缠结,从而使表层强化。50钢光滑试样经强化喷丸后表面硬度由270HV<sub>1</sub>提高到350HV<sub>1</sub>。表11-23列出了50钢试样强化喷丸后残留应力及强化层深。

表 11-23 50 钢试样强化喷丸后  
残留应力和强化层深

喷丸强度 <sup>①</sup> (弧高/mm)	表面残余压应力 /MPa	强化层深 /mm
0.18C	-490	0.4
0.20C	-600	0.5

① 以弧高(单位mm)表示喷丸强度,数字后字母表示试样标准,如0.18C表示采用C型标准试样测量弧高为0.18mm。

45钢连杆调质处理后,其硬度为228~269HBS,未强化喷丸者表面应力仅为-50MPa,甚至有的表面处于拉应力状态。而18Cr2Ni4W连杆热处理后距表面深度0.3~0.4mm处还有291~392.3MPa拉应力,当喷丸强度为0.18C时,15钢连杆表面残余压应力提高到-350MPa。用±374MPa交变应力在高频疲劳试验机上试验时,连杆疲劳寿命由未喷丸时的48万次提高到190万次。230和150型发动机的18Cr2Ni4W钢连杆在热处理后需经抛光处理,劳动强度大,生产效率低,产品质量差。改用强化喷丸后,提高了劳动生产效率15倍,还明显提高了弯曲、拉压疲劳强度。表11-24列出几种连杆强化喷丸的工艺参数。

### 11.3.4 连杆的质量检验

常用碳钢和合金结构钢连杆的质量检验见表11-25。

表 11-24 几种连杆强化喷丸的工艺参数

材 料	钢丸直径 /mm	喷丸速度 /m·s <sup>-1</sup>	钢丸流量 /kg·min <sup>-1</sup>	喷丸强度,弧高 /mm	喷丸时间 /min	覆盖率 (%)
18Cr2Ni4W	0.8~1.2	70~80	—	—	4	—
18Cr2Ni4W	1.0~1.2	75~82	300	0.38~0.44	3~4	—
45	1.0~1.2	70	140~160	0.18C	1.5	≥98
42CrMoA	0.8~1.0	70~80	200	0.46~0.76A	1~1.2	≥98

表 11-25 40、40Cr、40MnB 钢连杆的质量检验

检验项目	检 验 方 法	检 验 要 求
表面质量	观察	无裂纹、发纹、折叠、过烧、氧化坑、错移、金属未充满
纤维方向	显示宏观组织	金属纤维方向应沿着连杆中心线并与外形相符,无紊乱及间断
硬 度	按图 11-6 所示位置检查	按产品图样要求
显微组织	按图 11-6 所示部位取样抽检,参考图 11-7 评级	匀细的索氏体。可参考图 11-7 评级,1~4 级为合格,5~6 级须经喷丸强化后方可装车,7~8 级需重新调质
探 伤	磁性探伤	有裂纹者报废

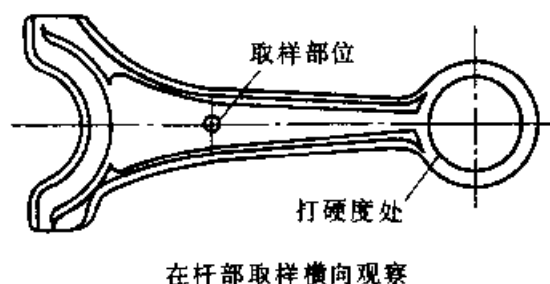


图 11-6 连杆硬度及显微组织检测部位

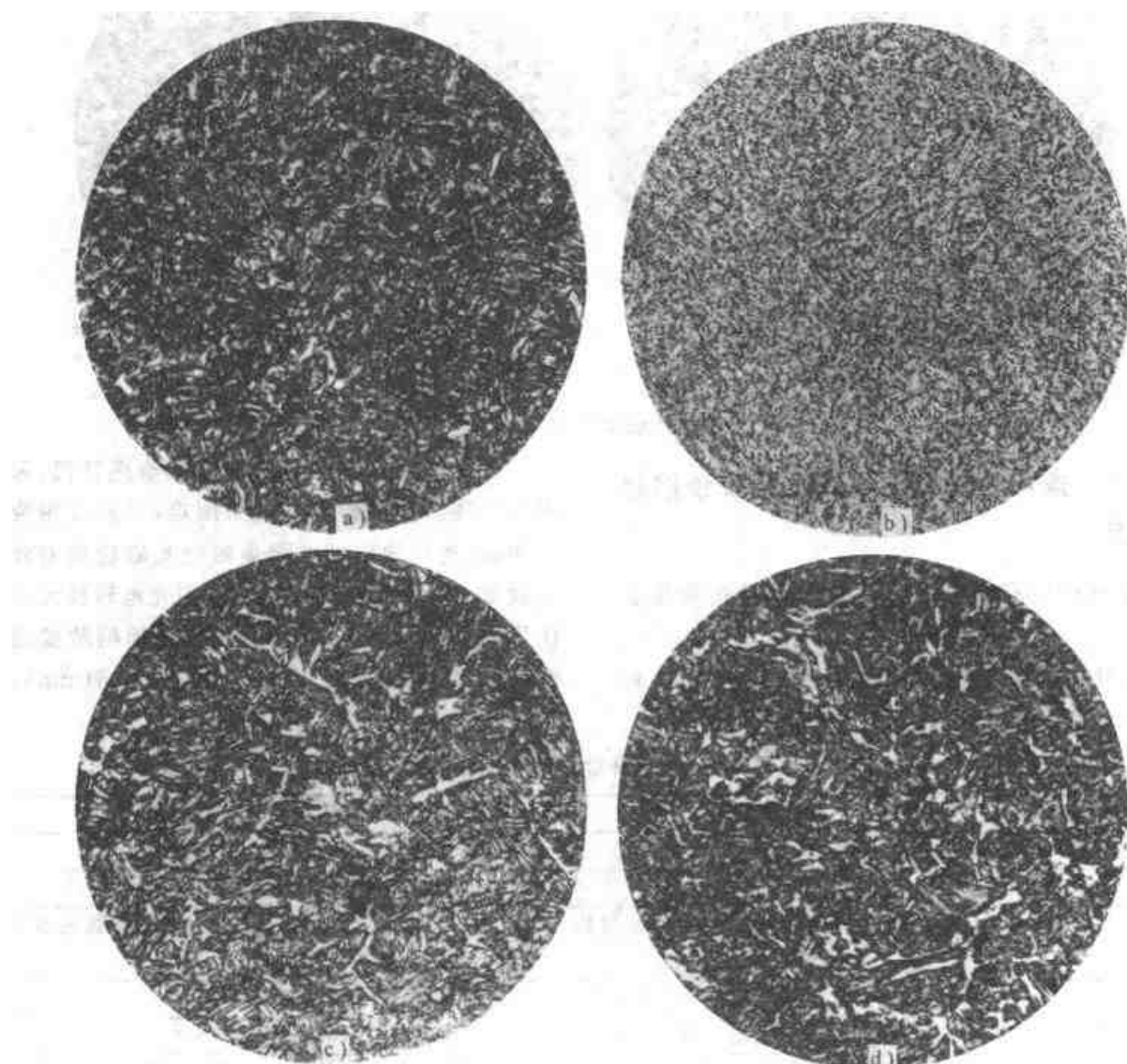


图 11-7 汽车连杆及连杆盖显微组织标准(一汽厂标 BR8—74) 400×

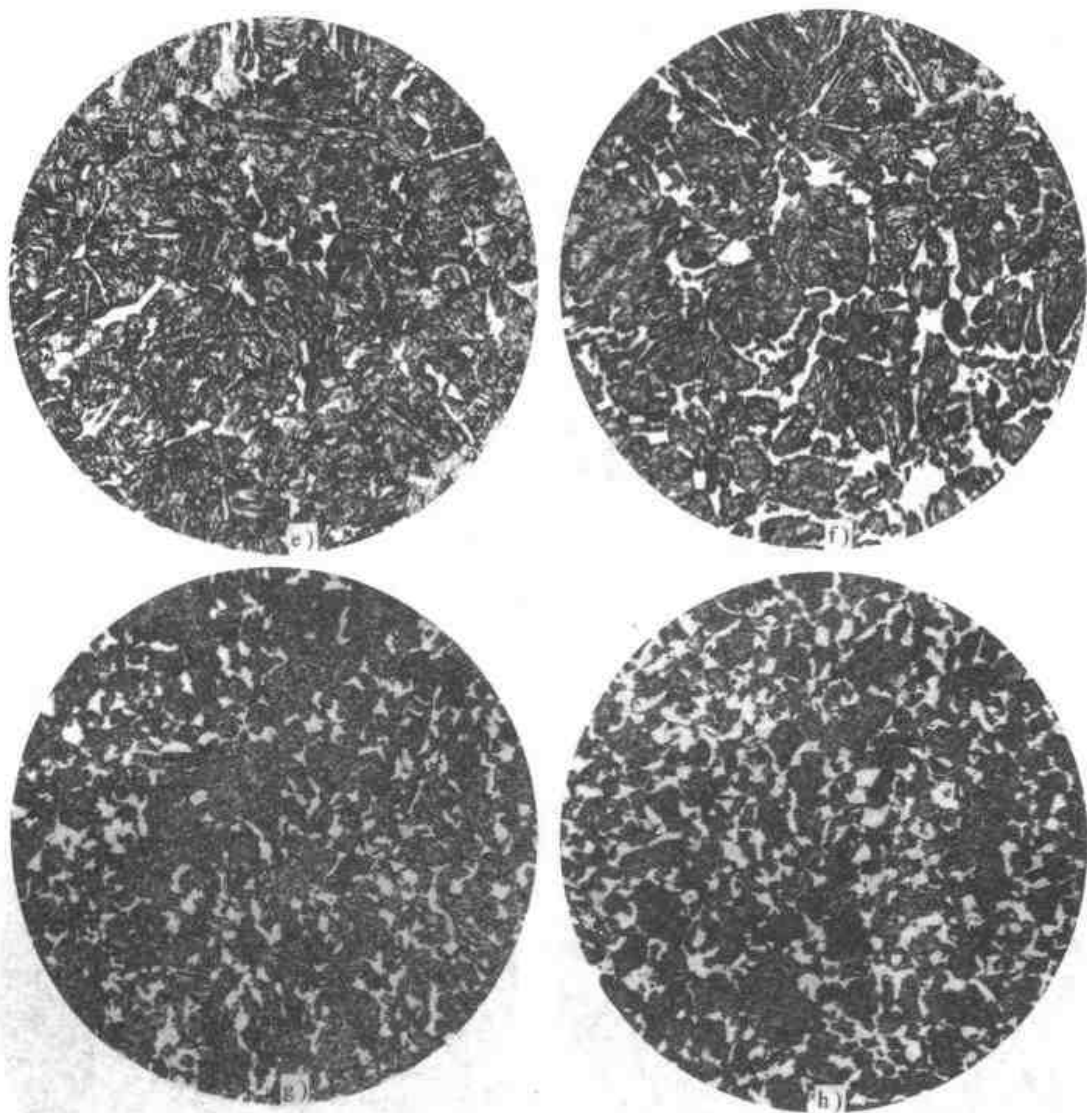


图 11-7 汽车连杆及连杆盖显微组织标准(一汽厂标 BR8—74) 400×(续)

11.3.5 连杆的常见热处理缺陷及预防补救措施

连杆热处理常见缺陷及预防补救措施见表 11-26。

连杆生产中,均需 100% 检查硬度和裂纹,也可采用剩余磁场检测装置进行硬度自动分选。

连杆酸洗处理多数已被喷丸清理替代,采用喷丸清理后给磁粉探伤带来困难,只能改用荧光探伤,使连杆缺陷部位聚集的荧光磁粉在紫外灯下激发出黄绿光。国外已有利用光电转换元件取代目测的自动分选装置,这种自动检测装置的检测灵敏度(缺陷尺寸×深度)为  $4 \times 0.5(\text{mm})$ ,检测速度为 50 件/h。

表 11-26 连杆热处理常见缺陷及预防补救措施

缺陷名称	形成原因	预防及补救措施
大块夹杂物(见图 11-8)	冶炼不良	加强原材料进厂检验
折叠(见图 11-9)	锻造不良	加强锻件表面质量检验
脱碳	1) 高温下锻造加热时间过长 2) 热处理操作不当	控制加热时间或通保护气氛,防止连杆在锻造、热处理过程中脱碳
硬度低	加热温度低或淬火冷却速度慢	重新淬火
淬火裂纹	淬火冷却过快,材料成分不对	注意材料成分和选择冷却条件
组织不均匀	淬火操作不当,冷却速度慢	严格执行淬火工艺,加强抽检,以便及时发现



图 11-8 40 钢连杆显微组织中的块状夹杂物 100×

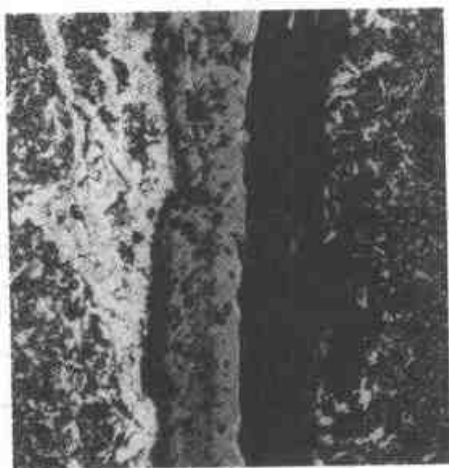


图 11-9 40 钢连杆锻造折叠的显微图片(裂纹附近严重氧化脱碳)

## 11.4 曲轴的热处理

### 11.4.1 曲轴的服役条件和失效方式

曲轴主要承受交变的弯曲—扭转载荷和一定的冲击载荷,轴颈表面还受到磨损。

曲轴在使用过程中的主要失效方式有如下两种:

(1) 疲劳断裂。多数是轴颈与曲柄过渡的圆角处产生疲劳裂纹,随后向曲柄深处发展造成曲轴断裂。其次是轴颈中部的油道内壁产生裂纹,发展为曲柄处的断裂。

(2) 轴颈表面的严重磨损。

### 11.4.2 曲轴材料

制造曲轴的材料有钢和球墨铸铁,钢又可

分碳素结构钢(如 45、50 钢)、合金结构钢(如 40Cr、50Mn、35CrMo、42CrMo、35CrNiMo、18Cr2Ni4WA)以及非调质钢(如 45V、48MnV、49MnVS3)。最常用的材料是 45 钢和球墨铸铁,非调质钢的应用发展很快,而球墨铸铁在轿车上用得较广,并正向载重车上扩展。曲轴材料的选择,首先要满足零件力学性能的要求,它取决于发动机设计的强度水平;其次要考虑曲轴的疲劳强度和耐磨性。曲轴的性能除与材料有关外,还取决于热处理及其他表面强化工艺,零件的加工精度和表面粗糙度也有十分重要的影响;对负荷较大的曲轴通常采用合金结构钢,锻坯要求调质处理,目的是提高强度并为以后的感应淬火作准备。如能达到节能、改善切削加工性能、提高零件质量的效果。而采用非调质钢,则可获得更显著的效果。

根据 JB/T 6727,锻钢曲轴对材料的要求如下:

(1) 钢的含碳量要精选,含碳量的变动范围应不大于 0.05%(质量分数)。钢的含硫、磷量应不大于 0.025%(质量分数)。

(2) 钢的非金属夹杂物、脆性夹杂物、塑性夹杂物的含量标准,应不超过 GB10561 规定的 2.5 级。

(3) 钢的淬透性应按 GB255 进行测定,其淬透性曲线,应在所用钢号的淬透性曲线范围内。

球墨铸铁曲轴应按 GB1348 中的规定,采用不低于牌号为 QT700—2 的球墨铸铁制造。内燃机标定转速低于 1500r/min 的球墨铸铁曲轴可以采用不低于牌号 QT600—3 的球墨铸铁制造。

汽车发动机曲轴常采用力学性能不低于 QT600—3 的球墨铸铁制造。农业用发动机曲轴规定球墨铸铁的力学性能有不低于 QT800—2 的。

### 11.4.3 曲轴的热处理工艺

#### 11.4.3.1 曲轴的制造工艺路线

锻钢曲轴和球墨铸铁曲轴的制造工艺路线分别是:

锻钢曲轴:锻坯调质(或正火)→矫直→清理→检验→粗加工→去应力退火→精加工→表面热处理→矫直→磨削加工→检验。

球墨铸铁曲轴:铸造→正火(或正火加高温回

火)→矫直→清理→加工→去应力退火→表面热处理→矫直→精加工。

球墨铸铁曲轴亦有采用加合金元素铸态不经预备热处理的,其制造工艺路线为:

铸造→清理→加工→表面热处理→精加工。

曲轴预备热处理的目的是达到必要的力学性能、改善切削加工性能,并为最终热处理作组织准备。最终热处理的目的是提高疲劳强度和轴颈耐磨性,达到产品设计要求。

JB/T 6727 对气缸直径 $\leq 200\text{mm}$ 的往复式内燃机曲轴规定热处理技术要求见表 11-27。

曲轴用非调质钢的化学成分和力学性能列于表 11-28。

某厂曲轴用非调质钢 49MnVS3,对残余元素及元素分析允许偏差规定为:残余元素  $w(\text{Cr}) \leq 0.30\%$ 、 $w(\text{Mo}) \leq 0.08\%$ 、 $w(\text{Ni})$

$\leq 0.040\%$ 、 $w(\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Mo}) \leq 0.60\%$ ,元素分析允许偏差(质量分数)(%) $\text{C} \pm 0.03$ 、 $\text{Si} \pm 0.03$ 、 $\text{P} \pm 0.006$ 、 $\text{S} \pm 0.003$ 、 $\text{Mn} \pm 0.04$ 、 $\text{V} \pm 0.03$ 。按 JK 图片评定非金属夹杂物的最高允许含量为: A3、B2、C1、D1。曲轴锻造工艺为:中频感应加热,加热温度为  $(1230 \pm 25)^\circ\text{C}$ ,终锻温度为  $(1125 \pm 20)^\circ\text{C}$ 。锻件的控制冷却在长约 80m 的隧道式冷却装置中进行。曲轴悬挂吊装,由传动链传送。控制冷却装置由 A 段、B 段、C 段组成。A 段长 35m,经过 20min,使曲轴锻件从  $920^\circ\text{C}$  控制冷却到  $600^\circ\text{C}$ 。B 段长 29m,主要是对锻件进行消除应力冷却,使锻件温度降至  $200^\circ\text{C}$ 。C 段长 10m,使锻件强制冷却至能用手摸为止。锻件经过控制冷却装置的总时间约 35min。

各种发动机曲轴所用材料及热处理工艺见表 11-29。

表 11-27 气缸直径小于或等于 200mm 的往复式内燃机曲轴热处理技术要求

项 目			锻 钢	球 墨 铸 铁	
预 备 热 处 理	毛坯硬度 (HBS)	调 质	287~302		
		正 火	163~211	240~300	
	同一曲轴硬度差(HBS)		≤50	≤50	
	显微组织 (体积分数)	调 质	索氏体,1~4 级		
		正 火	晶粒度 11~10 级 晶粒不均匀度级差≤3 级 不允许有魏氏组织 带状组织不大于 1 级	石墨球化级别 1~3 级 石墨球径大小 5~8 级 珠光体含量≥珠 85 级,须经表面处理的曲轴珠光体含量≥珠 75 级 游离渗碳体≤2%,磷共晶≤1.5%,总量≤3%	
最 终 热 处 理	轴颈表面感应加热 淬火 渗氮 处理	淬硬层深度 DS/mm		2.0~4.5	1.5~4.5
		硬 度 (HRC)	45 钢	53~63	42~55
			合金钢	≥53	
		同一曲轴硬度差(HRC)		≤6	≤6
	显微组织		细针状马氏体,3~7 级	3~6 级	
	氮碳共渗	渗层深度/mm		≥0.10	
		表面硬度 HV 0.10		≥420	
		离子渗氮	渗层深度/mm		≥0.15
表面硬度 HV 0.10			≥500		

表 11-28 曲轴用非调质钢的化学成分和力学性能

材 料	化学成分(质量分数)(%)						力 学 性 能					
	C	Si	Mn	S	P	V	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_{-1}$ MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	A <sub>K</sub> I	HBS
45V	0.42~0.48	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.035	≤0.015	0.05~0.12	≥686	≥441	≥17	≥40	≥10	-
48MnV	0.45~0.51	0.17~0.37	0.95~1.20	≤0.035	≤0.035	0.05~0.10	≥689	≥407	≥13	≥26	-	207~215
49MnVS3	0.44~0.54	0.15~0.60	0.60~1.00	≤0.045~0.065	≤0.035	0.08~0.13	780~900	≥450	-	-	-	258~271

表 11-29 各种曲轴所用材料及热处理工艺

用 途	材 料	预备热处理		最终热处理		
		工 艺	硬度 (HBS)	工 艺	层深 mm	硬度 (HRC)
轿车、轻型车、拖拉机	45	正火	170~228	感应淬火, 回火	2~3.5	50~55
	50Mn	调质	217~277	氮碳共渗, 570℃, 18h 油冷	≥0.5	≥500HV
	QT600-3	正火	229~302	氮碳共渗, 560℃, 18h 油冷	≥0.1	≥650HV
载重车及拖拉机	QT600-3	正火	220~260	感应淬火, 自回火	2.0~4.5	45~58
	45	正火	153~195	感应淬火, 自回火	3~4.5	50~53
	45	调质	267~271	感应淬火, 自回火	≥3	≥55
	45	正火	—	氮碳共渗	0.9~1.2	≥500HV
重型载重车	QT900-2	正火+回火	280~321	—	—	—
	35CrMo	调质	216~269	感应淬火, 回火	3~5	53~58
大功率柴油机	QT600-3	正火+回火	240~300	—	—	—
	35CrNi3Mo	调质	—	渗氮, 190℃, 60h	≥0.3	≥600HV
	35CrMo	调质	—	离子渗氮, 515℃, 10h	≥0.5	≥700HV
	QT600-3	正火+回火	—	渗氮, 510℃, 120h	≥0.7	≥800HV

11.4.3.2 曲轴的感应加热表面淬火

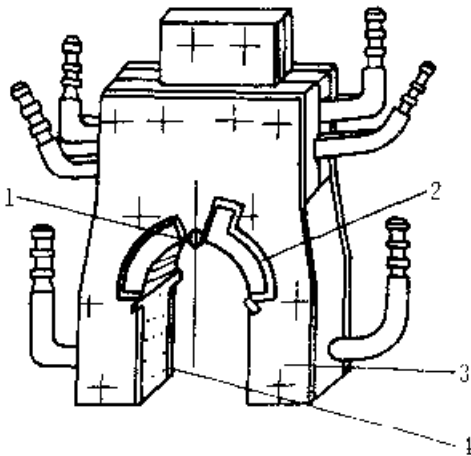


图 11-10 半圈淬火感应器示意图  
1—定位块 2—有效圈 3—外侧板  
4—淬火冷却装置

曲轴在大量生产中, 广泛采用感应加热表面淬火。淬火方法通常有: 采用整圈分开式感应器, 曲轴在静止状态下的感应淬火方法和采用半圈淬火感应器, 曲轴在旋转状态下的感应淬火方法。

曲轴半圈淬火感应器由有效圈、外侧板、定位块、淬火冷却装置等四个主要部分组成。图 11-10 是半圈淬火感应器的示意图。电流通过有效圈将电能转变为热能, 它是由异形紫铜管焊接成一个串联的“8”字形回路的半圆形施感导体。图 11-11 是有效圈的示意图。

6100 发动机曲轴有效圈尺寸见表 11-30。

曲轴是一个形状复杂的零件, 采用整圈分开式感应器使曲轴在静止状态下感应淬火时, 感应器所产生的纵向(轴向)磁场, 由于曲柄对磁场的



屏蔽,使被加热的曲轴轴颈圆周及轴向各部位产生极大的差异,导致淬火后轴颈圆周各处的轴向硬化区差异极大;静止状态下感应加热,感应器与轴颈的位置相对固定,感应器与轴颈圆周各处的径向间隙无法保持一致,导致淬火后轴颈圆周硬化层深度不均。因此,此种淬火方法已越来越少被采用。

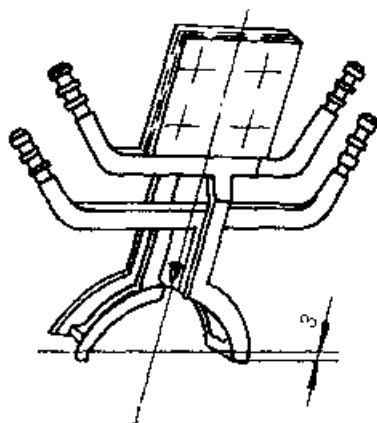


图 11-11 有效圈示意图

表 11-30 6100 发动机曲轴轴颈  
和有效圈尺寸

轴颈名称	轴颈尺寸/mm		有效圈尺寸/mm	
	直径	宽度	有效圈形状	直径/宽度
连杆轴颈	64	37.46~37.66	大于半圈 3mm	69/34
小主轴颈	76	35.75~35.90		81/32
大主轴颈	76	43.61~43.71		81/40

采用半圈淬火感应器曲轴旋转感应加热方法,不仅因为改变了感应器产生的磁场方向,由纵向变为横向(周向),基本消除了曲柄对磁场的屏蔽,从而淬火后轴颈各处的硬化区保持均匀,而且由于曲轴相对感应器作旋转,感应器靠定位块对轴颈作相对的柔性跟踪旋转运动,感应器借助于

定位块,能稳定地保持感应器与轴颈的间隙,保证了淬火后轴颈硬化层深度的均匀性和稳定性。因此,曲轴半圈感应器旋转加热淬火正越来越被广泛运用。

采用半圈感应器旋转加热淬火的优点是硬化层深而均匀、硬化区宽度均匀、能减轻曲轴淬火畸变量和防止油孔淬裂。表 11-31 列出 6100 发动机曲轴的感应加热电参数和淬火工艺参数。

曲轴轴颈采用半圈感应淬火后,虽然大幅度提高了轴颈耐磨性,但由于轴颈与曲柄连接的圆角  $R$  处未淬火,连接处产生较大的拉应力,使曲轴的疲劳强度有所降低,为了适应大功率的汽车、拖拉机、柴油机的需要,采用轴颈、圆角同时感应淬火的方法是十分有效的。

轴颈、圆角同时淬火的淬火感应器,是在轴颈半圈淬火感应器的基础上改变有效圈弧形段截面的角度,并增添弧段的导磁体,使圆角  $R$  和轴颈同时在较强的感应电流下被加热淬火。

曲轴经轴颈、圆角同时感应淬火后,不仅可以消除轴颈与圆角交接处的拉应力,而且使圆角处产生较大的压应力,因而大大提高了曲轴的疲劳强度。锻钢曲轴经轴颈、圆角同时淬火后疲劳强度可提高一倍以上。而对球墨铸铁曲轴,淬火后疲劳强度仅提高 30% 左右,所以球墨铸铁曲轴为较大幅度提高疲劳强度往往采用圆角滚压或圆角滚压加渗氮工艺。

495 发动机曲轴轴颈、圆角同时感应加热的电参数和淬火工艺参数见表 11-32,感应淬火结果见图 11-12。

曲轴轴颈、圆角同时感应淬火时,除应保证圆角的硬化层深度达到产品图样的规定外,还应控制硬化层的形状和分布,使硬化层在整个圆角处完整延续并圆滑过渡。

表 11-31 6100 发动机铸态球墨铸铁曲轴的感应加热电参数和淬火工艺参数

淬火轴颈	变压器 匝比	电 参 数				工 艺 参 数				硬化层深度 /mm
		电压 /V	电流 /A	功率 /kW	功率因数 ( $\cos\phi$ )	加热时间 /s	提前冷却时 间/s	冷却时间 /s	水压 /MPa	
连杆轴颈	13/2	720	155	100	0.93	10.2	0.5	3.7	0.10	2.5~4.5
小主轴颈	14/2	620	190	88	0.96	9.8	0.5	4.8	0.20~0.30	2.25~4.25
大主轴颈	13/2	620	165	95	0.85	10.4	0	4.8	0.35	2.25~4.25

注:曲轴材料:QT600-3(含铜);原始组织:铸态,珠光体含量 $\geq 75\%$ (体积分数),220~260HBS;电源设备:BP5D160/8000;感应器与零件之间间隙:2mm。

表 11 32 495 发动机曲轴轴颈、圆角同时感应加热的电参数和淬火工艺参数

淬火轴颈	变压器 匝比	电 参 数					工 艺 参 数			
		电压 V	电流 A	功率 kW	功率因数 (cosφ)	加热时间 s	加热温度 ℃	冷却介质	冷却时间 s	终冷温度 ℃
主轴颈	8:1	650	160~180	100~120	0.97	13	880~930	风-雾-风	2-4-4	300~380
连杆轴颈	8:1	650	110~160	90~110	0.97	10	880~930	风-雾-风	2-3-4	300~380

注：材料：QT600-3（含铜）；原始组织：正火加高温回火，珠光体含量 $\geq 8\%$ （体积分数），210~320HBS；技术要求：50~55HRC，层深3~4mm；电源设备：BPS 102，8000V2；感应器与曲轴之间间隙：轴向 $a_1=1\text{mm}$ ，径向 $a_2=2\text{mm}$ ，径向中间 $a_3=2\text{mm}$ 。

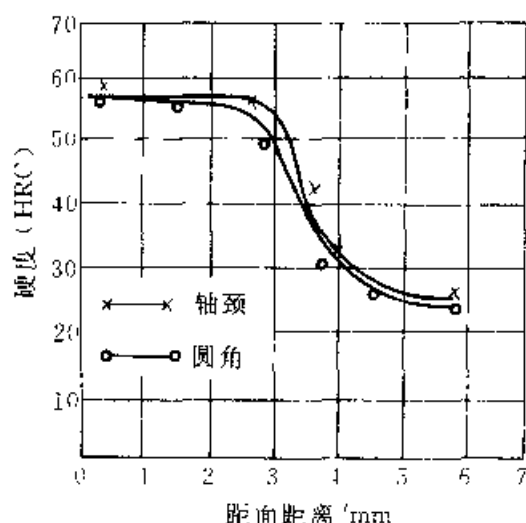


图 11 12 495 曲轴硬化层硬度分布

此外，圆角磨削加工后的表面粗糙度对曲轴的疲劳寿命有直接影响，应引起足够的重视。若在圆角处出现台阶、烧伤，此处即为疲劳裂纹的起源，将造成曲轴的早期损坏。

曲轴轴颈、圆角同时感应淬火将会增加畸变。根据曲轴形状、尺寸特征，选择合理的淬火次序；根据曲轴材料的淬火冷却特性，确定合适的延迟淬火冷却工艺等，均可减少曲轴的淬火畸变。

为保证曲轴工作中的尺寸精度，应于感应淬火后的低温回火过程中，采用专用夹具进行静态逆向矫直，利用相变塑性达到无应力矫直的效果。

PAG 淬火介质在大型曲轴感应淬火中的应用亦引人注目。某厂 16V240 和 12V180 柴油机曲轴，材料分别为 42CrMoA 和 50CrMoA，调质后感应加热、喷淋淬火，淬火介质为（质量分数）11.5% 的 AQ251，与油淬相比，可获得更高、更均匀的表面硬度和较深的淬硬层深度，减少淬火裂纹和磨削裂纹；且容易获得稳定的淬火质量，取得明显的经济效益。

曲轴感应淬火后多采用自然回火处理。对尺寸精度要求较高的曲轴，应采用热风循环的低温回火炉进行回火，如 40Cr 钢曲轴采用  $(160 \pm 20)^\circ\text{C}$  回火 2h，充分回火可将硬度控制在较窄的范围，如 55~60HRC，可以减少磨削裂纹，还能在长期使用过程中保证尺寸稳定。

#### 11.4.3.3 曲轴的渗氮和铁素体氮碳共渗

大功率柴油机（如机车和船舶用的柴油机）曲轴通常采用离子渗氮或气体渗氮处理。其渗层较深，工艺周期很长，往往选用大型、专用设备。曲轴渗氮后，具有很高的表面硬度、极好的耐磨性、疲劳强度，耐腐蚀性能也很好。但由于工艺费用十分昂贵，目前只在少数性能要求较高的大型曲轴上应用。表 11-29 中列出了一些应用实例。

汽车、拖拉机曲轴往往采用铁素体氮碳共渗处理。其渗层虽然很薄，但具有摩擦系数低，提高抗咬合抗擦伤能力、提高疲劳强度与耐磨性等优异性能，这种工艺还具有处理温度较低、时间短、热处理畸变小、节能效果显著、工艺费用较低等优点，因而得到广泛采用。

盐浴氮碳共渗工艺对环境的污染不容忽视，所以不宜大规模推广。目前国内曲轴较多采用的是含氧气氛的气体氮碳共渗。图 11 13 是 495 柴油机曲轴在连续式推盘炉生产线上进行气体氮碳共渗处理的工艺。

锻钢曲轴或球墨铸铁曲轴，由于加工过程和热处理过程所产生的应力，在表面热处理后均产生畸变，而矫直又会显著降低曲轴的疲劳强度。特别是氮碳共渗处理的曲轴，其硬化层薄，几乎没有加工磨量，所以更须严格控制畸变。毛坯热处理后可以采用热矫正，冷态矫正及粗加工后均应进行去应力退火。去应力退火温度一般应高于氮碳共渗温度，通常采用  $600^\circ\text{C}$ ，2h。在粗加工后的去应

力退火,一般要通入氮气保护以防止曲轴氧化。如果氮碳共渗后的曲轴还要矫正,矫正后应在氮碳共渗温度和气氛的条件下进行去应力退火,随后要进行磁粉探伤和退磁处理。

#### 11.4.3.4 球墨铸铁曲轴热处理

铸铁成分、铸造和热处理质量对球墨铸铁曲轴的性能影响很大。铸态球墨铸铁不允许有石墨飘浮、皮下气孔和疏松等缺陷。球化分级按GB9441《球墨铸铁金相检验》评定,一般应不低于4级。热处理工艺参数的影响和要求可参见第1卷有关球墨铸铁热处理部分。

典型的球墨铸铁曲轴的成分、预备热处理工

艺及其组织与性能见表11-33和表11-34。

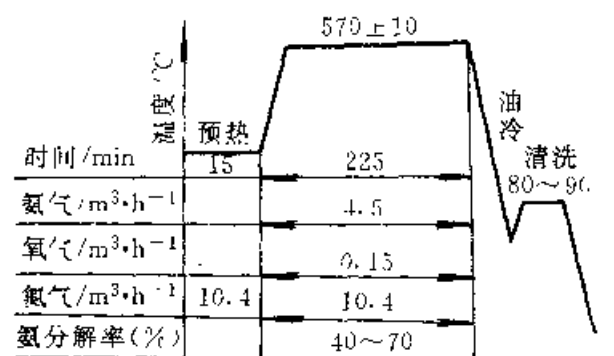


图 11-13 195 柴油机曲轴气体氮碳共渗工艺

材料:QT600-3,毛坯正火 229~302HBS

层深:0.10~0.16mm

表 11-33 球墨铸铁曲轴的化学成分

序号	化学成分(质量分数)(%)								牌号
	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	其他	
1	3.80~4.05	2.0~2.3	0.6~0.8	<0.1	<0.03	0.025~0.045	0.02~0.035	—	QT600-3
2	3.7~3.9	2.0~2.3	0.5~0.8	≤0.1	≤0.025	0.03~0.045	0.025~0.04	—	QT600-3
3	3.0~3.5	2.4~2.8	0.3~0.5	<0.1	0.03~0.035	0.015~0.05	0.04~0.05	Cu 0.35~0.40	QT600-3
4	3.6~3.8	2.1~2.4	0.3~0.5	≤0.075	≤0.03	0.045~0.07	0.03~0.05	Mo 0.25~0.35	
								Cu 0.5~0.7	
5	3.5~3.7	2.4~2.6	0.7~0.9	0.06~0.08	0.012~0.018	0.04~0.06	0.03~0.05	—	QT600-3
6	3.7~4.2	2.4~2.6	0.5~0.8	<0.1	≤0.02	>0.04		—	
7	3.0~3.5	2.2~3.0	0.5~0.8	<0.1	≤0.03	0.02~0.05	0.03~0.06	—	
8	3.5~3.8	1.8~2.2	0.5~0.8	≤0.1	≤0.03	0.045~0.06	0.035~0.05	—	QT600-3

表 11-34 球墨铸铁曲轴的力学性能和预备热处理工艺

序号	力学性能					显微组织(体积分数)				热处理工艺
	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	$a_k$ /J·cm⁻²	$\sigma_s$ /MPa	硬度 (HBS)	球化 分级	Fe <sub>3</sub> C 量	珠光 体量	其他	
1	760~930	2~4	20~10	693	255~285	≥4级	<3%	≥85%		
2	700~800	2~3	5~20	650~730	240~300	≥4级	≤5% -磷共晶	≥70%	不允许二次碳化物网存在	

(续)

序号	力学性能				显微组织(体积分数)				热处理工艺
	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	$a_k$ ·J·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_s$ /MPa	硬度 (HBS)	球化 分级	Fe <sub>3</sub> C 量	珠光 体量	
3	800~900	2~4	20~50	—	250~330	≥4级	≤5% +磷共晶	80~95%	—
4	≥900	≥2	≥20	—	280~341	≥4级	≤2%	≥70%	不允许存在磷共晶
5	≥600	2	15	—	240~280	—	—	75~90%	—
6	780~930	2.7~5	25~40	—	228~320	—	≤2%	≥85%	—
7	700~900	3	>25	—	229~285	≥4级	≤3% +磷共晶	75~80%	—
8	600	2	15	—	240~280	≥4级	≤2%	≥80%	—

注：本表中序号与表 11-33 相对应，其材料牌号和化学成分见表 11-33。

球墨铸铁曲轴主要采用正火处理(见表 11-29)。为提高球墨铸铁曲轴的力学性能,也可采用调质或正火后进行表面淬火、贝氏体等温淬火等工艺。感应加热表面淬火的方法与锻钢曲轴相似,但加热速度应稍低些(一般为 75~150 °C/s)。淬

火加热温度可取 900~950 °C,自热回火温度约 300 °C,炉中回火温度为 180~220 °C。经此处理后的表面硬度可达 52~57HRC。球墨铸铁曲轴经圆角、轴颈同时感应淬火后疲劳强度有显著提高,但由于球墨铸铁组织不同于钢,疲劳强度提高的

幅度不如钢(一般提高30%左右,而钢可提高一倍以上)。球墨铸铁曲轴和锻钢曲轴一样均可经氮碳共渗处理使疲劳极限和耐磨性大幅度提高,和锻钢曲轴不同的是所得氮碳共渗层深度较浅,硬度较高。

圆角滚压是提高曲轴承载能力常用的工艺措施之一。同曲轴轴颈、圆角同时感应淬火以及渗氮、氮碳共渗等工艺相比,圆角滚压具有强化效果显著、效率高、成本低等优点,因而在汽车发动机曲轴中的应用日益广泛。以铸态珠光体球墨铸铁曲轴为例,经圆角滚压后,其弯曲疲劳极限提高的幅度可达100%以上,远高于其他工艺的强化效果,使球墨铸铁曲轴的疲劳极限水平达到甚至超过同尺寸的锻钢曲轴。东风汽车公司经过十年的研究,先后开发出QS-1型专用和QR-1型通用曲轴圆角滚压机床,研制了曲轴弯曲变形的滚压校直专家系统,并在6102D<sub>2</sub>柴油发动机中,成功地利用圆角滚压球墨铸铁曲轴取代了原锻钢曲轴,投入批量生产。

#### 11.4.4 曲轴的质量检验

JB/T 6727 对曲轴材料的化学成分、本体硬度、力学性能、硬化层深度、表面硬度和硬化层宽度、氮化曲轴的渗氮层深度和表面硬度、显微

组织、表面质量及磁粉探伤等项目的检验方法和检验规则作了规定。

曲轴感应淬火的质量检验见表11-35。

表 11-35 曲轴感应淬火质量检验

检验项目	检验要求	检验设备或方法
淬硬层组织	钢 3~7 级马氏体 球墨铸铁 3~6 级马氏体	金相显微镜, 400×
淬硬层深度/mm	按 GB5617-85 及产品图样的技术要求	维氏硬度计, 载荷 1~5kgf
淬硬区长度及位置	按产品图样要求	腐蚀法或硬度法
表面硬度(HRC)	按产品图样要求	硬度计或锉刀
裂纹	不允许有任何裂纹	磁力探伤机
表面烧伤	淬火表面不得烧伤	

#### 11.4.5 曲轴的常见热处理缺陷及预防补救措施

曲轴感应淬火常见缺陷及防止措施见表11-36。

表 11-36 曲轴感应淬火常见缺陷及防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
淬硬层分布不均	1) 轴颈与感应器不同心 2) 感应器内电流分布不均 3) 油孔影响	1) 保证轴颈与感应器同心度偏差不大于1mm 2) 在感应器上合理配置导磁体 3) 油孔中打入钢(或铜)销子
油孔处的放射性裂纹	1) 油孔处加热不均或局部过热 2) 油孔周围冷却不均或过于激烈引起裂纹的发展	1) 油孔中打入钢(或铜)销子 2) 合理配置导磁体 3) 适当提前冷却 4) 改用半圈感应器加热和浸水冷却 5) 改用其他冷却介质
“C”形裂纹和淬硬层剥落	1) 锻造折叠 2) 淬硬层过深或层深偏差大 3) 油孔内壁的淬火裂纹的发展 4) 自热回火温度低 5) 磨削工艺不当 6) 材料淬透性过高	1) 改进锻造工艺 2) 油孔中打入钢(或铜)销子 3) 油道壁过薄, 应改进设计 4) 保证回火温度 5) 用半圈感应器加热和浸水冷却 6) 改进磨削工艺 7) 检查材料的化学成分和淬透性
淬火过渡区域的裂纹	1) 淬火应力集中 2) 磨削工艺不当	1) 保证感应器与轴颈的合理间隙 2) 改善磨削工艺

(续)

缺陷名称	产生原因	防止措施
淬硬表面的网状裂纹	1) 淬硬表面过热和激烈冷却 2) 淬硬层太深或自热回火温度低 3) 磨削切削用量过大	1) 适当减少加热时间或比功率 2) 保证感应器与轴颈间的合适间距 3) 降低冷却水压, 提高水温, 保证自热回火温度 4) 改善磨削工艺
硬度不够和软点	1) 材料含碳量低或有严重带状组织 2) 淬火温度低 3) 冷却水温高或水压低 4) 感应器喷水孔部分堵塞	1) 确保材料化学成分和组织合格 2) 适当增加加热时间 3) 适当提高冷却水压和降低水温 4) 清理感应器喷水孔

## 11.5 凸轮轴的热处理

### 11.5.1 凸轮轴的服役条件和失效方式

凸轮轴是发动机配气机构中的主要零件, 它的主要作用是保证气阀按一定的时间开启和关闭。凸轮与挺杆组成一对摩擦副。

凸轮轴在工作过程中除承受一定的弯曲和扭转载荷外, 主要是凸轮部分承受周期变化的挤压应力以及与挺杆体相接触产生的滑动带滚动的摩擦。

凸轮轴的主要失效方式是凸轮的粘着磨损(亦称擦伤, 严重时产生熔接现象), 和凸轮表面因挤压应力的反复作用而造成的麻点或表面剥落, 以及凸轮尖的磨损。所以, 要求凸轮轴除具有相应的强度和硬度外, 还应具有良好的抗擦伤性、抗接触疲劳能力和耐磨性。

### 11.5.2 凸轮轴材料

凸轮轴材料选择主要取决于其在发动机中的工作条件、使用工况, 凸轮—挺杆间的最大接触应力、相对滑动速度、润滑条件、润滑油的品种、匹配挺杆的材料、硬度及表面状况; 带有机油泵传动齿轮的凸轮轴尚须考虑机油泵驱动齿轮的工作负荷等。

凸轮轴根据其在发动机中的位置可分为下置凸轮轴和顶置凸轮轴。下置凸轮轴广泛应用于大中型发动机, 由于凸轮—挺杆间的接触应力大, 易造成点蚀、剥落; 螺旋齿轮驱动机油泵传动齿轮时负荷、滑差较大, 易造成磨损。顶置凸轮轴广泛应用于轿车、轻型车高速发动机, 由于转速高、润滑条件差, 凸轮易出现擦伤和磨损。可见, 对于不同结构、不同车型、速度和功率的发动机, 凸轮轴的

工作条件、使用工况不同, 因而对材料的要求也有所不同。

目前制造凸轮轴的材料、工艺种类较多, 可分为钢和铸铁两大类。钢凸轮轴按毛坯不同可分为锻钢凸轮轴、辊锻(楔横轧)凸轮轴及圆钢切削而成的凸轮轴; 按最终热处理工艺可分为感应淬火钢凸轮轴、渗碳钢凸轮轴、渗氮(或氮碳共渗)钢凸轮轴(按渗氮方法不同, 还可分为盐浴、气体、离子渗氮或氮碳共渗)。铸铁凸轮轴可分为冷激铸铁凸轮轴、可淬硬铸铁凸轮轴、球墨铸铁感应淬火凸轮轴、氩弧重熔铸铁凸轮轴、激光熔凝强化铸铁凸轮轴等。

各种发动机的凸轮轴所用材料及工艺列于表 11-37。

汽车、拖拉机厂常采用 45 钢感应淬火来生产凸轮轴, 所用材料应严格控制含碳量(精选含碳量(质量分数)0.42%~0.47%), 以保证合适的淬透性。

合金铸铁的弹性模量比中碳钢和球墨铸铁低, 而且还具有减小接触比压和保持润滑油膜的优点。所以, 对于马力大、转速高的发动机的凸轮轴往往采用合金铸铁来制造。常用的两种合金铸铁成分见表 11-38。此类铸铁均须经热处理使凸轮尖部达到一定的硬度, 亦称可淬硬铸铁。尤其前一种广泛用于小轿车的发动机中。

冷激铸铁凸轮轴是借助冷铁对高温铁液的激冷作用, 使凸轮的升程区, 尤其是凸轮尖部表面局部激冷而获得白口组织的耐磨层, 因此不需热处理。

冷激铸铁凸轮轴凸轮尖部表面组织为软硬相间的复相组织, 其渗碳体具有很高的硬度和低的摩擦系数。因此, 与冷激铸铁挺杆匹配时不易发生

粘着现象。摩擦过程初期,珠光体因磨损而凹下,形成渗碳体突起,两个表面实际上是渗碳体骨架相互接触,避免了珠光体与珠光体的粘接。另外在珠光体凹下部分易于储存润滑油,改善了润滑效果。因此,冷激铸铁凸轮尖和冷激铸铁挺杆这对摩擦副的油膜保持性好,摩擦阻力小且磨损极微,可以在相当大的载荷及转速范围内工作,而保持较高的耐磨性。

冷激铸铁凸轮轴具有最优秀的抗擦伤性能,对润滑油品种不敏感,同时也有较好的抗点蚀剥

落性能和较高的耐磨性,且生产成本低。冷激铸铁凸轮轴在欧洲各国的汽车及拖拉机上用得比较多,在美国及日本都用在载重车上。

冷激铸铁的化学成分,主要是含碳量要足够高,以保证冷激层硬度和碳化物量,根据设计结构的不同,可选择加入合金元素,主要是铬,有时亦加入少量钼、铜、镍,以提高强度及硬度。典型的冷激铸铁凸轮轴的化学成分见表 11-39。

可淬硬铸铁与冷激铸铁凸轮轴的轴颈一般不需进行感应淬火。

表 11-37 各种凸轮轴所用材料及热处理工艺

用 途		材 料	预 备 热 处 理		最 终 热 处 理			
			工 艺	硬 度 (HBS)	工 艺	层 深 /mm	硬 度 (HRC)	
小拖拉机 轿 车 吉 普	QT600-3	正火	229~302	贝氏体等温淬火		—	43~50	
	合金铸铁	去应力退火	241~302	贝氏体等温淬火、氮碳共渗		0.10~0.15	>700HV	
	45	调质	187~229	感应淬火、回火		3.0~6.0	轴颈 55~63 齿 45~58	
轿车	合金铸铁	去应力退火	248~331	凸轮感应淬火、回火		—	52~60	
轿车、载重车	冷激铸铁	去应力退火	凸轮尖>47HRC	—		—	—	
载重车 拖拉机	45	正火	163~197	感应淬火、回火		2.5~5.5	轴颈 55~63 齿 45~58	
	QT600-3	去应力退火	230~280	贝氏体等温淬火		—	≥45	
重型车	20	—	—	渗碳淬火、回火		1.3~1.7	58~62	
	QT600-3	去应力退火	≥170	贝氏体等温淬火		—	43~51	
	50	正火	—	感应淬火、回火		1.5~2.0	59~63	
大马力 柴油机	船	20CrMnTi	正火	—		1.7~2.2	56~61	
	机	50Mn	退火	241~285	感应淬火、回火	凸轮	2~5	58~62
			去应力退火			轴颈	1.5~4	55~62
	车	45	正火	—	感应淬火、回火		1.3~2.5	50~55

表 11-38 常用的两种合金铸铁的化学成分

材料名称	化学成分(质量分数)(%)									
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Cu
镍铬钼合金铸铁	3.2~3.4	2.00~2.20	0.65~0.85	<0.10	<0.10	0.40~0.50	0.90~1.10	0.40~0.45	—	—
铜钼钼合金铸铁	3.2~3.4	1.90~2.10	0.70~0.90	<0.10	<0.10	—	—	0.40~0.60	0.30~0.50	0.80~1.00

表 11-39 典型的冷激铸铁凸轮轴的化学成分

材料名称	化学成分(质量分数)(%)								
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
铬镍钼合金铸铁	3.6	2.0	0.7	<0.15	<0.15	0.2	0.5~1.1	0.2	—
低铬合金铸铁	3.6	1.5	0.6	—	—	—	0.1~0.3	—	—

### 11.5.3 凸轮轴的热处理工艺

#### 11.5.3.1 凸轮轴的感应加热热处理

汽车、拖拉机等内燃机的凸轮轴大都采用感应加热热处理以提高强度及耐磨性。根据凸轮轴结构和要求的不同,可对凸轮轴的凸轮、支承轴颈、偏心轮、齿轮等不同部位,按不同要求进行感应加热表面淬火。

加热方法:根据不同结构的凸轮轴可采用一次加热一个部位(中型以上多缸发动机用凸轮轴)或一次加热多个部位(轻、小型发动机用凸轮轴)。

感应器类型:凸轮轴(特别是凸轮)淬火感应器一般可分为两类:圆形感应器和仿凸轮形感应器。前者应用普遍,多数用于凸轮轴中频感应加热表面淬火;后者多数用于凸轮高频感应加热表面淬火或具有特殊形状、特殊要求的凸轮感应加热表面淬火。圆形感应器内径大于支承轴颈外径,零件与感应器的间隙较大,并且凸轮周边与感应器间隙不等,采用零件旋转加热方式。多个凸轮(或多个部位)同时淬火的淬火采用多个圆形感应器并联的组合感应器,加热方式采用零件旋转加热。仿凸轮形状感应器,零件与感应器的间隙较小,且也比较均匀,间隙可根据凸轮各部位不同硬化层深的要求来改变仿形形状。为了获得凸轮周边均匀的硬化层深,一般对曲率半径较小的部分增大间隙。仿凸轮形感应器一般做成分开式,适合于单件和小批量生产。

在凸轮轴感应淬火中,常出现因凸轮之间或凸轮与其他淬火部位(如偏心轮、齿轮等)之间的间距过小,而发生后淬火的凸轮对它紧邻的已淬火的凸轮或其他已淬火部位造成回火现象,使该处硬度降低。这是感应器所产生的磁场在感应器轴向两端的漏磁使已淬火凸轮局部范围二次加热所致。为了避免这一现象,在感应器轴向两端必须采取屏蔽措施。如在感应器有效圈外侧加“U”形导磁体,使感应器有效圈所产生的磁场集中在有效圈的内侧,以减少磁场的泄漏,同时也提高了感应器的输出效率。图 11-14 是一个带有屏蔽装置的双圆形凸轮轴淬火感应器实物照片。生产实践证明,如果在“U”形导磁体的两端分别加一紫铜片重复屏蔽,则屏蔽效果更好(图 11-15)。

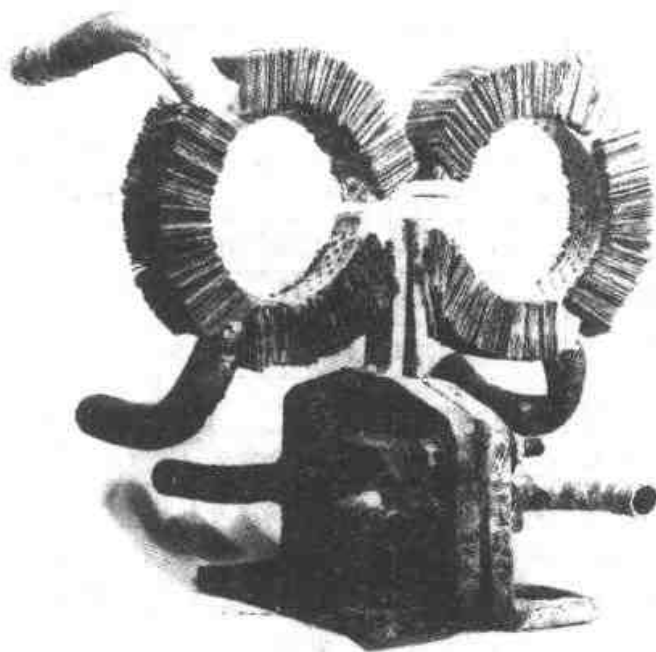


图 11-14 凸轮轴感应加热用的双圆形感应器

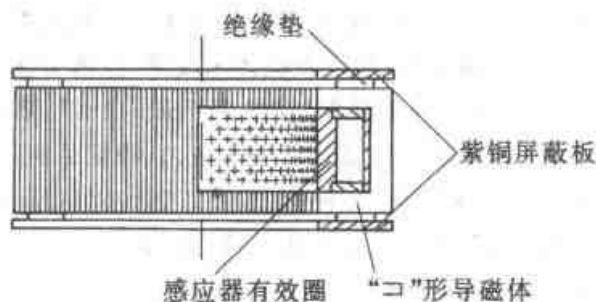


图 11-15 “U”形导磁体两端加屏蔽的示意图

6102 发动机凸轮轴感应加热表面淬火工艺参数及技术要求列入表 11-40。

某厂生产可淬硬铸铁凸轮轴,80 年代小批量试制时,采用 108 中频发电机组电源、立式通用淬火机 GCT-120,圆形感应器带喷水孔,加磁屏蔽,单个凸轮加热,淬火介质为 8%~10% (质量分数) 的聚丙烯酸钠 (ACR) 淬火液,工件转速 100r/min,加热时间 6~8s,预冷 1s,喷淬 4~6s。桃尖硬度 51~54HRC,升程处淬硬层深  $\geq 3\text{mm}$ ,淬火后经 250℃1.5h 回火。90 年代该厂在凸轮轴加工线上装一凸轮轴全自动淬火机,专门处理 4 缸汽油机的合金铸铁凸轮轴,生产能力 120 根/h,该淬火机采用晶闸管中频电源,在 3.6kHz 时输出 200kW,有可控温的淬火液槽及淬火机,有软化水的冷却循环系统,有一电控柜。凸轮轴材料为镍铬钼合金铸铁,铸态组织:桃尖附近 3mm 深度



表 11-40 6102 发动机凸轮轴感应加热表面淬火工艺参数及技术要求

淬火部位	变压器 匝比	电 参 数					热处理参数				淬火后 硬度 (HRC)	淬硬层 深度 /mm
		空载电 压/V	载荷电 压/V	电流 /A	有效功 率/kW	功率因 数 cos $\phi$	加热时 间/s	间隙时 间/s	冷却时 间/s	水压 /MPa		
大轴颈	19/1	750	740 $\pm$ 5	270 $\pm$ 5	95	0.96	4.4	0	4.4	0.15	55~63	3.4
小轴颈	19/1	750	740 $\pm$ 5	245 $\pm$ 5	82	0.95	4.0	0	4.0	0.15	55~63	—
齿 轮	19/1	750	740 $\pm$ 5	215 $\pm$ 5	62	0.90	4.3	0	1.3	0.15	45~58	—
凸 轮	12/1	750	700 $\pm$ 5	220 $\pm$ 10	70	0.96	4.1	0	2.5	0.15	55~63	2.9, 尖 4.8
偏心轮	12/1	750	650 $\pm$ 10	230 $\pm$ 10	70	0.96	3.3	0	4.4	0.15	55~63	—

注: 材料为 45 钢, 锻件正火后硬度为 163~197HBS, 电源设备为 BPS100-8000, 淬火水温为 35~40℃。

处是细片状珠光体基体上初生渗碳体及石墨; 基圆部分的合金碳化物允许全部网状分布; 石墨为 A 型、E 型, 长度 4~7 级; 基体硬度 241~320HBS。加工工序为: 铸坯铣两端面→打中心孔→粗、精车支承轴颈→加热 10~13s, 预冷 >5s→淬火。淬火后组织: 表层细针状马氏体加残留奥氏体加少量珠光体, 初生渗碳体未改变; 淬硬层深 ≥1.5mm, 桃尖允许较深, 淬硬层不进入杆部; 表层硬度 48HRC。为降低表面淬火应力、稳定组织, 有利于消除磨削裂纹, 淬火后在 1000~2500Hz 中频感应加热回火设备中进行低温回火。

### 11.5.3.2 凸轮轴的化学热处理

虽然中碳钢感应加热表面淬火的凸轮轴有较高的硬度, 但其耐磨性不如渗碳淬火的凸轮轴, 在某些情况下, 为获得更高的耐磨性可采用 20、20Cr 或 20CrMnTi 钢进行渗碳淬火(见表 11-37)。考虑到凸轮轴渗碳后磨量较大(约 0.4~0.5mm), 故需增加渗碳层深度。渗碳后一般采用重新加热淬火, 以保证显微组织良好, 使用寿命长。淬火、回火后的凸轮轴硬度应不低于 56HRC, 汽车凸轮轴应不低于 58HRC。

气体氮碳共渗能显著提高抗擦伤和防止热胶合、咬合的能力。在 100℃的工作温度下, 氮碳共渗的抗咬合能力与抗擦伤能力均超过淬火、回火, 甚至超过渗碳淬火。合金铸铁氮碳共渗后的硬度高达 700HV 以上。耐磨性为中碳钢感应淬火件的两倍。如 680 汽油发动机的合金铸铁凸轮轴采用贝氏体等温淬火及去应力处理后再进行尿素气体氮碳共渗处理, 氮碳共渗工艺见图 11-16。

某厂 EQ491 凸轮轴, 材料为铬钼合金铸铁, 制造工艺路线为: 铸造毛坯→加工中心孔→中频

感应加热表面淬火→粗磨→精磨→矫直→清洗→离子氮碳共渗→抛光。离子氮碳共渗设备为 LD-75A 离子氮化炉, 凸轮轴采用竖直插入方式装夹, 装载量 300 根/炉。主要工艺参数: 共渗温度 550~600℃, 时间 2.5~4h, 氨气 0.6~1.5L/min, 丙烷气 5~15mL/min, 压力 1500~2200Pa, 电压 500~800V, 电流 20~80A, 冷却方式为真空炉冷。处理后化合物层深为 0.008~0.016mm, 扩散层深大于 0.20mm。

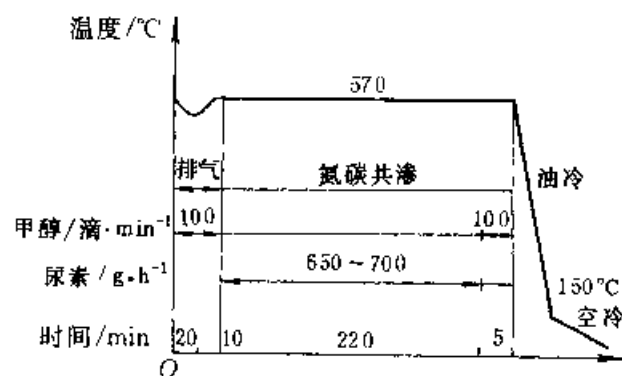


图 11-16 凸轮轴气体氮碳共渗工艺

材料: 合金铸铁; 层深: 0.10~0.15mm;

设备: RJJ-35

除合金铸铁外, 球墨铸铁凸轮轴也可采用氮碳共渗处理及离子渗氮处理。SH760 汽车凸轮轴采用尿素氮碳共渗处理后, 解决了凸轮轴的早期拉毛和磨损的质量问题, 产品质量稳定, 使用寿命成倍提高。氮碳共渗的缺点是渗层较浅, 不能承受较大的载荷, 一般适用于中小马力发动机。

### 11.5.3.3 球墨铸铁凸轮轴的热处理

球墨铸铁凸轮轴一般选用 QT600-3 球墨铸铁, 除少数采用中频淬火或氮碳共渗以外, 大多数球墨铸铁凸轮轴是采用毛坯正火或去应力退火,

表 11-41 球墨铸铁凸轮轴贝氏体等温淬火实例

序号	化学成分(质量分数)(%)							贝氏体等温淬火参数				显微组织 (体积分数)	硬度 (HRC)
	C	Si	Mn	S	P	Mg	RE	加热 温度 /°C	保温 时间 /min	等温 温度 /°C	停留 时间 /min		
1	3.7~ 3.9	2.0~ 2.3	0.5~ 0.8	<0.025	<0.1	0.035~ 0.045	0.025~ 0.04	860±10	30	270±10	60	贝氏体+≤ 5%马氏体; 少量残留奥氏体	34~38
2	3.5~ 3.7	2.4~ 2.6	0.7~ 0.9	<0.02	<0.1	0.04~ 0.06	0.03~ 0.05	870±10	15	240±10	45	贝氏体+ 10%~15%马 氏体+少量残 留奥氏体	44~48
3	3.7~ 4.2	2.4~ 2.6	0.5~ 0.8	≤0.02	≤0.1	>0.04	0.02~ 0.04	860±10	30	290~300	45	贝氏体+少 量马氏体和残 留奥氏体	39~46

加工后进行贝氏体等温淬火。贝氏体等温淬火的工艺参数选择可参阅第 1 卷有关球墨铸铁热处理章节。表 11-41 为球墨铸铁贝氏体等温淬火实例。

凸轮轴贝氏体等温淬火均在半精加工后进行。经贝氏体等温淬火后,凸轮轴要伸长约 0.3% 左右,应予以注意。贝氏体等温淬火后的凸轮轴弯曲程度一般不超过 0.5mm/m,超差时应施以热矫直。贝氏体等温淬火后可以省去回火处理,淬火后为下贝氏体基体组织,具有良好的综合力学性能。适用于中、小型马力发动机和中小批量生产。

#### 11.5.3.4 凸轮轴的其他强化工艺

如前所述,冷激铸铁凸轮轴具有优良的使用性能,但迄今为止冷铁只能靠手工摆放,所以生产操作要有严密的协调及组织管理相配合,否则质量就不易稳定。近年来先后出现了非合金灰铸铁凸轮轴表面氩弧重熔和激光重熔(熔凝)硬化工艺,下面分别作一简介。

1. 氩弧重熔铸铁凸轮轴 氩弧重熔铸铁凸轮轴表面形成垂直于凸轮表面的莱氏体组织,凸轮表面硬度高达 54~64HRC,硬化层深度达到 2~2.5mm,有很高的抗擦伤性能、耐磨性和耐热性,在运转中能承受更大的中心压力( $P < 1000\text{MPa}$ ),因而获得良好的使用性能。

氩弧重熔表面硬化工艺是利用普通钨极氩弧焊,凸轮接焊机正极,焊炬接负极,凸轮绕轴心转动,焊炬除作横向摆动外,还靠一个精密凸轮靠模保证钨棒(焊极)端部到凸轮表面各点的距离不变,凸轮转动一圈,即完成一个凸轮的重熔处理,

使凸轮表面的珠光体转变为所希望的莱氏体组织。

凸轮表面氩弧重熔工艺的特点是适用于凸轮间距小的凸轮轴,因为凸轮间距小,采用冷激工艺不易安置冷铁,而氩弧重熔则不受此限制。又由于采用铸铁凸轮的重熔工艺,使铸坯铸造方便,成品率高,便于实现自动化,在逐步稳定氩弧重熔工艺的前提下,这种方法具有较好的发展前景。

2. 激光熔凝强化铸铁凸轮轴 铸铁激光重熔可获得好的表面质量,硬化层深度达 1~1.3mm,硬度达 60~68HRC(714~970HV<sub>0.05</sub>);合理的预热和缓冷能有效地清除重熔表层的开裂和气孔,其耐磨性比普通冷激铸铁提高 2~3 倍;重熔表层的组织为细密的 Fe<sub>3</sub>C(大量)+M(少量)+A(多量),其中 A 具有非常好的强韧性和抗塑变能力,从而赋予硬化层以优异的耐磨性、良好的热硬性和抗擦伤性能,这对于在高接触应力、较高升温条件下工作的摩擦副是理想的耐磨层。

#### 11.5.4 凸轮轴的质量检验

JB/T 6728 对凸轮轴硬度、力学性能、显微组织、硬化层深度、表面宏观质量及磁粉探伤等项目的检验方法和检验规则作了规定。

凸轮轴感应淬火的质量检验见表 11-42。

#### 11.5.5 凸轮轴的常见热处理缺陷及预防补救措施

凸轮轴感应淬火常见缺陷及防止措施见表 11-43。

表 11-42 凸轮轴感应淬火的质量检验

检验名称	检验项目	检 验 要 求	检验设备或方法	备 注
显微组织	淬硬层组织	钢 3~7 级马氏体	金相显微镜 400×	
		合金 铸铁 细针状马氏体,基体上均匀分布着碳化物网或针和石墨以及少量残留奥氏体		
表面质量	淬硬区长度及位置	按产品图样要求	腐蚀法或硬度法	—
	裂 纹	不允许有任何裂纹	磁力探伤机	100%探伤后退磁
	其 他	淬火表面不得烧伤		—
硬度	表面硬度	按产品图样要求	维氏硬度计或锉刀	—
	淬硬层深度	按 GB 5617 及产品图样的技术要求	维氏硬度计,载荷 1~5kgf	界限硬度值=0.8×允许的硬度下限值(HV)

表 11-43 凸轮轴感应淬火常见缺陷及防止措施

缺陷名称	产 生 原 因	防 止 措 施
凸轮表面软点	零件旋转过快,在凸轮背水面形成软点或低硬度	使零件转速降至 50r/min 以下
感应加热时,相邻的淬火轴颈回火	两个淬火部位间距太小;感应器与淬火部位的相对位置不合适	在感应器上加屏蔽装置;在感应器两侧装上海磁材料以调整感应器的相对位置
凸轮尖部和边角淬硬层崩落	1) 凸轮尖部过热 2) 淬硬层太深 3) 冷却过于激烈 4) 自热回火温度低 5) 钢的含碳量及淬透性过高 6) 感应器与凸轮间隙过小	1) 减少加热时间 2) 加大感应器内径和减少感应器有效高度 3) 减少冷却水压和提高冷却水温 4) 调整零件与感应器相对位置 5) 保证合适的自热回火温度 6) 控制好钢的化学成分和淬透性
凸轮尖部硬度偏低和显微组织级别偏低	淬火加热温度不足	在感应器有效圈外圆装“□”形硅钢片
铸铁凸轮局部熔化或显微组织中残留奥氏体量过多	淬火加热温度过高	1) 减少加热时间或比功率 2) 加大感应器内径或减少有效圈高度
铸铁凸轮的硬度不均匀或硬度偏低	1) 毛坯铸态组织不合格,如石墨粗大 2) 毛坯铸态硬度低 3) 加热温度低	1) 使毛坯铸态硬度及组织合格 2) 适当增加加热时间

应力可达 1500MPa。

挺杆的主要失效方式有:磨损、擦伤和接触疲劳破坏。

## 11.6 挺杆的热处理

### 11.6.1 挺杆的服役条件和失效方式

挺杆在发动机气缸体导管内作上下往复运动,同时绕自身轴线作旋转运动。挺杆与凸轮相接触的端面为球面,在与凸轮相对滑动的过程中为点接触(理论上),承受很大的接触应力,最大接触

### 11.6.2 挺杆的材料

#### 11.6.2.1 挺杆材料及热处理的技术要求

根据 JB3681,汽车发动机四冲程顶置式及侧置式气门挺杆的材料及热处理的技术要求如下:

(1) 挺杆可用 15Cr、20Cr、45Cr、20、45 钢制造;可用化学成分符合图样要求的合金铸铁制造。

(2) 挺杆材料及热处理技术要求见表 11-44。

(3) 挺杆底部工作表面须经磷化处理或其他表面处理。

(4) 挺杆磷化前,底部工作表面应进行探伤。如采用磁力探伤,探伤后应退磁。

(5) 经机械加工后的挺杆工作表面不应有裂纹、蜂窝孔、黑点、刻痕、凹坑等有害缺陷,在挺杆非工作表面允许有少量黑点及加工痕迹。

### 11.6.2.2 挺杆材料选择

挺杆和凸轮轴构成一对摩擦副,挺杆材料选择时必须考虑到它们之间的适应性。

渗碳后的钢挺杆有较高的硬度、高的接触疲

劳强度和耐磨性,但它的储油性和减摩性均较差,所以较易出现擦伤。用合金铸铁来制造挺杆和凸轮轴有日益增多的趋向。冷激铸铁挺杆表面组织中有大量的针状碳化物,它们能起着—个相当坚固的骨架作用,而表面经磨削成微凹的珠光体部分又起着储油作用,因而耐磨性、减摩性及储油性均较好。冷激铸铁挺杆再经淬火、回火处理能提高接触疲劳寿命,从试验和使用的结果表明,经过适当表面强化的合金铸铁挺杆和凸轮轴,在耐磨性和抗擦伤能力等方面都优于钢制挺杆和凸轮轴。目前以使用铬钼或铬镍钼合金铸铁  $w(\text{Ni})(0.4\% \sim 0.50\%, w(\text{Cr})0.5\% \sim 1.0\%, w(\text{Mo})0.4\% \sim 0.6\%)$  为多,也使用铜钼钼合金铸铁。

表 11-45 列举一些发动机挺杆和凸轮轴的材料选配。

表 11-44 挺杆材料及热处理技术要求

类 别		钢 制 挺 杆		铸 铁 挺 杆
材 料		15Cr、20Cr、20	15Cr、45	合金铸铁
热 处 理		渗碳或碳氮共渗	感应淬火	—
硬化层深范围/mm		0.6~1.5	不小于 2	不小于 2
显微组织	底部工作表面	回火马氏体和少量针状托氏体		针状渗碳体、莱氏体和适量石墨
	杆 部	回火托氏体		细珠光体基体
硬 度	底部工	淬火后	58~65HRC	58~65HRC
	作表面	不淬火	—	不低于 52HRC
	杆部及窝座		不低于 36HRC	不低于 241~285HBS
备 注		渗层组织应为细致的马氏体,不允许网状渗碳体、游离铁素体,心部为低碳马氏体		底部工作表面应为冷激、冷激淬火或麻口淬火组织

表 11-45 挺杆和凸轮轴材料的选配

用 途	挺 杆	硬 度 (HRC)	凸 轮 轴	硬 度 (HRC)
载重车、拖拉机、轿车	1) 35 钢碳氮共渗	57~62	45 钢感应淬火	55~63
	2) 冷激铸铁	$\geq 52$	45 钢感应淬火	55~63
	3) 冷激铸铁	$\geq 52$	冷激铸铁	$> 47$
	4) 20Mn2B 或 20Cr 钢渗碳	55~62	45 钢感应淬火	55~62
	5) 冷激合金铸铁	$\geq 55$	球墨铸铁感应淬火	45~55
	6) 20 钢渗碳	53~58	球墨铸铁感应淬火	45~55
	7) 合金铸铁淬火	58~63	45 钢感应淬火	55~63
	8) 冷激铸铁淬火、回火	$\geq 58$	45 钢感应淬火	55~63
	9) 冷激铸铁淬火、回火	$\geq 58$	冷激铸铁	$> 47$
	10) 合金铸铁淬火、回火	$\geq 55$	合金铸铁凸轮感应淬火、回火	52~60

(续)

用 途	挺 杆	硬 度 (HRC)	凸 轮 轴	硬 度 (HRC)
占 肖、拖拉机	1) 35 钢堆焊合金铸铁(冷激)	60~66	15 钢感应淬火	55~63
	2) 20Cr 钢渗碳	55~63	球墨铸铁贝氏体等温淬火	43~50
重型载重车	1) 合金铸铁氮碳共渗	$\geq 795\text{HV}_{0.05}$	20 钢渗碳	58~62
	2) 50Mn2 钢淬火或冷激铸铁	47~54	球墨铸铁贝氏体等温淬火	43~51
机 车	20Cr 钢渗碳	58~63	15 钢感应淬火	50~57

### 11.6.3 挺杆的热处理工艺

各种挺杆热处理工艺及技术要求见表 11-46。

#### 11.6.3.1 钢制挺杆的热处理

在大量生产中,钢制挺杆通常采用冷挤或热锻成形,而小批量生产的挺杆则采用棒料加工成形。

1. 制造工艺路线 菌状挺杆通常采用热锻成形:

下料→感应加热后热锻→加工→渗碳→淬火、回火→精加工→磷化→成品。

筒状挺杆常采用冷挤压成形:

下料→退火→磷化、皂化→冷挤→加工→渗碳或碳氮共渗→淬火、回火→精加工→磷化→成品。

表 11-46 各种挺杆热处理工艺及技术要求

材 料	预 备 热 处 理	最 终 热 处 理	技 术 要 求	
			层 深 mm	硬 度 (HRC)
20Cr	退火: $(760 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温 180min, 降到 $(700 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ × 120min, 炉冷到 $500^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷	渗碳: $(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 空冷; 盐浴淬火: $900 \sim 920^{\circ}\text{C}$ 空冷; 淬火: $(820 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 硝盐浴回火: $(280 \pm 10)^{\circ}\text{C}$	1.2~1.6	53~60
35 钢堆焊合金铸铁	退火: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ × 120min, 降至 $(750 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 120min 后空冷	高频堆焊后水冷, 再在 $(300 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火 3h	堆焊层 $\geq 1.5$	60~66
35 钢或 Y15 钢	-	碳氮共渗: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 10% 盐水(质量分数)淬火, 回火: $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 90min	0.2~0.4	58~62
冷激合金铸铁	$550^{\circ}\text{C}$ 退火 4h	淬火: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 油淬, 回火: $180^{\circ}\text{C}$ , 120min	-	58~63
15Cr	-	$(940 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 气体渗碳后空冷, $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬, $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火	1.0~1.4	58~63
可淬硬合金铸铁	-	$855^{\circ}\text{C}$ 油淬, $160^{\circ}\text{C}$ 回火	-	$> 50$
20	-	$(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 渗碳后空冷, $(820 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 淬火, $(280 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火	1.1~1.5	53~58
冷激合金铸铁	$(550 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 退火 6h	$(560 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 液体渗氮(盐浴成分: $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3 : \text{KCl} = 5 : 1 : 1$ ) 180min 后油冷	-	$\geq 795\text{HV}$
50Mn2	退火: $(820 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ × 180min 后, 炉冷到 $600^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷	淬火: $820^{\circ}\text{C}$ 淬入轻柴油 回火: $300 \sim 320^{\circ}\text{C}$ × 2h	-	47~54

2. 热处理工艺 图 11-17 和图 11-18 分别列出 15Cr 和 35 钢挺杆在井式炉中的渗碳工艺。

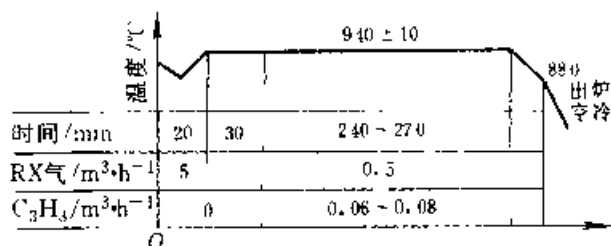


图 11-17 15Cr 钢挺杆在 RJJ-60 井式炉中的渗碳工艺

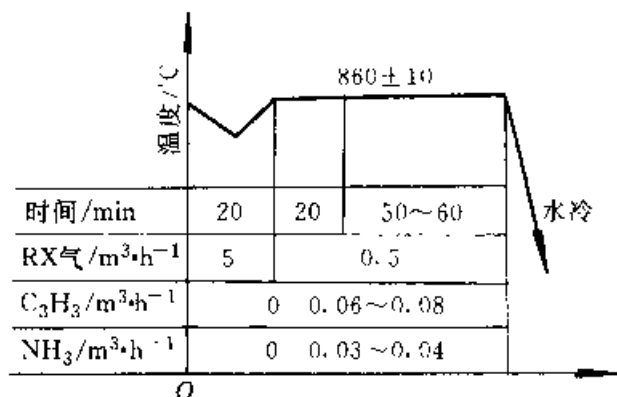


图 11-18 35 钢挺杆在 RJJ-60 井式炉中的碳氮共渗工艺

### 11.6.3.2 合金铸铁挺杆的热处理

铸铁挺杆主要有合金铸铁和冷激铸铁两大类，其他尚有球墨铸铁挺杆。挺杆制造有整体铸造的，有在钢制成杆体头部堆焊上合金铸铁以及用单体铸造的合金铸铁挺杆头与钢制杆体对焊等形式。

#### 1. 制造工艺路线

(1) 合金铸铁整体铸造可分为以下几种：

1) 合金铸铁整体铸造(不激冷)→去应力退火→机械加工→淬火、回火→精加工→表面处理→成品。

2) 合金铸铁整体铸造，端面激冷→去应力退火→机械加工→表面处理→成品。

3) 合金铸铁整体铸造，端面激冷→去应力退火→机械加工→淬火、回火→精加工→表面处理→成品。

(2) 合金铸铁整体铸造(冷激)→去应力退火→机械加工→氮碳共渗→精加工→成品。

(3) 钢制杆体→堆焊端部(冷激)→回火→精加工→成品。

(4) 钢制杆体———→单体铸造头部(冷激)———→对焊

→热处理→精加工→表面处理→成品。

#### 2. 热处理工艺

(1) 铸铁挺杆的热处理工艺随化学成分、使用条件和制造方法的不同有很大差别。铸铁挺杆的使用性能与显微组织、硬度、表层和次表层的残留应力有较大关系。碳化物网将使挺杆早期失效，表现形式是点蚀剥落和快速磨损。显微组织中有较多的垂直于工作球面的针状碳化物，细回火马氏体基体和点状、片状石墨配合时，具有最好的使用性能。较高的硬度对耐磨也是有利的。铸铁挺杆的使用性能与组织、硬度的关系见图 11-19。硬度及组织与铸件的合金成分及铸造工艺有关。热处理的主要作用在于使基体组织转变为马氏体，以抵抗高的接触应力，或通过表面处理的方法提高挺杆端面的硬度。

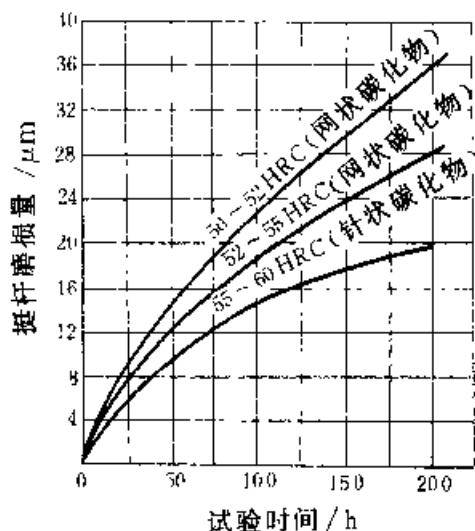


图 11-19 镍铬钼合金铸铁挺杆的组织硬度和磨损量与试验时间的关系

( $\omega(\text{Ni}) 0.4\% \sim 0.5\%$ ,  $\omega(\text{Cr}) 0.9\% \sim 1.10\%$ ,  $\omega(\text{Mo}) 0.40\% \sim 0.55\%$ )

(2) 冷激铸铁挺杆，随着发动机性能指标不断提高，挺杆端面接触应力也越来越高，容易引起冷激铸铁挺杆体最常见的失效即疲劳剥落。为此，冷激铸铁挺杆必须经淬火、回火处理。为保持冷激铸铁挺杆优良的抗擦伤性能，热处理不得使较多量碳化物分解成团状石墨，并应使基体组织中的珠光体都转变为马氏体，所以淬火加热温度应严格控制，并防止脱碳。冷激铸铁挺杆的淬火加热一般采用盐浴加热。

(3) 高频堆焊冷激合金铸铁挺杆进行 300℃ 回火,能减缓应力集中,但是不适当地提高回火温度会降低表面残余压应力并导致挺杆早期疲劳剥落。图 11-20 表明,回火温度过高会使疲劳寿命下降。图 11-21 表明了不同温度回火后挺杆的表面残留应力分布情况。

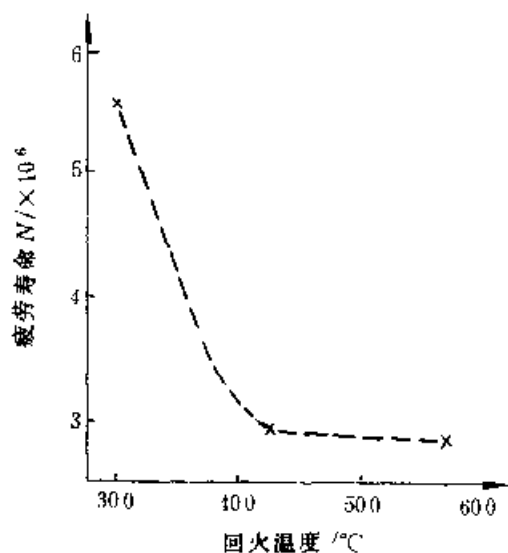


图 11-20 疲劳寿命随回火温度的变化

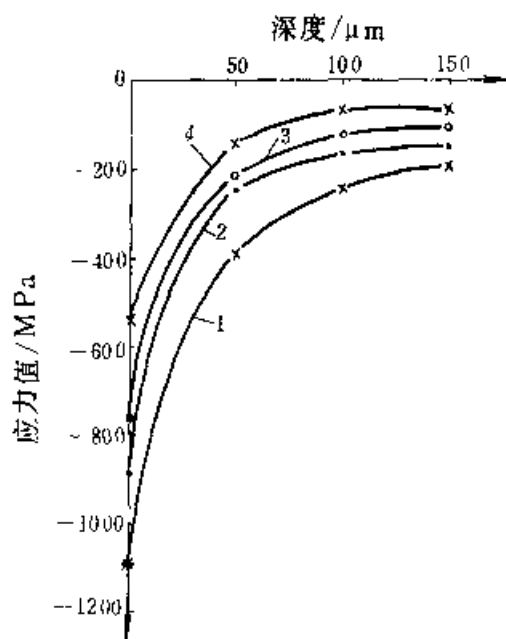


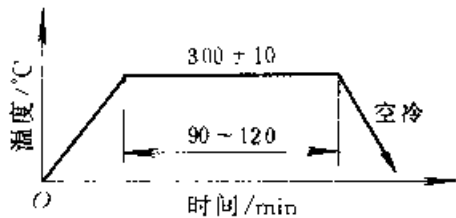
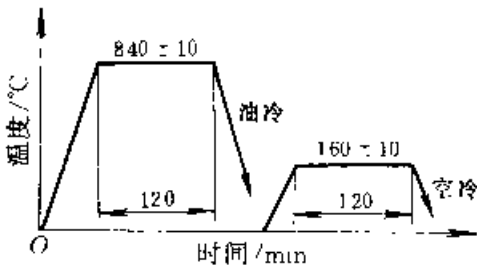
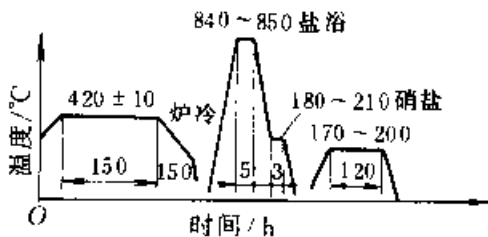
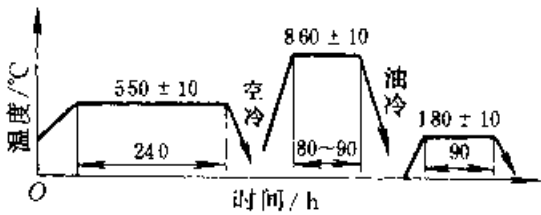
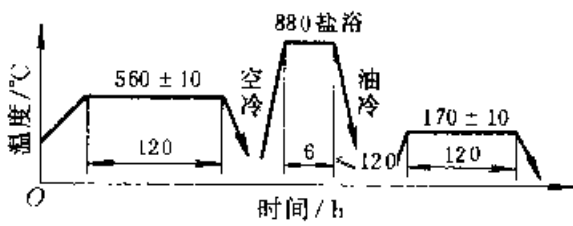
图 11-21 不同温度回火后挺杆的表面应力分布  
回火温度: 1 300℃ 2 400℃ 3 450℃  
4 570℃

几种冷激合金铸铁挺杆的热处理工艺规范列于表 11-47。

表 11-47 冷激合金铸铁挺杆的热处理工艺

材料	化学成分 (质量分数)(%)	热 处 理 工 艺	端面硬度 (HRC)	显微组织 (体积分数)
铬合金 铸铁	C 3.45~3.65 Si 2.0~2.4 Mn 0.6~0.9 S ≤0.12 P ≤0.20 Cr 0.2~0.4 Mo 0.3~0.5		≥52	莱氏体+少量 珠光体,有少量点 状石墨
镍铬钼 合金铸 铁	C 3.5~3.7 Si 1.7~1.9 Mn 0.7~1.0 S <0.10 P <0.10 Ni 0.5~0.7 Cr 0.25~0.35 Mo 0.4~0.6		铸态 55~ 62 氮碳共渗 后 >795HV <sub>0.2</sub>	球面为较细针 状莱氏体,基体为 85%珠光体,白口 层深 2~6mm

(续)

材料	化学成分 (质量分数)(%)	热 处 理 工 艺	端面硬度 (HRC)	显微组织 (体积分数)
镍铬钼合金铸铁	C 3.2~3.4 Si 2.20~2.40 Mn 0.65~0.85 S < 0.10 P < 0.10 Cr 0.90~1.10 Ni 0.40~0.50 Mo 0.40~0.65		60~65	挺杆端工作面的显微组织为: 30%~60%碳化物—马氏体+15%残留奥氏体+≤0.5%细点状石墨
			铸态 277~352HRS 热处理后 57~63	回火马氏体—少量点状石墨+少量渗碳体(垂直于表面,要求保留10%)
镍铬钼合金铸铁	C 3.6~3.8 Si 1.8~2.0 Mn 0.8~0.95 S < 0.03 P < 0.02 Ni 0.7~0.8 Cr 0.45~0.55 Mo 0.08~0.12		63~65	基体:碳化物—极少量莱氏体·马氏体 石墨:呈点状均匀分布<3%,白口层深3~8mm
镍铬钼铜合金铸铁	C 3.4~3.6 Si 2.1~2.4 Mn 0.7~0.9 S < 0.05 P < 0.1 Cr 0.4~0.6 Mo 0.4~0.60 Cu 0.15~0.2 Ni 0.5~0.7 Ti 0.07~0.1		58~63	—
镍铬钼铜合金铸铁	C 3.4~3.6 Si 2.1~2.4 Mn 0.7~0.9 S < 0.05 P < 0.1 Cr 0.4~0.6 Mo 0.4~0.60 Cu 0.15~0.2 Ni 0.5~0.7 Ti 0.07~0.1		>63	—



(续)

材料	化学成分 (质量分数)(%)	热 处 理 工 艺	端面硬度 (HRC)	显微组织 (体积分数)
镍铝铜合金铸铁	C 3.5~3.8 Si 1.7~1.9 Mn 0.6~0.8 Cr 0.3~0.5 Mo 0.1~0.6 Cu 0.5~0.8 S < 0.01 P < 0.02		58~63	

11.6.4 挺杆的质量检验

汽车发动机四冲程顶置式及侧置式气门挺杆的质量检验应按 JB3681-84 规定的检验规则进行。

11.6.4.1 渗碳钢挺杆的质量检验

渗碳钢挺杆的热处理质量检验见表 11-48。

表 11-48 渗碳钢挺杆热处理质量检验

检验项目	检 验 方 法	检 验 要 求
表面质量	观察	无裂纹、划痕、发裂、皱纹、碰伤和氧化皮
渗碳层深度/mm	显微检查按过共析层+共析层 1:2 过渡层,测量渗碳淬火有效硬化层深度应按 GB 9450-88 测定	按零件图样要求
硬度(HRC)	10%锉刀检查,2%硬度计检查	按零件图样要求
显微组织	表层 金相显微镜观察	细针状马氏体,碳化物,断续或连续网状碳化物深度 < 0.1mm。表面硬度合格时,允许有少量残留奥氏体
	心部 金相显微镜观察	板条马氏体+铁素体

11.6.4.2 合金铸铁挺杆的质量检验

镍铝铜合金铸铁挺杆的热处理质量检验见表 11-49。

表 11-49 镍铝铜合金铸铁挺杆的热处理质量检验

检验项目	检验方法	检 验 要 求
硬度(HRC)	在端面测定,至少三点	58~65(淬火后)
显微组织	每炉最少取一个试样进行金相组织检验	1) 热处理零件表面不允许有脱碳、氧化和石墨生长现象 2) 基体组织为细马氏体 3) 石墨和碳化物分布应符合铸态显微组织检验要求 4) 在距端面 2.6~8.5mm 范围内允许出现 6 级碳化物

11.6.5 挺杆的常见热处理缺陷及预防补救措施

11.6.5.1 渗碳钢挺杆常见缺陷的预防及补救

渗碳钢挺杆常见热处理缺陷的预防及补救措施见表 11-50。

表 11-50 渗碳钢挺杆常见热处理缺陷的预防及补救措施

缺陷名称	产生原因	预防及补救措施
渗碳层深不均(见图 11-22、图 11-23)	炉气流动不良,炉子密封不好,零件不干净并重叠堆放	不许重叠堆放,保证炉气流动好、气氛均匀,不漏气。当渗层偏差小,最大层深未超过规定者可以返修
过热	渗碳温度偏高或渗碳时间过长	应严格按照规定操作。过热组织可采取 850~900℃正火后,重新淬火

(续)

缺陷名称	产生原因	预防及补救措施
渗碳层碳浓度过高	渗碳温度过低, 炉气碳势过高, 扩散时间不够	应严格按照规定操作。可采取 900~910℃扩散后正火, 再重新加热淬火
脱碳 (见图 11-24)	炉气碳势低, 盐浴脱氧不良, 渗碳后空冷太慢	适当提高炉气碳势, 在保护气氛中冷却, 出炉后散放快冷, 可补渗后再加热淬火
软点	淬火温度偏低, 连续炉出料端温度低	允许返修淬火

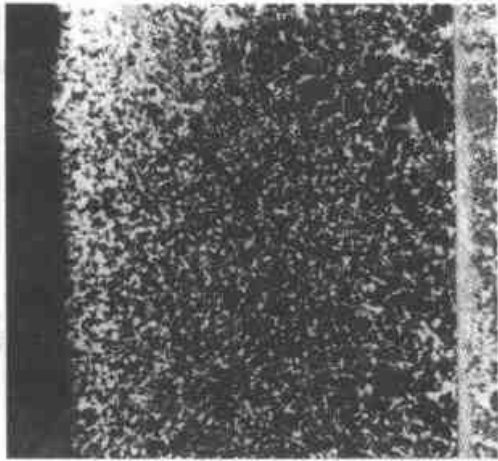


图 11-22 15Cr 钢挺杆渗碳层较浅处的显微组织中 出现亚共析组织 100×



图 11-23 15Cr 钢挺杆渗碳层深度不均的宏观照片 (图中 A 端面因氧化阻碍渗碳, 几乎全无渗碳层)

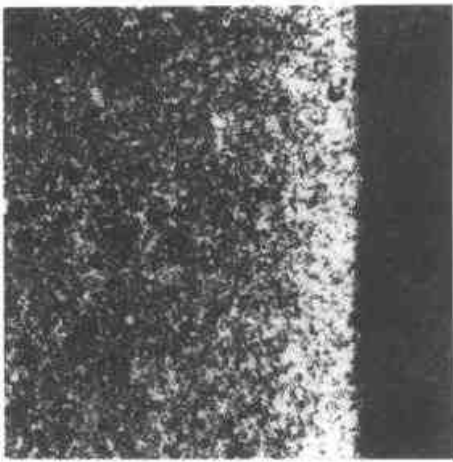


图 11-24 15Cr 钢挺杆表面脱碳的显微组织 100×

11.6.5.2 合金铸铁挺杆常见缺陷的预防及补救  
镍铬钼合金铸铁挺杆的热处理缺陷预防及补救措施见表 11-51。

表 11-51 镍铬钼合金铸铁挺杆热处理缺陷的预防及补救措施

缺陷名称	产生原因	预防及补救措施
表面脱碳	加热温度过高或炉气碳势过低	1) 淬火加热应在保护气氛中进行 2) 当脱碳深度低于磨削加工余量者可磨去
过热	加热温度过高	1) 严格控制淬火加热温度 2) 出现过热, 不能补救
硬度低	加热温度低或保温时间不足	允许重新加热淬火
淬火软点	淬火零件脏或淬火油温过高	保证零件清洁, 保证淬火油温

11.7 排气阀的热处理

11.7.1 排气阀的服役条件和失效方式

排气阀在高温下高速运动和复杂而多变的应力状态下工作, 其盘端面露在燃烧室中, 承受高温 (600~850℃)、高压燃气的冲刷与腐蚀。典型汽车排气阀危险区及温度分布状态如图 11-25 所示, 从图中看出:

(1) 排气阀的最高温度在其盘部和颈部 (A、C 区), 汽油发动机排气阀的最高温度在 C 区, 柴

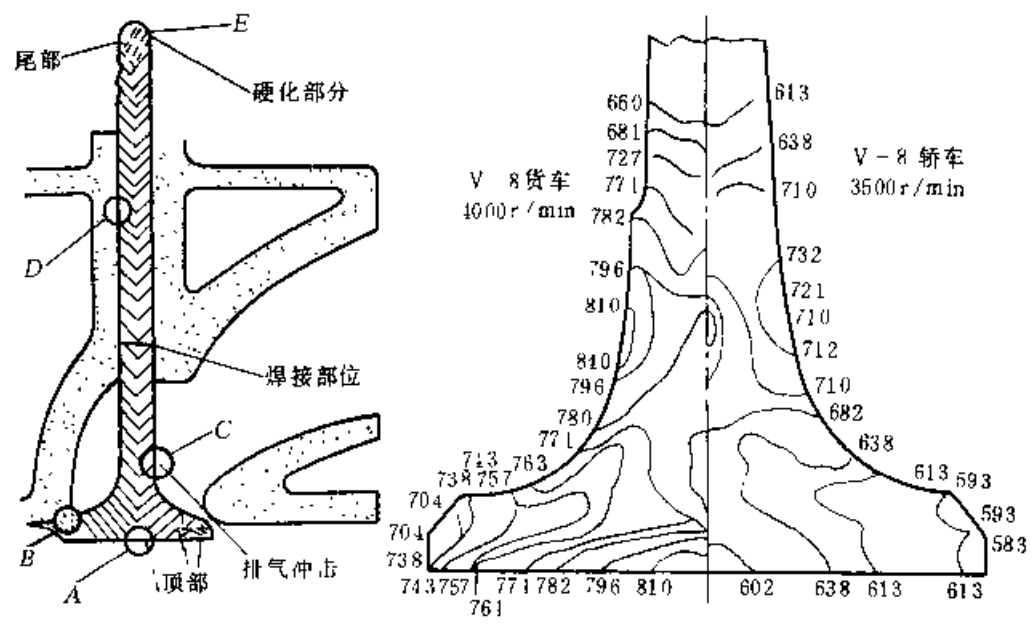


图 11-25 典型汽车排气阀危险区及温度分布状态

油发动机排气阀的最高温度在 A 区。这些部位要求高的热强度和良好的耐腐蚀性。

(2) 与阀座接触的盘锥面(B 区)是排气阀的又一个危险区,该区要求抗热腐蚀、热疲劳、热磨损等综合性能。

(3) 排气阀的杆部和杆端部(D、E 区)分别与导管、摇臂接触,均属磨损区,该区要求良好的减摩和耐磨性能。

排气阀的失效方式主要是盘部烧蚀、盘锥面

腐蚀与磨损、杆部与颈部折断、杆部和杆端面的磨损与擦伤。其中,盘锥面产生腐蚀麻坑较为普遍,而排气阀的烧蚀与折断是最严重的失效方式。

11.7.2 排气阀的材料

11.7.2.1 排气阀材料及技术要求

根据 GB10483《汽车发动机气门技术条件》,排气阀材料的化学成分应符合表 11-52 的规定。

排气阀材料的力学性能见表 11-53。

表 11-52 排气阀材料的化学成分(质量分数) (%)

材料牌号	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	W	Co	N	Fe	其他	用途	相当 牌号 ISO 683, XV
40Cr <sup>①</sup>	0.37 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.01	≤0.04		0.80 ~ 1.10	—	—	—		余	—	进气阀	
42CrMo <sup>②</sup>	0.38 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.04	≤0.04	≤0.35	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.25	—	—	—	余	—	进气阀	—
4Cr9Si2	0.35 ~ 0.50	2.0 ~ 3.0	≤0.7	≤0.03	≤0.035	≤0.60	8.0 ~ 10.0	—	—	—	—	余	—	进 排 气 阀	1
4Cr10Si2Mo	0.35 ~ 0.45	1.9 ~ 2.6	≤0.7	≤0.03	≤0.035	≤0.60	9.0 ~ 10.5	0.7 ~ 0.9	—	—	—	余	—	进 排 气 阀	2
8Cr20Si2Ni	0.75 ~ 0.85	1.75 ~ 2.25	0.20 ~ 0.60	≤0.03	≤0.030	1.15 ~ 1.65	19.00 ~ 21.50	—	—	—	—	余	—	进 排 气 阀	4

(续)

材料牌号	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	W	Co	N	Fe	其他	用途	相当牌号 ISO 683/ XV
X85CrMoV182 (1.4748)	0.80 ~ 0.90	≤1.00	1.00 ~ 1.50	-	-	-	16.50 ~ 18.50	2.20 ~ 2.50	-	-	-	余	V 0.40 ~ 0.60	进气阀	3
X60CrMnMoVNbN 2110(1.4785)	0.57 ~ 0.65	≤0.25	9.5 ~ 11.5	≤0.025	-	≤1.5	20.00 ~ 22.00	0.75 ~ 1.25	-	Nb 1.0 ~ 1.2	0.40 ~ 0.60	余	V 0.75 ~ 1.00	排气阀	-
5Cr21Mn9Ni4N (21-4N)	0.18 ~ 0.58	≤0.35	8.00 ~ 10.00	≤0.030	≤0.040	3.25 ~ 4.50	20.00 ~ 22.00	-	-	-	0.35 ~ 0.50	余	-	排气阀	8
Y5Cr21Mn9Ni4N (21-4NS)	0.48 ~ 0.58	≤0.35	8.00 ~ 10.00	0.010 ~ 0.090	≤0.040	3.25 ~ 4.50	20.00 ~ 22.00	-	-	-	0.35 ~ 0.50	余	-	排气阀	9
21-12N	0.15 ~ 0.25	0.75 ~ 1.25	1.00 ~ 1.50	≤0.030	≤0.030	10.50 ~ 12.50	20.00 ~ 22.00	-	-	-	0.15 ~ 0.25	余	-	排气阀	7
23-8N	0.28 ~ 0.38	0.60 ~ 0.90	1.50 ~ 3.50	≤0.015	≤0.040	7.00 ~ 9.00	22.00 ~ 24.00	-	-	-	0.28 ~ 0.40	余	-	排气阀	-
2Cr22Ni11N	0.15 ~ 0.25	≤1.00	1.00 ~ 1.60	≤0.030	≤0.035	10.00 ~ 12.00	20.50 ~ 22.50	-	-	-	-	余	-	排气阀	-
3Cr20Ni11Mo2PB	0.25 ~ 0.35	≤1.00	≤1.20	≤0.030	0.18 ~ 0.25	10.00 ~ 12.00	19.00 ~ 21.00	1.80 ~ 2.50	-	-	0.15 ~ 0.30	余	B 0.001 ~ 0.010	排气阀	-
DELORON0.60 (粉 102)	0.80	4.30	-	-	-	余	15.50	-	-	-	-	4	B 3.50	杆端面 堆焊	-
STELLITEN0.60 (Co 1)	1.10	1.00	0.90	-	-	2.80	28.00	0.90	4.00	余	-	2.8	-	盘锥面 堆焊	-
STELLITEF (F203)	1.80	1.10	0.10	-	-	22.00	25.00	0.50	12.00	余	-	2.8	-	盘锥面 堆焊	-

① 按 YB6。

表 11-53 排气阀材料的力学性能

材料牌号	热处理, °C				$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$\alpha_K$ /J·cm <sup>2</sup>	硬 度		热 处理 方法	相当牌 号 ISO 683/ XV
	淬火	回火	固溶 处理	时效						HBS	HRC		
40Cr <sup>①</sup>	850 油	500 水或油	-	-	≥980	≥784	≥9	≥45	≥58.8	≤207	-	淬火 回火	-
42CrMo <sup>①</sup>	850 油	580 水或油	-	-	≥1018	≥931	≥12	≥45	≥78	≤217	-	淬火 回火	-
4Cr9Si2	1020~ 1040 油	700~ 780 油	-	-	≥883	≥588	≥19	≥50	-	-	-	淬火 回火	1

(续)

材料牌号	热处理				$\sigma_s$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$\alpha_K$ (J·cm <sup>2</sup> )	硬 度		热处 理方 法	相当牌 号 ISO 683/ XV
	淬火	回火	固溶 处理	时效						HBS	HRC		
1Cr10Si2Mo	1010~ 1040 油	720~ 760 空冷			≥883	≥686	≥10	≥35	—	—	—	淬火 回火	2
8Cr20Si2Ni	1050~ 1080 油冷	700~ 800 快冷		—	≥883	≥686	≥10	≥15	≥9.8	≥262	—	淬火 回火	4
X85CrMoV182 (1.4758)	1050 油冷	760 空冷		—	—	—	—	—	—	—	—	淬火 回火	3
X60CrMoMoVNb 2110(1.4785)			1150 水冷	675 空冷	—	—	—	—	—	—	—	固溶 时效	—
5Cr21Mn9Ni1N (21-4N)			1150 快冷	730~ 780 空冷	≥883	≥559	≥8	—	—	≥302	—	固溶 时效	8
Y5Cr21Mn9Ni4N (21-4NS)			1150~ 1200 快冷	730~ 780 空冷	≥883	≥559	≥8	—	—	≥302	—	固溶 时效	9
21-12N			1177 水冷	—	≥820	≥430	≥26	≥20	—	—	—	—	7
23-8N			1163 水冷	774 空冷	≥500	≥190	—	≥70	—	—	—	—	—
2Cr22Ni11N			1050~ 1150 快冷	750~ 800 空冷	≥785	≥392	≥35	≥35	—	≤218	—	固溶 时效	—
3Cr20Ni11Mo2PB			1120~ 1150 快冷	730~ 760 空冷	≥883	≥490	≥20	≥25	—	≤269	—	固溶 时效	—
DELORON0.60 (粉102)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≥50	—	—
STELLITE N0.60 (Co-1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≥10	—	—
STELLITE F (F203)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≥39	—	—

① 按 YB6

GB10483 规定排气阀的热处理及其他技术要求如下:

(1) 气阀经调质处理后的硬度为 30~37HRC, 每个气阀的硬度差不得大于 4HRC。奥氏体钢或焊接气阀的硬度按图样规定。

(2) 气阀杆端面经淬火硬化后, 其硬度应不低于 50HRC。淬硬层深度不小于 0.8mm, 过渡区不得出现在锁夹槽部。

(3) 合金结构钢及马氏体型耐热钢气阀经调质处理后, 其金相组织为回火索氏体。奥氏体型耐热钢气阀, 其晶粒度按 YB27 中第一级别图进行

评定, 3 级以上(含 3 级)为合格。

(4) 外观要求: 气阀表面不得有裂纹、氧化皮及过烧现象。非加工表面应平整、光滑, 不允许有影响使用性能的锻造缺陷。工作表面不得有伤痕、麻点、腐蚀等有害缺陷。

(5) 气阀锻造金属流线, 应符合气阀外形的纤维方向。

(6) 杆部焊接的气阀, 焊接处的抗拉强度应不低于基体材料的抗拉强度; 杆端部焊接气阀其抗剪强度按图样规定。

(7) 气阀盘锥面应经密封性试验。

表 11-54 常用排气阀材料及其技术要求

钢 号	硬度(HRC)		杆端部硬化层 深度/mm	备 注
	杆部及盘部	杆端部		
4Cr9Si2	30~37	>50	>3	按不同型号发动机的要求提出
	30~40	>50		
	32~37	>50	>3	
4Cr10Si2Mo	30~40	≥50	3~5	按不同型号发动机的要求提出
	32~37	≥50	>3	
	30~35	≥50		
4Cr14Ni14W2Mo	220~280HBS 22~30	≥53	2~3	杆部渗氮 离子渗氮
		≥600HV	≥0.04	
		≥750HV	0.05~0.10	
5Cr21Mn9Ni4N	34~40	50~60	0.6~1.0	焊耐磨合金
5Cr21Mn9Ni4N 与 4Cr9Si2 焊接	28~38	35~63	1.5~3	电解液淬火或感应淬火
5Cr21Mn9Ni4N 与 45Mn2 焊接	28~38	35~63	1.5~3	

注：表中数据为有关生产厂的技术要求，有的与国家标准及行业标准略有差异。

(8) 气阀应经无损探伤。磁粉探伤后，应做退磁处理。

### 11.7.2.2 排气阀材料选择

排气阀材料要求有足够的高温强度和耐磨性能，良好的抗氧化和抗燃气腐蚀性能，较高的热传导率和较低的膨胀系数以及优良的冷热加工和焊接性能。

排气阀材料是按照其工作环境温度、介质及耐久性要求来选择的。目前多数选用马氏体型的 Cr—Si 钢和奥氏体型的 Cr—Mn—Ni 和 Cr—Ni 钢。常用排气阀材料及其技术要求见表 11-54。

### 11.7.3 排气阀的热处理工艺

#### 11.7.3.1 马氏体型耐热钢排气阀的热处理

1. 制造工艺路线 马氏体型耐热钢棒料→电锻→锻造成形→调质→矫直→机加工→杆端部淬火→抛光→成品。

2. 热处理工艺 马氏体型耐热钢排气阀都在稳定的回火索氏体组织状态使用。其热处理工艺为整体调质后杆端部局部淬火。

4Cr9Si2 排气阀调质处理的工艺参数见表 11-55。

4Cr9Si2 排气阀调质处理后有时会出现冲击韧性偏低的现象，可采用两次淬火调质工艺，第一次在 1020℃加热、油淬；第二次在 960℃加热、油淬后进行回火，回火后水冷。这样处理可提高冲击韧性，改善钢的综合性能，但也降低了排气阀的硬度。4Cr9Si2 钢在 450~600℃回火有回火脆性，因此回火后需快速冷却。

4Cr10Si2Mo 钢排气阀的热处理工艺见表 11-56。

排气阀热处理后需经喷丸和矫直，为了消除内应力，可再进行第二次回火(300℃, 120min, 空冷)。马氏体型耐热钢排气阀一般都采用杆端部局部淬火，以提高其耐磨性。气阀杆端部表面淬火后硬度应为 50HRC 以上，当杆端部长度大于 4mm 时，硬化层深应不小于 2mm。当杆端部长度小于或等于 4mm 时，硬化层深不小于 1mm。杆端部表面淬火可采用感应加热、电解液加热及火焰加热淬火等方法来实现。

表 11-55 4Cr9Si2 排气阀调质处理的工艺参数

工 序	加热温度/℃	加热介质	保温时间/min	冷却方式	显微组织
淬 火	1030~1050	盐 浴	5~20	油淬水冷	马氏体+碳化物
回 火	680~700	空 气	90~120	油冷或水冷	回火索氏体+碳化物

表 11-56 4Cr10Si2Mo 钢排气阀的热处理工艺

序号	淬 火					回 火			硬度 (HRC)
	温 度 /℃		加热介质	时间 /min	冷却方式	温度 /℃	时间 /min	冷却方式	
	预 热	淬 火							
1	850	1040±10	盐浴	5~8	油冷	630±10	150	水冷	31~36
2	850	1050±10	盐浴	5	油冷	680±10	120	空冷	32~37
3	840	1050±10	盐浴	15	油冷	750±10	180	空冷	33~35

## 11.7.3.2 奥氏体型耐热钢排气阀的热处理

1. 制造工艺路线 根据 GB/T 12773《内燃机气阀钢钢棒技术条件》,气阀的原材料可按退火状态或固溶处理状态提供。排气阀可分为整体阀与焊接阀,不少奥氏体型耐热钢排气阀的盘锥面采用等离子堆焊,杆端面采用氧-乙炔堆焊硬质合金。奥氏体型耐热钢排气阀的制造工艺路线可分为以下两种:

(1) 整体阀:下料→电锻→顶锻→热处理→加工→盘锥面及杆端面堆焊合金→热处理→精加

工→表面处理→成品。

(2) 焊接阀:盘部、颈部下料→电锻→顶锻  
杆部、锁夹槽部、杆端部下料  
→热处理→加工→盘锥面堆焊  
→热处理→加工→对焊→  
→矫直→去应力→退火→加工→杆端部感应淬  
火。

2. 热处理工艺 奥氏体型耐热钢排气阀一般都经固溶处理和时效。5Cr21Mn9Ni4N 钢经不同工艺热处理后的组织和性能见表 11-57。

表 11-57 5Cr21Mn9Ni4N 钢经不同热处理后的组织和性能

热处理工艺名称		固溶热处理	不完全固溶热处理	退 火
工艺规范		1150~1180℃, 0.5~1h 后水冷	1070~1120℃, 0.75~1h 后水冷	850~900℃ 加热 6h 后炉 冷
显微组织		奥氏体基体+极少量碳化物	奥氏体基体+少量细小 均布的碳化物	奥氏体基体+大量细小颗 粒状碳化物
晶粒度(级)		2~5	5~9	9~10
电锻成品率(%)		30~90	≥95	90~98
切削加工性能		较难切削	较易切削	易切削
高温持久强度	750℃ 加热 100h	160MPa 1150℃ 加热、水冷, 750℃ 回火 4h 空冷	125MPa 1100℃ 加热 0.5h 水冷, 750℃ 回火 4h 空冷	60MPa 900℃ 加热 7h 缓冷
	800℃ 加热 100h	80MPa 1170℃ 加热 0.5h 后水 冷, 750℃ 回火 8h 后空冷	62MPa 1100℃ 加热 1.5h 水冷, 750℃ 回火 8h 空冷	37MPa 800℃ 加热 6h 缓冷
室温力学性能	$\sigma_b$ /MPa	710~1150	1070~1275	1050~1128
	$\sigma_s$ /MPa	570~875	760~895	758~765
	$\delta$ (%)	3.4~36	11~30	12.4~33
	$\psi$ (%)	4~32.5	12~31	12.8~30
	硬度(HBS)	≥302	280~330	295~310

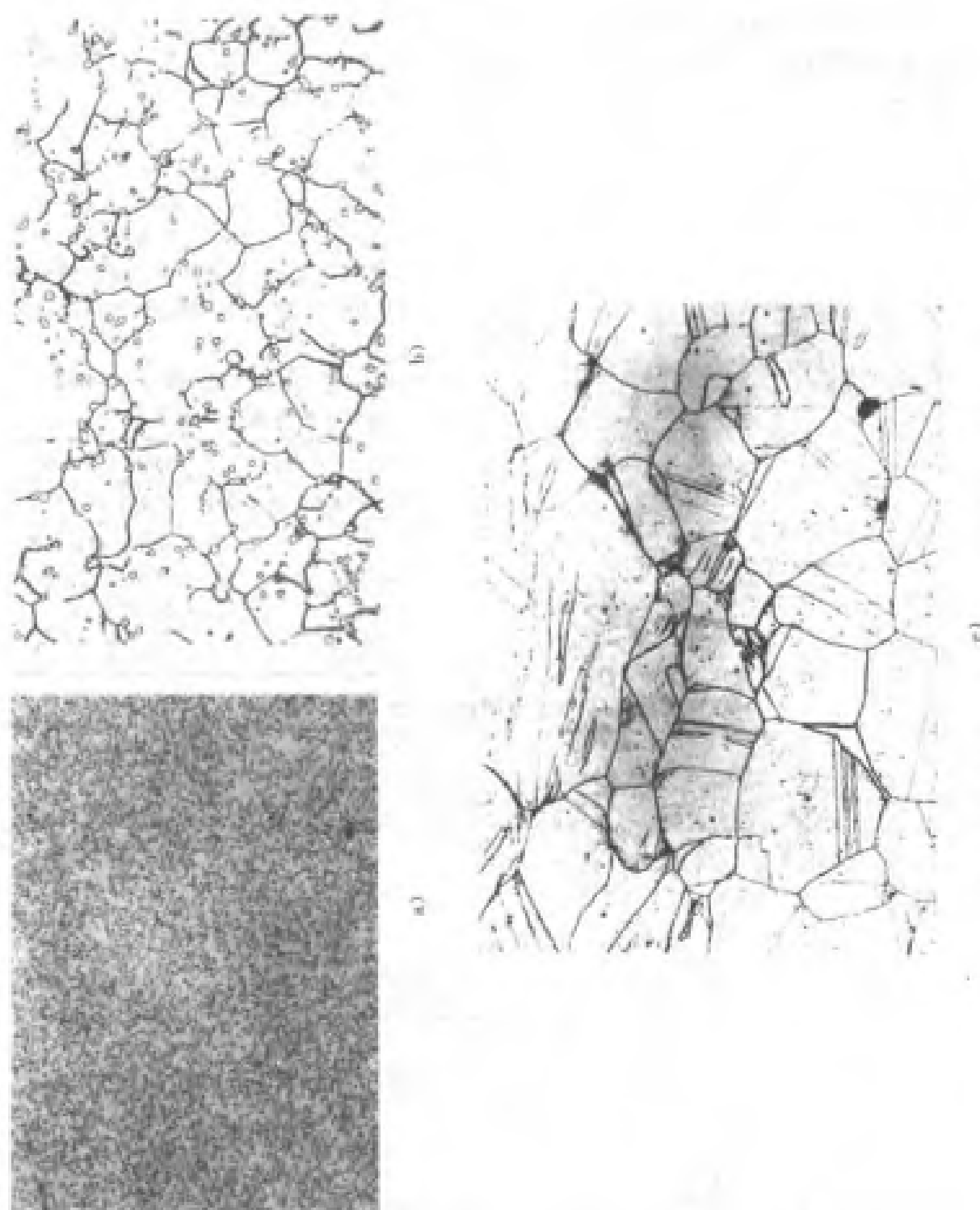


图 11-26 5Cr21Mn9Ni4N 钢三种不同状态的组织

a) 退火, 400× b) 不完全固溶热处理, 400× c) 固溶热处理, 100×



按上表经不同热处理后的 5Cr21Mn9Ni4N 钢所得的显微组织见图 11-26。从上表可以看出:原材料采用退火状态,具有良好的电镀和切削加工性能。经加工后进行固溶热处理,可获得良好的高温强度。另外,5Cr21Mn9Ni4N 钢的固溶温度范围很窄,固溶温度过低则冷拔、矫直比较困难;若固溶温度过高,易产生过热、过烧,产生这类缺陷,生产厂是无法补救的。

5Cr21Mn9Ni4N 钢的典型热处理工艺见图 11-27。

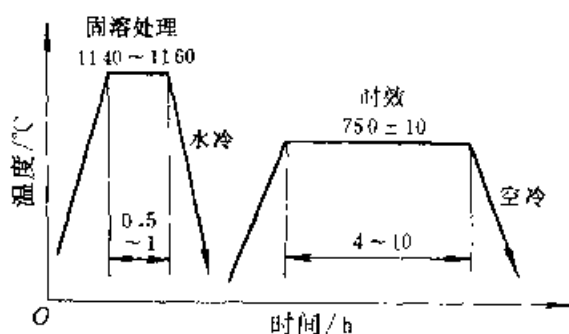


图 11-27 5Cr21Mn9Ni4N 钢排气阀的典型热处理工艺

原材料若已经过固溶热处理,则制造厂不再进行固溶热处理,只需进行时效处理。时效处理不但可以消除加工应力,而且可以提高强度、硬度和

韧性。时效温度应严格控制,温度过高,会产生层状析出,析出物主要是  $M_{23}C_6$  和少量  $CrN$ 。层状析出会导致降低室温韧性、疲劳强度、耐蚀性能。层状析出的产生还与固溶温度过高、固溶后冷却速度太慢、钢中氮含量不合理等因素有关。一旦产生层状析出,生产中是很难补救的,所以生产中应严格控制,以防止这种组织出现。

奥氏体钢整体排气阀应在磨削加工后进行镀铬或渗氮处理,以提高阀杆及杆端面耐磨性。

采用 4Cr9Si2 钢或 45Mn2 钢制造阀杆可以节省贵重的 5Cr21Mn9Ni4N 钢,改善导热性能以及通过适当的热处理进一步改善排气阀的使用性能。5Cr21Mn9Ni4N 钢与 4Cr9Si2 钢焊接排气阀热处理工艺见表 11-58。

表 11-58 5Cr21Mn9Ni4N 钢与 4Cr9Si2 钢焊接排气阀热处理工艺

热处理工艺名称	热处理工艺规范
5Cr21Mn9Ni4N 固溶处理、时效	参见图 11-27
4Cr9Si2 淬火、回火	1050℃ 盐炉加热 5~20min 后淬油, 670℃ 回火 1h
去应力退火	370℃ 1h

表 11-59 4Cr14Ni14W2Mo 钢化学成分(质量分数) (%)

材 料	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	W	Fe
4Cr14Ni14W2Mo	0.40~0.50	≤0.8	≤0.7	≤0.03	≤0.035	13.0~15.0	13.0~15.0	0.25~0.40	2.00~2.75	余量

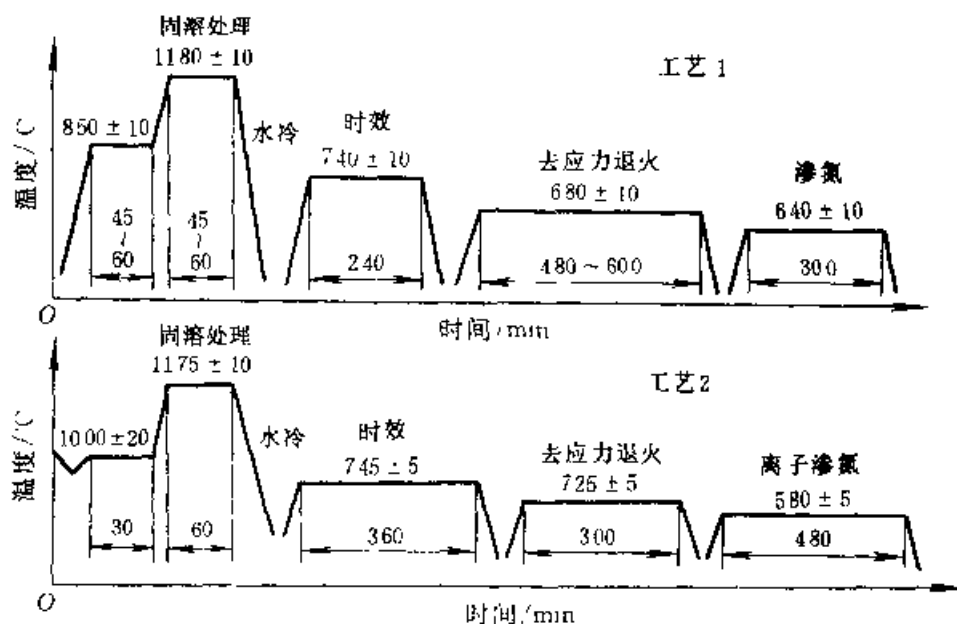


图 11-28 4Cr14Ni14W2Mo 排气阀热处理工艺

焊接排气阀的杆端部应进行感应淬火或电解液淬火。21-4N 钢排气阀的杆端面 and 盘锥面可根据设计要求堆焊钴基或镍基合金,常用的有司太立(Stellite)合金、国产的 Co-01~Co-04、Ni-02~Ni-04 等钴基或镍基合金。

机车及船用大马力柴油机的排气阀常用 4Cr14Ni14W2Mo 钢制造,其化学成分见表 11-59。

4Cr14Ni14W2Mo 钢排气阀热处理工艺见图 11-28。

### 11.7.4 排气阀的质量检验

汽车发动机排气阀的质量检验应按 GB 10483 规定的检验方法和检验规则进行。

排气阀热处理质量检验见表 11-60。

表 11-60 排气阀热处理质量检验

检验项目		检验方法	检 验 要 求
纤维方向		宏观检查	锻造金属流线应符合气阀外形的纤维方向
表面质量		观 察	表面不得有裂纹、氧化皮及过烧现象。工作表面不得有伤痕、麻点、腐蚀等有害缺陷,非加工表面应平整、光滑,不允许有影响使用性能的锻造缺陷
硬度 (HRC)	杆部、盘部	硬度测量	30~37(每个气阀的硬度差不得大于 4HRC)
	杆端部		≥ 50
基体金 相组织	合金结构钢	金相显微镜观察	应为回火索氏体,其游离铁素体含量不得超过视场面积的 5% (体积分数),1 级合格。奥氏体晶粒度 ≥ 6 级
	马氏体耐热钢		应为回火索氏体,不允许有游离铁素体及连续网状碳化物,奥氏体晶粒度 ≥ 6 级
	奥氏体耐热钢		为奥氏体,奥氏体晶粒度 ≥ 3 级,层状析出物按照产品图样及技术文件规定
渗氮层	渗氮层深度	金相显微镜观察	应符合产品图样及技术文件规定
	渗氮层疏松		1~3 级为合格
	渗氮层中氮化物		马氏体钢气阀离子渗氮渗氮层中氮化物级别 1~3 级合格
堆 焊 层		金相显微镜观察	堆焊合金层与基体之间应为冶金结合,其金相组织及冶金质量应符合产品技术文件的规定
杆端部淬火硬化层		金相显微镜观察	硬化层深度应符合 JB/T 6012 或产品图样要求
探 伤	磁粉探伤		应无裂纹
	超声波探伤		用于焊接排气阀焊缝探伤,应无裂纹

注: JB/T 6720 内燃机进、排气门金相检验。JB/T 6719 内燃机进、排气门磁粉探伤。

(续)

### 11.7.5 排气阀的常见热处理缺陷及预防补救措施

排气阀常见热处理缺陷的预防及补救措施见表 11-61。

表 11-61 排气阀常见热处理缺陷的预防及补救措施

缺陷名称	产 生 原 因	预防及补救措施
裂纹	锻造温度过高或 停锻温度太低	调质前进行磁粉探伤,可检查出锻造裂纹,如果裂纹深度 ≤ 0.5mm 可事前除去

缺陷名称	产 生 原 因	预防及补救措施
奥氏体 晶粒粗大	锻造加热温度过高,固溶温度过高、 时间过长	应严格按照规定操作
奥氏体 钢的层状 析出	固溶和时效温度过高、时间过长,固溶后冷却速度不够。 钢中含氮量不合适	严格按照规定操作,检查钢中含氮量

## 11.8 半轴的热处理

### 11.8.1 半轴的服役条件和失效方式

半轴是机动车辆上驱动车轮的杆件,一般载重车采用全浮式半轴,它主要承受驱动和制动转矩,小客车多用半浮式半轴,工作载荷为弯扭复合力矩。此外,半轴还受一定的冲击载荷。

多数半轴为一端法兰式(图 11-29a),重型车常用二端花键式(图 11-29b),而越野车的内、外半轴是变截面台阶轴(图 11-29c)。半轴使用寿命主要决定于花键齿的抗压陷和耐磨损的性能。载重车半轴易损坏的部位还有杆部与凸缘的连结处(图 11-29a 中 C 处)或花键端(图 11-29a 中 A 处)以及花键与杆部相联结处(图 11-29a 中 B 处)。A 处的花键齿与齿轮直接接触,受冲击扭转力最大。B、C 处应力集中严重。在上述部位易产生疲劳断裂。

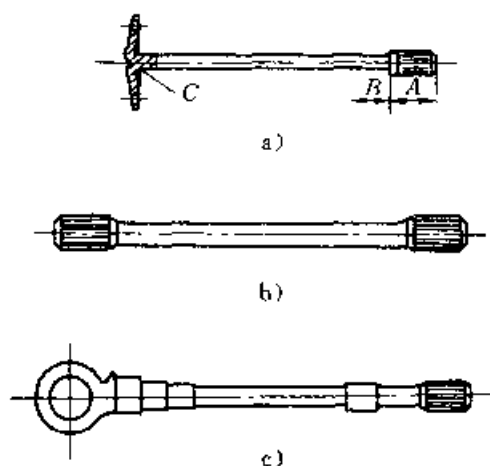


图 11-29 各类汽车半轴示意图

- a) 一端法兰式 b) 二端花键式  
c) 变截面台阶轴

### 11.8.2 半轴材料

半轴应具有足够的强度(大多数半轴的计算工作应力  $\tau_{\max} = 347 \sim 530 \text{ MPa}$ )、韧性和良好的抗疲劳性能,一般都用中、低碳合金钢制造。当硬度在 45HRC 以下时,半轴的疲劳强度随硬度增加而成比例地增加。所以调质半轴的硬度范围取 37~47HRC 为宜。

图 11-30 是半轴的应力分布情况,除法兰盘根部和花键根部应力较高外,其他部分是比较均匀的,而截面内应力是表面最大,心部为零。所以在

选用材料和强化工艺时应保证半轴的强度分布能与其在使用工况下的应力分布相适应。

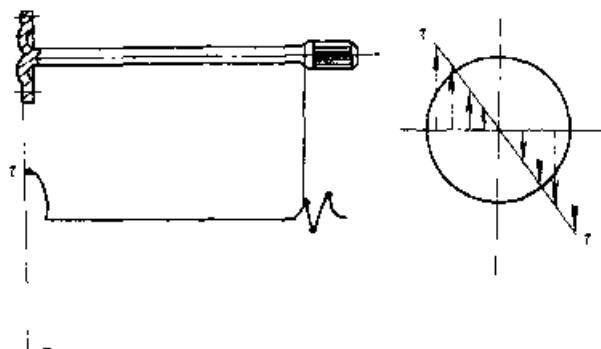


图 11-30 半轴沿长度方向和截面内应力分布示意图

按照 ZB/T21 001《汽车半轴技术条件》的规定,汽车半轴的技术要求主要有:

(1) 在保证产品设计性能要求条件下,推荐采用的半轴材料牌号为 40Cr、42CrMo、10MnB、40CrMnMo、35CrMo、35CrMnSi、10CrV 和 45 钢。

(2) 半轴热处理工艺,推荐采用预调质处理后表面中频感应淬火处理工艺。预调质处理后,心部硬度为 24~30HRC;中频感应淬火处理后杆部表面硬度不低于 52HRC;花键处允许降低 3HRC;杆部硬化层深度范围为杆部直径的 10%~20%,硬化层深度变化不大于杆部直径的 5%;杆部圆角应淬硬;法兰盘硬度不低于 24HRC。在保证半轴性能指标要求条件下,也允许采用其他热处理工艺,如正火处理后进行表面中频感应淬火工艺。

(3) 感应淬火后半轴的金相组织:预调质处理后表面中频感应淬火处理,硬化层为回火马氏体,心部为回火索氏体;正火处理后表面中频感应淬火处理,硬化层为回火马氏体,心部为珠光体加铁素体。

(4) 半轴表面不应有折叠、凹陷、黑皮、划痕及裂纹等缺陷。杆部表面允许有磨去裂纹的痕迹。磨削后存在的磨痕深度不大于 0.5mm,同一横断面不允许超过两处。

(5) 半轴磁力探伤后应退磁。

无论是调质半轴或是表面感应淬火的半轴,均要选择淬透性合适的材料,以保证半轴的淬硬层深度达到规定要求。所以,小型的汽车、拖拉机

半轴往往选用 40Cr、40MnB 钢制造；而对粗大的重型载重汽车半轴需选用淬透性较高的合金结构钢（如 12CrMo、40CrNi、40CrMnMo）。材料淬透性太低，则半轴的静扭转强度和疲劳极限将达不到要求；而淬透性过高，则表层残余压应力降低，使疲劳强度下降，甚至形成淬火裂纹。

半轴常用材料及技术要求列于表 11-62。

越野车的内、外半轴一般是变截面台阶轴，要求较高的冲击韧性；过去往往采用低碳合金钢渗碳处理，现多采用中碳合金钢感应淬火。

### 11.8.3 半轴的热处理工艺

#### 11.8.3.1 半轴的调质

1. 制造工艺路线 下料→锻造成形→正火或退火→机械加工→调质→喷丸→矫直→精加工→成品。

2. 热处理工艺 调质半轴的锻坯热处理主要考虑机械加工的要求，一般采用正火处理，对于正火后硬度过高的钢材，可采用退火。表 11-63 列出了几种半轴的锻坯热处理工艺。半轴调质工艺见表 11-64。

表 11-62 半轴常用材料及技术要求

产品	钢 号	预备热处理	整体调质		感应淬火		渗碳淬火	
			杆 部 (HRC)	法 兰 (HRC)	层 深 /mm	表面硬度 (HRC)	层 深 /mm	表面硬度 (HRC)
轿车、 吉普车	10Cr	正火	28~32	28~32	4~6	50~55	—	—
	40MnB		11~17	—	—	—	—	—
	20CrMnTi		—	—	—	—	1.5~1.8	58~63
	12CrMo		37~41	22~32	1~2	50~55	—	—
载重车	10Cr	正火	—	—	3~6	49~62	—	—
	12Cr2Ni4A	正火	—	—	—	—	1.2~1.6	58~63
	10MnB	正火 187~241HBS	—	—	4~7	52~58	—	—
	40MnB	调质 229~269HBS	—	—	1~7	52~63	—	—
重型车	10CrMnMo	退火 ≤255HBS	37~41	—	—	—	—	—
	40Cr	正火	—	—	7~10	50~55	—	—
	40CrNi	退火	—	—	8~10	53~60	—	—

表 11-63 几种半轴锻坯热处理工艺

钢 号	工 艺	加热温度 /℃	保温时间 min	冷 却 方 式	硬 度 (HBS)
40MnB、40Cr	正火	860~900	45	流动空气冷却，以 80℃/h 的冷速冷到	187~241
40CrMnMo	退火	860~880	100	600℃ 后空冷	≤255

表 11-64 半轴调质热处理工艺

钢 号	淬 火			回 火			
	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却方式	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却方式	硬 度 (HRC)
10MnB	840±10	45	油 冷	300~350	150~180	水冷	41~47
40CrMnMo	810±10	60	油 冷	480±10	120	水冷	37~41
40Cr	840~860	50~55	垂直入水 3~5s 后，提拉出水空冷	400~460	120~150	水冷	37~44

## 11.8.3.2 半轴的感应淬火

1. 制造工艺路线 下料→锻造成形→调质或正火→铣端面、打中心孔→矫直→机械加工→清洗→中频感应淬火、回火或自热回火→矫直→精加工→成品。

锻坯热处理的目的,除考虑机械加工的要求外,还要为感应淬火作组织准备。一般采用调质处理,有条件的厂最好采用锻热淬火加高温回火,这对以后的加工和感应淬火都极为有利。

此外,应高度重视冷、热加工协调对热处理质量的影响。如汽车半轴感应加热定位,应根据加工

工艺特性进行分析,作到冷、热加工工艺、检验定位基准统一。半轴法兰轴端中心孔深度与法兰内端面的相对位置要准确,以保证法兰内端面与矩形感应器的距离,此距离过大或过小都不能保证感应淬火热处理质量,将导致半轴工作时早期损坏。

## 2. 热处理工艺

(1) 半轴感应淬火后的力学性能,半轴经感应淬火后,屈服强度与疲劳极限均有提高,尤以疲劳极限的提高最为显著(见表 11-65 及表 11-66)。

表 11-65 半轴静扭强度对比试验结果

半轴直径 , mm	钢 号	热 处 理	硬化层深 mm	屈服扭矩 J	断裂扭矩 J	最大扭角 (°)	断裂部位
35	40Cr	调质		5000~5600	7700~8100	90~100	近花键
		调质+感应淬火	~4	6000~6500	8200~8500	60~80	杆部
50	40MnB	调质		16500~17000	23700~24500	300~600	杆部
		正火+感应淬火	1	15000~17000	16750~20500	45~75	花键尾根
		正火+感应淬火	3	16000~18000	19000~23000	37~53	花键尾根
		正火+感应淬火	6.5	18000~20000	23000~24500	42~50	花键尾根
		正火+感应淬火	8	21000~22000	28500~30000	55~63	花键尾根
52	40MnB	调质+感应淬火	10~11	20000~20500	30000	63~67	花键尾根
		正火+感应淬火	16~17	23000~25000	30000~32000	63	花键尾根
	40CrMnMo	调质		20000~21000	30000	150~190	--

表 11-66 40MnB 钢半轴疲劳极限对比试验结果

编号	热 处 理	表面硬度 (HRC)	硬化层深 , mm	硬化层深与直径 之比(%)	循环次数 ( $\times 10^3$ )	损 坏 情 况	备注
1	调质	37~42	--	--	132	花键部分断裂	第一组
2	中频感应淬火	54~58	4~6.5	8~13	590	花键齿早期断裂	
3		46~48	3~6.5	6~13	501	未损坏	
4		52~58	3.2~6.6	--	501	花键处产生疲劳裂纹	
5	调质	37~42	--	--	9	近花键处断裂	第二组
6	中频感应淬火 250°C 回火	52	4~7	9.5	200	未断	
7	中频感应淬火 300°C 回火	50~52	4~7	9.5	134	杆部断裂	
8	中频感应淬火 250°C 回火	52~54	4~7	9.5	200	未断	

试验条件:第一组扭转力矩 0~6000N·m

第二组扭转力矩 0~3300N·m。

频率 400 次/min;扭转摆角  $\pm 5.75^\circ$ 。

表中数据表明:感应淬火半轴的静扭强度高  
于调质半轴,感应淬火层愈深,其静扭强度愈高。  
数据还表明,40MnB 钢中频感应淬火可以代替  
40CrMnMo 钢调质半轴。表 11-66 中数据还表明:  
中频感应淬火半轴疲劳寿命比调质半轴提高很多  
倍,因此半轴调质处理工艺多数已被中频感应淬  
火所取代。

(2) 半轴感应淬火工艺参数的选择,半轴淬  
硬层深度的确定应以保证半轴内任何一点的扭转  
应力均小于或等于该点的剪切屈服强度。图 11-  
31 中点划线表示半轴感应淬火后的强度分布情  
况, $a'O$  表示半轴的扭转应力分布情况。若淬硬层  
太浅,则半轴强度不足,图 11-31a 中  $b'h$  区域为危  
险区;若淬硬层太深图 11-31c,则由于半轴表层残  
余压应力降低而降低疲劳寿命。合适的淬硬层深  
度应如图 11-31b 所示。

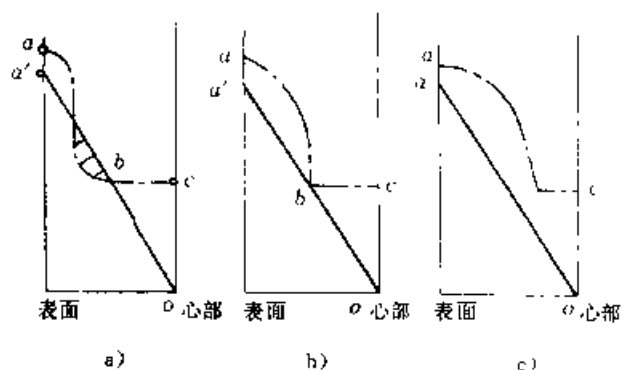


图 11-31 半轴感应淬火硬化层与强度分布  
a) 太浅 b) 合适 c) 太深

通常,感应淬火硬化层深度可以根据半轴杆  
部直径的大小和产品设计结构形状来确定。对轻  
型载重车和小轿车的法兰盘式半轴(杆部直径在  
50mm 以下)淬硬层深度可按下列要求确定(参阅  
图 11-32)。

花键部:齿根硬化层深度(按测量到半马氏体  
区计算)应达到花键部轴颈的  $10\%$  ( $\delta_1 = 10\% D$ )。

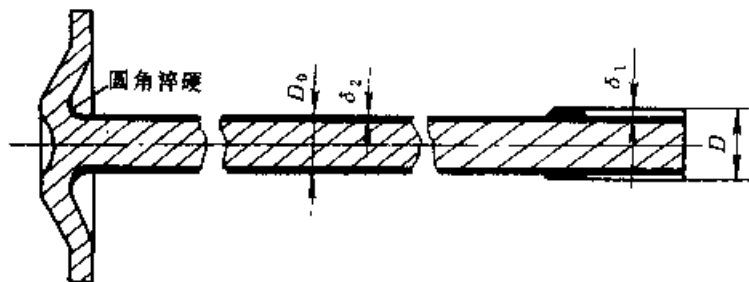


图 11-32 半轴表面淬火的硬化层深度

杆部:硬化层深度应达到杆部直径的  $15\%$  ( $\delta_2 = 15\% D_0$ )。

法兰根部:要求法兰盘与杆部连接的过渡角  
淬硬。在实际生产中,圆角处硬化区域的最小直  
径应比半轴杆部直径大  $25\%$ 。

这些要求是为了保证半轴的静强度和疲劳强  
度。花键与杆部的淬硬层深度对静强度影响较大,  
法兰圆角淬硬对疲劳极限影响较大。每种表面淬  
火半轴都有最佳的硬化层深,应考虑到硬化层深  
对表层残余压应力的影响。表 11-67 列出了直径  
为 50mm 的带法兰半轴感应淬火后花键尾根部位  
的残余压应力。

表 11-67 40MnB 半轴感应淬火  
后表面残余压应力

工 艺	硬化 层深 mm	硬化层深与 直径之比 (%)	残余压 应力 (MPa)
正火—感应淬火	4	8	-400
正火+感应淬火	5	10	-480
正火+感应淬火	6.5	13	-324
正火+感应淬火	8	16	-340
调质	-	-	260

从表中可看出硬化层深超过最佳值后,再增  
加硬化层深则表面残余压应力下降。试验表明,随  
表面残余压应力下降,其疲劳寿命也随之下落。

半轴感应淬火,一般都采用功率为  $100 \sim$   
 $320\text{kW}$ 、频率为  $2500 \sim 8000\text{Hz}$  的中频电源,连续  
加热者频率较低,整体一次感应淬火的所需频率  
较高,功率也大些。为了保证法兰圆角加热,可采  
用带导磁体的感应器。

半轴整体感应淬火后可以自热回火。连续加  
热淬火的半轴可以采用整体感应加热回火,中频  
电源是  $100\text{kW}$ 、 $2500\text{Hz}$ 。也可采用在电炉内回火,  
回火温度一般为  $180 \sim 250^\circ\text{C}$ 。回火  
后表面硬度要求为  $52 \sim 58\text{HRC}$ 。

EQ1090E 后桥半轴连续淬火后  
经不同方式回火的疲劳试验数据见  
表 11-68。数据表明,感应加热回火的  
疲劳寿命较炉中回火为高。其原因  
是,感应快速加热时,最表层首先瞬  
时产生马氏体分解,使体积收缩处于  
相变超塑性阶段,待整体回火完成后

表层形成更大的压应力,具有一个更理想的有利于提高疲劳强度的应力分布;而炉内加热缓慢没有这种条件。

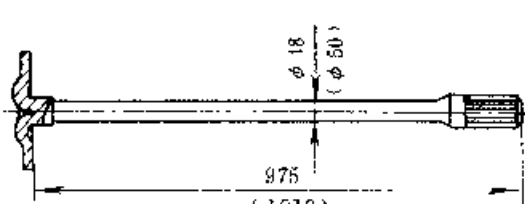
(3) 半轴感应加热表面淬火举例,40MnB 钢

制造的带法兰半轴的表面淬火工艺技术要求见表 11-69,其淬火工艺可以采用连续加热淬火和整体一次加热淬火,工艺参数见表 11-70 和表 11-71。

表 11-68 半轴炉中回火和感应加热回火的疲劳寿命比较

回火方式	淬硬层深度/mm			表面硬度(HRC)			疲劳次数 ( $\times 10^4$ )
	花 键	杆 部	法兰根	花 键	杆 部	法兰根	
炉中回火	5.0	7.0	5.0~8.4	52~61	52~56	52~56	53.8 出现裂纹
感应加热回火	5.6~6.0	6.0~7.0	6.0~8.0	52~58	52~57	51~54	试至 724 次未断
矫直后感应加热回火	5.5	6.0	6.3~8.0	53~57	53~58	53~56	试至 727 次未断

表 11-69 40MnB 钢半轴表面感应淬火技术要求

技 术 要 求				零 件 简 图	
车型	硬 度		硬化层深度/mm		
	正火后 (HBS)	表面淬火后 (HRC)	花键部	杆 部	
CA10	187~241	52~58	4~6	5~7	
EQ1090	187~241	52~63	1~7	4~7	

注:表图中尺寸 1019 为 EQ1090 半轴杆长。

表 11-70 40MnB 钢半轴感应加热淬火工艺参数(CA10)

项 目	连续淬火			整体 淬火
	法 兰 圆角	杆部	花键	
发电机空载电压/V	340	400	400	730
发电机负载电压/V	335	410	400	730
发电机负载电流/A	280	285	250	460
发电机有效功率/kW	85	89	85	260
功率因数(cosφ)	1.0	0.99	0.98	0.9
变压器匝比	11:1			12:1
电容量/μF	147.35			
加热时间/s				58
冷却时间/s	—			28
水压/MPa	0.15~0.35			0.15~ 0.35
淬火冷却介质温度/℃	25~15			30~40
淬火冷却介质(质量分数)	0.2%~0.3%聚乙 烯醇水溶液			水
感应器移动速度/ mm·s <sup>-1</sup>	3~12,常用 3~6			

表 11-71 40MnB 钢半轴感应加热淬火工艺参数(EQ1090)

项 目	连续淬火			整体淬火	
	法 兰 圆角	杆部	花键	机组	晶闸管 电源
发电机空载电压/V	—	—	—	750	—
发电机负载电压/V	420	730	750	730	620
发电机负载电流/A	140	145	145	460	1000
发电机有效功率/kW	33	80	75	260	400
功率因数(cosφ)	0.9	0.93	0.9	0.95	0.95
变压器匝比	24:1			5/2	5/2
电容量/μF	39.5			28	210
加热时间/s				60	32
冷却时间/s				28	28
水压/MPa	0.15~0.3			0.15~0.3	
淬火冷却介质温度/℃	20~40			25~40	
淬火冷却介质(质量分数)	0.2%~0.3%聚乙 烯醇水溶液			水	
感应器移动速度/ mm·s <sup>-1</sup>	3~12				

半轴曾采用连续淬火,其感应器如图 11-33 所示。现在采用矩形感应器进行整体一次加热淬火,感应器有效圈示意图见图 11-34

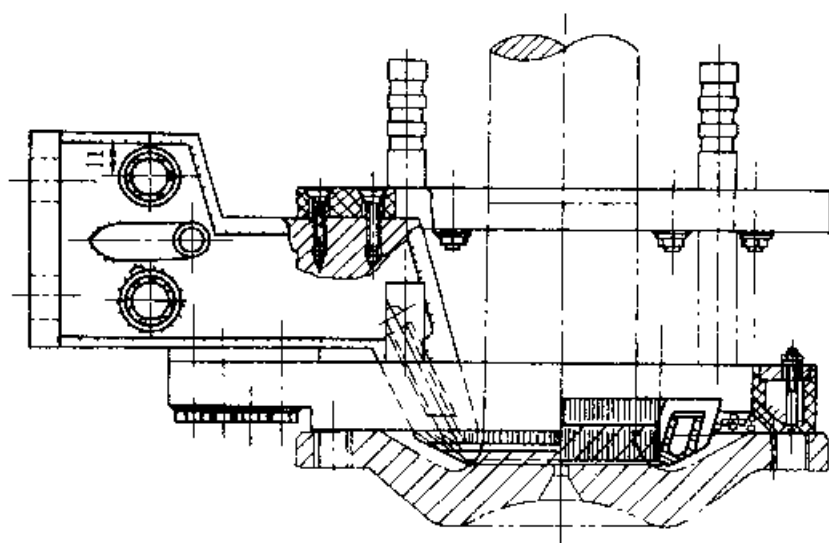


图 11-33 半轴连续淬火用感应器

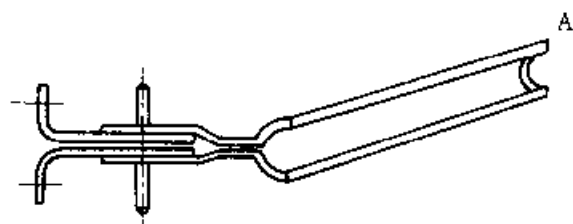


图 11-34 半轴整体一次感应淬火  
感应器有效圈示意图

半轴连续淬火存在效率低,不便于机械化和自动化的缺点,而且连续淬火使半轴靠近光杆的花键区常常产生软带,强度较低,使用中往往在花键尾部断裂。这是由于感应器移到该处时,磁感应线强烈地偏移到未失去铁磁性的光杆部位所引起的。采用矩形感应器进行整体一次感应加热时,其有效圈电流方向平行于半轴中心线,并产生垂直于工件轴线的横向磁场,所以半轴的轴向几何尺寸变化(如花键—光杆、多阶轴及台肩轴等)时,不会引起磁感应线的偏移。所以工件表面的感应电流是均匀的,半轴表面可以获得均匀加热。图 11-35 是带法兰的半轴采用矩形感应器整体一次感应加热淬火时实际观察的表面均温加热曲线。由于在有效圈 A 端圆弧(见图 11-34)上镶有硅钢片导磁体,所以法兰根部圆角部位升温较快,加热均温时间长,保证了该处的硬化层深和足够的硬化区域。采用整体一次感应淬火还能提高花键齿顶

的硬度。

采用矩形感应器加热时,由于感应器和零件之间间隙较大(一般为 5~8mm),所以升温慢,加热时间长,硬化层较厚且均匀

半轴回火也可采用矩形感应器加热,采用 15~20°C/s 的升温速度,控制感应加热回火温度在 (250±10)°C 范围内,可以使半轴表面硬度控制在 52~63HRC 的范围内,性能良好。

### 11.8.3.3 半轴的渗碳热处理

1. 制造工艺路线 下料→锻造成形→预备热处理→矫直→机械加工→渗碳→淬火、回火→矫直→精加工→成品。

2. 热处理工艺 渗碳半轴锻坯热处理主要考虑机械加工的要求,并为渗碳热处理作组织准备,一般采用正火处理。对于正火后硬度较高的钢材,可以再加一次高温回火处理。表 11-72 列出几种半轴锻坯的热处理工艺。

20CrMnTi 钢半轴的渗碳热处理工艺见图 11-36。

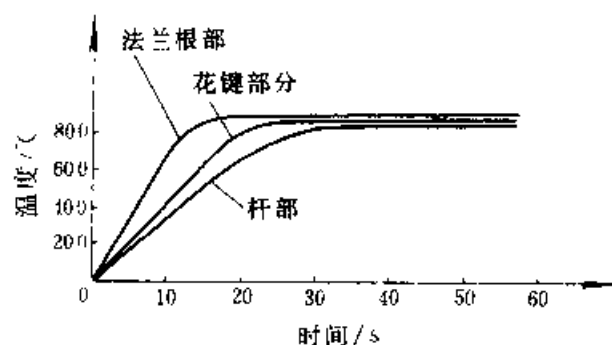


图 11-35 采用矩形感应器整体一次感应加热淬火时,半轴表面的均温加热曲线

表 11-72 几种渗碳半轴的锻坯热处理工艺

钢 号	工艺名称	加热温度 /°C	保温时间 /min	冷却方式	硬度 (HBS)
12Cr2Ni	正火	960~980	150~180	空冷	≤269
	回火	640~660	120	空冷	
20CrMnTi	正火	960~980	150~180	风冷	156~207



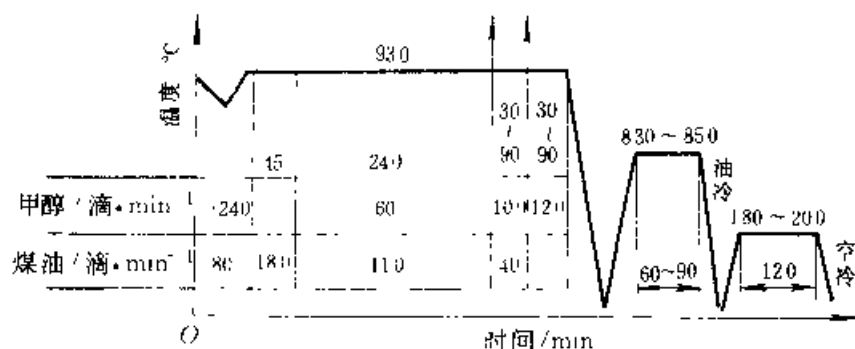


图 11-36 20CrMnTi 渗碳半轴热处理工艺

## 11.8.4 半轴的质量检验

常用合金结构钢半轴调质的质量检验见表 11-73, 半轴表面感应淬火的质量检验见表 11-74。

表 11-73 常用合金结构钢半轴  
调质的质量检验

检验项目		检验方法	检验要求
硬度 (HRC)	淬火后	用硬度计	≥49
	回火后	测量抽检	38~50
硬化层深度		测至半马氏体区	大于杆部半径的 1/2
显微组织	硬化层	显微观察	回火后为索氏体或带有部分托氏体的索氏体
	心部		从中心到花键底径半径 3.4 范围允许有铁素体
径向圆跳动/mm		以顶尖孔定位	按图样及工艺文件要求

表 11-74 半轴表面感应淬火的质量检验

检验项目	检验方法	检验要求		
		花键部	杆部	法兰圆角
硬化层深度	硬度计(GB5617)	$\delta_1 \approx 10\% D_1$	$\delta_2 \approx 15\% D_0$	淬硬
表面硬度(HRC)	硬度计	≥49	≥52	-
硬化部位	硬度计或锉检	按图样要求		
显微组织	显微观察	硬化层内为回火马氏体, 心部为回火索氏体		

(续)

检验项目	检验方法	检验要求		
		花键部	杆部	法兰圆角
畸变	用百分表	按图样要求 一般: 杆部径向圆跳动 ≤ 1mm 花键部径向圆跳动 ≤ 0.3mm		
探伤	磁力探伤机	无裂纹		

## 11.8.5 半轴的常见热处理缺陷及预防补救措施

半轴调质的常见热处理缺陷的预防及补救措施见表 11-75。半轴表面感应淬火的常见缺陷的预防及补救措施见表 11-76。

表 11-75 半轴调质常见缺陷的  
预防及补救措施

缺陷名称	产生原因	预防及补救措施
淬火后硬度低或硬化层深不够	1) 加热温度低或加热时间短 2) 加热后在空气中停留时间长, 零件降温过多 3) 水温太高	可重新加热淬火
杆部淬火裂纹	钢中碳和合金元素含量偏高, 淬透性偏高	检验原材料淬透性, 改变淬火冷却速度
花键裂纹	1) 淬火加热温度高 2) 水温过低	严格执行工艺
回火后硬度低	回火温度高、时间长	可返修
淬火裂纹	原材料缺陷	加强原材料检验及管理

表 11-76 半轴表面感应淬火常见缺陷的  
预防及补救措施

缺陷名称	产生原因	预防及补救措施
硬化层组织不均匀	感应加热温度低或淬火冷却速度慢	严格执行工艺
花键裂纹	材料淬透性高, 冷却太快, 硬化层太深	1) 提高淬火水温、用热水淬火 2) 采用聚合物淬火介质 3) 检验原材料淬透性
淬火软带	在连续淬火时, 由于零件形状尺寸变化使磁通改变而引起	1) 改用矩形感应器 2) 减慢感应器移动速度或加大功率 3) 预处理正火改为调质
软点	冷却不均或加热不均	改进工艺
畸变	1) 淬火应力 2) 顶针压力 3) 半轴自重及旋转离心力	1) 淬火后矫直 2) 淬火机床上自动矫正

## 11.9 喷油泵柱塞偶件和喷油嘴偶件的热处理

### 11.9.1 喷油泵和喷油嘴偶件的服役条件和失效方式

喷油泵柱塞偶件由柱塞与柱塞套组成, 喷油嘴偶件由针阀体与针阀组成。柱塞偶件和喷油嘴偶件均属精密偶件, 要求尺寸配合精度高、因而尺寸稳定性高。它们处于一定配合间隙下工作, 通常由于磨损使间隙超差而失效。喷油嘴位于燃烧室顶部, 因此还要求一定的耐蚀性和耐回火性。

### 11.9.2 喷油泵和喷油嘴材料

柱塞偶件和喷油嘴偶件除应符合上述工作条件、达到规定的使用性能外, 还要求热处理畸变小。喷油泵和油嘴偶件常用材料及技术要求见表 11-77。

GCr15 钢广泛用于柱塞偶件和中、小马力柴油机的针阀偶件。大马力柴油机常用 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 钢制造针阀, 用 18Cr2Ni4WA 钢制造针阀体。机车用柴油机可采用 27SiMnMoVA 钢制造针阀体。随着柴油发动机性能指标的不断提, 对喷油泵和喷油嘴偶件要求愈来愈高, 其选材也更科学。

某厂采用 20CrMoS 材料制造用于重载车的发动机喷油嘴偶件, 材料化学成分(质量分数(%))为: C 0.17~0.22, Si 0.15~0.40, Mn 0.50~0.90, Cr 0.30~0.50, Mo 0.40~0.55, S 0.015~0.040, P ≤ 0.035, Al ≤ 0.05; 末端淬透性为:  $J_0$  -31~44HRC; 供货状态为冷拉退火态, 显微组织为铁素体+珠光体, 硬度 179~239HBS。与传统材料 18Cr2Ni4WA 相比, 其主要特点有:

表 11-77 喷油泵和喷油嘴偶件常用材料及技术要求

材 料	技 术 要 求		用 途
	热 处 理	硬度(HRC)	
GCr15	球化退火, 淬火及深冷处理, 回火, 稳定化处理	62~65	柱塞、柱塞套
GCr15SiMn	正火, 球化退火, 去应力退火, 淬火及冷处理, 回火, 稳定化处理	62~65	柱塞、柱塞套
GrWMn	淬火及冷处理, 回火, 稳定化处理	62~65	柱塞、柱塞套
W18Cr4V	退火, 淬火, 回火, 稳定化处理	62~66	针阀
W6Mo5Cr4V2	退火, 淬火, 回火, 稳定化处理	62~66	针阀
18Cr2Ni4WA	渗碳(层深 0.6~0.9mm), 淬火及冷处理, 回火, 稳定化处理	≥58	针阀体
25SiCrMnVA	渗碳, 淬火, 回火, 稳定化处理	≥58	针阀体
27SiMnMoVA	渗碳(层深 0.5~0.9mm), 淬火, 回火, 稳定化处理	58~62	针阀体

(1) 由于  $M_s$  点较高 (18Cr2Ni4WA 为  $310^{\circ}\text{C}$ , 20CrMoS 为  $360^{\circ}\text{C}$ ), 可减少残留奥氏体含量 (在相同渗碳热处理条件下,  $\varphi(18\text{Cr2Ni4WA})$  为 18%,  $\varphi(20\text{CrMoS})$  为 3.4%)。大量检测证明, 喷油嘴一般在  $250^{\circ}\text{C}$  左右的环境下工作, 若存在大量残留奥氏体, 会在一定温度下逐渐转变为马氏体, 引起体积膨胀, 尺寸发生变化, 造成卡死失效。因此, 减少残留奥氏体含量是提高使用寿命的途径之一。

(2) 经快速室温磨损对比试验表明, 两种材料试样的相对耐磨性较接近: 18Cr2Ni4WA 为  $2.7160 \sim 4.1126\text{mm}$ , 20CrMoS 为  $3.9810 \sim 5.1430\text{mm}$ 。

(3) 在相同机加工工艺条件下, 20CrMoS 的综合加工性能优于 18Cr2Ni4WA。20CrMoS 的切削加工性能良好, 能满足高速精密加工的需要。

(4) 20CrMoS 的热胀系数较小, 且与配合件的热胀系数较接近。

(5) 20CrMoS 经渗碳随罐风冷后, 不需进行高温回火, 因此畸变量小。20CrMoS 渗层碳化物形态和分布良好。20CrMoS 回火稳定性优于 18Cr2Ni4WA。

经耐久试验和可靠性考核, 证明 20CrMoS 钢制造的喷油嘴具有良好的使用寿命, 能满足柴油机的高速增压使用要求。

### 11.9.3 喷油泵和喷油嘴偶件的热处理工艺

#### 11.9.3.1 制造工艺路线

热轧退火棒料 → 自动机加工 → 热处理 → 精加工 → 稳定化处理 → 成品。

#### 11.9.3.2 热处理工艺

1. 渗碳 针阀体形状复杂、精度高, 要求有高的耐磨性、尺寸稳定性和一定的冲击韧度, 因此很多厂采用低碳合金结构钢制造, 并经渗碳热处理。国内除部分厂仍沿用中孔堵碳的固体渗碳工艺外, 很多厂采用低温  $820 \sim 830^{\circ}\text{C}$  或中孔塞碳棒的  $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$  的气体渗碳法。与固体渗碳相比, 工人有较好的劳动条件, 并可以用  $\text{CO}$ 、红外仪或氧探头控制碳势, 以保证渗碳质量。法国 ECM 公司利用模拟和仿真技术开发了 INFRACARB 真空渗碳软件, 该软件装备在低压真空渗碳 ICBP 系列装备上使用后获得了良好的效果。低压渗碳

具有防止出现非马氏体、质量好、热处理畸变小、运行费用低、有利环境保护及方便生产等优点。

2. 马氏体分级淬火 部分偶件采用马氏体分级淬火。马氏体分级淬火是从奥氏体化温度淬到稍高于或稍低于上马氏体点 ( $M_s$ ) 温度的液态介质 (如热油、盐浴等) 中, 在淬火介质中保温到整个钢件内外温度均匀后取出缓慢冷却 (通常在空气中), 以避免钢件内外产生大的温差。在钢件冷却到室温时, 整个截面很均匀地形成马氏体, 因而避免形成过大的残留应力。所以, 马氏体分级淬火是减轻零件开裂、减小零件畸变及残留应力的有效措施。马氏体分级淬火时必须控制的工艺参数为奥氏体化温度、分级淬火浴的温度、在浴中的保温时间及从浴中取出后的冷却工艺等。

马氏体分级淬火温度对钢淬火后的残留奥氏体量影响很大。此温度过低或过高, 都会影响奥氏体热稳定性程度。分级温度过低时, 不但会提高残留奥氏体量, 而且还会使随后的冷处理效果减弱。马氏体分级淬火温度和保温时间对 GCr15 钢残留奥氏体量的影响如图 11-37 所示。

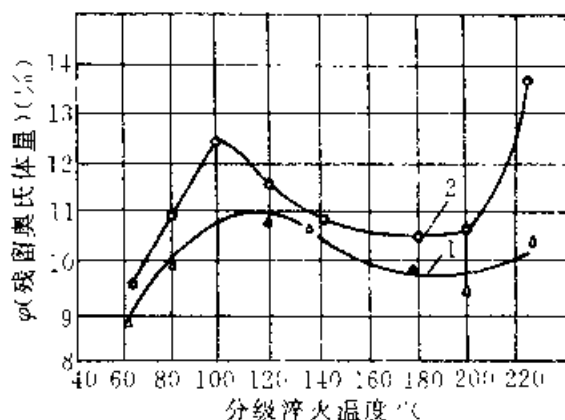


图 11-37 马氏体分级淬火温度和保温时间对 GCr15 钢残留奥氏体量的影响

1 —  $850^{\circ}\text{C}$  油淬, 分级淬火保温 10min  
2 —  $-850^{\circ}\text{C}$  油淬, 分级淬火保温 30min

马氏体分级淬火保温时间以工件内外温度均匀为止, 按偶件的大小不同, 一般为  $2 \sim 5\text{min}$ 。保温时间过长将引起残留奥氏体量增加 (图 11-38)。

从分级淬火浴中取出后的冷却方式对残留奥氏体量也有很大影响 (图 11-39)。分级等温后水冷, 残留奥氏体量最少, 油冷时略有增加, 空冷时残留奥氏体量比油冷时有较大的增加。在实际生产中还应控制淬火油温和从油槽中取出工件的时

间, 淬火油温过高或过早地从油槽中取出工件(工件未冷透), 均将使残留奥氏体量增多。

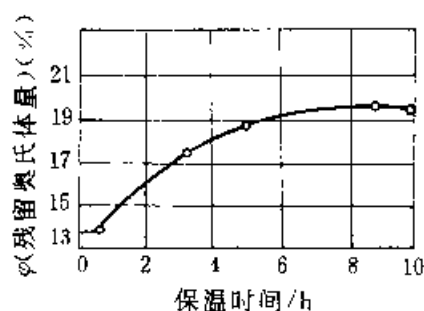


图 11-38 GCr15 钢( $w(C)1.04\%$ ,  $w(Cr)1.56\%$ ,  $w(Mn)0.3\%$ )850°C 加热, 175°C 分级保持不同时间对残留奥氏体量的影响(分级后油冷)

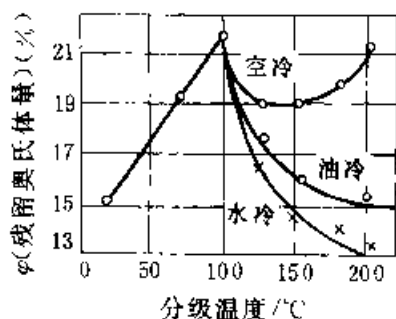


图 11-39 GCr15 钢 880°C 加热, 在 M<sub>s</sub> 点以下不同温度分级保持 30min 后冷到室温时的残留奥氏体量和分级温度的关系

3. 光亮淬火 偶件的淬火多数是在盐浴中进行加热, 容易出现脱碳或贫碳现象。盐浴淬火后清洗困难, 其细小的喷孔常被残存的盐渣阻塞, 清洗不净还会造成喷孔堵塞、中孔及座面锈蚀、雾化不良或卡死现象。

在含氧的保护气氛中往往会对铬合金元素产生氧化, 使零件表面形成 0.01~0.03mm 的黑色组织(托氏体), 增加研磨困难, 降低使用寿命, 所以采用氮气气氛保护较为合理。目前所用的氮气纯度为 99.5%(体积分数), 加适量有机液体, GCr15 钢淬火后贫碳及黑色组织可控制在 0.02mm 以内。

高速钢和轴承钢采用真空淬火能进一步提高产品质量, 表面光亮不用清理, 硬度很均匀稳定, 淬火畸变小, 重现性好。

4. 冷处理 冷处理要及时, 尽可能在淬火后立即进行, 在室温停留的时间最好不超过 30min。如 GCr15 钢淬火后在室温停留 1h, 对残留奥氏体

稳定化效应则显著增长(图 11-40)。

如果冷处理前先进行回火, 再冷处理, 则使冷处理效果大为减弱, 使工件耐磨性降低(图 11-41)。

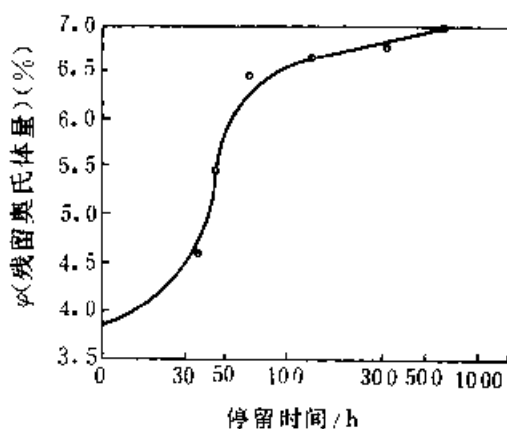


图 11-40 淬火后室温停留时间对在 78°C 冷处理效果的影响(GCr15 钢, 850°C 加热淬入 15°C 油)

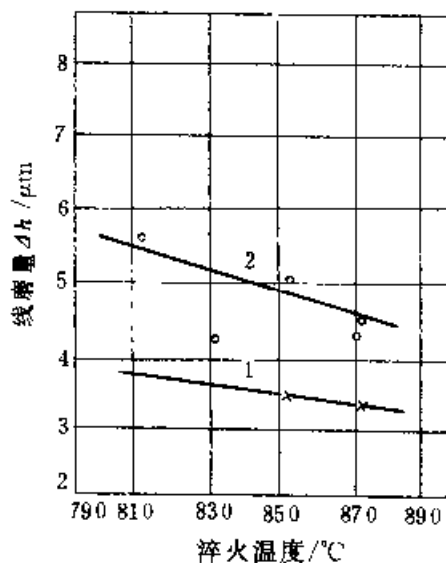


图 11-41 CrWMn 钢淬火后立即冷处理与淬火后经回火再冷处理的耐磨性比较  
1—立即冷处理 2—回火后再冷处理

5. 回火 主要根据偶件的硬度要求选择回火温度。在硬度达到技术要求的前提下, 尽可能选择较高的回火温度, 以提高马氏体和残留奥氏体的稳定性, 松弛淬火应力和保证尺寸稳定。通常 GCr15 钢制柱塞偶件硬度要求为 62~65HRC, 一般采用 160°C 回火, 回火时间 2~6h。

6. 稳定化处理 精密偶件均需进行 1~2 次稳定化处理, 160°C 回火后的 GCr15 钢可采用 130°C 稳定化处理 4~6h, 通常在粗磨后进行。用

GCr15SiMn 或 W18Cr4V 钢制造的偶件采用 2~3 次稳定化处理。W18Cr4V 的稳定化处理温度为 120℃, 时间 6h, 而 GCr15SiMn 钢的三次稳定化处理温度分别为 175℃、155℃和 130℃, 时间为各 8h。三次稳定化处理分别在回火、粗磨和精磨后进行。

### 11.9.3.3 精密偶件的热处理工艺举例

#### 1. GCr15 钢柱塞偶件的热处理工艺

GCr15 钢柱塞偶件热处理的硬度要求为 62~65HRC, 可以采用油淬, 其工艺见图 11-42。也可采用马氏体分级淬火, 其工艺见图 11-43。

#### 2. GCr15SiMn 钢柱塞偶件的热处理工艺

热处理工艺详见图 11-44。

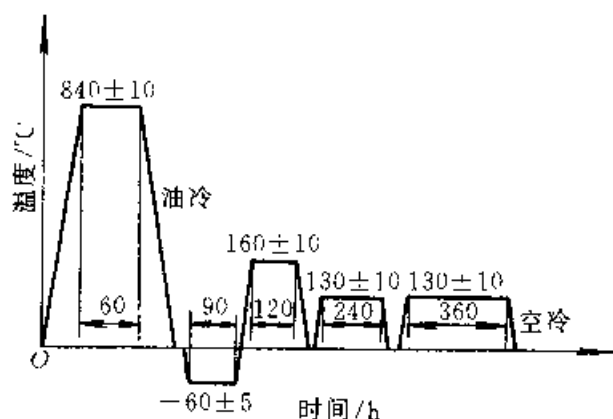


图 11-42 GCr15 钢柱塞偶件热处理工艺

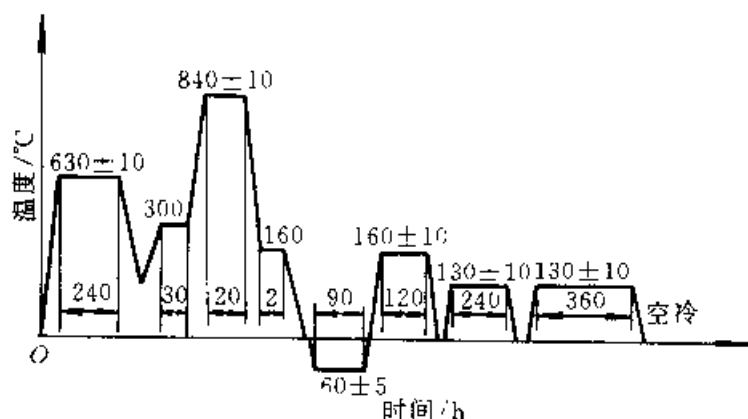


图 11-43 GCr15 钢柱塞偶件热处理工艺

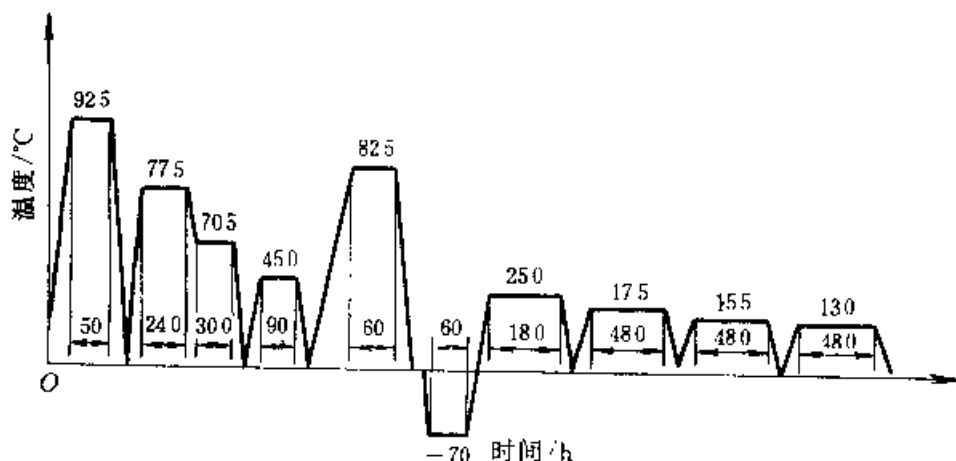


图 11-44 GCr15SiMn 钢柱塞偶件热处理工艺

#### 3. 18Cr2Ni4WA 钢针阀体的热处理

18Cr2Ni4WA 钢针阀体可以采用两种热处理工艺:

(1) 渗碳后随罐空冷后直接冷处理(工艺如图 11-45 所示)。热处理硬度要求  $\geq 58\text{HRC}$ 。

当残留奥氏体量多导致硬度低时,可重复冷

处理,并进行回火一次,回火时间 120min。若上述方法仍达不到硬度要求,可先在  $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$  实施保温 4h 的回火,然后再加热到  $(800 \pm 10)^\circ\text{C}$  保温 150~180min,通入吸热式保护气氛和少量丙烷。出炉后油冷(油温保持在  $100 \sim 140^\circ\text{C}$ )、清洗后再按图 11-45 进行冷处理、回火和稳定化处理。

(2) 渗碳后重新加热淬火(工艺见图 11-46)。

针阀体内孔直径很小,顶端喷孔仅 0.25mm 左右,在气体渗碳条件下较难保证孔内渗碳要求,所以多数工厂均采用固体渗碳,上述二种工艺均采用固体渗碳。

4. 25SiCrMoVA 钢针阀体的热处理工艺  
热处理工艺见图 11-47。

5. W18Cr4V 钢针阀的热处理工艺

W18Cr4V 钢针阀热处理硬度要求为 62~66HRC,其热处理工艺有两种,油淬或马氏体分级淬火。热处理工艺见图 11-48 和图 11-49。

6. W6Mo5Cr4V2 钢针阀的热处理工艺  
热处理工艺详见图 11-50。

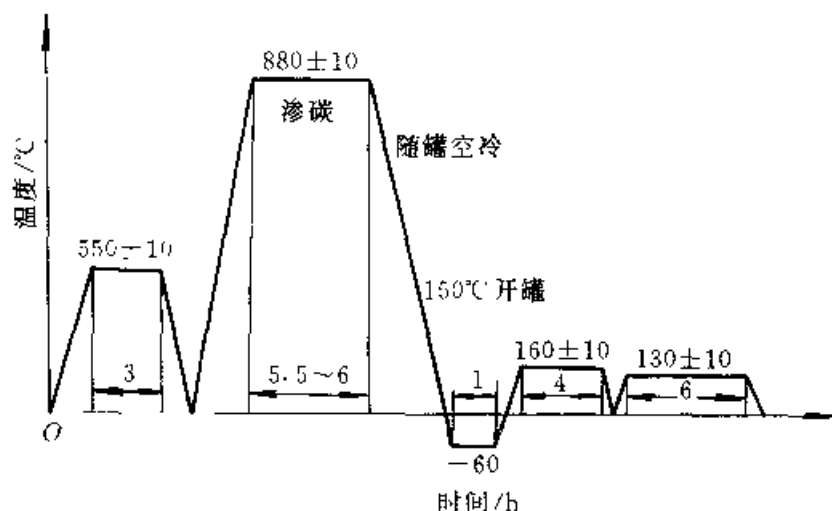


图 11-45 18Cr2Ni4WA 钢针阀体的热处理工艺(直接冷处理)

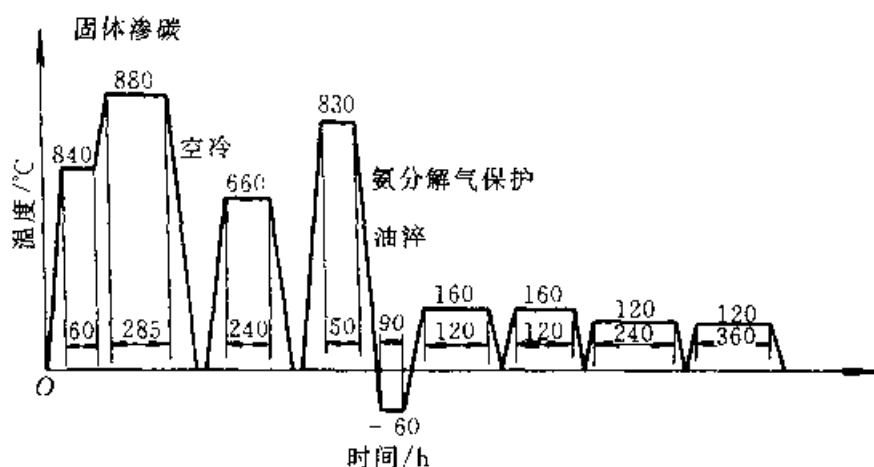


图 11-46 18Cr2Ni4WA 钢针阀体热处理工艺(渗碳重新加热淬火)

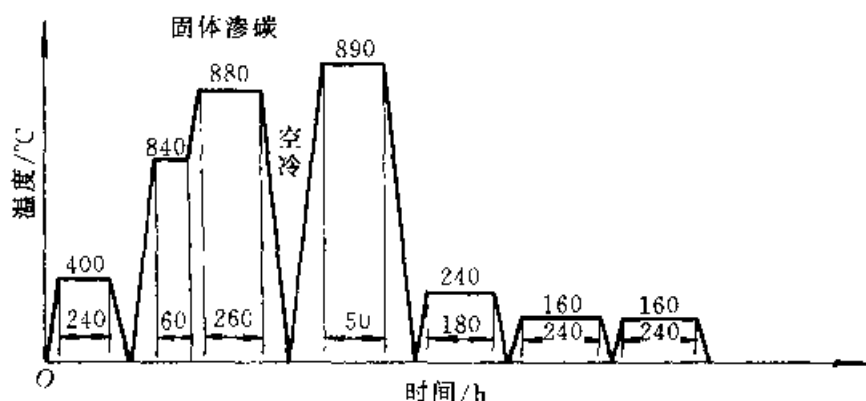


图 11-47 25SiCrMoVA 钢针阀体热处理工艺

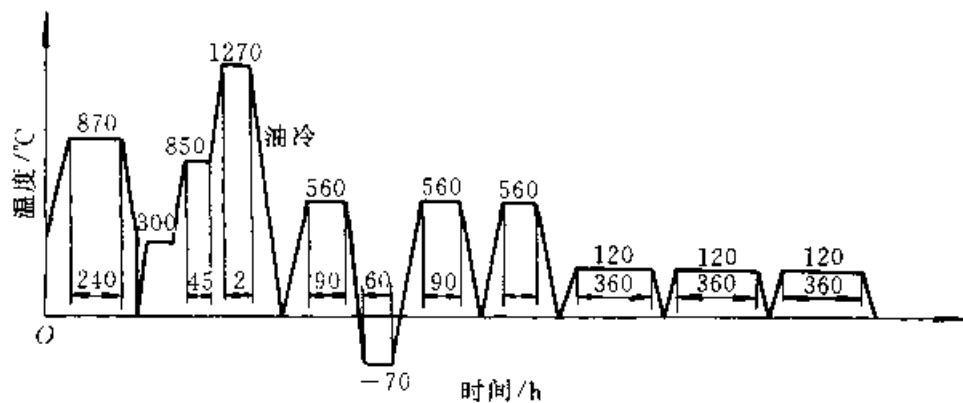


图 11-48 W18Cr4V 钢针阀(油淬)热处理工艺

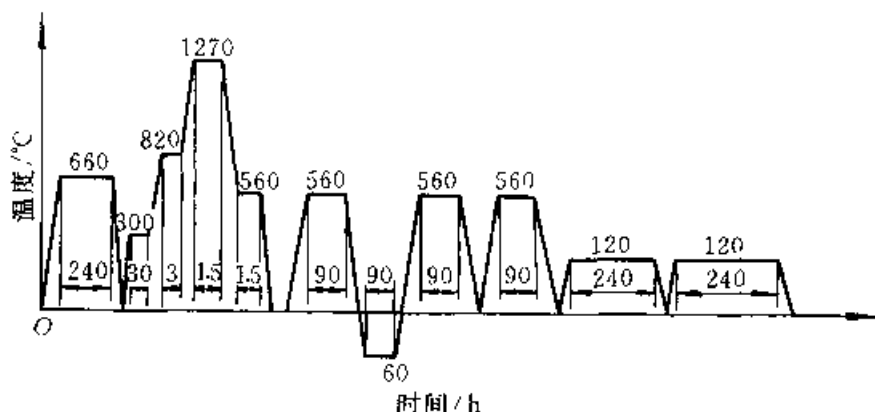


图 11-49 W18Cr4V 钢针阀(分级淬火)热处理工艺

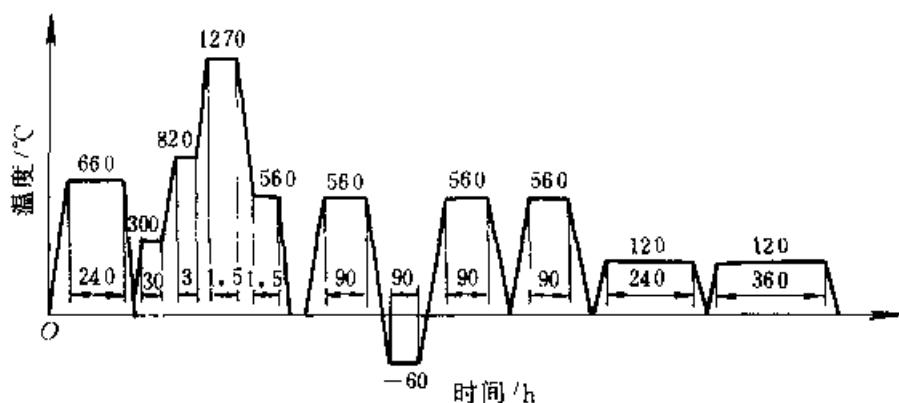


图 11-50 W6Mo5Cr4V2 钢针阀热处理工艺

7. 各种偶件的真空热处理 GCr15 钢、高速钢偶件的真空淬火及 27SiMnMoV 钢偶件的真空渗碳淬火(渗碳层深 0.5~0.9mm)工艺分别如图 11-51、图 11-52 和图 11-53 所示。

生产中,零件先脱脂,经 200℃烘干 30min 后方可装炉,装炉后先抽真空达 2.66Pa 后升温。GCr15 钢在加热到 840℃时真空度不高于 5.32Pa,高速钢淬火加热时真空度低于 3.33Pa; 950℃保温完成后即升压,压力为 53~93Pa,并升温加热。27SiMnMoV 钢针阀体渗碳处理时,在

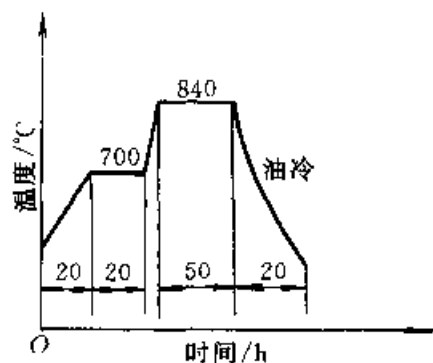


图 11-51 GCr15 钢偶件真空淬火热处理工艺

930℃前保持真空度为 6.65Pa,在 930℃渗碳期的前 60min 内,每隔 5min 送一次气,气体中丙烷和氮气各 50%(体积分数),总耗气量为 80~110L/min。在扩散期(30min)及随后冷却至 900℃过程中保持真空。

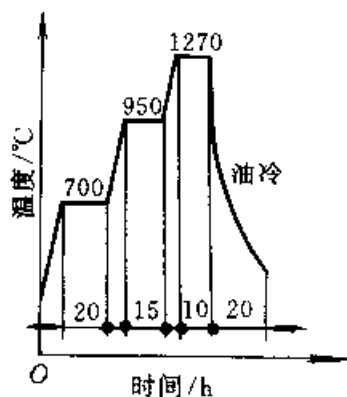


图 11-52 W18Cr4V 高速钢偶件真空淬火热处理工艺

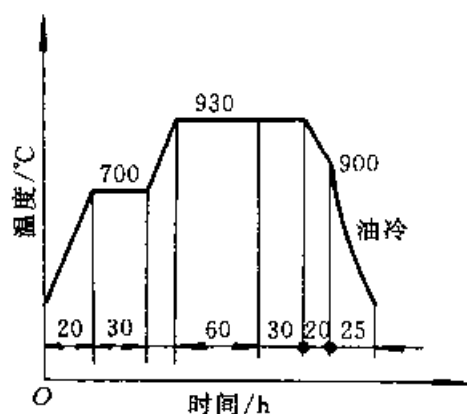


图 11-53 27SiMnMoV 钢偶件真空渗碳淬火热处理工艺

所有的淬油工件在淬油前应送氮气入炉,炉压升至 61180~86450Pa 后打开内炉门,将工件淬油,从内炉门打开到工件入油应在 8~10s 内完成。工件淬油时间一般为 20min 左右,出油后在前室需停留 20min 左右,待温度降到 100℃后送入氮气或空气,在压力达到 100kPa 后开外炉门,工件出炉。

## 11.10 履带板的热处理

### 11.10.1 履带板的服役条件和失效方式

拖拉机和推土机的履带板主要承受压力和一定的冲击载荷,其表面与地面或泥沙碎石接触产生磨损。

履带板的主要失效方式是表面磨料磨损、压弯和断裂。

### 11.10.2 履带板材料

履带板要求具备足够的强度、一定的冲击韧度和良好的耐磨性。常用材料及技术要求列于表 11-78。

表 11-78 履带板的常用材料及技术要求

钢 号	热处理技术要求
40SiMn2	调质 364~444HBS 齿部中频感应淬火 45~58HRC,其余部分 32~45HRC
ZGMn13	水韧处理 156~229HBS
ZG31Mn2Si	淬火并低温回火 38~54HRC

大、中型履带拖拉机(包括推土机、起重机)常用热轧的 40SiMn2 履带异形板材,小型拖拉机常用 ZGMn13 及 ZG31Mn2Si 铸造履带板。它们的化学成分见表 11-79。

高锰钢 ZGMn13 属高碳、高合金钢,是高合金耐磨专用钢。高锰钢经过固溶热处理(俗称水韧处理)后,在室温下为奥氏体组织,这种钢韧性、塑性高,但屈服强度与硬度较低。在很大压力和冲击载荷作用下发生塑性变形时,奥氏体转变成马氏体,产生明显的加工硬化,使硬度由 200HBS 提高到 45~55HRC,耐磨性大大提高,适于制造拖拉机履带板,但由于合金含量高,所以成本较高。

ZG31Mn2Si 可以用来替代 ZGMn13 制造小型拖拉机的履带板。铸造后经变质处理和水韧、处理和回火获得低碳马氏体组织。

表 11-79 常用履带板材的化学成分(质量分数)

(%)

材 料	C	Si	Mn	S	P	其 他			
40SiMn2	0.37~0.44	0.60~1.00	1.40~1.80	≤0.04	≤0.04	—			
ZGMn13	1.10~1.50	0.40~1.00	11.00~15.00	≤0.05	≤0.09	Cr≤1.0	Ni≤0.5	Cu≤0.5	Mn/C≥8
ZG31Mn2Si	0.26~0.36	0.5~0.9	1.10~1.60	≤0.05	≤0.05	—			



大、中型拖拉机、推土机履带板广泛采用40SiMn2钢,它们在钢厂热轧成型钢,便于机械加工工厂制造。

### 11.10.3 履带板的热处理工艺

#### 11.10.3.1 40SiMn2 钢履带板的热处理

1. 制造工艺路线 热轧成形→下料→机加工→热处理→成品。

2. 热处理工艺 40SiMn2 钢可采用快速加热,在清水中淬冷。40SiMn2 钢淬透性较高,受淬火介质温度变化影响较小。但对回火脆性很敏感。在200~300℃回火时,冲击韧度为22J/cm<sup>2</sup>。回火温度380~510℃时,冲击韧度为90~110J/cm<sup>2</sup>。热处理工艺如图11-54所示。

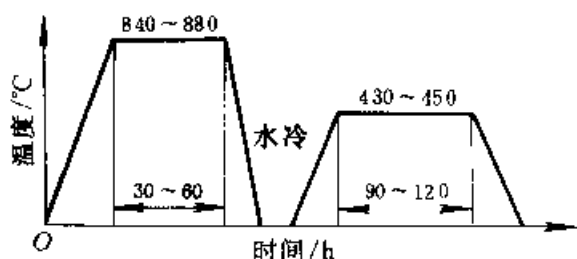


图 11-54 40SiMn2 钢履带板的热处理工艺

图11-55所示履带板是在柴油加热的推杆式连续炉内进行的热处理。若采用箱式电炉,往往由于装载量较多,需保温60~90min。

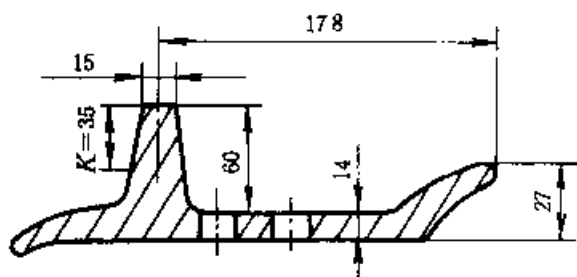


图 11-55 拖拉机履带板的横截面及硬度要求  
K段内为45~58HRC,其余为32~45HRC

只进行上述调质处理的履带板,耐磨性较差,平均使用寿命仅2000~3000h。根据使用要求,齿部(即履刺部分)硬度应略高于板部的硬度,以提高齿部的耐磨性。而板部硬度稍低,有利于防止断裂。为达到履带板横截面不同部位的硬度要求(见图11-55),通常采用两种工艺:一种是履带板整体调质后,用100kW、8000Hz的中频电流对齿部进行感应淬火,然后回火。另一种方法是整体加热

淬火后,中频感应加热回火。在回火时,应设计合适的感应器,以调节感应器与履带板各部位之间的间隙,使履带板齿部和板部获得不同的硬度。

#### 11.10.3.2 ZGMn13 钢履带板的热处理

1. 制造工艺路线 铸造→热处理→成品。

2. 热处理工艺 铸态组织不允许有明显的柱状结晶。按照75JT 18《一拖ZGMn13履带板技术条件》规定,有3~4级的柱状晶者应先进行退火处理。消除部分柱状晶后,再进行水韧处理。消除柱状晶的退火工艺见图11-56。铸态组织中没有柱状晶的履带板可直接进行水韧处理。履带板在连续式炉中加热,其工艺见图11-57。

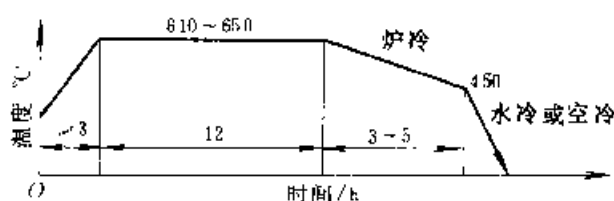


图 11-56 ZGMn13 钢履带板退火工艺

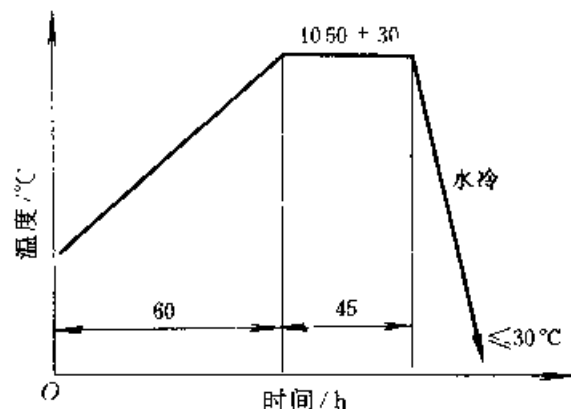


图 11-57 ZGMn13 钢履带板水韧处理工艺

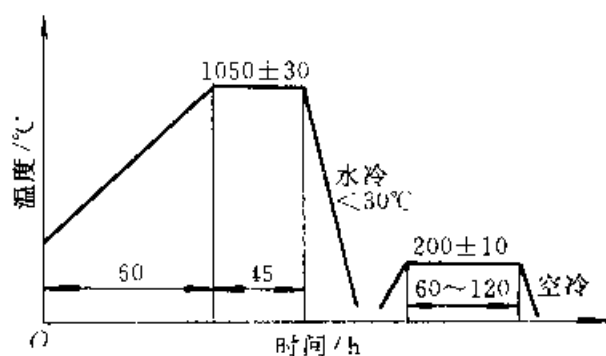


图 11-58 ZG31Mn2Si 钢履带板热处理工艺

## 11.10.3.3 ZG31Mn2Si 钢履带板的热处理

1. 制造工艺路线 铸造→热处理→成品。

2. 热处理工艺 履带板在连续式炉中加热,水韧处理及回火工艺如图 11-58 所示。

过程中仅检验硬度。ZGMn13 钢履带板在热处理车间用连续式炉进行水韧处理时,每隔 2h 检查 2 块履带板的显微组织,中央试验室还定期抽检履带板的硬度。热处理质量检验要求列于表 11-80。

## 11.10.4 履带板的质量检验

40SiMn2 钢及 ZG31Mn2Si 钢履带板在热处理

淬火组织为 7~10 级的 ZGMn13 钢履带板为不合格,允许重新加热进行水韧处理。但只允许返修一次,返修不合格者应作报废处理。

表 11-80 40SiMn2、ZG31Mn2Si 和 ZGMn13 钢履带板热处理质量检验要求

检验项目	检 验 要 求		
	40SiMn2	ZG31Mn2Si	ZGMn13
硬度	整体 364~444HBS 或: 齿部 45~58HRC 其余 32~45HRC	38~54HRC	156~229HBS
显微组织			按碳化物的形态(溶解、析出、过烧)、大小及分布情况以及基体晶粒大小定级。按 NJ47《拖拉机用高锰钢履带板技术条件》。并参照 75JT-18《拖 ZGMn13 履带板技术条件》规定 1~6 级合格,7~10 级不合格

## 参 考 文 献

- 1 毛志强. 中国汽车工程学会第十届年会论文集. 北京, 1996
- 2 敖炳秋. 汽车科技, 1996(1): 1
- 3 Taylor BJ, et al. TRIBOLOGY international 1979 (4): 81~82
- 4 朱法义等. 金属热处理, 1997(9): 27
- 5 何光楚等. 汽车材料通讯, 1989(3): 40
- 6 曹正等. 中国汽车工程学会第十届年会论文集. 北京, 1996
- 7 顾教有. 第六届湖北省热处理学术交流会论文集. 1996
- 8 刘途. 第六届全国热处理大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- 9 毛志强. 金属热处理, 1997(4): 32
- 10 陈蕴博等. 国外金属热处理, 1997(1): 32
- 11 解挺. 国外金属热处理, 1997(3): 12
- 12 马静芬. 金属热处理, 1998(1): 50
- 13 万朝平. 第六届全国热处理大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- 14 仲玉杰. 金属热处理, 1985(3)
- 15 施爱莉. 国产化非调钢 49MnVS3 在桑塔纳轿车上的应用. 中国汽车材料学会第九届年会论文, 1994
- 16 胡明如, 潘健生. 钢铁化学热处理原理. 上海: 上海
- 17 蒋光福. 东风汽车, 1998(2): 28
- 18 段柱明等. 铸铁凸轮轴. 汽车、农用车铸件典型工艺技术、质量控制专题研讨会论文汇编, 1997
- 19 杨伯荣等. 汽车科技, 1987(3)
- 20 北京内燃机总厂. 北京牌汽油发动机挺柱高频堆焊质量标准. 工厂标准, K5010-74
- 21 冷激铸铁气阀挺杆. 二汽科技通讯, 1974(1)
- 22 符应鹏等. 二汽科技通讯, 1980(4)
- 23 5Cr21Ni4Mn9N 奥氏体阀门钢生产试验总结. 南汽科技情报, 1980(4)
- 24 李敏宝等. 金属热处理, 1984(3)
- 25 孟少农主编. 机械加工工艺手册, 第 1 卷: 第 2 章材料及热处理. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 26 甄润身等. 第六届全国热处理大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- 27 黄泽民等. STEYR 重载车发动机用 20CrMoS 渗碳钢性能及应用研究. 中国汽车材料学会第十届年会论文, 1996
- 28 张建国. 金属热处理, 1998(5): 2
- 29 胡炳明. 国外金属热处理, 1996(1~2): 2
- 30 沈锦如. 国外金属热处理, 1996(1~2): 39

# 第 12 章 金属切削机床零件的热处理

北京机床研究所 张魁武

## 12.1 机床导轨的热处理

### 12.1.1 导轨服役条件及失效形式

机床的床身、立柱、横梁和转台等都有导轨。机床的精度、加工精度和使用寿命在很大程度上决定于其导轨的几何精度和内在质量。机床导轨有滑动导轨、滚动导轨和静压导轨三种类型。滑动导轨的失效形式主要有三种,一是导轨工作面磨损,丧失精度;二是导轨工作面拉伤,表面粗糙度恶化;三是导轨工作面碰伤。滚动导轨的主要失效形式为接触疲劳损坏和重压下产生塑性变形。机

床导轨维修的工作量占整台机床修理工作量的40%~50%。正确合理地选择机床导轨的材料和热处理方法是提高其耐磨性、抗擦伤能力和疲劳强度,保持精度,延长使用寿命的重要措施之一。

### 12.1.2 导轨材料

机床主导轨按所用材料可分为铸铁导轨和镶硬化钢导轨。其他材料,如树脂混凝土和陶瓷等应用尚少。塑料导轨主要用于导轨副的运动导轨,即上导轨或称副导轨。常用的导轨材料列于表12-1。

表 12-1 机床导轨材料

材料类别	牌 号	热 处 理	配合副(上导轨)
铸 铁	灰 铸 铁 HT200, HT250, HT300, HT350、密烘铸铁、低应力铸铁	表面淬火或高温 时效	聚四氟乙烯软带, HT200, HT250
	球墨铸铁 QT500-7, QT600-3	表面淬火或高温 时效	聚四氟乙烯软带, HT200, HT250
	耐磨铸铁 MTPCuTi20, 25, 30 MTP20, 25, 30 MTVTi20, 25, 30 MTCrMoCu25, 30, 35 MTCrCu25, 30, 35	高温时效	聚四氟乙烯软带与上导轨相 同的耐磨铸铁 ZCuSn10P1 ZZnAl10-5
钢	轴 承 钢 GCr15, GCr15SiMn	淬火或表面淬火	聚四氟乙烯软带 HT200, HT250, HT300, GCr15 滚动体
	工 具 钢 T7, T8, 9Mn2V CrWMn, 9SiCr		
	结 构 钢 45, 40Cr, 42CrMo 55, 50CrV	淬火或表面淬火	聚四氟乙烯软带 HT200, HT250, HT300
	渗 碳 钢 20Cr, 20CrMnTi 20CrMnMo 15CrMn	渗碳	聚四氟乙烯软带 HT200, HT250, HT300, GCr15 滚动体
	渗 氮 钢 38CrMoAlA	渗氮	聚四氟乙烯软带, HT200, HT250, HT300

### 12.1.3 铸铁导轨的感应淬火

机床导轨常用感应淬火的频率范围有高频、超音频和中频三种。

#### 12.1.3.1 高频感应淬火

##### 1. 设备与工装

(1) 加热设备,通常采用的高频感应加热设备的振荡频率范围为  $150 \sim 300\text{kHz}$ ,输出功率为  $60, 100, 200$  和  $250(\text{kW})$ 。

(2) 淬火机床,为减少功率损耗多采用感应器固定、床身移动的连续淬火。图 12-1 为台车式淬火机床,被淬火工件放在台车工作台上,台车在轨道上行走,适用于大型机床导轨淬火,感应器需加浮动机构。图 12-2 为滑动式淬火机床,一般用大型机床改装,被淬火机床导轨放在其工作台上,若运行平稳则感应器可不加浮动机构,由于行程有限,适用小型机床导轨淬火。

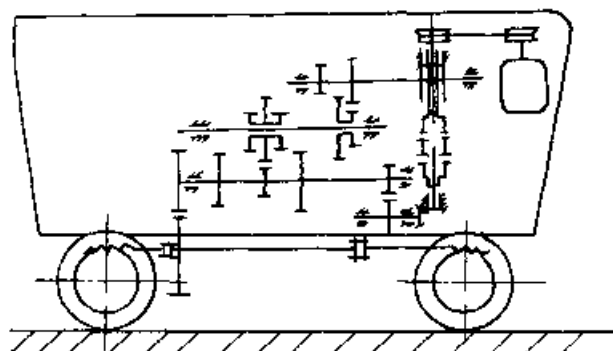


图 12-1 台车式感应淬火机床结构示意图

##### (3) 感应器

1) 山形导轨感应器,为使导轨峰顶不过热,采用此种感应器,见图 12-3。感应器内角  $\alpha$  一般取  $72^\circ \sim 76^\circ$ ,内角大小应与山形高度成反比,感应器与峰顶的间隙取  $5 \sim 7\text{mm}$ ,与斜面间隙取  $2 \sim 2.5\text{mm}$ 。为提高加热效率,可加装导磁体。

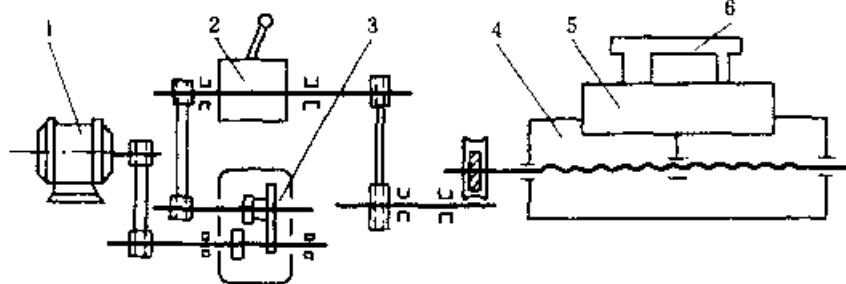


图 12-2 滑动式感应淬火机床结构示意图

1 电动机 2—变速手把 3—变速器 4—磨床底座 5—工作台 6—淬火床身

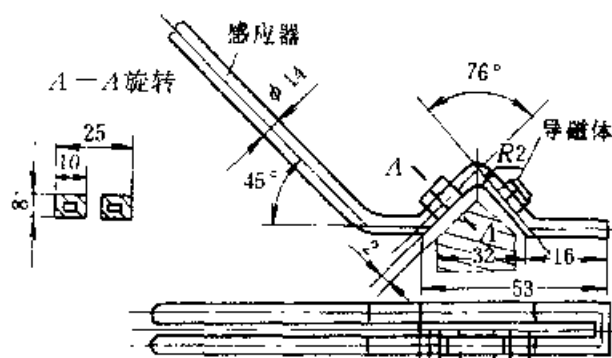


图 12-3 山形导轨高频淬火感应器

2) V 形导轨感应器,如图 12-4 所示,感应器与导轨底部间隙应尽量小,一般取  $1.5 \sim 2\text{mm}$ 。感应器内角一般取  $60^\circ \sim 65^\circ$ ,适当加大感应器与导轨斜面顶部间隙,并安装导磁体,可得硬化深度较均匀的淬火层,为防止 V 形槽内未淬火区积水,在感应器预热圈后部增设 V 形风嘴,向床身导轨运动的方向吹风。

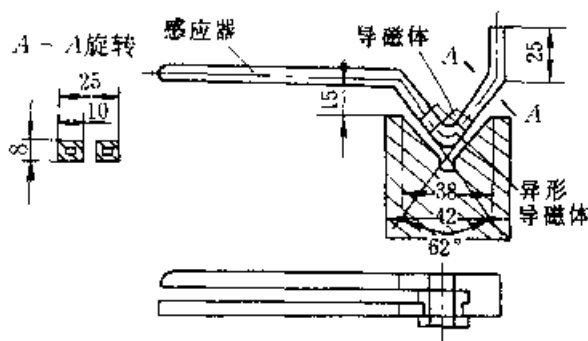


图 12-4 V 形导轨高频淬火感应器

3) 燕尾形导轨感应器,如图 12-5 所示,燕尾尾部感应圈不能仿形,应制成圆弧形,半径  $R$  一般为  $6 \sim 7\text{mm}$ ,燕尾越长, $R$  应越大。内角  $\alpha$  一般  $50^\circ$  左右, $\alpha$  的大小与燕尾长度成反比。还常在感应器的预热圈上钻  $2 \sim 3$  个预冷孔,对准燕尾尾部尖角喷水。为使燕尾斜面淬硬深度接近燕尾平面部分的淬硬深度,感应器预热圈与加热圈的连接回头应平行于燕尾斜面,并尽可能伸进燕尾槽底部。在燕尾平面部位和槽底部放置导磁体可进一步改善淬火效果。

斜面导轨高频淬火感应器设计可参照燕尾导轨感应器进行。

斜面导轨高频淬火感应器设计可参照燕尾导轨感应器进行。

1) 平导轨感应器,此种感应器的预热圈与加热圈的连接回头,应在淬火表面  $15\text{mm}$  之外,见图

12-6, 在接近被淬火导轨两侧 5~10mm (导轨面较窄时取下限, 反之取上限), 并使该处感应圈与

导轨面成  $15^\circ \sim 35^\circ$  仰角。如图 12-6, 适当布置导磁体可获更佳的淬火效果。

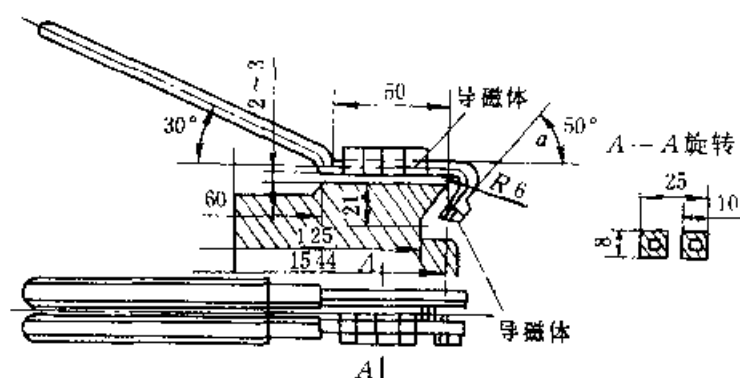


图 12-5 燕尾形导轨高频淬火感应器

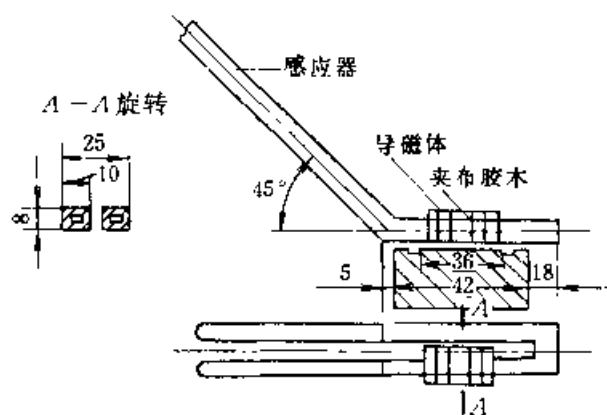


图 12-6 平导轨高频淬火感应器

5) 双轨式感应器, C620-3 型车床双轨式高频淬火感应器结构如图 12-7。设计原则同前。

## 2. 淬火工艺参数与实例

(1) 工艺参数, 感应器与导轨面的间隙见前。移动速度一般为  $1.2 \sim 3.0 \text{ mm/s}$ , 在其他工艺参数一定的情况下, 速度越慢, 淬硬层越深。

淬火温度一般控制在  $900 \sim 950^\circ\text{C}$ , 淬火温度过高则组织粗大, 残留奥氏体量增多, 耐磨性下降。淬火温度过低, 奥氏体化不完全, 硬度低, 耐磨性也差。

淬火介质一般用压强为  $0.1 \sim 0.15 \text{ MPa}$  的自来水喷冷。

(2) 铸铁导轨淬火举例, 见表 12-2。

## 12.1.3.2 超音频感应淬火

国产超音频感应加热设备的频率为  $30 \sim 40 \text{ kHz}$  或  $100 \sim 150 \text{ kHz}$ , 输出功率为 60, 100, 200 和 250 (kW)。

用输出功率 100kW, 频率  $30 \sim 40 \text{ kHz}$  的超音频进行 MAZAK 车床床身导轨淬火的工艺参数

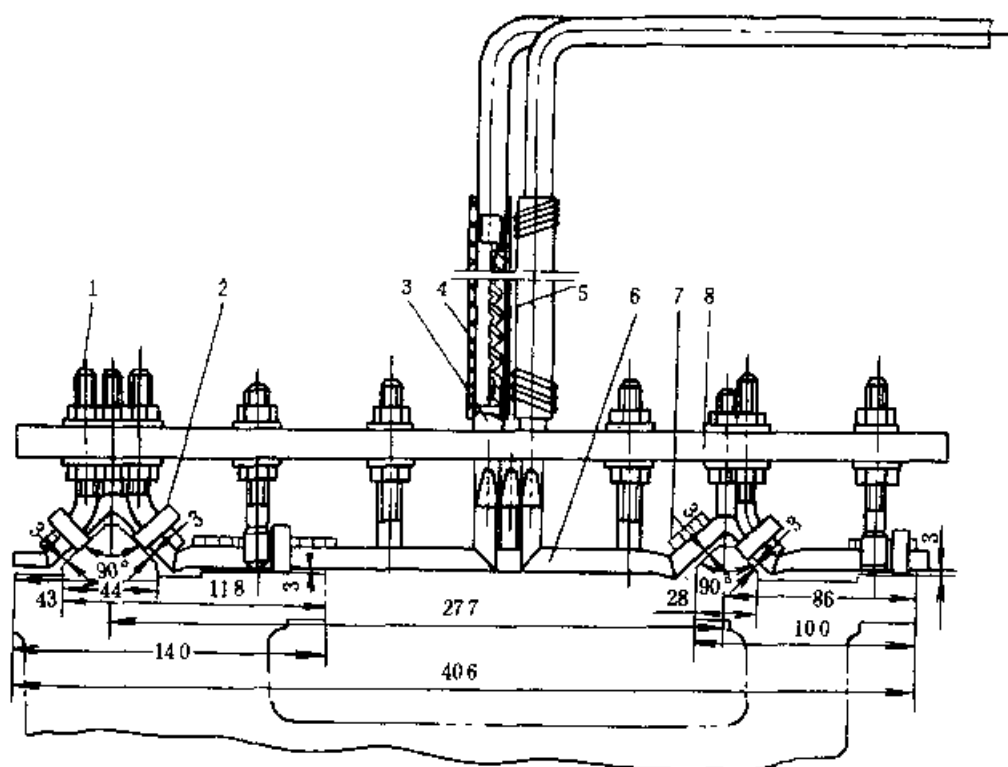


图 12-7 C620—3 型车床导轨双轨式高频淬火感应器

1—导向支柱 2—滚珠轴承 3—接管 4—胶管 5—连接软管 6—感应器 7—导磁体 8—支承板

是:阳极电压92~95kV,阳极电流8~9.5A,移动速度为3.45mm/s,淬火温度900~910℃,冷却剂用浓度为0.2%(质量分数)的聚乙烯醇水溶液,淬硬层深度2~3mm,显微组织为细针状马氏体加片状石墨,硬度70HS以上(灰铸铁床身原始硬度 $\geq 187\text{HBS}$ ,游离铁素体 $< 5\%$ (体积分数))。

### 12.1.3.3 中频感应淬火

国产中频感应加热设备频率一般为2500和8000Hz,输出功率100,200,250和500(kW)。

淬火机床一般用大型机床改装,中频淬火变压器和感应器装在溜板上,由溜板拖动淬火变压器和感应器作直线运动,实现连续淬火,见图12-8所示

中频淬火采用双回路感应器。为提高感应加热效率,改善加热状况,可适当布置导磁体。感应器的结构参照高频淬火设计。

淬火比功率一般选0.8~1kW/cm<sup>2</sup>,一次电压一般不超过800V,调节接入回路的电容器容量和变压器的一次侧线圈匝数与二次侧线圈匝数之比,使功率因数 $\cos\varphi=0.90\sim 0.95$ 。CA6140车床床身导轨中频感应淬火工艺参数如表12-3。

### 12.1.3.4 感应淬火导轨灰铸铁技术条件和质量检验

1. 灰铸铁的技术条件 所用灰铸铁应满足JB/T3997《金属切削机床灰铸铁技术条件》的要求。含磷量不大于0.15%(质量分数),化合碳在0.6%~0.8%(质量分数)之间。导轨表面硬度:在导轨长度 $\leq 2500\text{mm}$ 时,不得低于190HBS,在导轨长度 $> 2500\text{mm}$ 或重量 $> 3\text{t}$ 时,不得低于180HBS。显微组织应符合表12-4。导轨的加工表面粗糙度 $R_a < 3.2\mu\text{m}$ ,除有特殊要求外,凡边缘、尖角都应倒角。

表 12-2 灰铸铁导轨高频感应淬火工艺参数

机床型号	淬火部位	阳极电压 /kV	阳极电流 /A	栅极电流 /A	淬火移动速度 /mm·min <sup>-1</sup>
C620-3型车床	大凸面	13	2.2	0.6	160~220
	小凸面双轨同淬	13	2.2	0.6	160~220
		13	2.8	0.7	160~220
C3163型六角车床	双轨同淬	13	3.5	0.5~0.6	72

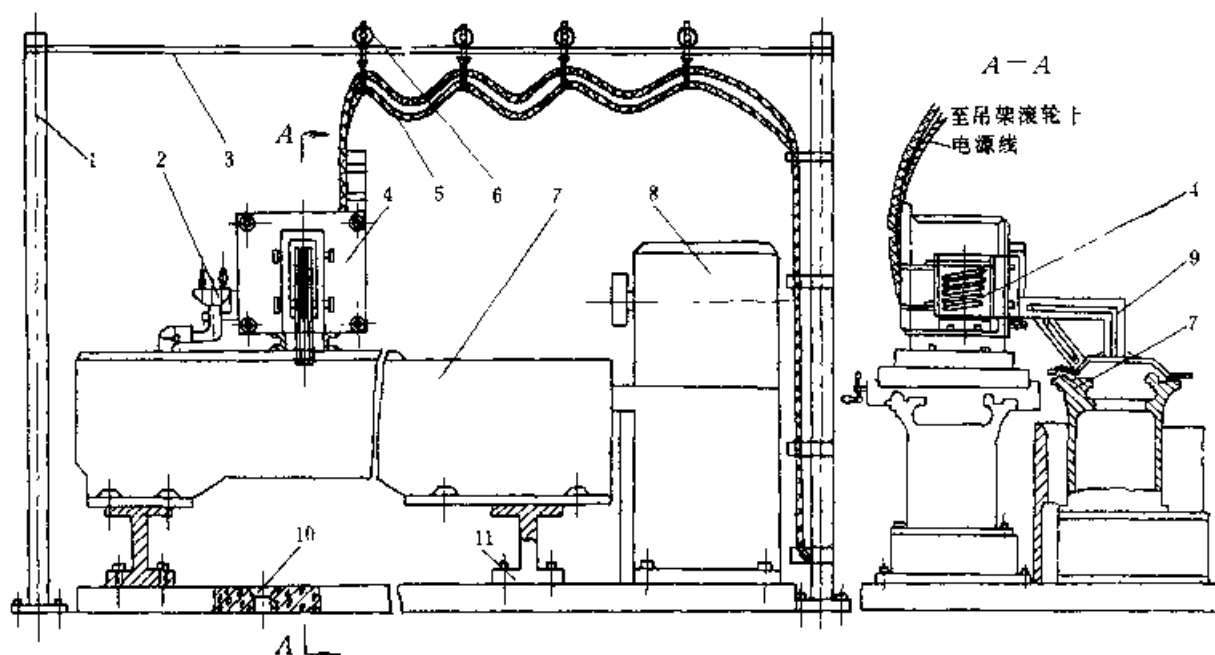


图 12-8 中频感应淬火示意图

1—立柱 2—分水器 3—钢索 4—淬火变压器 5—导线 6—滚轮 7—被淬火机床  
8—淬火机 9—淬火感应器 10—下水道口 11—工作台

表 12-3 CA6140 车床床身导轨中频淬火工艺参数

电 参 数						热 处 理 规 范				
次电压	次电流	一次侧线 圈匝数	二次侧线 圈匝数	淬火功率	功率因数	感应器与 导轨表面 间隙	移动速度	淬火温度	淬火介质	冷却方式
380V	20A	12	1	60~70kW	0.90	1.5~2mm	4mm/s	900℃	水	连续喷射

## 2. 淬火后的质量要求

(1) 淬火表面不得有裂纹、烧伤。

(2) 成品表面平均硬度值,对于灰铸铁 HT200 和 HT250 导轨应  $\geq 65\text{HS}$ , HT300 和 HT350 导轨应  $\geq 68\text{HS}$ ,规定淬硬区域内不应有软点、软带。

(3) 中频和超音频淬火的成品表面显微组织 5~6 级合格,高频淬火者允许出现 7 级,不允许有粗大马氏体和大量残留奥氏体的过热组织或托氏体及珠光体加马氏体组织。

(4) 成品有效硬化层深度,高频淬火者  $\geq 0.8\text{mm}$ ,超音频淬火者  $\geq 1.5\text{mm}$ ,中频淬火者  $\geq 2.0\text{mm}$ 。

表 12-4 灰铸铁导轨显微组织合格范围

项 目	合 格 范 围
白 墨	分布形状以 A 型为主,放大 100 倍时,长度 5~30mm
珠 光 体	含量 $\geq 95\%$ (体积分数),以索氏体和细片状珠光体为主,最大片间距在放大 500 倍时 $< 2\text{mm}$
铁 素 体	含量 $< 5\%$ (体积分数)
磷 共 晶	含量 $< 2\%$ (体积分数),小块状,分散分布
游离碳化物	不允许存在

## 12.1.3.5 灰铸铁导轨感应淬火常见缺陷及解决办法(详见表 12-5)

表 12-5 灰铸铁导轨感应淬火常见缺陷及解决办法

缺 陷	产 生 原 因	解 决 方 法
硬度低	原始组织中铁素体含量较多,化合碳低,硬度低,加热温度低,冷却水不足或水压低	应严格按 JB T3097 标准控制原材料,正确选择并认真执行淬火工艺参数,适当提高加热温度或水压
硬化层或厚度不均	感应器与导轨面间隙不均或不合理,加热速度太快喷射冷却水水压低	正确设计感应器及浮动装置,合理布置导磁体,调整好淬火机床,适当提高冷却水压,例如,0.2~0.4MPa
淬火裂纹	淬火温度过高,冷却太剧烈,原材料成分不符或组织不良,淬火中途停顿,随后从该处继续淬火,重复淬火以及导轨两端不平整或有尖角	正确掌握工艺,减缓冷却速度,原始组织中不应有激冷组织,化学成分合格,淬火中途停顿后须退回起始端,重复淬火应先行高温回火或退火,导轨两端加工平整,倒角
硬度不均和软带	淬火介质温度过高,水压不足,形成硬度不均,在淬火导轨的起止端和淬火中断、继续淬火的交界处常出现软带	正确执行工艺,感应器在起淬端外 5mm 处预热,使端部温度达 750℃ 左右再开始淬火运动,尾端可用加长导轨,或调高阳极电流保证该处加热足够,中断淬火应退回起端再淬
淬火变形	导轨感应淬火后,均导致表面下凹,导轨长度方向中部表面下凹值最大,下凹值与床身的刚性、长度、淬火、硬度、组织、深度、操作以及感应器设计等有关	合理设计床身等导轨面淬火的零件,提高刚性,调整冷热加工工序,保证淬火时有较高刚性,如可将不需淬火的导轨底面的机加工放在淬火后进行,合理设计感应器,尽可能采用双导轨同时淬火,如加热设备功率不足,不能双导轨同时淬火,则须使两导轨同向淬火,淬火上装应牢固、运行平稳、速度均匀,感应器与导轨面间隙在淬火过程保持一致,导轨面淬火前进行精刨加工时,在床身长度方向中部加一向下的预应力,使之发生弹性变形,刨削加工后去掉预应力,弹性恢复后得到中部凸起的导轨表面,或在淬火时加一向床身导轨面向上凸起的预应力,以抵消淬火后的下凹变形





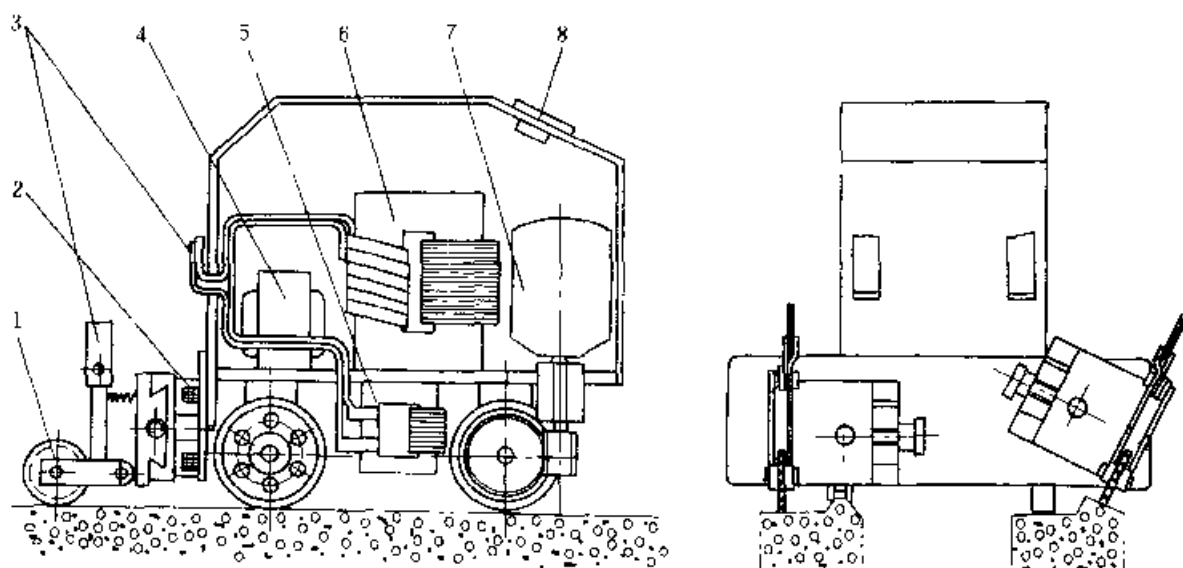


图 12-9 接触电阻加热淬火小车

1—钢滚轮 2—电磁离合器 3—铜排导线 4—控制变压器  
5—电流互感器 6—主变压器 7—电动机 8—电流表

### 12.1.5.2 淬火工艺参数

淬火铜轮电极板厚	$\delta = 1\text{mm}$
淬火电流	$I = 450 \sim 500\text{A}$
铜轮线速度	$v = 2.5\text{m/min}$
铜轮施于导轨表面的压力	$P = 10 \sim 60\text{N}$
铜轮进给量	$= (0.9 \sim 1) \text{铜轮曲线跨距}$
常用铜轮电极如图 12-10 所示	

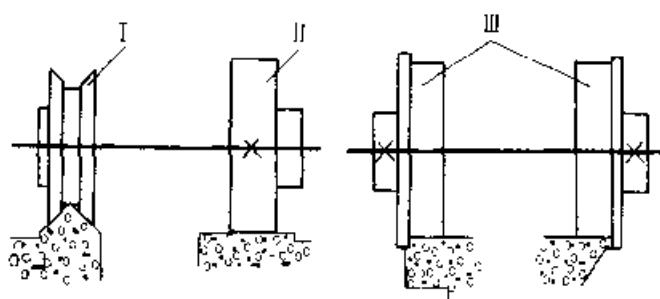


图 12-10 冲压铜轮电极

### 12.1.5.3 质量检验

为保证接触电阻加热淬火的质量,对灰铸铁材料的要求同感应淬火。淬火后质量评定按《灰铸铁件接触电阻加热淬火质量检验与评级》JB/T6954 进行。主要检验项目有:淬火深度 $\geq 0.18\text{mm}$ ,硬度 $\geq 550\text{HV}$ ,淬硬面积 $> 25\%$ ,显微组织为隐晶马氏体加少量残留奥氏体或细针状马氏体加少量残留奥氏体。淬火条纹排列整齐,少无断线,少无烧伤小坑。

### 12.1.6 镶钢导轨热处理

为克服滑动导轨的“爬行”,提高机床的定位

精度,减少传动阻力,滚动导轨的应用日广。铸铁导轨不能适应滚动的点或线接触疲劳载荷,镶钢淬硬导轨接触疲劳强度较高。一般要求导轨硬度 $\geq 60\text{HRC}$ 。硬度稍低,则承载能力明显下降。例如,硬度为 $55\text{HRC}$ 时的承载能力仅为 $60\text{HRC}$ 时的 $2/3$ ,同时淬硬层还需有足够的深度。

镶钢滚动导轨常用的热处理方式有整体淬火、渗碳淬火、感应淬火和渗氮等。举例如下:

**例 1** M6025—C 磨床镶钢导轨见图 12-11。材料采用 $9\text{Mn2V}$ 钢,硬度要求为 $61\text{HRC}$ 。工艺流程为锻造 $\rightarrow$ 退火 $\rightarrow$ 切削 $\rightarrow$ 淬火、回火 $\rightarrow$ 粗磨 $\rightarrow$ 稳定化处理 $\rightarrow$ 半精磨 $\rightarrow$ 时效。

热处理工艺:退火—— $790^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ ,降至 $710^\circ\text{C}$ 保温 $3\text{h}$ ,炉冷。硬度 $197 \sim 207\text{HBS}$ 。淬火——盐浴炉吊挂加热 $800 \sim 820^\circ\text{C} \times 25\text{min}$ ,淬入 $160^\circ\text{C}$ 硝酸盐浴中 $5 \sim 6\text{min}$ 取出热校直。随后在 $150 \sim 160^\circ\text{C}$ 硝酸盐浴中回火 $4\text{h}$ ,空冷,弯曲度 $\leq 0.6\text{mm}$ 。粗磨和半精磨后各在 $140 \sim 160^\circ\text{C}$ 油炉中时效 $8\text{h}$ 。

**例 2** SI—220 数控车床床身镶钢导轨见图 12-12。材料为 $\text{GCr15}$ 钢,硬度要求 $61\text{HRC}$ 。工艺流程为锻造 $\rightarrow$ 正火 $\rightarrow$ 退火 $\rightarrow$ 切削 $\rightarrow$ 去应力处理 $\rightarrow$ 精刨、粗磨、钻孔 $\rightarrow$ 淬火、回火 $\rightarrow$ 精磨。

热处理工艺如下:

正火: $910^\circ\text{C}$ 保温 $1.5 \sim 2\text{h}$ ,流动空气中冷却,晶粒度 $\geq 5$ 级,碳化物网 $\leq 3$ 级。

退火: $780^\circ\text{C}$ 保温 $3 \sim 4\text{h}$ ,炉冷至 $690^\circ\text{C}$ ,保温

4~6h, 炉冷至500℃以下出炉。硬度 197~207HBS, 球化2级。

去应力退火: 吊挂加热 600~650℃保温 3h, 低于400℃出炉空冷。

淬火: 860℃保温 40~50min, 油淬冷至170℃左右取出热校直。

回火: 140~160℃保温 2.5~3h。

3h, 低于400℃出炉空冷。

淬火: 吊挂装炉, 表面防脱碳, 840℃保温 70~80min, 油淬冷至170℃左右取出热校直。

深冷处理:  $\leq -60^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 。

回火: 160~180℃ $\times 3 \sim 4\text{h}$ 。

时效: 吊挂装炉, 140~160℃ $\times 12\text{h}$ 。

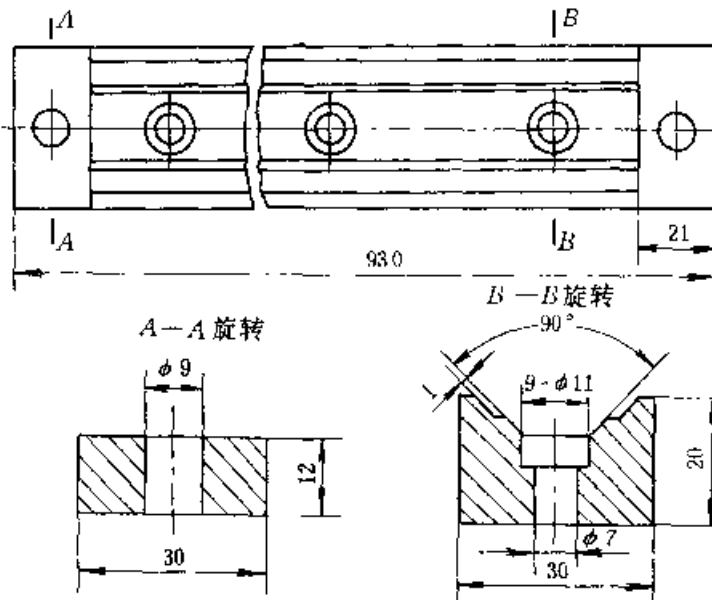


图 12-11 M6025 C 磨床导轨

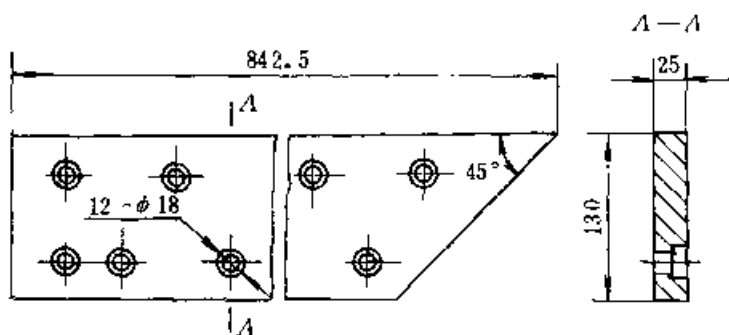


图 12-12 SI-220 车床导轨

**例 3** SI-232 凸轮车床床身上导轨见图 12-13。材料 CrWMn 钢, 硬度要求 61HRC。工艺流程为锻造→正火→退火→粗刨→去应力处理→半精刨、钻孔→淬火、深冷处理、回火→半精磨→时效→精磨。

热处理工艺如下:

正火: 920℃保温 1.5h, 流动空气中冷却。晶粒度  $\geq 5$  级, 碳化物网  $\leq 3$  级。

退火: 770℃保温 3~4h, 炉冷至 670℃保温 4~6h, 再炉冷至 450℃以下出炉。硬度 207~255HBS, 球化 2~4 级。

去应力退火: 吊挂装炉到 600~650℃保温

**例 4** T1163 单柱坐标镗床导轨见图 12-14, 材料 20Cr 钢, 渗碳淬火硬度要求 58HRC(孔除外)。工艺路线为锻造→退火→铣→去应力退火→铣、粗磨→渗碳→铣、钻孔→淬火、回火→粗磨→时效→半精磨→稳定化处理→精磨→时效。

热处理工艺如下:

退火: 830℃ $\times 2 \sim 4\text{h}$  炉冷到 500℃以下出炉。

去应力退火: 620℃ $\times 4\text{h}$ , 炉冷至 350℃以下出炉; 弯曲度  $< 1.0\text{mm}$ 。

渗碳: 920℃渗碳, 保温 8~10h, 降至 800℃出炉, 入坑冷却。渗碳层深 1.2~1.5mm, 弯曲度  $< 0.1\text{mm}$ , 不校直。

淬火: 在 550℃预热 50~60min, 在 820~840℃盐浴加热 10~12min, 淬入 200℃硝盐中。

回火: 160℃ $\times 16\text{h}$  油浴。

**例 5** JCS-013C 加工中心导轨见图 12-15。材料 38CrMoAlA 钢, 要求硬度  $\geq 900\text{HV}$ , 渗氮深度  $\geq 0.5\text{mm}$ , 工艺流程为锻造→刨→调质→刨、铣、钻→去应力退火→磨、铣→稳定化处理→磨→渗氮→精磨。

热处理工艺如下:

调质: 吊装、预热在 650℃保温 60~90min, 930~940℃加热保温 110~120min 油淬, 650~680℃ $\times 2 \sim 3\text{h}$  回火。硬度 241~269HBS, 平直度  $\leq 1.0\text{mm}$ 。

去应力退火: 吊装加热到 600~650℃ $\times 12\text{h}$ , 炉冷至  $\leq 350^{\circ}\text{C}$  出炉, 平直度  $\leq 0.5\text{mm}$ 。

时效: 在油浴炉中吊挂 180℃ $\times 12\text{h}$ 。

离子渗氮: 吊装, 加热到 520~530℃保温 16h, 再升温到 560~580℃保温 16h, 渗剂为氨气, 炉冷到  $\leq 150^{\circ}\text{C}$  出炉。

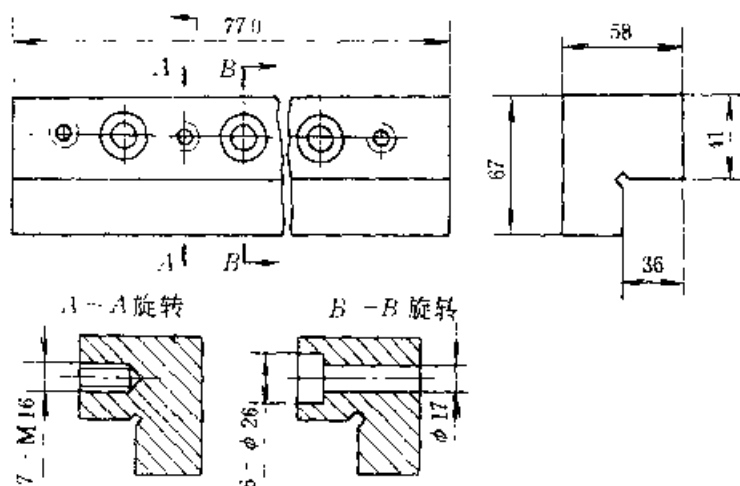


图 12-13 SI-232 凸轮车床床身上导轨

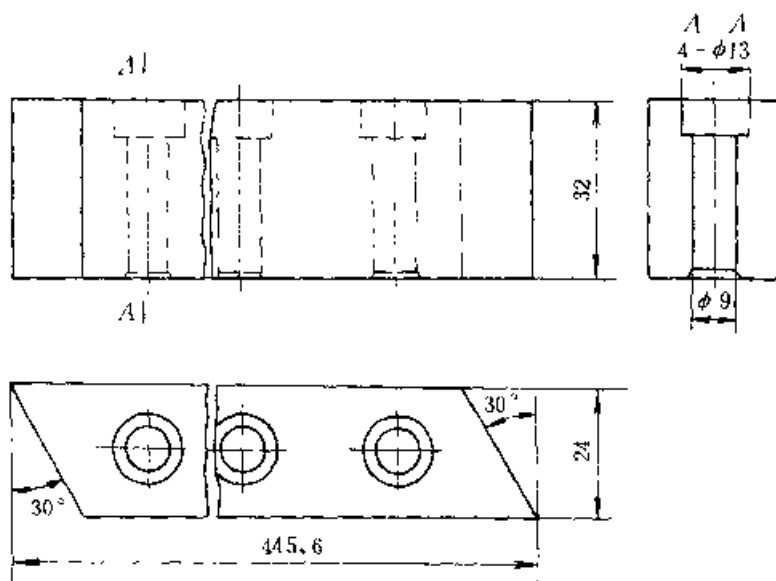


图 12-14 T4163 坐标磨导轨

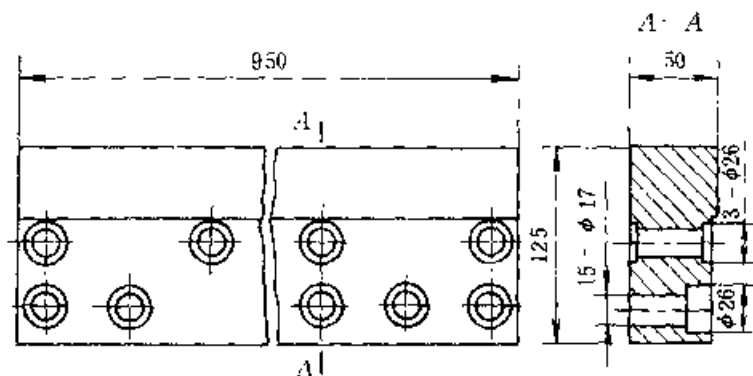


图 12-15 JCS-013 加工中心导轨

### 12.1.7 机床导轨用材和热处理的进展

机床导轨用材和热处理明显的发展趋向有四：一是铸铁淬火导轨比例增加；二是镶钢导轨比例增加；三是直线滚动导轨比例增加；四是非金属材料

导轨，特别是塑料导轨比例增加。此外，淬火变形较小的激光淬火，在机床导轨上也有少量应用。它的变形量仅为高频淬火的  $1/5 \sim 1/10$ ，可大大节省淬火后的磨削加工工时。

上面提到的直线滚动导轨其突出优点是无间

隙,可施加预紧力,刚度高,能长期保持精度,可高速运行,低速又无爬行。直线滚动导轨主要由导轨体、滑块、保持器、滚珠和端盖等组成。国内外大都在专业生产厂制造,组装或单元部件出售。

## 12.2 机床主轴的热处理

### 12.2.1 主轴服役条件及失效形式

主轴是机床的重要零件之一,切削加工时,高速旋转的主轴承受弯曲、扭转和冲击等多种载荷,要求它具有足够的刚度、强度、耐疲劳、耐磨损以及精度稳定等性能。

与滑动轴承相配的轴颈可能发生咬死(又称抱轴),使轴颈工作面咬伤,甚至咬裂,这是磨床砂轮主轴常见的失效形式之一。主要起因有润滑不足、润滑油不洁净(含有杂质微粒)、轴瓦材料选择不当、结构设计不合理、加工精度不够、主轴副装配不良及间隙不均等。咬死现象一旦发生,则主轴运转精度下降,磨削时产生振动,被磨削零件表面

出现波纹。解决措施除针对上述原因改进外,在主轴选材和热处理方面,应提高硬度、红硬性、热强度以增强抗咬死能力。实践证明:抗咬死能力依 65Mn 钢中频淬火 → GCr15 钢中频淬火 → 38CrMoAlA 钢渗氮顺序提高。

带内锥孔或外圆锥度的主轴,工作时与配合件虽无相对滑动,但装卸频繁。例如,铣床主轴常需调换刀具,磨床头尾架主轴常需调换卡盘和顶尖,磨床砂轮主轴常需调换砂轮等,在装卸中都易使锥面拉毛磨损,影响精度,故也须硬化处理。

与滚动轴承相配的轴颈虽无磨损,但为改善装配工艺性和保证装配精度也须有一定的硬度。

### 12.2.2 主轴材料

主轴依用材和热处理方式可分为四种类型,即局部淬火主轴,渗碳主轴,渗氮主轴和调质(正火)主轴。根据主轴的工作条件,选择材料,制订热处理技术要求,见表 12-9。

表 12-9 机床主轴材料

类别	工 作 条 件	材 料	热 处 理 及 硬 度	应 用 实 例
渗碳	①与滑动轴承配合 ②中等载荷,心部强度要求不高,但转速高 ③精度不太高 ④疲劳应力较高,但冲击不大	20Cr 20MnVB 20Mn2B	渗碳淬火 58~62HRC	精密车床 内圆磨床等的主轴
	①与滑动轴承配合 ②重载荷,高转速 ③高疲劳,高冲击	20CrMnTi 12CrNi3	渗碳淬火 58~63HRC	转塔车床,齿轮磨床, 精密丝杠车床,重型齿轮 铣床等主轴
渗氮	①与滑动轴承配合 ②重载荷,高转速 ③精度高,轴颈小 ④高疲劳,高冲击	38CrMoVA	调质 250~280HBS 渗氮 $\geq 900\text{HV}$	高精度磨床的主轴镗 床镗杆
淬 火	①与滑动轴承配合 ②中轻载荷 ③精度不高 ④低冲击、低疲劳	45	正火 170~217HBS 或调质 220~ 250HBS 小规格局部整体淬火 42~ 47HRC 大规格轴颈表面感应淬火 48 ~52HRC	龙门铣床,立铣、小型 立式车床等小规格主轴, C650, C660, C8480 等大 重型车床主轴
	①与滑动轴承配合 ②中等载荷,转速较高 ③精度较高 ④中等冲击和疲劳	40Cr 42MnVB 42CrMo	调质 220~250HBS 轴颈表面淬火 52~61HRC(42CrMo 取上限,其他钢 取中、下限)装拆部位表面淬火 48~ 53HRC	齿轮铣床、组合车床、 车床、磨床砂轮等主轴

(续)

类别	工作条件	材料	热处理及硬度	应用实例
淬火	①与滑动轴承配合 ②中、重载荷 ③精度高 ④高疲劳,但冲击小	65Mn GCr15 9Mn2V	调质 250~280HBS 轴颈表面淬火 $\geq 59\text{HRC}$ 装卸部位表面淬火 50~55HRC	磨床主轴
调质或正火	①与滑动轴承配合 ②中小载荷,转速低 ③精度不高 ④稍有冲击	45 50Mn2	调质 220~250HBS 正火 192~241HBS	一般车床主轴 重型机床主轴

### 12.2.3 主轴的热处理工艺

典型机床主轴热处理工艺实例如下。

**例1** Y7163 齿轮磨床主轴见图 12-16。材料为 20CrMnTi 钢,渗碳淬火,硬度要求 58~63HRC,渗碳层深度 1.4~1.6mm,晶粒度 6~8 级,碳化物网 $\leq 4$  级。

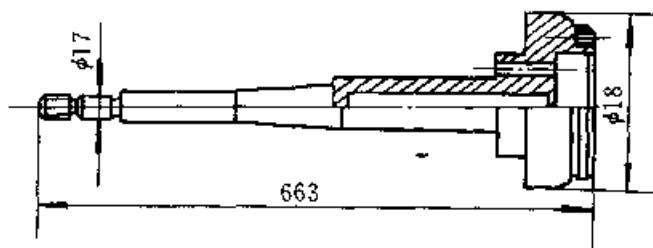


图 12-16 Y7163 齿轮磨床主轴

热处理工艺

正火:加热到 930℃保温 3h,空冷。

渗碳:粗车后气体渗碳,930℃ $\times$ 8h,炉冷至 600℃,出炉空冷,矫直。

淬火:830℃ $\times$ 2h,油淬。

深冷处理:-70℃ $\times$ 2h,取出恢复到室温。

回火:160℃ $\times$ 4h,空冷。

时效:160℃ $\times$ 18h。

**例2** M1432 磨床主轴见图 12-17,材料 38CrMoAlA,要求渗氮层表面硬度 $\geq 950\text{HV}$ ,渗氮层深度 $\geq 0.43\text{mm}$ ,硬度梯度要求单边磨去 0.08mm,硬度 $\geq 900\text{HV}$ ,畸变要求径向圆跳动 $\leq 0.05\text{mm}$ 。

热处理工艺

调质:粗车后加热到 940℃保温 2.5~3h,油淬,在 650~690℃回火 3~

3.5h,硬度 248~280HBS。

高温回火:半精车后在 610℃ $\times$ 5~5.5h,炉冷至 $\leq 350^\circ\text{C}$ 出炉空冷。

渗氮:精车并磨削后进行二段离子渗氮,一段 500℃ $\times$ 18h,二段 570℃ $\times$ 20h,分解氨流量为 0.5L/min。渗氮后表面硬度为 1081~1115HV。单边磨去 0.1mm,硬度仍有 907~933HV。脆性 1 级,径向跳动 $\leq 0.03\text{mm}$ 。

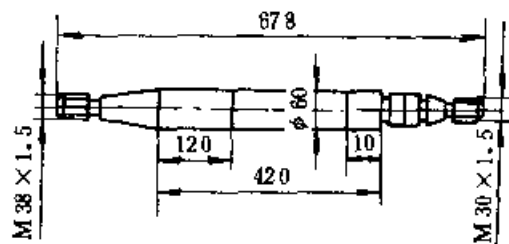


图 12-17 M1432 磨床主轴

**例3** T649A 镗铣床镗杆见图 12-18。材料 38CrMoAlA 钢,心部硬度要求 253HBS,渗氮层表面硬度要求 $\geq 900\text{HV}$ ,渗氮层深度要求 0.5mm。

热处理工艺

正火:原材料在井式炉中吊挂 940℃ $\times$ 3~3.5h,空冷。

调质:车削后 500~600℃ $\times$ 1.5~2h 预热,升

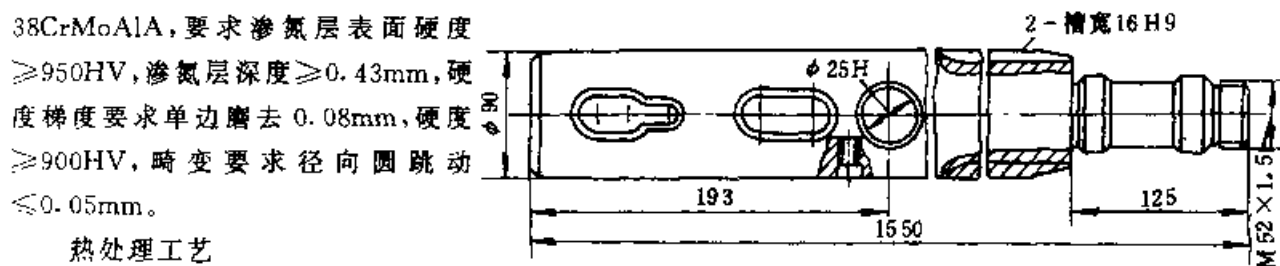


图 12-18 T649A 镗铣床镗杆

温至  $930 \sim 940^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ , 油淬,  $620^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$  回火空冷。硬度  $255 \sim 269\text{HBS}$ , 表面  $10\text{mm}$  内为索氏体。

去应力处理: 车外圆、铣槽、钻孔后,  $\leq 300^{\circ}\text{C}$  装炉, 加热至  $(590 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  保温  $10\text{h}$ , 炉冷至  $\leq 300^{\circ}\text{C}$  出炉空冷。

时效: 磨外圆和锥孔后经  $190^{\circ}\text{C} \times 12\text{h}$ 。

离子渗氮: 精加工后进行两段离子渗氮, 一段  $520 \sim 530^{\circ}\text{C} \times 20\text{h}$ , 二段  $560 \sim 570^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ , 氮气在  $800^{\circ}\text{C}$  热分解后供给, 流量  $0.5 \sim 0.7\text{L}/\text{min}$ , 压力  $2.67 \times 10^7\text{Pa}$ 。渗氮后表面磨去  $0.10\text{mm}$ , 硬度  $\geq 850\text{HV}$ , 脆性  $\leq 1$  级, 径向圆跳动  $\leq 0.06\text{mm}$ 。

例4 T615K 镗床镗杆见图 12-19。材料  $38\text{CrMoAlA}$  钢, 基体硬度  $220 \sim 260\text{HBS}$ , 渗氮层表面硬度  $\geq 900\text{HV}$ , 渗氮层深度  $0.45 \sim 0.65\text{mm}$ 。

热处理工艺

退火: 锻后  $840 \sim 870^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ , 炉冷至  $550^{\circ}\text{C}$ , 出炉空冷。

调质: 粗车后  $930 \sim 950^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$ , 油淬,  $620 \sim 650^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ , 空冷, 矫直。

去应力处理: 精车外圆及锥孔, 粗刨键槽后进行  $600 \sim 620^{\circ}\text{C} \times 10 \sim 12\text{h}$ , 炉冷至  $150^{\circ}\text{C}$  出炉空冷。

渗氮: 粗磨后气体渗氮, 先在氨分解率  $18\% \sim 25\%$  的气氛中, 经  $500 \sim 510^{\circ}\text{C} \times 20\text{h}$  渗氮, 再于氨分解率  $40\% \sim 50\%$  气氛中, 经  $510 \sim 520^{\circ}\text{C} \times 70\text{h}$  渗氮, 最后在氨分解率  $> 90\%$  的气氛中退氮  $2\text{h}$ , 炉冷至  $150^{\circ}\text{C}$  出炉。硬度  $\geq 950\text{HV}$ , 精磨、精研后成品表面硬度  $\geq 900\text{HV}$ 。

例5 TY7432 剃齿刀磨齿机前主轴见图 12-20。材料  $\text{GCr15}$  钢, 要求硬度  $62\text{HRC}$ 。

热处理工艺

球化退火: 锻后  $780^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$  炉冷至  $710^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ , 再炉冷至  $\leq 500^{\circ}\text{C}$ , 出炉空冷。显微组织为球状珠光体  $2 \sim 5$  级, 碳化物网  $\leq 3$  级。

淬火: 车削后盐浴淬火, 先在  $550^{\circ}\text{C}$  预热, 升温到  $850^{\circ}\text{C}$ , 保温  $70\text{min}$ , 淬入  $160^{\circ}\text{C}$  硝盐保持  $12\text{min}$

取出空冷。

深冷处理: 淬火后  $-60^{\circ}\text{C}$  处理  $2\text{h}$ , 取出。

回火: 回复到室温后进行  $160^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$  回火。

时效: 粗磨后  $160^{\circ}\text{C} \times 16\text{h}$  时效, 径向跳动  $\leq 0.2\text{mm}$ 。

例6 MQ8260 曲轴磨床头架主轴, 见图 12-21。材料  $65\text{Mn}$  钢, 要求调质到  $(250 \pm 15)\text{HBS}$ , 外圆  $\phi 110\text{mm}$ ,  $\phi 85\text{mm}$  及 5 号锥孔要求淬火到  $56\text{HRC}$ 。

热处理工艺

退火: 锻后  $800^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ , 炉冷至  $550^{\circ}\text{C}$  后空冷。

调质: 车内外圆后进行  $810^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ , 油淬,  $630^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{h}$  高温回火, 空冷。

淬火:  $L = 225$  段局部盐浴淬火,  $800^{\circ}\text{C} \times$

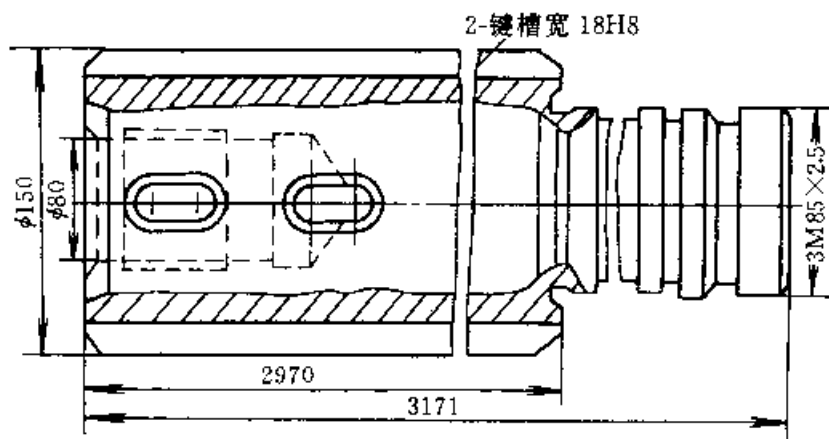


图 12-19 T615K 镗床镗杆

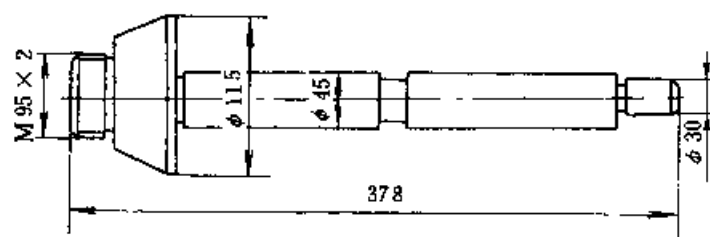


图 12-20 TY7432 剃齿刀磨齿机前主轴

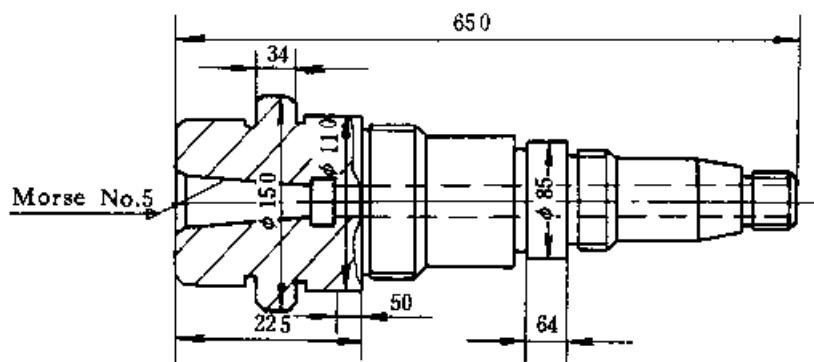


图 12-21 MQ8260 曲轴磨床头架主轴

20min, 淬入盐水10s取出入油冷透,  $\phi 85\text{mm} \times 64\text{mm}$  段中频感应淬火在 ZP100, 2500HZ 中频上加热, 感应器内径  $\phi 95\text{mm}$ , 高 25mm (见图 12-22), 功率 50kW, 移动速度 120~130mm/min。

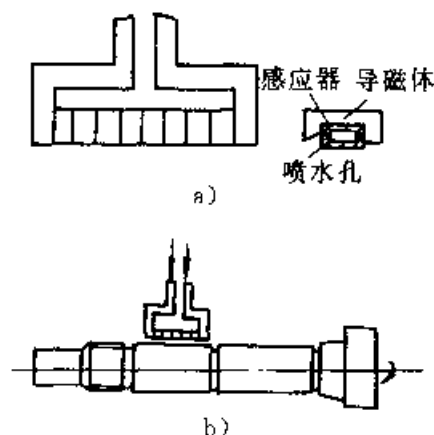


图 12-22 外圆感应器

a) 感应器结构 b) 淬火时位置

回火: 整体  $200^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$  空冷。

时效: 磨加工后  $160^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$ , 空冷。

在局部盐浴淬火前  $\phi 150\text{mm} \times 30\text{mm}$  段和螺纹段应包扎石棉火泥, 保证淬火硬度  $\leq 30\text{HRC}$ , 以为随后的钻孔和车螺纹作好准备。 $L=50\text{mm}$  的淬火过渡区不考核硬度。

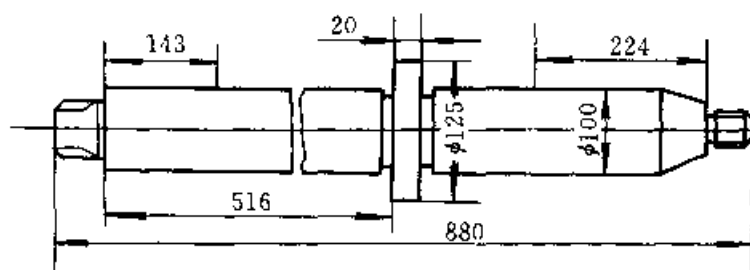


图 12-23 M7150A 砂轮主轴

例 7 M7150A 平面磨床砂轮主轴见图 12-23, 材料 65Mn 钢, 要求心部调质到  $(250 \pm 15)\text{HBS}$ , 表面中频感应淬火硬度  $\geq 59\text{HRC}$ 。

热处理工艺

退火: 锻后  $800^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$  炉冷至  $550^{\circ}\text{C}$  出炉空冷。

调质:  $810^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{h}$ , 先盐水淬冷 20s 再油冷, 然后  $600^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$  回火, 空冷。

感应淬火: 精车后进行中频感应淬火, 使用 ZP-100, 2500Hz 设备, 参数见表 12-10。

回火:  $160^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 。

时效: 粗磨后  $160^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ 。

20mm 段的两边及锥体段硬度允许低至 50HRC。

表 12-10 M7150A 砂轮主轴中频淬火参数

淬火部位尺寸/mm	功率/kW	移动速度/(mm·min <sup>-1</sup> )
$\phi 100 \times \begin{smallmatrix} 143 \\ 224 \end{smallmatrix}$	50	110~130
$\phi 125 \times 20$	50	同时加热
温度/ $^{\circ}\text{C}$	感应器尺寸/mm	淬火介质
820	$\phi 115 \times 29$	喷水
840	$\phi 135 \times 34$	喷雾 20s 空冷

例 8 CA8480 轧辊车床主轴, 见图 12-24。材料 45 钢, 要求表面感应淬火, 硬度 48HRC。

热处理工艺

正火: 锻后  $840 \sim 860^{\circ}\text{C}$  空冷。

感应淬火: 粗车后使用 208 中频发电机和  $\phi 1000\text{mm} \times 5000\text{mm}$  卧式淬火机。工艺参数如表 12-11。

回火: 井式炉  $320 \sim 340^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ , 空冷。

锥孔用锉刀检查硬度为 45~50HRC, 有 8~15mm 宽的软带。 $\phi 300\text{mm}$  及  $\phi 240\text{mm}$  外圆肖氏硬度计测定为 60~70HS。 $\phi 300\text{mm}$  一段靠法兰盘处允许有 15mm 宽的淬火过渡区。

例 9 C2150 卧式六轴自动车主轴, 见图 12-25。材料 45 钢无缝钢管。要求调质硬度为 235HBS, 表面淬火硬度为 48HRC。

热处理工艺

调质: 加热到  $830 \sim 850^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$  保温, 水淬, 再加热到  $600^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$  保温回火, 硬度 222~250HBS。

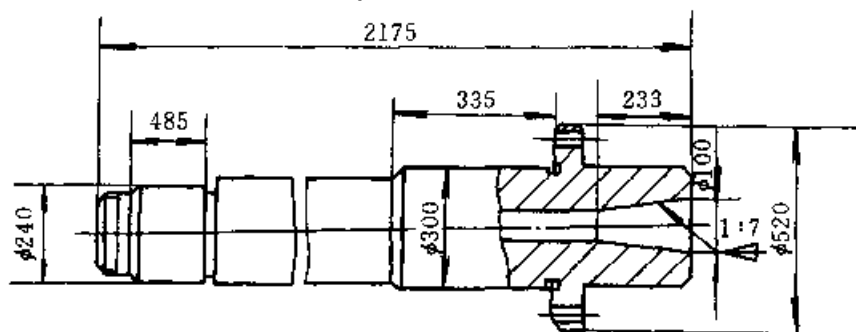


图 12-24 CA8480 轧辊车床主轴

感应淬火:在 GP-100,250kHz 高频上,对粗、精车后的主轴进行淬火,工艺参数如表 12-12。内孔淬火采用图 12-26 所示的内孔感应器。

淬火表面硬度 52~58HRC,深度 1.0~1.5mm,径向圆跳动 $\leq 0.40\text{mm}$ 。内孔硬度可用手

提式 Emco-Intesfs83 型内表面洛氏硬度计测量。

例 10 CA6140 卧式车床主轴见图 12-27。材料 45 钢,要求 C 面及  $\phi 90\text{mm} \times 80\text{mm}$  段外圆淬硬,硬度 52HRC,莫氏 6 号锥孔硬度 48HRC。

表 12-11 CA8480 轧辊车床主轴中频淬火参数

淬火部位	感应器尺寸/mm	匝 比	功率因数 $\cos\varphi$	电 容 /kF	电 压 /V	功 率 /kW	淬火方式	速 度
1:7 锥孔	$L=250$	1:6	0.95	627	600	120	连续	零件转速 0.1r/min
$\phi 300$ (mm)外圆 $\phi 240$	$\phi 308 \times 22$ $\phi 247 \times 16$	1:6	0.90~ 0.95	481	750	190	连续	感应器移动 150~ 170mm/min

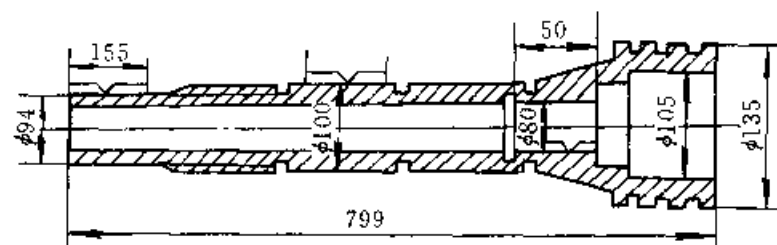


图 12-25 C2150 卧式六轴自动车主轴

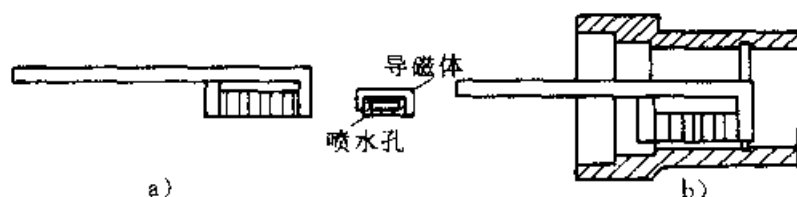


图 12-26 内孔感应器

a) 感应器结构 b) 淬火时位置

表 12-12 C2150 卧式六轴自动车床主轴高频淬火参数

淬火部位	感应器截面尺寸 /mm	感应器与轴表面间隙 /mm	线 速 度 (mm/s)	加热温度 /°C	淬火介质
内孔外圆	8×7	2	3	900~920	自来水喷冷

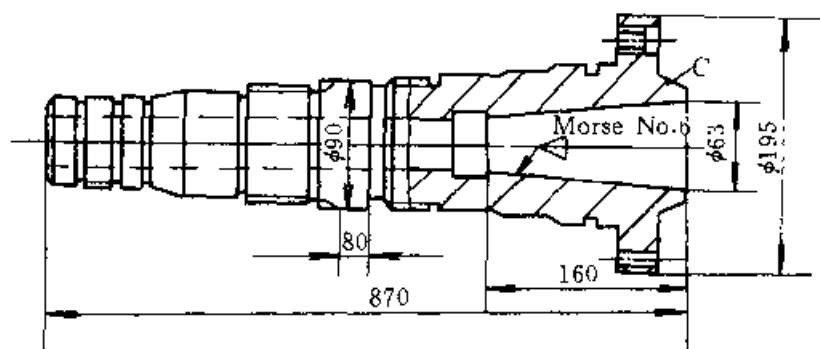


图 12-27 CA6140 卧式车床主轴



### 热处理工艺

正火: 锻后加热到 840~860℃空冷。

感应淬火: 粗、精车后在 GP-100, 250kHz 高频设备上淬火。电参数和热处理参数见表 12-13。内锥孔淬火感应器装有扇形导磁体, 淬火时, 先由外向内预热一次, 再由内向外加热淬火, 锥孔淬硬深度, 口部 0.5mm, 中部 0.6mm, 底部 0.8~0.9mm。锥孔也可采用盐浴局部加热到 810~830℃, 保温 20min 后, 内孔喷 5%~10% (质量分数) NaCl 水溶液 40~45s 再淬入油中冷透。锥孔内表面硬度可用手提式 Emco-Intests83-35-102 型硬度计测定。

### 12.2.4 机床主轴用材及热处理的进展

机床主轴的转速愈来愈快, 一般在 10000r/min 以上, 国外数控加工中心达 5~6 万 r/min, 甚至更高; 精度愈来愈高; 传动力矩愈来愈大。对主轴提出了更高的精度保持性、耐磨性以及抗擦伤, 抗咬死等的要求, 促使其用材和热处理向更高档次发展。表现在以下几方面:

(1) 国外渗碳主轴占 46.4%, 国内仅占 11.9%, 而局部淬火主轴国外仅占 22.5%, 国内则高达 49.3%。国内渗氮主轴占 25.4% 稍高于国外的 19.0%。调质(正火)主轴国外仅占 7.2%, 而国内则占 13.4%。由上可见, 我国机床主轴用材和热处理的档次, 从总体看低于国外水平。

(2) 国外局部淬火结构钢机床主轴的含碳量有向高含量发展倾向。例如, 使用 50、55、60 和 65Mn 等代替原 45、40Cr 钢, 以提高其淬火硬度。

(3) 研制新型的刚度大、惯性小、耐磨性好的陶瓷主轴材料, 表面喷涂陶瓷的主轴已有所应用。

(4) 滚动轴承和静压轴承的主轴应用有增加趋势。

(5) 美国超精密加工机床主轴有采用不锈钢制造。以求获得高硬度、高耐腐蚀性和低粗糙度的统一。

## 12.3 机床丝杠的热处理

### 12.3.1 丝杠服役条件及失效形式

丝杠是机床的重要零件之一, 应用于机床的进给机构和调整移动机构。在螺纹车床、螺纹磨床、铲床、坐标镗床和测量机中, 其精度高低直接

影响这些机床的加工精度、定位精度或测量精度。数控机床在高进给速度下要求工作平稳和高定位精度, 故应使用滚珠丝杠副减少摩擦阻力。其动静摩擦系数相差极小, 在静止、低速和高速时摩擦转矩几乎不变, 传动灵敏、平稳, 低速无爬行。传动效率可达 90% 以上, 比梯形丝杠副高 2~4 倍, 滚珠丝杠可消除轴向间隙, 提高轴向刚度, 预拉伸安装可减少丝杠的受热伸长量, 故定位精度和重复精度高。

滑动丝杠主要失效形式是磨损, 滚珠丝杠主要失效形式是接触疲劳, 同时也存在磨损。对于精密滑动丝杠和精密滚珠丝杠还应具有良好的几何精度稳定性。此外, 在腐蚀性介质和较高温度等特殊条件下工作的丝杠, 还要求具有耐腐蚀性和耐热性等。

### 12.3.2 丝杠材料

1. 梯形丝杠材料 梯形丝杠的材料和热处理工艺选用一般原则如下:

(1) 低精度, 轻载荷丝杠常用碳素结构钢制造, 经正火、调质处理, 或用冷轧易削钢直接机械加工而成。

(2) 高精度轻载荷常用碳素工具钢或合金工具钢制造, 经调质或球化退火处理。

(3) 低精度、有耐磨性要求的可用中碳结构钢制造, 经氮碳共渗处理直接使用。

(4) 高精度, 工作频繁的丝杠常用合金工具钢制造, 整体淬火, 还有采用高级渗氮钢制造, 经渗氮处理。渗氮丝杠可承受较高温度工作。

(5) 高精度, 要求耐磨的小规格丝杠可用低合金钢制造, 进行渗碳淬火。

(6) 用于测量, 受力不大的丝杠可用感应淬火。

梯形丝杠用材料见表 12-13。

梯形丝杠原材料的允许缺陷级别见表 12-14。

2. 滚珠丝杠材料 滚珠丝杠的材料和热处理工艺选用一般原则如下。

(1) 低精度轻载荷滚珠丝杠用碳素结构钢制造, 有些可冷轧成形直接使用。

(2) 高精度大载荷滚珠丝杠多用合金工具钢和轴承钢制造。常采用感应淬火, 也有采用火焰淬火和整体淬火的。

(3) 小规格滚珠丝杠有些厂家习惯用渗碳淬火。

滚珠丝杠用材料见表 12-15。

(4) 某些热处理时易变形的高精度滚珠丝杠可用渗氮钢制造,经渗氮处理后使用。

滚珠丝杠原材料的允许缺陷级别见表 12-16。

(5) 在腐蚀和高温环境中工作的滚珠丝杠可选用沉淀硬化不锈钢制造。

3. 滚珠螺母和反向器的材料和热处理 滚珠丝杠副的滚珠螺母和反向器的用钢和热处理技术要求,见表 12-17。

表 12-13 梯形丝杠材料

丝杠精度等级及工作条件		钢 号	热 处 理
普通精度 (7 级及其以下)	轻 载	45, 50	正火或调质
		Y45MnV	
	中 载	40Cr, 45, Y40Mn	氮碳共渗, 硫氮碳共渗
高 精 度 (6 级及其以上)	轻 载	T10A, T12A, <sup>45</sup> <sub>40Cr</sub>	调质, 球化退火
	重 载	9Mn2V, CrWMn, T12A	淬火
		38CrMoAlA, 35CrMo, 20CrMnTi	渗氮
	高 温	0Cr57Ni4Cu4Nb	固溶处理+时效

表 12-14 梯形丝杠原材料的允许缺陷

丝杠精度		6 级 及 其 以 上		7 级	8 级及其以下	渗氮丝杠
钢 号		(T10A) (T12A)	CrWMn 9Mn2V	T10(T10A) T12(T12A) 45, 40Cr Y40Mn	45 40Cr Y40Mn	20CrMnTi 38CrMoAlA
宏观 检 查	中心疏松	≤2	≤2	≤3	≤3	≤2
	一般疏松	≤2	≤2	≤3	≤3	≤2
	方形液析	≤2	≤2	≤3		≤2
微 观 检 查	氧化物	≤2	≤2	≤3	≤3	≤2
	硫化物	≤2	≤2	≤2	≤3	≤2
	氧硫化物和	≤3	≤3	≤4	≤5	≤3
	带状碳化物	≤2	≤2			
	网状碳化物	≤3 <sup>①</sup> ≤2 <sup>②</sup>	≤3	碳素工具钢 ≤3 <sup>①</sup> ≤2 <sup>②</sup>		
	珠光体球化级别	2~4	2~4	碳素工具钢 2~4		

① 截面 > 60mm。

② 截面 ≤ 60mm。

表 12-15 滚珠丝杠材料

丝杠精度等级及工作条件	钢 号	热 处 理
低精度轻载	冷轧 60 钢	
高精度重载	GCr15, GCr15SiMn CrWMn, 9Mn2V 50CrMo	外圆中频感应淬火, 沿滚道感应淬火, 整体淬火
高精度热处理易变形	38CrMoAlA	渗氮
小 规 格	20CrMnTi	渗碳淬火
腐蚀、高温介质工作	1Cr15Co14Mo5VN 0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶+深冷+时效 固溶+时效

表 12-16 滚珠丝杠原材料允许缺陷

检 查	项 目	精 度		
		精密级	标准级	普通级
宏观检查	中心疏松	$\leq 2$	$\leq 2.5$	$\leq 2$
	一般疏松	$\leq 1$	$\leq 1.5$	$\leq 2$
	偏析	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$
微观检查	氧化物	$\leq 2$	$\leq 2.5$	$\leq 3$
	硫化物	$\leq 2$	$\leq 2.5$	$\leq 3$
	网状碳化物	$\leq 2.5$	$\leq 3$	$\leq 3$
	带状碳化物	$\leq 2$	$\leq 3$	$\leq 3$
	碳化物液析	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$
	珠光体	GCr15, GCr15SiMn 2~5级		
	球化级别	9Mn2V, CrWMn 2~4级		

表 12-17 滚珠螺母和反向器材料

零件名称	钢 号	热处理技术要求
滚珠螺母	GCr15, CrWMn	整体淬火 60~62HRC
反向器	GCr15, CrWMn 20CrMnTi, 40CrMo 40Cr	整体淬火 58HRC 离子渗氮深度 0.3~0.4mm, 硬度 $\geq 550\text{HV}$ 离子渗氮深度 0.3~0.4mm, 硬度 $\geq 500\text{HV}$

### 12.3.3 梯形螺纹丝杠热处理

#### 12.3.3.1 普通丝杠热处理

1. 正火 负荷轻的 7 级和 7 级以下梯形螺纹丝杠, 可用此种工艺。为减少正火时弯曲变形可将坯料通过电阻加热三辊热校直的方法进行正火。

2. 调质 中碳结构钢调质后硬度要求 220~250HBS。回火后如径向跳动超差应进行矫直, 并作去应力处理。中频感应加热调质, 与电炉加热调质相比, 具有操作方便, 劳动强度低, 质量稳定, 氧化脱碳少, 成本低。中频感应加热调质自动线已在生产应用多年, 效果良好。

3. 气体氮碳共渗: 80 年代中开始采用此种工艺处理普通梯形丝杠, 耐磨性提高一倍左右, 用于中等负

荷。例如, X60 铣床工作台升降丝杠, 尺寸为  $\phi 32\text{mm} \times 620\text{mm}$ , 45 钢制造。棒料经正火预备热处理后, 粗加工, 经  $590 \sim 600^\circ\text{C} \times 6 \sim 8\text{h}$ , 随炉冷却至  $300^\circ\text{C}$  以下出炉空冷的去应力处理, 再进行气体氮碳共渗。共渗气源有酒精水溶液裂化气加氨气和直接滴酒精入渗氮炉, 同时通氨气。要求表面硬度为  $480\text{HV}_{0.1}$ , 白层深度  $\geq 12\mu\text{m}$ 。典型工艺是在  $570^\circ\text{C}$  保温 3~4h。冷却方式有两种。一是提罐至炉外冷却, 继续通氨气和裂化气, 待冷却到  $180^\circ\text{C}$  以下, 丝杠出罐, 表面呈银灰色; 另一种是保温结束后立即出炉出罐油冷, 表面呈黑色。也有在精车螺纹后进行硫碳氮共渗处理。例如, 45 钢的 7 级普通丝杠, 在 RRN-60-6 型炉, 进行滴注式硫碳氮共渗。滴注液配比为 80mL 工业酒精加 20mL 硫代氰酸铵 ( $\text{NH}_4\text{CN}$ ), 滴量为  $100 \sim 140$  滴/min ( $2.5 \sim 3\text{mL/min}$ ), 氨流量为  $20 \sim 25\text{L/min}$ , 处理温度  $570 \sim 580^\circ\text{C}$ , 保温 3~4h, 提罐冷却。表面硬度  $\geq 480\text{HV}_{0.1}$ , 白层厚度  $\geq 12\mu\text{m}$ 。

#### 12.3.3.2 精密丝杠

6 级和 6 级以上丝杠为精密丝杠。

1. 精密不淬硬丝杠 通常用高碳工具钢制造, 少数用结构钢制造

例 1 SG8630 车床 T85  $\times 12$  丝杠, 材料 T12A 钢, 下料后进行球化退火, 车、磨后分别进行中, 低温时效。热处理工艺见图 12-28。硬度  $170 \sim 217\text{HBS}$ 。

例 2 45 钢  $\phi 35\text{mm} \times 1150\text{mm}$  6 级丝杠在粗车后进行调质球化。在精车和粗磨后进行中, 低温时效。热处理工艺见图 12-29。硬度  $207 \sim 220\text{HBS}$ 。

#### 2. 精密淬硬丝杠

例 1 SM8630A 车床丝杠, 直径  $\phi 100\text{mm}$ , 全长 6486mm, 螺纹部分长 5460mm, 螺纹部分采用

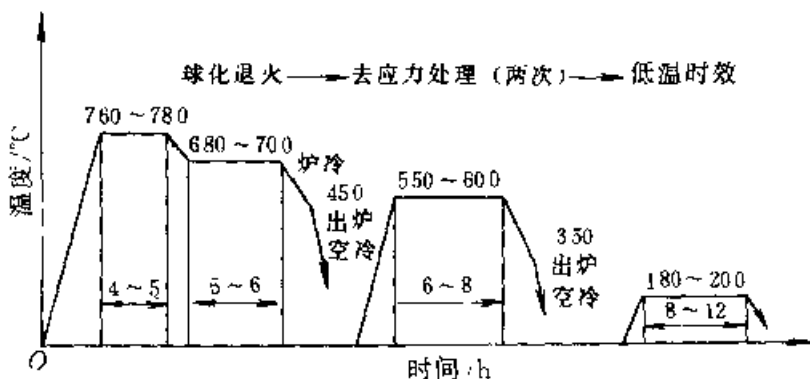


图 12-28 T12A 钢丝杠球化退火工艺图

14段相接,每段长392mm(包括接头每段长390mm,如图12-30。T12A钢制造。接头技术精湛,接头密合良好。下料后球化退火,车外圆及铣梯形螺纹,然后在550~600℃去应力处理,再于760~780℃加热淬火,220~260℃回火,磨外圆和螺纹后,进行低温时效,具体热处理工艺如图12-31。硬度56~60HRC,径向圆跳动 $\leq 0.15\text{mm}$ 。

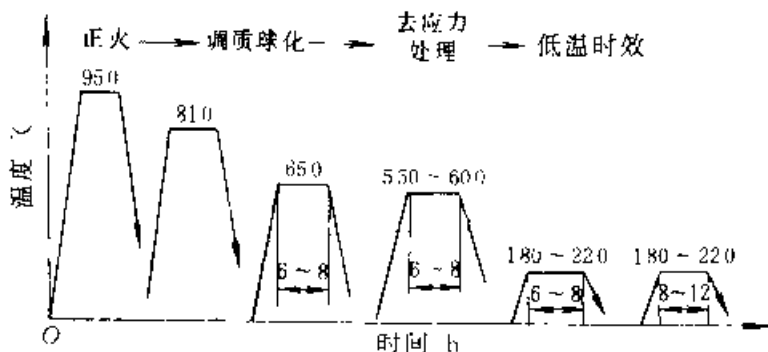


图 12-29 45 钢丝杠调质球化工艺

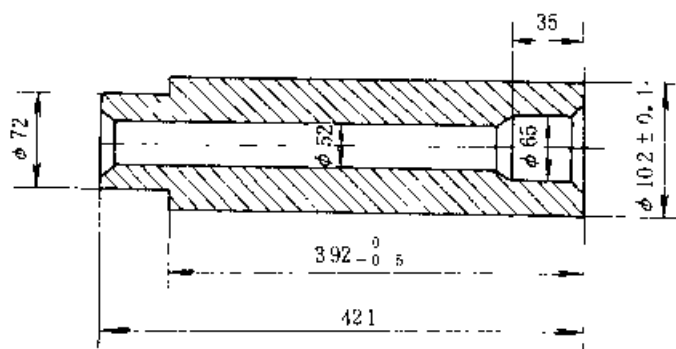


图 12-30 SM8650A 车床接头丝杠段

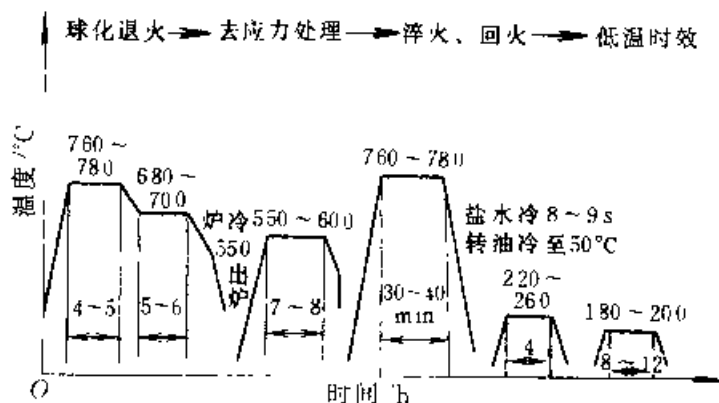


图 12-31 T12A 钢接头丝杠热处理工艺

例2 C8955 铲床丝杠,螺纹精度6级,如图12-32。材料CrWMn钢,整体淬硬。工艺路线:下料 $\phi 70\text{mm} \times 1595\text{mm}$ →正火→球化退火→粗车外圆及螺纹→去除应力处理→粗磨外圆、半精车螺纹、铣键槽→淬火、回火→粗磨外圆及螺纹→低温

时效→精磨外圆及螺纹。处理工艺如图12-33。6级精度低温时效一次,4级和5级精度低温时效两次。成品硬度56~61HRC。

例3 中小规格精密淬硬丝杠( $\phi < 50\text{mm}$ )多用9Mn2V钢制造。工艺流程:下料→正火(消除网状碳化物合格者不作)→球化退火→粗车外圆和螺纹→去应力处理→粗磨外圆、半精车螺纹、铣键槽→淬火、回火→粗磨外圆及螺纹→低温时效→精磨外圆及螺纹。热处理工艺见图12-34。

例4 S7332 螺纹磨床5级精度丝杠见图12-35。材料9Mn2V钢。工艺流程为下料→调质→粗车及粗磨外圆→中频淬火→热矫直→深冷处理→回火→磨外圆、粗磨螺纹→低温时效→精磨→低温时效。

热处理工艺

中频感应淬火:设备为100kW,2500Hz的中频发电机,卧式淬火机,带有三个淬火托架。工艺为输出功率40kW,电压400V,电流120A,  $\cos\phi 0.95$ ,感应器内径 $\phi 80\text{mm}$ ,高20mm,感应器移动速度100mm/min。

深冷处理:  $-70^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 。

回火:  $200 \sim 240^\circ\text{C} \times 6 \sim 8\text{h}$ 。

低温时效:  $180 \sim 200^\circ\text{C} \times 12 \sim 24\text{h}$ ,一次。

淬火层深度5.5~6mm,硬度 $\geq 56\text{HRC}$ ,显微组织为细针状马氏体加均匀分布的碳化物,径向圆跳动 $\leq 0.7\text{mm}$ 。

例5 C8955 铲床丝杠,材料20CrMnTi钢,渗氮。工艺路线:下料 $\phi 70\text{mm} \times 1038\text{mm}$ →车外圆→正火或调质→粗车→去应力处理→精车螺纹→低温时效→研中心孔→半精磨外圆→磨螺纹→离子渗氮→研中心孔→精磨螺纹及外圆。

热处理工艺

正火:  $950^\circ\text{C}$ 加热空冷。

调质:  $860 \sim 880^\circ\text{C}$ 加热,保温1.5~2h,油冷。 $580 \sim 600^\circ\text{C}$ 加热回火6~8h,炉冷至 $300^\circ\text{C}$ 以下出炉。

低温时效:  $180 \sim 220^\circ\text{C} \times 8 \sim 12\text{h}$ 。

离子渗氮:丝杠在井式离子渗氮炉中垂直对称吊挂,  $530^{\circ}\text{C} \times 18\text{h}$ , 压力  $200 \sim 270\text{Pa}$ , 冷至  $150^{\circ}\text{C}$  出炉。要求渗氮层总深度  $\geq 0.4\text{mm}$ , 表面硬度  $\geq 650\text{HV}_5$ , 渗氮层脆性  $\leq 1$  级, 单边磨去

$0.05\text{mm}$  后, 硬度  $\geq 600\text{HV}_5$ , 渗氮后径向圆跳动  $\leq 0.05\text{mm}$ , 外观为银灰色, 渗层显微组织为白色致密的化合物层加扩散层, 允许有少量断续脉状碳氮化合物, 不允许有粗大组织出现。

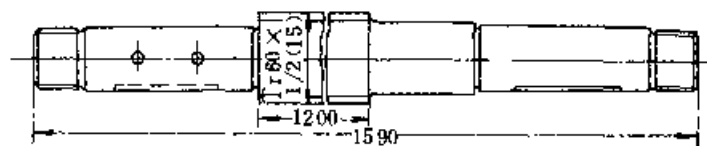


图 12-32 C8955 铲床丝杠

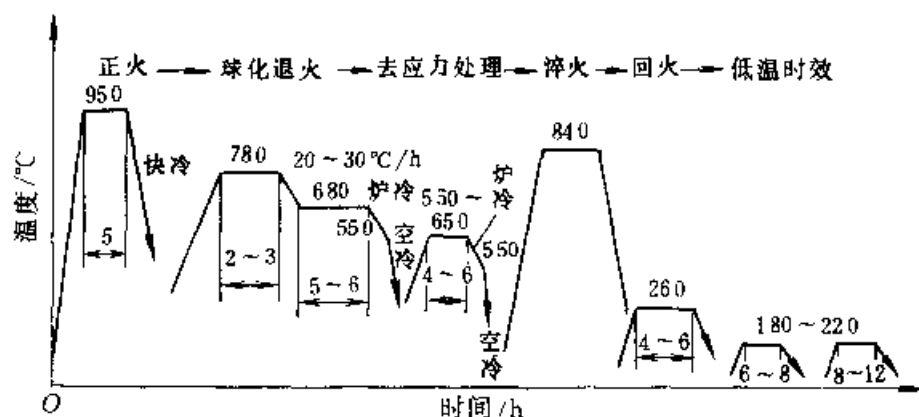


图 12-33 CrWMn 钢淬硬丝杠热处理工艺

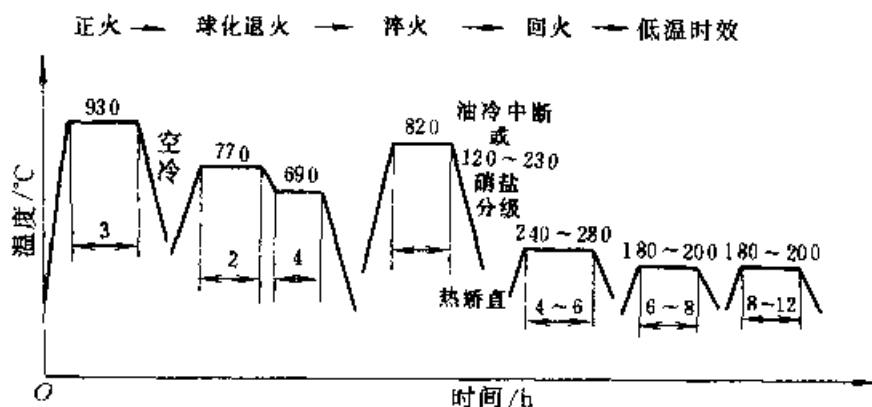


图 12-34 9Mn2V 钢淬硬丝杠热处理工艺

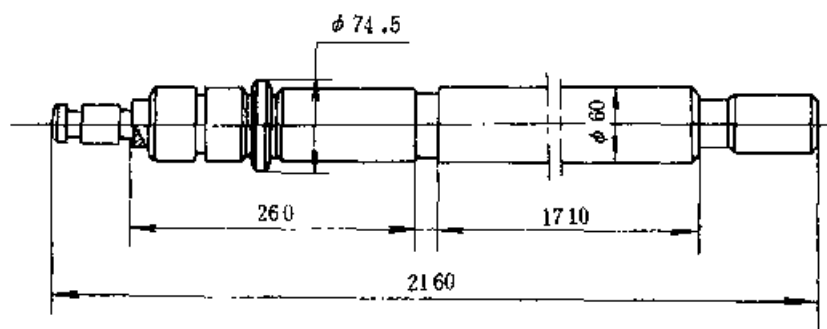


图 12-35 S7332 螺纹磨床丝杠

### 12.3.4 滚珠丝杠热处理

#### 12.3.4.1 外圆中频感应淬火

1. 工艺路线 下料→正火→热矫直→球化退火→粗车→去应力处理→精车外圆及螺纹→中频淬火→回火→粗磨外圆与滚道→低温时效→精磨外圆与滚道。

2. 热处理工艺 GCr15 钢滚珠丝杠热处理工艺示于图 12-36。硬度要求 58~62HRC。

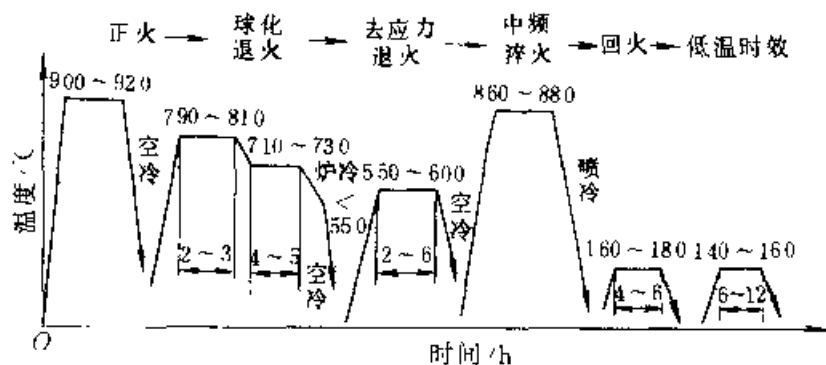


图 12-36 GCr15 钢滚珠丝杠热处理工艺图

中频感应淬火：例如采用 100kW、2500Hz 的中频发电机组，双床身卧式淬火机，可淬长度 2.5m。前床身装有车头三爪卡盘和一个支架（见图 12-37）。主轴转速在 4~80r/min 范围可调。后床身上装有变压器和感应器，无级变速运动。滚珠丝杠一般先车出螺纹滚道，然后进行感应淬火。感应器的加热圈和冷却圈，均为环形，两圈相距 10mm，感应圈内径与滚道外圆间隙 5mm，喷水孔方向垂直丝杠轴线。中频感应淬火的电参数和工艺参数如表 12-18 所示。

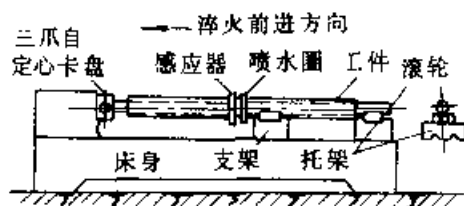


图 12-37 滚珠丝杠中频淬火支托方法

#### 3. 技术要求与质量检验

硬度：GCr15、GCr15SiMn、CrWMn 和 9Mn2V 钢为 58~62HRC。

淬硬层：厚度均匀，无软带，螺纹底部硬化层深度  $\geq 1\text{mm}$ 。

显微组织：滚道顶部与钢球接触的  $45^\circ$  位和滚道底部三处为马氏体 1~3 级合格。

#### 12.3.4.2 沿滚道中频感应加热浸液淬火

螺距大于 16mm 的滚珠丝杠采用沿滚道中频感应加热浸液淬火，可获得满意的硬化效果。现以规格为 GQ8020 1765--3505，直径  $\phi 80\text{mm}$ ，螺距 20mm 的 GCr15 钢制滚珠丝杠为例介绍中频感应加热浸液淬火工艺。

1. 设备 K6PS100/8 型 100kW、8000Hz 晶闸管中频发生器。工作时降压器不动，车头卡盘夹持工件旋转，将导轮卡在滚道中，靠摩擦力带动工件前进。通过浸入淬火介质中的感应器实现加热和冷却。

2. 工艺参数 感应器与滚道的间隙为 1~1.5mm，中频电压 580~600V，功率 70~72kW，直流电压 410V，直流电流 160~170A，频率 5600~5900Hz，降压变压器匝比为 14:1，淬火温度  $880^\circ\text{C}$ ，淬火介质  $w(\text{Na}_2\text{CO}_3)$  10% 水溶液，移动速度 1mm/s。

3. 质量检验 滚珠丝杠沿滚道感应加热浸液淬火硬化层剖视如图 12-38。由图可见硬化层深度较均匀，在滚道  $45^\circ$  位置为 3~3.5mm，硬度 61~62HRC。

#### 12.3.4.3 整体加热淬火

直径较小，长度较短的滚珠丝杠可采用整体加热淬火。常用钢号和热处理工艺参数见表 12-19 和表 12-20。

### 12.3.5 丝杠特殊热处理工艺

#### 12.3.5.1 沉淀硬化不锈钢丝杠

1. 材料和技术条件 例如，丝杠尺寸为  $\phi 45\text{mm} \times 1880\text{mm}$ ，选用 0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4pH) 奥氏体-马氏体型沉淀硬化不锈钢制造。此钢含碳极低 ( $w(\text{C}) \leq 0.07\%$ )，抗腐蚀性强。经固溶热处理和时效获高耐磨性、高温强度、良好的低温延性和加工性。硬度 40~46HRC。

2. 工艺路线：下料→固溶热处理→粗车→时效→车削→低温时效（径向圆跳动超差时，允许冷敲矫直）→车削→低温时效→磨。

3. 热处理工艺 为获得最佳处理效果，根据此类不锈钢中所含合金元素的微小变化，其热处理工艺应作适当调整。下面推荐两种化学成分的 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢的热处理工艺供参考使用。

表 12-18 滚珠丝杠中频淬火参数

编号	规格	材 料	电 参 数						工 艺 参 数						
			电 流 /A	电 压 /V	功 率 /kW	cosφ	激磁电流 /A	电 容 /μF	匝 比	感应器 尺寸/mm	间 隙 /mm	淬火温度 /°C	转 速 /r·min <sup>-1</sup>	感应器线 速度/mm	冷 却 介 质
1	GQ3006	GCr15	100~ 110	500~ 510	55	0.95~ 0.99	2.7~ 3.4	47	22:1	φ50×14	10	860~ 880	450	6	w(Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )10%+H <sub>2</sub> O 压力 0.15MPa
2	GQ3506	GCr15	105	560	60	0.99	3.3	41	22:1	φ50×14	7.5	880~ 900	400	5.5	
3	GQ4006	GCr15	110~ 112	530~ 540	60	0.99	3.3	41	22:1	φ50×14	5	880~ 900	350	5	
4	GQ4506	GCr15	110~ 118	530~ 560	60	0.96~ 0.97	2.8~ 3.1	37	22:1	φ60×14	7.5	880~ 900	300	4.5	
			115~ 118	520~ 530	60	0.99~1	3.2~ 3.4	35	22:1	φ60×14	7.5	880~ 900	250	4	
5	GQ5006	GCr15	118~ 119	550~ 560	65	0.96~ 0.97	3.3	37	22:1	φ60×14	5	880~ 900	300	4.5	
6	GQ6008	GCr15	115~ 118	560~ 570	65	0.96~ 0.97	3.1~ 3.3	31	22:1	φ70×14	5	880~ 900	250	4	
7	GQ7010	GCr15	118~ 120	550	65~67	0.96	3.3	25	22:1	φ80×14	5	880~ 900	200	3.5	
8	GQ8012	GCr15 CrWMn	115	600	65~67	0.97	3.2	16	22:1	φ90×14	5	800~ 900	150~ 180	3	
9	GQ9012	GCr15 CrWMn	105~ 110	620~ 640	67	0.99	3.4	13	22:1	φ100×14	5	900~ 920	150	2.5	



图 12-38 滚珠丝杠沿滚道

感应淬火硬化层剖面

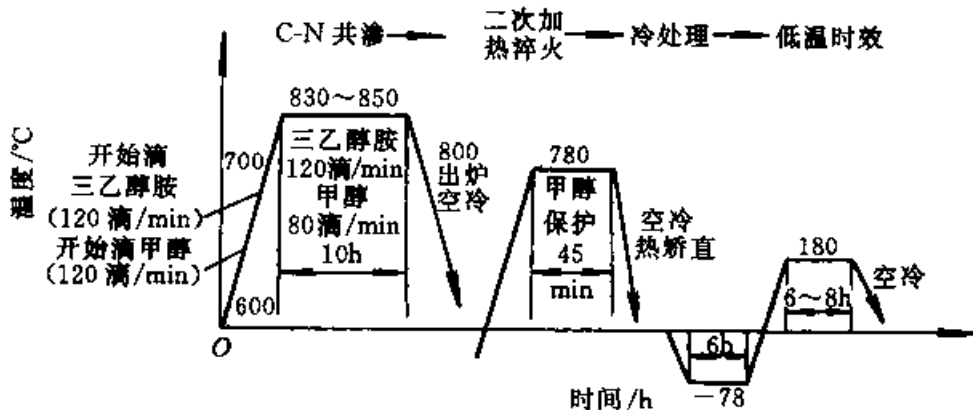
表 12-19 滚珠丝杠整体淬火  
回火工艺参数

钢 号	淬火温度 /°C	回火温度/°C	
		58~62 HRC	56~60 HRC
GCr15	845~865	160~180	200~220
GCr15SiMn	830~850	160~180	200~220
9Mn2V	800~820	160~180	240~260
CrWMn	830~855	160~190	260~320

**表 12-20 液珠丝杠整体淬火的低温时效参数**

低温时效	硬 度 (HRC)	
	58~62	56~60
第 一 次	140~160℃ 6~8h	160~180℃ 6~8h
第 二 次	140~160℃ 8~12h	160~180℃ 8~12h

(1) 成分(质量分数)为 0.021%C, 0.59%Mn, 0.26%Si, 0.005%P, 0.003%S, 16.32%Cr, 4.2%Ni, 3.97%Cu, 0.53%Nb 的钢。在井式炉中加热进行因溶热处理, 工艺是 850°C 预热 1h, (1050±10)°C 加热 1.5h, 油冷, 硬度 30~32HRC。再经 (510±10)°C 时效 1.5h, 硬度为 42~46HRC。



(2) 成分(质量分数)为 0.028%C, 0.47%Mn, 0.45%Si, 0.004%P, 0.009%S, 16.94%Cr, 4.0%Ni, 3.44%Cu, 0.41%Nb 的钢, 在盐浴炉中加热进行固溶热处理, 在 850°C 入炉, 随炉升温至 1070°C, 保温 80min, 油冷(油温 60~70°C), 硬度为 30HRC, 再经 470°C 空气炉时效 4h, 硬度为 43~45HRC。应当指出, 在盐浴炉中加热固溶处理的 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢表面有约 1mm 厚的异相层, 应用时要加以考虑。

序号	工序名称	工 艺 参 数	硬度(HRC)
1	退火	(860±10)°C×2~3h, 炉冷	28~29
2	固溶处理	(1050±10)°C×60min, 油冷	47~48
3	深冷处理	-78°C×30min	48~49
4	一次时效	(540±10)°C×2h, 空冷	51~52
5	二次时效	(540±10)°C×2h, 空冷	54~55

### 12.3.5.3 碳氮共渗空心滚珠丝杠

一种外径为  $\phi 37.8\text{mm}$ , 壁厚  $3.6\text{mm}$ , 全长



1027mm, 螺纹部分要求硬度为 58~62HRC, 渗层深度要求 0.8~1.1mm 的空心滚珠丝杠, 材料用 18Cr2Ni4WA 钢。由于它细长, 若用渗碳淬火则变形太大, 用渗氮则硬化层深度太浅, 故采用碳氮共渗。

渗剂用三乙醇胺和甲醇, 在 RJJ-105 渗碳炉中进行滴注式气体碳氮共渗。采用二次加热淬火, 可获得较好的显微组织和力学性能, 表面硬度 50~60HRC, 内部为 41~42HRC, 热处理工艺如图 12-39。

共渗前丝杠内孔用抗渗粉堵塞保护, 可保证内孔表面粗糙度不变, 无渗碳脱碳现象。碳氮共渗二次加热淬火后丝杠长度收缩较大, 对于不同尺寸和材料, 应摸清其收缩规律, 在共渗前车螺纹时, 应使用挂轮将收缩量事先予以补偿, 使得共渗淬火后精磨螺纹时, 不致磨不出来成品。

### 12.3.6 机床丝杠和热处理的进展

#### 12.3.6.1 丝杠新材料

丝杠为细长杆件, 淬火弯曲变形和伸长给制造带来许多麻烦。为此原苏联研究采用 7X12BM (7CrMn2WMo) 空冷硬化微变形钢, 淬火弯曲变形小, 伸长量仅有 0.05%, 比 XBF 钢 (CrWMn 钢) 的淬火伸长量 0.1%~0.18% 小得多, 从而可在淬火前车出螺纹, 大大减少淬火后的校直和磨螺纹工时。我国也开发了类似的钢号, 但未投产。

使用 YF45MnV 易切非调质钢原材料直接车削螺纹达到成品尺寸和精度。其力学性能与调质态 45 钢相当, 而切削性能优于调质态 45 钢, 与正火 45 钢相当。具有节能节材, 减少工序的优点, 可用于制造不淬硬丝杠。

#### 12.3.6.2 微机控制滚珠丝杠感应淬火

国外在 80 年代已有计算机控制的滚珠丝杠表面感应淬火设备。由于在淬火过程中能实时监测并反馈控制淬硬层深度, 从而调节淬火时丝杠的伸长量, 可将丝杠全长累计误差控制在  $\pm 0.15\text{mm}$  之内, 淬火前先开出螺纹滚道, 可显著节省淬硬后磨削螺纹的工时。

国内于 1990 年研制出开槽滚珠丝杠中频淬火微机控制系统。采用 STD 总线模块式工业计算机, 设计了多种功能软件和工艺软件。实现了滚珠丝杠中频淬火伸长量自动控制和自动化操作。推荐了勿须修正螺距的零伸长中频淬火工艺。丝杠

全长淬火长度变化量可控制在  $\pm 0.15\text{mm}$  之内, 淬硬层深度、硬度和金相组织符合技术条件。

#### 12.3.6.3 计算机控制棒料自动校直机

美国开发了一种计算机控制的棒料自动校直机, 对热处理后长杆件在沿长度方向自动检查 5 点弯曲量, 并自动决定何处需要校直。校直效率比人工提高 3 倍, 校直质量稳定一致。

## 12.4 机床基础件的去应力处理

### 12.4.1 机床基础件服役条件及失效形式

机床铸造和焊接基础件是整台机床的基座和骨架, 起着支撑作用。这类零件在铸造焊接以及随后的机械加工过程中, 都不可避免地在其内部形成残留应力。产品在使用过程因受外力、振动、环境温度变化, 随时间的迁移, 残留应力会逐渐松弛和重新分布, 从而导致零件变形, 丧失原来的几何精度, 使整台机床精度下降。为克服上述问题, 应在粗加工后尽可能消除其残留应力, 并使最后残存不多的内应力分布趋于均衡稳定。高精度精密机床和精密仪器的基础件, 常在半精加工后再作一次去应力处理。

常用的消除和稳定残留应力的时效方法有热时效、振动时效和天然时效三种。

### 12.4.2 热时效

#### 12.4.2.1 工序安排

热时效应放在粗加工之后, 以便将铸造或焊接残留应力和粗加工形成的残留应力, 一并消除和均匀化。高精度机床可在半精加工后作第二次热时效。凡加工量大的面、孔、槽等均应在第一次时效前加工。

#### 12.4.2.2 装炉

钢铁零件在热时效温度下强度下降, 极易发生弯曲, 扭转等畸变。装炉时须注意以下几点:

(1) 长薄件放置应使竖直方向有较大弯曲刚度, 例如长而扁的工作台应使侧面向下立放。

(2) 轻薄或结构复杂零件的支承点位置应使重量平均分布或增加支承点, 尽量减少零件承受的弯曲应力。

(3) 应将平面和刚性大的面平放在炉底, 大件和重要件不应放在小件和易变形件之上, 小件

不应套装在大件之中。分层装炉时,上下垫铁要对应,不得相互错开,以防弯曲。

(4) 装炉不宜过满,零件与炉壁,各零件之间的间隔不应小于100~300mm,以利炉气流通,温度均匀。

#### 12.4.2.3 热时效工艺规范(见表12-22)

为充分有效地去除应力,应控制炉膛内温度

均匀,一般采用多点控温,保持温差小于100℃;缓慢升温,以小于50℃/h为宜,不得高于100℃/h;降温速度也不可太快,一般取30~50℃/h;出炉温度不可太高,炉冷至150℃以下方可出炉空冷。同时满足以上四点才能获得几何尺寸稳定的基础件。

#### 12.4.2.4 热时效工艺实例(如表12-23所示)

表 12-22 热时效规范

零件材料	壁厚/mm	保温温度/℃	保温时间/h
HT200	<50	550±50	2
灰铸铁HT250	50~100		壁厚每增25mm加1~1.5h
HT300	>100		6
合金铸铁	<50	580±50	2
	5~100		壁厚每增25mm加1~1.5h
	>100		6
焊接钢结构	<50	A <sub>c1</sub> -(100~200)	2

表 12-23 机床基础件热时效工艺实例

序号	材料及技术要求	工 艺 规 范
1	T4240 座标镗床床身 材料:MTPCuTi25 技术要求:200~230HBS	
2	C8955 车床床身 材料:MTP20 技术要求:≥200HBS	
3	铣床床身 材料:HT200 HT300	

(续)

序号	材料及技术要求	工 艺 规 范
4	数控机床床身,横梁钢板焊接结构 材料:A3 钢	

#### 12.4.2.5 热时效的优缺点

在  $A_{c1}$  点以下的  $500\sim 650^{\circ}\text{C}$  温度区间的高温热时效能消除 60% 以上的残留应力,是消除残留应力的有效方法。但是一次投资较高,生产周期长,能耗高,且不能用于导轨淬硬的零件。

#### 12.4.3 振动时效

##### 12.4.3.1 基本原理

工件在激振器所施加的周期性外力——激振力的作用下产生共振,各部位所受的交流动应力与内部的残留应力叠加,使工件局部发生屈服,引起微小塑性变形,导致残留应力弛豫和重新分布,趋于均匀,并增强了金属基体的抗变形能力,达到提高工件几何精度稳定性的目的。这种工艺方法称谓振动时效。

##### 12.4.3.2 设备与监测仪器

1. 激振器 有机械式 电磁式和液压式等几种类型。其作用是提供外力给予工件足够的振动能量和与工件固有频率相同的频率,引起工件共振。我国主要用机械式。

2. 控制装置 用来调节和控制激振器的频率。

3. 显示记录装置 显示记录振动时效过程振动时效参数的变化。

##### 12.4.3.3 应用范围

1. 适用材料:碳素结构钢、低碳合金结构钢、

不锈钢、各种铸铁和非铁金属零件,但不适用于冷拉、冷拔、冷轧及沉淀硬化钢。

2. 工件类别 适用于各类机械产品的铸铁基础件,焊接构件(压力容器使用须谨慎),也可用于长/径比较大的轴类零件。

##### 12.4.3.4 工序安排及处理前的准备

(1) 振动时效应安排在铸造、锻压、焊接、粗加工和淬火等工序之后进行。如与热时效复合使用,则在上列工序后先作一次热时效,再于半精加工之后作一次振动时效,会获得比进行两次热时效或两次振动时效更佳的精度稳定化效果。

(2) 检查工件,确认没有裂纹及其他严重缺陷后,方可进行振动时效。

(3) 激振器安卡位置必须平整干净。

##### 12.4.3.5 工艺过程

振动时效工作状态如图 12-40。

1. 选定恰当的工件支承

(1) 多点弹性支承,支承位置应选在振动节点(线)处,支撑物为弹性体,常用的有专用橡胶垫或轮胎,塑料块等,如图 12-41。

(2) 悬臂夹持如图 12-42。此法适用梁形件,可使零件固有频率下降。对于具有一定频率范围的激振器,采用此法可处理固有频率较高的零件,扩大了其可用范围。

(3) 振动台法,固有频率很高的小件,可固定

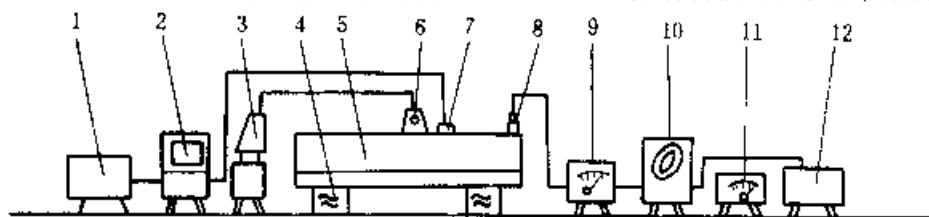


图 12-40 振动时效工作状态

- 1—稳压电源 2—应变仪 3—激振器控制箱 4—支承 5—零件  
6—激振器 7—应变计 8—拾振器 9—测振仪 10—示波器  
11—信息发生器 12—X—Y 记录仪

丁振动台上进行振动时效处理

2. 装卡激振器 将激振器牢固地装卡在工件振动的波峰处,如图12-43所示

3. 振型选择 一个特定的工件可在几个频率下受激共振,并各自表现出不同的振动型式,如弯曲振动、扭曲振动、鼓形振动以及刚体位移和刚体转动等。其中刚体位移和刚体转动不能引起工件内部产生相对位移,不能消除残留应力,不起稳定精度作用,不可采用。表12-24给出JCS-018型加工中心床身模态分析各振型的响应频率。

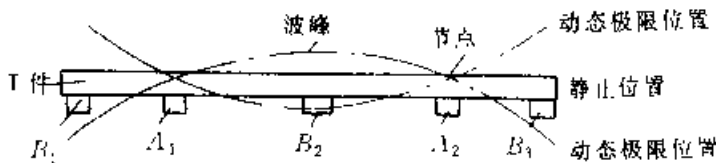


图 12-41 振动时效工件的支承

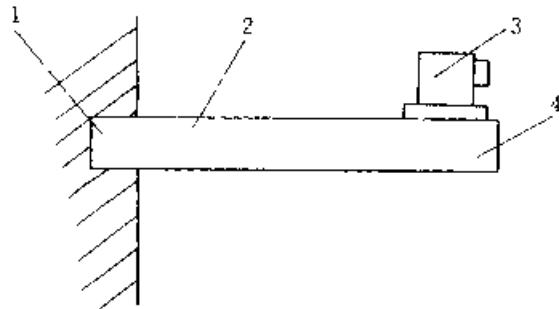


图 12-42 悬臂夹持

1 固定端 2—1件 3 激振器 4 自由端

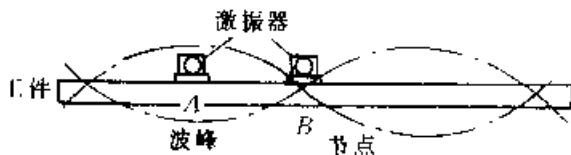


图 12-43 激振器装卡位置

A—激振器安装在波峰处(正确)  
B—激振器安装在节点处(错误)

表 12-24 JCS-018 加工中心床身各振型的响应频率

频率/Hz	振 型	频率/Hz	振 型
17.578	刚体转动	222.328	垂直弯曲
111.328	扭 曲	287.109	水平弯曲

4. 频率选择 开启激振器,调节激振频率,当频率与工件某固有频率一致时,振幅达到最大值,进入共振状态。当工件固有频率高于激振器所

能得到的最大频率,可采用分频处理,即选择

$$f_{\text{选}} = f_{\text{固}} / n$$

式中  $f_{\text{选}}$  工件固有频率(Hz);

$f_{\text{选}}$  振动时效选用频率(Hz);

$n$  简单正整数

5. 动应力选择 机械式激振器通过改变偏心距来调节激振力。一般铸件动应力取5~60Pa,焊接构件取50~100Pa。最好事先测出工件的残留应力值,依下式计算应选的动应力。

$$\sigma = K \cdot \sigma_{\text{RS}}$$

式中  $\sigma$  动应力;

$\sigma_{\text{RS}}$  工件的残留应力;

$K$  过载系数, $K$ 值一般取0.45左右。

动应力的选择还须注意,与残留应力叠加后,其最大值不应超过材料的疲劳强度。

可能获得的动应力值受激振器的功率,安放位置,工件结构刚性和支承状态等制约。显然在实行振动时效处理中可供选择的动应力值限于一定范围。

6. 振动时间的选择:振动时效处理持续的时间常选在15~60min。刚性较差、形状简单的取下限;形状复杂的大件取上限。有时还需在几个位置激振,如生产现场有快速检验振动时效效果的仪器,则可较准确地决定停机时间

#### 12.4.3.6 振动时效效果的快速判断

振动时效过程中,外加的激振能量一部分消耗在工件内部阻尼和微小塑性变形;另一部分产生工件的宏观振动。随着残留应力峰值的降低及应力的重新分布和均匀化,塑性变形消耗的能量逐渐减少,因而外加的激振能量将更多地转变为工件的振动,表现为振动参数发生变化。根据各参数的变化规律,即可在现场及时判断振动时效效果,而适时停振。快速检测参数及判断依据参见图12-44。

从图12-44a)可见,随振动时效的进行,工件的振动振幅(或加速度)逐渐增大,到某一刻后趋于稳定,此时可以停振了。从图12-44b)和c)可知随振动时效的进行,幅频曲线变窄变尖,或共振频率左移(即频率下降)。从图12-44d)可知随振动时效的进行,激振电流(或功率)下降,最后趋于稳定,此时即可停振。

#### 12.4.3.7 振动时效处理实例(见表12-25)

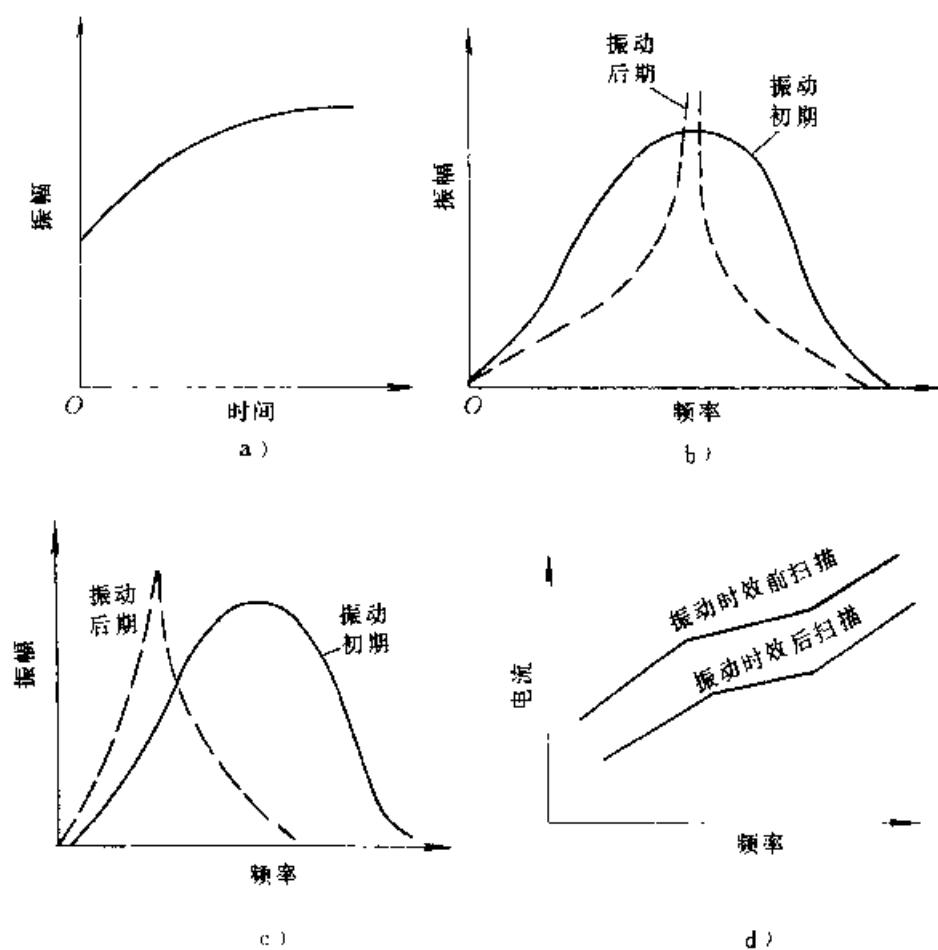


图 12-44 振动时效过程工艺参数的变化

表 12-25 振动时效举例

零 件				工 艺 参 数			备 注
名 称	材 料	尺 寸 /mm	重 量 /kg	振动频率 /Hz	动 应 力 /Pa	振动时间 /min	
仪表机床床身	铸铁	1100×80 ×180	80	250	±18~25	15~25	
CM6125 精密 车床床身	HT300	1160×2322 ×190	105	445	±7.5	30×2	一阶弯曲频率 378Hz 悬臂 支承, 两端对 调各振一次
铣床工作台	HT200	1325×320 ×120	250	230~241	±27	20	
L6120 拉床床身	A3 钢焊接	4088×1140 ×700	2866	70~80	5 档	45	W2—86A 型激振器

## 12.4.3.8 振动时效的优缺点

振动时效消除应力的百分比虽低于热时效,但一次性投资少,生产周期短,能耗不足热时效的1/10,设备轻小,使用方便,对材料有强化作用,从而提高了构件的抗变形能力和尺寸精度稳定性。另外此工艺还适合于处理不能采用热时效的淬硬零件。

## 12.4.4 天然时效

天然时效是将粗加工后的零件放置在露天环境,经受昼夜、严寒、酷暑、风吹、日晒和雨淋等作用而引起残留应力松弛,从而稳定尺寸精度。此法

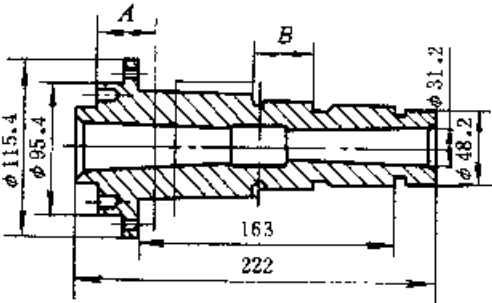
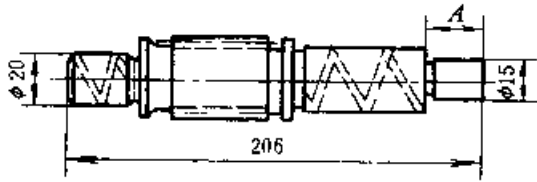
消除应力很有限,但对稳定尺寸精度也有些作用。由于其周期太长(1年以上),占用资金、场地,其效果也不及热时效和振动时效,逐渐已不作为单独使用的时效方法。

## 12.5 机床其他零件的热处理

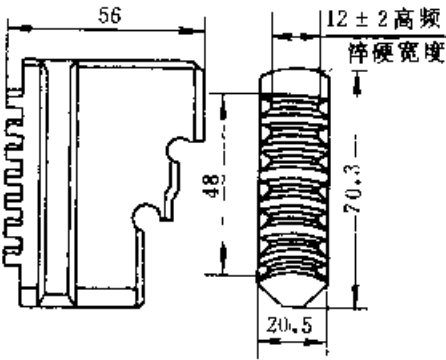
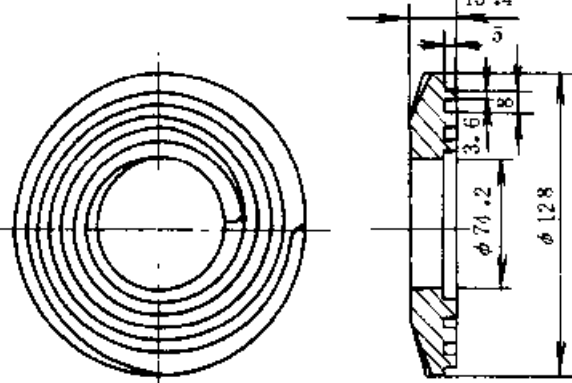
## 12.5.1 机床附件的热处理

机床附件是指与主机配套的转台、分度头和三爪自定心卡盘等部件,其主要零件用材和热处理举例列于表12-26中。

表 12-26 机床附件热处理工艺实例

序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热 处 理 工 艺
1	<p>FW250 万能分度头主轴</p>  <p>材料:45 钢 技术要求:硬度 45~50HRC A、B 段硬度&lt;30HRC</p>	<p>锻造 → 正火 → 机 加工 → 淬 火 → 回火 → 机加工</p>	<p>正火:830~850℃×30~40min,空冷 淬火:盐浴加热810~830℃×7min, 放入冷却胎具中,在A、B段加 缓冷套,盐水中冷却13~14s, 转入80~120℃油中冷却 回火:340~380℃×30min</p>
2	<p>万能分度头蜗杆</p>  <p>材料:20Cr 钢 技术要求:渗碳层深度 1.0~1.5mm 淬火硬度≥59HRC A 段硬度≤30HRC 径向圆跳动≤0.2mm</p>	<p>正火 → 机加工 → 渗碳 → 机 加工 → 淬 火 → 回火 → 机加工</p>	<p>正火:900~920℃×1~1.5h,空冷 渗碳:910~930℃×3~4h,冷到 850℃以下出炉,置于保温筒 内冷却 淬火:盐浴局部加热830~850℃× 3min,油淬 回火:180~220℃×2h</p>

(续)

序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热处理工艺
3	<p>φ160 三爪自定心卡盘卡爪</p>  <p>材料: 45 钢 技术要求: 牙部 12mm 宽度硬度 <math>\geq 52\text{HRC}</math> 两侧及牙根硬度 <math>30\sim 40\text{HRC}</math>, 其余 <math>53\sim 58\text{HRC}</math>, 牙距总膨胀量 <math>\leq 0.25\text{mm}</math></p>	<p>正火 → 机加工 → 淬火 → 回 火 → 高频 淬火 → 回 火 → 发兰 → 磨加工</p>	<p>正火: <math>840\sim 860^{\circ}\text{C} \times 1.5\sim 2\text{h}</math>, 空冷 淬火: 盐浴加热 <math>800\sim 820^{\circ}\text{C} \times 10\sim 12\text{min}</math>, 淬入盐水 <math>5\sim 6\text{s}</math> 后, 油冷 回火: <math>180\sim 200^{\circ}\text{C} \times 1.5\sim 2\text{h}</math> 高频淬火: 两件时效牙部向外, 面向感应器加热温度 <math>860\sim 900^{\circ}\text{C}</math> <math>11\sim 13\text{s}</math>, 水冷 回火: <math>180\sim 200^{\circ}\text{C} \times 1.5\sim 2\text{h}</math></p>
4	<p>三爪卡盘盘丝</p>  <p>材料: 45 钢 技术要求: 硬度 <math>45\sim 50\text{HRC}</math> 平面翘曲 <math>\leq 0.20\text{mm}</math> 内孔椭圆 <math>\leq 0.15\text{mm}</math></p>	<p>锻造 → 正火 → 机 加工 → 淬 火 → 回火 → 发兰 → 磨</p>	<p>正火: <math>840\sim 860^{\circ}\text{C} \times 1.5\sim 2\text{h}</math>, 空冷 淬火: 盐浴加热, <math>800\sim 810^{\circ}\text{C}</math>, 淬入水玻璃苛性钠水溶液 回火: <math>320\sim 340^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}</math></p>

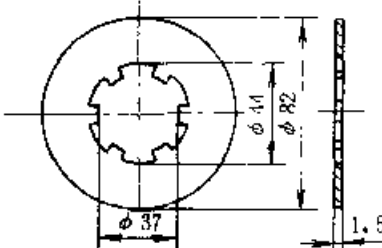
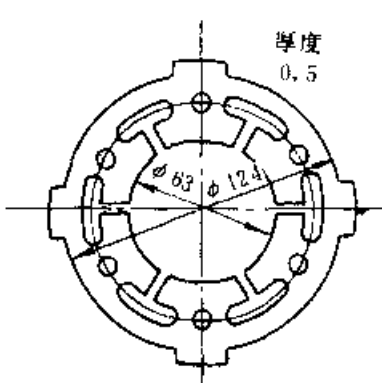
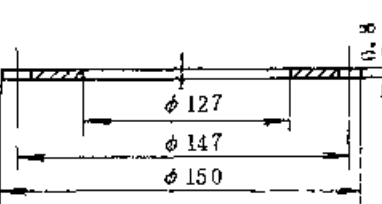
### 12.5.2 机床离合器零件的热处理

机床离合器部件的主要零件有摩擦片、联结花键套、磁轭和齿环等。除摩擦片仍采用传统热处理工艺外,其余四种零件均要经系统的激光淬火实验室试验、中、小批量生产性中间试验以及性能考核。自1991年在国内最大的专业厂投产以来,该四种零件全部采用激光淬火,产品质量明显提

高,节约了电能消耗,根治了过去联结爪部工作面硬度低,卡爪内侧变形大;花键套键侧面硬度低、内孔变形超差、小孔处开裂;磁轭和齿环渗碳淬火变形大、发生断齿、两者啮合不良、传递力矩不足及发生打滑等缺陷。在生产中使用至今工艺稳定,杜绝了废品,质量达到或超过国外名牌产品。

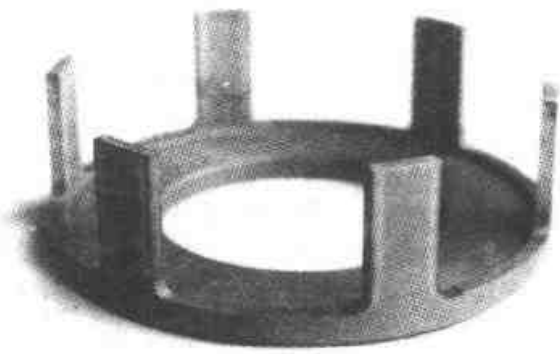

机床离合器零件热处理工艺实例见表 12-27。

表 12-27 离合器零件热处理工艺实例

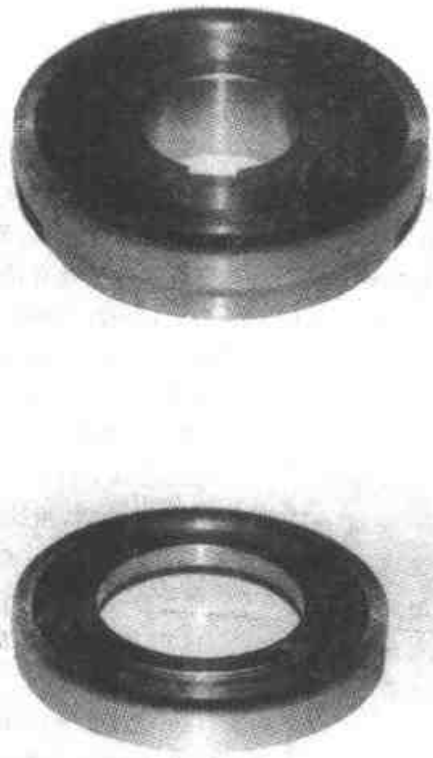
序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热 处 理 工 艺
1	<p>X62W 万能升降台铣床摩擦片</p>  <p>材料: A3 钢 技术要求: 渗碳层深度 0.4~0.6mm, 硬度 40~50HRC 平面度 <math>\leq 0.10\text{mm}</math></p>	<p>机加工 → 渗碳 → 淬火 → 回 火 → 机加 工 → 回火</p>	<p>渗碳: <math>920 \sim 930^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 2.5\text{h}</math> 冷至 750<math>^{\circ}\text{C}</math> 出炉 淬火: 盐浴加热, <math>900 \sim 920^{\circ}\text{C} \times 1\text{min}</math> 油淬 回火: 装胎具 <math>380 \sim 420^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 1.5\text{h}</math>, 拧紧胎具螺钉二次回火 <math>380 \sim 420^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 1.5\text{h}</math></p>
2	<p>DLMD 电磁离合器摩擦片</p>  <p>材料: 65Mn 钢 技术要求: 硬度 44~48HRC 平面度 <math>\leq 0.1\text{mm}</math></p>	<p>冲片 → 淬火 → 回 火 → 磨</p>	<p>淬火: 盐浴加热 <math>820 \sim 840^{\circ}\text{C} \times 1.5 \sim 2\text{min}</math>, 油淬 回火: 装胎具 <math>340 \sim 360^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}</math></p>
3	<p>电磁离合器摩擦片, 精度 11 级, 模数 <math>m=1.5</math>, 齿数 <math>z=98</math></p>  <p>材料: 6SiMnV 钢 技术要求: 硬度 55~60HRC 平面度 <math>\leq 0.1\text{mm}</math></p>	<p>锻造 → 退火 → 切 片 → 淬 火 → 回 火 → 磨</p>	<p>退火: <math>740 \sim 760^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}</math> 冷至 500<math>^{\circ}\text{C}</math> 以下出炉 淬火: 盐浴加热 <math>860 \sim 880^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{min}</math> 出炉, 放在平台上用铁块 压平淬火 回火: 装胎具回火 <math>380 \sim 420^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 1.5\text{h}</math></p>



(续)

序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热处理工艺
4	<p>DLMO6.3 电磁离合器联结</p>  <p>材料: 45 钢 技术要求: 硬度 <math>\geq 55\text{HRC}</math> 淬硬深度 <math>\geq 0.3\text{mm}</math> 爪部直径变形 <math>\leq 0.1\text{mm}</math> 硬化面积 <math>\geq 80\%</math></p>	<p>全部机加工之后, 在数控激光热处理机上自动进行六个爪的 12 个侧面激光扫描淬火</p>	<p>激光输出功率 <math>P=1000\text{W}</math> 透镜焦距 <math>f=350\text{mm}</math> 离焦量 <math>d=59\text{mm}</math> 扫描速度 <math>v=1000\text{mm/min}</math> 生产节拍 <math>t=45\text{s/件}</math> 结果: 硬度 <math>57\sim 60\text{HRC}</math> 硬化层深度 <math>0.3\sim 0.6\text{mm}</math> 直径变形 <math>\leq \pm 0.03\text{mm}</math> 爪侧面 100% 淬硬</p>
5	<p>K5—D2 花键套</p>  <p>材料: 45 钢 技术要求: 硬度 <math>\geq 55\text{HRC}</math> 个别点允许 <math>\geq 50\text{HRC}</math> 淬硬层深度 <math>\geq 0.3\text{mm}</math> 内径变形 <math>\leq 0.05\text{mm}</math> 硬化面积 <math>\geq 80\%</math></p>	<p>全部机加工之后, 在数控激光热处理机上自动进行六个花键的 12 个侧面激光扫描淬火</p>	<p>激光输出功率 <math>P=1000\text{W}</math> 透镜焦距 <math>f=350\text{mm}</math> 离焦量 <math>d=59\text{mm}</math> 扫描速度 <math>v=1200\text{mm/min}</math> 结果: 硬度 <math>55\sim 63\text{HRC}</math> 硬化层深度 <math>0.3\sim 0.5\text{mm}</math> 内径变形 <math>&lt; 0\sim 0.03\text{mm}</math></p>

(续)

序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热处理工艺																		
6	<p>EXE—10 牙嵌式电磁离合器的磁轭和齿环</p>  <p>直径 <math>\phi 116\text{mm}</math>, 齿高 <math>0.45\text{mm}</math>  齿顶宽 <math>0.26\text{mm}</math>, 齿根部厚 <math>0.35\text{mm}</math>  齿的环形宽 <math>8\text{mm}</math>  材料: 42CrMo, 45 钢, 20CrMnTi 均可  硬度: <math>\geq 45\text{HRC}</math>, 齿侧面硬化带允许有 <math>\leq \frac{1}{4}</math> 齿高硬度  低于 <math>45\text{HRC}</math> (<math>436\text{HV}_{0.1}</math>)  变形: 淬火前后磁轭齿环 100% 成对检查啮合情况</p>	<p>全部机械加工之后, 最终进行激光淬火</p>	<p>激光输出功率 <math>P=1200\text{W}</math>  特殊设计 <math>R</math> 透镜 <math>8\text{mm}</math> 宽的环形斑  齿面一次扫描, 完成淬火  离焦量 <math>d=15\text{mm}</math>  被淬火面与水平面倾角 <math>7^\circ</math>  扫描速度 <math>v=500\text{mm/min}</math>  结果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材料</th><th colspan="2">硬 度</th><th rowspan="2">淬火层深度 /mm</th></tr> <tr> <th><math>\text{HV}_{0.1}</math></th><th>HRC</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>42CrMo</td><td>720</td><td>60.2</td><td>1.05</td></tr> <tr> <td>45 钢</td><td>560</td><td>53</td><td>9.94</td></tr> <tr> <td>20CrMnTi</td><td>520</td><td>50.7</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table> <p>齿面翘曲 <math>0.03\sim 0.08\text{mm}</math>  42CrMo 钢淬火显微组织为针状马氏体加部分板条状马氏体</p>	材料	硬 度		淬火层深度 /mm	$\text{HV}_{0.1}$	HRC	42CrMo	720	60.2	1.05	45 钢	560	53	9.94	20CrMnTi	520	50.7	1.00
材料	硬 度		淬火层深度 /mm																		
	$\text{HV}_{0.1}$	HRC																			
42CrMo	720	60.2	1.05																		
45 钢	560	53	9.94																		
20CrMnTi	520	50.7	1.00																		

### 12.5.3 弹簧卡头的热处理

弹簧卡头要求头部耐磨, 颈部弹性好。常用 T8A、65Mn、60Si2Mn、9SiCr 等钢制造。弹簧卡头形状复杂, 淬火时容易发生开裂和变形。

#### 12.5.3.1 防止开裂, 减少变形的措施

- (1) 头部先加热一段时间, 再整体入炉加热。
- (2) 颈部薄断面处用铁皮或石棉绳保护。
- (3) 淬火加热保温结束, 薄截面处预冷到

$700^\circ\text{C}$  左右再淬火。

(4) 在硝盐浴中分级或等温淬火。

(5) 要求头部和颈部应有不同硬度的弹簧夹头, 可进行尾部至颈部在盐浴中局部回火、加热时间不超过  $3\text{min}$ , 出炉油冷; 头部与颈部截面相差较大者, 在  $500\sim 700^\circ\text{C}$  盐浴中快速回火, 加热时间不超过  $1\text{min}$ , 出炉油冷。

12.5.3.2 几种弹簧卡头的热处理工艺举例(如表 12-28)

表 12 28 弹簧卡头的热处理工艺举例

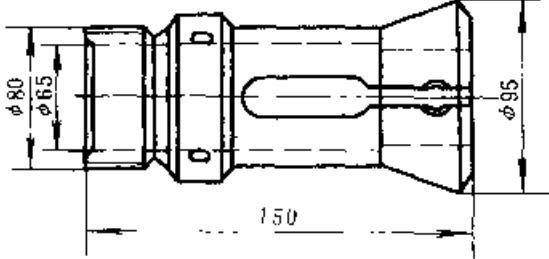
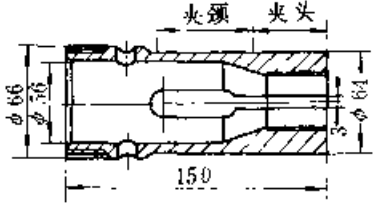
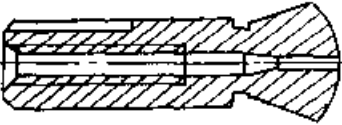
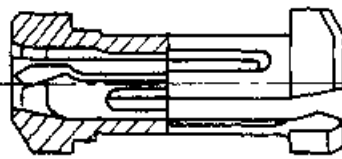
序号	零件名称材料及技术要求	工艺流程	热处理工艺
1	<p>卧式多轴自动车床夹料卡头</p>  <p>材料: 9SiCr 钢 技术要求: 头部硬度 60~65HRC 颈部硬度 38~43HRC 自然状态下孔径胀大 1.2~2.5mm</p>	<p>锻造 → 退火 → 机加工 → (开口处留一部分连接) → 淬火 → 回火 → 机加工 → 磨升口 → 胀大定型</p>	<p>退火: 790~810°C, 1~2h, 炉冷至 700~720°C × 3~4h, 冷到 500°C 以下出炉 淬火: 头部与颈部盐浴局部加热 820~870°C × 20~30min, 油淬 回火: 180~200°C × 1.5h 胀大定型: 尾部与颈部在 700°C 盐浴中局部加热 40~60s, 取出立即用锥度为 1:10 的胎棒插入孔里, 调整胎棒, 使夹头外圆直径胀大到 <math>(1) + (2 \sim 2.5) \text{mm}</math></p>
2	<p>卧式多轴自动车床送料卡头</p>  <p>材料: T8A 技术要求: 头部硬度 58~64HRC 颈部硬度 38~43HRC 自然状态下三爪并紧</p>	<p>锻造 → 退火 → 机加工 → 淬火 → 回火 → 磨</p>	<p>退火: 740~760°C × 1~2h, 炉冷到 650~680°C × 1~2h, 冷至 500°C 以下出炉 淬火: 将头部并紧, 用铁丝捆牢头部与颈部在 820~830°C 盐浴局部加热 15~20min, 淬入 140~180°C 碱浴, 冷却 5~10min, 清洗 回火: 180~200°C × 1.5h 颈部回火: 尾部与颈部在 700°C 盐浴局部加热 15~20s, 空冷</p>
3	<p>仪表机床小型专用卡头</p>  <p>材料: 60Si2MnA 钢 技术要求: 头部硬度 ≥ 59HRC 颈部硬度 40~45HRC</p>	<p>退火 → 机加工 → 淬火 → 回火 → 磨</p>	<p>退火: 810~830°C × 1~2h, 炉冷至 700~720°C × 2~3h, 冷至 500°C 以下出炉 淬火: 300~400°C 预热, 盐浴加热 840~860°C × 2~2.5min, 淬入 280~300°C 硝盐 × 20~30s, 转入 150~180°C 热油冷却 颈部回火: 尾部与颈部在 540~560°C 硝盐浴中加热 20~30s, 油冷</p>
4	<p>磨阀瓣机床专用卡头</p>  <p>材料: 65Mn 钢 技术要求: 两端头部硬度 58HRC 中部硬度 40~45HRC</p>	<p>锻造 → 正火 → 高温回火 → 机加工 → 淬火 → 回火 → 机加工</p>	<p>正火: 780~810°C × 40~60min, 空冷 高温回火: 680~700°C × 1~2h 淬火: 盐浴加热 810~830°C × 10~15min 出炉预冷, 待中部冷到 700°C 左右淬入 160~180°C 硝盐中冷却 回火: 硝盐浴加热 500~520°C × 3~4s, 油冷 (利用断面壁厚差快速回火)</p>

表 12-29 蜗杆用钢及热处理

热 处 理 类 别	钢 号	热 处 理 技 术 要 求
渗 碳	20Cr	正火 渗碳淬火 58HRC 或 渗碳感应淬火 58HRC 分度蜗杆须低温时效
	15CrMo	
	20CrMo	
	20CrMnTi	
	20CrMnMo	
渗 氮 (或氮碳共渗或硫、 氮、碳共渗)	38CrMoAlA	调质 265HB 渗氮层深度: 0.4~0.5mm 硬度: 900HV
	40Cr	调质 235HBS 或正火 渗氮层深度: 0.4mm 硬度: 500HV 或氮碳共渗, 硫氮碳共渗
	35CrMo	
	42CrMo	
淬 火 (或表面淬火)	CrWMn	球化退火 淬火硬度 56HRC 低温时效
	9Mn2V	
	45	调质 235HBS 淬火或感应淬火硬度 48HRC 内圆淬硬层深度 $\geq 1$ mm
	40Cr	
调 质	42CrMo	调质 235HBS
	45	
	40Cr	

表 12-30 花键轴用钢及热处理

热 处 理 类 别	钢 号	热 处 理 技 术 要 求
调 质 (或正火)	45, 40Cr	调质硬度 215~235HBS 或正火
	35CrMo, 42CrMo	调质硬度 235~265HBS
	YF15MnV	
感应淬火 (或激光淬火)	45, 40Cr	调质、硬度 265HBS 感应淬火 48HRC 或 52HRC (或键侧面激光淬火)
	35CrMo, 42CrMo	
	9Mn2V	球化退火 调质、硬度 265HBS 感应淬火 61HRC (或键侧面激光淬火)
渗碳淬火	20Cr 15CrMn 20CrMo 20CrMnTi 20CrMnMo	渗碳层深度 0.8~1.3mm 淬火硬度 58HRC 或感应淬火硬度 58HRC

### 12.5.4 蜗杆的热处理

蜗杆螺纹表面与蜗轮相对滑动,摩擦发热较严重,容易发生磨损和胶合。蜗杆推荐用钢及其热处理如表 12-29。

蜗轮常用材料有 ZCuSn10P1, ZCuSn6Zn6-Pb3, ZCuAl10Fe3 等铸造铜合金和灰铸铁 HT200、HT250、HT300 以及耐磨铸铁等。分度蜗轮须经时效处理。另外静压蜗轮表面可采用涂层

塑料。

### 12.5.5 花键轴的热处理

机床花键轴的主要失效形式是花键的磨损,甚至花键外圆棱边磨出圆角。少数因强度过低在传递大功率时发生花键轴扭曲报废。根据花键承受扭矩的大小、滑移齿轮的移动频度及精度高低,推荐了表 12-30 所示的几种热处理方式。

## 参 考 文 献

- 1 机床零件热处理编写组. 机床零件热处理. 北京:机械工业出版社, 1982
- 2 机械工业部北京机床研究所编. 金属切削机床基础技术总论. 第八章:机床用材及热处理, 1987年4月第131~170页
- 3 JB/T 3997《金属切削机床灰铸铁技术条件》
- 4 JB/T 6954《灰铸铁件接触电阻淬火质量检验和评级》
- 5 高瑛, 马敬仲. 铸件的变形与时效. 北京:机械工业出版社, 1985
- 6 张魁武. 激光热处理工艺试验及其应用. 机床, 1990(8):29~31
- 7 JB/T 50077《机床八类零件选材及热处理》

# 第 13 章 气动工具及钻探机械 零件的热处理

中国矿业大学 倪振尧

气动工具是矿山、铁路、水利及国防等各种石方工程中使用最广泛的凿岩工具；而钻探机械则是地质勘探、石油开采等方面使用的主要设备。在实际使用中要求这些产品的主要零件和关键零件耐磨性高、耐冲击性好（主要是多次冲击抗力）、抗疲劳性能好。

本章主要内容介绍气动工具及钻探机械的典型零件和易损零件的常用材料及热处理方法。

## 13.1 凿岩机活塞的热处理

### 13.1.1 工作条件及失效形式

活塞是凿岩机上冲击做功的关键零件，也是最主要的易损件，由它传递凿岩机工作时的冲击和扭转能量。图 13-1 是最常用的凿岩机型号 YT-21 的活塞简图。

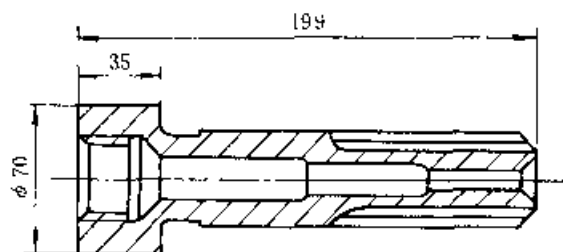


图 13-1 YT-21 型凿岩机活塞

活塞的失效形式主要是冲击端面凹陷、花键磨损、冲击端花键崩裂和折断。渗碳处理的低碳合金钢活塞，因冲击端面凹陷失效的占多数，而高碳钢活塞则折断是失效的主因。

活塞在工作过程中，其端头反复冲击钎杆，因接触疲劳剥落和心部强度不足使冲击端面不断凹陷，或使端面花键崩裂掉块。当端面凹陷到一定程度，活塞因效率显著降低而报废。

活塞在多次反复冲击下，在外表面大小圆交接处和内表面大小孔过渡处应力集中的地方易产生疲劳折断，如图 13-2 所示。

活塞外表面大圆与缸体配合，花键齿面与转

动套筒配合。在工作过程中，这些配合面互相摩擦，当磨损到凿岩效率显著下降时，活塞失效而报废。

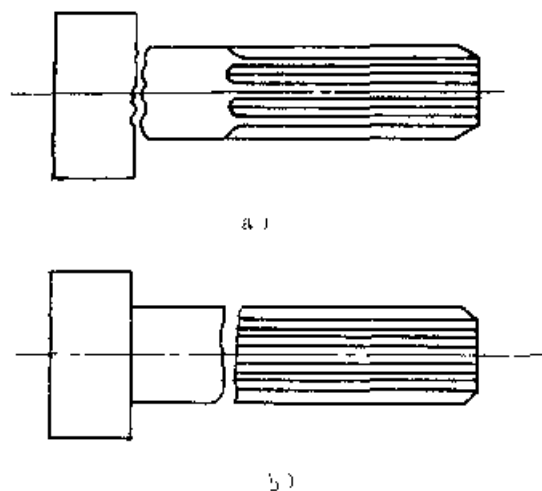


图 13-2 活塞的折断

a. 外表面大小圆交接处  
b. 内表面大小孔过渡处

### 13.1.2 凿岩机活塞的材料

目前活塞多选用低碳渗碳钢、中碳渗碳钢或高碳钢制造。

1. 20CrMnMo 钢 这种钢是较长期用来制造活塞的一种渗碳钢（化学成分（质量分数）为：0.17%~0.24%C，0.20%~0.40%Si，0.9%~1.2%Mn，0.20%~0.30%Mo，1.1%~1.4%Cr）。用该钢制造的活塞，其使用寿命已基本达到过去用 12CrNi3 或 12Cr2Ni4 钢活塞的使用寿命。20CrMnMo 钢活塞的缺点是心部强度低，在工作过程中易出现冲击端面凹陷和花键崩裂。

2. 35CrMoV 钢 为了克服低碳渗碳钢活塞心部强度不足的缺点，采用了提高碳含量的渗碳钢制造活塞，其成分（质量分数）为：0.30%~0.38%C，0.17%~0.37%Si，0.40%~0.70%Mn，1.00%~1.30%Cr，0.20%~0.30%Mo，

0.10%~0.20%V。这种钢材已成功地用于制造7566型凿岩机活塞。因它含碳量较高,不但可以降低渗碳层厚度,缩短渗碳时间,并且因淬火后心部强度高,从而克服了20CrMnMo渗碳活塞端头凹陷快,易崩齿的缺点。

3. 钒钢 钒钢是制造凿岩机活塞的优良材料之一(其化学成分(质量分数)为:0.95%~1.05%C,0.20%~0.40%Mn,≤0.35%Si,0.2%~0.4%V),许多国家用于制造凿岩机活塞。由于钢中钒碳化物在较大的温度范围内不易溶解,故能显著地阻止加热时奥氏体晶粒长大,从而可防止过热,使钢材具有较高的冲击韧度。在冷却过程中,由于未溶钒碳化物的结晶核心作用,使钢易于形成珠光体类组织,从而可获得较浅的淬硬层,使活塞表面层呈现较大的残余压应力来提高疲劳强度。

为了保证钒钢活塞整体淬火后能得到薄层淬硬效果,其化学成分和技术条件除应符合国标GB1299规定外,还要求下列技术条件:淬透性为2.0~2.6mm;低倍组织缺陷按YB9第一、二级别图评定;一般疏松≤2级,中心疏松≤2级,不得有

旋型偏析(GB1979);钢材高倍组织缺陷:(非金属夹杂物按冶标YB9第4级别图评定)脆性夹杂物≤2.5级,塑性夹杂物≤3级,二者合并≤5级;碳化物带状≤2级(碳化物按YB9第7级别图评定)。

### 13.1.3 20CrMnMo 钢活塞的热处理

#### 1. 制造工艺路线

锻造→正火→检验→机加工→渗碳(渗碳后降温油冷)→高温回火→淬火→清洗→低温回火→喷砂→检验→磨加工。

2. 热处理工艺 20CrMnMo 活塞需进行渗碳处理,目前多用气体法,亦有采用固体或液体法。其处理工艺可参考表13-1。

20CrMnMo 活塞渗碳层深度要求为1.8~2.2mm。

3. 技术要求及质量检查 20CrMnMo 活塞的技术要求及质量检查见表13-2。

4. 常见热处理缺陷及防止方法 20CrMnMo 活塞热处理常见缺陷及防止方法见表13-3。

表 13-1 20CrMnMo 活塞热处理工艺举例

方 法	工 序	热 处 理 工 艺
气体渗碳	渗 碳	渗碳温度:920~930℃ 保温 16~18h 渗碳介质:煤油+甲醇
	淬 火	加热温度:830~850℃ 保温 15min,油淬
	回 火	加热温度:180~200℃ 保温 2h,空冷
固体渗碳	渗 碳	渗碳温度:920~940℃,保温 18~20h,随罐空冷
	正 火	加热温度:900~920℃,保温 4min,空冷
	淬 火	加热温度:830~850℃,保温 15min,油淬
	回 火	加热温度:180~200℃,保温 2h,空冷
液体碳氮共渗	碳氮共渗	温度 900~950℃,保温 15~20h,油冷 盐浴成分(质量分数):0.9%~1.3%NaCN+55%~65%BaCl <sub>2</sub> + 20%~25%NaCl+1%~2%“603”渗碳剂
	回 火	温度 180~200℃,保温 60min,空冷
	淬 火	加热温度 830~850℃,保温 15min,油淬
	回 火	温度 180~200℃,保温 2h,空冷

表 13-2 20CrMnMo 活塞技术要求及质量检验

序 号	项 目	技 术 要 求	检 验 方 法
锻造正火	硬 度	$\leq 217\text{HBS}$	用布氏硬度计抽检 10%~20%
	金相组织	珠光体+铁素体 晶粒度 5~6 级	用金相显微镜定期检查
渗 碳	渗层深度	总渗层=1.8~2.2mm 总渗层=过共析层+共析层+ $\frac{1}{2}$ 过渡层	1) 渗层深度以检查内试棒为准 2) 内试棒应与所渗零件材料相同, 表面没有氧化皮、锈迹, 并经正火处理 3) 用放大镜或显微镜检查
	渗层表面碳浓度	$w(\text{C}) 0.85\% \sim 1.05\%$	1) 用试棒做剥层分析, 每层约 0.10~0.20mm 2) 可定期用标准试块或金相图片比较
正 火	显微组织	不得有明显的渗碳体网	用金相显微镜定期检查
淬火+回火	硬 度	表面: 58~63HRC 心部: 38~45HRC	硬度计抽检 10%~15%, 其余用锉刀检验 检查部位: 表面为冲击端面, 心部在与过渡区相距 2~3mm 处
	显微组织 (JB1673-75)	表面: 马氏体( $\leq 3$ 级)+粒状碳化物 心部: 马氏体+贝氏体	用金相显微镜检查
	畸 变	对无阀苗岩机活塞畸变检查, 弯曲 $\leq 0.2\text{mm}$	用千分表检查

表 13-3 20CrMnMo 活塞热处理常见缺陷及防止方法

常见缺陷	产生原因	防止方法
心部硬度低	1) 淬火温度低 2) 冷速慢	1) 选择正确的淬火温度, 即略高于心部材料的淬火温度 2) 选用冷速快的淬火介质
碳化物呈网状分布	1) 淬火温度低或保温时间短 2) 淬火冷却过程慢 3) 渗碳层碳浓度高	1) 制定正确的淬火、正火规范, 使碳化物充分溶解 2) 冷却操作要迅速 3) 降低渗碳的碳势
渗层不均匀	固体渗碳时火焰炉加热温度不均	1) 将活塞主要工作面(冲击端面)装罐时放在中心位置 2) 将渗碳罐放在火焰中心区 3) 装炉后, 升温到 820~860°C 保温 2~3h, 再继续升温到渗碳温度
表面麻蚀	渗碳剂中有硫酸盐、硫化铁、砂子、硅酸盐等杂质	1) 严格限制渗碳剂中硫酸盐的含量 2) 渗碳剂要过筛除去杂物
活塞渗碳后出炉空冷时产生表面裂纹	1) 冷却速度不合适引起次表面产生马氏体 2) 表面碳浓度过高, 浓度梯度太陡, 或不均匀	1) 减慢冷速或增加冷速(如油冷)或者快速冷至 450~500°C, 再放到 650°C 炉中保温后空冷 2) 控制碳势, 避免表层碳浓度过高



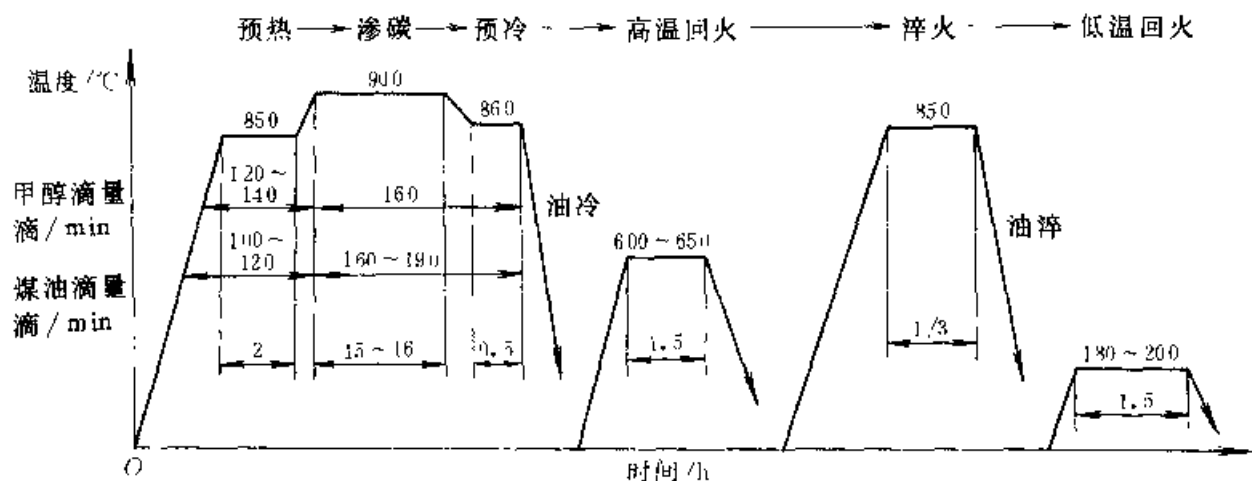


图 13-3 35CrMoV 钢活塞渗碳、淬火工艺图

(渗碳设备为 RJJ-90 9T 井式渗碳炉)

### 13.1.4 35CrMoV 钢活塞的热处理

#### 1. 制造工艺路线

锻造→退火→检验(硬度)→机加工→渗碳→检验(渗碳层)→高温回火→淬火→清洗→低温回火→喷砂→检验→磨削。

2. 热处理工艺 其热处理工艺如图 13-3 所示,技术要求如表 13-1 所示。

整个工艺过程为:

(1) 在高碳势气氛中预渗碳( $850^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 2\text{h}$ )。其目的是为了先形成细小的碳化物质点,以便随后升温渗碳时使零件表层碳化物呈颗粒状分布。

(2) 再升温至  $900^{\circ}\text{C}$  进行扩散渗碳,渗碳层深度达到要求后,炉冷至  $860^{\circ}\text{C}$  淬油。

(3) 进行  $600 \sim 650^{\circ}\text{C}$  的高温回火。

(4) 重新加热至  $850^{\circ}\text{C}$  进行淬火处理。

(5) 进行  $180 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、 $1.5\text{h}$  的回火处理。

3. 技术要求 见表 13-4。

表 13-4 35CrMoV 钢活塞技术要求

项 目	技 术 要 求
渗碳层深度/mm	1.6~1.9
表面硬度(HRC)	60~65
表层显微组织	马氏体( $\leq 3$ 级)+粒状碳化物
心部硬度(HRC)	$\geq 50$

### 13.1.5 钒钢活塞的热处理

#### 1. 制造工艺路线

原材料检验(化学成分、显微组织、非金属夹

杂物和淬透性)→下料→中频感应加热大头墩粗→球化退火→检验→机加工→淬火→回火→检验→磨削。

2. 热处理工艺 钒钢活塞热处理包括预先淬火、球化退火、最终淬火和低温回火等工序,具体工艺见图 13-4。

预先淬火的目的是为球化退火作准备,以期获得好的球化效果。最终淬火时,在  $720 \sim 730^{\circ}\text{C}$  预热的目的是为了缩短在  $A_{c1}$  以上的加热时间,可得到较多的板条马氏体。淬火的预热和加热在盐浴炉中进行。

回火温度对淬火钒钢力学性能的影响如图 13-5 所示。由图可以看出,抗弯强度在  $225^{\circ}\text{C}$  出现峰值,而抗扭强度在  $165^{\circ}\text{C}$  时最高。根据活塞的破坏情况分析,淬硬层的正断抗力和塑性、韧性起决定性作用。实际上选择较高的回火温度( $210 \sim 250^{\circ}\text{C}$ )使活塞的使用寿命有了提高。

薄壳淬火的冷却介质用 10% 盐水(质量分数)或亚硝酸钠和碳酸钠混合水溶液。此溶液在马氏体转变温度区间,冷却速度低于氯化钠水溶液,对防止淬火裂纹有益。

钒钢活塞淬火的关键,是保证活塞内外表面形成均匀一致的硬化薄层,从而使其所有表面(包括内孔)呈现残余压应力。为此要使用专门的喷具淬冷,使活塞各个部位冷却均匀一致。并且要求淬火介质有足够压力,流量充足,尽量避免空气混入其中,否则将会形成淬火软点,影响活塞质量。

喷淬活塞内孔和外表面设备的液压系统原理图如图 13-6 所示。淬火操作过程如下:

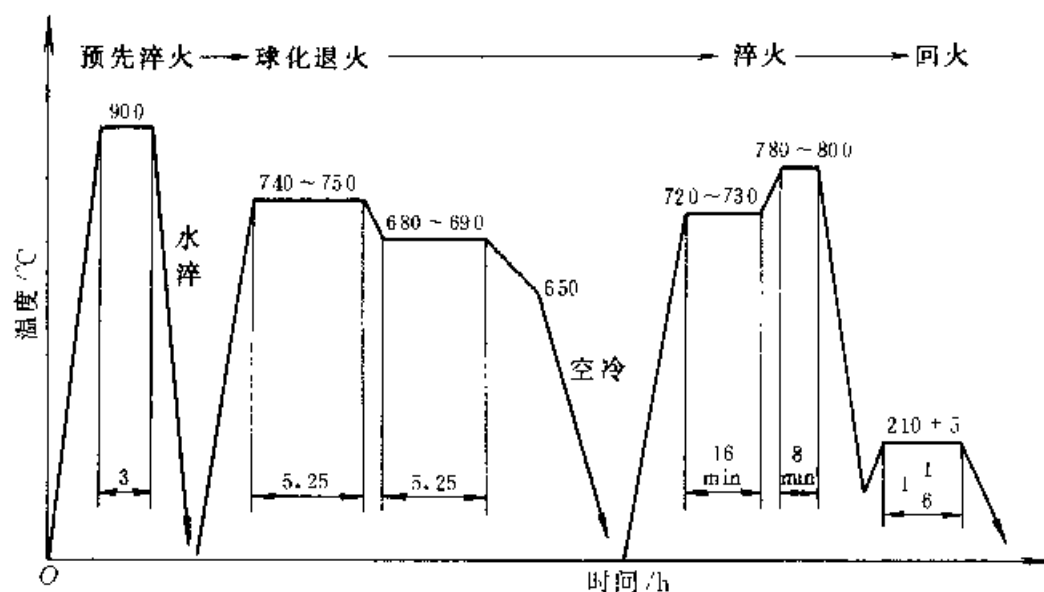


图 13-1 钎钢活塞热处理工艺

电源接通后,电动机 6 带动液压泵 3 工作,这时由于电磁阀 7 是关闭的,被泵吸上来的冷却介质通过溢流阀 4 返回水槽。当活塞放入喷具内并将上盖压紧时,行程开关使电磁阀 7 打开,冷却介质分别经节流阀 10、11 流入喷具,喷淬活塞内外表面,然后流回水槽。

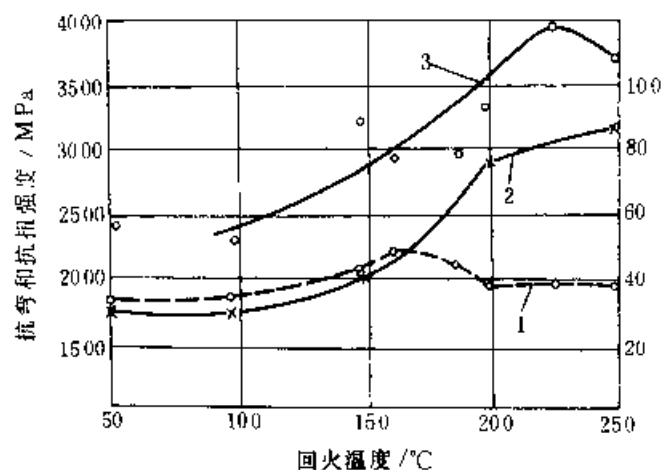


图 13-5 钎钢的力学性能和回火温度的关系

1—抗扭强度 2—冲击功 3—抗弯强度

活塞内孔表面如果淬火层不合格,则表面残余压应力较小甚至成为残余拉应力,活塞服役过程中疲劳裂纹源将出现在内孔表面,使其使用寿命大大降低。

3. 技术要求及质量检验 钎钢活塞的锻造、热处理技术要求及质量检验方法列于表 13-5

4. 常见热处理缺陷及防止方法 钎钢活塞热处理常见缺陷及防止方法见表 13-6。

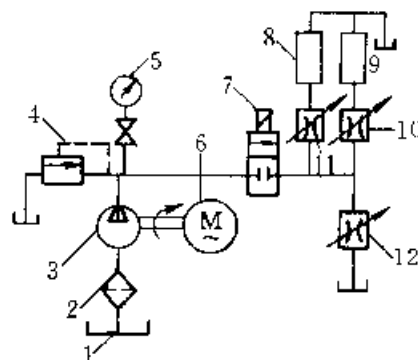


图 13-6 液压系统原理图

1—水箱 2—滤网 3—液压泵 4—溢流阀 5—压力表 6—电动机 7—电磁阀 8—活塞内腔 9—活塞外腔 10, 11, 12—节流阀

表 13-5 YT-24 凿岩机钎钢活塞锻造、热处理技术要求及质量检验

工 序	项 目	技 术 要 求	检 验 方 法
锻 造	金相组织	细片状珠光体	用金相显微镜观察
	晶 粒 度	≤5 级	按 YB27 评定
球化退火	硬度(HBS)	<197	布氏硬度计

(续)

工 序	项 目	技 术 要 求	检 验 方 法
球化退火	显微组织	球状珠光体,按 YB9 第二级别图评定,2~4 级合格 球化率:100% (允许少量孤立的条状碳化物存在)	由实物切取试片检验显微组织
淬火-回火	淬硬层深度	1) 小头端面:2.5~4.0mm 2) 花键槽底部及杆部:1.5~3.0mm, 不允许有淬透情况 3) 内腔表面和外表面应有均匀的淬硬层	将活塞纵剖,横剖经热酸侵蚀后进行 宏观测量 热酸侵蚀条件:盐酸和水 1:1 侵蚀温度 65~80°C 侵蚀时间:10~20min
	硬度(HRC)	表面:60~64,工作端面不允许有软点 心部:38~42	心部硬度一般不检查
	显微组织	表面:回火马氏体( $\leq 2$ 级)+均匀分布的未溶碳化物 过渡区:回火马氏体+托氏体+未溶碳化物 心部:托氏体+未溶碳化物 晶粒度 $\geq 7$ 级	未溶碳化物应以小、少、匀圆形态均匀分布。在 500 倍显微镜下,碳化物颗粒应以直径 0.25~0.75mm 为主

表 13-6 钒钢活塞热处理常见缺陷及防止方法

常见缺陷	产生原因	防止方法
出现渗碳体网	1) 锻造控温不好 2) 加热温度不均匀 3) 锻后冷速过慢	1) 严格控制锻造温度 始锻温度:1050~1070°C 终锻温度:830~850°C 2) 锻造加热装炉量不宜太多,力求均匀 3) 调整锻后冷却速度 4) 900°C 加热预淬火(球化前)
锻件冲击韧度低	锻造过热	防止过热,最好用中频感应加热
球化不良	1) 球化退火装炉量太多,靠近炉门散热快 2) 球化温度波动太大 3) 保温时间短	1) 控制装炉量,在炉门口放空罐挡风和防反射散热 2) 正确控制球化温度和保温时间 3) 球化退火前采用预先淬火(900°C 加热水冷)能改善球化质量
淬火裂纹和崩口	1) 淬火温度过高 2) 机加工不良,有尖角等 3) 锻造规范不合理 4) 淬火介质选择不当或成分、温度发生变化	1) 严格控制淬火温度 2) 机加工过渡处不允许有尖角,内孔表面精度要符合要求 3) 严格控制锻造规范 4) 正确选用淬火介质定期测定淬火的成分(测比重)、控制淬火介质的温度
淬硬层分布不均匀(尤其内腔)花键根部等部位无淬硬层	1) 冷却介质流动不够 2) 冷却介质温度过高 3) 淬火喷具设计不良	1) 加强介质流动性 2) 淬火盐水温度 $<40^{\circ}\text{C}$ 3) 改善喷具结构

(续)

常见缺陷	产生原因	防止方法
淬火后花键末端处折断或打击端面处崩花键	1) 加热温度过高 2) 冷却介质温度过高 3) 冷却介质成分不当	1) 严格控制淬火温度 2) 淬冷盐水温度应 $<40^{\circ}\text{C}$ , 最好 $20\sim35^{\circ}\text{C}$ 3) 淬冷盐水浓度应控制在 $5\%\sim8\%$ (相对密度 $1.03\sim1.08\text{g/cm}^3$ )
无阀凿岩机活塞如图 13-7 所示, 淬火畸变大, 或大盘开裂	淬火冷却方式掌握不好	1) 采用盐水和油的双介质淬火, 冷至 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ 即回火 2) 畸变形超过要求时, 需矫直, 矫直后在 $150^{\circ}\text{C}$ 油槽中时效 3h, 消除矫直残留应力

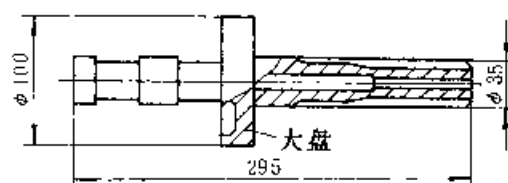


图 13-7 红旗 25 活塞简图

## 13.2 凿岩机主要渗碳件的热处理

凿岩机的主要零件, 大都要求表面耐磨, 心部有一定的强度和韧性。因此, 渗碳、碳氮共渗是凿岩机零件的主要热处理方法。这些零件主要有缸体、阀、螺旋棒、棘轮、回转爪和钎套等。

### 13.2.1 工作条件及失效形式

1. 缸体 缸体(见图 13-8)是凿岩机的主体。凿岩机的配气机构、冲击机构和回转机构都装在缸体里。在工作时, 主要和活塞接触, 受冲击和滑动摩擦作用, 因此缸体主要是由于内圆表面的磨损而报废。

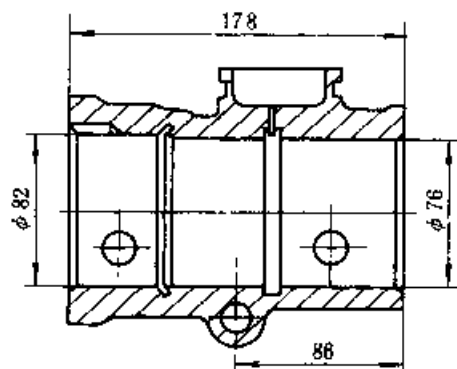


图 13-8 7655 型缸体

2. 阀 凿岩机工作时, 阀(见图 13-9)沿着阀套作轴向往复运动。阀主要是承受反复冲击载荷

和滑动摩擦。

阀的失效, 除因破裂外, 一般是以下列两处的磨损而报废, 即阀在前部位置时与阀盖, 在后部位置时与阀柜接触撞击的两个侧面处。这两个地方由于冲击磨损的作用, 形成了两个环形凹痕, 此凹痕加深后, 使阀的行程加大, 极易使阀沿着凹痕破裂而报废。

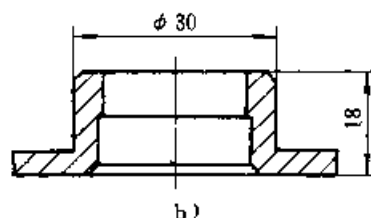
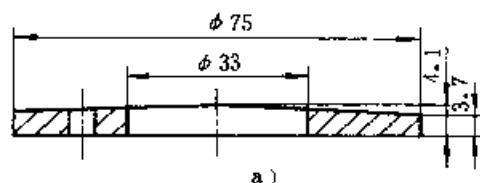
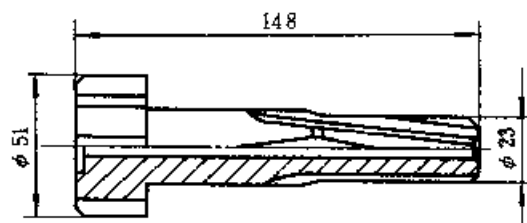
图 13-9 两种型号凿岩机的阀  
a) YT-25 型 b) 7655 型

图 13-10 7655 型凿岩机的螺旋棒

3. 螺旋棒 螺旋棒(见图 13-10)和螺母是活塞回程中使活塞产生转动的回转机构中的主要零件。它们的工作条件是承受反复冲击、扭转和滑动摩擦作用。它们是一对摩擦副, 在凿岩机使用过程中, 由于剧烈地磨损而使其配合间隙不断增加, 此时活塞用于带动回转的一大部分行程白白消耗在

二者间隙的调整上,间隙越大,活塞无益行程也越大。二者间隙增大到一定程度,凿岩机就不能继续使用。因此螺旋棒和螺母因磨损报废是主要的;因扭断而报废是偶然现象。

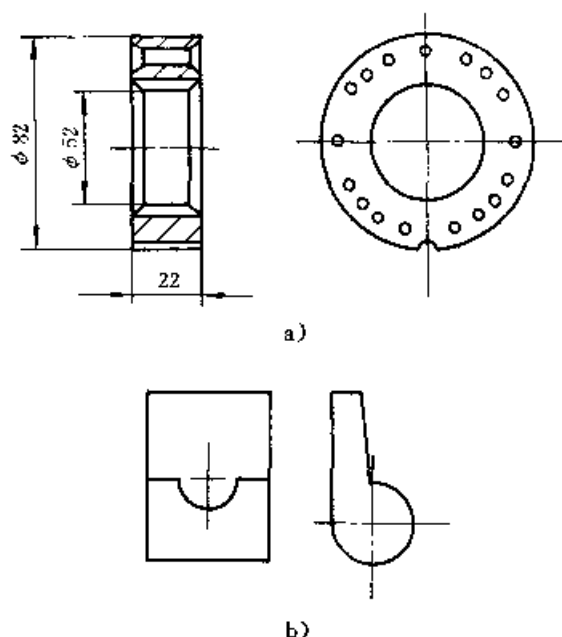


图 13-11 棘轮及回转爪

a) 棘轮 b) 回转爪

4. 棘轮及回转爪 棘轮和回转爪(见图 13-11)是强制活塞在反冲程回程时,沿着螺旋棒的螺旋槽滑动,从而使凿岩机得到回转动作的制动

装置。

在活塞反冲程时,与螺旋棒装在一起的回转爪抵住棘轮内齿,使螺旋棒不回转,从而使活塞沿着螺旋棒的螺旋槽进行回转运动。在活塞冲程时,螺旋棒可围绕自己轴线沿逆时针方向转动,这时,回转爪便在棘轮内齿间交替滑脱,而不阻碍螺旋棒转动。因此,棘轮和回转爪主要是承受摩擦和冲击载荷的作用

棘轮和回转爪在连续不断的的工作中,由于交替摩擦作用,而使棘轮内齿和回转爪逐渐磨成圆角形。当圆角达到一定程度后(目前规定磨损报废限度为  $R1.5\text{mm}$ ),二者不能紧密啮合,从而使制动作用失灵,棘轮与回转爪必须报废。

5. 钎套 钎套是凿岩机主要易损件之一,它压配在转动套内,其六方内孔与钎杆尾部配合并带动钎杆完成回转运动,同时对钎杆起导向作用。当活塞冲击钎尾时,钎杆尾部在钎套内作高速往复滑动。钎套内孔磨损是其失效的主要形式。当钎套端部六方内孔对边磨损达  $4\text{mm}$ ,超过废弃标准,机器效率显著下降。

### 13.2.2 技术条件和使用材料

凿岩机主要渗碳件的材料选择和技术条件参见表 13-7。

表 13-7 凿岩机主要渗碳件的材料选择及热处理技术条件

零件名称	选用材料	渗碳深度 mm	淬 火 回 火		
			硬 度 (HRC)	圆 度 /mm	金 相 组 织
缸 体	20Cr 20CrMo ZG20CrMnMo	1.2~1.5	58~63	<0.2	表层:回火马氏体+碳化物
阀	20Cr ZG20Cr	0.4~0.7	55~60	挠度 $\leq 0.15$	表层:回火马氏体(2级) 心部:回火马氏体+上贝氏体
	12CrMoV	0.6~1.0	58~62	挠度 $\leq 0.15$	
螺旋棒	20Cr 20CrMo	1.2~1.5	59~63	畸变度<0.1	表层:回火马氏体( $\leq 3$ 级)+粒状碳化物
棘 轮	20CrMo 20Cr	0.5~0.8	58~61	—	表层:回火马氏体(1~2级)+粒状碳化物(无网状分布)
回 转 爪	20Cr 30CrMo	1.0~1.4	60~65	—	表层:回火马氏体(1~2级)+粒状碳化物(无网状分布)
	35CrMo	1.0~1.4	60~64	—	
钎 套	20Cr 20CrMnMo	2.0~2.4	59~63	—	表层:回火马氏体(1~2级)+块状、粒状碳化物

## 13.2.3 制造工艺路线

锻造(铸造)→正火(退火)→机加工→渗碳→检验→淬火→清洗→回火→检验→磨削→稳定化处理(棘轮、回转爪不磨削;只有阀才进行稳定化处理)。

## 13.2.4 热处理工艺

凿岩机主要渗碳件的热处理工艺见表 13-8。

## 13.2.5 渗碳件热处理的质量检验

凿岩机主要渗碳件的技术要求和质量检验参见表 13-9。

## 13.2.6 热处理常见缺陷及防止方法

凿岩机主要渗碳件热处理常见缺陷及防止方法参见表 13-10。

表 13-8 凿岩机主要渗碳件热处理工艺

热处理方法	零件名称 工艺	缸 体		阀		螺旋棒	棘 轮	回转爪 (35CrMo)	针套
		加热温度/℃	850~920	890~920	890~920	890~920	890~920		890~920
锻件正火	保温时间/h	2.5	0.5			1.5	1.5		1.5
	冷却	空冷	空冷	空冷	空冷	空冷	空冷		空冷
铸件退火	加热温度/℃	880~950	980~1000						
	保温	2h 后随炉冷至 700℃ 保温 2h	1.5h						
	冷却	随炉冷至 300℃ 后空冷	炉冷						
液体碳氮共渗	加热温度/℃	920~950	920~950	910~930	910~930	910~930			
	保温时间/h	4~6	1.5~2.5	4~6	3~4	3~4			
	冷却	空冷		空冷	空冷	空冷			
	盐浴成分 (质量分数)	1.7%~2.3%NaCN+55%~65%BaCl <sub>2</sub> +20%~25%NaCl+1%~2%“603”							
淬 火	加热温度/℃	820~840	共渗后出炉 空冷到 840~ 860℃ 直接淬	820~840	780~800	760~780			
	保温时间/min	15		8	8	5			
	冷却	淬油		水淬回冷	水淬油冷	淬油			
回 火	加热温度/℃	200~220	310	170~190	200~220	170~190			
	保温时间/h	1	1	1.5	2	2			
	冷却	空冷	空冷	空冷	空冷	空冷			
气体渗碳	加热温度/℃	920~940	920~940	900~920	920~940	920~940			
	保温时间/h	8~10	4~6	9~10	5~7	7~8h			1) 950℃ 22h 油淬
	冷却	-		空气	空气	空气			2) 第一次 渗碳 840~ 860℃×5h 淬油
	淬火介质	煤油	煤油	煤油	煤油	煤油			
淬 火	加热温度/℃	渗层合格后 降温至 810~ 860℃ 约	渗层合格后 降温至 810~ 860℃ 约	810~860	840~860	840~860			
	保温时间/min			8	5	5			
	冷却			淬油	淬油	淬油			

(续)

热处理方法	零件名称	缸 体	阀	螺旋棒	棘 轮	回转爪 (35CrMo)	钎套
	工 艺						
回 火	加热温度/°C	200~220	230~250	180~200	200~220	180~210	170~180
	保温时间/h	1	1	2	1.5	1.5	2
	冷却	空冷	空冷	空冷	空冷	水冷	空冷
固体渗碳	加热温度/°C		920~940		920~940	920~940	
	保温时间/h		6~8		8~10	13~15	
	冷却		随罐空冷至 500°C 以下升 罐空冷		随罐空冷	随罐空冷	
淬 火	加热温度/°C		780~810		820~840	820~840	
	保温时间/min		4		8	5	
	冷却		淬油		淬油	淬油	
回 火	加热温度/°C		230~250		160~180	160~180	
	保温时间/h		1		1.5	1.5	
	冷却		空冷		空冷	空冷	
气体碳氮共渗	加热温度/°C			900~920	860~920	860~920	
	保温时间/h			7	6~10	6~10	
	冷却			随炉冷至 850°C 出炉空 冷			
	介 质	(1)煤油+氨气 (2)三乙醇胺 (3)苯胺					
淬 火	加热温度/°C			820~840	随炉降温至 840~860°C 直接淬油	随炉降温至 840~860°C 直接淬油	
	保温时间/min			8~10min			
	冷却			水淬油冷			
回 火	加热温度/°C			170~190	200~220	170~190	
	保温时间/h			1.5	1	1.5	
	冷却			空冷	空冷	空冷	

表 13-9 凿岩机主要渗碳件的技术要求和质量检验

热处理方式	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
锻件正火	硬 度	143~197HBS, 保证具有良好的机加工性	用布氏硬度计抽检 10%~15%
锻件正火	显微组织	索氏体+铁素体, 晶粒度≥5 级	用金相显微镜定期抽查
铸件退火	晶 粒 度	>4 级	用金相显微镜定期抽查
	金相组织	珠光体+铁素体	

(续)

热处理方式	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
渗 碳 (或碳氮共渗)	渗层深度	1) 过共析+共析+ $\frac{1}{2}$ 过渡区=总渗层 2) 渗层深度要求见表 13-7	1) 渗层深度以检查内试棒为准 2) 内试棒应与零件材料相同 3) 用放大镜或显微镜检查
淬火-回火	硬 度	见表 13-7	1) 检查部位:缸体内表面,阀表面,螺旋棒端面,棘轮,回转爪端面,钎套端面 2) 用锉刀检查 100%;用洛氏硬度计检查 5%~10%
	畸 变		1) 用千分表对缸体 100%检查圆度 2) 用塞规或塞尺抽检 10%阀挠度 3) 用千分表检查 10%螺旋棒畸变量
	显微组织		用金相显微镜定期抽查

表 13-10 凿岩机主要热处理常见缺陷及防止方法

常见缺陷	产生原因	防止方法
缸体内径圆度超差	渗碳淬火方式控制不好,冷却操作不对	渗碳时必须直立摆放在挂具上淬火时垂直入油上下窜动
铸钢缸体出现渗碳淬火后硬度不均匀,出现软带	化学成分不均匀,有偏析现象	铸钢熔炼要充分搅拌 严格掌握退火工艺
阀在渗碳后畸变大	1) 毛坯在冲压后有内应力 2) 渗碳温度过高	1) 毛坯冲压后进行退火(600℃保温 2h) 2) 适当降低渗碳温度和增加保温时间来控制畸变量
螺旋棒畸变超差	淬火温度过高和冷却操作不当造成	1) 严格控制淬火温度,不得偏高 2) 淬冷时垂直入油 3) 畸变超差件可进行加热矫直,在 150~170℃保温 30min 以上后进行热矫直,然后在 150~170℃回火 1h
棘轮磨削时表面龟裂	表面碳浓度过高,回火不足 磨削进刀量大,冷却不足,砂轮太硬	降低渗碳炉气碳势 延长回火时间 减小磨削进刀量,增加冷却液流量,使用硬度较低的砂轮
回转爪掉渣	表层碳浓度过高,有网状碳化物	不允许表层有网状碳化物,渗碳后可采取二次淬火或正火消除
棘轮、回转爪耐磨性低	此零件不进行磨削加工,渗碳后多次加热引起脱碳	渗碳后不宜多次加热,最好直接淬火



### 13.3 凿岩用钎头

#### 13.3.1 工作条件及失效形式

图 13-12 是使用最广泛的一种凿岩钎头,凿岩刃口为钎焊的碳化钨硬质合金片。钎头由钎头体和硬质合金组成。

钎头体起着向硬质合金刀片传递冲击功的作用。在凿岩过程中,钎头受力复杂,它不但承受由钎杆传递来的脉冲应力波,并且受着岩石反射回来的力波。在某些截面存在着由于冲击的反射产生力波叠加现象,使钎头的受力增加到 150%~180%。

钎头失效的原因,除了硬质合金片脱落和破碎外,主要是钎头体胀裤、裂裤和断腰所造成。钎头体尾部为一锥孔,它与钎杆头部锥体相配合。凿岩过程,锥孔部位受张力。如热处理质量欠佳,很易发生锥孔胀大(胀裤),使钎头松脱或锥孔壁开

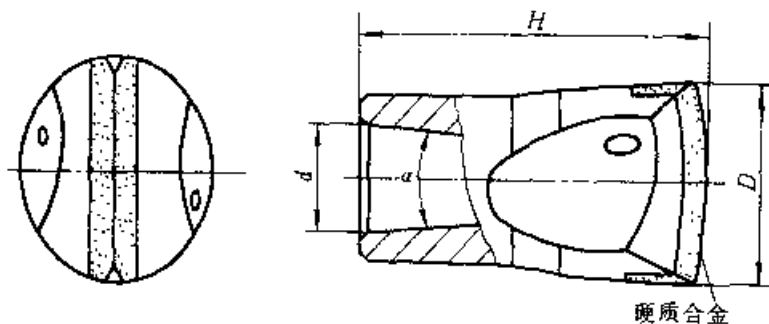


图 13-12 钎焊硬质合金的“一”字形钎头

裂(裂裤)造成钎头失效。硬质合金与钎头体钢材的膨胀系数相差一倍多,如果钎头热处理时冷速稍快,将会使硬质合金和钎头体之间产生很大的内应力。这种钎头在服役过程中,硬质合金刀片很易脱落。

#### 13.3.2 技术条件和使用材料

我国用于钎头的硬质合金和钎体的钢材牌号示于表 13-11。

为了保证钎体有良好强韧性,焊接硬质合金刀片的钎头需要进行适当的热处理,使钎体硬度在 35~15HRC 之间。

#### 13.3.3 制造工艺路线

车外形→加工锥孔→铣槽(为装硬质合金刀片)→钻水孔→铣排粉圆弧槽→检验→酸洗→配合金刀片→焊接→淬火→回火→磨刃→发蓝→检验。

#### 13.3.4 热处理工艺

1. 空冷硬化钢 因硬质合金和钢材的线胀系数相差过大,钎焊(铜基或银基合金焊料)硬质合金刀片的钎头淬冷时,冷速应尽量缓慢,否则刀片与钎体之间内应力过大,凿岩时刀片易脱落,所以优质钎头,均用空冷硬化钢制造钎体。

表 13-12 是我国以空冷硬化钢制造优质钎头的热处理工艺举例。

2. 40Cr 钢 当前我国许多工厂都用价廉的油淬钢制造钎头,最常用的是 40Cr,其热处理工艺是将焊好刀片的钎头冷至 900℃ 左右(待焊料固化),分别

采用下述两种冷却方法:

1) 将整个钎头放入温度为 380℃ 的硝盐槽中保温 30min,取出空冷。

表 13-11 钎头用硬质合金及钎体的钢材牌号

牌 号	成分(质量分数)(%)			硬 度 (HRA)	抗弯强度 (MPa)	WC 粒度 ( $\mu\text{m}$ )
	Co	WC	TaC			
YG8C	8	92		88.0	1750	2.7~2.8
YG11C	11	89		86.5	2100	2.7~2.8
YG15	15	86		87.6	2100	1.5~2
YG105	10	90	0.5	87.6~87.7	2800~2820	2.4

钎 体 的 钢 材 牌 号

40Cr, 35CrMo, 40CrNiMo, 40MnMoV, 27SiMnMoV, 24SiMnNiCrMoA, 55SiMnMo, 30CrNi3Mo<sup>①</sup>

① 国外某名牌产品钎体钢材,相当于我国的 30CrNi3Mo。

表 13-12 空冷硬化钢钎体热处理

钢 号		24SiMnNi2CrMoA
退 火 工 艺		加热至 750℃ 保温 4h→炉冷至 650℃ 保温 1h→随炉冷至室温。钎体钢材硬度 < 260HBS
淬硬工艺及组织性能	方案 1	刀片钎焊过程的同时,将钎体加热至 900℃ 左右,然后空冷至室温,最后在 200~300℃ 进行回火,组织为板条马氏体和粒状贝氏体混合物。硬度为 40~45HRC
	方案 2	刀片焊好后,将钎头重新加热至 860~900℃,空气冷却至室温,最后进行 200~300℃ 回火,获得板条马氏体和粒状贝氏体混合物。硬度为 40~45HRC

2) 将钎头下部浸入淬火油槽中(硬质合金钎头不得浸入油中)冷却 1~2min 后,再进行中温回火,温度 400℃,保温 30min。

经上述方法处理后,钎体硬度 25~35HRC。

## 13.4 凿岩机钎尾及成品钎杆的热处理

### 13.4.1 工作条件及失效形式

1. 钎尾 钎尾是凿岩机主要易损件之一,在服役过程中,钎尾(图表 13-13)承受活塞的高频率的冲击和扭转,它是典型的承受多种压缩、弯曲和扭转的杆件,与转动套接触面还承受很大摩擦力的作用,所以很易发生早期失效。其失效形式主要有以下几种:

1) 疲劳断裂,常常发生在钎尾波形螺纹的根部,如图 13-14 所示。重型导轨式凿岩机钎尾折断多发生在螺纹根部退刀槽处。

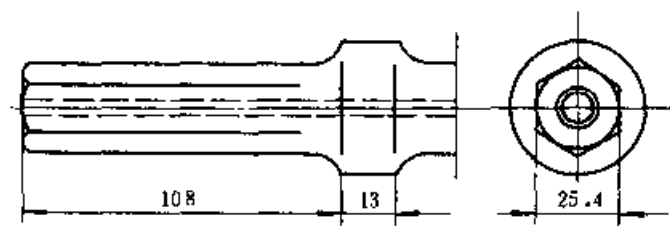


图 13-13 钎尾

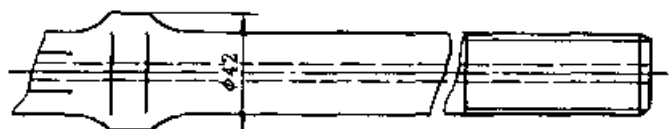
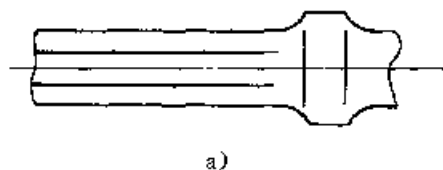


图 13-14 钎尾的疲劳断裂

2) 受活塞冲击的端面产生凹陷及剥落掉块,如图 13-15 所示。

3) 波形螺纹严重磨损。



a)



b)

图 13-15 钎尾端面凹陷

(a)和剥落掉块(b)

2. 成品钎杆 凿岩工程上应用最广的是图 13-16 所示的小型钎杆,它包括钎尾(与钎杆为一体)、钎肩、杆体和钎锥四部分。钎锥是为安装钎头用的。当钎杆尾端受到活塞的高频率打击时,钎杆把打击力传递给钎头把岩石凿碎。研究表明,由于应力波的反射和叠加,钎杆两端应力分布最大,中部较小。在正常情况下,钎头端部比钎尾端部应力分布稍高;当钎头磨钝时,凿岩阻力增大,靠近钎头端部应力强烈增加,因而钎杆两端经常在接近或超过持久极限的情况下工作,所以钎杆易破坏失效。失效的主要形式有:

1) 疲劳折断,最常发生在钎肩圆角处或横穿钎肩最大截面处。在其他部位也可发生断裂,疲劳源多数发生在钎杆水孔的内表面。

2) 钎尾端面凹陷和剥落掉块。因其受力情况和大型凿岩机单独构件——钎尾相同,所以也产生同样的失效形式。

### 13.4.2 技术条件和使用材料

1. 钎尾 钎尾应具有足够的疲劳强度、冲击韧度和一定的耐磨性。一般选用合金结构钢进行

渗碳处理。常用的钢种有 30SiMnMoV、35SiMnMoV 和 30Si2Mn2MoV 等。35SiMnMoV 钢的化学成分及临界点表见 13-13。

钎尾热处理技术条件参见表 13-14。

2. 成品钎杆 成品钎杆主要是因疲劳断裂而失效, 所以钎杆用钢应具有足够的疲劳强度。常用的钎杆用钢牌号和化学成分见表 13-15

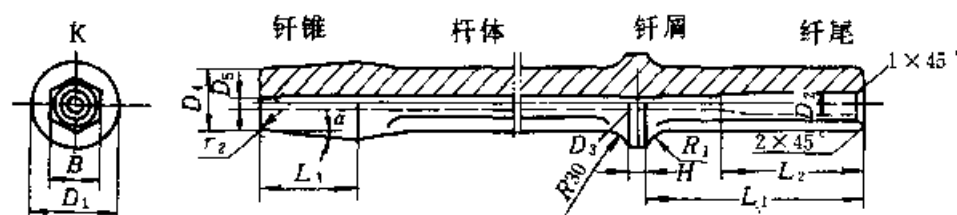


图 13-16 钎杆

表 13-13 35SiMnMoV 钢的化学成分及临界点

化学成分(质量分数)(%)					临界点 /°C			
C	Si	Mn	Mo	V	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ms	Mf
0.32~0.37	0.60~0.90	1.30~1.60	0.40~0.60	0.07~0.15	737	846	393	189

表 13-14 钎尾热处理技术条件

渗碳层深度/mm	淬 火 + 回 火			
	硬 度 (HRC)		金 相 组 织	
	心 部	表 面	心 部	表 面
0.5~0.8 1.0~1.2 <sup>①</sup>	48~52	58~60	下贝氏体+少量马氏体	马氏体+细粒状碳化物+少量下贝氏体+残留奥氏体

① 重型导轨式钎尾。

表 13-15 钎杆用钢的化学成分

序号	钢 组	钢 号		化 学 成 分 (质 量 分 数) (%)									
		牌 号	代 号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
1	碳素钢	中空碳 8	ZKT8	0.75~0.84	0.15~0.35	0.20~0.40	≤0.25			0.20	0.30	0.030	0.035
2	铬 钢	中空 8 铬	ZK8Cr	0.70~0.85	≤0.35	≤0.35	0.45~0.75			0.15	0.25	0.030	0.030
3	硅锰钼钢	中空 55 硅锰钼	ZK55SiMnMo	0.50~0.60	1.10~1.40	0.60~0.90		0.40~0.55			0.25	0.030	0.030
4	硅锰钼钒钢	中空 35 硅锰钼钒	ZK35SiMnMoV	0.32~0.42	0.60~0.90	1.30~1.60		0.40~0.60	0.07~0.15		0.25	0.030	0.030

## 13.4.3 制造工艺路线

## 1. 钎尾

## (1) 一般钎尾:

锻造→退火→检验→机加工→检验→渗碳→  
检验→淬火→回火→清洗→检验→磨削。

## (2) 重型导轨式凿岩机钎尾:

锻造→退火→检验→机加工→检验→气体  
(或液体)渗碳后直接油淬→高温回火→检验→等  
温淬火→两次低温回火→检验→冷滚压螺纹退刀  
槽→磨削。

## 2. 成品钎杆

正火→机加工→锻制钎肩→检验→钎尾淬火  
→回火→检验。

## 13.4.4 热处理工艺

## 1. 钎尾 钎尾热处理工艺如表 13-16 所示。

气体渗碳后进行一次高温回火,有利于渗碳  
层孪晶马氏体显微裂纹的焊合,对提高钎尾断裂  
韧度有益。

贝氏体等温淬火后进行两次低温回火,可以  
减少渗碳层中的残留奥氏体含量(质量分数),约  
从 39%降至 17%,可以有效地减少钎尾由于端面  
浅层剥落而失效的现象。

表 13-16 钎尾热处理工艺

热 处 理	规 范
锻造退火	加热温度 870~890℃,保温 2h, 炉冷至 100℃ 左右出炉空冷
淬 火	从渗碳罐取出零件,在空气中冷 却 40s 左右,接着淬入油中停留 40~60min,取出空冷数分钟,立即 回火
回 火	(260±10)℃,保温 1.5~2h
气体渗碳	920~940℃ 保温 4~8h,油冷
高温回火	550~650℃ 保温 2h
贝氏体等温淬火	860~880℃ 保温 20min(盐浴 炉),转入 260℃ 硝盐炉保温 40min 后空冷
回 火	260℃ 回火两次各保温 1h

2. 成品钎杆 成品钎杆热处理工艺参见表  
13-17。

## 13.4.5 技术要求和质量检验

钎尾和成品钎杆技术要求和质量检验如表  
13-18 所示。

表 13-17 成品钎杆热处理

热 处 理	规 范	硬 度(HRC)
ZKT8, ZK8Cr 钢		
热 轧 态	—	20~25
钎尾淬火	用中频电流或盐浴将尾端 30~40mm 加热至 800~840℃,保温 10min 淬火或油	
钎尾回火	300~400℃(碳钢)或 350~450℃(铬钢)硝盐炉回火 30min	48~55
钎锥淬火	中频或盐浴将钎锥部加热至 800~840℃,保温 10min 淬水或油	
钎锥回火	450~550℃ 硝盐炉回火 30min	30~35
55SiMnMo		
热轧态或正火	硬度合乎要求的热轧态 通电(低电压大电流)靠自身电阻加热至 900℃,空冷(或风冷)	35~43
钎尾淬火	从端面起 25mm 中频加热至 850~900℃( $A_{c3} \approx 785^\circ\text{C}$ )淬油	
钎尾回火	硝盐加热, 320℃×1h, 空冷	48~54

表 13-18 钎尾热处理技术要求和质量检验

工具名称	热 处 理	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
钎 尾	锻造退火	硬 度	$\leq 207\text{HBS}$	用布氏硬度计抽查
		金相组织	均匀细晶粒索氏体	用金相显微镜观察
	渗 碳	渗层深度和组织	0.5~0.8mm 1.0~1.2mm 重型导轨凿岩机钎尾, 表层不得有过共析层	用金相显微镜检查组织用放大镜检查测定试样断口的渗碳层厚度
		硬 度	表面: 58~60HRC 心部: 48~52HRC	用洛氏硬度计抽查
	淬火+回火	金相组织	表面: 马氏体+细粒状碳化物+少量下贝氏体 心部: 下贝氏体+马氏体	用金相显微镜观察
成品钎杆 (55SiMnMo)	热轧态或正火后	硬 度	35~43HRC	用洛氏硬度计抽查
	淬火+回火 (钎尾)	硬 度	48~54HRC	用洛氏硬度计抽查
		显微组织	贝氏体+马氏体	用金相显微镜检查

### 13.5 其他气动工具零件的热处理

气动工具除凿岩机外, 还有捣固机、气铲、气镐及铆钉机等。这些气动工具广泛用于铸造、建

筑、船舶、桥梁、锅炉、金属房架及其他金属结构的制造与修理工作中。它们的工作条件大致相同, 其关键件的损坏主要是磨损。其主要零件的热处理工艺列于表 13-19。

表 13-19 几种气动工具主要零件的热处理工艺

零件名称	材 料	热 处 理 工 艺	渗碳深度 /mm	硬度 (HRC)	生产中应注意的问题
D9 捣固机缸体	20Cr	气体渗碳: 915~935°C, 保温 3.5~4.5h, 坑冷 淬火: 850°C 保温 45min, 淬油 回火: 320~340°C, 保温 1h, 空冷, 发蓝处理	0.7~0.9 (包括磨量) 0.2	50~55	1) 淬冷时, 上下活动 30~40s, 2min 后出油 2) 淬火油温度 40~100°C 3) 畸变超差进行热矫, 但热矫温度应低于回火温度, 矫直后低温回火
D9 捣固机活塞	45	锻造余热淬火: 锻后温度控制在 820~900°C, 5% (质量分数) 盐水淬冷 回火: 540~560°C 保温 90min, 空冷		28~32	锻后至淬火的间隔时间不应超过 3s
		$\phi 32\text{mm}$ 表面及锥面高频淬火 (长度 100mm) 回火: 200°C 保温 90min, 空冷		50~55	
D4 捣固机阀盖	45	淬火: 800°C 保温 4min (盐浴炉), 5% (质量分数) 盐水淬冷		40~45	此件易淬裂, 出水温度控制在 150°C 左右

(续)

零件名称	材 料	热 处 理 工 艺	渗碳深度 mm	硬度 (HRC)	生产中应注意的问题
C5,6,7 气铲缸体	20Cr	气体渗碳:920℃保温3~4h 淬火:850℃保温15min,油淬 回火:220~240℃保温70min	0.6~0.8 (包括磨量 0.2)	55~60	
C5,6,7 气铲锤体	T8A	淬火:780~800℃保温10min(盐 浴炉),5%(质量分数)盐水冷却 回火:270~280℃保温90min空 冷		55~56	
C5,6,7 气铲阀	20Cr	淬火:盐炉加热880~900℃保温 5min,10%~15%(质量分数)盐水 冷却,组织为板条马氏体		15~50	淬火剂温度控制在40℃以 下
C5,6,7 气铲阀杆	20Cr	气体渗碳:910~930℃保温3h,降 温至840℃保温30min中,淬油 回火:230~250℃保温1h,空冷	0.5~0.7 (包括磨量 0.2)	55~60	油温控制在60~100℃
G10 气镐阀	20Cr	气体渗碳:910~930℃保温3h 淬火回火	0.5~0.7 (包括磨量 0.2)	52~57	油温60~100℃
G10 气镐阀杆	20Cr	气体渗碳:910~930℃保温4h 淬火回火	0.7~1.0 (包括磨量 0.2)	57~62	油温60~100℃
G10 气镐锤体	T8A	淬火:盐炉加热790~810℃保温 14min,5%(质量分数)盐水淬冷		62~65	盐水温度≤40℃
		回火:220℃保温90min	—	57~62	—
G10 气镐缸体	40Cr	正火:860~880℃保温100min,空 冷		—	—
		淬火:盐炉加热850~870℃保温 10min,油冷			—
		回火:530℃保温90min,水冷	—	32~37	—
S150 气 砂轮主轴	40Cr	调质:860℃保温15min,淬油, 600℃回火1h,水冷		25~30	—
		扁头端及 M12×1.25 丝扣部位高 频淬火,回火	—	48~53	—
S150 气砂 轮联轴套	20Cr	薄层渗碳:用 RJJ-259T(或 RJJ- 75-9T)气体渗碳炉,加1~2kg 尿素 排气保温时(920℃×10min)滴入甲 醇150滴/min 煤油150滴/min 直接盐水淬冷,200℃回火1h	0.10~0.15	45~50	—

(续)

零件名称	材 料	热 处 理 工 艺	渗碳深度 mm	硬度 (HRC)	生产中应注意的问题
S150 气 砂轮气缸	ZG20Cr	退火:930℃保温 90min 炉冷	—	—	—
		气体渗碳:920℃保温 6h, 直接淬 火, 油冷	0.85~1.05 (包括磨量 0.2)	55~60	—
		回火:220℃保温 1h, 空冷			
M16 铆钉 机气缸	20Cr	气体渗碳:920℃保温 210min	0.6~0.8 (包括磨量 0.2)	—	—
		淬火:850℃保温 50min, 油淬	—	—	片式炉垂直立装
		回火:220℃保温 70min, 空冷		55~60	—
M16 铆钉机 下阀柜 上阀柜	20Cr	气体渗碳:920℃保温 3h, 降温至 840℃, 直接淬火, 油冷	0.5~0.7 (包括磨量 0.2)	—	—
		回火:240℃保温 1h		55~60	—
M16 铆钉机阀	20Cr	淬火:盐炉加热 890℃保温 4min, 10%~15%(质量分数)盐水淬冷 组织:板条马氏体 回火:180℃保温 1h		45~50	盐水温度<30℃
铆钉机 的窝头	T8A T10A	淬火:800~820℃保温 40min, 盐 水冷 回火:260~280℃保温 1~1.5h, 空冷		50~55	

## 13.6 牙轮钻机三牙轮钻头

### 13.6.1 工作条件及失效形式

牙轮钻头是地质钻探、露天矿和石油开采的钻孔工具。牙轮机钻孔时,通过其回转、推压机构,使钻具回转并给钻头施以轴向压力。钻头主要由牙轮、牙掌(又称牙爪)和滚柱及滚珠组成。钻孔是靠牙轮对岩石的压碎、剪切和冲击破碎作用来完成的。牙掌的作用是支承牙轮保证牙轮钻孔时环绕牙掌的轴承转动,所以钻井时牙轮和牙掌轴承承受着带有冲击的接触应力载荷并受到强烈的磨损。其失效形式主要有以下几种:

(1) 牙轮与牙掌轴承跑合面表层疲劳剥落。尤其滚动轴承钻头更为严重。

(2) 牙轮与牙掌轴承跑合面因拉毛发热而咬死。

(3) 牙掌小轴磨损、折断。

(4) 滚柱、滚珠磨损与碎裂。

(5) 牙轮、牙掌断裂。

因此牙轮钻头须具有高的疲劳强度、冲击韧度和耐磨性。

### 13.6.2 技术条件和使用材料

由牙轮、牙掌的工作条件分析,它们需要疲劳强度高、韧性好、表面硬度高、耐磨性好,因此宜选用合金渗碳钢。滚珠和滚柱一般用 GCr15 轴承钢制造。但因滚珠和滚柱易发生碎裂失效,现多改用弹簧钢。牙轮钻头钢材的选用和热处理技术条件列于表 13-20。

表 13-20 牙轮钻头钢材选用及热处理技术条件

零件名称	材 料	渗碳深度 mm	渗碳表层碳浓度 $w(C)(\%)$	淬火,回火	
				表面硬度 (HRC)	表面金相组织
矿用牙 轮钻	牙轮 20CrMo 20Ni4Mo	0.9~2.2 (决定于钻头直径)	0.8~1.05	58~63	马氏体( $\leq 3$ 级)加粒状 碳化物( $\leq 2$ 级)
	牙掌 20CrMo	1.2~2.5 (决定于钻头直径)	0.8~1.05	58~63	马氏体( $\leq 3$ 级)加粒状 碳化物( $\leq 2$ 级)
	滚珠 滚柱 55SiMoV	—	—	55~59 56~60	—
石油 牙轮钻	牙轮 20CrNiMo 20Ni4Mo 15CrNi3Mo	0.9~2.2 (决定于钻头直径)	0.85~1.05	59~62	马氏体( $\leq 3$ 级)加粒状碳 化物( $\leq 2$ 级)
	牙掌 20CrNiMo	1.2~2.5 (决定于钻头直径)	0.85~1.05	58~61	—
	滚珠 滚柱 55SiMoV 50CrV	—	—	55~59 56~60	—

## 13.6.3 制造工艺路线

## 1. 牙轮

(1) 钢齿牙轮: 锻造→正火(退火)→检验→机加工→渗碳→淬火→低温回火→清洗→检验→磨削→检验。

(2) 镶齿牙轮: 锻造→正火(退火)→检验→机加工→钎焊减磨材料→渗碳→两次淬火→低温回火→清洗→检验→钻硬质合金齿孔→压齿→磨削→检验。

## 2. 牙掌

(1) 堆焊耐磨合金牙掌: 锻造→正火(退火)→检验→机加工→小轴、二道止推面、大轴受力部位堆焊耐磨合金→渗碳→淬火→低温回火→清洗→检验→磨削→检验。

(2) 渗硼牙掌: 锻造→正火(退火)→检验→机加工→渗碳→磨削→渗硼→淬火→低温回火→清洗→检验→磨削→检验。

## 13.6.4 热处理工艺

牙轮的热处理工艺示于表 13-21。

牙掌热处理工艺示于表 13-22。

表 13-21 牙轮热处理工艺举例

工 序	热 处 理 工 艺
锻造正火	加热温度 880~920°C, 保温 3~4h, 空冷
渗 碳	15CrNi3Mo 钢, 要求渗碳层深度 1.7~2.0mm RJJ-105 井式渗碳炉, 装炉后, 2~3h 炉温由 760°C 升至 920°C 滴入大量甲醇排气; 1~1.5h 均温阶段; 甲醇 180 滴/min, 丙酮 250 滴/min; 渗碳期: 13~15h 甲醇 100 滴/min, 丙酮 180 滴/min, 从 920°C 降温至 830°C 约 2.5~3h, 滴入甲醇 90 滴/min。然后工件出炉放入缓冷桶自行冷却
淬 火	1) 渗碳后预冷至 830~850°C 直接淬油 2) 渗碳后冷至室温重新加热至 830~850°C 淬油 3) 渗碳后进行 900~920°C 和 810~830°C 两次淬火均为油淬



(续)

工 序	热 处 理 工 艺
回 火	温度 170~190℃,保温 4h

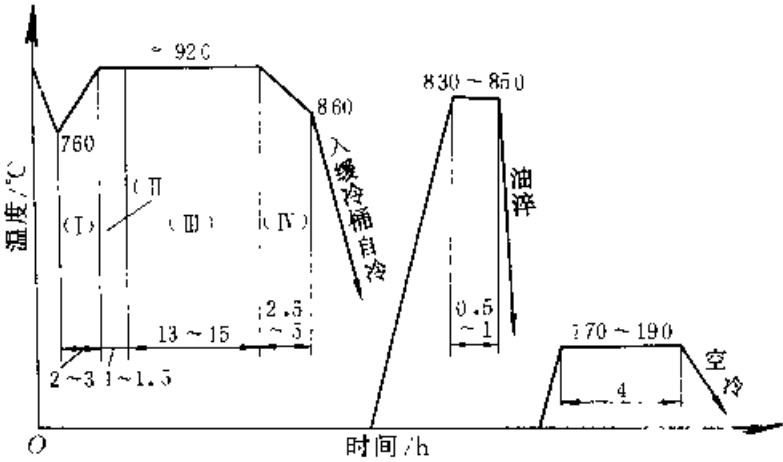


表 13-21 附图 15CrNi3Mo 钢牙轮热处理工艺图

注: 用 RJJ-105 井式渗碳炉

(I) 升温排气,滴入大量甲醇;(II) 均温,甲醇 180 滴/min,丙酮 250 滴/min;

(III) 渗碳,甲醇 190 滴/min,丙酮 180 滴/min;(IV) 降温,甲醇 90 滴/min

表 13-22 牙掌热处理工艺举例

工 序	热 处 理 工 艺
锻造正火	加热 880~920℃,保温 3~4h,空冷
渗 碳	20CrNiMo 钢,要求渗碳层 1.8~2.0mm,920~940℃,渗碳 13~17h
回 火	温度 170~190℃,保温 4h
渗 硼	1) 渗碳要求同上,渗碳后再渗硼 2) 将牙掌轴颈部位套上特制的渗硼杯,内部添加足够的渗硼剂,密封渗硼杯,放入通有吸热性保护气氛的热处理炉中加热。温度 930℃,时间 8h。渗硼组织为单相 Fe <sub>2</sub> B,渗层深度为 0.08~0.10mm 也可采用液体渗硼。不需渗硼的部位镀铜,把工件放入渗硼盐浴中,在 900~920℃ 保温 6~7h
淬 火	1) 固体法渗硼后,用盐浴炉或保护气氛炉加热至 810~840℃,保温 2~3h 后淬入 70~100℃ 油中 2) 盐浴渗硼后直接淬入 70~100℃ 的油中
回 火	温度 170~190℃,保温 4h

表 13-23。

13.6.5 质量检验

牙轮、牙掌热处理常见缺陷及防止方法参见

牙轮、牙掌的热处理技术要求和质量检验见 表 13-24。

表 13-23 牙轮、牙掌及滚珠、滚柱热处理技术要求和质量检验

工 序	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
正火(退火)	硬 度	≤217HBS	用布氏硬度计抽检
渗 碳	渗层深度	1) 过共析层+共析层+ $\frac{1}{2}$ 亚共析层 =总深 2) 共析层+过共析层≥总深 50%~70%	1) 用随炉小试样检验渗层深度 2) 小试样与牙轮、牙掌材料相同,表面无氧化皮,并经正火(或退火)处理 3) 随炉试样用金相显微镜检测

(续)

序 号	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
渗 碳	渗层表面 碳 浓 度 (质量分数)	0.8%~1.05%	1) 随炉试样做剥层分析,每层 0.1~0.2mm 2) 定碳按 GB223.1-81 规定进行 3) 也可定期用标准试块或金相图谱比较
渗 碳	渗层组织	单相 $\text{Fe}_2\text{B}$	1) 用同样钢材的随炉试样检测 2) 用三 P 试剂(黄血盐 1g,赤色盐 10g,氢氧化钾 30g,水 100mL)腐蚀,金相显微镜检查
	渗层深度	80~160 $\mu\text{m}$	用金相显微镜测量随炉试样
淬火+回火	硬 度	矿用牙轮、牙掌表面硬度 58~63HRC 石油牙轮 58~62HRC,牙掌 58~61HRC 滚珠 55~59HRC 滚柱 56~60HRC 牙掌耐磨合金大于 55HRC	1) 牙轮、牙掌用洛氏硬度计全部检验 2) 滚珠、滚柱抽检
	金相组织	表层不允许有连续网状碳化物及粗大针状马氏体	按 JB1671-78《汽车渗碳齿轮金相检验》标准评定

表 13-24 牙轮、牙掌热处理常见缺陷及防止方法

常见缺陷	产 生 原 因	防 止 方 法
渗碳层出现网状碳化物	渗碳温度过高,保温时间过长,渗碳出炉温度低,冷却方式不当	1) 按工艺要求渗碳,控制工件表面含碳量不超过 1%(质量分数) 2) 气体渗碳后出炉温度不能过低,以 740~760℃ 为宜 3) 为防止形成网状碳化物,渗碳后立即进行油淬或正火
淬火后硬度偏低	淬火温度低,冷却速度不够,或回火温度过高	允许重新淬火,但重新淬火次数不得超过两次

## 13.7 钻探机械钻具的热处理

### 13.7.2 技术条件和使用材料

#### 13.7.1 工作条件及损坏形式

在地质钻探过程中,钻机通过钻具(包括钻杆、岩心管和各種管接头)将转矩和轴向压力传到钻头,从而对地层进行钻探。钻具除了外表不断与孔壁岩层发生摩擦外,还承受巨大的弯曲、扭转及冲击力的作用。其失效形式有:

- (1) 断裂。
- (2) 丝扣处磨损变形。
- (3) 管壁裂缝和产生洞眼。
- (4) 管壁磨损,弯曲太大。

钻具材料及热处理技术条件参见表 13-25。

表 13-25 钻具材料及热处理技术条件

钻具名称	选用材料	表 面 淬 硬 层		
		淬硬层/mm	硬度(HRC)	显微组织
钻杆	45	0.5~1.2	50 以上	细马氏体
岩心管	15, 40Mn2	0.6~1.5	50 以上	细马氏体
接箍、锁接头	45, 40Cr 45Mn2 40MnB	2.0~2.5	50 以上	细马氏体

### 13.7.3 钻具的制造工艺路线

钻杆、岩心管的制造过程:切料→调质→高频表面淬火→检验。

接箍、锁接头的制造过程:切料→调质→机加工→表面淬火→检验→氧化处理。

### 13.7.4 钻具的热处理

1. 钻具的调质处理 钻具调质处理工艺示见表 13-26。

表 13-26 钻具调质处理工艺

材 料	淬 火		回 火	
	温度/°C	冷 却	温度/°C	冷 却
45	830~850	水	550~600	空气
40Cr	850~870	油	600~620	水
45Mn2	830~850	油	620~640	水

#### 2. 钻具高频感应淬火

(1) 高频感应淬火用感应器的选择(见表 13-27)。

表 13-27 钻具高频感应  
淬火用感应器的选择

钻具 名称	规格 /mm	感应器尺寸/mm			备 注
		内径	高度	间隙	
钻杆	φ50×5.5	56	28	2~4	采用双 圈感应器
岩心管	φ110×6	116	18	2~4	
	φ108×4.25	115	20	2~4	
接箍、 锁接头	φ65	69	12		采用单 圈感应器

表 13-28 钻具高频感应淬火工艺

钻具名称	规格 /mm	电 参 数				工件回转速度 /r·min <sup>-1</sup>	工件前进速度 /mm·min <sup>-1</sup>
		屏压/kV	槽压/kV	屏流/A	栅流/A		
钻杆	φ50×5.5	11	8.5	7.2	1.17	270	600
岩心管	φ110×6	12	9	8.1	1.4	108	300~600
	φ105×4.25	10	7.6	7.7	1.18	108	360
接箍、锁接头	φ65	12	4.5 (6~7)	2.4	0.33 (0.4)		120~150 (70~90)

(2) 钻具高频感应淬火工艺,钻具高频感应淬火工艺见表 13-28。

(3) 淬火用设备,锁接头、接箍采用 60kW 高频感应淬火设备,钻杆、岩心管采用 100kW 高频感应淬火设备。

图 13-17 是对岩心管进行高频感应淬火的喷油装置示意图。

为了适应不同弯曲度管材的连续淬火,需采用特殊的感应器导线,并在淬火机床上加相应的装置,如图 13-18 所示。

3. 锁接头火焰表面淬火 锁接头火焰表面淬火的有关参数如下:

(1) 工艺参数:加热温度 850~870°C,自喷水冷。氧气压力 0.7~0.8MPa,乙炔压力 0.05~0.15MPa,水压、水量调到既不熄火又能淬硬为准。

(2) 专用喷嘴:φ57mm 接头用 29×2-φ0.8mm 孔;φ65mm 接头用 31×2-φ0.8mm 孔;φ75mm 接头用 35×2-φ0.8mm 孔。

(3) 水孔:31×3-φ1mm 排孔。

(4) 火距:10mm。

(5) 机床转速:φ57mm 接头——1r/min;

φ65mm 接头——0.85r/min;

φ75mm 接头——0.74r/min。

工件横放顶紧(如图 13-19 及图 13-20),火焰对准淬火段(两图中标尺寸部位不淬火)。锁接头公体用专用喷嘴一个,母体用专用喷嘴两个。

4. 高强度钻杆热处理 使用材料为 35MnMoVTi 钢。采用正火处理,加热 860~900°C,空冷,组织为贝氏体。最后进行 600~650°C 回火。

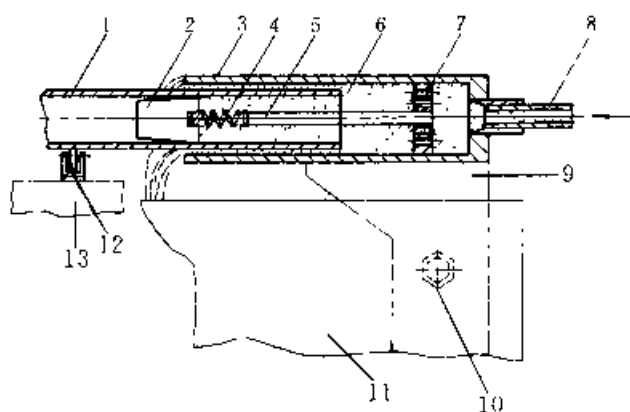


图 13-17 岩心管喷油装置示意图

- 1 工件 2 油堵 3—外套 4—弹簧 5—轴  
6—冷却油 7—分油板 8—给油管(联油泵)  
9—支架 10—调整螺栓 11—油箱  
12 滚轮 13—滑动导轨

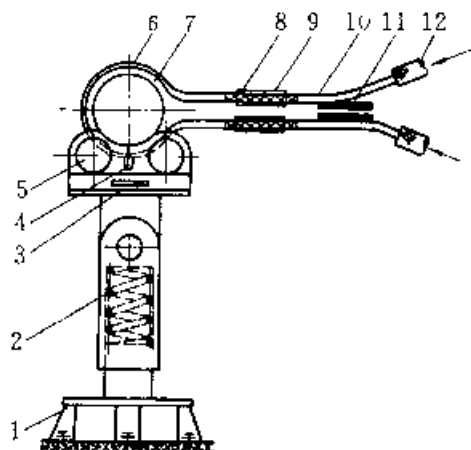


图 13-18 管材淬火用感应器示意图

- 1—支架 2 弹簧 3—托座 4—固定感  
应器的夹子 5—小钢轮 6—感应器  
7—工件 8—软导线 9—软导线外  
的橡皮管 10—铜管 11 铜板  
(接淬火变压器) 12—水管

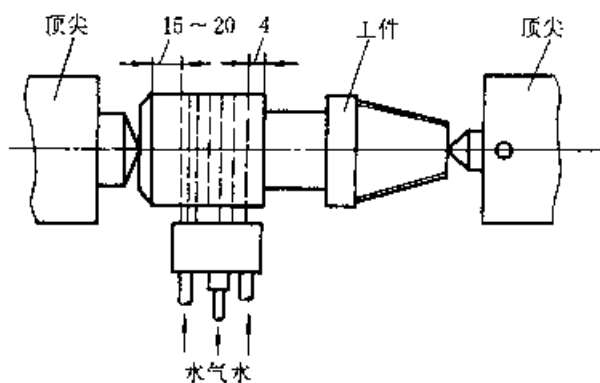


图 13-19 锁接头公体火焰淬火示意图

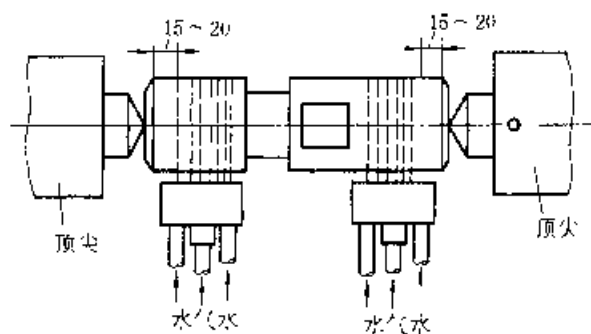


图 13-20 锁接头母体火焰淬火示意图

力学性能可达:  $\sigma_s = 880\text{MPa}$ ,  $\sigma_b = 980\text{MPa}$ ,  
 $\delta = 15\%$ ,  $a_K = 100\text{J/cm}^2$ .

5. 取心器外管热处理工艺 取心器外管(图 13-21)用 40Mn2MoVNb 钢制造, 要求两端 200mm 范围内调质, 硬度为 260~300HBS。

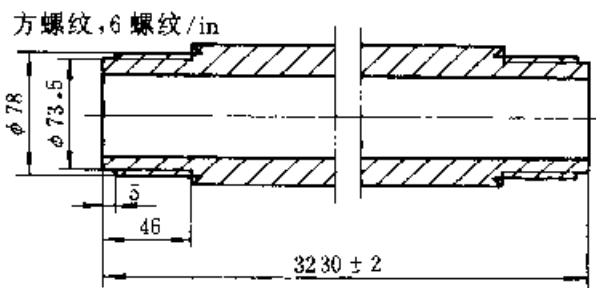


图 13-21 取心器外管

调质可采用感应加热, 在卧式淬火机床上用多圈感应器将取心器外管两端 200mm 范围内加热至 870℃, 立即进入图 13-18 所示的喷油器, 使取心器外管内外壁同时受到喷油的冷却, 硬度达 50HRC 以上, 然后放入电炉中回火。温度 670~690℃, 时间 4h, 回火后空冷。

高频感应淬火的电参数为: 屏压 11kV, 槽压 10kV, 屏流 8A, 栅流 2A。

操作要点: 采用间断加热(中间断电两次), 总加热时间约 70s, 工件转速为 80~150r/min, 加热温度控制在 860~900℃。

6. 齿瓦热处理工艺 齿瓦(图 13-22)用 T7 钢制造, 齿部硬度要求为 55~60HRC。

制造工艺过程: 锻造→退火→机加工→热处理。

退火可在箱式炉中进行。加热温度 760℃, 保温 3h; 随炉降温至 630℃, 保温 2h; 再随炉降温至 500℃ 出炉空冷。

淬火用盐炉加热, 温度 790℃。加热时间按 15s/mm(工件断面)计算。用碱水或盐水淬冷。

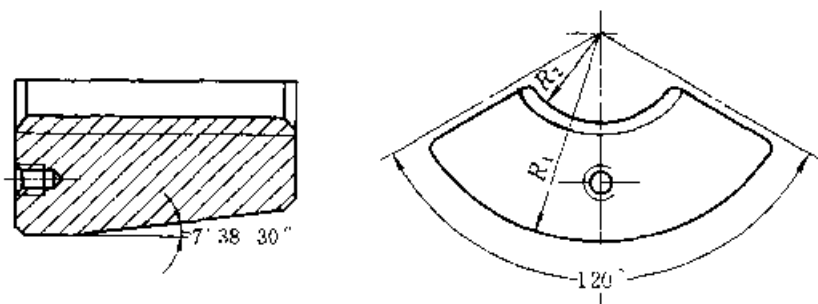


图 13 22 齿瓦

13.7.5 钻具热处理的质量检验

钻具热处理技术要求和质量检验见表 13-29。

13.7.6 钻具热处理常见缺陷及防止方法

钻具热处理常见缺陷及防止方法参见表 13-30。

表 13-29 钻具热处理技术要求和质量检验

工 序	项 目	技 术 要 求	质 量 检 验
高频淬火前	弯曲度	不超过 YB235 的规定	用千分表检验
	组织	索氏体	用金相显微镜检验
高频淬火	淬硬层深度	钻杆:0.8~1.2mm 岩心管:0.6~1.5mm 锁接头:2.0~2.5mm	用金相显微镜或放大镜检验 或按 GB5617
	硬度	不小于 50HRC	用洛氏硬度计检验
	组织	马氏体	用金相显微镜观察
	淬硬层深度	2~3mm	用金相显微镜或放大镜检验 或按 GB5617
锁接头 火焰淬火	硬度	不小于 50HRC	用洛氏硬度计抽检 10%,其余用锉刀检验
	显微组织	细针状马氏体≤1~5 级	用金相显微镜检验
	其他	淬火区不允许有严重烧伤、氧化、裂纹	
		丝扣畸变量 1/16	用螺纹塞规及高精度游标卡尺抽检

表 13-30 钻具热处理常见缺陷及防止方法

常 见 缺 陷	产 生 原 因	防 止 方 法
钻杆、岩心管淬硬层硬度不均匀	淬火时工件前进速度不平稳	改进淬火机床
岩心管淬火后在运输、使用中有的丝扣有裂纹	表面淬火后硬度过高或被淬透	控制淬火层深度,避免淬透
锁接头火焰表面淬火后出现裂纹	1) 所用材料非金属夹杂物多,晶粒粗大,组织不匀 2) 淬火温度过高,淬火剂应用不当,喷嘴与工件距离不合适	1) 对供应材料定期检验 2) 要防止加热温度过高,调整喷嘴与工件距离,合金钢可采用 0.2%~0.3%(质量分数)聚乙烯醇水溶液冷却

## 参考文献

- 1 刘金宝. 提高YT24型凿岩机活塞使用寿命的研究——薄壳淬火工艺的探讨. 凿岩机与风动工具, 1985(1):62~68
- 2 张宜平. YN30A型内燃机凿岩机转动套裂纹浅析. 凿岩机械与风动工具, 1985(1):43
- 3 滕华之等. 凿岩钎头用钢的研究和应用. 矿冶工程, 1986(1):44~47
- 4 刘清彪. 小钎杆的局部强韧化热处理. 凿岩机械与风动工具, 1984(4):37~76
- 5 肖上工等. 热处理工艺对35SiMnMo钢组织和性能的影响. 凿岩机械与风动工具, 1984(3):25~32
- 6 李相廷. 30SiMnMoV钢重型导轨式凿岩机钎尾的强韧化处理. 金属热处理, 1979(8):32~36
- 7 胡梦怡, 黄修. 热处理工艺对钎尾渗碳层马氏体显微裂纹的影响. 金属热处理, 1983(9):42
- 8 北京钢铁学院金相专业钎尾研究小组. 提高凿岩机钎尾使用寿命的试验. 金属热处理, 1977(6):35

# 第 14 章 农机具零件的热处理

内蒙古农机研究所 黄建洪

本章所指农机具零件是指除拖拉机、内燃机外,农牧业生产中耕作、种植、中耕、植保、畜禽饲养、农副产品收获、采集、加工机械中的基础件、易损件以及一些小农具。

## 14.1 农机具零件的服役条件、失效方式与性能要求

农机零件的共同特点就是工作条件恶劣,常在潮湿或带腐蚀(如化肥、粪尿、农药)的环境中工作,经常与土壤中砂石或农作物中心磨料发生摩擦磨损,以及振动与冲击。因而零件除需要足够

的强度、刚度和韧性外,还应具备很高的耐磨性和较好的耐蚀性。

### 14.1.1 农机零件的磨损失效

磨损是农机零件失效破坏的主要形式和材料消耗的第一位原因,占 80% 以上。所以农机零件的失效破坏都直接或间接与磨损有关。

在诸多磨损形式中,农机零件以磨料磨损为第一位,占总磨损量的 50% 以上,其次是粘着磨损。各种农机零件的失效分析见表 14-1。

表 14-1 各种农机零件的失效分析

序号	零件名称	失效原因与失效方式(按主次顺序排列)
1	犁铧	① 锋尖与刃口受土壤、砂石磨料磨损,② 受土壤中石块、树根冲撞,锋尖折断,刃口崩裂。③ 非淬火区强度不足,或磨薄后弯曲变形。④ 水田中腐蚀磨损,产生凹坑与龟裂
2	犁壁	① 受土壤砂石磨料磨损,② 受石块冲击开裂。③ 水田腐蚀磨损
3	圆盘耙片	① 受土壤砂石磨损,② 受石块、树根冲撞刃口开裂、弯曲。③ 水田腐蚀磨损
4	锄铲	同犁铧
5	旋耕刀	① 刃部受土壤砂石磨损。② 柄部与刃部受土块、石块、树根冲击,弯曲或折断
6	拖拉机履带板	① 销轴、销孔和跑道受泥砂磨损。② 磨损裂纹扩展,导致断裂。③ 水田腐蚀磨损,龟裂
7	水田机耕船: 前底板	① 由于柴油机工作转速下的微振频率,引起船体周期振动(由船前向船后逐渐减弱),使前底板受到峰值冲击力,在局部高应力作用下,受泥浆、砂粒冲蚀磨损与疲劳磨损,其磨损较后底板和两侧钢板都严重。② 受水田腐蚀磨损
	后底板	① 受泥砂纯磨料磨损和冲蚀磨损。② 水田腐蚀磨损
	两侧船体钢板	① 受泥砂冲刷,为冲蚀磨损和磨料磨损(切削与犁沟)。② 水田腐蚀磨损
8	水泵:壳体、叶轮、衬套	① 受水中所含少量砂粒的冲蚀磨料磨损(微切削与变形)。② 水流与零件相对运动,因紊流产生气泡,气泡破裂瞬间产生高压,冲击零件表面,反复冲击而疲劳破坏,谓之气蚀磨损或空泡腐蚀,表面出现蜂窝状破坏
9	收割机刀片	① 受作物中植物硅酸体和沾附砂土的磨料磨损,刃口变钝。② 受砂石、草根等杂物撞击而崩刃。③ 上下刀片间有时发生粘着磨损。④ 割草刀片还受草浆腐蚀磨损
10	秸秆还田机刀片	同收割机刀片中①、②,如由动、定刀片组成切割副,则也可能有粘着磨损
11	剪毛机刀片	① 受夹杂毛中砂土、杂质磨料磨损,刃面被划伤,刃口因接触疲劳磨损变钝或冲击崩刃。② 上、下刀片间粘着磨损,甚至发热退火。③ 清洗时受碱水腐蚀

(续)

序号	零件名称	失效原因与失效方式 (按主次顺序排列)
12	脱粒机钉齿	受稻壳和茎叶中植物硅酸体与表面沾附泥沙的强烈磨损
13	粉碎机锤片	①受饲料颗粒及其中杂质高速运动时冲蚀磨损。②少数锤片脆性折断
14	粉碎机筛片	①受飞速运动饲料及其中杂质颗粒冲蚀磨损、击穿、开裂。②被碎裂锤片击毁
15	磨面机动、定锥磨	白口铁磨齿受麦粒与砂粒的碾压、划伤。表面珠光体先磨损、压陷,凸出的莱氏体碳化物碎落
16	碾米机筛片	①受米粒挤压磨料磨损变薄、破裂。②在动态复杂应力作用下,强度不足,变形开裂
17	颗粒饲料机环模与压辊	①受饲料及其中杂质强烈磨损,环模的模孔变大,孔壁变薄、磨穿;压辊外径变小,间隙无法调整而报废;②环模、压辊强度不足而开裂。③受高温蒸汽腐蚀磨损
18	棉花机锯片	①受棉纤维、棉壳中硅酸体和夹杂砂粒的磨损,齿尖和刃口变秃,效率降低失效。②将棉绒和纤维从棉籽上剥离时受力,齿尖变弯,产生纵向、横向裂纹,最终疲劳断裂
19	榨油机:榨螺轴、榨条、出饼口	①在高温高压下,受已被高度压实的油渣及其中砂粒的碾压、微切削与疲劳磨损。②高压油液产生微区冲蚀磨损。③油液渗入裂纹,形成油楔,促使裂纹扩展。④酸性油液与水分在高温下的腐蚀磨损
20	畜禽饲养机械的刮粪板、清粪搅龙	①受带氨气、 $H_2S$ 的潮湿空气和粪尿内腐蚀。②在腐蚀介质中受砂土、杂质的磨料磨损与腐蚀磨损

造成农机零件磨损的磨料如下:

1. 土壤中的砂石 砂石都是各种母岩风化的产物,它不但是引发耕作机具磨损的元凶,而且随风飘散,沾附到农作物的茎叶籽实及动物皮毛上,也是造成收获加工机具磨损的重要原因。

砂粒对零件磨损能力强弱与其组分、硬度、粒度、粒形以及固定或松散状态有关。砂粒、石砾都是不同类型的氧化硅,如石英、燧石和黑硅石等。它们的硬度在 820~1250HV 之间,以石英最硬。我们对内蒙古呼伦贝尔地区沾附在牛羊毛中的砂粒作岩相分析,结果见表 14-2。莫氏硬度与 HV 换算见图 14-1。从中可知,砂粒中硬度高于淬火工具钢( $\leq 860HV$ )的石英、长石等颗粒竟超过 90% (体积分数)。

表 14-2 呼伦贝尔地区牛羊毛中砂粒的组成

砂质	体积分比 (%)	莫氏硬度	换算 HV
石英	59.22	7 (级)	1100
长石	31.55	6~6.5	700~900
云母	4.02	2~3	<100
磁铁矿	2.83	5.5~6.5	520~900
褐铁矿	2.08	5~5.5	400~520
角闪石	0.30	5.5~6	520~700

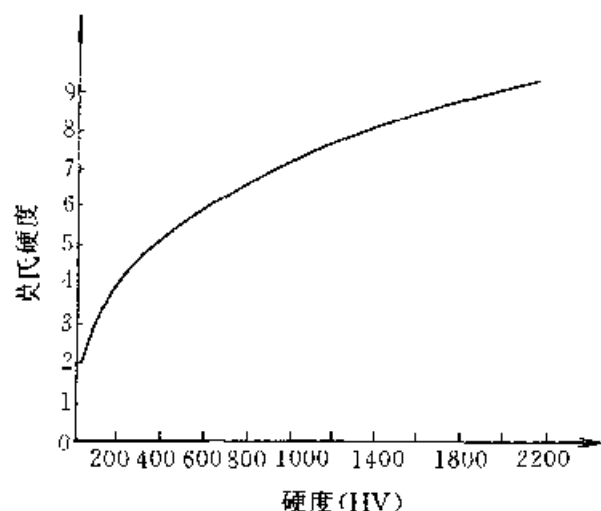


图 14-1 莫氏硬度与维氏硬度换算曲线

试验表明:材料的磨损量随磨粒直径的增大而急剧升高,直到约  $80\sim 150\mu m$  时才趋于平缓增加,并接近最大值,其磨损量随载荷变化而异,见图 14-2。这与农机零件在粗砂粒地区寿命远低于粘土地区的实际相符。在粗细兼有的土壤中,粒度很细的粘土粒,不但自身对农具磨损较轻,而且会充填在粗砂粒之间,堵塞了砂粒的棱角,减轻了磨损。

耕作机件在松散土壤中运动时,砂粒围绕犁铧、锄铲刀刃滚动,使尖锐的刃口逐渐磨钝到近似



抛物线形。但在坚实土壤中的石块( $\geq 10\text{mm}$ )则阻止砂粒的滚动。土壤通过石块对农具加载,使砂粒的尖角刺入金属表面,运动时产生微切削的

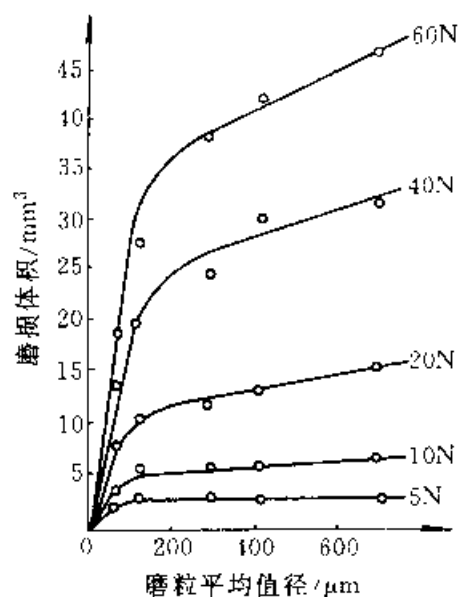


图 14-2 不同载荷下磨粒尺寸和磨损量的关系

“刨槽”,或推动金属作塑性流动,在磨粒运动轨迹的两侧及其前方隆起,形成“犁沟”。刨槽与犁沟即“划痕”。石块还会撞击刀刃造成崩刃,甚至折断,十分有害。所以在生荒地或天然草场上耕作,机具损坏很严重。

2. 植物中的硅酸体 植物茎叶籽实除表面沾砂外,还通过根系从土壤中吸收硅。硅酸体是构成植物细胞与器官的重要材料。植物硅酸体光学上各向同性,X 衍射表明它是非晶质。它在禾本科粮食、牧草中含量最高,有的可达 10%~20% (质量分数)。植物硅酸体主要是  $\text{SiO}_2$ , 还含少量  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  甚至  $\text{TiO}_2$ , 含水约 10% (质量分数); 硬度为莫氏 5.5~5.6 级 (540~570HV), 与玻璃相似; 颗粒多为 20~200 $\mu\text{m}$ , 带有尖棱,是收获加工机具的重要磨料。粮食籽粒外皮中含硅酸体很高,尤以稻壳为最。所以粉碎机锤片在加工洗净后的粮食时,粉碎水稻锤片的磨损量是大麦的几十倍,玉米的上百倍。图 14-3 是燕麦表皮细胞中硅酸体的形貌与尺寸 (根据扫描电镜照片绘图)。

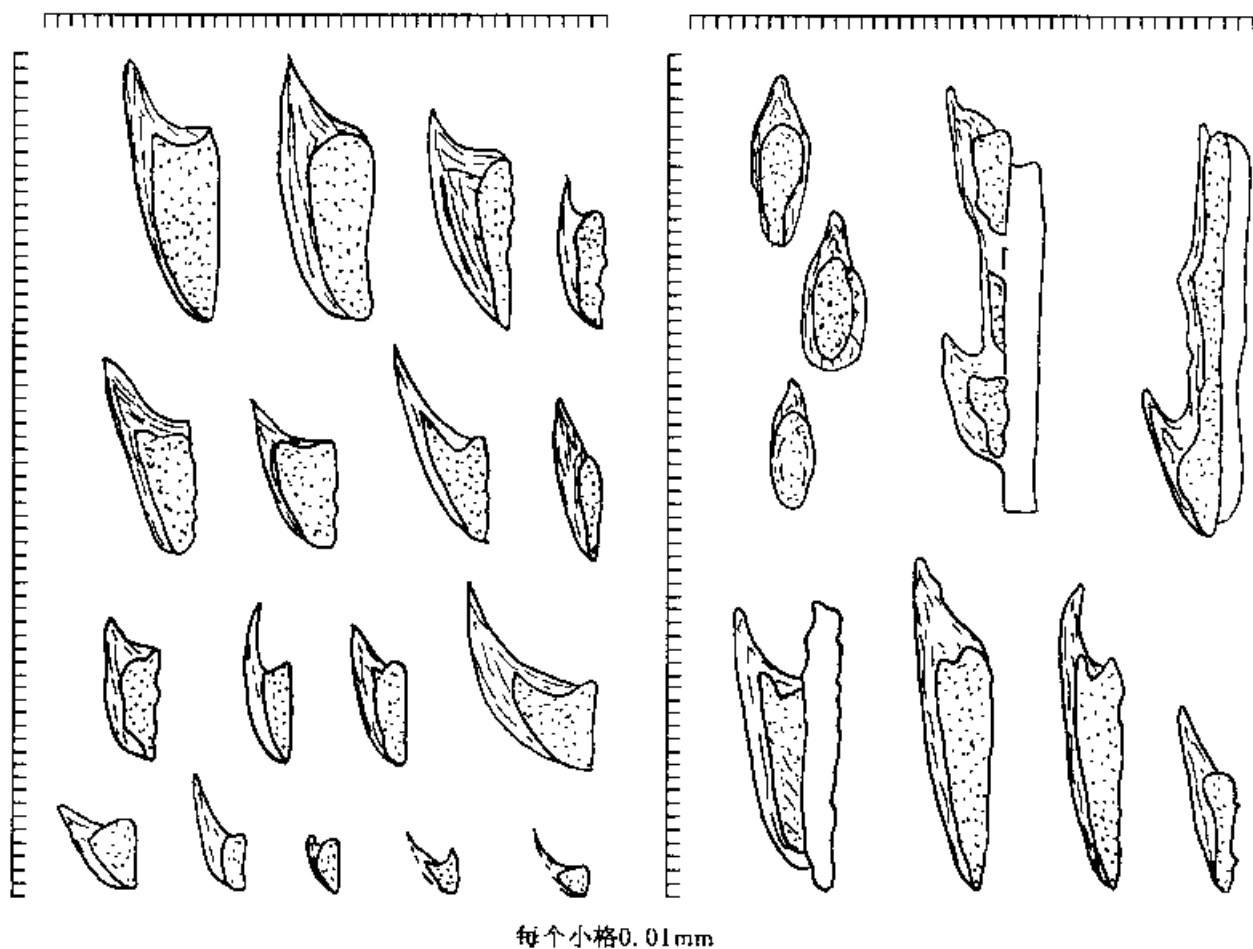


图 14-3 燕麦表皮细胞中尖形植物硅酸体 (每小格为 10 $\mu\text{m}$ )

## 14.1.2 农机耐磨零件的力学性能要求

### 14.1.2.1 硬度

1. 材料硬度与磨粒硬度之比对抗磨料磨损性能的影响 磨料磨损研究表明：当磨粒硬度  $H_a$  显著高于被磨材料硬度  $H_m$  时，为硬磨料磨损，磨损达最剧烈程度。相反，当  $H_a$  明显低于  $H_m$  时，属软磨料磨损。这时纯磨料磨损（即划伤）极轻微以致消失，转为疲劳磨损，零件寿命大大提高。见图 14-4。

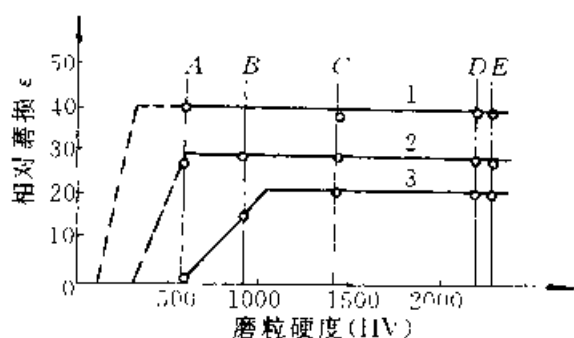


图 14-4 三种硬度 T8 钢的相对磨损与磨料硬度间的关系

$H_m$ : 1=186, 2=108, 3=79

$H_a$ : A=389, B=908, C=1425

D=2198, E=2298

试验发现，各种牌号的钢都在 550~600HV 时磨损明显减轻。石英硬度约 1000~1100HV。也就是说，在非固定磨料磨损情况下，当  $H_m/H_a \geq 0.5 \sim 0.6$  时，钢的耐磨性就有较大提高，如图 14-5 所示。

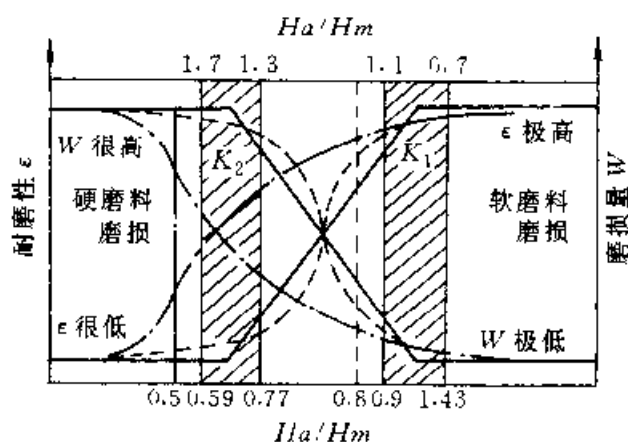


图 14-5 材料硬度和磨粒硬度之比与耐磨性的关系示意图

实线根据 NPMOB 实验

虚线根据 Richardson 实验

2. 农机耐磨料磨损零件的硬度设计 据周平安等实测，砂粒的平均硬度  $H_a \approx 970HV$ 。当  $H_m/H_a \geq 0.5 \sim 0.6$  时材料耐磨性就有较大提高；达到 0.80~0.85 时就有很大提高。对于抗砂粒磨损来说，就是要有 485~582HV (48.5~54HRC) 才有较高耐磨性，而达到 776~825HV (62.5~64HRC) 就有很高的耐磨性了。因此，18HRC 应作为许多耕作机具零件的最低硬度要求。而希望产生自磨锐效果（参见 11.1.5.1）的零件则应降低到 46HRC 或更低。在 48~54HRC 以上，钢耐砂粒磨损性与硬度成正比，达到 873HV (65.5HRC) 后继续提高硬度，不但无益，反受其害。

中国农机院针对犁铧的室内试验表明：在一定范围内，犁铧的相对耐磨性随宏观硬度和钢中含碳量升高而提高；只要回火充分，在稍低于 200℃ 回火，硬度最高耐磨性最高，见图 14-6 和图 14-7。

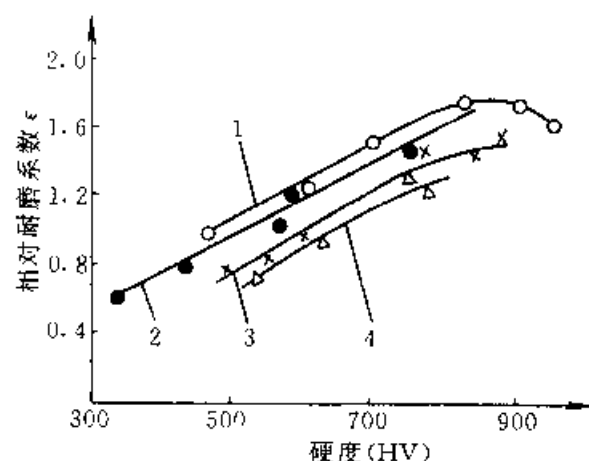


图 14-6 相对耐磨性与硬度的关系

1—T10 钢 2—65Mn 钢 3—65 钢

4—ZG340-640 钢

3. 硬度对抗粘着磨损性能的影响 粘着磨损常发生在润滑不良的摩擦副（轴颈与轴套、动刀片与定刀片）之间。微观上，两摩擦面是微凸体间的点接触，实际接触面积仅为表观面积的百分之一至千分之一。所以接触点上压强很高。当压强超过  $\sigma_s$  时，将发生塑性变形，接触点贴得很紧。滑动时产生剪切，使起润滑作用的金属氧化膜破坏，新裸露的金属表面直接接触，摩擦面温度升高，在分子力作用下，接触点上金属产生焊合（冷焊），滑动时又被撕开、剪断。这样反复粘着—滑动（撕开）一再粘着—撕开……，产生金属的刺

离和转移,发生粘着磨损的金属表面擦伤、撕裂或咬死。

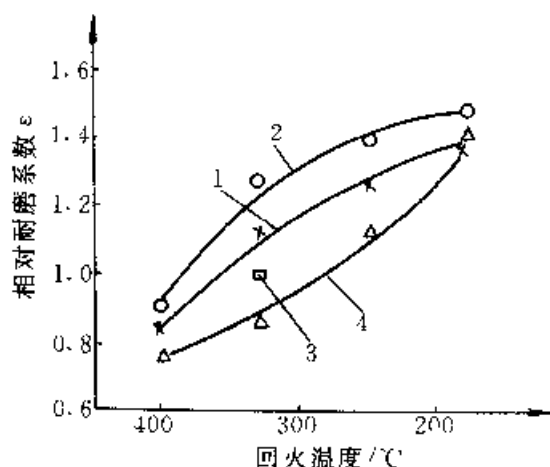


图 14-7 相对耐磨性与回火温度的关系

1 65SiMnRE 钢 2 65SiMn 钢  
3 65Mn 钢 4 65 钢

材料硬度高则  $\sigma_s$  和剪断强度  $\tau$  也高,有利于减轻粘着磨损。粘着磨损时硬度越高,耐磨性越好,二者呈线性关系。

淬火钢表面硬度达到 700HV (59.5HRC) 时就能抑制严重粘着的产生。

#### 4. 硬度对冲击磨损和疲劳磨损抗力的影响

各种耕作与收获刀片都以一定速度切入土壤或农作物,其刃口周期性地与土壤或作物及其中砂石等杂质发生接触、冲撞。能量较大,产生冲击磨料磨损,能量较小将产生接触疲劳磨损。

压入硬度 (HBS、HRC、HV) 是反映材料塑变抗力的指标,一定程度上也反映材料切断抗力的大小。所以在一定范围内,抗冲击磨损与接触疲劳磨损性能随硬度的升高而提高。

表 14-3 几种受冲击和疲劳磨损零件的最佳硬度值

零件名称	材 料	服役条件与受力情况	最佳硬度 (HRC)
滚动轴承	GCr15	受接触疲劳磨损	62
凿岩机活塞	T10V	受小能量多冲和接触疲劳磨损	59~61
石油钻机牙轮钻头	20CrMnMo 渗碳	受较高的小能量多冲和接触疲劳磨损	58~60
熟耕地犁铧	65Mn	受砂粒磨料磨损,破碎土垡时有冲击和振动,能量不大	61
生荒地犁铧	65Mn	受砂粒磨料磨损,并常遇石子的冲撞,能量较大	55~58
割草机刀片	T9	受草中植物硅酸体和沾附砂粒的磨损,刃口常遇小石子冲击	56~57 下贝氏体

Сорокин П. М. 对淬回火 T7 钢和合金钢试样,以不同能量冲击到硅砂上,作磨料磨损试验。结果表明:当冲击能量很低时,钢的耐磨性随硬度提高而上升;当冲击能量在一定范围内时,耐磨性几乎与硬度无关;只有在足以使硅砂破碎的大能量冲击下,则 600HV 或 55HRC 时耐磨性最高,见图 14-8、图 14-9。

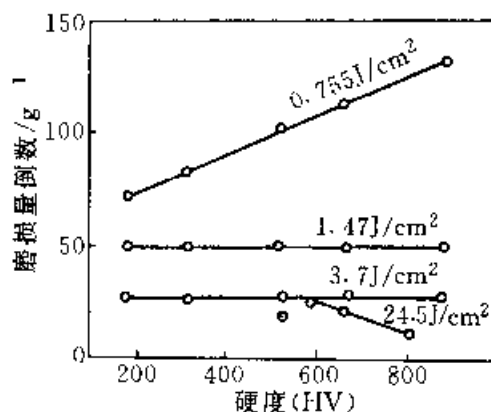


图 14-8 不同能量冲击下 T7 钢耐磨性与硬度的关系

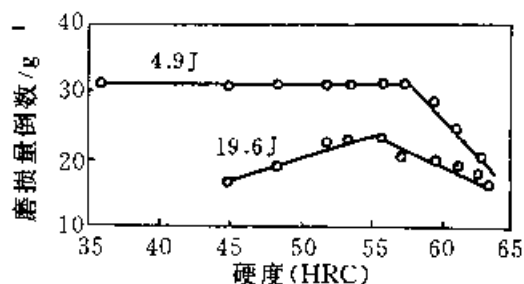


图 14-9 不同能量冲击下合金钢耐磨性与硬度的关系

我国科技工作者经长期研究与实践,找出一些承受疲劳磨损和小能量冲击磨损零件的最佳硬度值,列于表 14-3。

(续)

零件名称	材 料	服役条件与受力情况	最佳硬度 (HRC)
剪毛机刀片	T12J	受夹杂羊毛中砂粒的磨损, 刀口受接触疲劳或小能量多冲; 刃面被砂粒划伤; 上下刀片间有粘着磨损	剪洁净细毛 $\gamma$ 64 剪多砂粗毛 $\gamma$ 61~32
麦类秸秆还田机 甩刀	55Mn	刀刃受植物秸秆和泥砂冲击磨料磨损, 刀片还受较大冲击, 易断裂	56~57 下贝氏体
水稻秸秆还田机 刀片	80Cr1.5	刀刃切割沾附泥砂、高韧性稻秸, 受磨料磨损与接触疲劳, 要求锋利、耐磨、耐蚀	62~62.5
砂上地旋耕刀	60Si2Mn	刀刃和刀尖受砂粒冲击磨损, 刀柄受较大冲击, 易弯曲变形、折断	刀刃 57~58, 刀柄 47~50

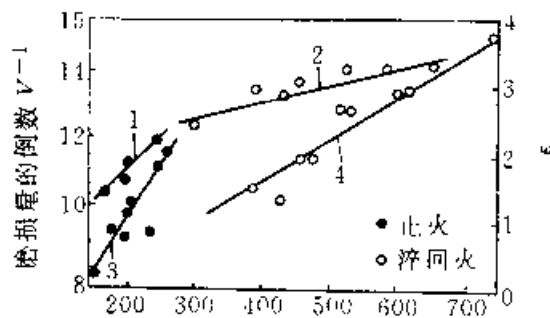
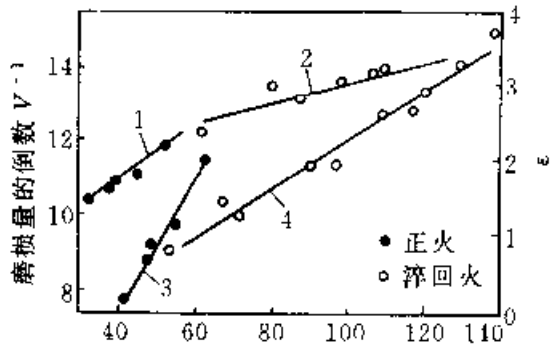
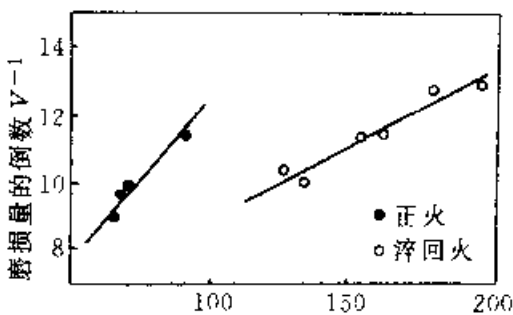

 a) 1, 2  $\epsilon$  与 HV  
3, 4  $V^{-1}$  与 HV  
硬度 (HV)

 b) 1, 2  $\epsilon$  与  $t_k$ ; 3, 4  $V^{-1}$  与  $t_k$ 

 c)  $V^{-1}$  与  $\sigma_b$ 

图 14-10 钢的力学性能与耐磨料磨损性的关系

a) 耐磨性与 HV 的关系 b) 耐磨性与  $t_k$  的关系 c) 耐磨性与  $\sigma_b$  的关系  
 $V^{-1} (\times 10^3 \text{ mm}^{-3})$   
 $t_k, \sigma_b$  均  $(9.8 \times 10^3 \text{ MPa})$

#### 14.1.2.2 其他力学性能对耐磨料磨损性的影响

农机零件工作时会遇到大量磨料, 既有刨槽、犁沟, 也有从表面滚过产生碾压或造成接触疲劳 (弹性的应力疲劳和塑性的应变疲劳), 还有冲击和冲蚀, 撕裂与发热等等。因而, 硬度并非是影响耐磨料磨损性能的唯一因素。

综合研究成果可以得出:

1. 强度 在金相组织大致相同时, 材料耐磨料磨损性 (用单位摩擦行程体积磨损量的倒数  $V^{-1}$  和相对耐磨性  $\epsilon$  表示) 与硬度 HV30、真实切断抗力  $t_k$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、屈服强度  $\sigma_s$ 、剪切屈服强度  $\tau$  等都有近似的直线关系。但随力学性能的提高, 正火钢 (珠光体) 比淬回火钢 (马氏体) 耐磨料磨损性提高得更快, 见图 14-10。

2. 塑性与韧性 Сорокин Г. М. 等研究了塑性、韧性对耐磨性的影响, 见图 14-11。由图可见, 随着塑性韧性的提高, 耐磨性增高, 高硬度时更加显著。

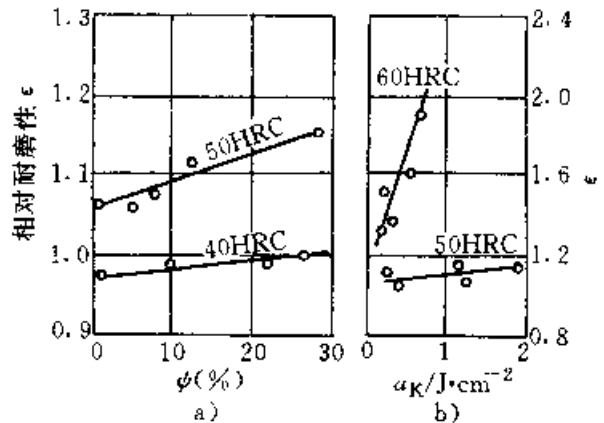


图 14-11 钢在不同硬度时塑性、韧性对耐磨性的关系  
 a)  $\epsilon$ — $\phi$  b)  $\epsilon$ — $\alpha_K$

3. 冷脆性 高寒地区冬季作业的农机具, 还应注意钢材的冷脆性会加速磨损与断裂问题。这类零件采用低碳马氏体材料效果较好, 已成功用于耙片、犁壁、铁锹等零件。

### 14.1.3 农机耐磨零件的组织要求

#### 14.1.3.1 钢铁组织对耐磨料磨损性的影响

1. 一般规律 微观组织对耐磨料磨损性能的影响, 其基本规律可分为两类:

(1) 当磨粒压入深度大于微观组织的尺寸时, 微观组织主要发挥整体作用而影响宏观性能;

(2) 当磨粒压入深度等于或小于微观组织的尺寸时, 微观组织中各单独相及单个组元的作用就显得格外突出。

2. 不同类型组织的影响 磨料磨损可由多种磨损机理造成。各种组织对不同机理产生的磨损, 其抗抵能力也不同。与农机服役条件较接近的低接触应力(滑动磨料磨损条件下), 钢中不同类型组织在不同硬度水平时的相对耐磨性, 见图 14-12。从该图并结合其他研究可看出:

(1) 在所有组织中铁素体(F)的耐磨性最低, 见图 14-12 以纯铁耐磨性为 1。

(2) 各种组织的耐磨性均随硬度而提高, 也随其含碳量的增高而提高。

(3) 在相同硬度时, 等温淬火贝氏体(B)的耐磨性明显高于马氏体(M)。这可能和 M 内存在淬火应力与微裂纹有关。因此板条 M 也比同硬度的片状 M 耐磨。片状 M 只有在硬度高得多的情况下才能达到与 A、B 相同的耐磨性。

(4) A 尽管宏观硬度不高, 但有很高的韧性, 能大量消耗磨粒犁削时的能量, 所以有较高耐磨性。在高应力磨料磨损时, A 又有很高的可加工硬化能力, 甚至诱发 A→M 转变, 使其耐磨性大大

提高。

(5) 预先的冷加工硬化虽提高了硬度, 但已造成塑性损伤, 故不能提高耐磨性。但磨损过程中, 由于磨粒犁削造成的微区加工硬化则能有效提高材料耐磨性。

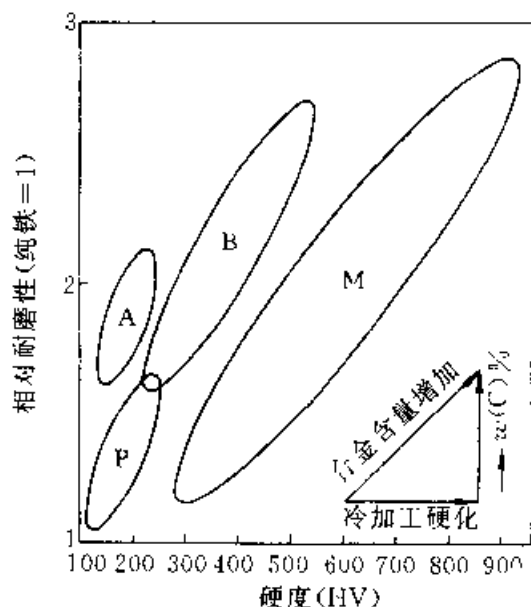


图 14-12 钢中不同类型组织在不同硬度水平时的相对耐磨性

P: 珠光体 A: 奥氏体 B: 贝氏体(等温淬火) M: 马氏体

(6) 固溶于各种组织中形成置换固溶体的合金元素, 能起一定强化作用, 也提高耐磨性, 但其作用比碳氮等间隙元素较弱。

3. 热处理钢中复相组织的耐磨性 总的说来, 多组元复合组织比单一组元和单相组织耐磨。

Серник П. М. 和 Кантор М. М. 对经过 10 种不同工艺热处理的 40 种钢, 在未被固定的磨粒中进行磨损试验, 并与经水韧处理的 Mn13 高锰钢对比。现摘录一些类似我国常用钢的相对耐磨性  $\epsilon$  列于表 14-4 (以经水韧淬火的 Mn13 钢为 1)。

表 14-4 不同热处理钢的松散磨料磨损相对耐磨性  $\epsilon$

材料	热 处 理 方 案										等 温 处 理							
	一		二		三		四		五		六		七		八		九	
	HBS	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$
T10	—	—	614	1.78	534	1.61	429 HBS	1.43	375	1.28	415 HBS	1.65	415	1.63	388	1.60	—	—
T12	—	—	614	1.95	550	1.75	429 HBS	1.60	388	1.19	415 HBS	2.31	415	2.31	401	2.30	388	2.29

(续)

材料	热 处 理 方 案										等 温 处 理							
	一		二		三		四		五		六		七		八		九	
	HBS	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBW	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$	HBS	$\epsilon$
65	182	0.85	578	1.66	577	1.32	450 HBS	1.28	360	1.04							—	—
55Mn1.5	187	0.99	778	1.39	501	1.27	477	1.21	401	1.12	555	1.81	429	1.72	441	1.66	—	—
55	170	0.63	601	1.55	477	1.32	363 HBS	1.04	321	0.89	—					—	—	—
55Cr1.5	187	0.73	601	2.18	534	1.99	511	1.89	363	1.70			514 HBW	2.53	477 HBW	2.37	429	2.15
75	207	1.12	601	1.76	578	1.74	477	1.52	311	1.08	—				—	—	—	—
75Cr1.5	207	1.15	601	2.42	555	2.23	415 HBS	1.78	388	1.62	578	3.12	514 HBW	2.82	477 HBW	2.65	461 HBW	2.60
60CrMnSi	269	0.81	578	2.70	514	2.54	505	2.45	421	2.31	505	2.88	429	2.66	388	2.51	352	2.45
CrMnSi	269	1.03	593	3.91	578	3.30	556	3.78	441	3.03	555	4.50	493 HBW	4.22	441	4.01	388	3.82

\* 为苏联工具钢, 类似我国轴承钢 GCr15SiMn, 因耐磨性优异, 摘录于此,

表中各热处理方案:

一、为常规退火, 加热至  $A_{c1}$  或  $A_{c2}$  以上  $50^{\circ}\text{C}$ , 保温 30min, 炉冷。

二~五为淬+回火, 加热至  $A_{c1}$  或  $A_{c2}$  以上  $50^{\circ}\text{C}$  淬火, 分别于  $170^{\circ}\text{C}$ 、 $300^{\circ}\text{C}$ 、 $400^{\circ}\text{C}$  和  $500^{\circ}\text{C}$  回火。

六~九为等温淬火, 加热至  $A_{c2}$  或  $A_{c1}$  以上  $50^{\circ}\text{C}$  分别淬入  $230\sim 240^{\circ}\text{C}$ 、 $270\sim 280^{\circ}\text{C}$ 、 $310\sim 320^{\circ}\text{C}$ 、 $380\sim 400^{\circ}\text{C}$  盐浴中。

#### 14.1.3.2 冶金因素对抗粘着磨损性能的影响

1. 一般规律 Roach 等将 38 种金属与钢配成摩擦副时的抗擦伤性排列于表 14-5。

表 14-5 钢与各种金属配对时的抗擦伤性

抗擦伤性	标 准	配对金属
很差	载荷达 1350N 便咬死	铍、硅、钨、钽、铬、铁、 钨、镍、铝、铌、钼、铈、 钼、铈、钽、钼、金、 钽、铈
差	在 1350N 下滑动 不超过 1min	铝、镁、锌、铜、钨
尚可	在 2250N 下滑动 $\leq 1\text{min}$	碳、铜、钨、钼、铈
好	在 2250N 下滑动 1min 不咬死	锗、银、铜、锡、铈、铅、 铈、铈

注: 试验用  $1.56\text{cm}$  的方形试样在转速为  $23.3\text{m/s}$  的圆盘上滑动。

摩擦副配对材料互溶性大, 粘着倾向大。

2. 钢中各种组织的影响

(1) 铁素体 (F) 很软, 无论钢、灰铸铁或球墨铸铁中, F 含量越高, 耐磨性越差。

(2) 珠光体, 片状 P 比粒状耐磨; P 片或 K 粒间距越小越耐磨; 硬度相近时, 正火钢 (片状 P) 比调质钢 (粒状组织) 耐磨。

(3) 马氏体, 与磨料磨损不同, 片状 M 与板条 M 耐粘着性能差别不大。经低温回火 M 即使硬度略低也比未回火 M 耐磨。

(4) 下贝氏体, 许多试验和实践均证明: 等温淬火的  $B_F$ , 即使硬度较低, 但因韧性和形变硬化能力高, 其耐磨性仍高于 M。

(5) 残留奥氏体, 因各家试验和服役条件不同, 结论相差较大。有适量而不明显降低宏观硬度的残留奥氏体, 能延缓裂纹扩展, 减轻 K 剥落, 应该是有利的。但残留奥氏体含量太高, 硬度降低, 塑性变形加大, 则易发生粘着。然而, 塑性变形大

又使接触面积增大,从而降低接触应力,减轻磨损。同时,摩擦过程中如能促使不稳定的残留奥氏体向M转变,又能降低磨损。但残留奥氏体大量转变,则未回火的M应力高、脆性大,又对耐磨性不利。对此,只有具体情况具体分析,通过实践加以考核。

(6) 碳化物, K 的类型、性能和含量对耐磨性都有明显影响。K 的硬度从 900~3000HV, 大体上依  $M_3C \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_7C_3 \rightarrow MC \rightarrow MC$  顺序由低到高。一般说来, K 硬度高, 含量多, 则耐磨性高。

试验表明, 钢铁中 K 粗粒比细粒耐磨性高。

#### 14.1.4 农机具零件的特殊性能要求

##### 14.1.4.1 自磨锐性能

无论是破土的耕作机件还是切割农作物的刀片都应有锋利的刃口。犁铧磨钝, 刃口从 1mm 增加至 5mm 厚, 耕深降低 38%, 牵引阻力增加 53%, 拖拉机油耗提高 25%, 机组效率下降 48%。青贮饲料切碎机刀片, 刃口厚达到 0.45mm 后, 每增加 0.1mm, 能耗即提高 13%。茎秆粉碎刀片, 刃口磨钝后, 使拖拉机速度由三档降到二档, 不但粉碎作业质量下降, 工作效率降低 20%, 油耗反而上升 20%。刀片如采用特殊设计或工艺, 使之作业时由于土壤或农作物对刀刃两个刃面产生不同的磨损量, 让厚度适当的刃口突出于前沿, 较长时间保持较锋利的切割性能, 这种效果称自磨锐现象, 这种刀片称自磨刃刀片。通常采用的措施有:

1. 进行特殊几何形状设计 例如王频等在 1. 开刃凿形犁铧的基础上, 对 65Mn 犁铧适当增大刃口附近淬火带内的铧面角, 减薄刃口厚度, 将硬度降至 52HRC 以下。由于设计改变, 造成刃口尖端和底部磨损量保持同步。尽管犁铧的磨损量比 60HRC 时有所加大, 但在自磨锐作用下, 容易得到较小的刃口圆弧和较平直的背棱, 始终保持良好的人土性能, 降低了能耗。

又如收割机刀片, 在刀刃斜面上开出适当齿纹, 使被切断的茎秆顺着齿纹划过, 刃口和齿纹都受茎秆的摩擦磨损, 齿纹加深, 保持锯齿状刃口的锋利, 得到自磨锐效果。

2. 采用双金属复合材料 我国传统的菜刀、剪刀和镰刀、锄片, 常在低碳钢刀体上用中高碳钢作刃口夹钢或贴钢。淬火后刃口较刃面硬度高, 工

作中刀体磨损快, 露出高硬度刃口。犁铧也用过在刃口上复合耐磨钢或贝氏体球铁为母体, 刃口铸高铬铸铁的措施来实现自磨刃。

3. 特殊处理 采用表面处理、化学热处理、堆焊、喷涂等表面强化工艺, 获得表黑硬度不同的刃部, 例如粉碎机锤片用中低碳钢渗碳、碳氮共渗或渗硼, 处理后两表层硬度高, 夹在中间的心部硬度低, 韧性好, 可防锤片意外击断。而且锤击时受粮食或饲料颗粒的冲蚀磨损, 自然形成中间凹、两面突起的刃口, 效率高, 寿命长。

用表面强化来获得自磨刃, 需经周密设计:

(1) 刃口耐磨层与基体母材的磨损率要保持适当比例。前苏联在研究复合钢板犁铧时, 得出切削层与承力层的磨损率为 1:(4~5) 或耐磨性为 (4~5):1 最好。中国农机院认为: 耕作刀片刃口堆焊层应 60HRC 以上, 母材为 55~60HRC。因堆焊合金富含高耐磨碳化物, 二者实际耐磨性之比在 (5~10):1 之间为好; 而切割茎秆的刀片, 堆焊层应 60HRC 以上, 母材淬火到 45~50HRC。二者耐磨性之比以 (10~15):1 为佳。美国某公司产堆焊青贮饲料机刀片, 堆焊层 60~65HRC, 母材 45HRC。堆焊刀片母材需经淬火, 否则基体受力变形, 产生侧向流动, 则堆焊层与母体开裂分离。

(2) 强化层厚度要适当。强化层厚度就是将来形成刃口的厚度, 太厚不锋利, 过薄易折断。实践表明, 割草机刀片刃口厚 0.1mm 左右为好; 切割玉米秆刀片刃口厚 0.3~0.6mm 锋利; 犁铧、旋耕机刀片则加厚到 1~1.5mm, 既满足耕作要求, 寿命也较长。

(3) 强化部位的选择, 与一般耐磨零件将耐磨层置于磨损表面不同, 自磨锐刀片有时将强化层放在刀片背面。

以犁铧为例, 如将强化层放在背面, 土壤对犁铧正面磨损较重, 露出背面强化层刃口, 此为第一类自磨刃 (图 14-13a)。这种犁入土性好, 适于中等湿度土壤, 在高坚实或高湿度土壤中则不能保持自磨锐效果。如将强化层放在正面, 耕作时背面母材受沟底土壤磨损较多, 正面强化层向前探出形成刃口, 此为第二类自磨刃 (图 14-13b)。这种犁铧适于在湿度大于 10% 的沙土或砂壤土耕作, 可保持背棱与犁过的沟底基本平行。但在其他土壤中因背面磨损过快, 背棱变宽形成负角, 受

地面反作用力  $F$  影响, 刃尖上翘, 使犁的入土性能变坏, 耕深越来越浅。当背棱宽度  $\geq 10.5\text{mm}$  时, 就失去对耕作功能。

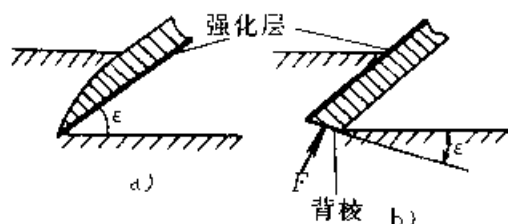


图 14-13 两类自磨刃犁铧剖面图

a) 第一类自磨刃 b) 第二类自磨刃

李凌云等研究生产出第三类自磨刃犁铧。该犁铧在铧尖前 70mm 背面堆焊耐磨合金, 其后段则在正面堆焊。耕作时铧尖背面耐磨合金伸出形成刃口, 而后段则由正面耐磨层承受砂土磨损, 提高了耐磨性。即使出现一个负  $\epsilon$  角的背棱, 入土性能也不变坏, 因为前面锋利的铧尖已将土块切开, 入土深度已定。这种犁铧兼一、二类自磨刃之长, 最适于高坚实土壤中耕作。

自磨锐的实质是通过刃的几何形状设计或表面强化技术, 在刀具作业时使磨粒磨损引向刃的设定部位, 使刃口磨钝的同时, 让刃面指定部位也按比例磨损, 达到自行磨利的效果。应该指出, 自磨锐是正确运用磨料磨损规律, 趋利避害, 科学利用磨粒磨损来实现的。只有磨料才能使刀具磨利。若盲目将两个刀片组成的切割副互相对磨, 则只有粘着磨损, 决不会出现自磨锐的奇迹。犁铧的三类自磨锐原理同样适用于其他耕作机件和农机刀片。只要对刀具服役条件认真分析, 有针对性地对几何形状、强化层部位、厚度和强化层与基体的耐磨性之比进行设计, 就不难实现自磨锐效果。强化层不一定是耐磨合金堆焊, 表面淬火与化学热处理手段同样大有用武之地。

#### 14.1.4.2 刀片的锋利性与利磨性

锋利是指刀刃受到阻力最小便能切入作物并完成切割任务。这要求刀刃有足够的强度和硬度外, 几何形状方面应做到有适当的刃面夹角; 刃面相交的刃口曲率半径小、厚度薄。刀具的耐磨性, 就是作业时刀刃抵抗作物磨损而保持其几何形状(锋利性)的能力。利磨性则是当刀刃磨钝后, 能够在刃磨时迅速恢复锋利的能力。

锋利刀片主要用于收获、采集和加工机具。刀刃越薄、刃面夹角越小, 刀片越锋利。但刃面角太

小易折断, 一般以  $21^\circ$  左右既锋利又持久。除剪毛机刀片外, 常用刀片均接近  $21^\circ$ 。刃口曲率半径  $r$  则根据切割对象而定, 羊毛直径仅十几个  $\mu\text{m}$ , 剪毛机刀片  $r$  约  $10\mu\text{m}$ ; 草茎粗  $1\sim 2\text{mm}$ , 割草刀片  $r$  取  $0.05\text{mm}$ ; 而犁铧刃口  $r=0.5\text{mm}$  就很锋利了。

许多刀片不但要求锋利耐磨, 而且用钝后现场磨刃时要求很快磨利。像剪毛机刀片, 一般经过十几秒到几十秒刃磨, 就应恢复锋利。刀刃的变钝和磨利都是磨料磨损的结果, 因而耐磨性和利磨性是一对很难处理的矛盾。

实践证明: 碳素工具钢和低合金工具钢刀片锋利, 利磨性也好; 而高合金工具钢刀片则耐磨性好, 锋利性和利磨性都差。这与钢中碳化物类型有关。工业常用砂轮磨料为刚玉 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $180\text{CHV}$ ) 或  $\text{SiC}$  ( $2600\text{HV}$ )。碳钢和低合金工具钢淬火组织主要是马氏体 ( $<900\text{HV}$ ) 和渗碳体型碳化物 (约  $1100\text{HV}$ ), 砂轮硬度远高于刀片,  $H_a/H_m > 1.3\sim 1.7$ , 可顺利磨出尖薄刃口。但高合金工具钢中的  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (约  $1700\text{HV}$ )、 $\text{WC}$  (约  $2400\text{HV}$ )、 $\text{VC}$  (约  $2800\text{HV}$ ) 则不然, 其硬度高于刚玉, 与  $\text{SiC}$  旗鼓相当。砂轮只能将马氏体基体磨去, 然后再将凸出表面的碳化物崩掉。这对磨金属切削刀具无妨。但要磨出  $r$  仅几个到十几个  $\mu\text{m}$  的尖薄刃口则不可能。得到的是刀刃厚、呈锯齿状的刃口, 失去了锋利性。

同理, 渗硼刀片利磨性也极差。渗硼的水稻收割机定刀片虽耐磨, 寿命长。但定刀片只起支承作用, 无须很锋利。切割任务主要由不渗硼的动刀片完成。剪毛机刀片试用渗硼则效果较差。刀片用金刚砂 ( $1400\text{HV}$ ) 在磨刀盘上刃磨。FeB 硬度为  $1800\sim 2200\text{HV}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  是  $1200\sim 1800\text{HV}$ 。金刚砂对渗硼层不是切削而是碾压造成疲劳剥落。渗硼层又脆, 刃口常成锯齿状, 快速磨出的刀片往往连一头羊也剪不下来。要磨好刀, 需花几十分钟仔细研磨才行, 不适应机械剪毛作业。

农机刀片遇到的主要磨料是植物硅酸体 ( $540\sim 570\text{HV}$ ) 和砂粒 ( $970\text{HV}$ )。刀片硬度达  $62\text{HRC}$  左右就有较高的耐磨性, 并无红硬性要求。所以用碳素工具钢或低合金工具钢即可, 无需高合金工具钢。

#### 14.1.4.3 耕整地机件的脱土性

耕地整地是农机中耗能最高的作业。降低牵



引阻力,减少油耗,提高耕作效率和质量,具有重要意义。耕作机具的阻力除了切割、破碎和翻转土垡遇到的抵抗外,还来自土壤对耕作零件的粘附力和摩擦力。所谓脱土性好就是粘附力小,摩擦力小。影响土壤粘附和摩擦性能的因素很多,首先是土壤的性质、组成、含水量等;其次是耕作零件的表面性质,如表面自由能、粗糙度、硬度等;还有外部条件,如温度、压力、相对运动速度等等。

1. 土壤的粘附力与摩擦力 张际先等的研究表明:

(1) 土壤的粘附和摩擦是互相无关的两种现象。

(2) 零件表面硬度与粘附无关,而其他条件固定时,提高零件硬度可降低摩擦。

(3) 材料表面性质对粘附力与摩擦力影响最显著。除粗糙度外,主要是材料表面亲水性。零件表面涂敷憎水薄膜可大大降低土壤的粘附力和摩擦力,即有良好的脱土性。材料亲水性可用水对材料表面接触角 $\theta$ 来表征, $\theta$ 角大则亲水性差,憎水性强。各种材料经不同处理后的 $\theta$ 角见表14-6。

(4) 接触角 $\theta$ 对摩擦力的影响比对粘附力的影响大。 $\theta$ 对粘附力的影响与土壤含水量有关,在含水量高的土壤中影响显著。

(5) 从表14-6可知:聚四氟乙烯有极强憎水性。曾在水田犁壁贴聚四氟乙烯板,取得阻力大幅度降低的效果。表面镀铁和镀铬都能改善零件脱土性,而渗氮则适得其反。

2. 阳城犁镜的脱土性 陈秉聪等近年对山西阳城犁镜(即犁壁)优良的脱土性能研究发现:组织为晶粒粗大的莱氏体加少量二元磷共晶的过共晶白口铁,绝无游离石墨;与水的接触角达 $81.1^\circ$ ;在 $\text{pH}=5$ 和 $\text{pH}=10$ 的介质中均有较好耐蚀性。从中得出:

(1) 高碳过共晶白口铁对脱土性能有利,出现珠光体则不利,石墨的析出最为有害。

(2) 磷能提高接触角和耐蚀性,硅则相反。

(3) 粗晶组织能减少相界面积,提高接触角并降低腐蚀速度。

(4) 材料脱土性能与其耐蚀性密切相关。

这些研究都为寻找金属基减少粘附提供了有价值的参考。

3. 表面粗糙度的影响 不言而喻,降低零件表面粗糙度,将改善其脱土性能。

#### 14.1.4.4 环境保护与安全问题

农业机械是改造大自然、服务大自然的工.具,更应重视自然环境和人与生物的保护。1989年联合国环境署在全球推行清洁生产技术,不但要求大大降低生产过程的污染、节约能源和原材料,并要求将产品使用、消费过程中对环境的不良影响降至最低程度。据此,提出我国农机热处理行业急需解决的几个问题:

(1) 消除淘汰落后的有害的热处理工艺。

(2) 消灭该热处理而不热处理的零件,零件不经热处理,使用寿命低是对能源、原材料和人力的极大浪费,有悖于清洁生产原则,亟需认真解决。在此特别提出磨面粉机磨辊问题。国内大量使用铸铁磨辊,由于多种原因,不经热处理就用,因不耐磨,大量铁粉混于面粉之中。GB1355规定,磁性金属(主要是铁)含量应低于 $3 \times 10^{-5}$ 。实际检测大大超标。一些小面粉厂产品中铁含量超标几十倍、上百倍。对此应从材料、热处理与机械结构设计方面联合攻关解决。

(3) 防止热处理产品的污染与安全问题,在此特别提出农机零件要慎用渗硼问题。70年代以来,陆续将渗硼工艺引入农机产品,并取得一定效果。但在渗硼层在农田中自然分解状况未搞清之前,不应广泛应用。

表 14-6 各种材料与水的接触角 $\theta$

材料及其处理	45 钢	45 钢 憎水处理	45 钢 NC 共渗	45 钢 NC 共渗	65Mn	65Mn	T8 钢	1Cr13	镀铁	复合 镀铁	镀铬	复合 镀铬	聚四氟 乙烯
粗糙度 $/( \mu\text{m})$	0.12	0.15	0.4	0.9	0.2	0.28	0.4	0.83	0.27	0.22	0.35	0.32	0.7
硬度(HV)	245	245	245	588	247	313	724	300	675	634	768	634	5
接触角 $\theta(^{\circ})$	75.3	95.9	66	60	77.9	77.9	78°	68.8	83.2	83.8	83.7	85	106.7

1) 渗硼层脆, 易剥落, 硬度高达 1800HV 的渗硼碎屑均带尖锐棱角, 落入农田将成为远比石英更加凶恶的磨粒, 农机作业一环紧扣一环, 间隔不过几天, 犁铧犁壁剥落的渗硼碎屑会磨损耙片; 收割机刀片的碎屑又殃及秋耕的犁铧。今天用渗硼来对抗石英的磨损, 今后面对土壤中越积越多的硼化铁磨粒又将如何? 80 年代初统计: 犁铧、犁壁、耙片和旋耕刀片四大件全国每年被磨损掉到农田中的铁屑是 8660t。渗硼碎屑会少些, 但不能掉以轻心。DDT 和 666 农药的污染可为前车之鉴。

2) 渗硼不能用于粮油、饲料和食品机械零件, 如锤片、榨油机榨螺杆和颗粒饲料压粒模与压辊。否则尖硬的渗硼碎屑不被胃酸 (HCl) 腐蚀, 必然对人畜消化系统造成严重伤害。

3) 棉毛麻采集加工机械零件也要慎用。渗硼件 80 年代末羊毛大战, 为谋取暴利, 有人故意往毛中掺砂, 造成毛纺设备大大加速磨损, 结果毛纺厂拒收当地羊毛。如果有渗硼碎屑 (例如剪毛机刀片剥落的) 混入毛中, 则后果更加严重。

同理, 对渗金属、某些成分的合金堆焊, 也应在做过认真细致的基础试验, 证实无害后, 方可用于农机生产。农机热处理工作者应该有可持续发展的觉悟。

#### 14.1.4.5 耐腐蚀磨损问题

水田机械和施肥、植保、畜禽饲养机械的一些零件存在腐蚀磨损。南方潮湿空气中放置的农机具也有锈蚀问题。分析可知, 水田机械零件以磨损为主, 腐蚀其次; 施肥和植保机械零件则主要受腐蚀, 磨损较轻。只要抓住主要矛盾和矛盾的主要方面, 通过合理选材或采取表面处理、化学热处理措施均可解决。

畜禽饲养机械中一些受氨和  $H_2S$  气氛腐蚀严重、但磨损较轻的零件可用塑料包覆、镀锌, 特别是较厚层的热浸镀锌或渗锌。而清粪搅龙、刮粪板等既要防腐又要耐磨的零件, 可进行表面喷焊或化学热处理。某些颗粒饲料压粒模在高温带腐蚀条件下, 承受强烈磨料磨损, 则用 4Cr13 不锈钢淬火或低碳不锈钢渗碳淬火。

美英和前苏联等国都有耐大气腐蚀的专用钢如美国 “Corten”, 苏联 “10XH111” 钢等。主要成分 (质量分数) 为:  $\leq 0.12\%C$ ,  $0.5\% \sim 1.0\%Cr$ ,  $0.3\% \sim 0.65\%Ni$ ,  $0.25\% \sim 0.55\%Cu$ ,  $0.07\% \sim$

$0.15\%P$ 。苏联还有农用复合不锈钢板, 在 25 钢基体上包覆 08Cr13 或 08Cr18Ni10Ti。这些都可供我国借鉴。

## 14.2 耕作机械典型零件的热处理

### 14.2.1 犁铧的热处理

#### 14.2.1.1 服役条件与失效方式

犁铧是铧式犁的重要基础件 (图 14-14)。耕作时铧尖凿破土层, 在动力牵引下铧刃耕入土层下一定深度, 沿沟底和沟壁将土块和埋于土中的植物茎、根切开、切断, 通过铧面与犁壁把土块升起、挤碎, 然后翻扣到地面一侧。犁铧耕作时的阻力约占牵引力的  $1/2$ 。磨钝后阻力大大增高。所以犁铧受到土壤、砂粒、石块、茎根的强烈磨料磨损与冲击。土壤只有受到较大压力时才裂开与整体剥离, 这时阻力突然消失, 使铧尖和铧刃受到周期性冲击和振动, 可能产生疲劳破坏。水田犁铧还要受一定腐蚀磨损。约 10% 犁铧是非淬火区局部磨穿, 变形折断的。此外, 铧刃磨损, 背棱变宽, 入土性变坏, 按原苏联标准, 当背棱宽达 10.5mm 时, 就应视作失效。传统做法是铧尖铧刃磨钝而整体损坏不严重时, 可加热锻打修理, 恢复铧尖铧刃并淬火回火, 一般可修复 3~5 次。但因现场条件简陋, 修复后其寿命一次不如一次。

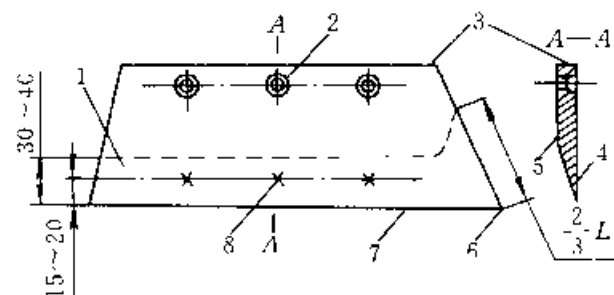


图 14-14 犁铧简图

1—淬火带 2—螺钉孔 3—犁铧背部 4—工作面  
5—背面 6—铧尖 7—铧刃 8—测硬度点

#### 14.2.1.2 技术要求与选材

犁铧要求整体有足够的强度和韧性以抵抗冲击和振动, 铧尖与刃部要有高耐磨性和高硬度, 最好还要有自磨锐效果。

GB/T14225.2 规定, 犁铧应采用 65SiMnRE 钢 (GB1465) 或 65Mn (GB699) 制造。热处理后

淬火区硬度 48~60HRC, 非淬火区  $\geq 32$ HRC。我国曾研制了 85MnTiRE 犁铧钢, 因含碳量提高, 有较高耐磨性。部分地区也有用稀土球墨铸铁生产, 多用于畜力犁铧。各种材料成分见表 14-7。

国外犁铧较普遍采用耐磨复合钢材或耐磨合金堆焊。前苏联在 55 号钢母材铧体的刃部复合 Cr6V1 耐磨钢 ( $w(C) 1.5\% \sim 1.7\%$ ,  $w(Cr) 5.5\% \sim 7\%$ ,  $w(V) 0.8\% \sim 1.2\%$ ,  $w(Mn) \leq 0.5\%$ ,  $w(Si) \leq 0.7\%$ )。在犁铧专用型材轧制时, 将耐磨钢扁钢贴到刃部。其重量仅占总重 6%~9% (质量分数), 成本不高, 但有良好自磨刃, 寿命甚至高于堆焊犁铧。其热处理工艺也很特殊: 900~930°C 加热 (如感应加热则 1030~1050°C), 鼓风冷却到 500°C 淬入水中。耐磨层  $\geq 56$ HRC, 母材 240HBS。美国某牌号大马力拖拉机牵引的犁铧, 基体为 T9 钢, 刃部用含 25% (质量分数) 的高铬合金堆焊。组织为莱氏体共晶基体上均匀分布六方块状碳化物 (1200HV), 和少量粗大块状、含 Cr 高达 70% (质量分数)、硬度 2100HV 的碳化物。国外认为这种组织有很强的抗磨料磨损性能。

#### 14.2.1.3 热处理工艺

各种材料制造的单金属犁铧的热处理工艺见表 14-8, 按图 14-14 局部加热淬火。

我国各地土质差异极大。因此有关标准中对农机零件硬度要求允许范围较广。如犁铧淬火区硬度为 48~60HRC。这并非说同一种犁铧上各点硬度在 48~60HRC 范围都属合格, 而是要求因地制宜, 根据不同土质有针对性地生产不同硬度档次的犁铧。例如在耕无石子的砂壤土熟耕地时, 以提高耐磨性为主, 硬度可取上限 (60.8HRC 时最佳)。而在开垦石子、树根多的生荒地或天然草场种草时, 为提高韧性, 硬度应取下限。为产生自磨刃, 甚至可低于 48HRC。

65Mn 钢  $M_s$  点约 250°C, 160~180°C 等温淬火是为了减小淬火应力与变形, 并得到适量残留奥氏体以提高韧性。但 60min 等温 M 转变不完全, 出炉空冷时还有相当多 A $\rightarrow$ M 转变。这部分 M 如不回火, 脆性较大。所以还须低温回火 2~3h 以消除脆性。试验表明: 65Mn 钢 850°C 加热, 180°C 硝盐等温 1h, 180°C  $\times$  3h 回火, 可使  $\alpha_K$  值从等温后的 11.76J/cm<sup>2</sup> 提高到 52.92J/cm<sup>2</sup>。

表 14-7 犁铧用材料的化学成分 (质量分数)

(%)

材 料	C	Si	Mn	S	P	RE	其 他
65SiMnRE	0.62~0.70	0.90~1.20	0.90~1.20	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	加入量 0.2	—
65Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	—	—
85MnTiRE	0.75~1.0	$\leq 0.70$	$\leq 1.10$	$\leq 0.04$	$\leq 0.04$	加入量 0.15	Ti: 0.2~0.4
稀土镁球铁	2.8~3.2	2.8~3.2	0.3~0.7	$\leq 0.03$	$\leq 0.05$	0.04~0.06	Mg: 0.02~0.06
高韧耐磨白口铁	2.2~2.5	$\leq 1.0$	0.5~1.0	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	—	—

表 14-8 犁铧热处理工艺规范

材 料	淬 火 加 热			淬 火 冷 却			回 火		硬度 (HRC)
	设备	温度 /°C	时间 /min	介质	温度 /°C	时间 /min	温度 /°C	时间 /h	
65SiMnRE	盐浴炉	850 $\pm$ 5	6~8	硝盐*	160~180	60	160~180	2~3	52~60
65Mn		850 $\pm$ 5	6~8	硝盐	160~180	60	160~180	2~3	52~60
85MnTiRE		830 $\pm$ 5	6~8	油	20~80		170~190	2	52~61
稀土镁球墨铸铁		880~900	60	硝盐*	280~310	60	280~310	4	36~40
高韧耐磨白口铁		880~910	60	硝盐	280~330	60~90	—		55~59

\* 可用 KNO<sub>3</sub> 和 NaNO<sub>2</sub> 各 50% (质量分数)。200°C 以下使用可另加 (3~5)% (质量分数) 的水。

表 14-9 DZ 型犁铧生产工艺过程

工.序号	工序名称	技 术 要 求	时间 /s	温度 /℃
1	下料	按图样切成梯形		
2	中频加热	根据犁铧规格确定加热时间	30~40	1100~1200
3	辊锻	通过三次轧制, 轧出; 背部厚 8mm 形变率 56% 刃部厚 3mm 形变率 83%	10s 内完成	
4	切边、冲孔、 挤沉头螺钉孔	按图样	4, 5, 6 三道工.序	背部降温至 850
5	压弯成形, 打商标	按图样	在 10s 内完成	刃口从 800 降至 760
6	轧出刃口	从 3mm 挤成 1~1.5mm 厚		760
7	整体淬火	淬入 $1.30\sim 1.35\text{g}/\text{cm}^3$ 的 $\text{CaCl}_2$ 水溶液中**	停留 4~6s 出水空冷	淬火液 $25\sim 70$
8	回火*	从淬火液取出及时回火	3h	$470\pm 10$
9	修整	回火完毕趁热修整		
10	清洗	彻底洗净吹干, 否则生锈		
11	涂漆			

\* 65Mn 钢有回火脆性, 中高温回火后应水冷。

\*\*  $\text{CaCl}_2$  淬火液蒸气对金属有腐蚀性, 车间仪表应加防范。淬火后零件应彻底洗净, 然后回火。

原材料:  $18\text{mm}\times 100\text{mm}$  或  $18\text{mm}\times 90\text{mm}$  65Mn 扁钢。

主要设备: YZ250-1000/1-8 型中频加热炉

D42 630 型辊锻机。

#### 14.2.1.4 犁铧的特殊热处理工艺

1. DZ 型犁铧 等温淬火犁铧虽较油淬强韧性好, 但生产率较低, 要有很深硝盐槽, 否则等温温度波动大, 犁铧质量不稳定。此外, 犁铧硬度即使达到 60HRC (713HV), 在高含砂量土壤中仍难抵御砂粒 (970HV) 的犁削划伤,  $H_m/H_a=713/970=0.735$ , 尚未达到 0.8~0.85 的要求。保定农机厂根据自磨锐原理, 对 65Mn 犁铧采取辊锻成形、余热淬火新工艺, 生产出低阻力、自磨刃的 DZ 型犁铧。其工艺见表 14-9 和图 14-15。

金相分析发现: 65Mn 辊锻淬火犁铧背部、中部和刃部都有板条 M, 并随变形率的加大, 刃部比背部板条更多、更细。硬度 40~45HRC。从背部取样, 加工成  $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 10\text{mm}$  无缺口试样, 作冲击试验, 其  $\alpha_K$  值比普通淬火高 10% 以上。

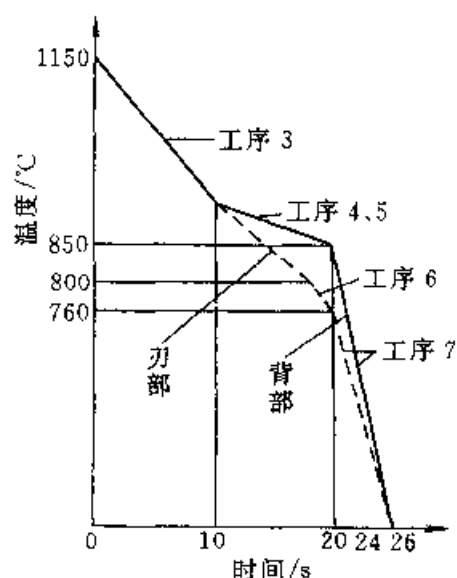


图 14-15 DZ 型犁铧辊锻与热处理工艺曲线



渗碳,机引犁渗层1.5~2.2mm,畜力犁为1.2~1.8mm,硬度60~62HRC。但因耗费之时,许多工厂已不用。60年代已用65-Q215-65轧制三层钢板,1978年后也用95-Q215-95三层钢板,并取得很好效果。存在问题是:钢板层间粘结强度低,冲压或淬火时层间分离,价格也高。

国内生产中用得较多的是35钢犁壁,淬火后获得板条马氏体组织。但35钢如遇钢材含碳量处于下限时,则淬火后常出现软点。为此国内试验了普碳钢LB37,将含碳量提高到0.32%~0.41%(质量分数),大大降低淬火软点,也确保得到板条马氏体。

对面积较小的轻型犁和畜力犁,常用冷硬铸铁铸造,工作面冷硬深度2~3mm,硬度40~50HRC,经消除应力退火后使用。著名的山西阳城犁壁,以当地产赤铁矿用木炭为燃料炼成铁液,直接注入金属型中制成。该犁壁成分(质量分数)含高碳(4.27%)、高磷(0.58%)、低锰(0.07%)、低硅(0.05%)、低硫(0.032%);金相组织为莱氏体加少量二元磷共晶的过共晶白口铁;硬度56HRC。具有十分优良的脱土性是其特点,但脆性很高,不适于机引犁使用。

#### 14.2.2.3 热处理工艺

犁壁热处理工艺见表14-11

(1)表面锈蚀钢材,可用15%(质量分数)浓盐水浸泡10min,晾干后于箱式炉加热,可减轻淬火软点。

(2)犁壁模压淬火,降温较快,可适当提高奥氏体化温度,并加大喷水压力,盐水强冷。

(3)65Mn犁壁推荐采用等温淬火强韧化处理,冲击韧度接近35钢,寿命比35钢犁壁高60%,甚至超过国外三层钢板犁壁,脱土性好,阻力小。

(4)对35钢或LB37钢,当含碳量为上限,又含有能提高淬透性的合金元素时,容易淬裂。对不同炉号钢板应通过试验,调整淬火温度,最低时可降至810℃淬火。

(5)某厂对6mm厚65Mn钢板,900℃均匀热透,出炉后15s内在160t摩擦压力机上成形。这时犁壁约降温到800℃,可直接淬油。但最好预冷约10s,降到760℃左右垂直淬入水玻璃淬火液中(62HRC,可根据要求硬度回火)。淬火时曲面弧度呈张开趋势。只要稳定工艺,掌握变形量后,在热压模具上增加反变形量,即可使变形控制到允许范围。

淬火介质配制(质量分数): $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 11%~14%, $\text{NaCl}$ 11%~14%先溶于水,测得波美度25~26°BE,再加入波美度40°Be的水玻璃20%~28%。这时水中有絮状凝胶偏硅酸( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ),再加入先溶于少量热水中的 $\text{NaOH}$ 0.5%,凝胶消失,溶液波美度28~35°即可使用。淬火液20~80℃都可用。长期使用只要随时补充水玻璃和碳酸钠即可,除非出现絮状凝胶,一般无须补充 $\text{NaOH}$ 。

表 14-11 犁壁热处理工艺规范

材 料	淬 火			冷 却	回 火		硬 度 (HRC)
	加热设备	温度/℃	保温/min		温度/℃	保温/min	
35/Q275	箱式电炉	900~920	15~20	淬火压床10%(质量分数) 盐水	150~160	60	50~55
65Mn	盐浴炉	840~860	5~6	180~200℃硝盐浴等温1h	170~190	180	55~60
95-Q215-95	箱式电炉	780~800	15	淬火压床10%(质量分数) 盐水	170~190	60	60~62
LB37	箱式电炉	880~900	15~20	淬火压床10%(质量分数) 盐水	150~160	60	50~55

#### 14.2.3 圆盘的热处理

##### 14.2.3.1 服役条件与失效方式

圆盘是耗耘机械和种植机械上的主要零件,

安装到不同机具上分别用来切土、碎土、松土、开沟和切断留在土壤中的残根杂草等。

圆盘有平面圆盘和球面圆盘两类,见图14-18。平面圆盘又分a.单面磨刃和b.双面磨刃;球

面圆盘又分 c. 圆边和 d. 花边 (边缘带缺口或呈星形)。双面磨刃的平面圆盘用作铧式犁上垂直切土的圆盘刀; 单面磨刃的平面圆盘用作播种机上的双圆盘式的开沟器。球面圆盘一般用于灭茬犁、圆盘耙、圆盘犁、栽植机, 或作为播种机和栽植机上的划行器等。圆盘耙又有轻、中、重耙之分。轻耙用于在已耕地上耙后碎土; 中耙用于耕后碎土或耙茬; 重耙用于耕后碎土、耙茬、耙荒。水田耙多为球面缺口耙与星形耙。

圆盘虽有多种不同用途, 但都是用作破土、平地 and 灭茬。所以圆盘主要是刃口及切入土壤的两侧刃面受砂石、根茎甚至还有铁片、钢丝等杂质的强烈磨损与冲撞, 使刃口残缺, 圆盘变形、破裂,

直径逐渐变小。水田作业还有腐蚀磨损。如作耙片用, 当直径磨损到原来的 70%~75% 时, 或缺口耙、星形耙的耙齿磨秃时, 就应报废更新, 否则耙片入土性能变坏, 耙地深度变浅, 碎土灭茬和耙地质量大为降低。

#### 14.2.3.2 技术要求与选材

圆盘应具有足够的强度和韧性, 还应有较高的硬度和耐磨性。JB/T6279.2 对耙片要求用 GB699 中 65Mn 钢制造, 热处理后硬度为 38~48HRC, 同一片上各点硬度差  $\leq 7\text{HRC}$ 。硬度测定部位为距耙片外缘 20~60mm 的环形圈内。此外 NJ154—86 规定对水田耙片 (厚 4mm, 65Mn 钢) 硬度为 40~48HRC。

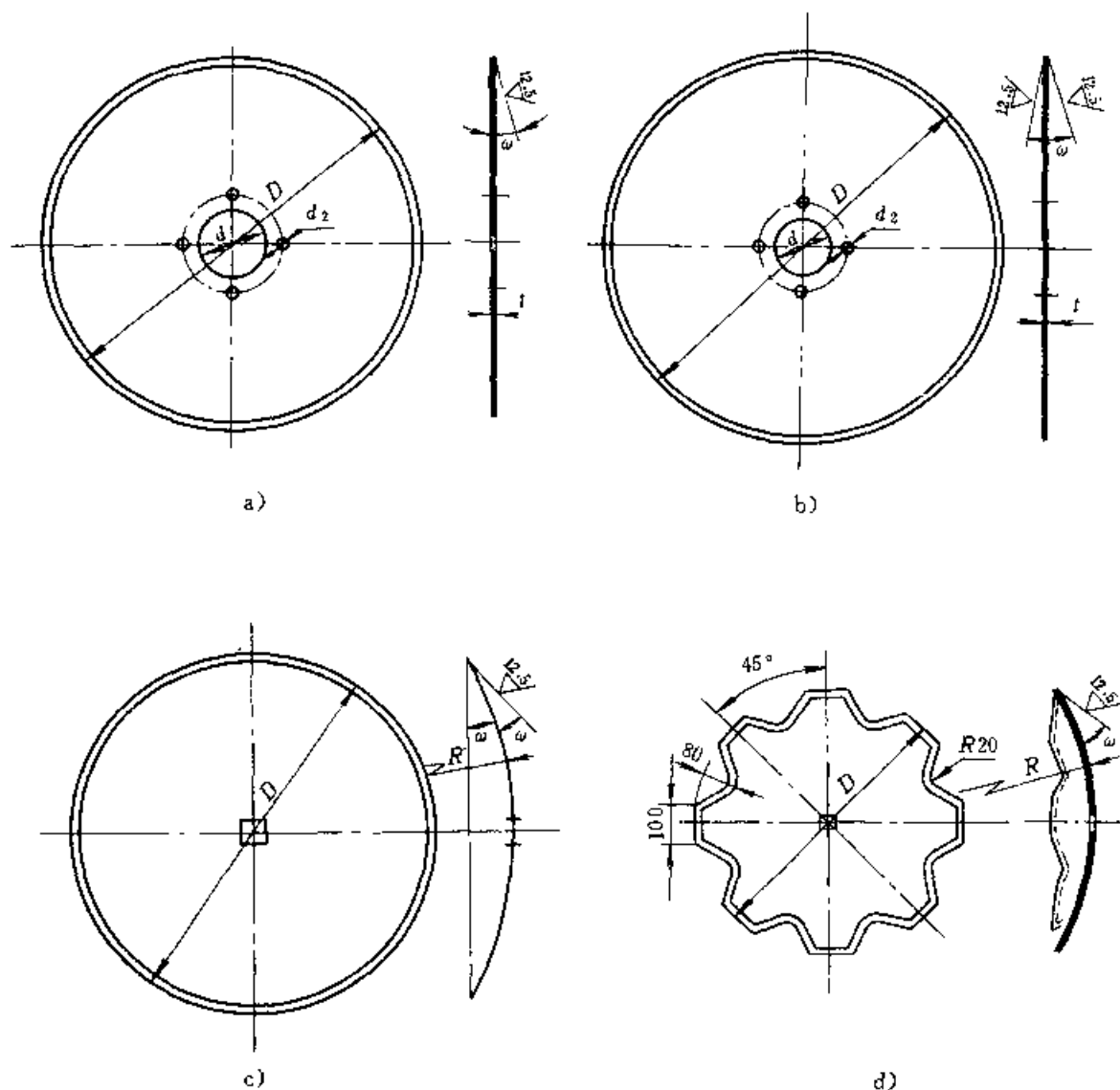


图 14-18 圆盘

由于圆盘有多种用途,其服役情况不同,除应有高耐磨性这一共性要求外,对韧性则应视用途和耕地情况作不同规定。如果过分顾及韧性而降低硬度,将导致耐磨性降低,脱土性变差。实践表明,种植多年的熟耕地,石块越来越少,用作划行器、开沟器的圆盘硬度可定得高些。西安农机厂对65Mn钢中频淬火开沟器圆盘,处理成58~62HRC,在陕北榆林砂砾地作业地温仅0~3.5℃。结果表明:厚度仅2.5mm的高硬度开沟器圆盘并未发生脆裂,而其磨损量则比43~49HRC和53~58HRC两对照组都低。中国农机院对Q275钢低碳马氏体淬火耙片(48~54HRC)和65Mn钢270℃等温淬火15min×180℃回火耙片(46~54HRC)与65Mn常规处理(840℃淬油+400℃回火,42~48HRC)耙片对比。结果表明,硬度较高的Q275低碳M耙片和65Mn等淬耙片,不但冲击韧度都高于65Mn油淬,而且田间试验也证明:低碳M耙片寿命高出15%;等淬耙片高出35%。可见只要从选材和工艺上改进,圆盘硬度的提高可进一步提高其耐磨性和韧性。地膜覆盖机圆盘,广泛采用低碳钢渗碳,硬度高、寿命也长。

国外对圆盘也广泛采用耐磨合金堆焊。前苏联球面圆盘耙用55号钢为母材,刃口堆焊Cr6V1

合金。美国某名牌牧草耕播机圆盘刀,主要用于耕翻多草潮湿或粘重、干旱的草地,经常在多石块、多草根的草原上耕作,要求具有较高强度和韧性,刃口锋利耐磨。其基体为50Mn钢,刃口堆焊含WC的组合合金。金相组织为:共晶合金铸铁基体上均匀分布小方块状碳化物( $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 或 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ ,约2000HV),另有颗粒为0.2~1mm的粗大未熔WC(约2400HV)。从金相组织看,堆焊后未经淬火。

#### 14.2.3.3 热处理工艺

各种圆盘的热处理工艺见表14-12。

### 14.2.4 锄铲的热处理

#### 14.2.4.1 服役条件与失效方式

锄铲分中耕锄铲和深松铲。中耕机锄铲分除草铲、松土铲和培土铲,一般深入上层下3~10cm。深松铲则对已犁耕过的土壤进一步深松,常深入土层以下25~40cm,将犁沟下面的土壤铲松。在拖拉机带动下,锄铲深入农田土壤以下,快速前进,切开土堡,切断草根,将土壤翻起。铲尖和铲翼受砂土严重磨损,也可能遇石块撞击损坏,其磨损情况与失效方式与犁铧相似。深松铲还受较大振动。

表 14-12 圆盘热处理工艺规范

零件名称	钢号	加热设备	淬 火			回 火		硬度 (HRC)
			温度/℃	时间/min	冷却	温度/℃	时间/h	
旱田耙耙片	65Mn	箱式电炉	840~860	7~10	油	370~430	1	42~49
				7~10	250℃等温 1h	400	3	42~45
				7~10	280℃等温 15min	180~200	1	48~54
水田耙耙片				7~10	油	380~450	1	40~48
五铧犁圆盘刀				3~5	油	370~430	1	42~49
	Q275	箱式电炉	890~910	3~5	(盐水) 10%w	160~180	1	50~54
开沟器圆盘	65Mn	8kHz、100kW 中频加热炉	890±10	40~45s	加压油淬	300~450	40~45s 加压	45~53
						200	40~45s 加压	53~62

注:1.圆盘的制造工艺路线为:落料→钻孔→压形、淬火→回火→开刃。

2.为防止变形,一般均应加压淬火(等温淬火可不必)、回火(在压模中喷油、喷水淬火)。

3.65Mn钢有回火脆性,中温回火后需快冷。

4.有条件时,推荐65Mn耙片270~300℃等温淬火,组织为B<sub>2</sub>+M,综合性能最佳。

5.开沟器圆盘中频感应加热,由压紧感应加热→压紧埋油淬火→压紧感应回火三部分组成热处理机床。回火加热时间与淬火加热同为40~45s,通过调节功率,改变回火温度,以调整圆盘回火后硬度。



## 14.2.4.2 技术要求与选材

根据作业要求,锄铲可设计成不同外形,如箭(长条)形、箭(鸭掌)形等,图14-19是双翼形深松铲。各种锄铲都应有较高的抗砂土磨损性能和一定的强度、韧性。松土铲和培土铲的性能要求类似犁铧,除草铲还要求有锋利耐磨的刃口。深松铲应有较高抗震性能。各种锄铲都希望有良好的自磨锐效果。

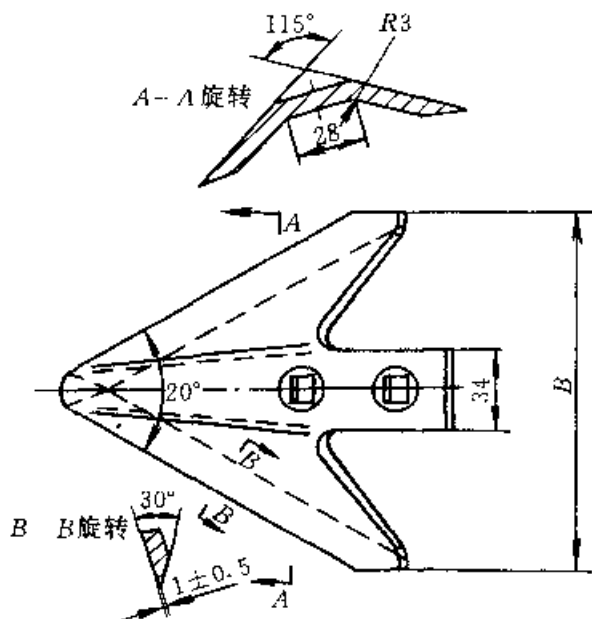


图 14-19 双翼形深松铲

NJ258 要求深松铲用 GB699 中 65Mn 钢制造,刃部进行局部淬火,淬火带宽 20~30mm,硬度为 48~56HRC。其他锄铲也多用 65Mn 制造,或 35 钢低碳马氏体淬火。还有少量用 Q215、Q235 钢渗碳(厚 0.8~1.2mm),但较理想的是 80 号钢与 Q215 双层复合钢板制造,有利于出现自磨刃。

国外也有用 60Si2Mn 钢制造锄铲的。英国 Moore M. A. 等曾经试验用硬度与石英砂(1100HV)相近的 1050HV 和 1200HV 氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$  95%),烧结成铲尖,用高温固化环氧树脂将这些氧化铝板状铲尖粘到软钢背衬垫板上,并与几何外形相同,热处理到 500HV 的钢锄对比。田间试验表明:氧化铝铲尖刃口厚度磨损极微小,始终保持锋利,而铲尖长度方向的磨损仅为钢铲的 1/5 到 1/2。当锄铲受到较大冲击,氧化铝板碎裂崩去一角时,仍不影响使用,并且逐渐磨平,损伤处并未发现裂纹扩大的趋势。只要粘结牢固,氧化铝板上即使有贯穿性裂纹,还能继续工作。但当背衬材料发生较大变形,其前缘发生卷曲,以致石块或硬物能刺进氧化铝板与钢背衬之间,破坏粘结面时,锄铲将损坏。

Moore 的试验给人启发。当批量生产时,烧结氧化铝陶瓷铲尖,成本并不比堆焊合金高,其

表 14-13 锄铲热处理工艺规范

零件名称	材料	加热设备	淬 火			回 火		硬度 (HRC)	备 注
			温度/°C	时间/min	冷却	温度/°C	时间/h		
复合钢板除草铲	80 钢+Q215 双层	盐浴炉	760~800	4~5	盐水	160~180	1	56~60	淬硬层 1~1.3mm
深层松土铲	65Mn		840~860	4~5	油	280~350	1	48~56	淬火带 20~30mm
中耕机锄铲	65Mn		840~860	4~5	油	320~380	1	43~51	淬火带 25~30mm
中耕机锄铲	35 钢		860~880	4~5	盐水	160~180	1	48~55	淬火带 25~30mm
林业锄草机锄铲	65Mn		820~840	4~5	油	300~350	1	46~52	淬火带 30~35mm
渗碳钢锄铲*	Q215 钢		780~800	4~5	盐水	180~200	1	50~60	渗碳层 1~1.5mm

\* 渗碳工艺的说明如下:

1. 建议用井式气体渗碳炉,以渗碳专用煤油(或低硫煤油)为渗剂,930~940°C 装炉,930°C 保温 6~9h,出炉在冷却坑中通水快冷,或空气中吹风冷却,以防析出网状碳化物,整体渗碳,局部淬火。
2. 渗层取下限时,也可以滴煤油、通氨气,(860±10)°C 气体碳氮共渗,6~7h。
3. 如用固体渗碳,则可用  $\text{BaCO}_3$  10%~15%、 $\text{CaCO}_3$  5% 与本炭拌匀(可买配好的固体渗碳剂)为渗剂,装箱,于箱式电炉中 (930±10)°C 渗碳,出炉开箱空冷。

寿命则提高很多。基体与刀刃磨损量应保持适当比例,才能出现自磨刃。低硬度软钢磨损快,强度低,这为磨薄了的前缘发生变形、卷曲,使硬物得以刺入,破坏粘结面,导致锄铲损坏创造了条件。

#### 14.2.4.3 热处理工艺

锄铲热处理工艺见表14-13。

### 14.2.5 旋耕刀的热处理

#### 14.2.5.1 服役条件与失效方式

旋耕刀是旋耕机的主要零件。旋耕机随拖拉机一边前进,其水平刀轴一边旋转。安装在刀轴上的多把旋耕刀在滚动前进时不断犁耕农田,打碎上垡,切断残留根茬,并将土壤抛向后方,同时起到耕、耙、和部分灭茬的作用。旋耕机在水稻和蔬菜种植以及塑料大棚耕作中广泛使用,大有取代犁和耙的趋势。

根据不同作业要求,旋耕刀可设计成不同形状,见图14-20。旋耕刀前端主要用来碎土、灭茬、抛土和掺混,经常与土壤中砂石发生强烈摩擦磨损。在未经犁耕的坚实农田中耕作时,会受到很大的冲击和振动,刀尖和刀刃受冲击磨料磨损,如硬度过低,将很快磨损。刀柄是受冲击力矩最大处,

处理不当,常在刀座安装处发生刀柄折断。刀柄强度不足,在受冲击时先扭曲或弯曲变形,改变了旋耕刀的几何形状与受力方向,最终导致断裂。也有少数旋耕刀发生刀尖和刀刃部分折断,这往往是淬火过热、回火不足、硬度过高或钢材存在折迭与严重夹杂等冶金缺陷所致。旋耕刀工作条件恶劣,寿命有待提高。

#### 14.2.5.2 技术要求与选材

旋耕刀的刀尖、刀刃要求硬而耐磨,并有适当韧性。柄部则要求有足够强度和弹性、韧性,以抵抗变形和折断。因此,各国普遍选用弹簧钢制造,欧洲和日本用60Si2Mn钢居多,前苏联等国也有用复合钢材和耐磨合金堆焊的。

我国GB/T5669-1995规定:旋耕刀和灭茬刀用65Mn(GB699)或60Si2Mn(GB1222)钢锻压成形并热处理,刀身48~54HRC,刀柄38~45HRC。

日本有人在砂土中试验表明:旋耕刀刃部硬度在650HV(57.5HRC)左右磨损最轻,而柄部硬度高于50HRC会折断,低于47HRC则会弯曲。与这一试验结果相比,GB/T5669-1995的硬度规定偏低了。所以,有的单位将刃部硬度定为55~60HRC,柄部硬度定为43~48HRC。这是考虑到有的农田土壤坚实,还可能有石块、砖头,其冲击力会高于砂地,而且即使发生少量弯曲变形,也总比突然折断为好。实践证明其效果较好。

#### 14.2.5.3 热处理工艺

旋耕刀一般经锻造或辊压成形然后热处理。如利用锻造余热淬火,则应控制变形量、停锻温度和停留时间。也可重新加热淬火。60Si2Mn钢脱碳倾向较严重,盐浴应认真脱氧。

由于旋耕刀刃部和柄部硬度要求不同,所以要进行整体淬火,两次回火。淬火后及时低温回火,整体消除应力,然后对刀柄局部二次回火,降低硬度,提高韧性。二次回火在硝盐中进行。硝盐温度略高于按硬度要求的回火温度,进行短时间回火,以免刃部被烤热而降低硬度。加热时刀柄在盐面上下串动几次,使高低硬度有一过渡区。65Mn和60Si2Mn都有回火脆性,第二次回火后应在水中快冷。

热处理工艺请见表14-14。

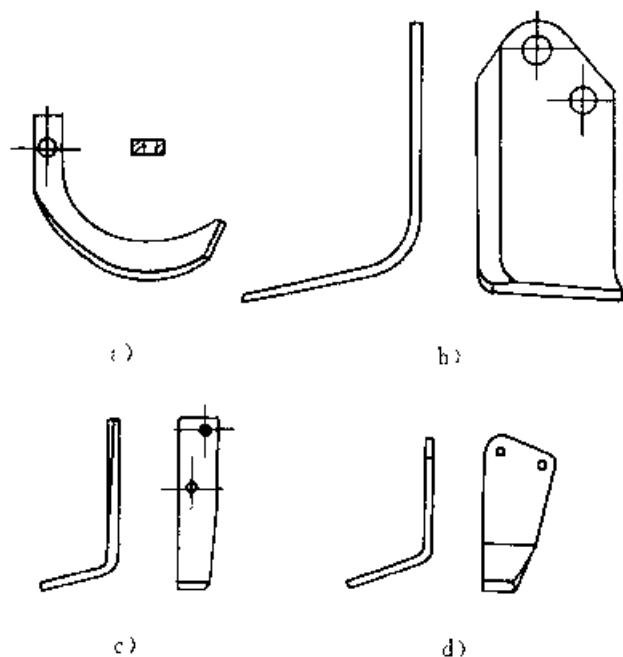


图14-20 旋耕刀

- a) 刀座式旋耕刀 b) 刀盘式旋耕刀  
c) M1型灭茬刀 d) M1型灭茬刀

表 14-14 旋耕刀热处理工艺规范

材料	淬 火				回 火					硬度 (HRC)
	设备	温度/°C	时间/min	冷却	次数	设备	温度/°C	时间/min	冷却	
65Mn	盐浴炉	840~850	10~20	油	1	油浴炉	170~190	60	空冷	刃部 53~60 柄部 43~48
					2 <sup>①</sup>	硝酸盐浴 <sup>②</sup>	460~500	5~10	水冷	
60Si2Mn		870~880	10~20	油	1	硝酸盐浴 <sup>③</sup>	300~360 <sup>③</sup>	60	水冷	刃部 48~54 柄部 38~45
					2		520~550	5~10		
65Mn		840~850	10~20	油	1	硝酸盐浴	280~320 <sup>③</sup>	60	水冷	
					2		460~500	10~15		
60Si2Mn		870~880	10~20	油	1	硝酸盐浴	400~450	60	水冷	
					2		550~580	10~15		

- ① 刀柄因采取较高温度的短时间回火,故需经过试验来确定时间与温度。例如:先根据刀柄厚度估算回火时间需10min才能保证热透,则回火温度可根据10min回火后,刀柄表面硬度在中、下限(如43~45HRC,这时心部会稍高)来确定。
- ② 油淬和油浴回火后必须彻底洗净,才能进入硝酸盐浴二次回火。以防油污进入,引起爆炸。
- ③ 280~360°C的回火可在带风扇的井式回火炉中进行。
- ④ 硝酸盐浴严防超温或局部过热。硝酸钾或硝酸钠单独使用时不得超过600°C,两种硝酸盐混合使用时不得超过550°C。不应用煤或焦炭加热,以防局部过热爆炸。易燃物不得进入硝酸盐。

### 14.3 收获与采集机械典型刀片的热处理

收获、采集机械刀片的切割对象主要是稻、麦、豆、黍类和玉米(整株切碎作青储饲料)与牧草,以及牛、羊毛等。由于作物和牛羊毛中沾附砂粒及硬夹杂物,还有硬似玻璃的植物硅酸体 $\text{SiO}_2$ 磨粒,所以它们看似柔软,刀片却磨损严重。

耐作物磨损的农机刀片按切割方式可分为有支承的双刀(一动一定,或两个刀片相对运动互为支承)和无支承的单刀切割两大类。一般说来,有支承切割的定刀片磨损较轻,动刀片磨损较重。与切割土壤的耕地、整地机械刀片(如犁铧、耙片)不同,这些刀片大都要求很锋利,刃口尖薄,曲率半径很小。

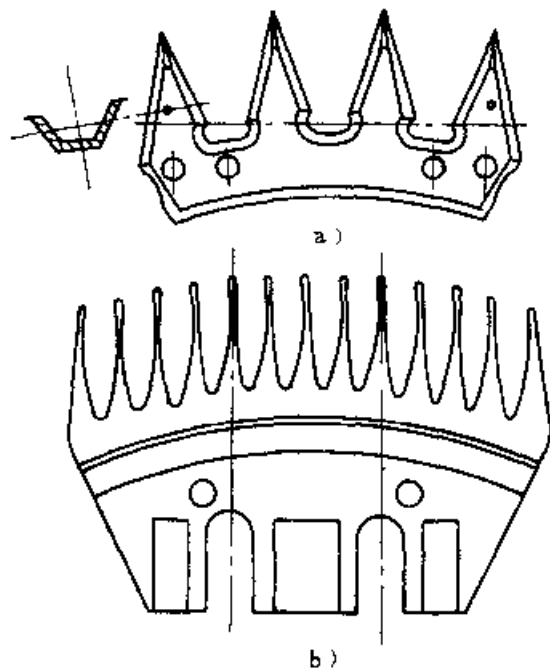


图 14-21 剪毛机上、下刀片

a) 上刀片 b) 下刀片

#### 14.3.1 剪毛机刀片的热处理

##### 14.3.1.1 服役条件与失效分析

剪毛机结构略似理发推剪,由固定的下刀片和约3000次/min往复摆动の上刀片组成切割副,在加压状态下进行剪切。上下刀片外形见图14-21。

羊毛极细软,要求刀片十分锋利,上下刀片刃口必须紧密贴合才能顺利剪毛,所以刀片要适当加压。剪毛机刀片除具有卷刃、崩刃、刃口疲劳脱落、刃口的切削与凿削、刃面受磨粒划伤、刃面粘着磨损和腐蚀磨损等失效方式外,还会因操作不

当,刀尖碰撞到羊角或剪毛机铁架上,而造成断齿报废。羊毛中的油脂又将砂粒、碎毛和杂质牢牢沾附在上下刀片的间隙中,一颗砂粒可以反复多次破坏刃口和刃面,加剧刀片磨损。故刀片常用热碱水清洗。这又造成腐蚀磨损。剪毛机刀片是各种刀具中服役条件最恶劣的。其最主要失效方式是:刃口崩刃、刃面划伤与粘着磨损。

#### 14.3.1.2 技术要求与选材

从刀片失效分析可知,刀片刃口和刃面有不同的失效方式和组织与性能要求。

1. 性能要求 刃口要求高硬度并有足够韧性,以抵抗砂粒的冲击和抗接触疲劳;刃面则要求高耐磨料磨损性能,以抵御石英之类高硬磨粒的划伤;刀齿整体要有足够韧性,以避免在非正常碰撞时刀齿折断而提前报废。

淬火钢件表面硬度达 62HRC 时可有较高的接触疲劳和小能量多冲抗力,能有效抑制严重的粘着磨损。虽然还不足以完全抵御硬度高达 1100HV 的石英砂粒的划伤,但抗磨料磨损性能已有很大提高。因此,刀片硬度取 62HRC 较为理想。在剪含粗砂粒少、冲击较轻的细羊毛时可取 63~64HRC,在剪含砂较重的羊毛时,取 61~62HRC 较好。

2. 金相组织要求 刃口应该是高硬度的隐晶马氏体或细针状马氏体为主,有适量韧性好的残留奥氏体,没有或仅有少量分布均匀的细小碳化物,以提高抗崩刃能力;刃面则要求在 M 基体上均匀分布数量适当、粗细搭配与基体结合牢固的 K,以提高抗划伤能力。在磨粒犁削刃面时,太细的 K 不能有效抵抗磨粒的“犁沟”和“刨槽”破坏。细 K 会随基体一起被磨粒翻起或被切掉。只有至少在一个方向的尺寸上大于磨粒压入深度的较粗 K 才能阻止划伤。但细 K 的弥散强化效果好,结合也较牢,脆性较小。所以最好是粗细搭配。此外,因 A 与 K 晶型相近,如果在碳化物与 M 基

体之间存在一层薄薄的残余 A,则可提高二者晶界结合强度,减轻 K 的剥落。

3. 刀片的选材 刀刃十分尖薄,为防止刀尖加热时脱碳和出炉后油淬前已降温,局部出现托氏体,刀片都选用低合金工具钢。由于高合金工具钢耐磨性差,难于很快磨出锋利刃口,不能满足现场剪毛要求,刀片也不能用高合金工具钢制造。

JB/T7881.5《剪羊毛机刀片》技术要求中规定,刀片应采用 Cr04、Cr06 (GB1299) 材料或不低于其性能的其他材料制造;动(上)刀片硬度 61~65HRC,定(下)刀片为 60~64HRC。原标准 NJ171 还推荐采用 T12J 材料并对热处理工艺作了介绍(见表 14-15)。从成分可知,这些钢含碳较高,塑性较差,上刀片在热冲成形时容易脱碳和开裂。所以有的单位曾用 08F、20 钢 (GB699) 低碳钢板冷冲成形,然后进行气体碳氮共渗淬火。他们认为这样做消除了冲压废品,减轻了模具磨损,从经济上看是可行的。

#### 14.3.1.3 热处理工艺

剪毛机刀片的制造工艺过程为:

热冲成毛坯—球化退火—机加工—热处理抛光、刃磨。

剪毛机刀片常规热处理工艺见表 14-15。淬火加热用盐浴炉,回火用油浴炉。有的单位用真空热处理炉淬火,质量较好,但热处理成本高,也不能解决原材料钢板存在的脱碳(包括热冲与退火脱碳)和碳化物偏析等缺陷,为此研究了几种特殊处理工艺。

#### 14.3.1.4 刀片特殊热处理工艺

1. 低碳钢冷冲成形碳氮共渗淬火 对上刀片用 08F 或 20 钢冷冲成形,机加工后 CN 共渗淬火。下刀片仍用工具钢常规热处理。上刀片热处理工艺见表 14-16。

表 14-15 对剪毛机刀片材料的规定\*

钢号	化学成分(质量分数)(%)						淬 火		回 火		硬度 (HRC)
	C	Si	Mn	S,P	Cr	Mo	温度/°C	冷却剂	温度/°C	冷却	
T12J	1.15~1.25	0.2~0.4	0.2~0.4	≤0.03	—	0.15~0.30	790~830	150°C~	160°C~ 170°C 空冷		64
Cr04	1.15~1.25	0.15~0.35	0.3~0.5	≤0.03	0.3~0.5	—	800~830	170°C 硝盐			64
Cr06	1.30~1.45	≤0.40	≤0.40	≤0.03	0.5~0.7	—	800~840	分级淬火 30s 或油淬			≥62

\* T12J 和 Cr04 资料抄自 NJ171-79。

表 14-16 上刀片低碳钢 CN 共渗淬火工艺规范

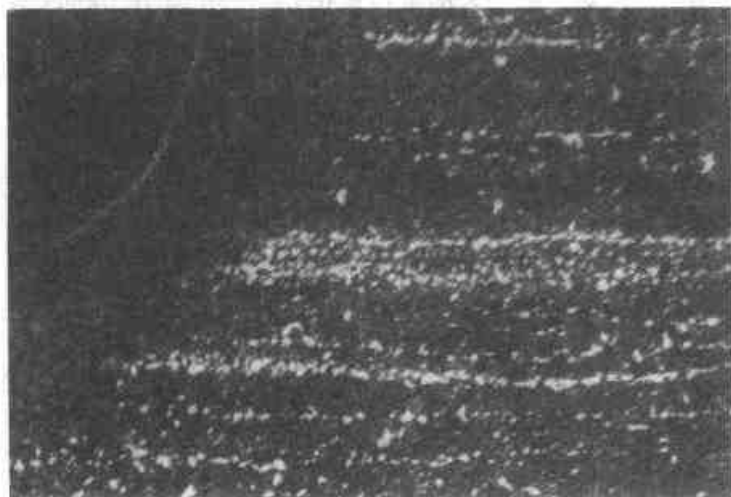
设备	渗剂	强渗阶段	扩散阶段	淬火	渗层深	$w(C)\%$	$w(N)\%$	(HRC)
井式气体 渗碳炉	煤油、尿素 甲醇排气	860~880℃, 90min	830~850℃, 60~90min	出炉淬油, 常规回火	单面 ≥0.45mm	0.9~1.10	0.2~0.4	≥63

表 14-17 刀片 N.M. 处理工艺规范

设备	渗剂	温度/℃	时间/min	淬火	回火	金相组织	硬度(HRC)
井式气体 渗碳炉	三乙醇胺、尿素、 甲酰胺等	760~850 (根据钢号和所 剪羊种选择)	15~60 (根据渗层 要求选择)	出炉直 接淬油	150~180℃ 油浴 1~3h	表层 0.03~ 0.1mm 内碳化 物完全溶解	61~64

## 2. 含氮马氏体化处理(简称 N.M. 处理)

利用氮能强烈扩大  $\gamma$  区的特性,对刀片渗氮,促使工具钢表层碳化物完全溶解,得到含氮马氏体加适量残留奥氏体的表层,心部仍为正常 M+K 组织。形成刃口无 K,刃面保留 K 的特殊金相组织

图 14-22 N.M. 处理刀片表层 K 溶解,带状偏析消除  
250×

(图 14-22),兼顾了刃口不崩刃,刃面抗划伤的要求。刀片寿命大幅度提高。N.M. 处理工艺见表 14-17。

## 3. 姜块状索氏体化处理(简称 G.S. 处理)

对热轧后空冷获得细片状索氏体的工具钢板,在略低于  $Ac_1$  温度下,不太长时间的退火,使细片状 K 不完全球化,形成生姜块状索氏体,淬火组织中 K 呈姜块状。从不同角度切开,其剖面均成细粒状或短条状,即使刃口受砂粒冲击崩刃,也只产生很小的缺口。而当砂粒划伤刃面时,由于姜块状 K 与基体有很大包覆面(图 14-23),结合牢固,弥散强化效果好,使砂粒压入浅, K 不易被翻起或切掉,从而提高了磨料磨损抗力。G.S. 处理工艺见表 14-18。

## 14.3.2 往复式收割机刀片的热处理

## 14.3.2.1 服役条件与失效方式

收割机刀片是谷物、豆、黍和牧草收获机械的主要工作零件,一般由动(上)刀片与定(下)刀片组成切割副,往复运动进行切割。也有上下刀片同时相对运动,完成切割作业的。根据工作要求,切割器分为 5 种: I 型用于割草机; II、III、IV 型用于谷物收获机械; V 型用于收割水稻为主的小型稻麦收割机和半喂入联合收割机。动力片分光刃、上开齿纹刀刃和下开齿纹刀刃三种;定刀片也分梯形(I 型)和矩形(II 型)两种。刀片简图和硬度测定部位见图 14-24。

根据收割作物的不同,刀片服役条件有较大差异。收割麦、黍和谷子时,籽粒成熟,茎叶枯黄干脆,沾附泥砂较少,刀刃即使不太锋利也能切割,刀片相对

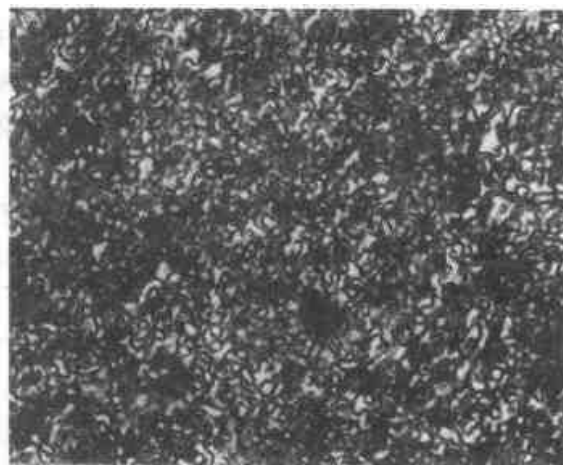
图 14-23 G.S. 处理后姜块状索氏体组织  
2250×

表 14-18 刀片 G.S. 处理工艺规范

设备	温度/℃	时间/h	冷却	硬度 (HBS)	淬火温度/℃	硬度 (HRC)
盐浴炉	710~720 (在 Ac <sub>1</sub> 以下 10℃)	1.5~3	出炉 空冷	263~283	较正常淬火温度低 10℃, 回火照常	62~65

寿命较长, 一个收获季节内可不用磨刀。收获水稻则不同, 割茬要求较低, 稻秆浸泡水中韧性很高, 刃口稍不锋利就割不动。贴近地面的稻秆上沾满泥砂, 加之水稻茎叶中含植物硅酸体较高, 所以刀片磨损很快, 需要经常磨刀。而牧草收割季节是秋季草已成熟、尚未枯黄, 营养价值最高时。这时纤维最粗, 韧性最好。某些禾本科牧草含植物硅酸体也高。所以要求刀片极锋利, 一般几小时就要磨刀。我国基本都是天然草原, 土地不平, 石块较多, 同一刀杆装着几十副刀片, 有的刀片可能插入泥砂中或遇到石子和成束的坚韧草根, 因而刀片小块崩刃、折断, 甚至整片断裂报废。

收割机刀片的失效方式与磨损机理如前所述。其中带齿纹的刀刃在割较干的茎秆时, 可看到明显自磨锐效果, 但若齿纹设计不合理, 由于粘杆的摩擦, 会使齿纹逐渐磨成针形, 最终折断。下开齿纹的动刀片割干草时也出现明显自磨刃, 但草较湿则齿纹会被草浆糊住而不起作用。

动定刀片之间隙对切割也有重要影响。通过高速摄影看到: 在割麦时干脆的麦秸是被切断的。而收割水稻和牧草时, 若动定刀片间隙稍大, 柔韧的叶片先塞进动定刀片之间, 然后撕裂而断。这增加了切割阻力, 增加了动力消耗, 也加快了刀片的磨损。但若将动定刀片中段间隙调小, 则由于自

重, 刀尖就会发生粘着磨损。

#### 14.3.2.2 技术条件与选材

GB1211 规定: 收获机动定刀片应采用 T9 钢等温淬火或 45 钢渗硼、20 钢和 15 钢碳氮共渗制造, 淬火区硬度: 光刃动定刀片 50~60HRC, 齿刃动定刀片 48~58HRC, 非淬火区硬度均不高于 35HRC; 淬火区内不得有脱碳层。

实际生产中渗硼或碳氮共渗仅用于定刀片。动刀片渗后淬火变形大, 很少采用。从环保角度看渗硼也不应提倡。生产中还常用 65Mn 作为 T9 钢代用品, 但从耐磨性看过共析的 T9 优于 65Mn 钢。实践还证实, 冷轧钢板碳化物细小, 球化良好, 晶粒较细, 脱碳层薄, 制成的刀片质量高。

国外大量生产的收割机刀片所用材料与我国相似, 多为高频加热淬火。美国有人认为等温淬火后组织为 M 与 B 各 50% (体积分数), 既可达 61~62HRC 高硬度, 又有较高抗冲击性能, 可使割草机刀片寿命提高 1~2 倍。欧美国国家有的齿刃刀片用约 50 号钢制造, 淬火硬度低于 50HRC, 大约是为了产生自磨刃。为防锈蚀和美观, 有的刀片表面镀铬, 厚约 0.01mm。对割草机刀片, 日本有用复合钢材生产的; 美国用铬基合金堆焊, 据说可提高寿命 2~5 倍; 前苏联用高频加热渗硼, 得到的是共晶组织, 其韧性比硼化铁高。

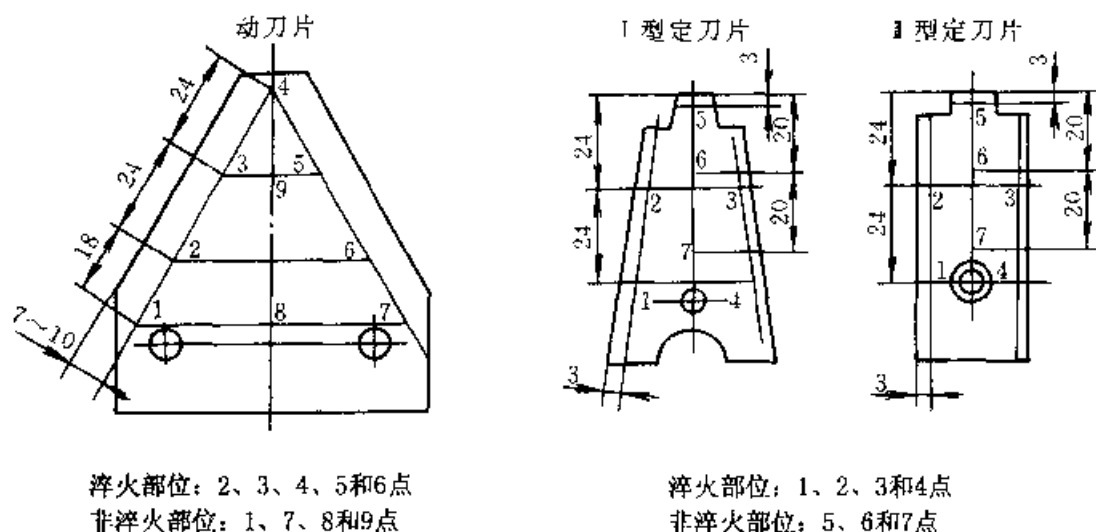


图 14-24 收割机刀片简图、淬火区和硬度测定部位

表 14-19 刀片热处理工艺规范

材料	淬 火				回 火		硬度 (HRC)
	设备	预热温度/°C	淬火温度/°C	冷 却	温度/°C	时间	
T9 65Mn	GP60 高频炉	570~600	880~900	230~250°C 硝盐 60min 260~280°C 硝盐 60min	220~240	60min	55~58 53~57

注：1. 高频加热时刀片采用人工上料，自动推进。淬火加热用两个并联感应圈，第一感应圈用于预热，进入第二感应圈完成最后加热。预热与加热共约 3s。加热完毕刀片自动落入等温淬火槽内。

2. 硝盐等温淬火槽内放 6 个铁丝料筐，由电动机带动每 10min 转 60°角，60min 转完一周。取出筐内刀片，空冷到室温后热水清洗。

### 14.3.2.3 热处理工艺

国内各厂均采用高频加热，等温淬火工艺。现将海拉尔牧机厂飞鹿牌刀片热处理工艺规范介绍于表 14-19。

梅敦等对割草机刀片耐磨合金喷涂作了系统试验，其结果表明：

(1) 刀片基材以 65Mn 较好。

(2) 采用中国矿冶研究院生产的合金粉末，2/3Ni60+1/3(Ni-WC)粉末。用氧-乙炔火焰喷涂于刀片底面。喷涂层厚以 0.08~0.13mm 为好。

(3) 刀片喷涂后经 820°C 淬油，300°C 回火 30min。基体 53~54HRC，喷涂层约 62HRC。这样耐磨层与基体磨损率之比最合适，刃口厚度可较长时间保持 0.08~0.11mm 之间，实现了自磨刃。

该工艺由于是手工喷焊，如要大批量生产，尚需解决机械化、自动化问题。

### 14.3.3 秸秆还田机刀片的热处理

#### 14.3.3.1 服役条件与失效方式

农作物秸秆切碎还田有利于改良土壤，可以沤肥，还避免焚烧秸秆带来空气污染，应大力提倡。秸秆切碎装置可以是谷物联合收割机中的一部分，当谷物籽粒脱出后，随即将秸秆切碎抛洒农田中，犁耕时翻到土壤下面沤肥。秸秆切碎还田机也可以单独使用。其切割机构有两种，一种是将动刀片装在旋转的刀盘上与固定刀片组成切割副，将喂入的秸秆切碎；另一种是刀片装在高速旋转的刀轴上，靠离心力使刀片甩出，砍切秸秆。动刀

片如图 14-25 所示。

谷物秸秆表面沾砂土，细胞内又含植物硅酸体，所以刀片磨损严重。遇上混入的粗砂粒、小石子，轻则崩刃，重则断裂。甩刀作业时经常受到较大冲击，刀片断裂严重。

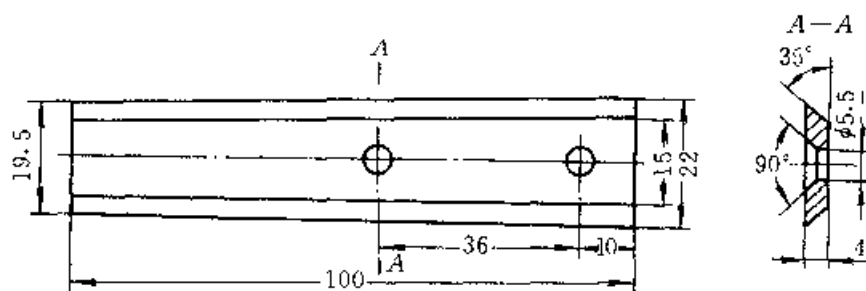


图 14-25 JG-120 型秸秆还田机动刀片

#### 14.3.3.2 技术要求与选材

刀片除要求高硬度、高耐磨外，还要有足够强度和韧性，以防断裂、崩刃。切碎玉米、高粱等老秆粗而表皮硬、切割阻力大的秸秆时，强度应有保证。而甩刀刀片对冲击韧度的要求很高。有人测定 4JF-150 型秸秆还田机甩刀，其  $\alpha_K$  值应  $\geq 155J/cm^2$ 。

根据服役条件和技术要求，对刀盘式有支承切割的动、定刀片可用碳素工具钢或 65Mn 制造；甩刀刀片则常用 65Mn 或 50CrVA 弹簧钢生产，并经等温淬火提高韧性。

南方气候潮湿，稻草沾附泥砂较重，韧性特好，难切断，刀片易锈蚀。北京钢铁研究院和上钢五厂曾选用 G8Cr15 中碳轴承钢 ( $w(C)0.75\% \sim 0.85\%$ ,  $w(Si)0.15\% \sim 0.35\%$ ,  $w(Mn)0.20\% \sim 0.40\%$ ,  $w(Cr)1.30\% \sim 1.65\%$ ,  $w(S) \leq 0.02$ ,  $w(P) \leq 0.027$ ) 制成刀片，取得很好效果。无论刀片锋利度还是耐磨性均大幅度超过 45 钢渗硼刀片，用铬钢防锈性能也得到改善。

ZB B93008—88 对甩刀式切碎机切碎刀片(图 14-26)要求用 65Mn 钢制造,刃口 44~50HRC。这一硬度显然偏低,可能是为获得高韧性,而牺牲一点耐磨性之举。我们推荐等温淬火,耐磨性和韧性均高得多。

### 14.3.3.3 刀片热处理工艺

秸秆切碎刀片热处理工艺见表 14-20。

ZB B93008—88 推荐 65Mn 刀片高频合金粉末堆焊强化,工艺是:高铬耐磨合金粉末堆放刀刃上,高频加热熔焊,合金层厚 0.3~0.8mm。金相组织为 A+M 基体上弥散分布 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 等碳化物。热处理后硬度:母材刃口≥40HRC,堆焊层 50~

60HRC。刃口应在堆焊层的反面即母材上开刃,可产生自磨锐效果。中国农科院工艺材料所经多次试验,最后推荐一种价格较低、耐磨性高、韧性好的铬铁基合金粉末,化学成分是: $w(C) 3\% \sim 5\%$ ,  $w(Cr) 15\% \sim 30\%$ ,  $w(Mo) 2\% \sim 6\%$ ,  $w(Mn) 0.5\% \sim 1\%$ ,  $w(Si) 0.4\% \sim 1\%$ 。高频加热堆焊温度:1270~1350℃。堆焊层组织为:奥氏体+马氏体基体(55~56HRC)上弥散分布着大量  $(Cr, Fe)_7C_3$  碳化物(1400~1800HV)和不连续分布的共晶碳化物(900~1300HV)。堆焊后刀片淬火一回火至 45~50HRC,可较长久保持自磨刃状态。

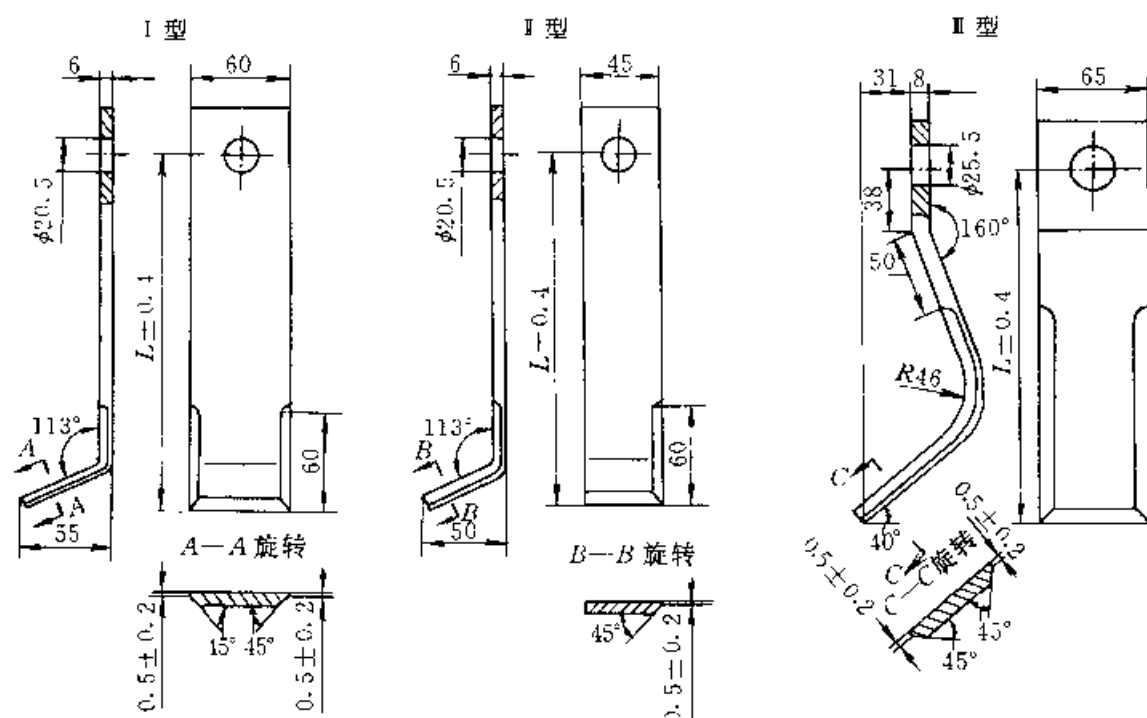


图 14-26 甩刀式切碎机刀片

表 14-20 秸秆切碎刀片热处理工艺规范

刀片类别	淬 火				回 火		硬度 (HRC)
	设备	温度/℃	时间/min	冷却	温度/℃	时间/min	
T8Mn 动刀片	盐浴炉	780~800	2	油淬	180~200	60	55~60
T8Mn 定刀片	盐浴炉	780~800	2	油淬	150~170	60	56~62
G8Cr15 动刀片	盐浴炉	830~850	2~3	油淬	150~170	60	60~63
65Mn 甩刀刀片 6~8mm 厚	盐浴炉	830~840	3~4	250~260℃ 硝 盐等温 30min	250~260	120	54~58
	箱式炉*	830~840	8~10				

\* 用箱式炉加热时,刀片需涂硼酸防氧化脱碳:刀片彻底脱脂油后,放硼酸饱和水溶液中煮沸 1~2min 取出,干燥后入炉加热。

\*\* 淬火前应先将原材料表面氧化脱碳层除尽。



### 14.3.4 铡草和青饲料切碎刀片的热处理

#### 14.3.4.1 服役条件与失效方式

铡草机和青饲料收获与切碎机统称为粗饲料加工机械。习惯上将用于切碎牧草、谷草、稻草、麦秸和玉米秆的机具称作铡草机，而将切碎青饲牧草和青储饲料的称为青饲料切碎机。小型铡草机主要用于铡草；大型的主要用于切碎青储饲料；中型铡草机则铡草和切碎青饲料两用。其切割部分主要有滚式切刀和盘式切刀两种。小型切碎机多用滚刀；大中型切碎机多用盘刀。两种切割装置均属有支承切割。

滚刀式切割器由安装2~6片动刀片的滚筒和底刃板（定刀片）组成。动刀片分螺旋刃口和直线刃口两种（图14-27a、b）。刀片刃口必须和底刃有 $18^\circ \sim 30^\circ$ 倾角，才能合理配合完成切割作业。动刀和底刃保持0.2~0.6mm间隙。切细软草料时

小，切粗硬作物时大。盘刀式切割器刀盘是一个圆盘或刀架，上面安装2~3片动刀片。动刀片刃口呈凹、凸曲线或直线形（图14-27c、d、e）。动刀片与底刃板间隙0.5~1mm。

刀片主要受作物自身的植物硅酸体和沾附泥沙的磨料磨损，还可能遇到夹杂较粗砂粒、石子、铁丝的冲击而崩刃，也有一些腐蚀磨损。

#### 14.3.4.2 技术要求与选材

铡草和切碎刀片要求刃口锋利、高硬度和高耐磨性，并有良好韧磨性，还要有足够的韧性和整体强度。设计时已注意到让刀刃逐渐切入，所以切割比较平稳。从提高耐磨性考虑，设计上常选用T9或65Mn钢制造刀片，也有用Q235钢为刀体，刃口镶焊65Mn钢的。刃口淬火带宽20~30mm，硬度58~63HRC，非淬火带硬度 $\leq 38$ HRC。刃口磨锐后厚度 $\leq 0.2$ mm，刃面角 $16^\circ \sim 26^\circ$ 。

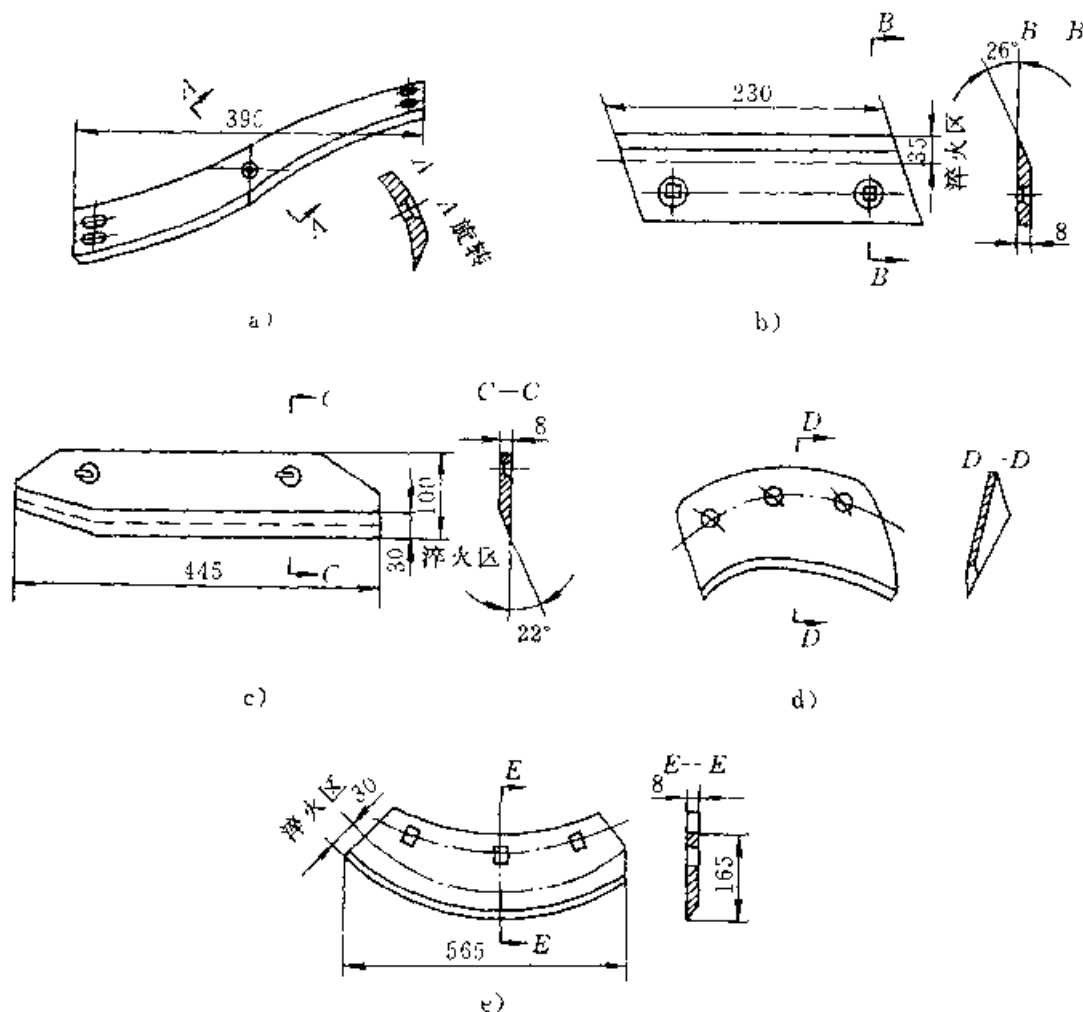


图14-27 几种常用切刀

a) 螺旋刃口滚式切刀 b) 直刃口滚式切刀 c) 直刃口盘式切刀 d) 凹刃口盘式切刀 e) 凸刃口盘式切刀

表 14-21 切碎机刀片热处理工艺规范

刀片类别	淬 火				回 火		硬度 (HRC)
	设备	温度 (°C)	时间	冷却	温度 (°C)	时间 h	
12 号动刀片	盐浴炉	180~200	1~3 min/min	油	180~200	1	53~54
	高频炉	800~810	试验确定	油或水			
T9 固定刀片	盐浴炉	180~200	0.5~1 min/min	玻璃	180~200	1	60~63
65Mn 动刀片	盐浴炉	180~200	1~3 min/min	油	180~200		58~61
	高频炉	880~910	试验确定	介质			
65Mn 定刀片	盐浴炉	180~200	0.5~1 min/min		180~200		60~63

注：1. 对单面开刃动刀片淬硬层达 1mm 即可，可用高频加热、油淬；对定刀片和两面开刃动刀片必须淬透，以保证刃磨后刃口高硬度。可视刀片厚薄采用油或水或玻璃溶液淬火。

2. 水玻璃淬火介质配制参看 11.2.2 节。

#### 14.3.4.3 热处理工艺

刀片厚 3~8mm，刃口局部淬入，最好采用感应加热或盐浴局部加热。如箱式炉整体加热局部淬火，则淬冷带要适当加宽，冷却时上下窜动，以免因热传导刃口部位冷速不够而产生软点。淬火后应立即送油浴炉回火。

刀片一般均采用单面开刃，为确保刀刃高耐磨性，应将刀片非开刃面的氧化脱碳层（包括原材料带来的）彻底除净，以免卷刃。

刀片热处理工艺见表 14-21。动、定刀片也可按 ZB B93008 推荐的耐磨合金堆焊强化工艺。详见 11.3.3 节。

### 14.4 农产品加工机械典型零件的热处理

#### 14.4.1 脱粒机弓齿、钉齿与切草刀的热处理

##### 14.4.1.1 服役条件与失效方式

脱粒机是用于将粮食籽粒从茎秆上剥离的装置。弓齿、钉齿和切草刀是脱粒机的主要易损件。脱粒机主要由脱粒滚筒和滚筒凹板组成。当一束稻捆或麦捆喂入脱粒滚筒时，靠滚筒和凹板上的

弓齿或钉齿对谷物穗头的冲击、梳理和揉搓作用完成脱粒。切刀则用来切断被滚筒带入围板内的茎秆，避免缠草现象，防止滚筒堵塞。由于作物茎秆沾附泥砂，谷物细胞中又富含植物硅酸体（稻壳中含量可高达 20%（质量分数）），因此弓齿、钉齿和切草刀受强烈磨料磨损。

根据脱粒机工作情况，弓齿又分梳理齿、加强齿和脱粒齿，都是用  $\phi 5\text{mm}$  钢丝弯制成不同形状。其中脱粒齿齿形最高，齿顶较尖，见图 14-28a。钉齿根据不同机型设计成各种形状，见图 14-29。切草刀刀片常用 3~4mm 厚钢板制成，见图 14-28b。刀片淬火后磨出刃口。

##### 14.4.1.2 技术要求与选材

弓齿、钉齿和切草刀都应有高硬度、高耐磨性，同时要有足够强度和韧性。JB/T 7868 规定：脱粒齿和加强齿用  $\phi 5\text{mm}$  65Mn 钢制成，淬火部位 45~55HRC；加强齿内齿可用 45 钢制成，淬火到 35~45HRC。

玉米脱粒机常用球顶方根的钉齿脱粒，用低碳钢渗碳淬火，硬度为 56~62HRC。

##### 14.4.1.3 热处理工艺

弓齿、钉齿和切刀热处理工艺见表 14-22（均局部加热淬火）。

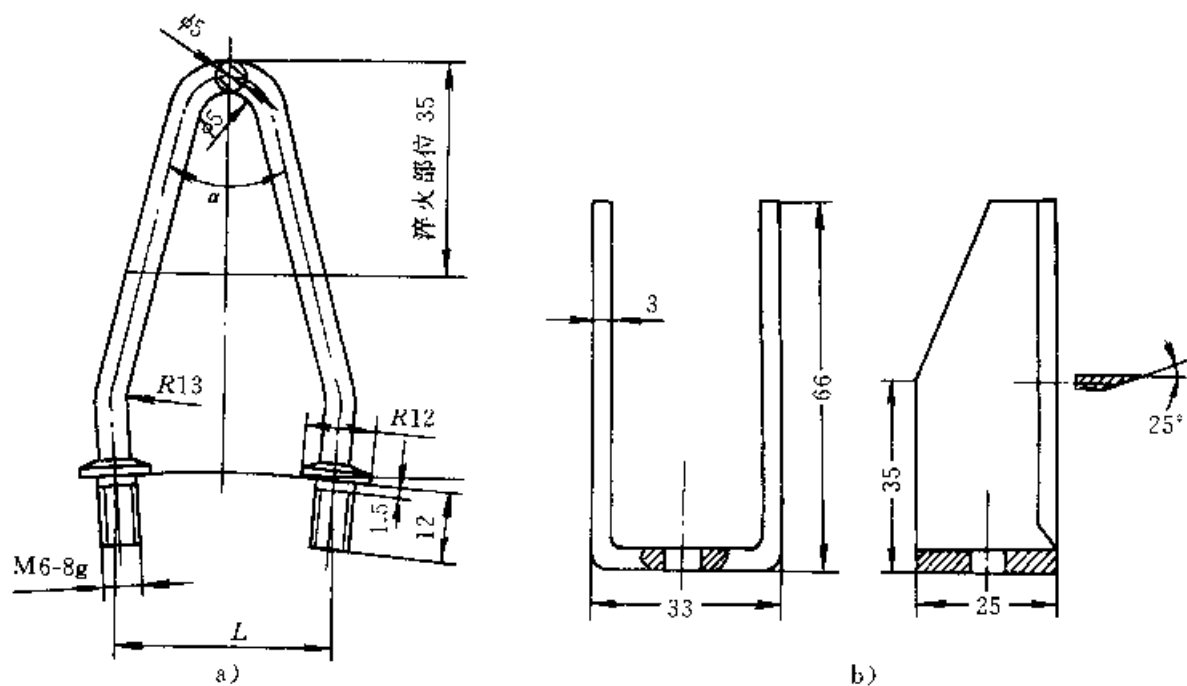


图 14-28 脱粒弓齿和切草刀

a) 弓齿 b) 切草刀

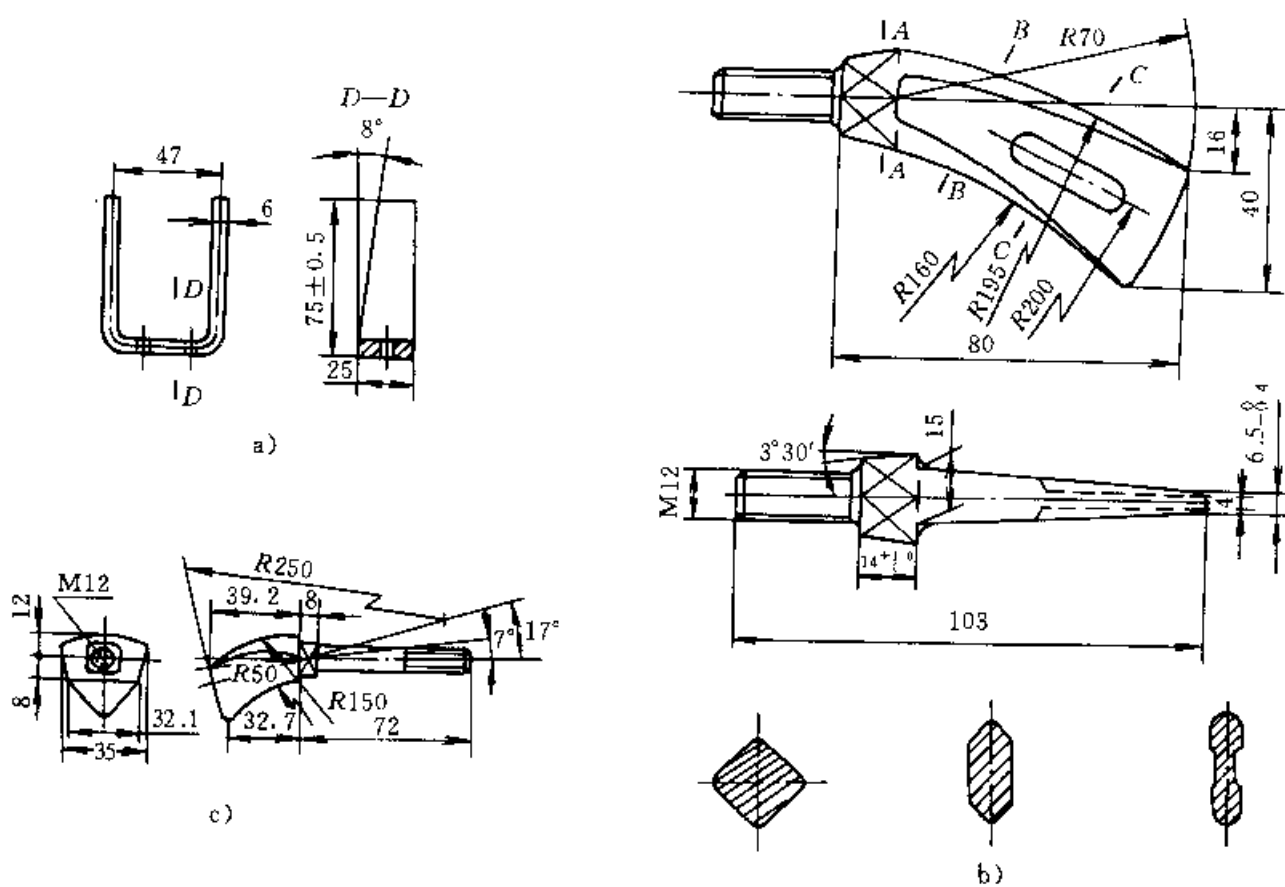


图 14-29 各种形状的脱粒钉齿

表 14-22 弓齿、钉齿和切刀热处理工艺规范

零件名称	材 料	淬 火				回 火		硬度 (HRC)
		设备	温度/°C	时间/min	冷却	温度/°C	时间/h	
弓齿	65Mn	盐 浴 炉	$840 \pm 10$	3	油	260~300	1	50~55
加强内齿	45		800~830	3	水—油	350~400	1	40~45
切草刀片	65Mn		$840 \pm 10$	2	油	200~250	1	55~60
钉齿	35		860~880	2~4	盐水	150~170	1	50~55
玉米脱粒钉齿	Q235 渗碳 1~1.2mm	渗碳炉**	$780 \pm 10$	2~3	水—油	180~200	1	56~62

\* 可用气体或固体渗碳，亦可碳氮共渗，工艺参看本章表 14-13 注释。

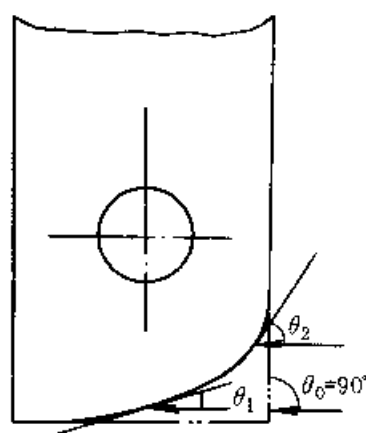
\*\* 可渗碳后出炉预冷淬火，亦可盐浴炉二次加热淬火。

## 14.4.2 粉碎机锤片的热处理

### 14.4.2.1 服役条件与失效方式

锤片是锤片式饲料粉碎机的主要粉碎零件，有时也用于粮食加工。全国每年消耗数亿片，是农机零件中消耗钢材最多的。作业时需加工的物料与线速度达 50~60m/s 高速旋转的锤片相撞击，物料打碎后，细粉通过筛片漏出，较大颗粒被筛片或白口铁铸成的齿板弹回，再度被锤片击碎。锤片则受物料的反复冲蚀磨损，工作一段时间，锤片一角磨秃，可掉换一面或掉头使用，直到 4 个呈 90° 的棱角均磨秃即告报废。

作业开始时物料对锤片的冲击角  $\theta_0 = 90^\circ$ ，随作业时间的推移，棱角逐渐磨圆， $\theta$  角也逐渐变小。而同一时刻锤片各点上的冲击角也不同，越接近顶端  $\theta$  角越小（图 14-30 中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ）。 $\theta$  变化，锤片磨损机理也发生改变。扫描电镜分析表明：物料打击到新锤片上， $\theta_0 = 90^\circ$  时物料中的硬质点（夹杂的砂粒或籽壳中的植物硅酸体等）将造成锤片表面塑性变形，出现凹凸不平的冲击坑。材料也将产生冷加工硬化，渐次变脆而剥落。随着锤片尖角变钝， $\theta$  角变小，垂直冲击坑逐渐变成斜向的凿削坑。甚至磨粒还在表面滑动一段，形成微观犁削的划痕。物料冲蚀材料表面时，磨粒运动前方的材料受到压应力，而其划过的后方则给材料留下拉应力。所以在冲击坑、凿削坑的尾部常留有横向裂纹。脆性材料更加明显。当  $\theta$  接近 30° 时，磨损几乎全变为犁削。锤片韧性较好时，磨损以微切削和凿削为主；脆性较大，则以脆性材料或材料中的脆性相断裂而造成材料的流失。

图 14-30 锤片及  $\theta$  角的变化

物料中的淀粉等软磨料，虽不能对锤片造成冲击坑、凿削坑和划痕，但大量磨料的撞击也使锤片表面产生应力疲劳。同时，软磨料的细粉会填塞在硬磨粒留下的坑及划痕中，等于给锤片敷上一层软垫，虽然减轻磨损，却大大降低粉碎效率，需要更换一角再用了。

### 14.4.2.2 技术要求与选材

锤片主要应耐磨料冲蚀磨损，还要有一定的强度和韧性。万一使用中断裂，必将筛片打碎甚至损坏设备。

SB/T 10118 规定：锤片用 (GB699) 20 或 25 钢渗碳淬火，56~62HRC；有效硬化层：锤片厚 3、4mm 为 0.5~0.8mm；锤片厚 5、6、8mm 时则为 0.8~1.2mm；安装孔周围 4mm 内硬度  $\leq 28$ HRC。实际生产中锤片的用材与热处理有：

(1) 65Mn 钢两端淬火或高频表面淬火。

(2) 20 钢或 Q235 钢渗碳或碳氮共渗淬火。据分析有的国外锤片即为 20Cr 钢碳氮共渗淬火。

表 14-23 锤片热处理工艺规范

工艺种类	化学热处理				淬 火				回 火		硬度 (HRC)
	设备	渗剂	温度/℃	冷却	设备	温度/℃	时间	冷却	温度/℃	时间/h	
气体渗碳	井式渗碳炉	煤油	920~930	通水的冷却	盐浴炉	780~800	0.3~0.5 min/mm	水淬 油冷	160~ 200	1	58~62
碳氮共渗	井式渗碳炉	煤油+氮	850~870	罐中冷却							
固体渗碳	箱式炉	固体 渗碳剂	920~930	开箱摊开 空冷	盐浴炉	780~800	1~1.2min /mm	水淬 油冷	160~ 180	1	54~58
					箱式炉	780~800					
65Mn 淬火	—	—	—	—	箱式炉	850±10	2~3s	硝酸盐 30min 空冷	160~ 180	1	56~62
					高频炉	880~910		油			

注：1. 渗碳和碳氮共渗时间视渗层厚度而定。

2. 固体渗碳剂可买配制好的商品，请见本章表 14-13 注释。

3. 硝酸盐等温温度为 260~280℃，然后空冷到室温，清洗后回火，得到 B<sub>F</sub>+M 组织。硝酸盐浴配方见本章表 14-8 注释。

(3) 45 钢渗硼或 Q235 钢先渗碳再渗硼，以提高过渡层硬度，使渗硼层得到较有力的支持。

(4) 45 钢调质 (22~28HRC) 后在 4 个角上堆焊耐磨合金。

(5) Q235 钢锤片浸渍到熔融的高铬铸铁中，表面浸挂一层耐磨铸铁，再进行正火，以获得较好的强韧性配合。

从使用情况看，凡经表面强化处理的锤片均比整体淬火的好。主要原因是：

(1) 无论经哪种表面硬化处理的锤片，除工艺不当脆性极大者外，其四角都较耐磨，能较长时间保持接近直角状态。而锤尖是线速度最高处，对饲料粉碎能力最强，延长  $\theta=90^\circ$  的时间，粉碎机效率就大大提高。

(2) 当锤片磨损，露出基材时，较软的基体容易磨凹，其两侧表面硬化层磨损慢而凸出，这时锤片因自磨锐效果而形成两个刀刃，提高了粉碎机效率。

渗硼锤片耐磨性高，也容易形成自磨锐的刃口。但渗硼层脆，碎屑带尖锐棱角，混入饲料或粮食中，在对人、畜的安全性未作出肯定结论之前，似不宜推广。

#### 14.4.2.3 热处理工艺

锤片常规热处理工艺见表 14-23。

#### 14.4.2.4 锤片特殊热处理工艺

肖永志等对 Q235 钢锤片渗碳与碳氮共渗结合，然后再高频淬火，表层得到细针状含氮马氏体

和少量残留奥氏体。生产考核证实，其寿命达到 20Cr 钢进口锤片水平。其热处理工艺见图 14-31，并说明如下：

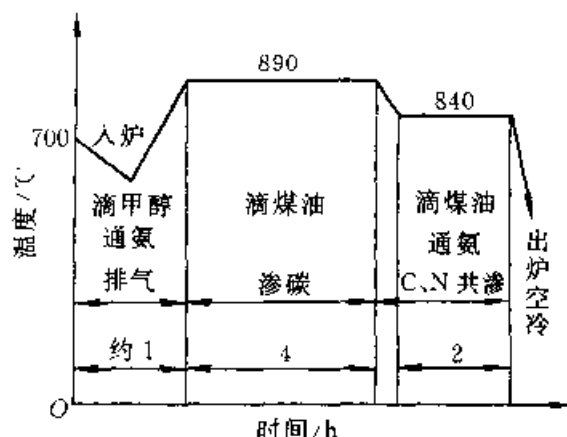


图 14-31 锤片先渗碳后碳氮共渗工艺曲线

(1) Q235 锤片先在空气炉内 300~400℃ 预热，这一步必不可少。

(2) 将渗碳炉先升温到 700℃，装入经预热的锤片，立即通氮气并滴甲醇排气。锤片随炉升温约 1h 可达 890℃。NH<sub>3</sub> 在 400℃ 以上可分解为活性 [N] 和 [H] 原子，[N] 可渗入钢表面。当锤片表面达 600℃ 时，[H] 可将锤片表面氧化膜还原，更加速 [N] 的渗入。渗 N 后降低了表层钢的 A<sub>1</sub> 点，扩大了 γ 区，在渗入一定量 N 的同时，为下一步渗 C 打下基础。

(3) 炉温到达 890℃ 即停氮和甲醇，改滴煤油渗碳 4h，渗层约 1mm 厚。

(4) 降温、通氮、滴煤油，在 840℃ 碳氮共渗

2h, 这时渗层加深到约 1.4mm, 表面可形成适量碳氮化合物, 以提高耐磨性。

(5) 890℃ 渗碳心部组织尚未粗化, 出炉空冷后心部相当于正火, 韧性较高。如直接淬火, 则表层马氏体较粗, 韧性较差。

(6) 共渗后锤片采用高频淬火: 830~860℃, 视锤片大小加热 6~8s, 喷水冷却 3.5~6.5s, 心部组织无变化。

(7) 淬火后立即 160~170℃ 回火 2h, 硬度 60~64HRC,  $A_K$  值从共渗后直接淬火的 6J 左右, 猛升至 96~110J。

### 14.4.3 筛片的热处理

#### 14.4.3.1 服役条件与失效方式

筛片是粮食、油料和饲料加工中应用极广的零件, 也用于种籽清选和分级。服役中受谷物、饲料及夹杂的砂粒颗粒的撞击、摩擦而磨损, 还要抵抗物料冲击变形和破坏。

锤片粉碎机用筛片见图 14-32。筛片受高速飞射过来颗粒的冲击和冲蚀, 既要让细粉漏出, 又要将粗粒弹回, 接受锤片再次击碎。筛片受到的是冲蚀磨料磨损。万一劣质锤片断裂, 飞向筛片, 则将筛片击破而报废。

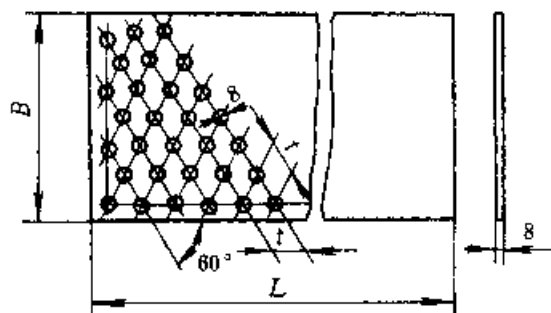


图 14-32 粉碎机用筛片

碾米机中筛片呈圆弧形, 又称瓦筛。在碾白室内, 受运动着的米粒还有谷壳、砂粒在高压下的强烈挤压和摩擦, 造成磨损。在热处理、校正、运输过程中, 特别是安装到碾米机上时, 经常受到敲击、板扭, 因而筛片工作前已存在一定内应力, 其失效主要是磨损和断裂。

#### 14.4.3.2 技术要求与选材

因筛孔全都是冷冲成形, 所以筛片普遍采用冷冲性能好的低碳钢板制造。粉碎机筛片工作中受物料的强烈摩擦和冲蚀、撞击, 要有较高表面硬度和耐磨性, 心部还要有较高强度与韧性。碾米机筛片较薄, 除要求表面高耐磨性外, 还要有足够强韧性, 保证在承受较大安装应力和工作应力时不致断裂。清选用筛片工作负荷较轻, 常用镀锌薄板制成, 不经热处理就用。粉碎机和碾米机筛片必须热处理。圆弧筛片热处理后还要压平, 作脆性检验, 松开后检查, 内外表面不得产生裂纹。

GB3943 附录 A 中, 对筛片热处理和技术要求有如下规定:

a) 碳氮共渗: 表面硬度  $\geq 550\text{HV}_1$ ; 渗层深度 70~170 $\mu\text{m}$ 。

b) 软氮化(应为氮碳共渗): 化合物层硬度  $\geq 450\text{HV}$ ; 化合物层深度 6~15 $\mu\text{m}$ ; 允许表面有不超过化合物层深度 1/3 的少量点状疏松。

c) 低碳马氏体处理: 推荐用 Q235 或 20 钢低碳马氏体淬火, 表层磨去 0.15mm 后检验硬度  $\geq 68\text{HRA}$  (约 35.5HRC); 非马氏体组织  $\leq 5\%$  (体积分数)。

#### 14.4.3.3 热处理工艺

筛片热处理工艺见表 14-24 和图 14-33。

表 14-24 筛片热处理工艺规范与要求

筛片品种	设备	热处理工艺	回火工艺	组织与硬度
20 钢米筛	箱式电炉	(920 $\pm$ 10)℃ 加热 8~10min, $w$ (盐水) 10% 淬火	(160~180℃) $\times$ 1.5h	板条 M (非 $\phi$ (M) $\leq 5\%$ ) 38~45HRC
20 钢粉碎机筛片	气体渗碳炉	氮碳共渗, 工艺曲线见图 14-33a	—	化合物层 8~24 $\mu\text{m}$ , 扩散层 0.12~0.2mm, $\geq 500\text{HV}$
Q235 钢米筛	气体渗碳炉	650℃ 氮碳共渗见图 14-33b	200℃ $\times$ 4h	表层 $\epsilon + \gamma'$ 约 25 $\mu\text{m}$ , 次表层含氮马氏体约 20 $\mu\text{m}$ , 表层 45~100 $\mu\text{m}$ , 800~1000HV

\* 负荷较轻的筛片, 低碳 M 淬火后可不回火, 其耐磨性更高。

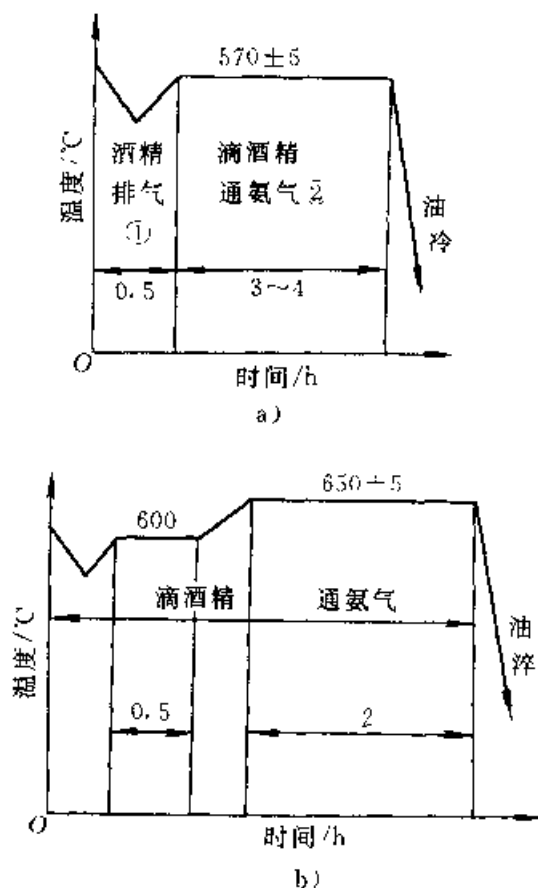


图 14-33 二种筛片热处理工艺曲线

a) 氮碳共渗 b) 奥氏体氮碳共渗淬火

- 注 1. 排气阶段酒精用量: RJJ-35 炉 4.8mL/min; RJJ105 炉 5.6mL/min.
2. 氮碳共渗阶段: RJJ-35 炉 (105 炉) 滴酒精 1.2mL/min (3.2), 通氨气 420L/h (1000), 炉压 800Pa.
3. 650°C 已在 Fe-C-N 三元共析点以上, 故称奥氏体状态氮碳共渗。出炉油淬, 次表层含氮奥氏体转变成含氮马氏体, 其下是含氮铁素体过渡区, 心部为铁素体和少量珠光体。200°C×4h 回火, 至关重要, 可使  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>-<sub>3</sub>(N, C) 化合物层沉淀析出  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>(N, C), 硬度进一步提高, 使 800~1000HV 的总硬化层达到 45μm 以上。

#### 14.4.4 颗粒饲料压粒机环模与压辊的热处理

##### 14.4.4.1 服役条件与失效方式

颗粒饲料压粒机是用于将粗育饲料(如草粉、秸秆粉、鸡粪、谷物粉及营养添加剂)混合均匀, 并压成颗粒以便于运输、储藏的机械。环模与压辊成副使用, 其工作情况见图 14-34。GB10828 规定, 压粒机环模内径  $\phi 200 \sim \phi 500$ mm, 壁厚 30~

70mm。模孔  $\phi 1 \sim 25$ mm, 或 25mm×25mm 与 30mm×30mm 方孔(小粒用于喂鸡、鱼和科研用小鼠, 大粒用于大牲畜越冬或抗灾)。环模与压辊工作时间隙仅 0.1~0.3mm。混合好的粉状饲料送入环模, 环模旋转时粉料进入间隙和模孔, 带动压辊旋转, 将粉料压入孔内, 越压越紧, 从模孔挤出时成为致密的条棒, 经刮刀切断成颗粒饲料。

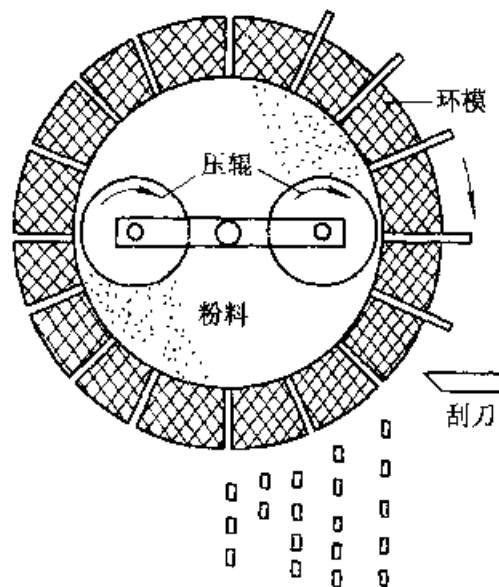


图 14-34 环模与压辊工作示意图

据实测, 压粒时粉料含水约 13%~15% (质量分数), 压模和压辊温度 80~100°C。隔着粉料, 二者在接触点上, 环模内壁受最大张应力(接触点为压应力), 而压辊壳体则受最大压应力。压强为 130~150MPa。周而复始环模和压辊将发生接触疲劳磨损。模孔则受饲料的强烈磨料磨损。当环模内径变大, 压辊外径变小时, 可对间隙适当调整。但过度磨薄、失圆或模孔磨穿时, 就要更换报废。某些饲料和添加剂在蒸汽熟化时, 会产生一些腐蚀性成分, 使环模和压辊受腐蚀磨损。

##### 14.4.4.2 技术要求与选材

ZB B93020-90 规定: 环模应选用  $\sigma_s \geq 600$ MPa,  $\sigma_b \geq 350$ MPa,  $a_K \geq 50$ J/cm<sup>2</sup> 的材料制造。热处理后要求见表 14-25。

环模和压辊热处理后均应清除氧化皮, 并装机试运行。用带油的物料压粒, 将模孔磨光, 直到用不带油的饲料压制时能出粒畅通为止。

环模上要钻数以千计的小孔, 所以材料应有良好的被切削性能。热处理后还要有高耐磨性和足够的强韧性。ZB B93021 规定: 环模用低碳合金

钢渗碳,而对压辊壳体要求用GCr15(YJZ84)制造。分析表明:丹麦产环模和压辊壳体均用不锈钢制造。正常工况下每生产1t产品,环模内径和压辊外径约磨损0.005~0.01mm(压谷物磨损小,压草粉磨损大),而美国产环模则用高淬透性表面硬化钢AISI9310钢( $w(C) 0.12\%$ ,  $w(Cr) 1.58\%$ ,  $w(Ni) 3.30\%$ ,  $w(Mo) 0.12\%$ )制成,渗碳层深1.5~1.6mm,表层硬度56~57HRC,基体36~32HRC,  $\sigma_s 1000\sim 1100MPa$ ;压辊壳体用淬透性高、可焊性极好的AISI8630钢( $w(C) 0.32\%$ ,  $w(Mn) 0.89\%$ ,  $w(Ni) 0.53\%$ ,  $w(Cr) 0.51\%$ ,  $w(Mo) 0.16\%$ )制造,表面喷涂含WC颗粒的耐磨合金,既提高耐磨性,又加大摩擦系数以利于

将饲料带入模孔。

根据我国国情,建议对小尺寸环模和大厚度压辊采用GCr15SiMn钢(YJZ84)制造;尺寸较大的环模用25MnTiB或25MnTiBRE(GB3077)渗碳制造;对热喷涂WC的压辊壳体可用42CrMo钢(GB3077)生产。

#### 14.4.4.3 热处理工艺

环模制造工艺:毛坯锻造—机加工—热处理—清理及磨光。

压辊壳体制造工艺:毛坯锻造—机加工—热处理(淬火、回火或调质处理后喷涂耐磨合金)。

热处理工艺见表14-26和图14-35。

表 14-25 环模和压辊技术要求

品种规格	硬度(HRC)	深度/mm	检 验 要 求	工作寿命
整体淬火环模				
内径<350mm	52~58		按圆周将环模三等分,每一部分至少取3点测定硬度,各部分硬度值>4HRC	正常工况下不少于600h
内径≥350mm	50~56			
各规格渗碳环模	55~62	≥1.2		
整体淬火压辊	52~63	淬硬层≤1	一等分,各部测2点以上	不少于300h

表 14-26 环模、压辊壳体热处理工艺规范

品 种	淬 火				回 火 <sup>①</sup>		硬度(HRC)
	设备	温度/℃	时间 <sup>②</sup>	冷却	温度/℃	时间/h	
GCr15SiMn 小环模或壳体	箱式电炉, 硼酸保护 <sup>③</sup>	830~840 <sup>②</sup>	2~2.2 min/mm	带搅拌的油 <sup>④</sup> 或 二硝淬火介质 <sup>⑤</sup>	150~180 油浴	2~3	60~63
GCr15SiMn 压辊壳体	盐浴炉	830~840 <sup>②</sup>	0.7~1 min/mm				
4Cr13 不锈钢 环模或壳体	盐浴炉 <sup>⑦</sup>	760~790 预热 1000±20 淬火	1~1.5 min/mm	油淬或300~350℃ 硝盐等温 <sup>⑥</sup>	180~200	2~3	50~53 等温48~53
42CrMo 壳体调质	盐浴炉	840~860	0.6~0.8 min/mm	油淬	550~570	2	32~38
25MnTiBRE 渗碳环模	75kW 渗碳炉	渗碳工艺见图14-35 油淬			180~200	2~3	56~62 渗层 1.2~1.5mm

① 详见本章表14-20注释。

② 如用GCr15钢,淬火温度为840~850℃。

③ 淬火与回火均从炉温恢复到指定温度后开始计算保温时间。

④ 淬火用2号普通淬火油效果较好,或用L-AN10号与L-AN20号全系统损耗用油各半混匀,油温20~80℃,加搅拌。

⑤ 二硝淬火介质配方: $w(NaNO_3) 30\% + w(NaNO_2) 20\% + w(水) 50\%$ ,密度1.40~1.46g/cm<sup>3</sup>,26~80℃使用,加搅拌。

⑥ 回火用HG-21号气缸油油浴、硝盐浴或在空气循环炉中进行。如在箱式炉中回火,则取3h,工件不得在炉内堆放。

⑦ 环模模孔小 $\phi 8mm$ 时,尽量不用盐浴加热,以免熔盐进入小孔凝固,影响加热和冷却速度。加热时环模在盐浴中应上下窜动几次,使孔内熔盐流动。出炉淬火前应将孔中熔盐沥干。

⑧ 等温淬火硝盐可用 $w(NaNO_3) 55\% + w(NaNO_2) 45\%$ ,该硝盐浴亦可用于550℃以下回火之用。其余注释事项请看本章表14-14注释。



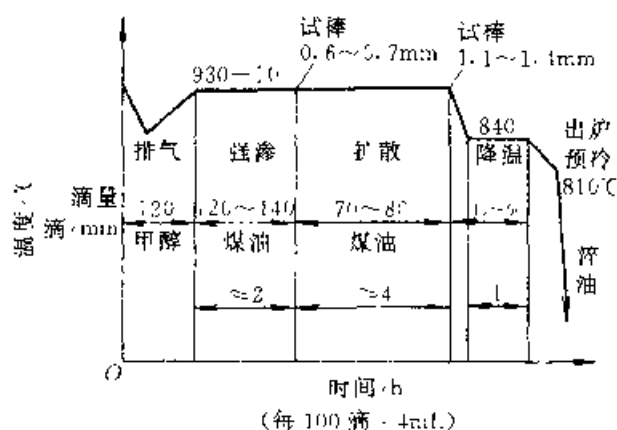


图 14-35 环模渗碳工艺曲线

### 14.4.5 轧棉花机、剥绒机锯片和肋条的热处理

#### 14.4.5.1 服役条件与失效方式

轧花机、剥绒机锯片和阻壳肋条是棉花加工机械的主要易损件。轧花是用旋转锯片的锯齿将籽棉上的棉纤维剥离下来。剥绒则是从已剥去纤维的棉籽上进一步剥下棉绒的过程。二者工作原理相同，见图 11-36。在 1533mm 长轴上，安装 110 片  $\phi 400\text{mm}$ 、厚 0.95mm 的锯片。安装时每片间隔 13.1mm，并应保持平行。要求锯片平面度  $\leq 0.5\text{mm}$ ，并有足够刚性。工作时轧花机内喂入一定量籽棉。旋转的锯片用锯齿钩住棉纤维，从工作箱内通过阻壳肋条的间隙将纤维拖出，棉籽被肋条挡住与纤维剥离。锯片和肋条受到棉花、棉籽、棉壳及混杂其中的砂粒、铁屑的严重磨损和阻力。齿尖截面积很小，局部应力较高，长时间反复作

用，将产生接触疲劳、塑性变形、磨料磨损与氧化磨损。

扫描电镜分析可见，工作一定时间后锯片刃口均已磨秃变圆，划痕累累；许多齿尖塑性变形反向弯成钩状；有的齿尖出现纵向与横向裂纹或断尖（图 14-37）。齿尖反向弯钩使钩抓纤维能力降低，并使钩住的纤维不易脱下，生产效率下降。齿尖受弯曲和疲劳应力会产生横向裂纹直到断尖。锯齿左右两侧所受阻力大小不同，使中间某一部分在剪切应力作用下疲劳开裂，发展成纵向裂纹。裂纹会使纤维嵌入，造成断丝，降低产品质量，同时也加快齿尖断裂，缩短齿的有效长度，增大齿顶面积（标准齿尖面积为  $0.2\text{mm}^2$ ）。这些都使锯片刺入和钩抓纤维的能力下降而应更换或修理。

#### 14.4.5.2 技术要求与选材

新锯片分  $\phi 400\text{mm}$ （380 齿）和  $\phi 320\text{mm}$ （304 齿）两种。一般轧花锯片工作一、二百小时，剥绒锯片工作一、两天就要将锯齿钝锉一次，以恢复其锋利，当断齿较多时就应报废。但还可车外圆后重新冲齿再用，通常可用到  $\phi 280\text{mm}$ 。所以，锯片不但要有足够刚性（以保持间距和平行）、强度和抗疲劳性能，还要有较高耐磨性。此外，锯片硬度又不能太高，以满足钝锉锯齿和车外圆后重新冲齿的要求。后者和前几项性能要求是相矛盾的。

GB5674 对轧花机、剥绒机锯片规定：

(1) 用 65Mn 或 55 钢 (GB699) 调质处理，表面洛氏硬度 23.3~32.7H<sub>RU</sub>、（约 246~298HV，23.5~31.3HRC）。

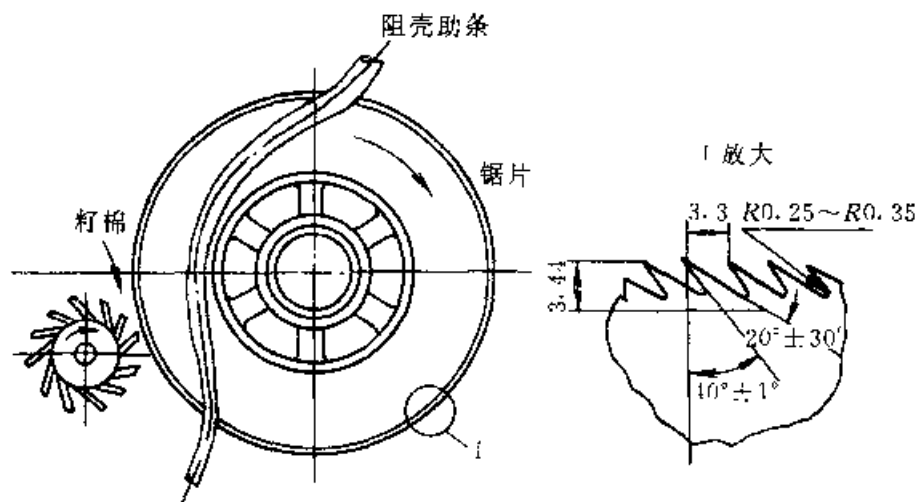


图 11-36 轧花机工作原理简图

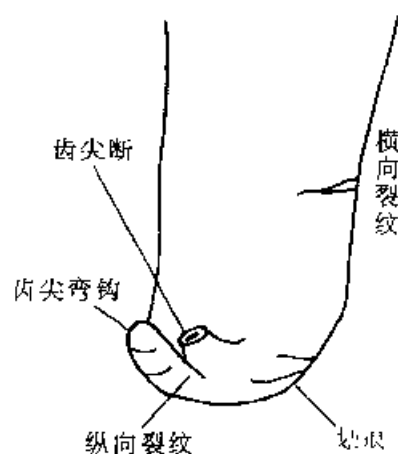


图 14-37 锯齿反向弯钩与裂纹

(2) 用 08F (GB699) 钢氮碳共渗, 要求:

a) 白亮层厚度  $\geq 0.01\text{mm}$ , 显微硬度  $\geq 509\text{Hm}$ , 扩散层中不得出现  $\text{Fe}_4\text{N}$  析出。

b) 力学性能:  $\sigma_b \geq 735\text{MPa}$ ; 整体硬度  $\geq 23.3\text{HR}_{15\text{N}}$ , 在距齿根  $5\sim 30\text{mm}$  的圆圈内均匀测定, 每片不少于 3 点。

NJ91 对轧花机肋条规定用 HT200 铸铁制造, 工作部位用激冷铸造, 表面硬度  $45\sim 55\text{HRC}$ ; NJ92 对剥绒机肋条要求用 45 号钢 (GB906)  $8\text{mm} \times 8\text{mm}$  冷拉方钢制造, 工作部位淬火  $35\sim 45\text{HRC}$ 。

#### 14.4.5.3 热处理工艺

与锯片相摩擦并造成其磨损的主要磨料, 是大量接触的棉纤维、棉籽、棉壳中存在的植物硅酸体 (约  $550\text{HV}$ ), 和少量混杂的砂粒、铁屑。前已论述, 只有材料与磨料硬度比  $\text{Hm}/\text{Ha}$  达到  $0.5\sim 0.6$  时, 耐磨性才有较大提高。据此, 锯片硬度应为  $275\sim 330\text{HV}$ 。因考虑锯齿修理和再生, 现行标

准规定的硬度较低, 其下限  $246\text{HV}$  不但不能抵御砂粒的磨损, 而且对大量硅酸体的磨损来说, 也显得软弱无力。我国科技工作者 70 年代试验成功锯片氮碳共渗, 为提高质量开创一条新路。氮碳共渗锯片化合物层硬度  $\geq 509\text{HV}$ 。对植物硅酸体  $\text{Hm}/\text{Ha}$  高达  $0.93$ , 对砂粒也达到  $0.5$ , 大大提高了耐磨性能。其扩散层又有较高的强度和抗疲劳性能, 约  $10\mu\text{m}$  厚的化合物层并不妨碍锯齿的钝挫或再生。同时低温氮碳共渗变形较调质淬火小得多, 防锈能力强, 可省去镀锌工序。美中不足是氮碳共渗锯片强度和弹性较高, 少量平面度超差的锯片, 校平较困难。

此后, 有的工厂也对剥绒机肋条采用氮碳共渗, 用 10 号钢冷拉方钢代替 45 号钢冷拉方钢, 取得减少工序、减少开裂变形废品及提高耐磨性的效果, 并已用于生产。

锯片与肋条热处理工艺见表 14-27, 工艺曲线见图 14-38 和图 14-39。

氮碳共渗设备为 RJJ-60 渗碳炉。通过图 14-10 输送装置, 定量投入预先压制成  $\phi 16\text{mm}$ , 每粒重约  $2.4\text{g}$  的尿素球。直流电动机经过 KZD-1 型晶闸管调速器, 经链轮带动送料装置运行。当装有尿素球的料斗内的转盘与进料管的圆孔对准时, 进料管中落入一颗尿素球。此时管的另一端被推杆轴封死。当凸轮转动  $180^\circ$  并带动推杆轴运动到轴上圆孔与进料管对准时, 尿素球落入推杆轴上小孔内、凸轮再转  $180^\circ$ , 推杆轴孔与送料管圆孔对齐, 尿素球即落入炉内。推杆轴的作用既输送尿素球, 又防止有毒炉气的泄漏。

表 14-27 锯片与肋条热处理工艺规范

零件名称	材料	热 处 理 工 艺 规 范	技 术 要 求
锯片 (调质处理)	55 钢	$(810 \pm 10)^\circ\text{C}$ 淬 $\text{CaCl}_2$ 水溶液 — $(550 \sim 600^\circ\text{C}) \times 1\text{h}$ 回火, 并压平	$23.3 \sim 32.7\text{HR}_{45\text{N}}$
	65Mn	$(830 \pm 10)^\circ\text{C}$ 淬油 — $(600 \pm 10)^\circ\text{C} \cdot 1\text{h}$ 回火并压平	
锯片 (N、C 共渗)	08F	$(530 \pm 5)^\circ\text{C}$ 氮碳共渗油冷, 见图 14-38	白亮层 $\geq 0.01\text{mm}$ 硬度 $\geq 509\text{HV}0.1$
剥绒肋条	10 钢	$(570 \pm 5)^\circ\text{C}$ 氮碳共渗油冷, 见图 14-39	白亮层 $\geq 7\mu\text{m}$ , $\geq 500\text{HV}0.1$ 扩散层 $\geq 15\mu\text{m}$

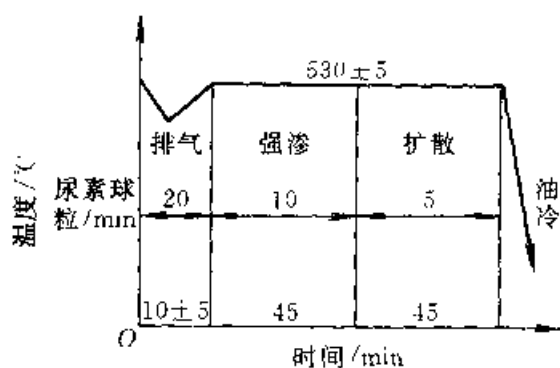


图 14-38 锯片 N.C 共渗工艺曲线

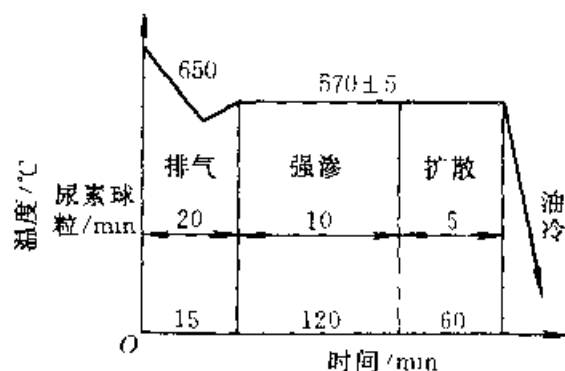


图 14-39 肋条 N.C 共渗工艺曲线

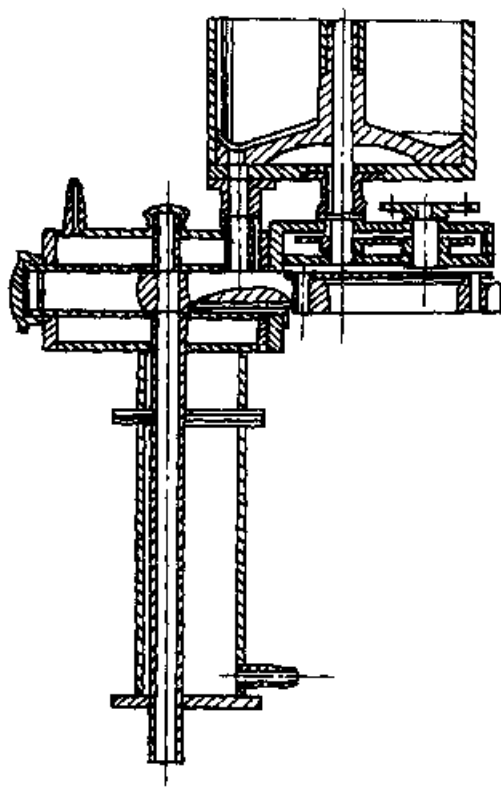


图 14-40 尿素小球输送装置

为减少锯片变形，吊挂的方式应使锯片有较大的自由度，以保证加热和冷却时锯片可以自由胀缩，尽可能减少机械应力的影响。出炉油冷可提高锯片抗疲劳性能，也可使锯片获得比水冷、空冷更小的变形。入油速度以  $1\text{m/s}$  时锯片变形最小。

#### 14.4.6 榨油机的榨螺的热处理

##### 14.4.6.1 服役条件与失效方式

螺旋式榨油机是我国应用最广的榨油机械。榨螺轴是关键件和易损件。榨油机榨膛结构见图 14-41。榨膛是由许多榨条或圆排组成的多棱体圆柱形空腔。榨螺轴旋转时，经过蒸炒的油料被推动向前，因榨膛与榨螺之间空间逐渐变小，油料不断被碾压破碎而榨出油液。在压榨区（Ⅲ区），榨螺工作温度常在  $160^\circ\text{C}$  以上，压力可达  $70\sim 140\text{MPa}$ 。这时油料已变为高度紧实的“不可压缩体”，油料及其中混入的砂粒等硬颗粒对榨螺产生强烈的挤压摩擦，使零件受到极严重的磨损。

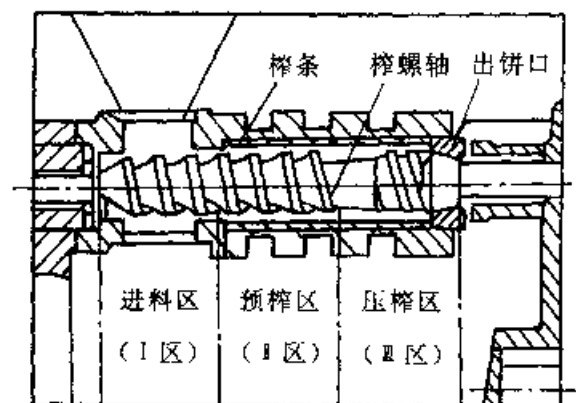


图 14-41 榨膛结构示意图

扫描电镜分析可见，榨螺表面布满微切削槽与犁沟，还有挤压坑。较低倍数下，可看到明显的顺油料运动方向，材料受碾压而发生塑性流动与材料堆积而形成的流变波纹。因塑性变形和加工硬化，导致犁沟和挤压坑边缘以及流变波纹的后方留下显微裂纹。油液因毛细管作用渗入裂纹中，下一次受挤压时形成油楔，促使裂纹扩展，加速材料剥落。剥落的高硬碎粒嵌在“不可压缩体”的油渣上，又去磨损前方的榨螺、榨条和出饼口。油料本身都含水分，高压油液和水分不断冲刷零件表面，还会造成冲蚀磨损与腐蚀磨损。榨螺磨损后，压榨区空间增大，压力降低，势必榨油不尽，效率降低，此时就要更换榨螺。由于第Ⅲ区负荷最

重,磨损最快,所以有的榨螺轴是由多节榨螺组合而成,以便随时更换磨损部分。小榨油机的榨螺轴则为一个整体。

#### 14.4.6.2 技术要求与选材

榨螺表面应具有高温下的高硬度、高耐磨性,心部应有高强度,还要有足够的韧性和抗疲劳性能。GB8933 规定榨螺(分段)用 20 钢经渗碳淬火,表面硬度 56~64HRC。但生产中大多用淬透性较高的 20CrMnTi 钢制成,有效硬化层深 1.5~2.0mm。使用中榨螺寿命仍然不能令人满意。渗碳层如出现网状或多角形碳化物,容易产生应力集中,成为裂纹源;如渗层次表层残留奥氏体过多,形成 $\leq 600\text{HV}$ 的“软带”,则会降低抗疲劳性能。分析还证明,一旦渗碳层被磨掉,则榨螺表面受推挤和碾压,产生的流变波纹与磨粒犁削划痕迅速增多,很快报废。

有的单位采用合金白口铸铁制造分段榨螺,有的用 GCr15 轴承钢料头和废轴承熔炼浇铸成榨螺,都取得较好效果。

#### 14.4.6.3 热处理工艺

20CrMnTi 钢榨螺工艺流程:锻造 $\rightarrow 950\sim 980^\circ\text{C}$ 正火 $\rightarrow$ 机加工 $\rightarrow$ 清洗脱脂 $\rightarrow 350\sim 400^\circ\text{C}$ 箱式炉中预热、预氧化 $\rightarrow$ 气体渗碳(见图 14-42) $\rightarrow$ 出炉推开,吹风快冷,防止析出网状 K $\rightarrow 350\sim 870^\circ\text{C}$ 加热油淬 $\rightarrow 150\sim 170^\circ\text{C}/3\text{h}$ 回火 $\rightarrow$ 清洗。

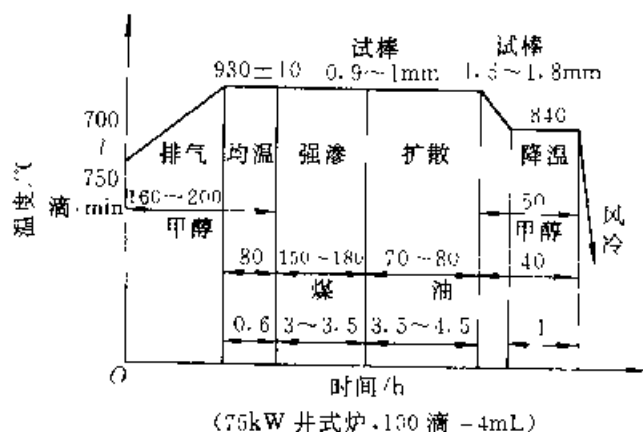


图 14-42 榨螺渗碳工艺曲线

金相检验:

(1) 渗碳层深 1.6~2.0mm,其中过共析+共析层占 50%~70% (体积分数)。

(2) 按 JB1673,  $M-A_n \leq 5$  级,  $K \leq 5$  级,心部  $F \leq 5$  级。

有效硬化层深度(测至 550HV1):  $DC=2.0$

~2.5mm。

表面硬度: 58~64HRC。

如果是分段榨螺,淬火时应套在图 14-43 夹具中,上面加一垫圈后淬油,以防变形开裂。

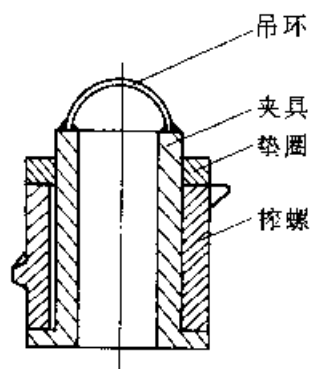


图 14-43 淬火夹具

## 14.5 小农具材料及其热处理

小农具一般是指手工用的各种小农具,如铁锹、锄头、锄板、镐头和镰刀等。这些小农具由于地区土质的差异和耕作习惯等不同,其形状、结构、大小等也随而不同,种类繁多。

这些小农具和机引农具一样,工作对象是土壤或各种农作物,条件比较恶劣,常受土壤的磨粒磨损,使刃口变钝;有时还受石块等硬物的冲击,引起机具的折断或崩刃。因此它们对材料的性能,要求应具有一定强韧性和良好的耐磨性。所以常选用较经济的碳素钢制造。有产品用复合钢板制造,有些产品(如锄头等)仍沿用古老的夹钢经锻焊而成,或用低碳钢制造并进行擦渗处理。擦渗工艺一般是在锻造红炉中进行。首先将要处理的锄板平置丁红炉的火坑中加热(上盖瓦片),然后把备好的渗料(一般是含碳量  $w(C)$  1.3%~4.4% 的共晶或过共晶的白口铸铁)放在锄板之上,一道加热,待温度升到 1200°C 左右,渗料就开始熔化,钢处于奥氏体状态,操作者用钩及时将渗料在锄板上来回刮擦。经过擦渗后的锄板,表面覆盖着一层很薄的白口铸铁,往里是过共析层、共析层、亚共析层组织。擦渗后再进行淬、回火处理,这样处理后的锄板刃口锋利、耐磨,并具有自磨刃性能。这种工艺是我国古老的热处理工艺(在《天工开物》中称为“生铁淋口”)自古以来即流传于民间,还流传到日本、南洋诸国,很受欢迎。

几种小农具选用的材料及其热处理列于表 14-28。

表 14-28 小农具用材料及其热处理工艺

产品名称	钢 号	处理方法	淬 火 回 火							硬度 (HRC)
			加热 设备	加热温度 ℃	保温时间 min	冷却介质	加热温度 ℃	保温时间 min	冷却 介质	
锄头、 锄板	B2、A3	1200℃ 单面擦渗	红炉或 高频	800~810	4~5	水	局部淬火、自身回火			>50
	45	普通淬火	盐炉	840	4~5	水	300~350	30	空气	40~50
	65+ B2 复合钢	普通淬火	盐炉	800~820	1~5	水油	300~350	30	空气	40~50
镐头	45、65Mn	普通淬火	箱式电炉	820~840	10~15	水油	250~300	30	空气	40~50
铁锹	45、50	普通淬火	箱式电炉	820~840	3	水	250~300	30	空气	
	B2、A3	高温快速 冷却淬火	箱式电炉	900~910	3	w(NaOH)10% 水溶液	100	30	空气	40~50
镰刀	刃钢: 45、65 本体: B2、A3	刃口夹(贴) 钢、局部淬火	红炉或 高频	820~840	3	水	局部淬火、自身回火			>50
	45、50、65Mn	普通淬火	箱式电炉	820~840	3	水油	250~300	30	空气	

## 参 考 文 献

- 邵荷生. 磨损机制及影响因素 [A]. 张清主编. 金属磨损和金属耐磨材料手册 [M] 第3章. 北京: 冶金工业出版社, 1991
- 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993
- Хрущов М. М. Principles of Abrasive wear [J]. Wear, 1974, 28 (1): 69~88
- Moor M. A. Abrasive wear by said [J]. Tribology International, 1975, 8 (3): 105~110
- 周平安等. 土壤磨粒特性对农机材料磨损性能的影响 [J]. 农业机械学报, 1986 (3): 54
- 热处理手册编委会. 热处理手册: 第一版、第二分册、第八章 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978, 2-370
- Сорокин Л. М., Яелокова Н. В. Механических свойств сталей На Их Износостойкость В условиях Трения Скольжения По Абразиву [J]. Метод, 1983 (9): 41~47
- 赵会友, 邵荷生等. 钢的力学性能参数对耐磨料磨损性能影响的研究 [A]. 林福严, 曲敬信, 陈华辉编. 磨损理论与抗磨技术 [C]. 北京: 科学出版社, 1993, 39~45
- 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 刘英杰, 周平安. 材料的磨料磨损 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 赵永武等. 钢摩擦磨损的概率统计模型 [J]. 摩擦学学报, 1992, 12 (4): 289~297
- 陈普, 赵冬梅, 邵尔玉. 轴承钢中贝氏体对接触疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理学报, 1990, 11 (4): 20
- 梅亚莉, 景国荣. GCr15 轴承钢贝氏体—马氏体复相组织的研究 [A]. 第五届全国热处理年会论文集, 天津: 天津大学出版社, 1991, 95~100
- 郭元钧, 黄继富. 65Mn 钢马氏体—下贝氏体复相组织和性能 [A]. 南京: 第四届全国热处理年会论文集, 1987
- 中国农机院材料工艺所. 磨粒磨损与抗磨技术译文集 [C]. 北京: 中国农机出版社, 1985
- 阎秉钧等. 奥氏体—贝氏体复相组织在模具中的应用研究 [J]. 金属热处理学报, 1995, 16 (4): 17~21
- Крательский П. В., Алиев В. В. Трение. Нагрузки. Вязкость Смазочных Справочник [M]. Москва «Машиностроение», 1978
- Sarkar A. D. Wear of Metals [M]. Pergamon Press Ltd. England, 1976
- 王频等. 单金属犁磨自磨刃形成机理探讨 [J]. 农业机械学报, 1998, 29 (2): 16
- 阎志醒, 孟昭宏. 农机具刃类零件自磨刃堆焊研究

- [J], 农机与食品机械, 1997, (1): 20~30.
- 21 李凌云, 张德英, 王翠兰, 犁铧的第一、二、三类自磨刃与DSZ犁铧[J], 农村牧区机械化, 1999 (1): 27~29.
- 22 黄建洪, 对锋利刀刃磨损机理、性能要求、组织和热处理工艺的探讨「A」, 临潼: 第三届全国热处理年会论文, 1982.
- 23 张际光等, 土壤对固体材料粘附和摩擦性能的研究, 农业机械学报, 1986, 19 (1): 32.
- 24 陈秉聪等, 传统犁壁材料脱土性分析研究, 农业机械学报, 1995, 26 (9): 46~49.
- 25 李健, 清洁生产与热处理, 国外金属热处理, 1996, 增刊: 1.
- 26 李凌云等, 65Mn钢犁铧锻造余热淬火, 金属热处理, 1993 (7): 48~50.
- 27 李凌云, 热处理对犁铧和犁壁牵引阻力的影响, 农牧与食品机械, 1994 (5): 31.
- 28 中国农机院, 农业机械设计手册(上、下), 北京: 机械工业出版社, 1996.
- 29 黄建洪, 王玉柱, 农机刀片的磨损机理和碳化物在磨损中的行为J, 中国机械工程, 1995, 6 (5): 15~18.
- 30 Suh N. P. Tribophysics, Prentice Hall INC, 1986.
- 31 王玉柱, 李俊, 黄建洪, 含氮马氏体化处理及其在剪毛机刀片上的应用[J], 包头钢铁学院学报, 2000, 19 (3): 208~211.
- 32 黄建洪, 刘东雨, 低合金刃具钢的麦块状索氏体化处理, 金属热处理, 1999 (1): 1~4.
- 33 段汝浩, 张辉晨, 65Mn制制刃刀的强化处理[J], 金属热处理, 1991 (6): 45.
- 34 磨损失效分析案例编委会, 磨损失效分析案例汇集「M」, 北京: 机械工业出版社, 1985.
- 35 肖永志等, 饲料粉碎机锤块的材料选择及热处理工艺[J], 金属热处理, 1993 (5): 35~36.
- 36 戈大钊等, 筛片的失效分析及热处理[J], 金属热处理, 1997 (4): 39~40.
- 37 张新月, 球状尿素气体氮碳共渗工艺在剥绒机肋条生产上的应用「J」, 铸锻热 热处理实践, 1991 (3): 45.

## 第 15 章 发电设备零件的热处理

东方汽轮机厂 林锦棠 刘显惠

发电方式很多,如火力发电、水力发电、风力发电及核动力发电等等,但目前仍以火力发电为主;另一方面,就发电设备来讲,也以火力发电最具典型性,因此,本章重点阐述火力发电设备的热处理。火力发电用设备包括锅炉、汽轮机与发电机三大部分。由锅炉产生的高压过热蒸汽使汽轮机运转,从而驱动发电机发电。

### 15.1 汽轮机转子和发电机转子的热处理

表 15-1 给出了汽轮发电机容量与汽轮机转子技术指标、钢锭和锻件的重量、材料屈服强度要求的情况。

表 15-1 汽轮机转子锻件的主要参数

机组容量 /MW	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	本体直径 /mm	钢锭重量 /t	锻件重量 /t	强度要求 $\sigma_{0.2}$ MPa
50	3000	865	70	34.5	440
100	3000	970	88	43.5	490
200	3000	1040	125	65.9	539
300	3000	1620	185	76	637
600	3000	1810	230	101.8	760
700	1800	2363	300	170	620*
870	1800	2640	400	137	586*
1100	1500	2620	570	292	620*

\* 处数字为  $\sigma_{0.02}$ 。

从该表可以看出,随着机组的大型化,转子锻件的尺寸和重量随之增加,要求材料的力学性能水平越来越高,对冶金质量与可靠性的要求亦不断提高。目前世界上制造大型汽轮机转子锻件的钢锭重量已达 600t,锻件直径已近 3m。钢锭越大,偏析越严重,内部缺陷也越多,通常的生产方式很难适应在高温、高压、高速条件下运行的电站设备对大型锻件各项苛刻的要求,因此,电站设备高质

量大型锻件的生产,有赖于电站用大锻件材料及整套制造技术,包括热处理技术的全面发展。

#### 15.1.1 汽轮机转子和汽轮发电机转子的服役条件及失效方式

1. 汽轮机转子和汽轮发电机转子的服役条件 汽轮机转子和汽轮发电机转子是发电设备的核心。汽轮机转子上带有若干整体叶轮或套装叶轮,叶轮上紧密镶嵌着若干叶片;而发电机转子则负载着两个护环及大量铜线。因此,对大容量机组来说,汽轮机转子或发电机转子整体重量约几十吨至几百吨,这样的大型件需要以 1500(半转速)~3600r/min 的高速度运转。而汽轮机高中压转子的运行条件则更为苛刻,除高速外,还有亚临界或超临界参数的高温、高压的过热蒸汽环境。

我国电站需求的大型汽轮机参数的类型已从亚临界快步跨入超临界阶段,汽轮机运行的蒸汽参数现阶段已从 16.7MPa/538℃ 亚临界状态发展至 24.1MPa/540~566℃ 的超临界水平,今后还要发展至 30.9MPa/593℃ 及 34.4MPa/619℃ 的超临界更高参数的蒸汽状态,因此,电站汽轮机转子将面临更为严酷的运行环境。

总之,汽轮机高中压转子受高应力、高温度的双重作用,而汽轮机低压转子及发电机转子则主要承受巨大的离心力及扭转力矩的作用。此外,调峰机组的频繁启动、停机或甩负荷还会给转子带来交替变化的热应力,汽轮机转子的中心孔及外圆表面的叶片安装部位、汽封部位会有可观的应力集中,从而使转子相应部位发生蠕变、热疲劳或二者的交互作用。

#### 2. 转子的失效方式

(1) 转子的脆性断裂 汽轮机、发电机转子的设计寿命以往通常是 10 万 h(10 年)以上,目前趋于延长至 30~35 年或更长的寿命,高速度旋转的转子的安全可靠度在电站设备部件中至关重要,它的失效会引起整台设备的报废或电站瘫痪。

在中国及世界各国电站中,偶尔发生的转子断裂失效是最为惨重的灾难性事件。

(2) 高中压转子的时效弯曲变形,由于转子中心线在制造中与原钢锭的中心线未保持同轴,或者转子因热处理不良,其金相组织出现了非轴对称性的情况,会使长期在高温下运行的转子因蠕变速率的区域性差异而发生转子的整体弯曲,使机组振动加大无法继续运行。

(3) 转子表面局部产生裂纹,转子由于材质中的 P、S、Si、Mn、Sn 等杂质元素在使用温度下,长期运行后向晶界迁移,使材质发生时效老化,出现脆性,而损害其运行的可靠性;转子中心及外圆表面的叶片安装部位,汽封部位等应力集中处易出现局部裂纹等。

如转子出现了后两种失效方式,也必须立即停机处理;否则,转子振动与开裂的严重后果均不堪设想。

### 15.1.2 转子用钢

我国发电设备用大型转子锻件用钢的标准,最初是 1972 年颁发的 JB1265~1271-72《电站设备大锻件技术要求》,后于 1985 年修订为 JB1265~1271-85 标准,目前已修订为 JB/T7027-93《300~600MW 汽轮机转子体锻件技术条件》等九份有关汽轮机、发电机转子大锻件的标准系列。从用于小型机组的普通碳钢转子到

大型机组铬钼镍钒合金钢转子,以及工业汽轮机转子锻件,标准上列出的锻件材料约有 10 余种之多,以下介绍其中主要的两类以及当今世界上两种新类型的转子锻件用钢。

1. 亚临界高、中压转子用钢(30Cr2MoV 及 30Cr1Mo1V) 70 年代至 80 年代初,我国发电设备制造厂生产的汽轮发电机最大单机容量是超高压参数的 200MW,所用汽轮机大型高中压转子的常用材料是 30Cr2MoV 钢种,相当于前苏联的 P2 钢;80 年代后期及 90 年代生产的亚临界参数机组的单机容量已达 300~600MW,其高中压转子的材料为 30Cr1Mo1V 钢,相当于美国 ASTM A 470 第 9 级钢,即 1Cr-1Mo-1/4V 钢,由于该钢优良的工艺性能及高温性能,故已成为美国、日本、欧洲各国及我国广泛使用的、亚临界参数机组通用的高中压转子用钢。

两种亚临界参数高中压转子用钢的化学成分见表 15-2,力学性能要求见表 15-3。

亚临界高、中压转子运转的环境温度为 525~560℃ 的过热蒸汽,故要求:

① 材料应具有一定的高温持久强度和蠕变强度性能。

② 为了便于制造,材料应具有良好的工艺性能,如冶炼、锻造、热处理等加工性能,以便在大截面锻件中获得均匀的组织及优良的综合力学性能。

表 15-2 高中压转子用钢的化学成分(质量分数)

(%)

钢 号	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S	Cu	引用标准
30Cr2MoV	0.22~0.32	0.50~0.80	0.30~0.50	1.50~1.80	0.80~0.80	0.20~0.30	≤0.015	≤0.018	≤0.20	JB1265-85
30Cr1Mo1V	0.27~0.34	0.70~1.00	0.17~0.37	1.05~1.35	1.00~1.30	0.21~0.29	≤0.012	≤0.012	≤0.15	JB/T7027-93

注: 30Cr1Mo1V: Al≤0.010 Sn≤0.015 Sb≤0.0015 As≤0.020。

表 15-3 高中压转子的力学性能要求

钢 号	部 位	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_L$ /MPa	$\sigma_1$ (%)	$\psi$ (%)	$A_{KV}$ J	$a_{KV}$ J·cm <sup>2</sup>	FATT <sub>50</sub> °C	上平台能量 J	引用标准
30Cr2MoV	轴端纵向	≥490	≥637	≥16*	≥40	≥49	≥39	—	—	JB1265-85
	本体径向			≥14*	≥35					
30Cr1Mo1V	本体径向 (轴端)	590~690	≥720	≥15	≥40	≥8	—	≤116	≥75	JB/T7027-93
	中心孔纵向 (横向)	≥550	≥690	≥15	≥40	≥7	—	≤121	≥47	

\* 皆为  $\sigma_b$ 。



③材料应具有良好的导热性能,以便发电机组在启动及停机时,转子内部的热应力较低等等。

30Cr2MoV 钢制造的 200MW 容量级的大型高中压转子,已广泛运行在国内许多大、中型电厂。这种钢高温性能好,但热加工性能差,其原因是 30Cr2MoV 钢铬含量较高,钢液粘,夹杂物不易上浮,经常因非金属夹杂物超标,或锻造裂纹严重而报废。而且大截面转子淬透性差,心部易出现贝氏体与铁素体的双相组织,造成转子体组织和性能的不均匀性。

30Cr1Mo1V 钢与 30Cr2MoV 钢相比,化学成分(质量分数)发生变化,铬含量由 1.5%~1.8% 降至 1.05%~1.35%,钒由 0.60%~0.80% 提高到 1.0%~1.3%,碳含量适当上调,锰含量由 0.50%~0.8% 提高到 0.7%~1.0%。从而使成分更为合理,保证了转子材料具有较高的高温蠕变和持久强度,大大改善了其热加工性能,提高了生产成品率。30Cr1Mo1V 钢从 80 年代起已取代 30Cr2MoV 钢,广泛用于大容量发电机组整锻高、中压转子的制造。

一般说来,对于 Cr—Mo—V 高、中压转子用钢,在具有同等室温抗拉强度的情况下,与其他显微组织相比,上贝氏体组织具有较高的持久和蠕变强度,如图 15-1 及 15-2 所示。其主要强化机理是上贝氏体组织具有弥散分布的碳化钒细微颗粒,使材料在长期的高温工作条件下保持了良好的组织稳定性。

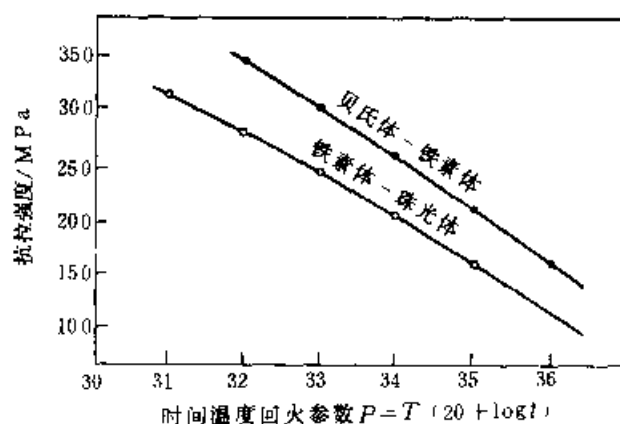


图 15-1 组织对 30Cr1Mo1V 钢持久强度的影响

30Cr2MoV 钢的 CCT 曲线见图 15-3, 30Cr1Mo1V 钢的 CCT 曲线见图 15-4,由此可见, 30Cr1Mo1V 钢为典型的贝氏体钢,30Cr1Mo1V 钢的调质通常采用鼓风冷却淬火。近年来,国外对 30Cr1Mo1V 钢采用油淬增加冷却速度,使实际生产的高中压转子的 FATT、(即断口形貌脆性转变温度)降低到了 10~48°C,而高温持久强度的水平保持不变,从而提高了高、中压转子低温段的塑性,可以使汽轮机转子在电站热启动时的暖机时间大为缩短。

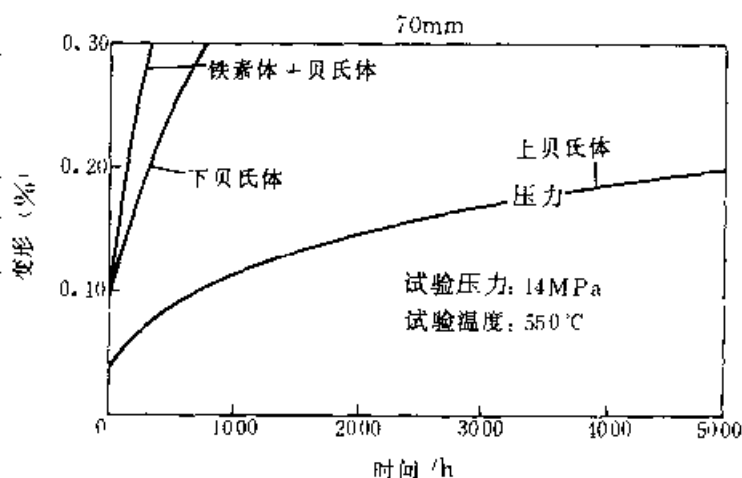


图 15-2 相变产物对 30Cr1Mo1V 钢蠕变性能的影响

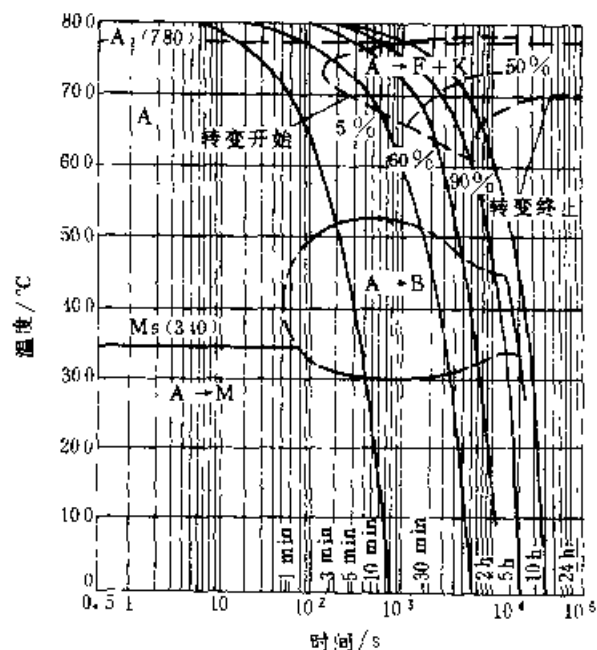


图 15-3 30Cr2MoV 钢的 CCT 图  
成分(质量分数)(%): C 0.26, Mn 0.4  
Si 0.31, Cr 1.65, Mo 0.63, V 0.28

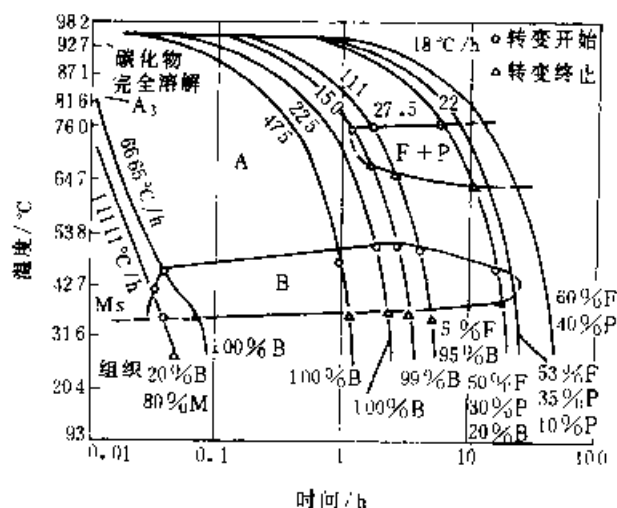


图 15-1 30Cr1Mo1V 钢的 CCT 图

成分(质量分数)(%): C 0.32, Mn 0.74, Si 0.23

Ni 0.34, Cr 1.04, Mo 1.20, V 0.21

2. 汽轮机低压转子与发电机转子用钢  
34CrNi3Mo 和 30Cr2Ni4MoV 34CrNi3Mo 钢用于 50~200MW 容量级低压主轴与发电机转子。由于该钢含碳量高,淬透性欠佳,不宜采用激烈的

水淬和快冷工艺,尤其是中心部位 FATT 较高,达 60~90°C,高于汽轮机低压转子与发电机转子的服役温度,限制了该钢的应用范围与大尺寸转子锻件的制造。30Cr2Ni4MoV 钢属于低碳的 2%~1%(质量分数)NiCrMoV 钢,即 ASTM A470 的 5、6、7 级钢( $w(C)$  从 0.30%~0.40%降为 0.20%~0.35%),该钢可采用大水量喷水的快冷淬火工艺,其锻件最大截面即使在 2000mm 以上,也可保证在锻件淬火后,其心部组织基本上为贝氏体,具有高的强度、良好的塑性与低温韧性,其脆性转变温度 FATT 通常在室温以下。该钢被广泛用于叶轮与主轴为一体的超大型整锻低压转子锻件。

两种钢的化学成分及力学性能要求分别如表 15-1 及表 15-5 所示。发电机转子用钢 30Cr2Ni4MoV 的成分与力学性能与低压转子的用钢相近。

34CrNi3Mo 钢与 30Cr2Ni4MoV 钢的 CCT 曲线分别见图 15-5 及图 15-6。

表 15-4 汽轮机低压转子用钢的化学成分(质量分数)

(%)

钢 号	C	Mn	Si*	Cr	Ni	Mo	V
34CrNi3Mo	≤0.40	0.50~0.80	0.17~0.37	0.70~1.10	2.75~3.25	0.25~0.40	-
30Cr2Ni4MoV	≤0.35	0.20~0.40	0.17~0.37	1.50~2.00	3.25~3.75	0.30~0.60	0.07~0.15
	P	S	Cu	Al	Sn	Sb	As
34CrNi3Mo	≤0.015	≤0.018	≤0.20	—	—	—	—
30Cr2Ni4MoV	≤0.012	≤0.012	≤0.20	≤0.015	≤0.015	≤0.0015	≤0.020

引用标准: 34CrNi3Mo 为 JB1265—85, 30Cr2Ni4MoV 为 JB/T7627—93。

\* 采用真空碳脱氧时,硅≤0.10%。

表 15-5 汽轮机低压转子的力学性能要求

钢 号	部 位	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_{1.5}$ (%)	$\psi$ (%)	$A_{KV}$ J	$a_K$ J·cm <sup>-2</sup>	FATT <sub>50</sub> /°C	上平台能量 J	引用标准
34CrNi3Mo	轴端纵向	≥735	855~955	≥13	≥10	—	≥40	—	—	JB1265—85
	本体径向	≥735	855~955	≥11	≥35	—	≥30	—	—	
	中心孔纵向	≥685	≥810	≥10	≥35	—	≥30	—	—	
30Cr2Ni4MoV	本体径向 (轴端)	≥760	860~970	≥16	≥45	≥40	—	≤13	≥68	JB/T7627—93
	中心孔纵向 (横向)	≥720	≥830	≥16	≥45	≥34	—	≤27	≥54	

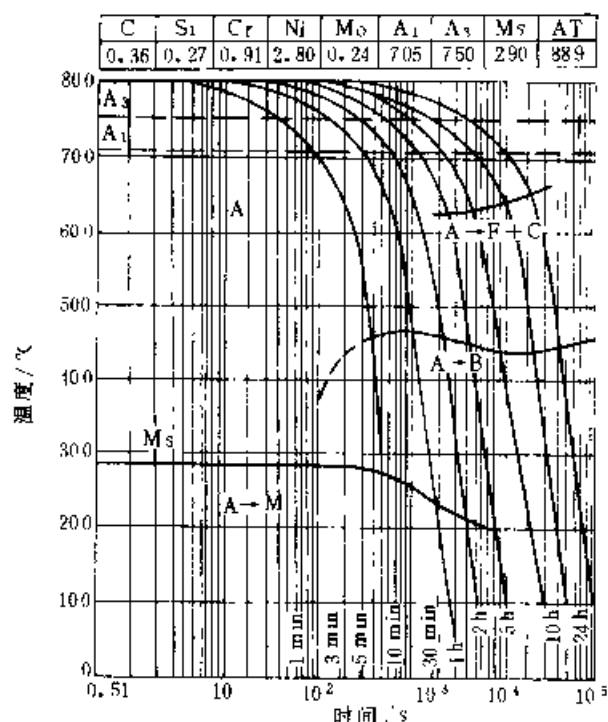


图 15-5 34CrNi3Mo 钢的 CCT 图  
成分(质量分数)(%): C 0.36, Si 0.27  
Cr 0.91, Ni 2.80, Mo 0.24

通常, 30Cr2Ni4MoV 钢的使用温度宜限制在 350℃ 以下, 因为该钢具有较强的回火脆性倾向, 在 350~575℃ 长期时效后, 其硅、锰将促进磷及有害的微量元素向晶界偏聚, 会导致 FAIT 显著上升, 使材料韧性恶化, 如图 15-7 及图 15-8 所示。近年来, 国外研制并生产出了超低硅、锰、磷、硫及有害元素含量的整锻低压转子锻件, 这些超净化钢杂质元素(质量分数)的控制目标为: Si: 0.02%, Mn: 0.02%, P: 0.002%, S: 0.001%, Sn: 0.002%, Sb: 0.0001%, As: 0.002%。

超净化的 30Cr2Ni4MoV 钢克服了 350℃ 以上长期时效后的脆化倾向, 且高温持久强度有所提高, 与该钢常规纯度转子材料相比, 有更好的应力腐蚀与腐蚀疲劳抗力及良好的低周疲劳性能。

超超临界发电机组低压转子的入口蒸汽温度达 150℃, 镍铬钼钒钢超净化低压转子的研制成功, 开拓了该钢作为耐 350℃ 以上温度的低压转子, 应用于超超临界高效率发电厂的使用前景。

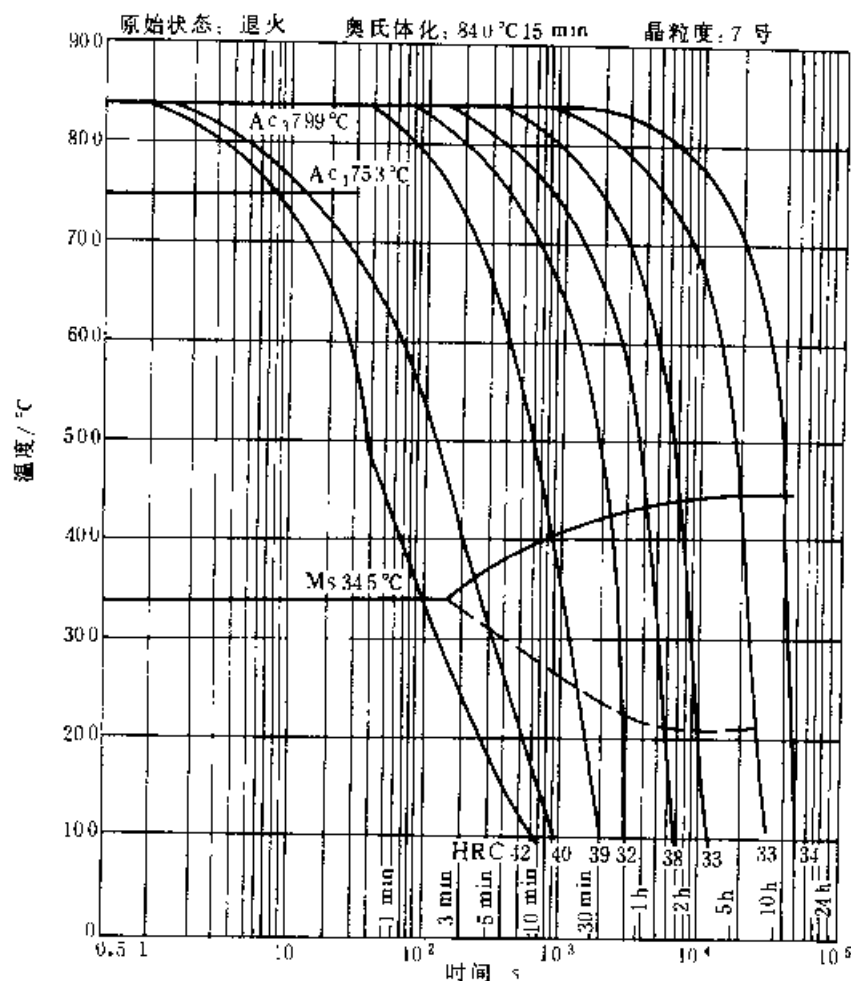


图 15-6 30Cr2Ni4MoV 钢的 CCT 图  
成分(质量分数)(%): C 0.26, Mn 0.28, Si 0.23  
Cr 1.63, Ni 3.31, Mo 0.45, V 0.11

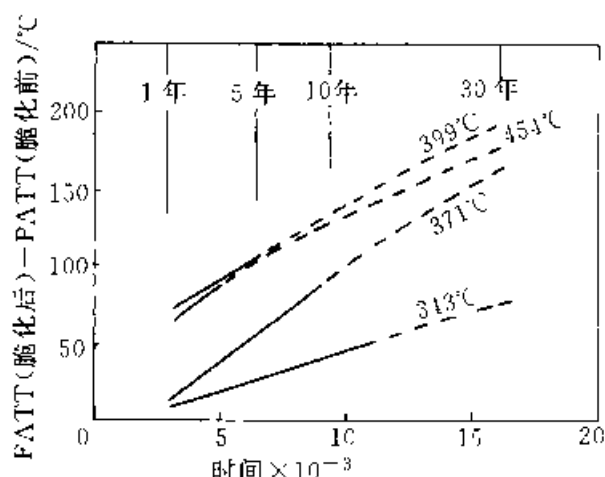


图 15-7 低压转子的时效脆化

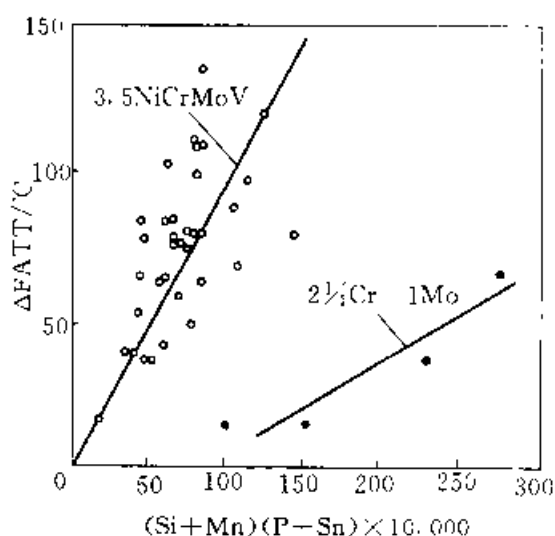


图 15-8 化学成分对回火脆性的影响

3. 高低压一体化转子锻件 大容量汽轮机通常有高压、低压两根或两根以上的转子锻件，汽轮机组不同温度区段汽缸中的转子锻件使用不同的材料制造。1CrMoV 钢高压(HP)、中压转子的

主导要求是高温持久强度高，而 3.5NiCrMoV 钢低压(LP)转子的主导要求则是在室温下应具有高的强度与高的塑性。

为了使发电机组变得紧凑而简单化，同时，机组具有更高的发电热效率及安全可靠性，从 80 年代起，国外研制并制造了新型的 HLP 高、低压一体化新型转子材料，使一支转子的 HP 与 LP 不同段分别兼有高压转子或低压转子的性能。从而使较大容量的汽轮机可以设计为只有一根转子的单缸汽轮机。高低压一体化转子锻件，多应用于 100MW 及以下容量的机组，当末级叶片长度达 850mm 或 1070mm 时，优秀的 HLP 转子可应用于 100~250MW 单缸汽轮发电机组。

表 15-6 列出了发达国家已经生产的几种 HLP 转子的典型成分和尺寸。

常规的 2%~2.5% 铬型 HLP 一体化转子通常采用特殊的分段调质处理的办法，以使转子的 HP 段的性能满足高中压转子的要求，而 LP 段的性能满足低压转子的要求，其典型的性能见图 15-9 及图 15-10。

我国驱动供热型工业汽轮机的汽轮机转子也属于单缸型高、低压一体化转子的应用范畴，转子材料为 28CrMoNiV 及 30CrMoNiV 钢，已列入 JB/T 7027-93《工业汽轮机转子锻件技术条件》，其化学成分及力学性能见表 15-7 及表 15-8。该材料经常规热处理后，其性能介于 30Cr1Mo1V 与 30Cr2Ni4MoV 钢之间，可满足工业汽轮机转子高压端对高温持久强度的要求，又能适应低压末级对转子高强韧性的要求。

表 15-6 世界上几种 HLP 转子的典型尺寸与成分(质量分数)

(%)

材 料	典型转 子尺寸 /mm	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Nb	研究制造方
2%CrNiMoWV	φ1431× 7572	0.23	0.07	0.67	2.12	0.85	0.74	0.32	0.63		美国、德国
2.25%CrNiMoVNbW	φ1601× 7937	0.24	<0.03	<0.05	2.25	1.10	1.70	0.20	0.20	0.03	东芝、日 本制钢所
2.5Cr1.2Mo1.5NiV	φ1625	0.25	0.06	0.44	2.48	1.13	1.45	0.23			神户制钢、 富士电机
2%CrMoNiWV	φ1940× 4300	0.22	0.05	0.7	2.13	0.86	0.76	0.32	0.65		德、美、英、 瑞士等
9CrMoVNbN	φ1750× 1810	0.16	0.09	0.09	9.69	1.36	1.22	0.22	(0.04)	0.05	日本制钢所

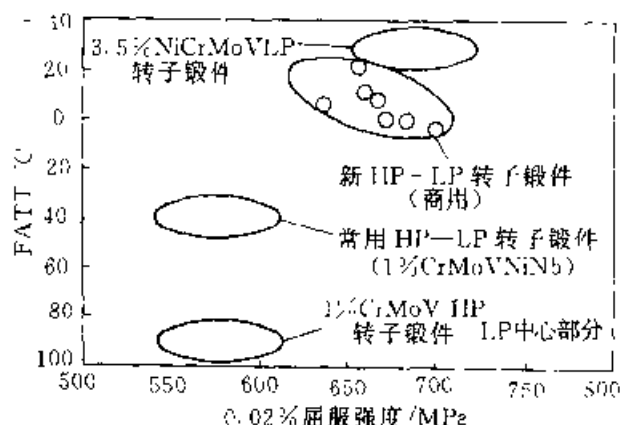


图 15-9 HLP 转子锻件 LP 段中心的 FATT 与 0.02% 屈服强度

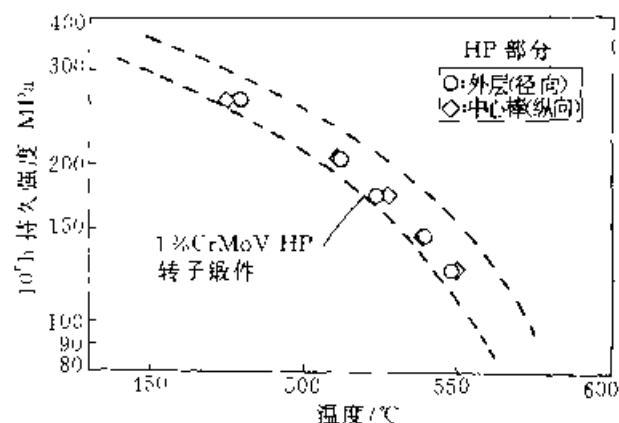


图 15-10 HLP 转子锻件 HP 段的持久强度

表 15-7 工业汽轮机转子的化学成分(质量分数)

(%)

钢 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al
28CrMoNiV	0.25~0.30	0.30~0.80	≤0.30	≤0.012	≤0.012	1.10~1.40	0.80~1.00	0.50~0.75	0.25~0.35	≤0.20	≤0.01
30CrMoNiV	0.28~0.34	0.30~0.80	≤0.30	≤0.012	≤0.012	1.10~1.40	1.00~1.20	0.50~0.75	0.25~0.35	≤0.20	≤0.01

表 15-8 工业汽轮机转子的力学性能要求

钢 号	尺寸范围 / mm	取样部位	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_t$ / MPa
28CrMoNiV	≤900	切向、纵向	550~700	700~850
30CrMoNiV	≥900	切向、纵向	550~700	700~850
钢 号	$\delta_5$ (%)	$\phi$ (%)	Arv / J	FATT <sub>50</sub> / °C
28CrMoNiV	≥15	≥40	≥24	≤85
30CrMoNiV	≥15	≥40	≥24	≤85

\* 尺寸范围指锻件粗加工后、性能处理前的直径。

4. 超临界高中压转子用钢 超临界机组的蒸汽温度高于 560°C 以上时,普通 CrMoV 高中压转子钢的持久强度已显得不足,而高合金化的 12%Cr 或改型的 12%Cr 不锈钢类转子因其更好的高温持久强度特性(见图 15-11),而在世界各国得到广泛重视与发展。表 15-9 给出了最近 30 多年来所研制的超临界高中压转子钢的化学成分。

已分别在 50MW、700MW 及 1000MW 超超临界机组 593°C 参数运转的、三支 TMK1 材料转子的性能水平如图 15-12 所示。其不锈钢中压转子锻件毛坯的最大直径为  $\phi 1750\text{mm}$ 。

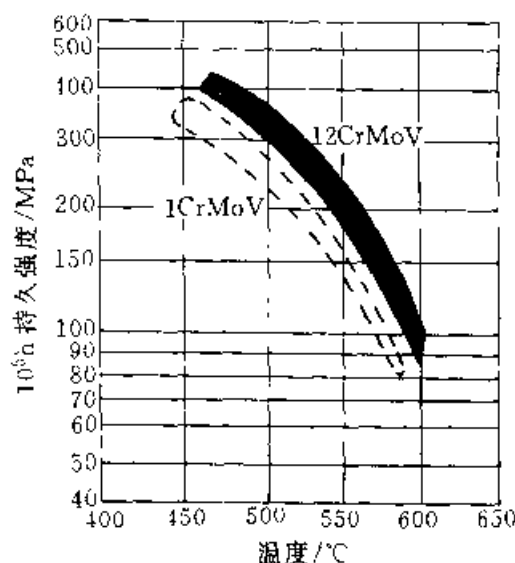


图 15-11 1CrMoV 与 12CrMoV 钢的持久强度特性

表 15-9 超临界 12Cr 转子锻件材料的发展及化学成分(质量分数) (%)

牌 号	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb	N	B	Ti
TYPE422	0.23	0.40	0.08	0.75	13.5	1.00	0.25	1.00	—	—	—	—
RNO MoWV	0.22	—	—	0.80	11.5	1.00	0.30	0.25	—	—	—	—
H46	0.18	0.30	0.70	—	11.6	0.60	0.30	—	0.25	0.05	—	—
FV448	0.13	0.50	1.00	—	10.5	0.75	0.15	—	0.45	0.05	—	—
TAF	0.18	0.50	0.50	—	10.5	1.50	0.20	—	0.15	—	0.03	—
SEW555	0.23	0.25	1.00	0.50	12.0	1.00	0.30	—	—	—	—	—
12CrMoWV	0.23	0.40	0.80	0.75	13.0	1.00	0.25	1.00	—	—	—	—
11CrMoVNB	0.18	0.25	0.75	0.70	10.5	1.00	0.20	—	0.06	0.06	—	—
11CrMoVTa	0.17	0.06	0.60	0.35	10.6	1.00	0.22	—	—	0.05	—	0.07
TMK1	0.14	0.05	0.50	0.60	10.2	1.50	0.17	—	0.06	0.04	—	—
TMK2	0.13	0.05	0.50	0.70	10.2	0.40	0.17	1.80	0.06	0.05	—	—
FR 1200	0.12	0.05	0.50	0.80	11.2	0.20	0.20	1.80	0.05	0.06	—	—
ROTOR B	0.17	0.07	0.06	0.12	9.34	1.58	0.27	—	0.059	0.02	0.008	—
ROTOR E	0.12	0.10	0.45	0.74	10.39	1.06	0.18	0.81	0.045	0.05	—	—
ROTOR F	0.11	0.03	0.52	0.58	10.22	1.42	0.18	—	0.05	0.06	—	—
10CrWMoVNB	0.12	0.07	0.06	0.20	9.92	0.60	0.21	1.87	0.06	0.02	0.013	(Co) 2.95

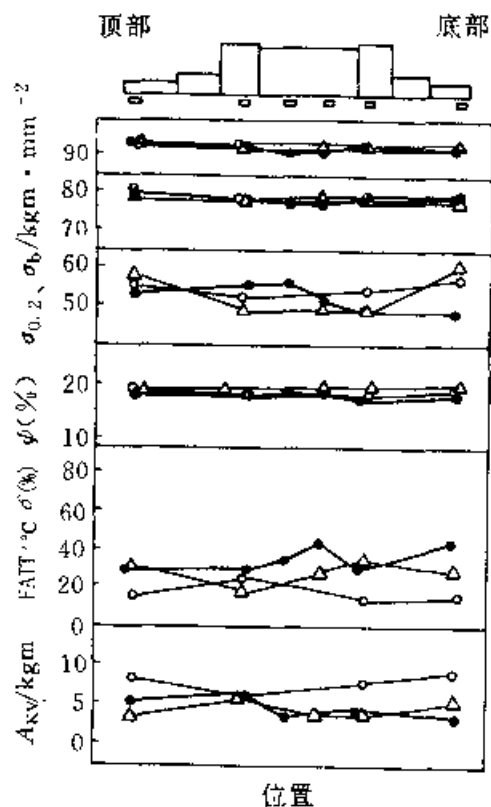


图 15-12 三支 TMK1 转子的力学性能

## 15.1.3 转子锻件的热处理

电站用大型转子锻件的质量水平,主要反应在炼钢和铸锭技术上。真空精炼与真空浇注的双真空脱气技术,大大减少了钢中的磷、硫、锡等不纯物及氢、氧、氮气体含量;而先进的铸锭形状的设计与应用则减轻了特大型钢锭中的各种偏析,及伴随偏析而出现的疏松、夹杂、成分偏析等各类缺陷。由此,极大地提高了大型转子锻件材料内部的纯净度,从而可通过先进的锻造及热处理技术,使大型转子锻件获得优良的、安全可靠的使用性能。

转子锻件的热处理通常包含有锻后热处理、调质热处理与去应力退火三个阶段。

锻后热处理的主要目的是细化晶粒,解决锻造组织中的粗晶与混晶问题,对于已在炼钢阶段采用双重脱气处理的转子锻件,不必再进行去应力退火。但是为了消除大锻件材料中的粗晶与混晶,有时则需要采取多次重结晶的办法进行复杂的正火处理。

调质热处理的目的是使材料沿转子锻件的整

个截面达到均匀一致的组织与性能。

去应力热处理的目的为了消除热处理应力及转子开槽与打中心孔的加工应力,一般是在低于回火温度  $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$  的温度加热缓冷。对于已达到高纯净度的转子材料,回火脆性已不复存在,大锻件的调质回火可采用  $5 \sim 15^{\circ}\text{C/h}$  的缓冷方式,因而对电站锻件的去应力处理,已有省略不作的趋势。

大型转子锻件造价昂贵,其热处理十分重要而复杂,需根据其材质、冶炼铸造方法、锻造工艺与锻件尺寸的具体情况确定。

1. 亚临界高中压转子  $30\text{Cr}1\text{Mo}1\text{V}$  钢的热处理 某厂生产的  $30\text{Cr}1\text{Mo}1\text{V}$  600MW 汽轮机高中压转子,经双真空精炼,转子锻件的尺寸为  $\phi 1200\text{mm} \times 8340\text{mm}$ ,锻件毛坯重 45t。其锻后热处理工艺采用  $1010 \sim 1030^{\circ}\text{C}$  高温正火和二次  $250^{\circ}\text{C}$  较长时间的冷却,以保证心部充分转变,达到细化晶粒的目的。

该转子的调质处理是以每小时  $10760\text{m}^3$  的大鼓风量的鼓风冷却方式,使奥氏体化后的转子锻件快速冷却,外表与心部均获得上贝氏体组织,从而使材料具有高的持久强度与良好而均匀的室温综合力学性能。因转子不同部位的截面差较大,实际操作中,为保证均匀冷却,对截面较小的轴颈加缠石棉布保护冷却,实际鼓风 10h 后轴身为  $240^{\circ}\text{C}$ ,轴颈为  $63 \sim 86^{\circ}\text{C}$ ,达到预期效果。

该转子两种热处理包括去应力热处理的工艺

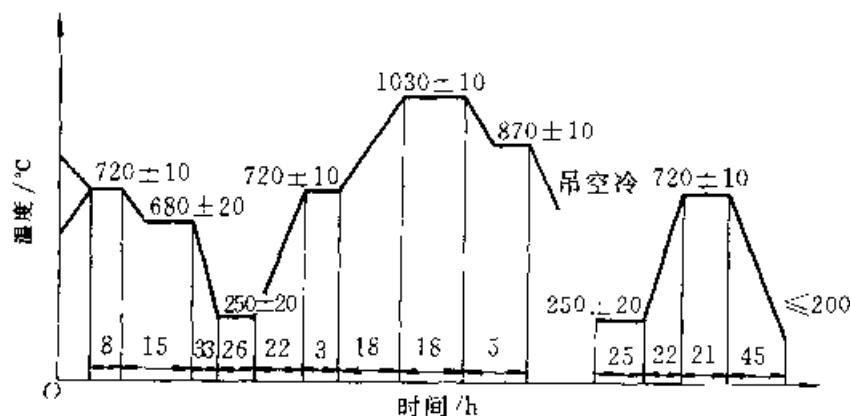


图 15-13  $30\text{Cr}1\text{Mo}1\text{V}$  钢 600MW 汽轮机高中压转子锻后热处理工艺

曲线分别如图 15-13 及图 15-14 所示。用该工艺处理的高中压转子,经全面检验达到了国外有关技术标准的无损与理化检测的要求。

2. 汽轮机低压转子  $30\text{Cr}2\text{Ni}4\text{MoV}$  钢的热处理 某厂生产的 600MW  $30\text{Cr}2\text{Ni}4\text{MoV}$  钢汽轮机低压转子,经双真空精炼,锻件毛坯的尺寸为  $\phi 1925\text{mm} \times 8800\text{mm}$ ,重 88t。

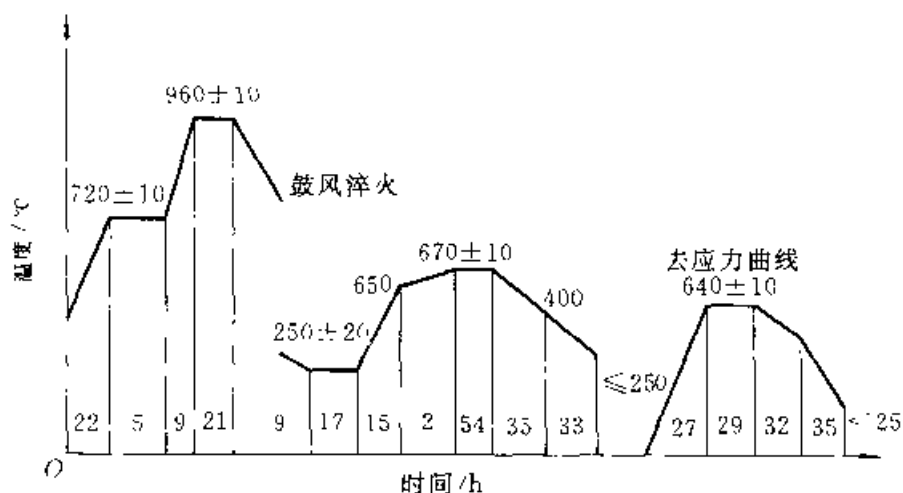


图 15-14  $30\text{Cr}1\text{Mo}1\text{V}$  钢 600MW 汽轮机高中压转子调质热处理与除应力处理工艺

从图 15-6  $30\text{Cr}2\text{Ni}4\text{MoV}$  钢的连续冷却曲线可以看到,该钢的淬透性很好,高温奥氏体相当稳定,在空冷时不发生珠光体相变。生产实践中发现这种钢易出现粗大的奥氏体晶粒并有组织遗传性倾向。

为使近两米直径的大型锻件达到组织均匀、晶粒细化的目的,该钢的锻后热处理采用了  $930^{\circ}\text{C}$ 、 $900^{\circ}\text{C}$  及  $870^{\circ}\text{C}$  的三次高温正火,使之实现多次重结晶。正火温度过高时,正火细化晶粒的效果不好;第一次正火温度低于  $840^{\circ}\text{C}$  时,则易出现粗晶遗传现象。该转子锻后正火冷却的温度降低到  $180 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ,并保持足够的时间,使之充分完成组织转变,减少残留奥氏体量,有利于晶粒细化和充分去氢。考虑到转子尺寸大和可能有氢的偏析,在本工艺的回火处理阶段延长了保温时间,进行了适当的去氢处理,其锻后热处理的工艺曲线如图 15-15 所示

转子的调质热处理在  $\phi 2.7\text{m} \times 18\text{m}$ 、每小时喷水量达

2000~2370t 的立式喷水装置中进行,以满足大型低压转子充分淬火的需要,从而获得更多的马氏体和下贝氏体组织。为提高转子的断裂韧度,减少淬火应力集中,避免淬火时出现裂纹,一方面在转子本体适当开槽,用以减少转子锻件的有效截面,增加锻件淬火的表面积,以便得到较好的心部组织;同时又在转子的不同部位采取不同的喷水

量和冷却工艺,使工件各部位获得大致相同的冷却速度,从而得到良好的淬火效果,避免开裂。该大型转子实际喷水时间为 12h,空冷 4h 后,转子轴身温度为  $80^{\circ}\text{C}$ 。其调质工艺、及叶轮体与转子中心孔机加工之后转子去应力处理工艺曲线如图 15-16 所示。

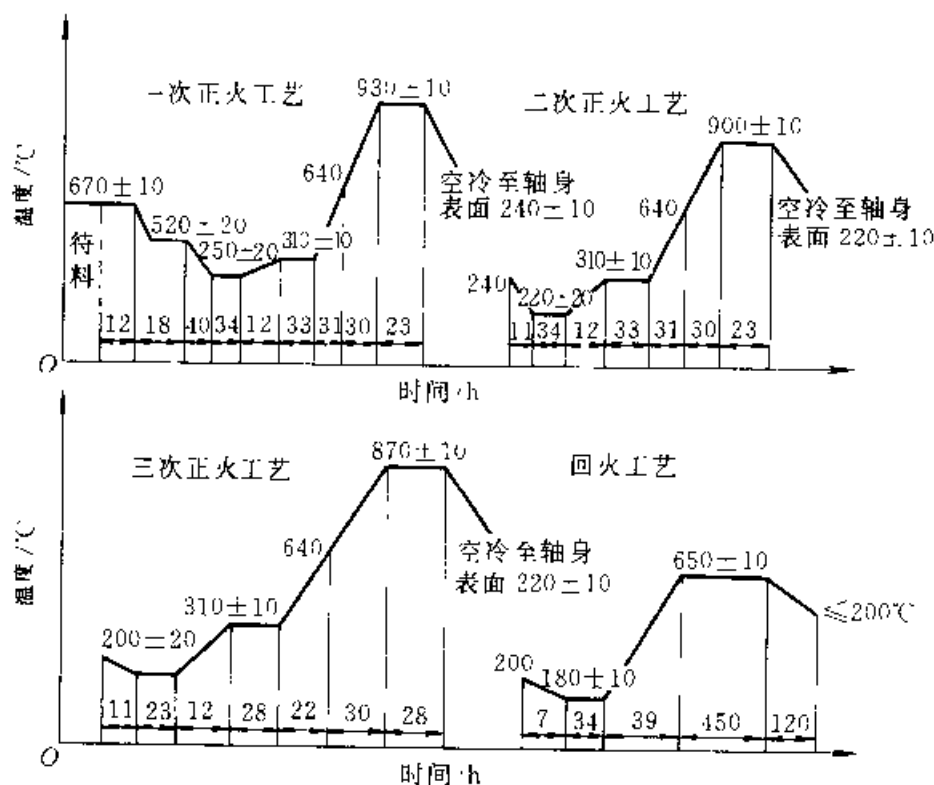


图 15-15 600MW 汽轮机 30Cr2Ni4MoV 钢低压转子锻后热处理工艺

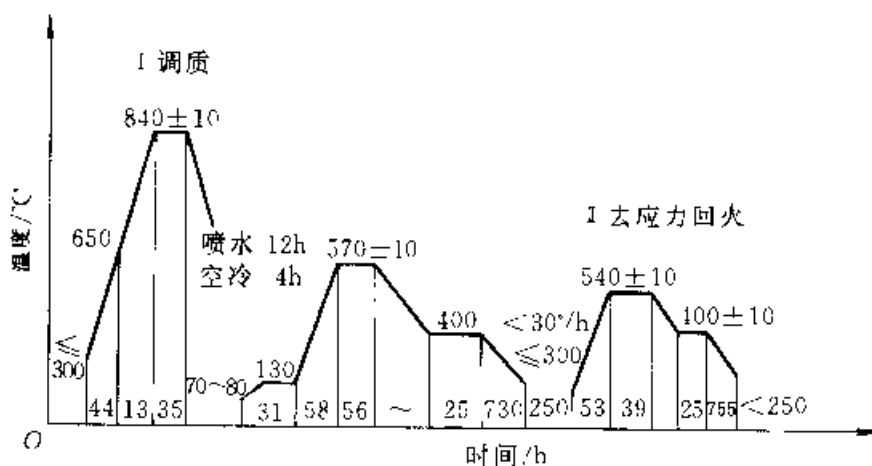


图 15-16 600MW 汽轮机 30Cr2Ni4MoV 钢低压整体转子调质热处理与除应力处理工艺



## 3. HLP 高低压一体化转子的热处理

2.5Cr1.2Mo1.5NiV钢制高低压转子,由碱性电炉+真空碳脱氧冶炼的89t钢锭经13000t水压机锻制而成,最大直径为 $\phi 1625\text{mm}$ 。

经过预备热处理的转子锻件采用图15-17的分段调质工艺进行调质处理,即井式炉分段控温,使转子高压段加热到950℃,鼓风冷却,653℃回火;而转子低压段加热到910℃,喷水冷却,624℃回火。从而使转子的HP段与LP段分别达到不同的性能要求。

## 4. 超临界高中压不锈钢转子的热处理

一台415MW超临界汽轮发电机,进汽温度580℃,汽轮机高中压转子的材质为10%Cr-MoVNbN钢,由双真空浇注的97t钢锭制造,其

预备热处理的工艺曲线见图15-18。

为了防止大型不锈钢转子的相变开裂,预备热处理采用690℃等温保持150h,以保证转子全部转变为铁素体+碳化物组织。调质热处理采用油淬以得到充分的马氏体转变,锻件在150~200℃均温,防止淬火开裂。接着进行两次回火处理,第一次回火处理保证获得一种低应力的回火马氏体组织,并在冷却过程中使残留奥氏体转变为马氏体;第二次回火处理消除应力,并使第一次回火处理后形成的马氏体回火。

此外,不锈钢转子的轴颈须堆焊一层1CrMoV类低合金钢,以减少使用中轴颈的异常磨损。

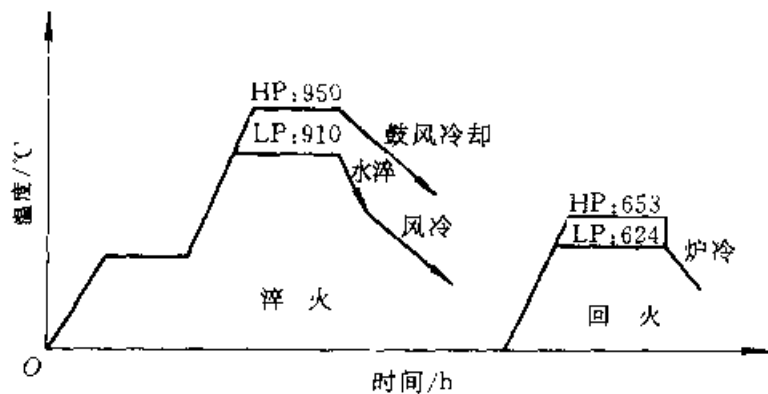


图 15-17 高低压一体化转子调质热处理工艺曲线

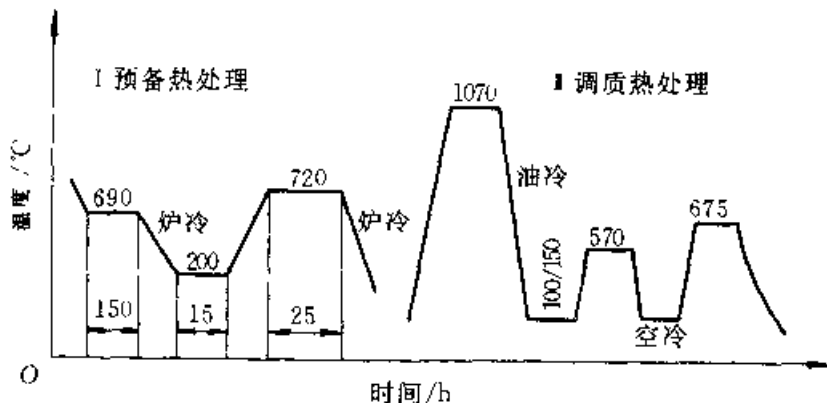


图 15-18 10%CrMoVNbN 大型转子锻件锻后  
热处理与调质热处理

### 15.1.4 常见大型转子锻件热处理缺陷及预防措施

国内重机厂生产的大型转子,常见热处理的缺陷及预防措施见表 15-10。

表 15-10 常见大型转子锻件热处理缺陷及预防措施

热处理缺陷	大型转子锻件热处理缺陷的预防措施
锻后热处理开裂	转子锻坯入炉前认真清除掉锻造过程中产生的表面裂纹等缺陷;锻造后在锻坯表面温度为 500℃ 以上时趁热入炉;锻后热处理的冷却速度不能太快,冷却的温度和保持时间要适当
白点	镍铬钼钒钢和铬钼钒钢白点敏感性强,最有效的措施是真空冶炼及真空浇注,降低钢液氢含量,若钢液不经真空处理,必须经长时间除氧处理;真空处理未达工艺要求时,应有适当的除氢处理;同时,应采取措施降低锻件内部的应力
出现粗晶和混晶	钢液应纯洁、均匀,锻型及浇注参数应合理,尽可能减少钢锭宏观和微观偏析;锻造时应充分锻造,变形应均匀,变形温度和变形量应合理;终锻温度适当低一些;锻坯锻后热处理的重结晶参数应合理,多次过冷多次重结晶效果更好
调质开裂	调质前锻件应无严重超标缺陷;粗加工时给锻件合理倒角和加工圆角,锻件各段截面差别不宜过大;加热速度及淬火冷却速度应适当,淬火终冷温度应严格控制
硬度不均匀	加热应均匀,淬火冷却均匀,回火温度应均匀,回火时间应足够
强度指标不合格	冶炼及铸造时尽量减少宏观、微观偏析;锻造时应彻底切除浇冒口;调质工艺应正确、准确,操作时严格执行工艺,保证加热冷却均匀;加热炉仪表、热电偶应校对准确
塑性指标不合格	提高钢液纯洁度,严格控制有害元素;尽量减少宏观、微观偏析;彻底切除浇冒口;充分锻透锻实,消除孔洞和疏松;锻造热处理阶段应充分相变,使锻造组织细化和均匀化;调质处理时工艺参数应正确、准确,严格执行工艺;测温系统应校对准确;试样加工及测试系统应正常
热处理变形太大	锻造时尽量使锻件中心线与钢锭中心线一致;机加工划线尽可能不偏心;少用和不用开槽调质;加工热处理吊孔轴线一定要通过转子中心线并与之垂直;加热冷却应均匀
残留应力过大	淬火加热、冷却应均匀;消除应力回火的温度和时间应足够;消除应力回火后的冷却速度尽可能慢一些,冷却应尽可能均匀;出炉温度应合理;切应力环的机加工参数应合理,测试方法应正确

## 15.2 汽轮发电机无磁性护环的热处理

至造成整体破裂飞出酿成重大事故。

### 15.2.1 护环的服役条件及失效方式

无磁性护环是用来箍紧汽轮发电机转子两端的端部线圈,防止线圈在高速运转时由于离心力的作用将其甩出。护环是用加热红套的方法,一端紧套在转子轴身端部,另一端紧套在中心环上。运转时,护环除了承受本身离心力外,还承受转子绕组端部的离心力、弯曲应力以及配合应力等。为了防止端部因漏磁造成的损耗及防止运转时产生涡流影响发电机效率,要求护环材料无磁性,其导磁率  $\mu \leq 1.1G_r/O_c$ 。

在电站出现的主要失效方式是非 18-18Mn-Cr 系材料制作的护环频繁出现应力腐蚀开裂,甚

### 15.2.2 护环用钢

根据现行标准 JB/T 7029《30MW 以下汽轮发电机无磁性护环锻件技术条件》、JB/T 1268《50~200MW 汽轮发电机无磁性护环锻件技术条件》以及 JB/T 7030《300~600MW 汽轮发电机无磁性护环锻件技术条件》,护环材料的化学成分见表 15-11,其力学性能要求见表 15-12,护环的晶粒度要求为 ASTM No1 级或更细。

1Mn18Cr18N 含碳量低、含铬量高,抗应力腐蚀能力强;在同等强度的情况下,其断面收缩率与冲击韧度几乎是 50Mn18Cr5 类材料的二倍而受到越来越广泛的应用,特别是用在大容量汽轮发电机组上,该钢已基本取代了 18-5 型钢。

表 15-11 发电机护环材料的化学成分(质量分数)(JB/T1268-93) (%)

钢 种	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Al	N
50Mn18Cr5	0.40~ 0.60	17.00~ 19.00	0.30~ 0.80	≤0.060	≤0.025	3.50~ 6.00	-	-	-
50Mn18Cr5N	0.40~ 0.60	17.00~ 19.00	0.30~ 0.80	≤0.060	≤0.025	3.50~ 6.00	-	-	≥0.08
50Mn18Cr4WN	0.40~ 0.60	17.00~ 19.00	0.30~ 0.80	≤0.060	≤0.025	3.50~ 6.00	0.70~ 1.20	-	≥0.08
1Mn18Cr18N	≤0.12	17.50~ 20.00	≤0.80	≤0.050	≤0.015	17.50~ 20.00	-	≤0.040	≤0.15

表 15-12 发电机护环材料的力学性能要求(JB/T1268-93)

项 目	I	II	III	IV	V
$\sigma_b$ MPa	$\geq 895$	$\geq 965$	$\geq 1035$	$\geq 830$	$\geq 900$
$\sigma_{0.2}$ MPa	$\geq 760$	$\geq 825$	$\geq 900$	790~970	980~1030
$\delta_5$ (%)	$\geq 25$	$\geq 20$	$\geq 20$	$\geq 21$	$\geq 19$
$\phi$ (%)	$\geq 35$	$\geq 30$	$\geq 30$	$\geq 60$	$\geq 57$
$A_{kv}$ J		-	-	$\geq 122$	$\geq 102$
试验温度 /°C	20~27			$\sigma_b, \sigma_{0.2}, \delta_5, \phi;$ 95~105 $A_{kv}; 20\sim 27$	
推荐用钢	50Mn18Cr5 50Mn18Cr5N 50Mn18Cr4WN			1Mn18Cr18N	

护环材料是一种奥氏体钢,通常需用电渣钢来制造,其护环成品所要求的高强度只能通过冷扩孔产生大量的塑性变形,即由冷变形强化来实现;与此同时还要求护环满足较低的残留应力的要求(要求护环的残留应力不超过规定屈服强度的20%)。因此,护环的制造难度很大。

### 15.2.3 护环锻件的热处理

600MW 汽轮发电机 50Mn18Cr5N 大型护环的尺寸为  $\phi 1186\text{mm}$  (外径)  $\times \phi 993\text{mm}$  (内径)  $\times 975\text{mm}$  (高),其生产工艺流程如下:

电炉冶炼、浇注电极→电渣重溶→电渣棒在 1190℃、1140℃~750℃ 区间拔长、锻粗、冲扩孔后加芯棒拔长成护环毛坯→水冷→护环坯进行固溶处理→楔块扩孔成形→消除残留应力回火→测

试残留应力与力学性能合格后→精加工至护环的交货尺寸。

护环需七火锻成,第二、三、四火在 1190℃ 高温加热共计 60h,其目的是利用锻造前的高温加热使合金元素得以充分扩散。其余四火均采用 1140℃ 较低温度锻造,以控制晶粒粗化。毛坯锻毕后采用水冷,防止锻件冷却过程中大量析出碳化物产生脆性。

护环的热处理包括固溶处理与去应力退火两部分,其工艺如表 15-13 所示。

表 15-13 护环锻件的热处理工艺

固溶处理工艺	(1035±5)°C 加热 4h 后入水冷却 60min,出水时工件温度应小于 100°C
去应力处理	(250±10)°C 保温 4h, (300±10)°C 保温 10h,缓冷 10~12h,全工件温度低于 100°C 时出炉

护环的固溶处理是制造过程的一种中间热处理。护环在坯热锻后虽经过水冷,但实测其伸长率仅为 49%~57%,不满足中心最大变形量 62% 的塑性要求。通过再次正式的固溶处理,使晶界上的碳化物在高温下更好地溶于晶内,提高护环扩孔前坯的塑性,其塑性可提高到 62%~69%。

护环坯中间固溶处理的好坏,关系着护环成形工序的成败,其工艺要点是

1) 固溶处理的冷却条件——工件入水前水温应低于 30°C,冷却終了水温应低于 55°C,工件出炉到入水时间应少于 5min。

2) 固溶处理应采用氩气保护加热,当炉温升到 500°C 时开始通氩气,500~900°C 通氩气量应为 10L/min,900°C 以上为 30L/min。

3) 通氩气采用保护罩,测温热电偶应直接接触工件,以保证测温准确。

4) 装炉前必须将工件表面灰尘、油污等清洗

干净。

600MW 汽轮发电机 50Mn18Cr5N 护环,经

过 300℃ 的去应力处理后,成品护环的力学性能、

残留应力、晶粒度及磁导率见表 15-14。

表 15-14 600MW 用 50Mn18Cr5N 护环的组织与性能

取样部位	$\sigma_{\perp}$ /MPa	$\sigma_{\parallel}$ /MPa	$\delta_4$ (%)	$\psi$ (%)	$\alpha_k$ J·mm <sup>2</sup>	残留应力 /MPa	晶粒度 (级)	磁导率 (μ)
外环切向	990	1163	36	49	—			
	1010	1177	31	51				
中环切向	1076	1217	36	50	175 181	3	1~2	1.008
	1108	1234	27	47				
	1106	1243	30	46				
	1120	1249	25	46				
内环切向	1242	1310	20	36	110			
	1269	1336	17	35	110			
径向	969	1163	22	46	—			
	850	1114	17	47				

#### 15.2.4 常见护环锻件热处理缺陷及预防措施(见表 15-15)

表 15-15 常见护环锻件的热处理缺陷及预防措施

热处理缺陷类型	产生原因与预防措施
出现粗晶和混晶	护环的晶粒度主要由锻造决定。为避免粗晶和混晶,应严格控制锻造温度和变形量,终锻温度应合理,变形量应均匀。固溶温度和保持时间要合理,并进行合理的快速升温。
护环强度偏低	加热温度偏高、时间太长或温度不均匀,致使局部应力偏高。若温度偏高太多,会引起碳化物析出,降低应力腐蚀抗力,对磁性性能不利。
护环塑性偏低,成形能力差	碳化物未充分固溶引起。固溶温度与保持时间应充分,淬火入水应快,水温要低,水冷时间应足够;热锻成形后应采用水冷,防止冷却过程中析出过量碳化物。

### 15.3 汽轮机叶轮的热处理

#### 15.3.1 叶轮的服役条件及失效方式

叶轮是火力发电站汽轮机核心——高速转动部件转子上的关键大锻件之一。如 200MW 汽轮机末级叶轮锻件毛坯的直径约为 1.4m,重约 4t。叶轮通过加热红套实现与转子的过盈配合。叶轮

外缘周向槽或径向槽中装嵌若干叶片,一起随同转子高速旋转。受叶片及叶轮高速转动离心力及振动应力的综合作用,叶轮在工作状态下承受巨大的切向与径向应力。叶轮叶根槽及键槽的尖角处,还受到应力集中与湿蒸汽环境腐蚀的双重作用。因此,叶轮与汽轮机转子一样,要求有高的强度,优良的塑性、韧性与低的脆性转变温度 FATT。

叶轮主要的失效方式是末几级叶轮,特别是末级叶轮叶根槽根部或键槽根部出现应力腐蚀裂纹,叶轮键槽裂纹达到一定深度后,将导致整个叶轮的飞裂。

为了杜绝大型机组叶轮的飞裂事故,也由于电站大锻件冶炼及制造技术的提高,对于 200MW 以上的大型汽轮机,目前国内外均采用叶轮与转子锻为一体的大直径整锻转子超大型锻件,通过机械加工从转子上产生本体叶轮,不再另外进行叶轮的红套。仅 200MW 及其以下的小型汽轮机上仍采用红套叶轮。

#### 15.3.2 叶轮用钢

根据现行标准 JB1266《25~200MW 汽轮机轮盘及叶轮锻件技术条件》及 JB/T7028《25MW 以下汽轮机轮盘及叶轮锻件技术条件》,叶轮主要钢种的化学成分见表 15-16。

一般叶轮采用 34CrNi3Mo、35CrMoV、34CrMo1 等钢制造,这些叶轮钢常用电炉冶炼加钢包炉精炼,在大气下浇铸钢锭;而要求较高的叶

轮或特大型叶轮则采用 30Cr2Ni4MoV 钢制造, 少钢中气体含量。叶轮用钢的力学性能要求见表 15-17。用电炉加钢包炉精炼, 并采用真空浇注钢锭, 以减

表 15-16 叶轮用主要钢种的化学成分(JB1266)(质量分数) (%)

钢种	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
34CrMo1	0.30~ 0.38	0.40~ 0.70	0.17~ 0.37	≤0.020	≤0.020	0.70~ 1.20	≤0.40	0.40~ 0.55	—	≤0.20
24CrMoV	0.20~ 0.28	0.30~ 0.60	0.17~ 0.37	≤0.020	≤0.020	1.20~ 1.50	—	0.50~ 0.60	0.15~ 0.30	≤0.20
35CrMoV	0.30~ 0.40	0.40~ 0.70	0.17~ 0.37	≤0.020	≤0.020	1.00~ 1.30	≤0.30	0.20~ 0.30	0.10~ 0.20	≤0.20
34CrNi3Mo	0.30~ 0.40	0.50~ 0.80	0.17~ 0.37	≤0.020	≤0.020	0.70~ 1.10	2.75~ 3.25	0.25~ 0.40	—	≤0.20
30Cr2Ni4MoV	≤0.35	0.20~ 0.40	0.17~ 0.37	≤0.020	≤0.020	1.50~ 2.00	3.25~ 3.75	0.30~ 0.60	0.07~ 0.15	≤0.20

表 15-17 叶轮用钢锻件的力学性能要求

项 目	锻 件 强 度 级 别						
	440	490	540	590	690	730	760
$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	≥440	≥490	≥540	≥590	≥690	≥730	≥760
$\sigma_b/\text{MPa}$	≥590	≥640	≥690	≥720	790~930	850~970	670~970
$\delta_5(\delta_1)(\%)$	≥18	≥17	16	16	≥14	≥13(≥16)	≥16
$\psi(\%)$	≥40	≥40	≥40	≥40	≥35	≥35(≥45)	≥45
$A_{KU}(A_{KV}), \text{J}$	≥39	≥39	≥39	≥39	≥39	≥39(≥41)	(≥41)
$\text{FATT}_{50}/^{\circ}\text{C}$	≤40	≤40	≤40	≤40	≤20	≤20(≤13)	≤13
推荐用钢	24CrMoV 35CrMoV 34CrMo1	34CrMo1 35CrMoV	34CrNi3Mo	34CrNi3Mo	34CrNi3Mo (30Cr2Ni4MoV)	30Cr2Ni4MoV	

### 15.3.3 汽轮机叶轮锻件的热处理

大型叶轮通常采用水压机自由锻造, 从钢锭至叶轮交货, 钢锭材料的利用率仅 13%~15% 或更低。直径为  $\phi 1300\text{mm}$  以下、重量小于 2t 的中、小型叶轮可采用模锻生产, 从而优化了叶轮的生产程序, 使钢材利用率提高到 36%, 比常规自由锻工艺提高 2.27 倍, 其模锻叶轮的生产工艺路线为: 炼钢、铸锭 → 开坯、去氢炉冷 → 锯床下料 → 锻饼 → 100 吨米锤模锻叶轮 → 正火 → 粗加工 → 调质 → 性能试验 → 超声波探伤 → 精加工 → 成品。

#### 1. 叶轮的锻后热处理 34CrMo1、

24CrMoV、35CrMoV、34CrMoV 等叶轮用钢, 冶炼浇注阶段若未经真空除气的平炉和碱性电炉或钢包精炼, 易产生白点。所以自由锻叶轮或用于模锻的坯料在锻造开坯后必须在 640~660°C 进行除氢防止白点的热处理, 锻件从锻后到除氢处理入炉的停留时间不能太长, 其轮缘温度不得低于 350°C。34CrMo1、24CrMoV 及 35CrMoV 钢叶轮的锻后热处理工艺见图 15-19, 34CrNi3Mo 钢叶轮毛坯的锻后热处理工艺见图 15-20。

2. 叶轮的调质处理 性能要求高的 34CrMo1、35CrMoV、34CrNi3Mo 等钢的叶轮, 调质前应将叶轮粗加工, 预先加热至 900~910°C,

然后空冷,正火处理,以改善锻件内部组织。

叶轮调质热处理的冷却方式有油冷,水油冷和水冷等方式,应根据叶轮用钢的材质、规格尺寸和性能要求来决定。如直径为  $\phi 1116\text{mm}$ ,厚约

80mm 的 35CrMoV 钢模锻叶轮的调质工艺见图 15-21,其调质后的力学性能见表 15-18,34CrNi3Mo 钢的调质工艺见图 15-22。

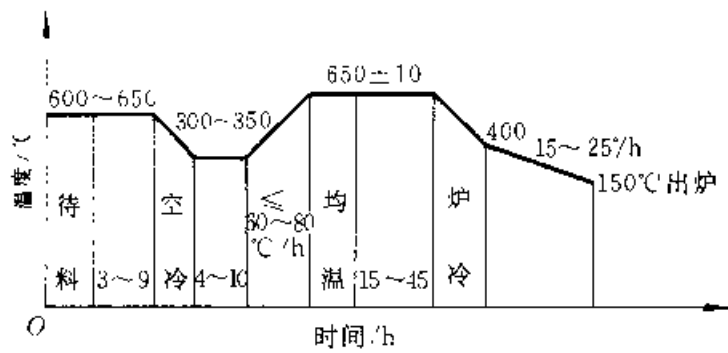


图 15-19 34CrMo1、24CrMoV、35CrMoV 叶轮毛坯的锻后热处理工艺

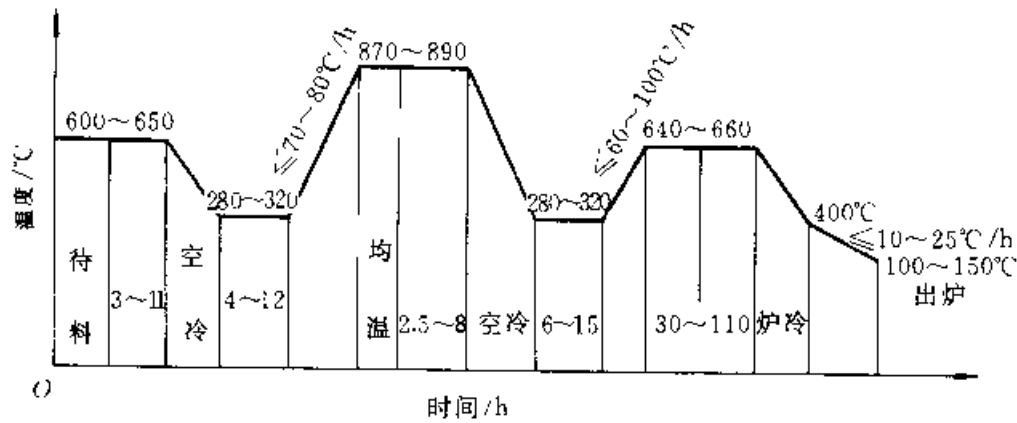


图 15-20 34CrNi3Mo 钢叶轮毛坯的锻后热处理工艺

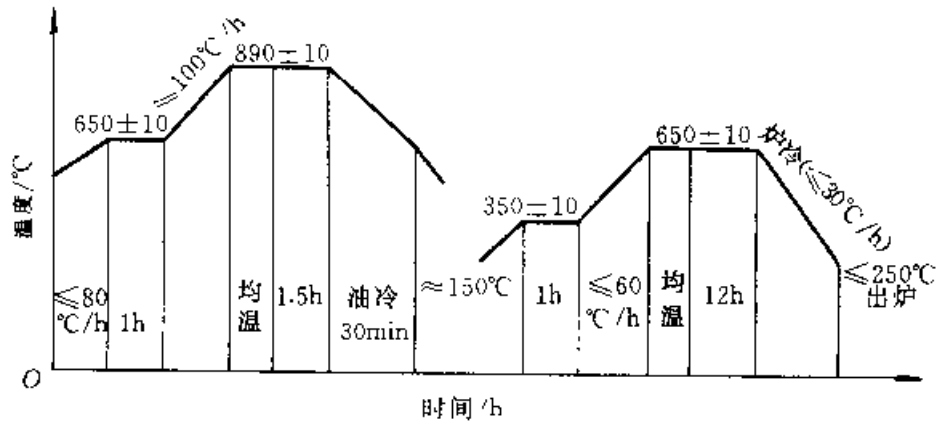


图 15-21 35CrMoV 钢模锻叶轮的调质热处理工艺曲线

表 15-18 35CrMoV 模锻叶轮调质热处理后的力学性能

序号	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5(\%)$	$\psi(\%)$	$a_K, \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	晶粒	超探
1	758	885	17	52	40	6~5 级	合格
2	758	885	17	50	63		
3	746	872	17	53	46		

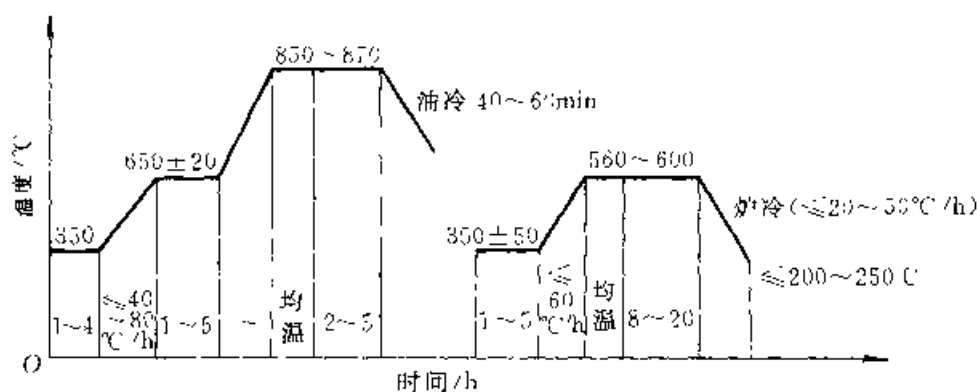


图 15-22 34CrNi3Mo 钢叶轮的调质热处理工艺曲线

### 15.3.4 常见叶轮锻件热处理缺陷及预防措施(见表 15-19)

表 15-19 常见叶轮锻件热处理缺陷及预防措施

热处理缺陷的类型	热处理缺陷产生的原因及预防措施
锻后热处理开裂	锻件入炉前认真清除掉锻件表面的锻造裂纹;锻坯件为 400°C 以上温度时趁热入炉,过冷保温温度和时间应适当
白点	叶轮钢液一般只有一次真空处理,热处理中必须考虑充分的除氢处理工艺来防止白点的产生
调质开裂	调质前锻件应无严重超标缺陷;粗加工时给锻件合理倒角和加工圆角;淬火冷却介质和冷却参数要合理
硬度不均匀	合理装料,锻件之间保持适当距离,使淬火加热及冷却均匀;回火温度的均匀度特别重要,应予以注意
力学性能不合格	提高钢液纯洁度,严格控制有害元素;尽量减少宏观、微观偏析;保证有足够的锻造比,使锻件流线均匀;叶轮调质前必须经重结晶处理改善其锻造组织存在的不均匀性;调质工艺应正确与准确,淬火、回火的加热温度应均匀;试验试样的取样部位应合理,试样加工要标准,试验设备应定期校验
残留应力不合格	保证调质淬火的加热与冷却均匀;并使消除应力回火的温度均匀而且保温时间足够,回火后的冷却速度要慢、要均匀;出炉温度不宜太高;机床切取应力环的机加工参数应当合理,测试的方法应准确

## 15.4 汽轮机叶片的热处理

叶片是汽轮机最重要的零件之一,它直接担负着将蒸汽的动能和热能转换成机械能的作用。叶片有动叶片和静叶片之分;动叶片安装在汽轮机转子的各级叶轮体上,与转子一起转动。静叶片则安装在隔板上,以使蒸汽流改变方向。

叶片尺寸的长短、级数主要是由汽轮机的功率大小决定。小功率汽轮机,仅有一、二级叶片,其叶片长度,只有几十毫米;而 300MW 大型汽轮机的高、中低压叶片则共有 28 级,其末级动叶片的长度长达 851mm。600MW 大型汽轮机的末级叶片长达 1016mm。

随着汽轮机组单机功率、叶片长度的不断增加,以及对机组安全性与可靠性要求的不断提高,对叶片材料的冶金质量和可靠性的要求也越来越高,普通冶炼方法制造的叶片材料,很难满足在高温、高压和高速条件下运行的动叶片的要求。因此,叶片的生产制造,从冶炼、锻造、热处理、质量检查等全过程都区别于一般的普通钢材。

### 15.4.1 叶片的服役条件及失效方式

1. 叶片的服役条件 汽轮机中的动叶片在运行中主要受到以下几种应力的作用:

(1) 在高速旋转时,叶片、围带和拉肋的质量所产生的离心力引起的拉应力。

(2) 叶片重心偏离径向辐射线产生的弯曲应力。

(3) 蒸汽通过动叶片叶栅时,冲击叶片产生的弯应力和动应力。

(4) 高温叶片还受到热应力的作用。

高压、中压段的高温叶片除与转子一起高速旋转外,还承受高温、高压的过热蒸汽作用。其工

作温度均在  $400^{\circ}\text{C}$  以上;亚临界机组,最高可达  $540^{\circ}\text{C}$ (喷嘴叶片、调节级叶片)。而超临界机组,其叶片工作温度可达  $560^{\circ}\text{C}$ ,甚至  $590^{\circ}\text{C}$ 。高、中压段的静叶片工作时,主要承受高温以及高温、高压蒸汽的冲击,

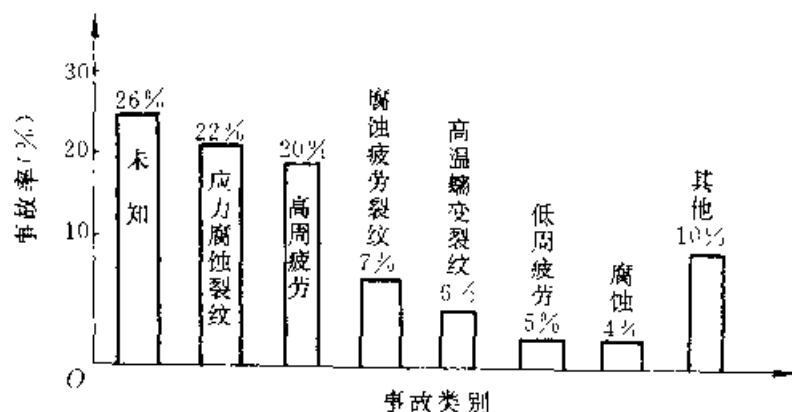


图 15-23 关于汽轮机叶片事故原因的统计

低压段动叶片,随着叶片尺寸的增大,其高速旋转的离心力和动应力将不断增加。而其中的末级、次末级或次次末级叶片则工作在下湿蒸汽环境中,蒸汽中的微量氯离子等残余有害物质易沉积在叶片表面而产生腐蚀或应力腐蚀。低压静叶片工作时,主要承受低压蒸汽的冲击以及湿蒸汽的腐蚀。

2. 叶片的失效形式 叶片工作过程中,动叶片与转子一起高速旋转,承受的各种应力比静叶片大得多,即工作环境相对恶劣。因此,叶片的失效主要是动叶片的失效。

图 15-23 是美国 EPRI 电力研究所对美国汽轮机叶片事故原因的统计结果。

(1) 应力腐蚀、疲劳和腐蚀疲劳 高速运转的叶片承受的是交变载荷,若叶片振动特性不良、设计加工不当或装配质量不良,在受到各种频率的蒸汽流扰动作用以及运行周波改变的影响时,都可能使叶片因发生振动产生疲劳失效。汽轮机的调节级叶片以及低压的几级叶片就经常发生这种断裂事故。

低压末级、次末级以及次次末级叶片由于处于湿蒸汽下运行,当蒸汽凝聚相中含有某些活性阴离子并沉积在叶片表面上时,将使叶片表面的氧化膜发生破坏,使叶片表面出现腐蚀小坑,成为应力腐蚀、疲劳和腐蚀疲劳的裂纹源,导致叶片的断裂失效。试验表明,叶片材料在 22%(质量分数)NaCl 腐蚀溶液中的疲劳强度将比在空气中降

低 60% 左右。

(2) 低压末级叶片的水蚀,低压蒸汽中含有的微小水滴撞击高速旋转的低压动叶片(如:1016mm 叶片正常工作时,其叶顶的圆周速度高达  $600\text{m/s}$ ),使叶片表层金属产生塑性变形并最终被冲刷掉,在叶片的进汽边产生水蚀,并且愈向叶顶愈严重。水蚀将导致叶片的安全性下降、汽流变化及机组效率下降。

(3) 喷嘴、高温调节级叶片的固体颗粒冲蚀磨损,由锅炉管道和蒸汽导管剥落的氧化物颗粒在高压蒸汽的作用下,高速冲击汽轮机的喷嘴和调节级叶片,而使叶片型面产生冲蚀磨损。冲蚀磨损将使汽轮机的效率降低、可用性降低、输出功率减少。

(1) 水击,若汽轮机末几级隔板上疏水结构不好,或疏水不良,使凝结水进入低压缸的蒸汽通道,一定尺寸的水珠冲击高速旋转的叶片,会使叶片产生严重变形,甚至导致叶片的断裂。

#### 15.4.2 叶片用钢

叶片基本上都使用 12%Cr 马氏体不锈钢和改型的 12%Cr 马氏体不锈钢和耐热钢制造,如:1Cr13、2Cr13、C-422、X22CrMoV121、1Cr12Ni3Mo2VN 等。该类马氏体不锈钢加工性能好,成本低,吸振能力强(1Cr13、2Cr13 钢的衰减性能仅次于铸铁),并且可以通过加入适当的合金强化元素和改进锻造、热处理等工艺措施,使其强韧性满足叶片设计要求。

图 15-24 和图 15-25 分别为 12%Cr 型钢的相图和组织图。众所周知,在改型 12%Cr 型不锈钢中,加入的 Cr、Mo、W、V 是强碳化物形成元素,C、Mn、Ni 和 N 则是奥氏体的形成与稳定元素。钢中过多的  $\delta$ -铁素体含量会显著降低钢的强度、塑性及韧性,还会影响钢的疲劳强度和高温强度。因此 12%Cr 钢应注意碳与合金元素的适当配比,严格控制金相组织中  $\delta$ -铁素体的含量。钢中的  $\delta$ -铁素体含量可用下式进行计算。即:

$$\delta\text{-铁素体含量} = (10E_{\text{Cr}} - 100\%)$$

$$\begin{aligned} \text{铬当量}, E_{\text{Cr}} = & 1\text{Cr} + 2\text{W} + 2.2\text{Mo} + 4.5\text{Nb} \\ & + 3.2\text{Si} + 10\text{V} - 7.2\text{Ti} + 12\text{Al} \\ & + 2.8\text{Ta} - 45\text{C} - 30\text{N} - \text{Ni} \\ & - 0.6\text{Mn} - \text{Cu} - \text{Co} \end{aligned}$$



另一种铬当量  $E_{Cr}$  计算式为:

$$E_{Cr} = 1Cr - 40C - 2Mn - 1Ni - 6Si \\ + 4Mo + 11V - 30N + 1.5W$$

当  $E_{Cr} \leq 9$  (目标 7) 时, 钢中一般不存在  $\delta$ -铁素体。

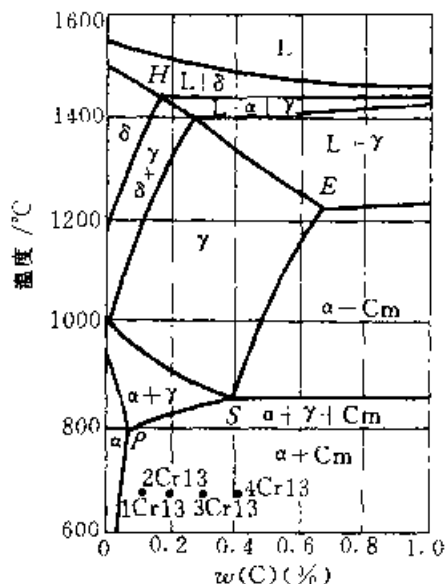


图 15-24 12%Cr 钢的 Fe-Cr-C 平衡相图

表 15-20 为国内外汽轮机制造厂常用的叶片材料, 其化学成分见表 15-21

电炉冶炼的 12%Cr 马氏体不锈钢和耐热钢, 一般含有较多的夹杂物, 只能用于制造静叶片。动叶片用钢均需采用电渣重熔, 真空感应熔炼或真空自耗重熔等二次精炼的方法制造, 使叶片材料的夹杂物含量大为降低, 合金元素的偏析得到改善。

根据 GB8732 和 GB1221 标准, 有十种常用叶片材料, 几种典型的动、静叶片材料与热处理介绍如下。

1. 亚临界高、中压叶片用 2Cr12NiMo1W1V (C422) 钢与 1Cr12WMoV 钢 2Cr12NiMo1W1V (C422) 钢是由国外引进的耐热不锈钢。该钢的合金元素的配比比较合理, 具有高的高温强度、良好的长期热强性能和持久塑性, 无缺口敏感性, 耐应力腐蚀, 被广泛地用于电站汽轮机的制造业, 它不仅用于汽轮机高温部分的叶片, 而且还广泛用于汽轮机的紧固件、阀杆等其他零部件的制造。

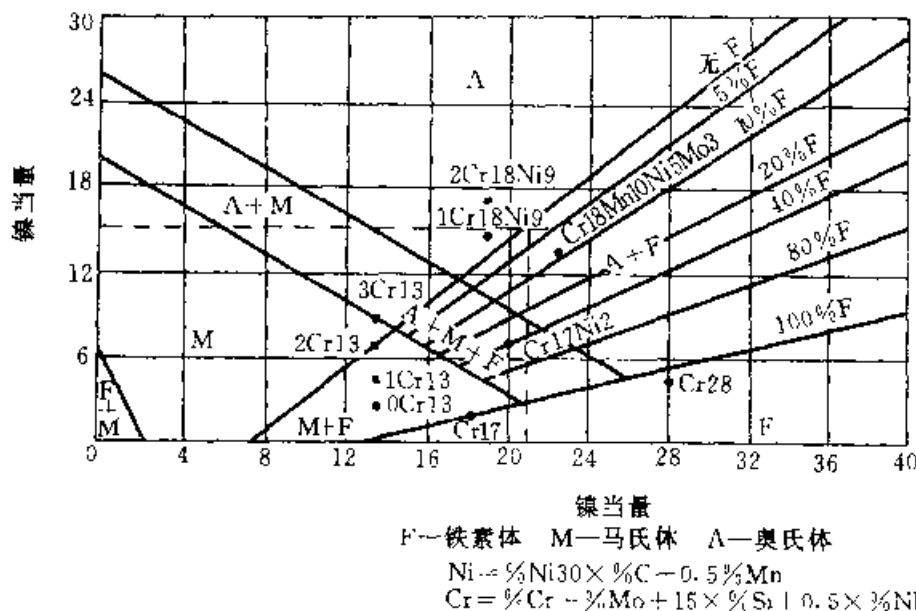


图 15-25 不锈钢的组织图

表 15-20 国内外汽轮机制造厂常用叶片材料

制造厂家	动叶片牌号或钢种	静叶片牌号或钢种	末级叶片
高温叶片	GE、日立、东芝 AISI616(C422)H46 R26	AISI616(C422)H46	
	西屋、三菱 AISI616(C422)	AISI616(C422)	

(续)

制造厂家		动叶片牌号或钢种	静叶片牌号或钢种	末级叶片
高温叶片	西门子	X22CrMoV121 X15CrMoVNbN111	X22CrMoV121	
	中国	1Cr12WMoV 1Cr11MoV 2Cr12NiMo1W1V H46	1Cr11MoV1Cr13 ZG1Cr13ZG1Cr11MoV	
中温、低温叶片	GE、日立、东芝	AISI403	AISI403 AISI410	12Cr Ni Mo V Ti-6Al-4V
	西屋、三菱	AISI403	AISI403 AISI304	17-4PH Ti-6Al-4V
	西门子	X20Cr13	X20Cr13 X7CrAl13	X10CrNiMoV122
	中国	1Cr13 2Cr13	ZG1Cr13 ZG2Cr13 1Cr13	1Cr12Ni2W1Mo1V 17-4PH

表 15 21 叶片钢的主要化学成分(质量分数)

(%)

钢 种	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu
1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	11.50~ 13.50					
1Cr12	0.10~ 0.15	≤0.60	≤0.60	11.50~ 13.00					≤0.30
X7CrAl13 (德国)	≤0.08	≤1.00	≤1.00	12.50~ 14.00	Al:0.1~ 0.30				
2Cr13	0.16~ 0.24	≤0.60	≤0.60	12.00~ 14.00					≤0.30
X20Cr13 (德国)	0.17~ 0.22	0.10~ 0.50	0.30~ 0.80	12.50~ 14.00	0.30~ 0.80				
1Cr12Mo	0.10~ 0.15	≤0.50	0.30~ 0.60	11.50~ 13.00	0.30~ 0.60	0.30~ 0.60			
AISI403	0.10~ 0.15	≤0.50	≤1.00	11.50~ 13.00	≤0.60	≤0.60			≤0.50
1Cr11MoV	0.11~ 0.18	≤0.50	≤0.60	10.00~ 11.50	≤0.60	0.50~ 0.70		0.25~ 0.40	≤0.50
1Cr12WMoV	0.12~ 0.18	≤0.50	0.50~ 0.90	11.00~ 13.00	0.40~ 0.80	0.50~ 0.70	0.70~ 1.10	0.15~ 0.30	≤0.30
X22CrMoV121 2Cr12MoV	0.18~ 0.23	≤0.50	0.30~ 0.80	11.00~ 12.50	0.30~ 0.50	0.80~ 1.20		0.25~ 0.35	≤0.30
2Cr11NiMo1V (851)	0.17~ 0.23	≤1.00	≤1.00	10.50~ 11.50	≤0.50	0.90~ 1.10		0.15~ 0.25	≤0.50
2Cr12NiMo1W1V (802T)	0.15 0.21	≤0.50	0.50~ 0.90	11.00~ 13.00	0.80~ 1.20	0.70~ 1.10	0.75~ 1.05	0.15~ 0.30	
2Cr12NiMo1W1V AISI616(C422)	0.20~ 0.25	≤0.50	0.50~ 1.00	11.00~ 12.50	0.50~ 1.00	0.90~ 1.25	0.90~ 1.25	0.20~ 0.30	≤0.30

(续)

钢 种	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu
H46	0.15~	0.20~	0.50~	11.00~	0.30~	0.80~	Nb:0.35~	0.15~	N:0.04~
X19CrMoVNbN111	0.20	0.60	0.80	11.50	0.60	1.10	0.55	0.25	0.08
AISI304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18.00~ 20.00	8.00~ 10.50				
1Cr12Ni2Mo1W1V	0.12~ 0.16	0.10~ 0.35	0.40~ 0.80	10.50~ 12.50	2.20~ 2.60	1.00~ 1.40	1.00~ 1.10	0.15~ 0.35	
X10CrNiMoV1222	0.08~ 0.13	0.10~ 0.50	0.60~ 0.90	11.40~ 12.50	2.20~ 2.60	1.60~ 1.80	N:0.020~ 0.040	0.25~ 0.40	
12Cr-Ni-Mo-V	0.08~ 0.15	≤0.25	0.50~ 0.90	11.00~ 12.50	2.00~ 3.60	1.50~ 2.00	N:0.020~ 0.040	0.25~ 0.40	
17-4PH	≤0.055	≤1.00	≤0.50	15.00~ 16.00	3.80~ 4.50		Nb+Ta 0.15~0.35		3.00~ 3.70
Ti-6Al-4V	≤0.10	≤0.15	Fe: ≤0.30	O: ≤0.15	V: 3.5~1.5	Ti: 余量	Al: 5.5~6.8		
R26	≤0.08	≤1.50	≤1.00	16.0~ 20.0	35.0~ 39.0	2.5~ 3.0	Co:18.0~22.0 B:0.001-0.1		Fe: 余量

该钢与 1Cr12WMoV 的化学成分十分接近, 见表 15-21; 热处理工艺和力学性能要求见表 15-22, 图 15-26 和图 15-27 分别为 2Cr12NiW1Mo1V 和 1Cr12WMoV 钢的连续冷却转变曲线, 这两种钢均为亚临界参数高、中压叶片常用钢种。

从 2Cr12NiW1Mo1V 钢的连续冷却转变曲线

可以看出, 该钢空淬即可获得马氏体组织, 铁素体含量在正常情况下不会超过 5% (体积分数)。

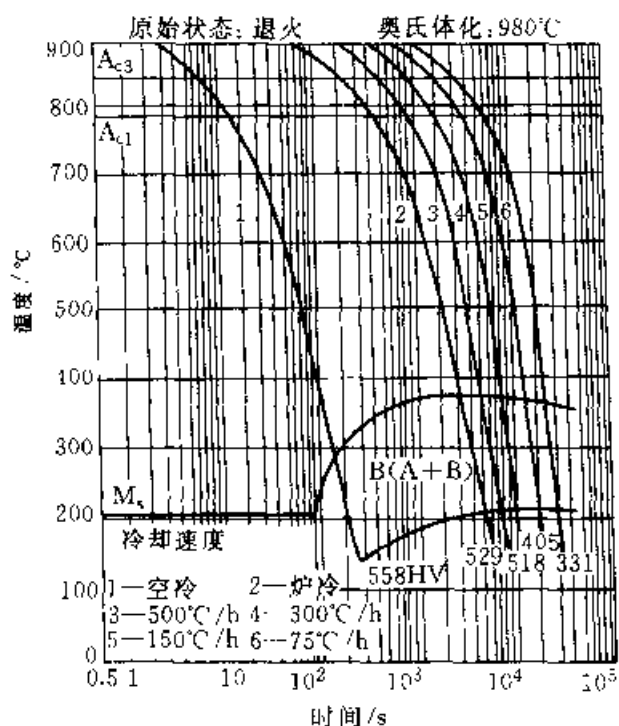
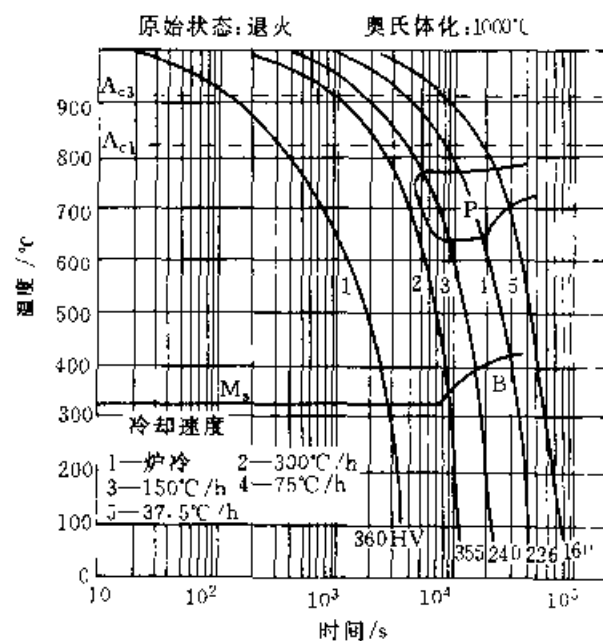
1Cr12WMoV 钢空冷也可获得马氏体组织, 但组织中铁素体含量一般都较高。这是由于 1Cr12WMoV 钢中 C、Ni 元素较低之故。

表 15-22 动叶片材料的热处理工艺和力学性能要求 (GB8732 或工厂标准)

牌 号	热 处 理 /°C				$\sigma_{0.2}$ MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	HBS	$A_{KU}$ /J
	退 火	回 火	调 质							
			淬 火	回 火						
1Cr13	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	950~ 1000 油	700~ 750 空	≥345	≥540	≥25	≥55	≥159	≥78
1Cr12	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	980~ 1040 油	660~ 770 空	≥440	≥615	≥20	≥60	187~ 229	≥71
2Cr13	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	950~ 1020 油	660~ 770 空	≥490	≥665	≥16	≥50	207~ 241	≥63
1Cr12Mo AISI403	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	950~ 1000 油	650~ 710 空	≥550	≥685	≥18	≥60	217~ 248	≥78
1Cr11MoV	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	1000~ 1050 油	700~ 750 空	≥490	≥685	≥16	≥55	269~ 302	≥47
1Cr12WMoV	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	1000~ 1050 油	680~ 740 空	≥590	≥735	≥15	≥45	269~ 302	≥47
2Cr12MoV	880~ 930 缓冷	750~ 770 快冷	1020~ 1070 油	680~ 740 空	≥600	≥922	≥15	≥50	241~ 285	≥47
2Cr11NiMo1V(851)			980~ 1020 油	590~ 640 空	$\sigma_{0.02}$ ≥655	≥932	≥16	≥40	285~ 331	$A_{kv}$ ≥17

(续)

牌 号	热 处 理 /℃				$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	HBS	$A_{KV}$ /J
	退 火	回 火	调 质							
			淬 火	回 火						
2Cr12Ni1Mo1W1V (802T)	800~ 900 缓冷	700~ 770 快冷	1020~ 1060 油	660~ 720 空	$\geq 735$	$\geq 880$	$\geq 14$	$\geq 42$		$\geq 47$
2Cr12Ni1Mo1W1V (C422)	860~ 930 缓冷	750~ 770 快冷	980~ 1040 油	650~ 750 空	$\geq 760$	$\geq 930$	$\geq 12$	$\geq 32$	277~ 311	
1Cr12Ni2W1Mo1V			980~ 1050 油冷	650~690 空冷 (二次)	$\geq 735$	$\geq 922$	$\geq 13$	$\geq 40$	293~ 331	$A_{KV}$ $\geq 45$
1Cr12Ni3Mo2VN			996~ 1024 油冷	$\geq 566$ 二次	$\sigma_{0.02}$ $\geq 758$	$\geq 1102$	$\geq 13$	$\geq 30$	331~ 363	$A_{KV}$ $\geq 51.2$
TC10(Ti-6Al-4V)	700~ 800 退火				$\geq 827$	$\geq 896$	$\geq 10$	$\geq 25$		
0Cr16Ni4Cu4Nb (17-1PH)	600~700 快冷		固溶 1020~ 1060	第 1 种时 效 650	590~ 755	$\geq 890$	$\geq 16$	$\geq 55$	262~ 302	
			固溶 1020~ 1060	第 1 种时 效 820	890~ 980	950~ 1020	$\geq 16$	$\geq 55$	293~ 321	
				第 2 种时 效 570						
			固溶 1020~ 1060	第 1 种时 效 820	755~ 890	890~ 960	$\geq 16$	$\geq 55$	277~ 311	
第 2 种时 效 610										

图 15-26 2Cr12NiMo1W1V(C422)  
钢连续冷却转变曲线图 15-27 1Cr12W1MoV 的连续  
冷却转变曲线

12%Cr 型钢的碳含量在 0.1%~0.2% (质量分数) 之间时, 有好的抗蠕变性能。在钢中加入的 Cr、Mo、W、V 元素除参与固溶强化外, 主要是通过高温回火, 析出各种类型的弥散分布的碳化物, 使之得到均匀的回火索氏体组织, 获得良好的综合力学性能, 满足高温使用的要求。图 15-28 为 2Cr12NiMo1W1V (C422) 与 H46 (2Cr12MoVNbN) 及 AISI403 (1Cr12Mo) 钢高温持久强度的比较。

600℃ 左右超超临界参数高温段叶片则需使用 R26、H46 等。

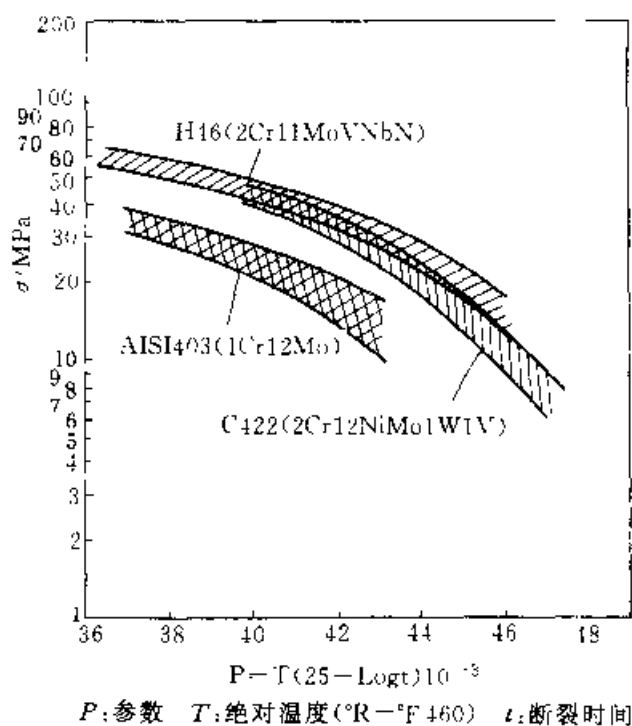


图 15-28 H46 钢、C422 钢和 AISI403 钢的高温持久强度

2. 亚临界低压叶片用 AISI403 (1Cr12Mo) 与 1Cr13 钢 AISI403 钢为 80 年代我国从国外引进的钢种, 在 GB8732 标准中将其转化为 1Cr12Mo。AISI403 和 1Cr13 叶片材料的化学成分相近见表 15-21, 热处理工艺和力学性能要求见表 15-22。图 15-29 为 AISI403 和 1Cr13 钢的连续转变曲线。

1Cr13、AISI403 钢调质热处理后, 在回火温度相同时, 其强度主要受钢中的铁素体含量的影响, 国内汽轮机制造厂在使用 1Cr13 钢作叶片材料时, 为减少钢中的铁素体含量和提高钢的强韧性, 将 1Cr13 钢的碳含量下限规定为  $w(C)0.10\%$ 。

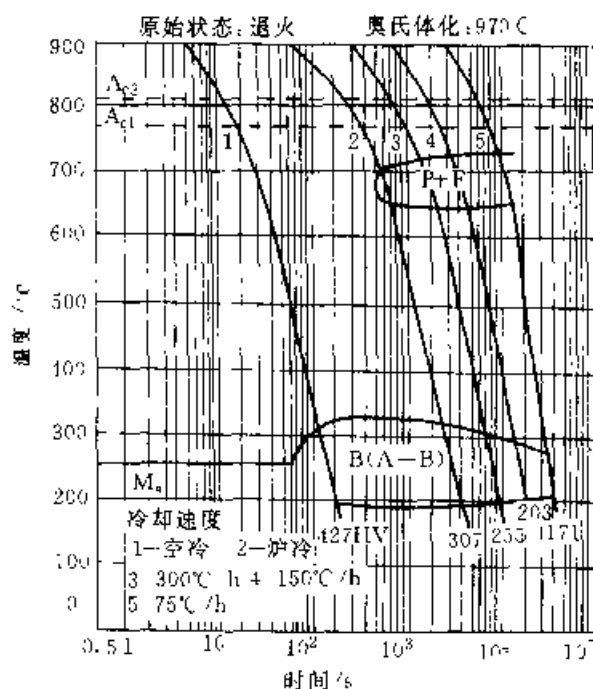


图 15-29 AISI403 连续冷却转变曲线

3. 低压末级叶片用钢 1Cr12Ni3Mo2VN、1Cr12Ni2W1Mo1V 与 17-4PH 汽轮机转子在高速转动时, 叶片长度的增加则会使转子和叶片受到的离心力成倍增加, 这样, 叶片长度的增加就受到转子材料和叶片材料强度的制约, 因此, 汽轮机的转速为 3000r/min 时, 用 12%Cr 钢制造的叶片, 最大长度一般为 40in 左右, 转速在 3600r/min 时, 叶片的长度一般最大为 850mm, 再增加叶片的长度则必须使用密度只有钢的 60% 的钛合金。

末级叶片由于其形状复杂, 截面尺寸变化较大, 为使各部位的组织性能均匀一致, 并节约材料和减少机加工量, 末级叶片毛坯一般都采用模锻 (或精锻) 制造。

目前世界各国制造的大功率汽轮机的末级叶片大多选用 12%Cr 改型马氏体不锈钢和沉淀强化不锈钢, 即 1Cr12Ni3Mo2VN、1Cr12Ni2W1Mo1V 和 17-4PH 钢, 其化学成分见表 15-21, 热处理工艺和力学性能要求见表 15-22。

在 12%Cr-Ni-Mo-V 钢中, 因 C 元素含量较低, 为了在提高材料强度水平的同时改善钢的塑韧性, 并提高 12%Cr 钢的淬透性, 使叶根的内外性能一致。该 12%Cr 钢中加入了约 2.0%~

3.0%的Ni元素,可显著减少钢中铁素体的含量;钢中加入少量的N元素,亦是为了提高钢的强度并减少钢中的铁素体含量;加入适量Mo是为了强化基体。为有效减少钢中铁素体的含量,应注意控制该钢的Cr当量,一般应要求低于9,目标值为7。图15-30为1Cr12Ni2Mo1W1V钢的连续冷却转变曲线。

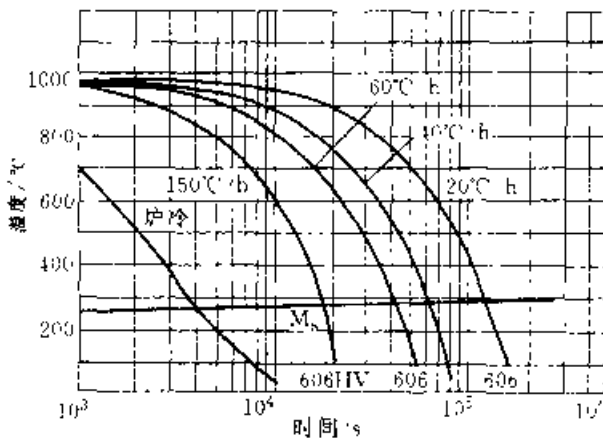


图 15-30 1Cr12Ni2W1Mo1V 钢  
的连续冷却转变曲线  
(化学成分(质量分数):C:0.18 Cr:11.0;  
Ni:2.10 W:1.32 Mo:1.14 V:0.23)

在17—4PH钢中,碳含量非常低( $\leq 0.055\%$  (质量分数)),且Cr、Ni元素含量较高,保证该钢能获得具有很好塑韧性的低碳马氏体基体;较高的Cu含量为这种马氏体基体提供了一种弥散强化相——富Cu相。由于这两方面的原因使该钢具有优良的综合力学性能和优异的耐蚀性及振动衰减性能。

我国200MW及300MW汽轮机中曾经使用的末级叶片材料还有2Cr13、2Cr12Ni1Mo1W1V(802T)及2Cr11Ni1Mo1V(851)等。

4. 静叶片用钢 1Cr13、1Cr11MoV、ZG1Cr13、ZG1Cr11MoV 静叶片由于工作时受到的应力较小,故选用的材料和材料强度等级要求一般低于同级动叶片。

静叶片用钢一般均用电炉冶炼,常用的静叶材料为1Cr13型的不锈钢。末级静叶片因尺寸较大,一般采用精密铸件。随着机组安全性和可靠性的提高,对静叶片的要求也越严格,国外一些公司已采用模锻静叶片或用厚钢板弯制静叶片。其化学成分见前表15-21,静叶片热处理工艺和力学性能要求见表15-23。

表 15-23 静叶片材料的常用热处理工艺和力学性能要求(工厂标准)

牌 号	热 处 理		$\sigma_{0.2}$	$\sigma_t$	$\delta$	$\psi$	HBS	$A_{K1}$ [J]
	淬火, °C	回火, °C	MPa	MPa	(%)	(%)		
1Cr13	980~1020	680~720	$\geq 441$	$\geq 618$	$\geq 20$	$\geq 60$	192~235	$\geq 40$
	油淬	空冷	$\geq 353$				187~229	
ZG1Cr13	1030~1050	650~700	$\geq 410$	$\geq 615$	$\geq 20$	$\geq 60$	187~229	$\geq 40$
	油淬	空冷	$\geq 392$	$\geq 519$	$\geq 15$	$\geq 40$	187~235	
ZG2Cr13	980~1000	730~750	$\geq 441$	$\geq 588$	$\geq 12$	$\geq 35$	207~255	$\geq 29.1$
	油淬	空冷						
1Cr11MoV	1000~1030	710~730	$\geq 490$	$\geq 650$	$\geq 16$	$\geq 55$	217~248	$\geq 50$
	油淬	空冷	$\geq 392$				192~241	
ZG1Cr11MoV	980~1000	730~750	$\geq 490$	$\geq 637$	$\geq 15$	$\geq 40$	197~229	$\geq 40$
	油淬	空冷						

### 15.4.3 叶片毛坯的热处理

汽轮机动叶片用钢采用电炉冶炼+电流重熔,大大减少了钢中的夹杂物,电渣锭再经充分地锻造使其中的疏松、偏析等缺陷在锻造过程中得到改善,从而使叶片毛坯性能热处理后满足技术条件的要求。

动叶片毛坯按外形分为方钢叶片和模锻叶

片,其热处理通常包括锻后热处理和调质热处理。

锻后热处理的目的是为了改善组织,降低硬度和去除锻造应力,为随后的调质热处理做好准备。锻后热处理根据不同材料采用不同的热处理工艺,通常采用高温退火或高温回火。

叶片钢的调质热处理通常是淬火+高温回火,组织为回火索氏体,此时材料的综合力学性能好,耐蚀性也较好。表15-22、表15-23分别为动叶

片及静叶片材料的热处理工艺以及力学性能要求。

12%Cr 叶片钢的淬火温度一般控制为 950~1050℃。其选择原则是既要保证获得均匀奥氏体组织,使 Cr23C6 型碳化物得到充分溶解,又要避免生成高温铁素体。该类叶片钢的淬火温度主要受 C、Cr、W、Mo 等合金元素的影响,若淬火温度低,碳化物溶解不充分,将使材料的强度性能偏低;若淬火温度超过正常的淬火温度,将使钢的晶粒粗大,铁素体量增多,降低钢的塑性和韧性。由于 12%Cr 钢的淬火马氏体组织中,固溶了碳及大量的合金元素,具有较大的内应力,为防止产生裂纹,淬火后必须及时进行回火处理,淬火后放置的时间一般应在 8h 以内。

12%Cr 叶片钢因铬含量高,C 曲线右移,临界淬火速度小,小型零件空冷淬火即可。大型零件

为使奥氏体充分转变为马氏体,多采用油淬。

12%Cr 钢淬火经不同的回火温度处理后,其组织、性能也随之变化:组织中的碳化物转变顺序是:  $(Fe,Cr)_3C \rightarrow (Cr,Fe)_7C_3 \rightarrow (Cr,Fe)_{23}C_{14}$ 。200~350℃ 低温回火时,淬火马氏体中析出少量的  $M_3C$  碳化物,并消除了部分内应力,其组织转变为回火马氏体。此时钢不仅仍保持高的强度和硬度,并因析出的碳化物不多,大量的铬元素仍保留在固溶体中,钢的耐腐蚀性较好,但塑性和韧性较低。在 400~550℃ 中温回火处理时,组织中析出弥散度很高的  $M_7C_3$  碳化物,使钢出现回火脆性,冲击韧度极低;600~750℃ 高温回火时,将形成  $Cr_{23}C_{14}$  型碳化物,组织转变为回火索氏体。经高温回火处理后,12%Cr 叶片钢的综合性能良好。图 15-31a、b 为回火温度对 Cr13 型钢硬度和冲击韧度的影响。图 15-32 为不同温度回火后的 13%Cr 不锈钢在 3% (质量分数) NaCl 溶液中腐蚀四星期后的腐蚀性能比较。图 15-33 和图 15-34 分别为 AISI403 钢和 C422 钢在不同温度回火处理后的力学性能。

12%Cr 型不锈钢回火的冷却方式,一般都采用空气冷却,因为 13Cr 型不锈钢有回火脆性倾向,并且随着钢中的碳含量增加而敏感性增大。2Cr13 钢在某些情况下,如叶片尺寸较大时为抑制回火脆性,使钢获得较高的冲击韧度,回火处理后可采用油快速冷却。但油冷会使钢的内应力增大,使叶片在机械加工时产生变形,因此油冷却后应增加一次除应力回火处理。

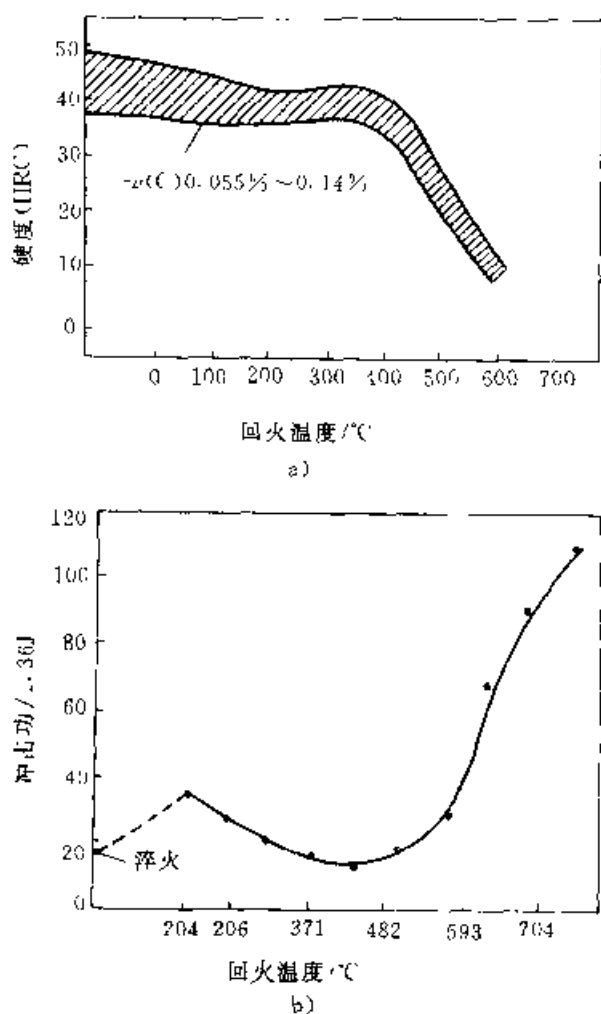


图 15-31 回火温度对 Cr13 型钢硬度和冲击韧度的影响

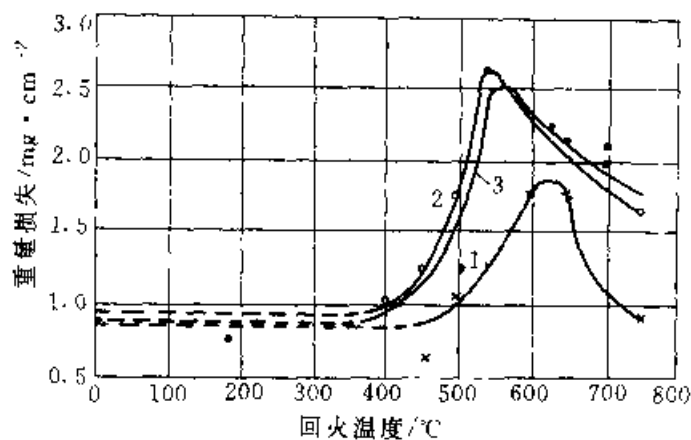


图 15-32 不同温度回火后的 13%Cr 不锈钢在  $w(NaCl) 3\%$  溶液中的腐蚀性能比较  
(1  $w(C) 0.06\%$ ,  $w(Cr) 13.3\%$  2  $w(C) 0.23\%$ ,  $w(Cr) 13\%$  3  $w(C) 0.29\%$ ,  $w(Cr) 13\%$ )

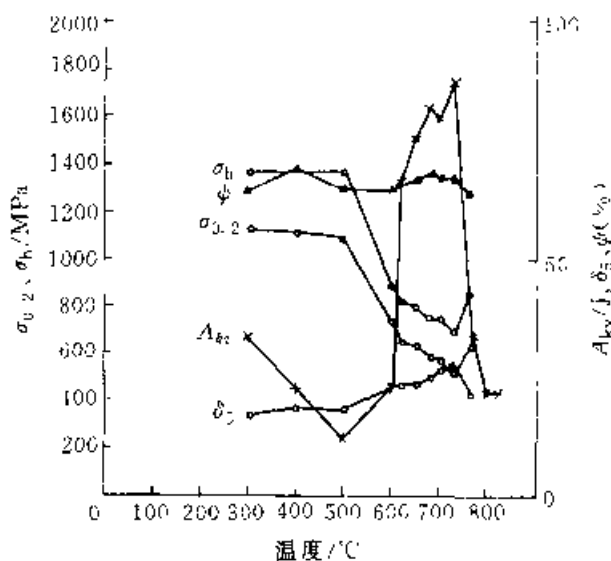


图 15-33 AISI103 钢 955°C 淬火后在不同温度回火处理的力学性能

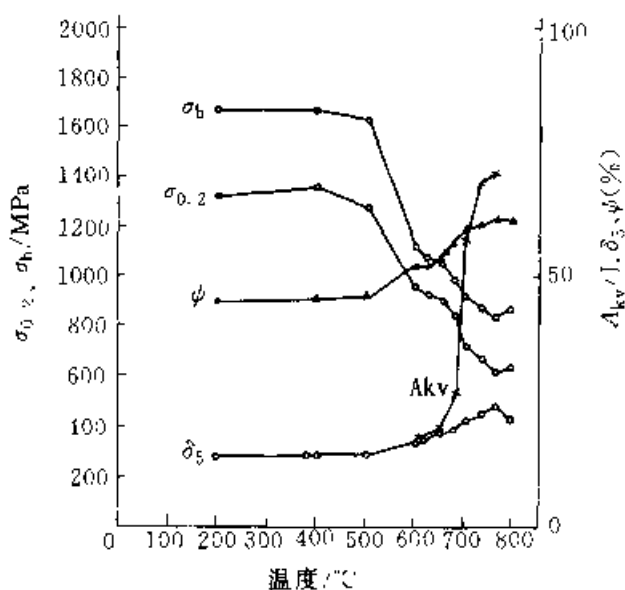


图 15-34 C422 钢 980°C 淬火后在不同温度回火处理的力学性能

#### 15.4.4 叶片的特种热处理

1. 叶片的局部淬火 汽轮机的低压末级动叶片在运行时叶片进汽边靠叶顶附近受湿蒸汽中水滴的冲蚀，而使叶片表层金属产生塑性变形并最终脱落，造成叶片进汽边产生水蚀。为防止叶片进汽边的严重水蚀，一是改进机组的疏水结构，使静叶片上的水滴尽可能少；二是在叶片的进汽边叶顶部采用防水蚀措施，如：钎焊或钎焊司太立合金片、表面局部淬火等。

金片、表面局部淬火等。

叶片表面的局部淬火防水蚀方法，是使进汽边叶顶局部的区域转化为马氏体，淬火层的硬度可达 40HRC 以上。材料硬度的提高可有效的减轻叶片的水蚀程度，达到防水冲蚀的目的，其工艺主要包括：高频淬火、火焰淬火、等离子淬火以及激光淬火等。

用高频淬火和等离子淬火主要是利用它们的一些特点，①加热速度快，加热时间短，淬火晶粒细小，淬火后表面硬度高。②表面氧化脱碳少，工件淬火变形小。③操作简单，淬火加热易进行控制。④表面形成一层压应力，从而提高材料的疲劳强度和抗应力腐蚀的能力。

高频淬火和火焰淬火的淬火温度一般控制在 950~1050°C 的范围；淬火层深度、硬度以及淬火范围一般根据叶片设计的要求而进行控制，层深一般为 2mm，也可淬透；硬度为 40~43HRC 左右。叶片表面局部淬火处理后，应进行除应力回火，以防止叶片在运行时产生应力腐蚀。回火处理以低温回火为主，温度一般控制在 200~300°C 的范围。

2. 叶片表面渗硼、渗铬、渗氮热处理 来自锅炉管道和蒸汽导管的剥落氧化物，在高压蒸汽的作用下，高速冲击汽轮机的喷嘴和调节级叶片，使其产生冲蚀磨损。为防止这种失效，喷嘴叶片可采用渗硼、渗铬和渗氮等方法，使叶片表面产生一层硬化层，提高叶片表面的硬度。

12%Cr 叶片钢经渗硼和渗铬处理后，表面硬度可达 1300~1600HV 左右，层深一般为几十微米。渗硼处理有多种方法，其中以固体渗硼较常见，热处理的参数为 900~1000°C，保温时间 6~10h。渗铬热处理的参数为 800~950°C，保温时间 6~10h。经渗氮处理后，其表面硬度在 800HV 以上，层深一般为 0.15~0.25mm。渗氮处理也有多种方法，其中以气体渗氮为主；热处理的参数为 530~550°C，保温时间 15~22h。

### 15.5 汽轮机螺栓的热处理

#### 15.5.1 汽轮机螺栓的服役条件及失效方式

螺栓属于汽轮机紧固件，汽轮机紧固件包括用于汽缸、阀门、蒸汽连通管、转子联轴器、叶片等



零部件上起紧固作用的螺栓、螺钉、螺母和铆钉等,其中最重要的是高、中压汽缸法兰连接用大型螺栓与螺母,国产300MW汽轮机高压外缸大型双头螺栓的尺寸为 $\phi 120\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ,而500MW高压外缸双头螺栓尺寸为 $\phi 160\text{mm} \times 1800\text{mm}$ 。

汽轮机高、中、低压汽缸通过法兰面上若干只螺栓的紧固作用,将高温、高压的蒸汽密封在汽缸内。在汽轮机运行过程中,如果没有其他意外停机事故发生的话,汽缸法兰密合的连续工作时间,取决于螺栓的可靠性。为了使汽缸中分法兰面密封,将螺栓的螺母拧紧后,在螺栓内有很大的弹性应力存在。在高温的长时间作用之下,螺栓内的弹性变形将向塑性变形转变,从而使螺栓的预紧力发生应力松弛,导致汽缸法兰连结紧密性的破坏。

因此,汽缸螺栓金属材料应具有良好的高温持久强度、高温蠕变强度及较好的抗松弛性能。螺栓由于存在螺纹具有产生应力集中的条件,因此材料应具有小的缺口敏感性及小的时效脆化倾向。对于在汽缸内部工作的螺栓,由于受蒸汽和水的冲蚀,还要求具有一定的抗蚀性。另外,制造螺栓和螺母的材料,还不应有相互咬死的倾向。国内电厂在高温下使用的紧固件,设计寿命通常为

20000h,最小密封应力为150MPa。

螺栓本身的结构、制造加工的质量、装卸螺栓的方法是否得当和拧紧时对螺栓形成的初紧应力的大小、汽轮机启动时螺栓与法兰的温度等都直接影响螺栓的使用寿命。而螺栓的过早失效,则主要是金属材料方面的原因。如用于520~535℃的25Cr2Mo1V钢,由于其组织不够稳定,在高温与高应力共同作用下松弛性能急剧恶化,往往导致汽缸或阀门严重漏气。此外,由于该材质的时效脆化曾发生过螺栓突然断裂的事故。

近来还发现高温合金材质制作的大螺栓,因其线胀系数过大,由应力腐蚀而导致了螺栓的早期断裂失效。

### 15.5.2 汽轮机螺栓用钢

常温及350℃以下的汽轮机低温段紧固件或标准件可用35或45号碳素钢制造,高温、高应力紧固件依据设计工况多采用合金耐热钢、12%Cr不锈钢或高温合金制造。普通铬钼合金耐热钢沿用GB3077《合金结构钢技术条件》,而复杂成分的合金热强钢,不锈钢及高温合金则依据各汽轮机厂制定的工厂标准。表15-24列出了汽轮机高温螺栓常用钢种的主要成分、高温持久性能及适用温度范围。

表 15-24 汽轮机中、高温螺栓用钢的主要成分、性能及适用温度范围

工作温度 /℃ ≤	钢种	主要化学成分(质量分数)(%)							持久强度 $\sigma_{10}^t$ /MPa
		C	Cr	Mo	W	V	Ti	B	
480	35CrMo	0.32~ 0.40	0.80~ 0.10	0.10~ 0.25					475℃:167
510	25Cr2MoV	0.22~ 0.29	1.50~ 1.80	0.25~ 0.35		0.15~ 0.30			500℃:196
540	2Cr12NiMo1W1V (C422)	0.20~ 0.25	11.0~ 12.5	0.90~ 1.25	0.90~ 1.25	0.20~ 0.30	(Ni) 0.50~ 1.00		540℃:206
560	20Cr1Mo1VNbTiB	0.17~ 0.23	0.90~ 1.30	0.75~ 1.00	(Nb) 0.11~ 0.25	0.50~ 0.70	0.05~ 0.14	(加入量) 0.005	560℃:191
650	R26	≤0.08	16.0~ 20.0	2.50~ 3.55	(Co) 18.0~ 22.0	(Ni) 35.0~ 39.0	2.50~ 3.00	0.001~ 0.01	550℃:480

过去在蒸汽初温为 535℃ 的各种高压、超高压及亚临界不同功率的汽轮机中,常用的螺栓钢种为 25Cr2Mo1V 及 20Cr1Mo1V1,前者因在电厂发生脆断问题,后者因大截面螺栓淬透性欠佳均基本淘汰。从 1973 年起,汽轮机制造行业广泛采用 20Cr1Mo1VNbTiB(1 号螺栓钢)取代上述钢种,先后用于 50MW、75MW、200MW 及 300MW 等多种机型,二十多年来已取得最佳的安全运行考核业绩,该钢制造的大螺栓在电厂无漏汽与脆断现象发生。该钢中除了含有铬、钼、钒等起固溶强化及弥散强化作用的元素外,还加入了铌、钛等细化晶粒及强化晶界的元素硼。由于微量硼元素的加入,起到降低晶界表面能的作用,使得这些元素偏聚在晶界上,填充了晶界结构上的空位,减缓了晶界的扩散过程,有效地阻止了晶界碳化物的聚集长大,因而抑制了晶界裂纹的形成及长大过程,强化了晶界;且由于 VC、NbC、TiC 等多种稳定的碳化物相所起到的沉淀硬化作用比单一的碳化物更为有效,使组织更为稳定,无时效脆化现象,无缺口敏感性。因而该钢比普通合金成分的耐热钢具有更高的持久强度、蠕变强度及抗松弛性能,特别适用于 560℃ 温度下作大容量机组的大型紧固螺栓。

80 年代,引进消化美国及日本汽轮机制造技术后,在 535℃ 亚临界参数,与 20Cr1Mo1VNbTiB 并列使用在 300MW 及 600MW 汽轮机上的高温大螺栓钢种是 C122、Cr12 改型不锈钢及 R-26 Cr-Ni-Co-Fe 基沉淀硬化型高温合金。

除上述钢种外,大型机组大截面中温螺栓用钢还有 40CrMoV、15Cr1MoV,高温大截面螺栓钢还有 20Cr1Mo1VTiB(2 号螺栓钢)、GH145 等

铬钼钒类耐热钢采用碱性电炉冶炼,C122 不锈钢一般为电渣钢,高温合金则采用真空感应炉冶炼+电渣重熔。用于 600MW 大型机组上的 15Cr1MoV 钢大截面中温螺栓,为了满足发纹检查对钢材纯净度的严格要求,国内生产也采用了电渣重熔。

### 15.5.3 螺栓毛坯的热处理

300MW 及以下容量机组的大螺栓在汽轮机制造厂的加工路线是:轧制或锻制圆钢的进厂验收检验→按螺栓尺寸下料→按冶炼炉次分批进行螺栓的性能热处理→按热处理炉次抽检力学性能,且每件热处理毛坯需硬度检查合格→加工为成品螺栓。引进型 600MW 机组用高温及中温大螺栓,在成品完工后还需进行磁粉或超声波探伤检查。

表 15-25 列出了高温螺栓主要钢种的热处理工艺,汽轮机厂对这些钢力学性能生产检验数据的统计结果及要求值。

当高温螺栓材料作螺母使用时,其工作温度可以比螺栓工作温度高约 30℃,为了使螺栓与螺母在长期使用后不发生咬死现象,高温螺栓应配制高温强度等级低一个档次的异种材料作螺母。如:大容量汽轮机组高压汽缸法兰面大螺栓 20Cr1Mo1VNbTiB 材料通常使用 25Cr2MoV 制作罩螺母,而 25Cr2MoV 的中压螺栓则使用 35CrMo 制作罩螺母。

高温螺母工作时需多次装卸,因此螺母六角面应有高硬度,其硬化层应能耐高温,故螺母的八角面通常需进行渗氮处理。其渗氮处理的工艺及要求如表 15-26 所示。

表 15-25 汽轮机高温螺栓钢的热处理工艺及力学性能数据

钢种	热处理工艺	力学性能				
		统计值	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta$ (%) $\psi$ (%)	
35CrMo	调质:850~880℃ 油淬 560~620℃ 回火 正火:850~890℃ 空冷 560~650℃ 回火	$\bar{X}_{3.57}$	726	881	18.5	64.0
		95%上限	891	1003	21.8	69.4
		95%下限	561	759	15.2	58.3
		要求值 $\geq$	588	765	14	40

(续)

钢 种	热处理工艺	力 学 性 能			
		统计值	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%) $\phi$ (%)
25Cr2MoV	调质:920~960°C 油淬 640~680°C 回火 正火:940~980°C 空冷 640~680°C 回火	$\bar{X}_{33}$	774	864	19.5 69.3
		95%上限	877	958	22.5 73.6
		95%下限	672	769	16.6 73.6
		要求值 $\geq$	686	785	15 60
2Cr12NiMo1W1V (C122)	(1040 $\pm$ 15)°C 油淬,650~750°C 回火空冷	$\bar{X}_{216}$	846	995	19.1 54.7
		95%上限	921	1052	22.5 67.9
		95%下限	771	937	15.8 47.4
		要求值 $\geq$	760	930	12 32
20Cr1Mo1VNbTiB	退火:750~800°C 以下装炉,均热升温至 950°C 保温后炉冷至 500°C 出炉 调质:1020~1040°C 油冷 690~730°C 回火	$\bar{X}_{nb}$	788	898	17.5 62.1
		95%上限	916	1025	20.8 72.6
		95%下限	662	771	14.2 52.2
		要求值 $\geq$	670	725	15 60
R26	固溶处理:1000~1050°C $\times$ 1h 油冷 时效:800~830°C $\times$ 20h 炉冷至 710~750°C $\times$ 20h 空冷	$\bar{X}_{203}$	671	1154	29.0 45.0
		95%上限	735	1215	32.6 52.6
		95%下限	606	1093	25.3 37.3
		要求值 $\geq$	550	1000	15 20

表 15-26 汽轮机高温螺栓罩螺母的渗氮工艺及要求

钢 号	气 体 渗 氮 工 艺	渗氮层技术要求		
		层 深	硬 度	脆 性
35CrMo	$\leq 250^\circ\text{C}$ 入炉,随炉升温, (520 $\pm$ 10)°C 保温 30h 氮气进气压力:60~80mm 油柱 氮气出气压力:30~40mm 油柱	$\geq 0.3\text{mm}$	$\geq 600\text{HV}$	$\leq 3$ 级
25Cr2MoV	氮气分解率:25%~30% 渗氮后随炉冷却, $\leq 150^\circ\text{C}$ 出炉	$\geq 0.3\text{mm}$	$\geq 700\text{HV}$	$\leq 3$ 级

#### 15.5.4 常见螺栓热处理缺陷及预防措施

铬钼钒钢螺栓的常见热处理缺陷和防止措施如下:

(1) 批量性淬火开裂,分析原因主要是钢厂供货的圆钢表面质量差,表面有较多浅层折叠与裂纹,在调质淬火中引起淬火开裂。采取酸洗打磨清除掉缺陷或车削去除缺陷层后再热处理,可避

免淬火开裂的发生。

(2) 淬火弯曲变形与硬度不均匀,改进设备,改进热处理操作,使长杆形零件在加热及淬火时能均匀加热与冷却。

(3) 20Cr1Mo1VNbTiB 螺栓出现粗晶。控制钢中酸溶硼含量,正确控制始锻与终锻温度;调质前,采用 950°C 退火,进行细化晶粒的预处理,可消除或抑制该钢粗晶问题的发生。

## 15.6 锅炉构件及输汽管的热处理

电站锅炉是火力发电站中与汽轮机、发电机配套使用的三大配套主机产品之一。与汽轮机、发电机的发展一样,随着电力需求量的增大和使用要求的提高,以及燃料种类的多样化,我国电站锅炉的主要产品目前已拥有 300MW、600MW 亚临界自然循环或控制循环中间再热锅炉,300MW、600MW“W”形火焰燃煤低挥发分无烟煤锅炉,300MW 及 100MW 以上的循环流化床锅炉等系列化的锅炉产品。

锅炉构件包括锅炉本体、耐火炉墙、钢构架、辅助设备和附件等部分。其中最主要的组成件是构成锅炉本体受热面的锅炉钢管(被称为“四管”的水冷壁、过热器、再热器与省煤器用管)、输送蒸汽的蒸汽管(导管、联箱和连接管等)以及卷制锅炉汽包等需用的锅炉钢板等。

### 15.6.1 锅炉用钢管及钢板的服役条件和零件失效方式

锅炉设备中的受热面管子是处在煤、油或燃气的燃烧高温、腐蚀性气氛的介质中,管内壁承受水或蒸汽的内压作用而长期工作的零件。亚临界水冷壁管和省煤器管的工作温度一般在 400℃ 以下,而过热器管和再热器管在 400~600℃ 的高温工作。因此,要求锅炉钢管有足够的持久、蠕变强度,高的抗氧化性能,良好的组织稳定性,并应有良好的焊接工艺性能。

这种高温、应力、腐蚀介质等恶劣环境对锅炉钢管的长期作用,特别是锅炉所控制的运行参数(汽温、汽压与水位)或管系的设计、制造与安装不良时,四种受热面钢管因发生长时蠕变损伤、时效脆化、氧化腐蚀,甚至于短时高温相变等而产生长时超温爆管、短时超温爆管、材质不良爆管和腐蚀性热疲劳裂纹损坏等失效。大型锅炉四管的爆漏问题是影响火力发电机组安全、经济运行的主要因素之一。

主蒸汽管常用 12Cr1MoV、10CrMo910 钢制造大口径管,如 300MW 亚临界参数的主蒸汽管的尺寸为  $\phi 273\text{mm} \times 40\text{mm}$ ,内部承受 540℃ 高温与 17.0MPa 压力,在制造过程中要进行弯管及焊接接长。要求材料具有良好的高温持久、蠕变强

度,并且有良好的塑性与焊接工艺性能。主蒸汽管受管内高温、高压蒸汽的作用,常因材质老化失效。运行时间超过十万小时的火电机组的主蒸汽管道,应加强金属监督检查及寿命评估。

高压、超高压、亚临界锅炉汽包及高压加热器用厚钢板工作温度低于 400℃,除承受高压外,还受到冲击、疲劳载荷、水和蒸汽介质的腐蚀作用,主要失效方式是疲劳、腐蚀疲劳或脆性断裂。

### 15.6.2 锅炉钢管及钢板用钢

#### 1. 锅炉钢管

在锅炉设备中,锅炉钢管主要用来制造水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管、联箱及蒸汽导管等。

锅炉设备及输汽管用钢的化学成分、强度等级及应用范围列于表 15-27,其中的绝大部分钢种已列入国标 GB5310 高压锅炉用无缝钢管。

15CrMo、12Cr1MoV 为前苏联钢种;12Cr2MoWVTiB(G102)、12Cr5MoVSiTiB(111)及 10Cr5MoWVTiB(G106)为我国自行研制的两种。

20Mng(ASME SA106B)、25Mng(ASME SA-210C)、15NiCuMoNb5(WB36)、15Mo3(DIN17175)、20Mog(ASME SA-209T1a)、12Cr2Mo(ASME SA213、SA335 T22、P22;DIN17175 10CrMo910)、10Cr9Mo1VNb(ASME SA213、SA335 T91、P91)、1Cr19Ni9(ASME SA213 TP304)、1Cr19Ni11Nb(ASME SA213 TP347H)为 80 年代引进的钢种。

P91(10Cr9Mo1VNb)大口径钢管,已广泛用来代替 12Cr1MoV 作主蒸汽管。T91 和 P91 是在 9Cr-1Mo 钢的基础上添加了 Nb 和 V 合金元素的核电用钢,其 600℃ 十万小时的持久强度是 9Cr-1Mo 钢的三倍,与 1Cr19Ni9(TP304)相比,持久强度等强温度为 625℃,许用应力的等应力温度为 607℃。它不仅保持了 9Cr-1Mo 钢优良的抗高温腐蚀性能,而且是国内外铁素体耐热钢中热强性能最高的钢种之一。

12Cr2MoWVTiB(G102)是 60 年代我国自行研制的低合金贝氏体型耐热钢,具有良好的综合力学性能、工艺性能和热强性能,用于制造大型电站锅炉(壁温  $\leq 600^\circ\text{C}$ ,在强度计算时如考虑了氧化损失可用到 620℃)的过热器和再热器。目前已

在国产 200MW 机组高压锅炉中作为高温再热器和高温过热器广泛使用。

锅炉构件用钢管依据 GB5310 或相应工厂标准,由钢厂提供化学成分、表面质量、尺寸规格、力学性能、压扁、扩孔、晶粒度及水压等无损检测均

符合要求的无缝钢管。低合金钢管的供货状态一般是热轧、正火或正火+回火,TP304 等奥氏体钢管的供货状态为固溶处理。

2. 锅炉用钢板 汽包、集箱等锅炉构件常用钢板材料的化学成分、应用范围见表 15-28。

表 15-27 锅炉受热面管与输汽管用钢的主要化学成分、强度等级与应用范围

钢 号	化学成分(质量分数)(%)									$\sigma_s$ MPa	用 途
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	Nb		
20G	0.17 ~ 0.21	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65							$\geq 215$	壁温 $\leq 480^\circ\text{C}$ 受热面管, $\leq 450^\circ\text{C}$ 联箱与蒸汽管
20MnG (SA106B)	$\leq 0.30$	$\geq 0.15$	0.29 ~ 1.06	$\leq 0.40$	$\leq 0.15$	$\leq 0.08$				$\geq 240$	$\leq 425^\circ\text{C}$ 集箱和蒸汽管道
25MnG (SA-210C)	$\leq 0.35$	$\geq 0.10$	0.29 ~ 1.06							$\geq 275$	300MW、600MW 水冷壁、省煤器、过热器及再热器
15Mo3	0.12 ~ 0.20	0.10 ~ 0.35	0.40 ~ 0.80		0.25 ~ 0.35					$\geq 260$ ~ 285	不超过 $510^\circ\text{C}$ 的过热器、 $500^\circ\text{C}$ 蒸汽导管
20MoG (SA 209T1a)	0.15 ~ 0.25	0.10 ~ 0.50	0.30 ~ 0.80		0.44 ~ 0.65					$\geq 220$	不超过 $510^\circ\text{C}$ 的水冷壁、过热器和再热器等
15CrMo	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.80 ~ 1.10	0.40 ~ 0.55					$\geq 235$	$510^\circ\text{C}$ 导管、集箱,不超过 $550^\circ\text{C}$ 过热器、再热器等
12Cr2Mo (F22、P22) (10CrMo910)	0.08 ~ 0.15	$\leq 0.50$	0.40 ~ 0.70	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.20					$\geq 280$	不超过 $565^\circ\text{C}$ 的联箱、主蒸汽管,不超过 $580^\circ\text{C}$ 再热器与过热器
12Cr1MoV	0.08 ~ 0.15	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20	0.25 ~ 0.35	0.15 ~ 0.30				$\geq 255$	不超过 $565^\circ\text{C}$ 的联箱、主蒸汽管,不超过 $580^\circ\text{C}$ 再热器与过热器
12Cr2MoWVTiB (G102)	0.08 ~ 0.15	0.45 ~ 0.75	0.45 ~ 0.65	1.60 ~ 2.10	0.50 ~ 0.65	0.28 ~ 0.42	0.08 ~ 0.18	$\leq 0.008$	(W) 0.30 ~ 0.55	$\geq 343$	大量用于大型机组不超过 $600^\circ\text{C}$ 的高温再热器与高温过热器
12Cr3MoVSiTiB (H11)	0.09 ~ 0.15	0.60 ~ 0.90	0.50 ~ 0.80	2.50 ~ 3.00	1.00 ~ 1.20	0.25 ~ 0.35	0.22 ~ 0.38	0.005 ~ 0.010		$\geq 441$	用于壁温在 $600 \sim 620^\circ\text{C}$ 的再热器与过热器等
10Cr5MoWVTiB (G106)	0.07 ~ 0.12	0.40 ~ 0.70	0.45 ~ 0.70	4.0 ~ 6.0	0.48 ~ 0.65	0.20 ~ 0.33	0.16 ~ 0.24	0.010 ~ 0.016		$\geq 392$	用于壁温小于 $650^\circ\text{C}$ 的锅炉再热器管

(续)

钢 号	化学成分(质量分数)(%)									$\sigma_{0.2}$ /MPa	用 途
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	Nb		
10Cr9Mo1VNb (T91、P91)	0.08 ~ 0.12	0.20 ~ 0.50	0.30 ~ 0.60	8.0 ~ 9.5	0.85 ~ 1.05	0.18 ~ 0.25			0.06 ~ 0.10	$\geq 115$	用于壁温不超过 650°C 亚临界、超临界、 超超临界高温过热汽 和再热器、联箱和主蒸 汽管等
1Cr19Ni9 (TP304H)	0.04 ~ 0.10	$\leq$ 1.00	$\leq$ 2.00	18.00 ~ 20.00	(Ni) 8.00 ~ 11.00					$\geq 206$	用于亚临界、超临界 650°C 高温段的过热器 及再热器等
1Cr19Ni11Nb (TP347H)	0.04 ~ 0.10	$\leq$ 1.00	$\leq$ 2.00	17.00 ~ 20.00	(Ni) 9.00 ~ 13.00				Nb—Te $\geq$ 8C 1.00	$\geq 206$	用于亚临界、超临界 650°C 高温段的过热器 及再热器等

表 15-28 锅炉汽包等构件用钢板的化学成分、强度等级及应用范围

钢 号	化学成分(质量分数)(%)								$\sigma_{0.2}$ /MPa	用 途
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu		
20g	$\leq 0.24$	0.15~ 0.30	0.35~ 0.65						$\geq 185$ ~ 245	压力小于 6MPa, 温度低于 150°C 的锅炉及附 件
16Mng	0.12~ 0.22	0.20~ 0.60	1.20~ 1.60						$\geq 245$ ~ 345	温度低于 400°C 的中低压锅炉汽 包和大型锅炉的 板梁
19Mn6	0.15~ 0.22	0.30~ 0.60	1.00~ 1.60	$\leq 0.025$	$\leq 0.30$	$\leq 0.10$			$\geq 295$ ~ 355	代替 22g 与 16Mn 制造高压锅 炉汽包和封头
SA299	$\leq 0.30$	0.15~ 0.40	0.90~ 1.50						$\geq 275$ ~ 290	工作温度不大 于 400°C 的 300~ 600MW 锅炉汽包 和下环形集箱
13MnNiMoNb (BHW35)	$\leq 0.15$	0.10~ 0.50	1.00~ 1.60	0.20~ 0.40	0.60~ 1.00	0.20~ 0.40	0.005~ 0.022		$\geq 375$ ~ 390	工作温度不超过 400°C 的 200MW、 300MW 高压、超 高压锅炉汽包及高 压加热器
15NiCuMoNb5 (WB36)	$\leq 0.17$	0.25~ 0.50	0.80~ 1.20	$\leq 0.30$	1.00~ 1.30	0.25~ 0.50	0.015~ 0.045	0.50~ 0.80	$\geq 400$ ~ 440	工作温度不超 过 500°C 的焊接 结构受热部件; 锅 炉汽包、汽水分离 器等

(续)

钢 号	化学成分(质量分数)(%)								$\sigma_{0.2}$ MPa	用 途
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu		
12Cr1MoV	0.08~ 0.15	0.17~ 0.37	0.40~ 0.70	0.90~ 1.20	≤0.25	0.25~ 0.35	(V) 0.15~ 0.30		≥255	用于大型火电 机组锅炉集箱封 头,受热面低温段 的定位板和吊架 支座等固定件

过去生产的中、低压锅炉汽包均用 20g 或 23g 钢板制造。目前已逐步采用 16Mng、19Mn6 (DIN17155 钢号)、SA299 (ASME 钢号)、13MnNiMoNb (BHW35)、15NiCuMoNb5 (WB36) 等不同强度等级的普通低合金钢板来制造。

13MnNiMoNb (BHW35) 属于贝氏体型耐热结构钢,是一种添加有镍、铬、钼和铌的细晶粒合金钢,它具有高的高温屈服强度和对裂纹不敏感的特性,焊接性能好。该钢板的供应厚度一般在 150mm 以下,适用于工作温度不超过 400℃ 的各种焊接件,主要用于制造 200MW、300MW 及 600MW 高压、超高压锅炉汽包及高压加热器等部件。

锅炉钢板按 GB713《锅炉用碳素钢和低合金钢钢板》及工厂专用标准,由钢厂提供表面质量、尺寸规格、化学成分、拉伸、冷弯、V 形缺口冲击、时效冲击及超声波检验合格的钢板。锅炉钢板的供货状态一般为热轧、热轧一回火或正火一回火状态。

### 15.6.3 锅炉构件的热处理

经过弯、焊的钢管与钢板制作的零部件是否应热处理,需根据钢管或钢板的材质、钢管外径与壁厚、钢板的厚度,变形是冷变形还是热变形,变形度大小及所用焊接的方法等来具体确定。通常,对变形大的钢管冷弯件一般需进行去应力回火处理,而大尺寸厚钢板件即便是在高温下热卷成形,过后也应当对其进行正火加回火处理;为了细化晶粒、改善焊接接头力学性能,大尺寸厚板件电渣焊后需进行正火加回火处理。

水冷壁等“四管”的制造程序是:

设计→下料、弯管或焊接→组焊成膜式水冷壁管屏,或组装成过热器等的蛇形管束→电厂就

位、焊接、安装固定。水冷壁、过热器等“四管”通过导管与汽包、各联箱、集箱及主蒸汽管连通,构成锅炉的循环回路→由水冷壁管屏构成锅炉四面的炉墙;顶棚过热器及包复过热器构成炉顶与烟道;炉膛上方并列吊挂的蛇形管构成前、后屏过热器及再热器;烟道内蛇形管束构成省煤器等。

锅炉汽包是用厚钢板(70~250mm)经复杂工序制作的特大型加工结构件,其加工路线是:

设计→下料→钢板高温加热、经水压机冲压成汽包两端的半圆形封头→整块钢板高温加热、热卷成筒形→纵向焊接为汽包筒节、正火并校圆→将两个封头、若干筒节组合装焊为汽包→大型退火炉正火加回火处理→后续各种加工及焊接、去应力处理后成为锅炉汽包的成品。

钢管弯制后及焊接后热处理工艺见表 15-29。钢板变形及加工后的热处理工艺见表 15-30。

焊后热处理方法分为炉内加热的焊后热处理和与焊接部位局部加热的焊后热处理两种。炉内加热的焊后热处理,原则上要求零部件一次入炉。当一次不能装入炉内时,如 600MW 机组 29m 特大型锅炉汽包件,可以分两段(或两段以上)进行加热处理,但重叠加热的部位应大于 1500mm;炉外部位应采取保温措施,避免温度梯度过大带来的不良影响;炉外部分应合理安置支座,防止有害的热胀冷缩。被加热工件的装出炉温度应小于或等于 400℃,加热时,避免火焰直接接触工件。对局部加热的焊后热处理,所用的加热装置的种类、形式不限,但焊接区加热的宽度有所规定,即应使焊缝最外边缘处两侧的加热宽度大于两倍的钢板厚度。采用局部加热的焊后热处理,应使加热部位与非加热部位之间的温度梯度尽量减少。

表 15-29 锅炉钢管构件的热处理

钢 种	弯制加工后热处理	焊接后的热处理
20MnG	钢管外径大于 $\phi 159\text{mm}$ 、壁厚大于 22mm 或弯曲半径小于管子外径的 4 倍冷弯后在 900~930°C 正火处理	壁厚大于 19mm 时,焊后 593~677°C 去应力处理;小于 19mm 者焊后不热处理
25MnG (SA-210C)	壁厚大于 19mm,或壁厚虽小于 19mm,但弯曲半径小于钢管外径的 2.5 倍冷弯时,或热弯半径小于外径的 1.5 倍时,都需进行 593~695°C 的去应力热处理	壁厚小于 19mm 的钢管焊前不用预热,焊后不热处理;但大于 19mm 者除外
15Mo3	以通常冷加工度弯曲、冷扩口和冷拔加工后,钢管不需进行热处理 冷加工度大时应采用 910~940°C 正火	焊后一般不需热处理,当壁厚大于 20mm 时,焊后 530~620°C 去应力退火
20MoG (SA-209T1a)	冷、热弯后采用 870~980°C 正火处理	钢管外径小于 102mm、壁厚小于 12.7mm 时,焊前不用预热,焊后不用回火
15CrMo 钢管	该钢有良好的冷态变塑性,可以进行各种弯曲半径的冷弯	壁厚大于 10mm 时,焊件焊后 680~700°C 去应力处理
12Cr2Mo (T22、P22)	小口径厚壁管冷弯后,700~750°C 消除应力;大口径中蒸汽管 1000°C 上限热弯后 900~960°C 正火、700~750°C 回火处理;850°C 下限温度热弯后采用 700~750°C 回火处理	外径大于 51mm、壁厚超过 8mm 的管,焊后需 700~750°C 回火处理
12Cr1MoV	弯制后热处理要求与 12Cr2Mo 类似	焊前 200~250°C 预热,焊后 700~740°C 消除应力处理
12Cr2MoWVTiB (G102)		气焊后 1000~1030°C 正火及 760~780°C 回火;壁厚大于 6mm 手工电弧焊前预热,焊后 760~780°C 回火;氩焊后 780°C 加热炉冷至 400°C 以下空冷
12Cr3MoVSiTiB (Π11) 钢管	弯管性能良好	气焊、闪光对接焊、手工电弧焊后采用 740~770°C 回火处理
10Cr5MoWVTiB (G106)	钢管具有良好的冷弯性能,可进行各种弯曲半径的冷弯,弯头处塑性变形均匀	手工焊焊前预热,焊后 760~780°C 回火;气焊焊后需采用 1000°C 正火,770°C 回火处理
10Cr9Mo1VNb (T91、P91)	冷变形量大于 10%或弯管半径小于三倍的钢管直径时,需进行 730°C 以上加热温度的回火处理	厚壁管焊前 200°C 预热,焊后 750°C 消除焊接应力处理
1Cr19Ni11Nb (TP347H)		钢管焊接后要求进行 1180°C 的固溶处理

表 15-30 锅炉钢板构件的热处理

钢种	冷热成形后的热处理	焊接后的热处理
20g	有良好的冷热成形性能。板厚小于 46mm 时可采用冷成形;板厚大于 46mm 时,加热到 930~1000°C 热成形	一般情况下,焊前不预热,焊后不热处理 壁厚和刚性较大的部件,焊前预热 100~150°C,焊后进行 600~650°C 的消除应力处理;电渣焊后进行 900~930°C 的正火处理



(续)

钢种	冷热成形后的热处理	焊接后的热处理
16Mnq	热冲压同时作为正火处理时, 冲压加热温度为 900~990°C, 终压温度应大于 850°C, 热卷加热温度为 900~1000°C	厚度大于 25mm 的钢板, 焊前 100~150°C 预热, 焊后应进行 600~650°C 的消除应力处理; 电渣焊后一般采用 900~930°C 正火加 600~650°C 回火处理
19Mn6	热卷后正火加热温度 900~940°C; 封头冲压兼正火加热温度为 920~960°C, 终冲温度大于等于 800°C	电渣焊后进行 900~940°C 正火处理; 汽包整体焊后, 560~590°C 消除焊接应力
SA299	203 封头: 冷校前中间热处理 620°C; 中间去应力退火处理 580°C; 最终去应力退火处理 620°C 210mm 汽包筒节: 正火兼校调加热温度 900~950°C; 去应力退火温度 605~620°C, 炉冷至 300°C 空冷	焊后去应力热处理温度为 600~650°C
13MnNiMoNb (BHW35)	钢板热卷后正火校圆温度 900~910°C, 回火 640~660°C, 消除应力退火温度 530~600°C	手工焊, 自动焊后 580~610°C 消除应力; 电渣焊后 900~940°C 正火加 640~660°C 回火处理
15NiCuMoNb5 (WB36)	有良好的热成形性能, 热成形温度 850~1000°C。冷成形性能良好, 当变形量大于 5% 时需经 530~620°C 消除应力处理	焊接性能良好。焊前预热温度 150~200°C, 焊后 530~620°C 消除应力处理
12Cr1MoV	1000~1050°C 加热后热成形, 终止温度 850°C; 冷加工后一般 720~760°C 回火处理	焊前预热 200~300°C, 焊后 720~760°C 去应力处理

## 参 考 文 献

- 1 柳本龙二, 菅野勋崇. 大容量发电所用大型一体型低压タービンロータ軸材, 日本制钢所技术资料, 1992
- 2 Japan Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. A. Fujita, M. Shinohara & H. Yokota. Japan Casting & Forging Corp, K. Kaku, K. Soeda & Y. Kuroda Recent development of low FATT HP rotor forgings, Japan 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997
- 3 田中泰彦, 东司等. スーパークリーン低压タービンロータの製造と品質, 日本制钢所技术资料, 1992
- 4 The Japan Steel Works, T. Fukuda, Y. Ikeda & H. Yoshida. Production and properties of large sized superclean LP turbine rotor forgings, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997
- 5 Japan Toshiba Corp. Y. Tsuda, M. Yamada & J. Kanako, The Japan Steel Works Y. Tanaka & Y. Ikeda. Application of a new rotor steel forging for single cylinder steam turbines, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997
- 6 GB Power Systems M. P. Manning & P. F. Murley, Sarschmiede GmbH Germany, K. H. Schnfeld & R. Levacher. The effect of gashing and increased lensile strengtu on FATT of 2% CrNiMoV alloy steel rotor forgings, 13<sup>th</sup> International Forgemaster Meeting Volumes, 1997 年 10 月
- 7 Japan Kobe Steel H. Nakashima, T. Tsuchiyama & M. Miyakawa, Japan Fuji Electric Co., Ltd. M. Yamashita & K. Shimoda. Manufacturing of a HP/IP combined rotor forging from a 2.5Cr1.2Mo1.5NiV steel, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997 年 10 月
- 8 Japan Steel Works Y. Tanaka, T. Azuma, Y. Ikeda & T. Ishiguro. High purity 8CrMoVNbN rotor forging for high pressure low pressure combination steam turbine, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997 年 10 月
- 9 Forgemaster Steel and Engineering Ltd. UK M. A. Walsh. Manufacture of 10%CrMoVNbN turbine rotor for supercritical applications, 13<sup>th</sup> International

- Forgemasters Meeting Volumes, 1997 年 10 月
- 10 Sheffield Forgemasters group UK. A. Honeyman: Ferritic 12%Cr rotors for supercritical power plant, Technical Review 1995. 4
  - 11 Japan Toshiba Corp. Y. Tsuda, M. Yamada and R. Ishiji, Japan Steel Works Y. Tanaka, T. Azuma & Y. Ikeda: Development of high strength 12%Cr ferritic steel for turbine rotor operation above 600°C, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997 年 10 月
  - 12 Japan Kobe Steel T. Tsuchiyama, O. Matsumoto, M. Miyakawa, F. Murakami, S. Takeuchi, H. Ohizumi & Y. Murai: Development and Manufacturing of an advanced 12%Cr steel super critical steam condition, 13<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting Volumes, 1997 年 10 月
  - 13 刘显惠, 谈西屋公司透平构件的失效分析, 发电设备, 1989(12)
  - 14 第二重机厂技术资料, 600MW 汽轮机高中压转子锻件的研制, 1988
  - 15 第一重机厂技术资料, 钢包精炼炉生产 300MW 汽轮机中压转子生产技术总结, 1987
  - 16 第二重机厂技术资料, 汽轮机整锻低压转子的研制, 1988
  - 17 刘显惠, 超临界电站用 12%Cr 铁素体钢转子, 东方汽轮机, 1997(1)
  - 18 第二重机厂技术资料, 600MW 护环的研制, 1988
  - 19 第二重机厂技术资料, 100 吨一米锤模锻叶轮试制总结, 1989
  - 20 陈德和, 不锈钢的性能与组织, 北京: 机械工业出版社, 1976
  - 21 万嘉礼, 机电工程金属材料手册, 北京: 机械工业出版社, 1988
  - 22 H 文期刊资料, 火力原子能发电, 1994(10)
  - 23 上海发电设备成套设计研究所技术资料, C-421 钢的热处理、组织和性能研究, 1988
  - 24 东方汽轮机厂技术资料, 2Cr12Ni2WMoV 长叶片用钢, 1984
  - 25 上海发电设备成套设计研究所技术资料, 403 钢的热处理、组织和常温性能研究, 1988
  - 26 哈尔滨汽轮机厂技术资料, 30、60 万千瓦汽轮机叶片用 17-4PH 钢研究, 1988
  - 27 过康民, 动力工业用 12%Cr 钢, 汽轮机技术, 1985(1)
  - 28 过康民, 12%Cr 钢的物理冶金, 汽轮机技术, 1985(3)
  - 29 过康民, 汽轮机叶片材料, 动力工程, 1983(2)
  - 30 东方汽轮机厂技术资料, 20Cr1Mo1VNbTiB 钢高温螺栓性能试验总结, 1980
  - 31 上海发电设备成套设计研究所编, 汽轮机用钢性能数据手册, 1995
  - 32 毛惠文, 工业锅炉常见事故的预防处理及技术改造, 北京: 机械工业出版社, 1996
  - 33 郑泽民, 我国大型电站锅炉四管爆漏问题的分析, 能源部西安热工所编资料, 1991
  - 34 张鉴雯, 国产 300MW 机组 UP 型直流锅炉四管爆漏特征的研究, 中国电力, 1996(8)
  - 35 上海发电设备成套设计研究所编, 锅炉受压元件用钢性能手册, 1995

## 第 16 章 石油化工机械零件的热处理

宝鸡石油机械厂 石康才

### 16.1 泥浆泵零件的热处理

泥浆泵是旋转钻井法泥浆循环系统的关键设备,人们常将它称作钻机的心脏。由于泥浆泵所输送的泥浆含砂量多,粘度大,压力高,且有一定的腐蚀性,常常引起液缸、缸套、阀座、阀体等零件早期失效。合理选用材料、正确进行热处理和表面强化工艺对延长这些零件的使用寿命有着重要意义。

#### 16.1.1 液缸的热处理

液缸是泥浆泵液力端的主体,在泥浆泵工作过程中,它承受着高压泥浆的脉动压力,同时还受到高压泥浆腐蚀、冲刷。图 16-1 为泥浆泵液缸的结构示意图。

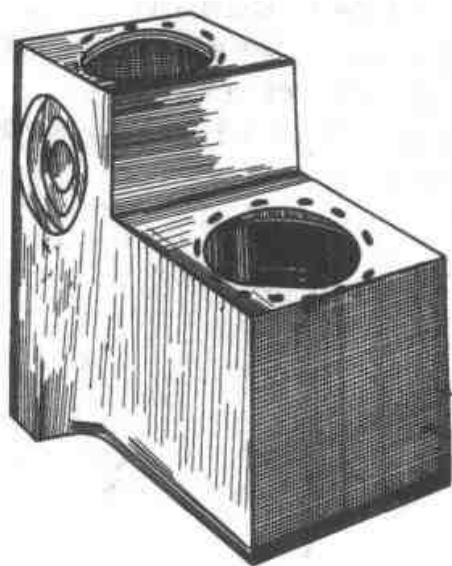


图 16-1 液缸结构示意图

液缸在工作过程中,其主要失效方式为冲刷失效和腐蚀疲劳失效。其中腐蚀疲劳失效在宏观和微观分析时具有以下特征:在液缸的宏观断口上,常有较厚的腐蚀产物或氧化膜,断口较平坦,具有多裂纹源开裂的特征;裂纹源区的电子显微断口形貌有沿晶断裂特征,同时也观察到具有应

力腐蚀的泥状花样及位向腐蚀坑形貌特征。裂纹扩展区有疲劳裂纹形貌。由于现代钻井工艺泵压的不断提高,腐蚀疲劳失效经常发生。

##### 16.1.1.1 液缸的材料

为了满足液缸的工作要求,制造液缸的材料必须具有较高的腐蚀疲劳抗力。研究表明,对于长期在腐蚀介质中使用的构件,调质、退火或正火态的条件腐蚀疲劳极限差别不大,合金元素对其影响也不明显。因此,液缸常用碳钢或低合金钢制造。液缸常用钢号、热处理状态、性能要求见表 16-1。

表 16-1 液缸用钢及硬度要求

钢号	ZG30	ZG35CrMo	30CrMo	AISI8630
处理状态	正火	调质	调质	调质
硬度要求 (HBS)	150~187	223~255	223~255	223~255

##### 16.1.1.2 液缸的整体热处理工艺

1. 制造工艺路线 铸钢件:冶炼→铸造→正火→粗加工→调质(碳素钢不进行)→检验→精加工。

锻钢件:冶炼→钢锭开坯→预防白点退火→锻造成形→正火→粗加工→超声探伤→调质→检验→精加工→表面处理。

2. 热处理规范 铸造液缸因形状复杂,铸造内应力大,枝晶偏析重,组织不均匀等冶金因素,在正火或淬火加热时,应特别注意控制升温速度。升温过程中在 400~500℃ 应保温 1~1.5h (或以每小时 50~100℃ 的速度升温)。锻造液缸加热时,因工件尺寸较大(截面约是 400mm×400mm),升温速度一般不得超过 200℃/h。各种材料的热处理规范见表 16-2。

3. 检验 液缸热处理后要进行外观检查和硬度检查,硬度检查应满足表 16-1 的要求,外观检查有无明显的淬火裂纹等。对液缸而言,提高

表 16-2 液缸热处理规范

液缸用 钢号	正 火			淬 火			回 火		
	温度 /℃	保温时间 /min	冷却 方式	温度 /℃	保温时间 /min	冷却 方式	温度 /℃	保温时间 /min	冷却 方式
ZG30	870~910								
ZG35CrMo	880~910	(1.5~1.8)L	空冷	850~870	(1.8~2.0)L	水淬或 油淬	620~660	(2.5~3)L	空冷
30CrMo	880~910			860~880	(1.8~2.0)L		600~640	(2.5~3)L	
AISI8630	880~910			860~880	(1.8~2.0)L		600~640	(2.5~3)L	

注: L 为液缸的有效截面 ( $\text{mm}^2$ )。

硬度, 增加强度并不能显著提高腐蚀疲劳抗力。过高的硬度反而会降低腐蚀疲劳极限。生产中应严格控制硬度上限。液缸因承受交变负荷, 锻件中的内在缺陷: 如裂纹、发纹、白点、严重的非金属夹杂物等都会显著降低液缸的使用寿命, 因此, 锻件液缸还需进行超声波检查。

### 16.1.1.3 液缸的表面处理与表面强化

表面处理与表面强化是提高液缸寿命的重要途径, 目前已经采用的方法有镀锌、化学镍磷化学镀、喷丸强化等。镀锌层  $10\sim 100\mu\text{m}$  厚即可显著提高腐蚀疲劳强度。随着镍磷化学镀的不断发展和完善, 在液缸上的应用也越来越多。通常镀  $40\sim 50\mu\text{m}$  的 Ni-P 层即可大大提高抗腐蚀疲劳性能。为了提高镀层与基体的结合力, 提高表面硬度, Ni-P 镀后需进行时效处理。

## 16.1.2 缸套的热处理

### 16.1.2.1 缸套的服役条件和失效

缸套和活塞是泥浆泵液力端的一对易于损坏的磨擦副。橡胶活塞在缸套内进行往复运动, 输送泥浆。泥浆压力高达  $40\text{MPa}$ , 泥浆含有一定量的砂粒, 有一定的腐蚀性。在活塞和泥浆的共同作用下, 缸套受到磨损和腐蚀, 从而失去密封性, 导致刺伤, 使缸套失效。

据调查, 缸套的磨损量以中间最大, 小头最小, 具有“鼓形”磨损特征。最大磨损量为  $0.7\sim 0.9\text{mm}$ 。缸套以磨损失效为主, 腐蚀失效为辅。

### 16.1.2.2 缸套的材料

制造缸套的材料列于表 16-3。目前油田常用材料为 50 钢、外套为 45 钢, 内套为高铬铸铁。

表 16-3 制造缸套的主要材料

材料	预备热处理	最终热处理	备注
16Mo, 20CrMo	正火	渗碳淬火, 回火	
50, 50V	正火	感应淬火, 回火	
高铬铸铁	退火	淬火, 回火	外套为 45
45, 20CrMo	正火	C-N-B 共渗	

### 16.1.2.3 低碳合金钢缸套的渗碳处理

#### 1. 制造工艺路线

铸造空心钢坯→锻造→正火→机加工→渗碳→车外圆(车去不需渗碳部分的渗碳层)→淬火→回火→磨内孔→检验→成品。

#### 2. 热处理工艺

材料为 20CrMo、16Mo 钢, 要求渗碳层深度为  $1.5\sim 2.0\text{mm}$ , 表面硬度  $\geq 60\text{HRC}$ , 淬火后内孔圆度  $\leq 0.15\text{mm}$ 。热处理工艺规范列于表 16-4。处理后用锉刀检验内表面硬度。

表 16-4 泥浆泵缸套渗碳淬火规范

工 艺	加热温度 /℃	保温时间 /h	加热设备	冷却方式
气体渗碳	920~940	12~14	井式渗碳炉	罐冷 (通保护气)
淬火	780~800	0.5	盐浴炉	喷水冷却
回火	160~180	2	旋风回火炉	空冷

### 16.1.2.4 中碳钢缸套的感应淬火

1. 制造工艺路线 铸造空心钢坯→锻造→正火→机加工→内孔中频淬火、回火→磨内孔→检验→成品。

2. 热处理工艺 材料为 50, 50V 钢, 要求淬硬层 2~3mm, 表面硬度  $\geq 58\text{HRC}$ 。热处理工艺规范为首先进行 860~880℃ 加热空冷正火, 保温时间视缸套尺寸和装炉量而定。机加工后, 内孔进行中频感应淬火, 电参数列于表 16-5。中频淬火温度为 880~900℃, 中频加热感应器用 4mm × 10mm 矩形紫钢管制成, 共两匝。感应器与缸套内表面间隙为 3~4mm, 感应器下方钻一圈喷水孔, 孔径 1.25mm, 间距 4mm, 倾斜角为 45°。淬火后进行回火, 回火温度为 160~180℃, 保温 1.5~2h。热处理后用锉刀检查内孔表面硬度。

表 16-5 泥浆泵缸套中频加热淬火热电参数

频率 Hz	淬火变压 器匝比	输出电压 /V	输出功率 /kW	功率因素 (cosφ)
8000	1:45	750	130~140	0.85~0.9

#### 16.1.2.5 缸套的碳氮硼三元共渗

所用材料为 45 钢或 20CrMo 钢, 要求渗层为 0.7~1.0mm, 表面硬度  $\geq 62\text{HRC}$ 。热处理工艺与

碳氮硼三元共渗后再进行中频内表面淬火并回火。

碳氮硼三元共渗可在 RJJ-105 9 井式气体渗碳炉中进行。共渗剂组成为尿素 150g, 硼酐 25g, 再加甲醇 1L。炉温为 830~860℃ 时装炉, 装炉后炉温下降, 开始滴入共渗剂 160~180 滴/min, 炉温回升到 800℃ 时滴入煤油 100~120 滴/min。共渗温度为 860℃, 保温 6~9h, 层深达到要求后, 工件随炉降温到 840℃, 出炉罐冷 (罐内滴入甲醇 100 滴/min 以防止氧化脱碳)。

三元共渗后即与前同样进行中频感应淬火, 并在炉中进行 (150~100)℃ 保温 1.5h 后空冷的回火。处理后用锉刀逐个检查内孔硬度, 有条件的工厂也可用里氏硬度计检查内孔硬度。

#### 16.1.2.6 高铬铸铁缸套的热处理

高铬铸铁缸套是以高铬铸铁为内衬的双金属缸套, 分烘装式和双液离心浇铸式两种。高铬铸铁的化学成分见表 16-6。

表 16-6 高铬铸铁缸套的主要成分 (质量分数)

(%)

缸套类别		C	Cr	Mo	Cu	Si	Mn
烘装式	耐磨层	2.60~3.00	19~21	—	—	0.30~0.70	0.60~0.90
	外套	0.40~0.50	—	—	—	0.50~0.80	0.50~0.80
双液离心浇铸式	耐磨层	2.60~3.00	19~21	1.00~2.00	—	0.60~0.90	0.60~0.90
	外套	0.40~0.50	—	—	—	0.50~0.80	0.50~0.80

#### 1. 烘装式双金属缸套内衬的热处理

(1) 制造工艺路线为: 冶炼→离心浇铸→退火→机加工→淬火→回火→磨加工→烘装。

(2) 退火的工艺曲线如图 16-2, 退火后硬度要求  $\leq 33\text{HRC}$ 。

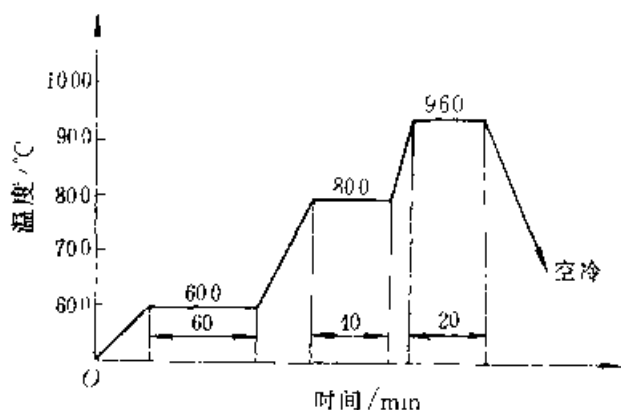


图 16-2 高铬铸铁退火工艺曲线

(3) 淬火工艺如图 16-3 所示。随炉试块的硬度应  $\geq 64\text{HRC}$ 。

#### 2. 双液离心浇铸缸套的热处理

(1) 制造工艺路线为离心浇铸→退火→粗加工→淬火→回火→磨加工。

(2) 退火工艺曲线见图 16-4, 要求内层硬度  $\leq 33\text{HRC}$ 。

(3) 缸套的淬火加热是在可控气氛炉内进行, 加热温度为  $(980 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 保温 1.5h 后取出放在 28r/min 的旋转淬冷台上用鼓风机强制冷却, 然后再在旋风回火炉中进行 150~200℃ 回火 3h。高铬铸铁淬火组织由针状马氏体、碳化物、残留奥氏体组成, 淬火硬度要求  $\geq 58\text{HRC}$ , 如图 16-5 所示。

近年来, 国外已试验出寿命在 2000h 以上的陶瓷缸套, 并开始有商品生产, 其主要成分是氧化铬。

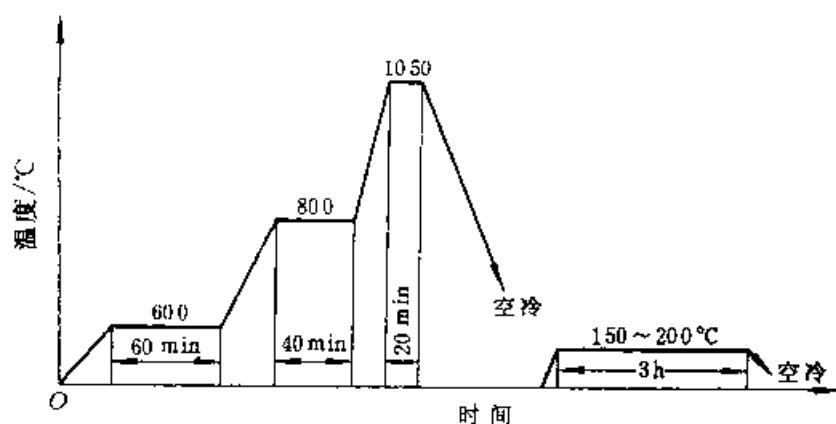


图 16-3 17%~20%Cr 高铬铸铁内套淬火工艺曲线

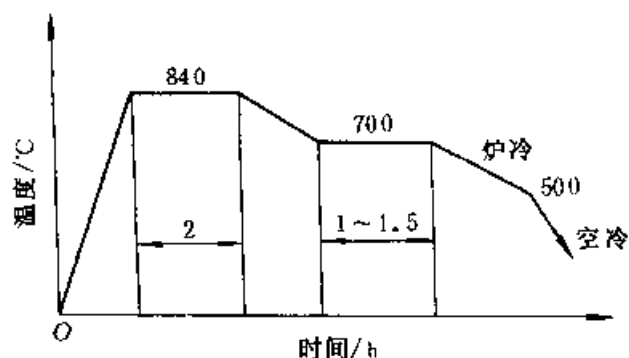


图 16-4 双液离心浇铸缸套退火工艺曲线

### 16.1.3 阀体与阀座的热处理

泥浆泵泵阀(阀体、阀座)是单作用的液力闭锁机构,阀体交替地上下运动,使泥浆沿一个方向运动,冲击着阀座。泵阀的破坏主要是磨粒磨

损,泥浆的冲击和腐蚀以及互相多次冲击造成阀的工作面磨损和表面上形成沟槽是阀失效的主要形式,见图 16-6。

#### 16.1.3.1 泵阀用料

根据磨损情况的比较(图 16-7),阀座和阀体要求高的强度和表面硬度。所用材料一类是整体淬火用钢,要求有足够的淬透性和高的表面硬度;另一类是渗碳用钢,除表面渗碳淬火后获得高的硬度外,要求心部有足够的强度。阀体、阀座常用材料和热处理见表 16-7。

#### 16.1.3.2 整体淬火阀体的热处理

所用材料为 42CrMo, 40CrNiMo, 要求表面硬度为  $\geq 53\text{HRC}$ 。

制造工艺路线为:下料→锻造→正火→机加工→淬火→回火→精加工。

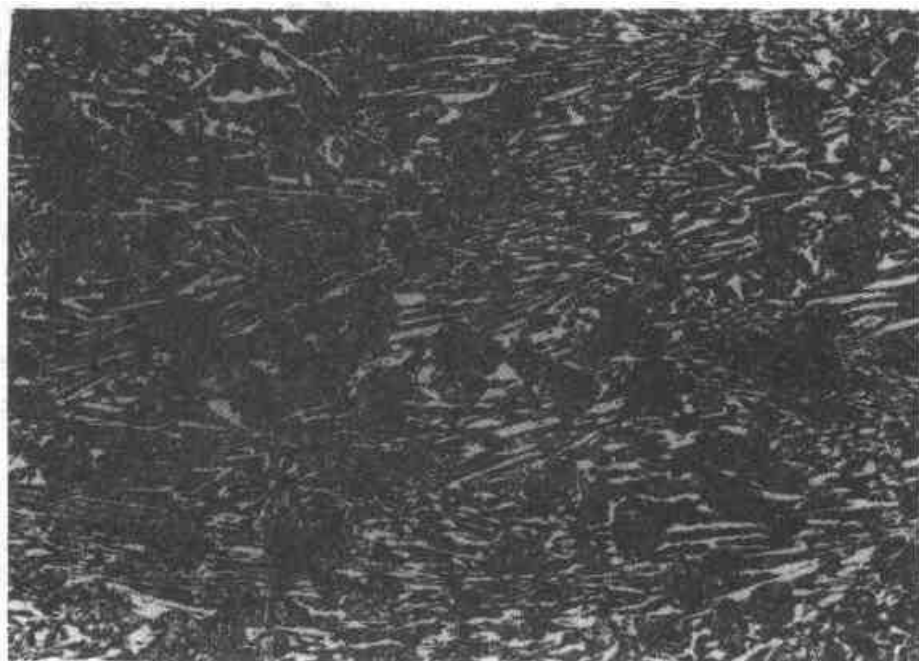


图 16-5 高铬铸铁淬火组织 200×

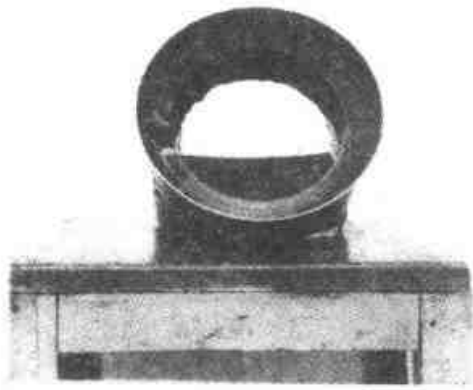
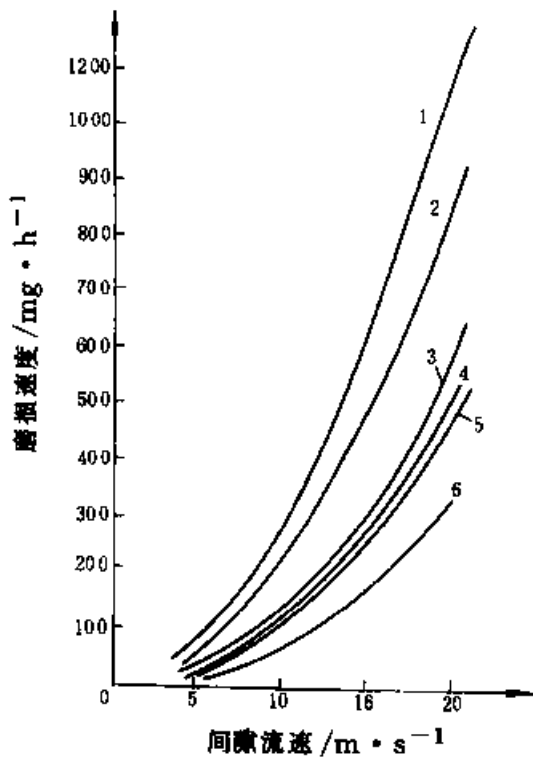
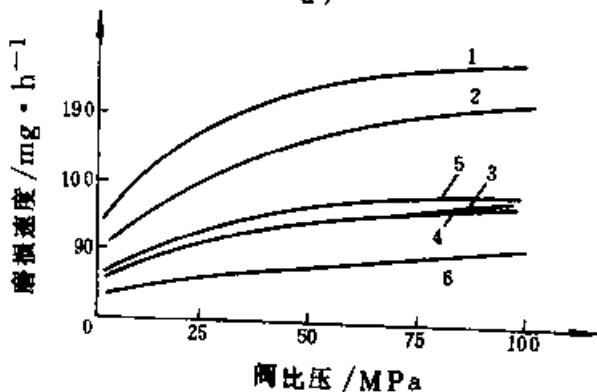


图 16-6 失效阀座



a)



b)

图 16-7 不同钢材阀体与阀座副的磨损速度曲线

a) 与间隙流速的关系 b) 与比压的关系  
 1—40Cr(48~52HRC) 2—40Cr(58~62HRC)  
 3—40CrNiMoA(59~61HRC) 4—50CrV(60~62HRC)  
 5—20CrNi3A(58~62HRC) 6—Cr12Mo(60~62HRC)

表 16-7 阀体和阀座用钢

钢 号	预备热处理	最终热处理
45、40Cr、42CrMo	正火	表面淬火, 48~52HRC
42CrMo、40CrNiMo	正火	整体淬火+低温回火
20CrNi3、20CrMnTi、12CrNi3	正火+高温回火	渗碳淬火

整体淬火规范见表 16-8。处理后用洛氏硬度计在端面检查硬度。

表 16-8 阀体、阀座整体淬火规范

钢号	淬 火			回 火	
	温度 / °C	保温时间(按 mm/mm 计)	淬火 介质	温度 / °C	保温时间 / h
42CrMo	850~870	0.5~0.6	油	160~180	1.5~2
40CrNiMo	850~870	0.5~0.6	油	160~180	1.5~2

注: 以上参数用于盐浴炉中加热。

#### 16.1.3.3 渗碳阀座的热处理

所用材料为 20CrMnTi 钢, 要求渗碳层深为 1.0~1.5mm, 淬火后硬度  $\geq 58\text{HRC}$ 。

制造工艺路线为下料→锻造→正火→机加工→非渗碳面镀铜(或涂防渗碳涂料)→渗碳→淬火→回火→机加工。

渗碳淬火、回火工艺曲线如图 16-8 所示。用氨基气氛渗碳的碳浓度分布曲线如图 16-9。

用金相法检查渗碳层深度, 用洛氏硬度计检查硬度应符合要求。

#### 16.1.4 活塞杆的热处理

活塞杆是泥浆泵的主要易损件, 它在工作中除传递交变的轴向载荷外, 还承受泥浆中石英砂的擦伤和泥浆液的腐蚀, 其主要失效方式是疲劳断裂和腐蚀。大量统计表明, 93% 为磨损失效, 外径尺寸最大磨损量为 1.8mm。要求活塞杆表面有很高的硬度和很细的粗糙度, 中心部分要有一定韧性, 并要有高的疲劳抗力。

##### 16.1.4.1 活塞杆用钢

为了满足活塞杆的要求, 常用钢材为 40Cr 钢, 35CrMo, 42CrMo 钢进行感应淬火, 或调质处理, 感应淬火后再镀硬铬, 也有采用 40Cr 钢进行热喷焊; 采用渗碳淬火时, 采用 20CrNi3, 20CrNiMo 钢。

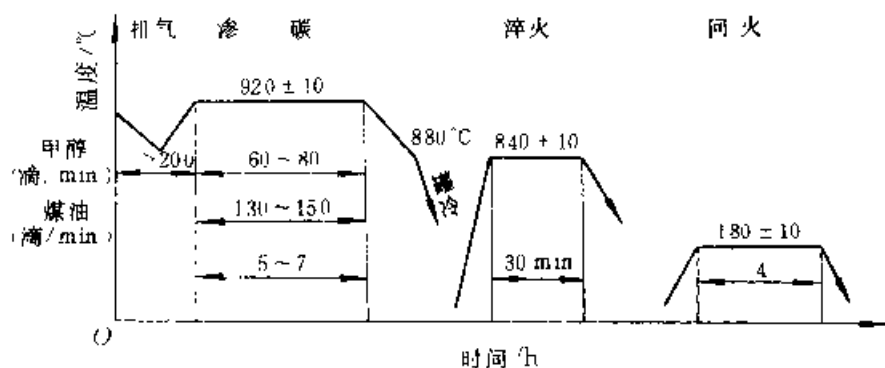


图 16-8 20CrMnTi 钢阀座阀体渗碳淬火工艺曲线（在 RJJ-75-9 炉中渗碳，在盐浴炉中淬火，在旋风炉中回火）

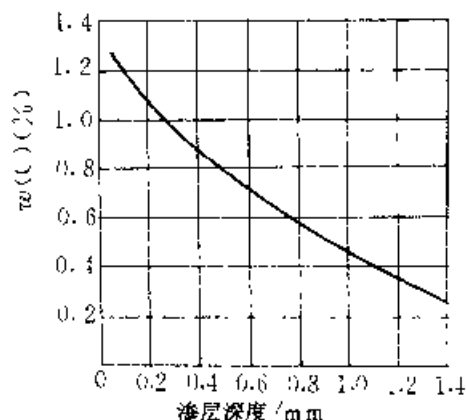


图 16-9 20CrMnTi 钢阀座随炉，920℃， $C_0=1.0$  的渗碳层浓度分布曲线

#### 16.1.4.2 35CrMo 钢制活塞杆的表面淬火

制造工艺路线为锻造→正火→机加工→调质→机加工→中频感应淬火→磨加工。

(1) 调质工艺（见表 16-9），要求硬度为 280~320HBS。

表 16-9 35CrMo 钢制活塞杆的调质规范

工艺	加热温度/℃	保温时间/h	加热设备、冷却方式	
淬火	860~870	2	箱式电炉	油淬
回火	560~600	3	箱式电炉	水冷

(2) 中频感应淬火，中频频率为 8000Hz，工件转速为 100~150r/min，同时以 180~200mm/min 的速度均匀下降，实现连续顺序淬火，其主要工艺参数列于表 16-10。

淬火后经 160~180℃ 回火 2h。热处理后检查硬度应为 52~60HRC，弯曲畸变≤0.5mm。

#### 16.1.4.3 40Cr 钢制活塞杆的喷焊

(1) 制造工艺路线为：锻造→正火→机加工

→调质→机加工→喷焊→磨加工。

(2) 调质工艺见表 16-9，硬度要求为 280~320HBS。

表 16-10 活塞杆的中频感应  
淬火工艺参数

输出电压/V	功率因素	匝比	电容量/ $\mu$ F	淬火温度/℃
750	0.9~0.95	9:1	16.5	880~900

(3) 调质后进行喷焊，喷焊材料为 NiWC 粉。焊层深度要求 0.6~0.8mm，硬度要求 55~62HRC。具体工艺为：

- 1) 表面预处理：脱脂、酸洗、喷砂等。
- 2) 预热：采用微还原焰，温度为 250~350℃。
- 3) 喷粉：工件转动线速度为 15~20m/min，喷枪移动速度为 3~5mm/r。
- 4) 重熔：采用中性焰 1000℃ 左右，以出现镜面反光为准。
- 5) 冷却：炉冷。
- 6) 检验：外观无裂纹，气孔、硬度符合标准，尺寸符合要求。

此外，近年来，有些部门已开始使用美国司太立合金进行活塞杆的热喷焊，取得较好的效果。

## 16.2 钻机绞车零件的热处理

### 16.2.1 刹车鼓的热处理

#### 16.2.1.1 刹车鼓的工作条件及失效分析

刹车鼓是钻机绞车的重要零件。图 16-10 是



刹车鼓和刹车块的温度分布图，由图可见刹车鼓表面温度可高达900℃，松刹车后，刹车鼓的表面温度在3~5s内很快降低。刹车鼓因周期性的加热和冷却，承受着交变的热应力、相变应力以及摩擦力，导致刹车鼓的失效。

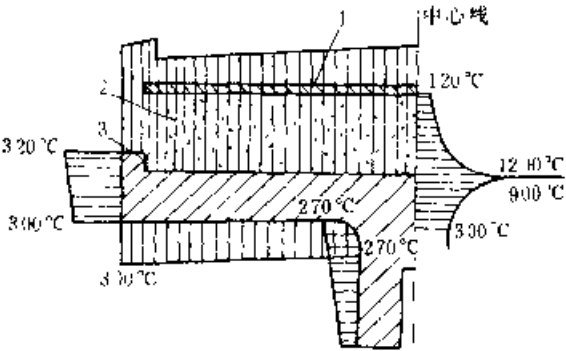


图 16-10 刹车鼓温度分布图  
1—刹车带 2—刹车块 3—刹车鼓

刹车鼓的主要失效方式有两种，其一是表面龟裂，裂纹有网状，树枝状和纵向，裂纹长度可达100mm，深5mm，裂纹为穿晶，尖端圆钝，具有典型的热疲劳特征，其二是磨损。

16.2.1.2 刹车鼓的材料和技术要求

为了提高刹车鼓的寿命，要求其用钢应具有有良好的热疲劳抗力。目前国内外刹车鼓用钢及技术要求如表16-11所示

16.2.1.3 刹车鼓的热处理

制造工艺路线为铸造(或锻造)→正火→粗加工→调质→精加工→成品  
粗加工→调质→组焊→机加工→表面淬火→磨削加工→成品。

刹车鼓的热处理工艺规范见表16-12。

刹车鼓的表面淬火方法有火焰淬火法和感应淬火法两种。火焰淬火法是在专用淬火设备上进行，加热器的宽度与刹车鼓表面相同，加热器紧接冷却器，这样可以实现连续顺序淬火。感应淬火可在8000Hz的中频感应淬火装置上进行，感应器为平面加热型，其宽度略小于要求加热区的宽度，冷却器与感应器做在一起，可以顺序连续淬火。淬火温度为900~930℃，水淬。回火在大型鼓风的空气炉或油浴炉中进行，回火温度为180~200℃，保温时间为3h。

表 16-11 刹车鼓用钢及技术要求

钢 号	化学成分(质量分数)(%)					硬 度 要 求
	C	Mn	Si	Cr	Mo	
ZG18CrMnMo	0.17~0.23	0.8~1.1	0.15~0.35	0.8~1.15	0.10~0.35	调质 210~250HBS 表面淬火 35~42HRC <sup>①</sup>
ZG40CrMo	0.38~0.43	0.75~1.00	0.15~0.35	0.8~1.15	0.15~0.25	调质 300~350HBS
ZG35CrMo	0.32~0.40	0.40~0.70	0.17~0.37	0.80~1.10	0.15~0.25	调质 260~302HBS 表面淬火 45~50HRC

① 冷却水套刹车鼓须进行表面淬火。

表 16-12 刹车鼓的热处理工艺规范

钢 号	调 质	表 面 淬 火
ZG18CrMnMo	淬火：900~920℃，2h，油淬 回火：600~650℃，3h，空冷	900~930℃ 表面淬火 180~200℃ 回火，3h
ZG40CrMo	淬火：850~860℃，2h，油淬 回火：560~600℃，3h，空冷	
ZG35CrMo	淬火：850~870℃，2h，油淬 回火：180~200℃，3h，空冷	880~900℃ 表面淬火 180~200℃ 回火，3h

注：调质在台车式电阻炉中进行。

调质后, 刹车鼓在大型门式布氏硬度计上测量硬度, 测量位置应均匀分布, 并需三点以上, 结果应符合技术要求。表面淬火后, 用超声波硬度计测量表面硬度, 其值应在 38~42HRC 之间, 允许过渡带硬度降低, 过渡带宽度不得大于 10mm。

### 16.2.2 石油钻机链条的热处理

石油钻机广泛采用链条传动, 它的传动速度快(线速度可达 8m/s, 有的甚至达 20m/s), 功率大, 承载能力强(几十吨, 甚至更重), 载荷变换频繁, 惯性冲击很大, 它的工作条件极为恶劣, 对材料和热处理要求很高。链条结构如图 16-11 所示。

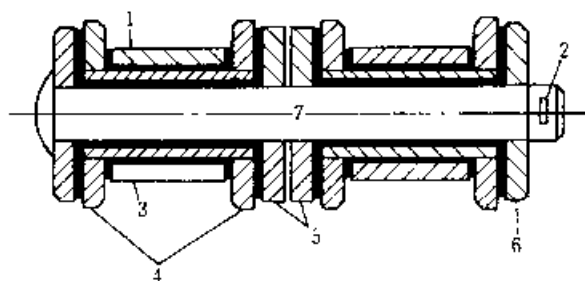


图 16-11 套筒滚子链的结构

1—套筒 2—开口销 3—滚子 4—内链板  
5—中间链板 6—外链板 7—销轴

#### 16.2.2.1 链板的热处理

链板主要承受交变的法向拉应力和弯曲应力, 并承受多次冲击载荷。在孔板处的应力分布如图 16-12 所示。其最大应力区位于离链板纵轴线倾斜  $70^\circ \sim 75^\circ$  的孔边上, 应力集中系数为 3.3~3.6, 这与链板的疲劳裂纹发生的位置相一致。

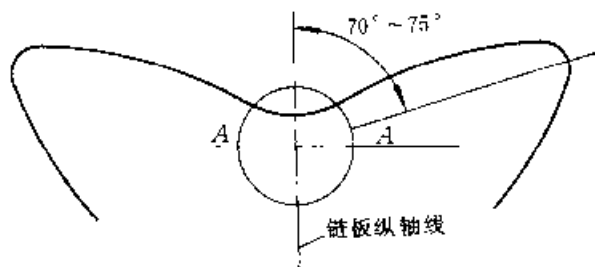


图 16-12 链板孔边的切向应力分布

1. 链板用钢 链板可用 35CrMo、42CrMo、10Cr、35CrNi3 钢制造, 经调质后采用冷变形强化工艺可显著提高寿命。

2. 制造工艺路线 冷加工→淬火→回火→挤孔→喷丸→检验。

3. 链板的热处理 链板的热处理工艺见表 16-13。

表 16-13 链板的热处理工艺规范

钢号	技术要求	淬 火		回 火	
		温度 /°C	淬火 介质	温度 /°C	冷却 介质
12CrMo	38~45HRC	840~850	油	120~160	水
35CrMo	42~47HRC	850~860	油	400~440	空气

4. 链板的冷挤压强化和喷丸强化 链板通过挤孔, 使孔内产生残余压应力, 可显著提高寿命。利用钢球或圆锥形冲头均可进行挤压强化。挤孔的过盈越大, 链板的疲劳强度越高。但过大的过盈量或使几何尺寸发生较大的变化, 或使挤孔难以实现。当相对过盈量为 0.02 时, 对提高链板的疲劳强度的效果最好, 表面光洁程度、显微硬度、强化层深度均处于最佳状态, 图 16-13 是挤孔强化对链板疲劳强度的影响曲线。

为提高链板的抗疲劳性能和多冲抗力, 喷丸强化也是一种有效的方法。对链板有效的喷丸参数是: 钢丸直径为  $\phi 0.3 \sim \phi 0.5\text{mm}$ , 喷丸速度为 38m/s, 喷丸时间为 20min 左右。经喷丸处理后, 链板的疲劳强度可增加 85%。挤孔之后再进行一次喷丸处理, 链板的寿命会进一步提高。

#### 16.2.2.2 链条滚子的热处理

链条运转时, 滚子承受很大的交变挤压力和多次冲击力, 在使用中常发生碎裂和磨损失效。

1. 滚子用钢 链条滚子要求钢材不仅有良好的强韧性, 而且要有足够的耐磨性。用 20CrMo 钢进行淬火以获得板条状马氏体, 可使寿命明显提高。

2. 制造工艺路线 冷成形→复碳→淬火→回火→检查。

3. 滚子的热处理 当原材料脱碳且在滚子成形后未消除时, 在淬火之前先进行复碳。滚子复碳、淬火、回火工艺及技术要求见表 16-14。

采用复碳工艺时应严格控制表面碳含量, 碳含量过高将引起滚子碎裂。使用中频感应淬火加 200°C 回火工艺不仅使工艺简化, 而且使寿命有较大的提高。中频感应淬火是很有前途的一种工艺。其多次冲击试验结果如表 16-15 所示。

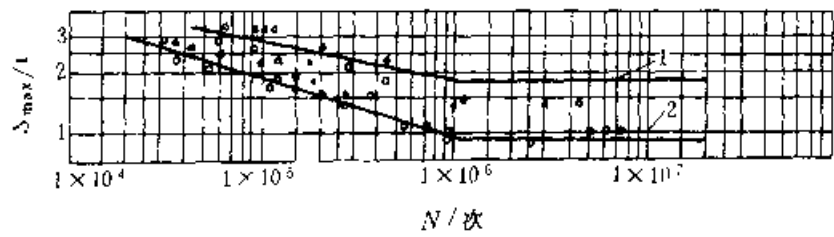


图 16-13 挤压强化对链板疲劳强度的影响  
1—挤压 2—未挤压

表 16-14 滚子的热处理工艺及技术要求

序号	规格/in	钢号	技术要求	工 艺 曲 线	备 注
1	4	20CrMo	淬火回火后 40~53HRC		淬火加热设备为盐浴炉，回火在旋风回火炉，复碳在 RJJ—75·9 井式渗碳炉中进行
2	2 1/2	20CrMo	淬火回火后 40~53HRC		
3	2	20CrMo	复碳深度 0.40 ~ 0.50mm，复碳浓度 0.20% ≤ w(C) ≤ 0.35% 硬度 38 ~ 53HRC		

表 16-15 滚子中频淬火与复碳淬火的多次冲击试验结果

(续)

冲击能量 J	断裂周次		断裂性质	
	复碳淬火	中频淬火	复碳淬火	中频淬火
196	42000	144000	疲劳	未裂
	30000	144000		
	48600	144000		
294	9643	48300	疲劳	疲劳
	18400	61890		

冲击能量 J	断裂周次		断裂性质	
	复碳淬火	中频淬火	复碳淬火	中频淬火
392	7500	24050	疲劳脆	疲劳
	9000	30120		
	10260	34900		
539	430	9200	脆	疲劳
	1130	10350		

表 16-16 销轴的材料、热处理及技术条件

钢 号	热 处 理	技 术 要 求			用 途
		总渗层深度/mm	表面深度/HRA	心部硬度/HRC	
20CrMnMo	渗碳淬火、回火	0.45~0.70	78~82	34~38	一般载荷
20Cr2Ni4	碳氮共渗淬火、回火	0.45~0.70	78~82	34~38	重 载

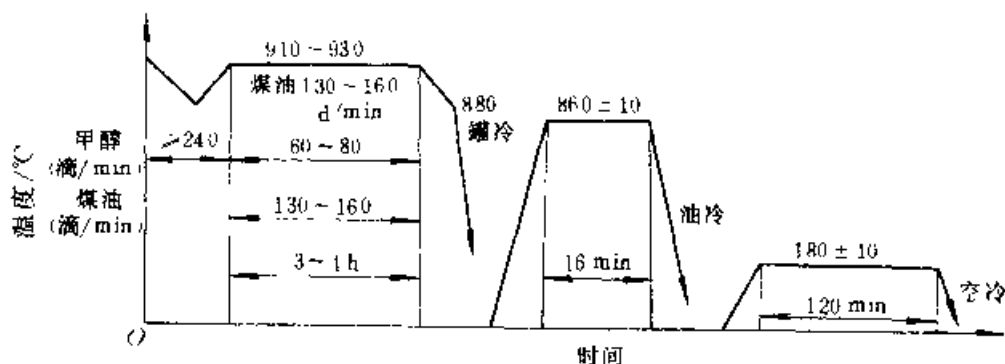


图 16-14 普通销轴 (20CrMnMo) 热处理工艺

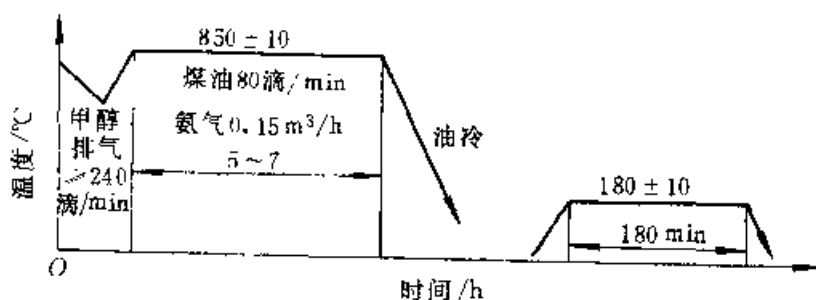


图 16-15 重载荷销轴 (20Cr2Ni4A) 热处理工艺

4. 滚子的喷丸强化 喷丸强化处理是提高滚子寿命的有效方法。喷丸强化要正确选择弹丸直径、喷丸速度、弹丸材质、喷射时间及喷射角度等工艺参数。经按最佳喷丸工艺处理的滚子,其纵向和横向残留应力可分别提高 33%~108% 和 300%~430%, 滚子的疲劳寿命可提高 30%~50%。

### 16.2.2.3 链条销轴的热处理

销轴主要承受周期性的冲击弯曲载荷。在石油钻井操作时,在提起钻杆的瞬间,或在卡钻处理事故时,销轴上承受着非常高的冲击载荷。销轴的主要失效形式有疲劳断裂,过载损伤断裂,脆性断裂和磨损。

1. 销轴用钢 销轴的材料、热处理及技术条件列于表 16-16。

2. 制造工艺路线 下料→机加工→渗碳(碳氮共渗)→淬火→检查→精加工。

3. 销轴的渗碳淬火 渗碳在 RJJ-75-9 井

式渗碳炉中进行。渗碳层达到要求后,随炉降温至 880°C 出炉罐冷(罐中滴入甲醇防止脱碳),渗层深度经检验合格,在盐浴炉中淬火加热,在旋风炉中回火,其工艺曲线如图 16-14 所示。

4. 销轴的碳氮共渗 碳氮共渗在 RJJ-75-9 炉中通入煤油和氨气进行,层深达到要求后直接淬油。经硬度检验合格后,在旋风回火炉中回火。其工艺曲线如图 16-15 所示。

销轴热处理后,采用喷丸强化可进一步提高寿命。重载荷销轴现已正式应用强化喷丸处理。

## 16.3 钻探工具的热处理

### 16.3.1 吊环的热处理

吊环在使用中主要承受疲劳载荷。在每一应力循环中,载荷的最小值为零,最大值随钻杆的增加而增大,在提起钻杆时则因钻杆减少而降低。

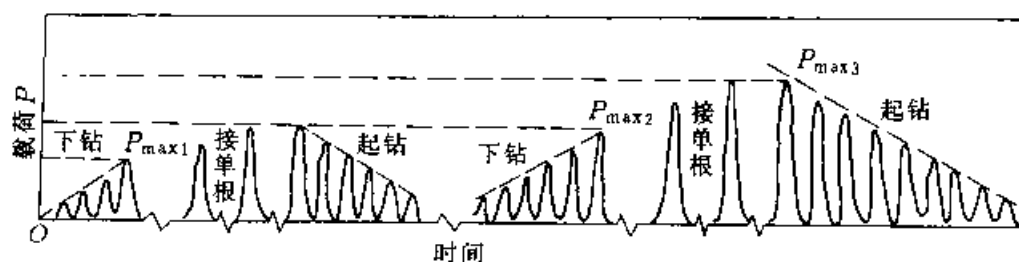


图 16-16 吊环的载荷谱线示意图

吊环所承受的是一种变动应力幅的低频随机疲劳载荷，其载荷谱线如图 16-16 所示。

吊环有三种失效方式，即变形、磨损和断裂，疲劳断裂是吊环最危险的一种失效方式。典型疲劳断口如图 16-17 所示。

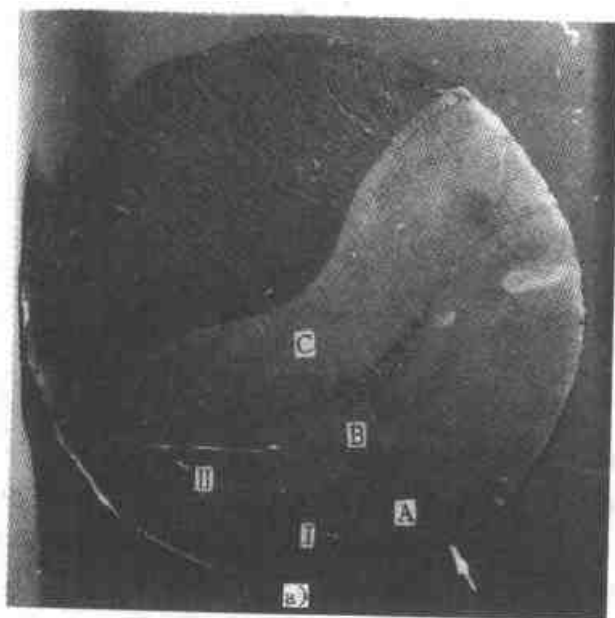


图 16-17 吊环的疲劳断口

a) 宏观断口 b) 疲劳区断口电镜照片 2000×

### 16.3.1.1 吊环用钢及技术要求

吊环用钢要求高的疲劳强度，低的裂纹扩展速率和高的断裂韧性。常用钢种及技术要求如表 16-17 所示。

### 16.3.1.2 热处理工艺

吊环根据长短和用钢要求可以在有保护气氛的箱式炉或井式炉中加热。

吊环的热处理工艺如表 16-18 所示。

值得指出，20SiMn2MoVA 和 40CrNiMo 钢的力学性能与回火温度的关系截然不同。20SiMn2MoVA 钢在淬火低温回火状态（即获得低碳马氏体状态），不仅强度高，韧性好，断裂韧度高，而且强韧性配合最佳。随着回火温度的升高，强度降低，断裂韧度也显著降低。40CrNiMo 钢随回火温度的升高，强度下降，韧性提高，在高温回火状态，强韧性配合最好，如图 16-18 和图 16-19 所示。

### 16.3.1.3 检验

锻造后用肉眼检查表面质量，不得有裂纹、折叠，重点检查环部。每批吊环带分离试棒一根，其截面与吊环杆部截面相同，长度与截面直径比为 4:1。分离试棒与吊环同炉热处理后作拉伸试验，试验结果应符合技术条件。吊环出厂前进行实物载荷试验，试验载荷为额定载荷的 1.5 倍，持续 5min 不得有残余变形。

常见缺陷是硬度不均匀，这是炉温不均匀所致。

表 16-17 吊环用钢及技术要求

钢号	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$A_K$ J	硬度 (HRC)
20SiMn2MoVA	$\geq 1372$	$\geq 1176$	$\geq 10$	$\geq 45$	$\geq 58$	11~17
40CrNiMo	$\geq 1629$	$\geq 882$	$\geq 12$	$\geq 50$	$\geq 68$	34~40

表 16-18 吊环的热处理规范 (以 150t 的为例)

钢 号	预备热处理	淬 火	回 火
20SiMn2MoVA	正火: $(930 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 空冷 高温回火: $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 4h	$(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 2h, 油冷	$(220 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 6h, 空冷
40CrNiMo	正火: $880^\circ\text{C}$ 空冷	$(850 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 2h, 油冷	$(520 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 3h, 空冷

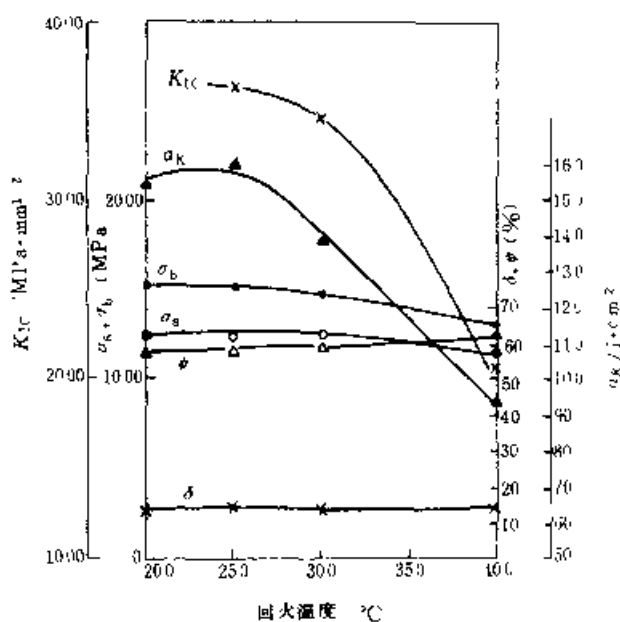


图 16-18 20SiMn2MoVA 钢不同温度回火后的力学性能

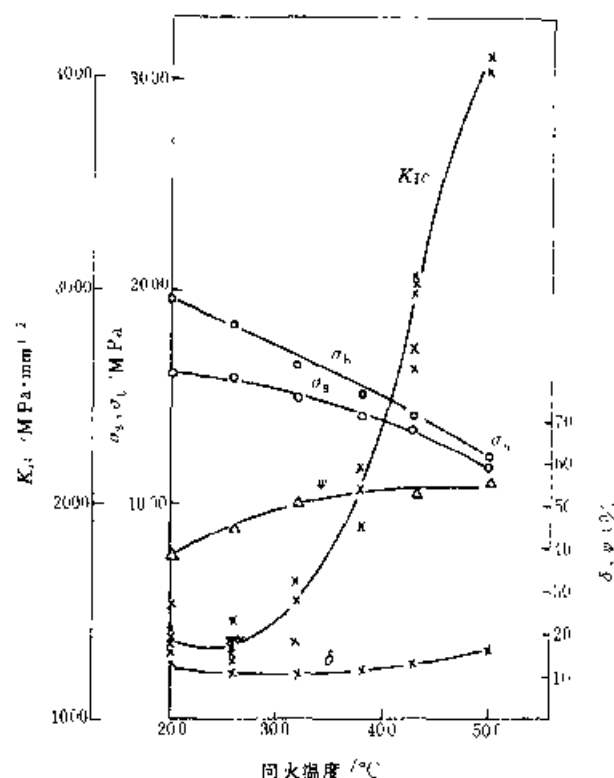


图 16-19 40CrNiMo 钢经不同温度回火后的力学性能

### 16.3.2 吊夹的热处理

吊夹与吊环配合使用，服役条件相似。它主要承受交变的弯曲载荷及冲击载荷，台肩部分还受到钻杆接头的频繁磨损，吊夹几何形状复杂，应力分布极不均匀。吊夹的外形如图 16-20 所示。

吊夹的失效形式有磨损、过量变形、断裂等。磨损失效发生在端面台肩处，是吊夹的主要失效方式。在钻杆作用下，吊夹发生严重的塑性变形而失效。为了修补磨损台肩，在油田常用堆焊工艺，从而导致焊接裂纹的产生，造成吊夹的断裂失效。

#### 16.3.2.1 吊夹用钢及技术条件

如上所述，吊夹材料要求有高的强度、高的韧性、高的疲劳强度、小的缺口敏感性。同时，还应有较好的焊接性能和表面硬化能力。42CrMo、35CrMo 钢可以较好地满足上述要求，它的技术要求为：

(1) 调质后硬度为 269~302HBS,  $\sigma_t \geq 882\text{MPa}$ ,  $\sigma_s \geq 686\text{MPa}$ ,  $\delta \geq 12\%$ ,  $\phi \geq 45\%$ ,

$A_K=58J$ 。

(2) 台肩表面淬火后硬度为 48~52HRC。

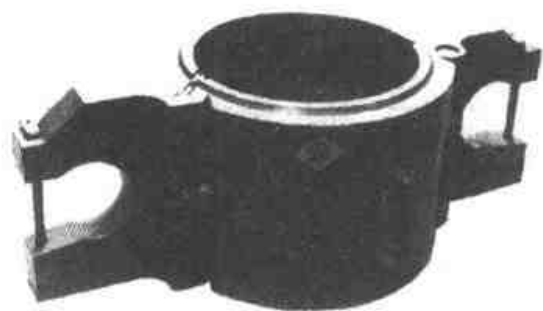


图 16-20 吊夹外形图

### 16.3.2.2 热处理

制造工艺流程为：锻造→正火→粗加工→淬火→回火→精加工→装配→台肩表面淬火→载荷试验→出厂。

吊夹应在可控气氛炉或盐浴炉中进行调质，其主要工艺参数见表 16-19。

表 16-19 吊夹热处理规范

(以 4<sup>1</sup>/<sub>2</sub>in 吊夹为例)

钢号	淬 火			回 火		
	温度 /°C	时间 /min	冷却	温度 /°C	时间 /min	冷却
35CrMo	860~870	120	油	580±20	180	空气
42CrMo	850~860	120	油	600±20	180	空气

注：表中数据系在可控气氛炉中处理的数据，用盐浴炉加热，可以适当缩短时间。

台肩部分可以用火焰淬火法实现表面硬化，其淬火温度控制在 880~900℃，喷水冷却，淬火后在炉内进行 180~200℃ 回火 2h。

### 16.3.2.3 检验

调质后逐件检查硬度，其值应符合技术要求。对于每一炉号的材料要做随炉试棒的力学性能试验，其结果应达到技术要求。

装配后进行成品载荷试验，试验载荷为额定载荷的 1.5 倍，持续 5min 不得有残余变形。

### 16.3.3 钻杆接头的热处理

钻杆接头是连接钻杆的重要工具。在工作过程中它承受钻具的交变拉力和交变的转矩，表面受到套管和井壁的摩擦力，在紧扣或卸扣时，螺纹部分受到很高的摩擦力，泥浆的腐蚀、冲蚀，含

H<sub>2</sub>S 气体的腐蚀，也是不可避免的，接头常见的失效形式有磨损、疲劳断裂、腐蚀疲劳断裂和应力腐蚀等。钻杆接头外形如图 16-21 所示。图 16-22 是接头疲劳断口的电镜照片。

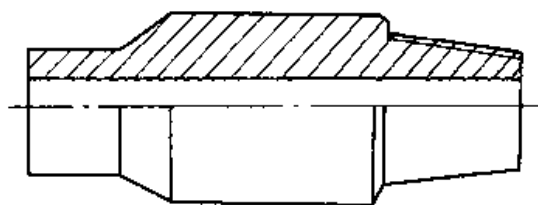


图 16-21 钻杆接头



图 16-22 接头疲劳断口电镜照片

### 16.3.3.1 接头的材料及技术要求

接头用钢要求有高的疲劳强度、小的疲劳缺口敏感性及良好的腐蚀疲劳抗力。同时还应有良好的耐磨性、焊接性能。接头常用材料及技术要求列于表 16-20。

表 16-20 钻杆接头的材料和技术要求

钢号	硬度 (HBS)	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$A_K$ /J
42CrMo	285~321	≥970	≥827	≥13	-	-
40CrNiMo	285~321	≥970	≥827	≥13	≥45	≥54
34CrNiMo	285~321	≥970	≥827	≥13	≥45	≥54
37CrMnMo	285~321	≥970	≥827	≥13	≥45	≥54

根据美国石油学会 (API) 的标准，接头的力学性能只要求 HBS,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_s$  和  $\delta$  四项指标 (见表 16-20)，为了保证使用性能，有些油田对接头提出

了附加技术条件,要求接头材料的断面收缩率和夏氏V冲击功分别为大于15%和5J。这样就必须使用34CrNiMo、40CrNiMo、37CrMnMo钢,才能达到较高的要求。

### 16.3.3.2 接头的热处理及表面强化

#### 1. 制造工艺路线

(1) 普通热处理:锻造→正火→粗加工→淬火→回火→检验→精加工→局部镀铜(或整体磷化)。

(2) 硬质加表面喷焊:锻造→正火→粗加工→淬火→回火→检验→精加工→表面喷焊→精加工→局部镀铜。

接头的淬火应在炉温均匀性为±1℃的可控气氛连续式或周期式炉中进行。淬火时,接头之间应保持足够的距离,淬冷油应强烈循环,以保证淬火的高质量。回火炉的炉温均匀度应为±8℃,淬、回火后应逐件检查硬度,抽一定量的接头实物进行力学性能分析。接头的热处理工艺规范列于表16-21。

表 16-21 钻杆接头的热处理工艺规范  
(以 4 1/2in 接头为例)

钢号	淬火		回火		冷却剂
	温度 ℃	时间 min	温度 ℃	时间 min	
12CrMo	860±10	90	560~600	120	油 空气
40CrNiMo	840±10	90	580~620	120	油 空气
34CrNiMo	860±10	90	560~600	120	油 空气
37CrMnMo	860±10	90	560~600	120	PHC 水溶液 水冷

注:表中数据系在RX箱式炉内加热的保温时间。

#### 16.3.3.3 检验

热处理后,在接头中部距台肩为25~32mm处进行布氏硬度检查,其值应在287HBS以上,此外应抽取一定数量的公接头,进行拉力试验。试样取样部位如图16-23所示。试样要纵向切取并平行接头。试样的标距长度必须在公接头锥度部分之内,并且标距的中心点应距公接头台肩为32mm处。拉伸试验结果应达到技术要求。

有冲击功要求的接头,还需作冲击试验,取样方法与拉伸试验相同。

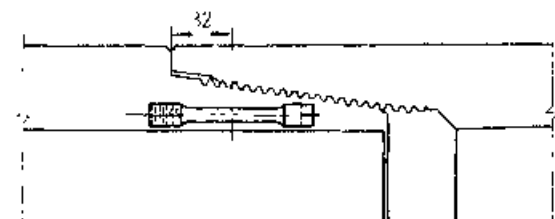


图 16-23 接头抗拉试样取样图

接头常见的热处理缺陷有硬度不均匀、力学性能达不到要求,特别是冲击值偏低等。解决这些问题的途径是加强材质管理、淬火剂管理以及热处理设备管理等,保证接头获得良好而均匀的淬火和回火。

接头螺纹表面镀铜的好处是:①公母扣间的摩擦系数小,使用寿命长。②允许在井下旋转时,转矩有所增加,但不损坏公母螺纹。③大大减少井下旋扣量。螺纹镀铜是接头的工艺发展方向之一。

为解决钻杆接头的耐磨性问题,国外已采用自动堆焊硬质合金工艺,使接头形成一段较宽的耐磨层,延长了接头的寿命。

为了提高接头腐蚀疲劳抗力和耐磨性,还可以采用喷丸渗锌强化法,其最合适的喷丸时间为2~3min,最合适的渗锌厚度为70~80μm,通过这种综合强化处理,可提高腐蚀疲劳强度75%~90%。

### 16.3.4 抽油杆的热处理

抽油杆在油管内作上、下往复运动,承受不对称循环载荷。它浸泡在采出液中,经受着腐蚀介质H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>和盐水的腐蚀作用。抽油杆的主要失效形式:在无腐蚀条件下是疲劳断裂;在腐蚀条件下是失重腐蚀,腐蚀疲劳和硫化物的应力破损。抽油杆的外形如图16-24所示。直径范围φ22.2~φ50.8mm,长度为7.62m和9.14m。

#### 16.3.4.1 抽油杆用钢

目前我国借用美国石油学会(API)标准把抽油杆分为C级、K级和D级,各级工作条件及其用钢如表16-22所示。

#### 16.3.4.2 制造工艺路线

下料→锻头→检验→热处理→拉直→力学性能检查→抛丸处理→头部机加工→涂漆→包装。



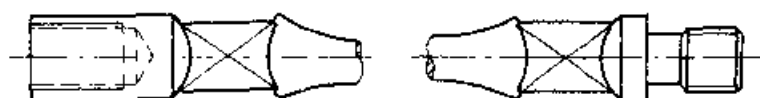


图 16-24 抽油杆结构图

表 16-22 抽油杆用钢及工作条件

级别	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	钢 号	工作条件
C	617~794	35Mn2, 20CrMo 35	无腐蚀或缓蚀, 井中重载抽油
K	578~794	20CrNiMo 20Ni2Mo	井中重载抽油, 中等腐蚀或缓蚀
D	794~970	35Mn2 40CrNiMo 42CrMo	无腐蚀重载 含硫油井, 重载

## 16.3.4.3 热处理

1. 技术要求 各类抽油杆用钢及其技术要求如表 16-23 所示。

2. 热处理工艺 抽油杆的热处理分正火、正火+回火、淬火+回火三类。热处理可在具有可控气氛的煤气加热炉和电阻炉中进行, 杆料用链传送或螺杆传送; 用水喷雾淬火(或正火), 然后回火。其主要工艺参数见表 16-24。

## 16.3.4.4 检验

热处理后在每 1000 根中任意抽取两根截取 450mm 做实物拉伸试验, 每一炉还应做随炉试棒的力学性能试验; 随炉试棒加工成标准拉伸试棒进行力学性能试验和金相检查, 结果应符合表 16-23 的要求, 晶粒度应在 6 级以上。

表 16-23 抽油杆用钢及其技术要求

级别	钢号	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$A_k$ /J	硬度 (HBS)	热处理
C	45	$\geq 598$	$\geq 353$	$\geq 16$	$\geq 40$	根据 用户 需要	197~241	正火
	20CrMo	$\geq 784$	$\geq 588$	$\geq 12$	$\geq 50$		207~241	淬火+回火
	35Mn2	$\geq 617$	$\geq 411$	$\geq 18$	$\geq 50$		187~228	正火
K	20Ni2Mo	$\geq 578$	$\geq 469$	$\geq 18$	$\geq 50$		179~207	正火+回火
D	35Mn2	$\geq 794$	$\geq 686$	$\geq 10$	$\geq 50$		248~295	淬火+回火
	40CrNiMo	$\geq 794$	$\geq 686$	$\geq 10$	$\geq 50$		248~295	正火+回火
	42CrMo	$\geq 794$	$\geq 686$	$\geq 10$	$\geq 50$		248~295	正火+回火

表 16-24 抽油杆热处理工艺参数

级别	钢 号	淬火 (或正火)			回 火		
		加热温度/°C	保温时间/min	冷却方式	加热温度/°C	保温时间/min	冷却方式
C	35	860±10	60	空冷	—	—	—
	20CrMo	880±10	60	水冷	620±20	90	空冷
	35Mn2	850±10	60	空冷	—	—	—
K	20Ni2Mo	825±10	60	空冷	600±20	90	空冷
D	35Mn2	830±10	60	水冷	560±20	90	空冷
	40CrNiMo	850±10	60	空冷	620±20	90	空冷
	42CrMo	850±10	60	空冷	620±20	90	空冷

为提高抽油杆的腐蚀疲劳抗力,对C级和D级杆可以采用325目AISI316不锈钢粉进行等离子喷涂工艺,使用寿命可提高3倍。采用综合强化,即热处理后喷丸强化,再喷镀一层锌的防护,抽油杆的腐蚀疲劳强度提高3倍,持久强度可提高到200MPa。综合强化对抽油杆使用寿命的影响见图16-25。

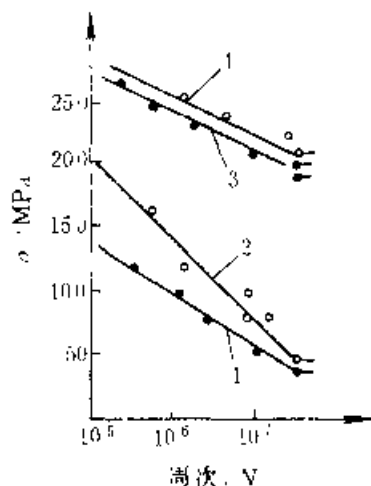


图 16-25 热处理后 20CrNi2Mo 钢实际  
在  $H_2S$  介质中的腐蚀疲劳回火  
索氏体组织时效处理后  
1、2 未强化 3、1 喷丸强化+喷镀锌

### 16.3.5 公母锥的热处理

公锥和母锥是在处理钻井时钻杆、接头断裂事故的工具,其外形如图16-26、图16-27所示。当钻杆断裂掉落井底时,用母锥在落井的钻杆外壁套螺纹,从而母锥与钻杆连成一体,将钻杆捞起;当接头断裂且落井的钻杆上无残留部分接头时,用公锥在钻杆内壁攻螺纹,然后将钻杆打捞上来。加工螺纹时,公锥、母锥的工作部分螺纹受到很大挤压应力和磨损,打捞钻杆时,它还受到落井钻杆的重力和井壁的阻力,因而与钻杆的螺纹连接部分受到很大的轴向剪切应力。公母锥的主要失效形式是螺纹压陷、磨损和剪断。

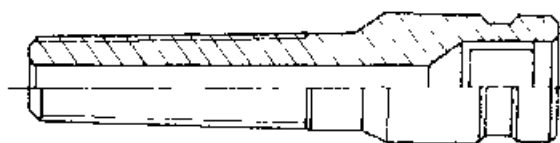


图 16-26 公锥外形图



图 16-27 母锥外形图

#### 16.3.5.1 公母锥用钢及技术要求

根据工作条件,要求公母锥螺纹具有较高的抗剪切强度,抗压陷能力以及耐磨性。采用27SiMn2WVA钢进行碳氮共渗或渗碳渗硼复合处理,可使公母锥寿命大大提高。用27SiMn2WVA钢制造公母锥可采用两种工艺:

1) 碳氮共渗,要求渗层深度为0.8~1.2mm,表面硬度 $\geq 60HRC$ 。

2) 渗碳、渗硼复合处理,要求渗碳层深度为0.6~0.9mm,渗硼层深度为0.08~0.12mm,硬度 $\geq 1200HV$ 。

#### 16.3.5.2 公母锥的碳氮共渗处理

制造工艺路线为锻造→正火→高温回火→机加工→碳氮共渗→检验→淬火→回火→机加工→检验。

1. 正火并高温回火 公母锥锻件毛坯在台车式电炉内进行930~950℃加热,保温1h空冷,再在650~700℃保温6h回火并随炉降温到50℃以下空冷。

2. 碳氮共渗 共渗在RJ1-105-3井式气体渗碳炉中进行。渗剂为尿素、甲醇溶液(甲醇与尿素的重量比为1:3的溶液)和煤油。共渗分两阶段进行:第一阶段,公母锥入炉后,开始滴入煤油30~100滴/min,在880℃共渗3h;第二阶段,炉内温880℃随炉降温到840℃,尿素、甲醇溶液为200~240滴/min,煤油为60~80滴/min,保温2~4h,抽样检查合格后出炉罐冷。

3. 淬火和回火 淬火加热在盐浴炉中进行,盐浴应充分脱氧。淬火加热温度为830~840℃,保温时间为:公锥20~25min,母锥为25~30min,然后水冷。回火在旋风回火炉中进行,回火温度为180~185℃,回火时间为4h,回火后空冷。

#### 16.3.5.3 公母锥的渗碳、渗硼复合热处理

制造工艺流程为锻造→正火→高温回火→机加工→气体渗碳→检验→渗硼→检验→淬火→回火→检验。

1. 预备热处理 与碳氮共渗前的预备热处理相同。

2. 渗碳 在 RQ 105 9 炉中进行, 渗碳温度为 930℃, 煤油滴量为 160~180 滴/min, 甲醇滴量为 70~90 滴/min, 保温 3~5h 后, 当层深达到 0.4~1.6mm 时, 随炉温降到 880℃ 出炉罐冷。

3. 渗硼 将已渗碳的公锥在盐浴炉内进行液体渗硼, 盐浴成分(质量分数)推荐为:  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  70%,  $\text{CaSi}$  10%,  $\text{NaCl}$  10%,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  10%, 渗硼温度为 930℃, 保温 4h 后出炉空冷。

4. 淬火、回火 淬火回火工艺与碳氮共渗后的公锥淬火工艺相同。

#### 16.3.5.4 检验

高温回火后检查硬度, 硬度要求  $\leq 269\text{HBS}$ 。用 27SiMn2WVA 钢专用试块, 随同公母锥一起进行碳氮共渗或渗碳, 渗硼复合热处理。碳氮共渗后检查层深和显微组织, 当总渗层深度在 0.8~1.2mm 时, 共析层+过共析层为 0.6~0.8mm, 脱碳层  $\leq 0.04\text{mm}$  为合格。对于渗碳+渗硼的公锥渗碳后进行显微检查, 其层深应达 0.6~0.9mm, 过共析层+共析层深度不小于 0.4~0.6mm。渗硼后, 其渗硼层的深度应达到 0.08~0.12mm, 硬度  $\geq 1200\text{HV}$ 。

#### 16.3.5.5 热处理缺陷及其防止

渗碳或碳氮共渗后常有表面脱碳, 表面碳化物网等缺陷。为了预防这些缺陷, 必须严格按工艺操作进行碳势控制。当脱碳层  $\geq 0.05\text{mm}$  时, 必须采取补渗处理。碳氮共渗的公锥若有严重碳化物网, 须在 860℃ 进行 2~3h 的扩散处理, 这时甲醇、尿素溶液滴量为 200~240 滴/min, 煤油滴量为 60~80 滴/min。公锥在淬火后, 有时会在内孔出现纵向裂纹, 其防止方法是加速冷却内孔; 或者用一工具塞住内孔, 防止冷却水进入内孔。

### 16.3.6 抽油泵泵筒的热处理

抽油泵泵筒在井下采油时, 不仅承受柱塞往复的磨擦磨损, 而且经受采出液的腐蚀、氧化。磨损和腐蚀是泵筒的主要失效形式。整体泵筒因为细而长, 例如: 常用泵筒外形尺寸为  $\phi 57\text{mm} \times 7800\text{mm}$ , 因泵筒变形而失效在油田也时有发生。

#### 16.3.6.1 整体泵筒的材料及表面强化工艺

我国抽油泵制造厂家借鉴和引进国外制造技术, 泵筒用钢和表面强化工艺如表 16-25 所示。

渗碳泵筒具有较高的硬度, 耐腐蚀性及疲劳强度。泵筒经渗碳后, 硬化层较厚, 比碳氮共渗泵筒及渗硼泵筒能承受更大的载荷和大的挤压应力。由于渗碳的综合力学性能远不如碳氮共渗, 所以渗碳工艺常常被碳氮共渗所取代。

表 16-25 国内整筒泵泵筒表面处理工艺

方法	材 料	工 艺 参 数	硬化层深/mm	表面硬度
渗碳	20	930℃, 保温 1h 840℃ 中频淬火, 200℃ 回火	$\geq 0.8$	995HV
碳氮共渗	20	860℃, 保温 4~6h 840℃ 中频淬火, 200℃ 回火	$\geq 0.6$	56~62HRC
渗氮	38CrMoAlA 34CrNiMo5	500~600℃, 保温 7~8h	$\geq 0.13$	600~1100HV
渗硼	20 45	860℃, 保温 1h	$\geq 0.08$	1380~1506HV
激光	45	功率 1480~1500W 泵筒走向速度为 86mm/min, 转速 13r/min	$\geq 0.35$	58~63HRC
镀铬	20 45		0.05~0.09	60~67HRC

渗氮处理温度低、变形小,泵筒的耐磨性和耐腐蚀性好,但必须要用价格较贵的氮化钢,因而限制了它的应用。

碳氮共渗工艺是目前制造厂家广泛采用的强化方法之一。与渗氮比,生产周期短,渗速快,可用材料广泛。它的最大优越性在于泵筒碳氮共渗后,且有良好的加工性。

渗硼和激光强化工艺正处于试验阶段,据报导,个别油田已取得良好的效果。

#### 16.3.6.2 泵筒的碳氮共渗处理

制造工艺路线为:下料→粗加工→去应力退火→精加工→碳氮共渗→校直→淬火→回火→校直→人工时效→检验→珩磨→检验。

1. 去应力退火 泵筒半成品在井式炉内  $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$  入炉,加热到  $560 \sim 600^{\circ}\text{C}$  保温  $1 \sim 1.5\text{h}$  随炉冷到  $200^{\circ}\text{C}$  以下空冷出炉。

2. 碳氮共渗 碳氮共渗在专用井式炉中进行,炉子应保证上下温度均匀,气氛均匀,特别是有保证筒体内腔气氛均匀的装置,这样才能保证渗层均匀、变动量小。

碳氮共渗所用的渗剂可以选用煤油 +  $\text{NH}_3$ , 吸热式气氛 + 丙烷 + 氨气,合成吸热式气氛 ( $\text{N}_2$  + 甲醇) + 丙烷 + 氨气等。

共渗温度  $860^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 共渗  $4 \sim 6\text{h}$ , 渗后缓冷。

3. 中频淬火 淬火在专用淬火机床上进行,中频电源的频率为  $8000\text{Hz}$ 。淬火温度为  $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 水冷。淬火后经  $200^{\circ}\text{C}$  回火  $2\text{h}$ 。

4. 人工时效 在井式炉中  $110 \sim 120^{\circ}\text{C}$  保温  $24 \sim 48\text{h}$ , 空冷。

#### 16.3.6.3 检验

碳氮共渗后检查随炉处理的金相试块,检测共渗层深度和显微组织。当总深度  $\geq 0.6\text{mm}$ , 共析层 + 过共析层  $0.4 \sim 0.6\text{mm}$ , 脱碳层  $\leq 0.05\text{mm}$  为合格。中频淬火并回火后用里氏硬度计检查内孔硬度,硬度应达到  $56 \sim 62\text{HRC}$ 。

### 16.3.7 石油钻头的热处理

图 16-28 所示为石油三牙轮钻头。它由六个基本部件组成。即三个牙轮和三个牙掌。三个牙掌在加工后焊接在一起构成通体钻头。在石油牙轮钻头组成中,牙轮、牙掌配合的轴承结构一直是人们关注的问题,也是钻头失效的关键部位。

过去牙轮内表面镶嵌贵重的银合金,而牙掌轴承表面的受力部位则敷焊钴铬钨合金,再进行渗碳、淬火处理,两者之间用滚柱连接,组成滚动轴承。为了提高钻头使用寿命,适应高钻压(几千牛至几十千牛)、高转速、硬地层的需要,取消了滚柱,而采用了滑动轴承结构,如图 16-29 所示。这种结构对材料和热处理提出了很高的要求。

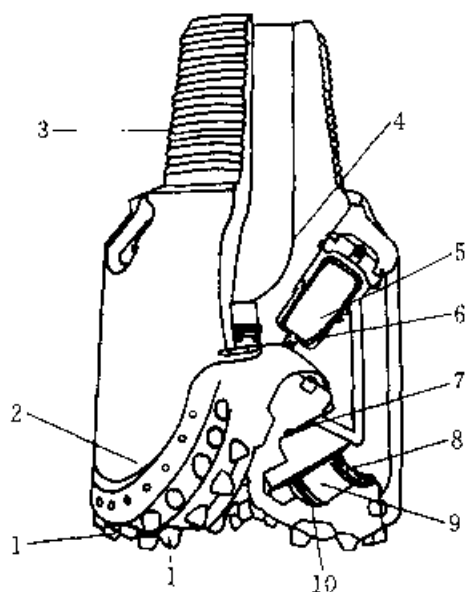


图 16-28 牙轮钻头示意图

1—硬质合金齿 2—掌尖 3—螺纹 4—加油孔 5—储油囊 6—泄压阀 7—止面 8—O型密封圈 9—大轴 10—卡簧

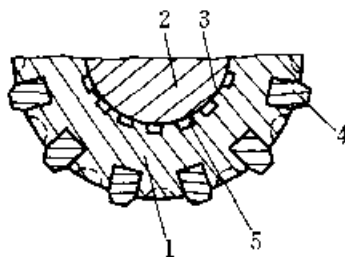


图 16-29 牙轮钻头的滑动轴承结构

1—牙轮 2—牙掌轴颈 3—滑动接触面 4—硬质合金齿 5—特殊金属镶焊

#### 16.3.7.1 牙掌的材料与热处理

1. 牙掌用钢 牙掌可用 AISI8720 钢制造,钢中硫磷含量(质量分数)应控制在  $0.015\%$  以下。

2. 制造工艺路线 锻造→正火→机加工→局部镀铜→渗碳→检验→磨削加工→脱脂→固体渗硼→强力清洗→淬火→清洗→回火→检验→机加工→组焊。

3. 牙掌的热处理 渗碳可在氮气气氛的周期式渗碳炉或连续式渗碳炉内进行。渗碳温度  $930^{\circ}\text{C}$ ，用  $\text{CO}_2$  红外仪或氧探头进行碳势控制，通常碳势控制在  $w(\text{C}) 1.20\% \pm 0.05\%$ ，渗碳层的深度依不同规格钻头而异，一般均在  $1.20\text{mm}$  以上。

淬火油进行淬火。

回火在空气炉中进行，回火温度  $180^{\circ}\text{C}$  均温时间为  $2\sim 3\text{h}$ 。

4. 组织和性能检测 渗碳层的检查与常规渗碳的质量控制相同。

渗碳后渗硼的质量控制，在连续生产条件下，

每堆三盘放置渗硼试样一只，试样尺寸  $\phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。每 2000 只牙掌随机取样解剖一只，进行全面分析。分析项目：

(1) 渗层金相组织，图 16-31 是检测的合格渗硼牙掌的金相照片。可以看出：渗硼层的最外层为齿状组织，主要为  $\text{Fe}_2\text{B}$ 。由于钢的基体经过预渗碳，齿状组织层的齿形特征不十分明显。齿间和毗区分布析出相  $\text{Fe}_3(\text{CB})$  和  $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ ，再下层即渗碳层基体。如果发现外层出现明显  $\text{FeB}$  相，则判为不合格，必须重新调整渗剂和工艺。

(2) 渗硼层深度，渗硼层深度只量取齿状渗层，控制在  $50\sim 100\mu\text{m}$ ，深度不够必须补渗。测量渗硼层方法有几种，可采用平均测量法，即计算齿长的平均值。

(3) 硬度检测，图 16-32 是渗硼牙掌的硬度分布曲线。渗层表面硬度  $\geq 1500\text{HV}$ 。进入渗硼—渗碳过渡区时，硬度并不是单纯渗硼情况那样出现急剧下降，而为渗碳层硬度所补偿。整个表层的硬度梯度较平缓，足以承受钻头在

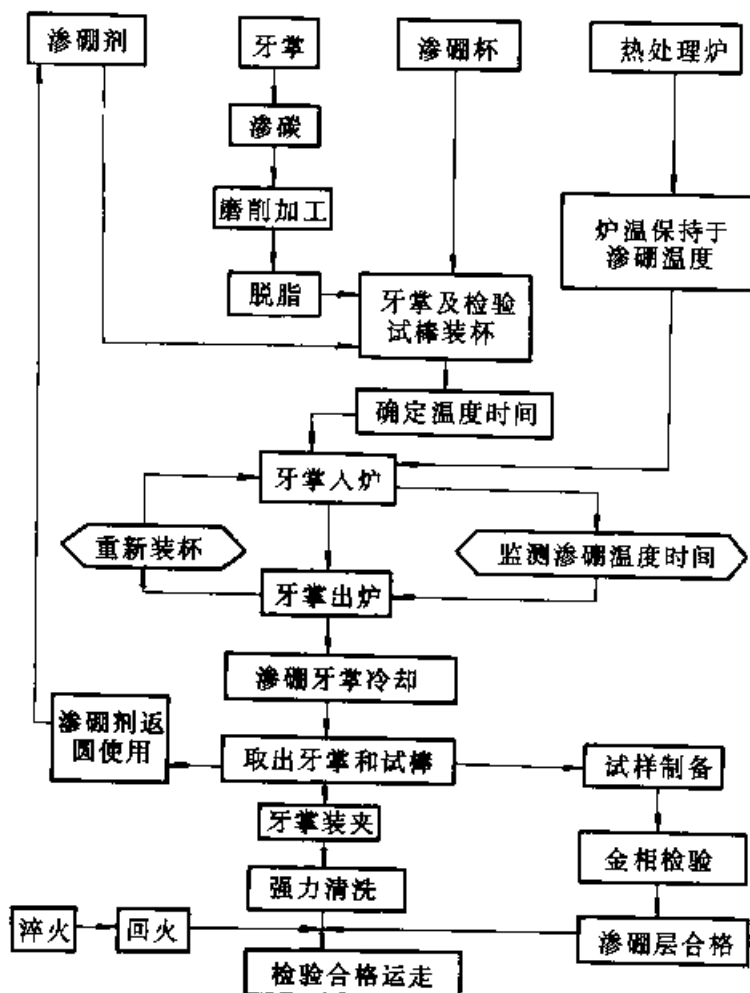


图 16-30 牙掌渗硼过程示意图

渗碳之后，牙掌轴承表面经过磨削加工，保持光洁，渗硼部位基本上与渗碳部位（仅限于牙掌轴承表面）保持一致。采用固体渗硼法，轴承表面用渗硼杯进行局部封装，工艺过程如图 16-30 所示。

渗硼处理可以在电加热的各种炉内进行，渗硼温度为  $930^{\circ}\text{C}$ ，保温时间  $6\text{h}$ 。需要指出的是渗硼最好在保护气氛下进行。

淬火在密封箱式炉中进行，炉内通入氮气气氛保护，淬火温度为  $840^{\circ}\text{C}$ ，保温时间根据牙掌型号确定，一般在  $2\sim 3\text{h}$  之间。温度不宜选择过高，以免局部地区达到共晶温度，引起渗层熔化。淬火油温保持在  $80^{\circ}\text{C}$ ，可用同美国 Sun 牌性能相同的

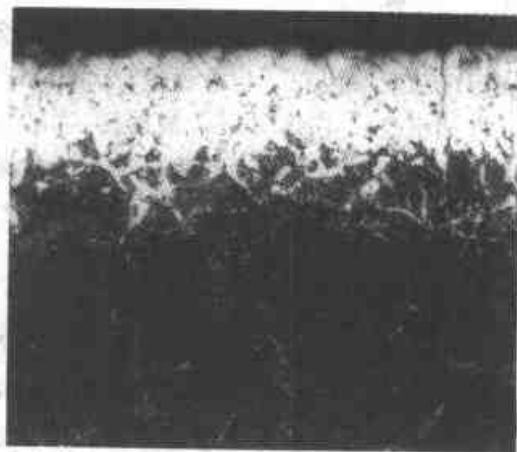


图 16-31 渗碳+渗硼金相组织

井下工作的各种机械冲击的作用,这就明显地显示出渗碳--渗硼复合处理的优越性。

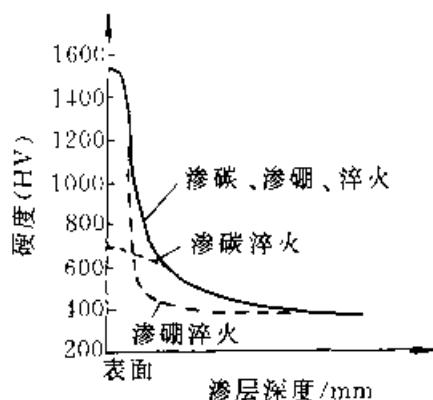


图 16-32 不同化学热处理对材料硬度的影响

(4) 剥落和裂纹检查,一般情况下,均用目测法检查(渗硼层上是否有剥落、裂纹和其他缺陷(如疏松层)。抽检的解剖牙掌在金相显微镜下观察,或用探伤法。表层的剥落是不允许的,但如果有极其轻微的裂纹,只要不超过规范规定的严重程度,仍然允许通过。

此外还有一些不可缺少的检测项目,如渗硼层是否覆盖住要求的渗硼部位,防渗区是否有漏渗,密封面的防渗高度是否足够,或者是否超高等等。

### 16.3.7.2 牙轮材料与热处理(以镶齿牙轮为例)

1. 牙轮用钢 牙轮可用 AISI9310 钢制造,钢中硫磷含量应控制在 0.015% (质量分数) 以下。

2. 制造工艺路线 锻造→正火→机加工→渗碳→检查→淬火→清洗→回火→检验→机加工→镶硬质合金→检验。

3. 牙轮的热处理 牙轮的渗碳与牙掌一样可以在连续式渗碳炉或周期渗碳炉中进行,渗碳温度 930℃,碳势控制在  $w(C)$  0.80%±0.03%,渗碳层深依不同规格钻头而异,一般均在 1.80mm 以上。

渗碳后缓冷,经检查合格后,进行淬火处理,牙轮淬火在密封箱式炉内进行,炉内通入氨基气氛保护,气氢碳势应控制  $w(C) = 0.80\% \pm 0.05\%$ ,淬火温度 840℃,保温时间根据牙轮型号确定。淬火油温控制为 80℃。

回火在空气炉中进行,回火温度 180℃,均温时间 2~3h。

4. 检验 牙轮渗碳后的检验主要检测项目有:表层碳浓度测定和渗层深度测定。该项目是由剥层试棒分析获得。过高的碳含量会在渗层出现网状碳化物,所以应严格控制碳势  $w(C)$  0.80%±0.05%。

淬火回火后的牙轮主要检查硬度,硬度应在 56~62HRC。

## 16.4 钻机齿轮的热处理

### 16.4.1 石油钻机螺旋锥齿轮的热处理

螺旋锥齿轮是石油钻机中的主要传动零件,它较高的传动速度(空载最高线速度为 30m/s,加载线速度为 25m/s),受重载(传动功率为 894840W)冲击载荷,其主要失效方式是磨损、点蚀、或断裂,该齿轮的热处理方法有渗碳或沿齿沟中频感应淬火等。

#### 16.4.1.1 锥齿轮的渗碳

1. 齿轮的外形与主要参数 图 16-33 为锥齿轮的外形图,其主要技术参数为端面模数  $m = 12$ , 齿轮齿数  $z = 41$ , 节圆直径  $D_s = 192\text{mm}$ , 压力角  $\alpha = 20^\circ$ , 齿全高  $h = 14$ , 螺旋角  $\beta = 36^\circ$ , 端面弧齿厚  $s = 17\text{mm}$ , 精度为 7-7-6。

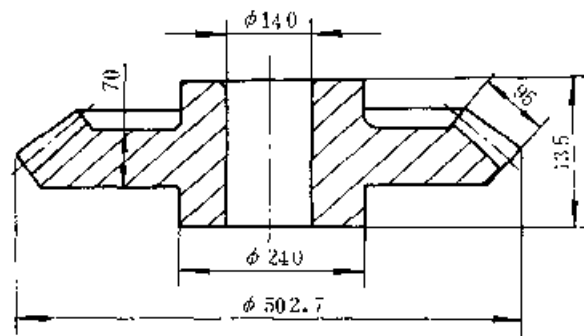


图 16-33 螺旋锥齿轮

2. 用钢及技术要求 采用 20Cr2Ni4A、22CrMnMo 钢进行渗碳。总渗碳层深度为 1.8~2.3mm, 渗层表面碳浓度  $w(C)$  为 0.85%~1%。渗碳淬火回火后表面硬度为 58~62HRC, 心部硬度为 36HRC。有效渗碳硬化层深度测至 50HRC 处不小于 1.2mm (在同样材料, 同炉处理的试块上测定)。淬火后渗层组织为碳化物 ≤1 级, 马氏体 ≤2 级, 残留奥氏体 ≤2 级。渗碳淬火后表面脱碳层 ≤0.05mm。热处理后畸变量为大背面翘曲 ≤0.20mm, 振摆 ≤0.02mm。

制造工艺路线为锻坯→正火→高温回火→车齿坯→粗、精铣齿→渗碳→高温回火→淬火→低温回火→喷丸→磨端面及孔→磨齿→装配。

3. 渗碳 渗碳在 RJJ—105—9 井式渗碳炉进行, 装炉方式如图 16-34 所示。每炉装炉量为 4~6 件。

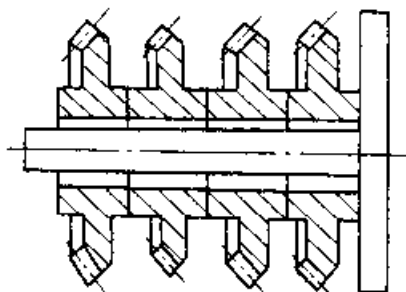


图 16-34 齿轮渗碳装炉方式

为了加速排气, 装炉后在向炉内滴入甲醇 (160~180 滴/min) 的同时, 还向炉内通入适量的氨气 (4~4.5 L/min), 氨在高温下分解为氮和氢, 一方面增大炉压, 使炉内空气尽快排除; 另一方面

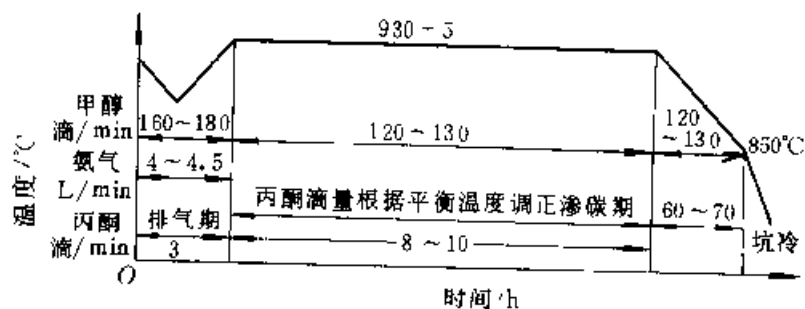


图 16-35 渗碳工艺曲线

平衡温度: 20Cr2Ni4A 37.5~39℃

22CrMnMo 40~42℃

也有冲洗炉内碳黑的作用。当炉温升到 900℃ 以后, 开始滴入丙酮 (160~180 滴/min)。待 CO<sub>2</sub> 含量 (体积分数) 与 0.8%~1.0% 时, 停止供氨。当 CO<sub>2</sub> 含量 (体积分数) 小于 0.5% 可接通露点仪。在渗碳期间甲醇滴量不变 (120~130 滴/min), 丙酮量由露点仪测出平衡温度来确定。其工艺曲线如图 16-35 所示。

4. 高温回火 锥齿轮在 RJJ—105—9 炉中于 580~600℃ 保温 6h (滴甲醇 60~70 滴/min), 随后出炉空冷。高温回火的目的在于减低淬火后渗层的残留奥氏体, 降低磨裂危险。

5. 马氏体分级淬火 淬火加热在盐浴炉中进行, 齿轮加热到 800~820℃, 保温 1h 后, 淬入 160℃ 的硝盐浴中, 经过 30min 后取出空冷至室

温, 最后在 180~200℃ 温度下回火 6h。

6. 检查 用随炉试块检查渗碳层深度、硬化层深度、表面硬度、心部硬度以及显微组织等项, 检测齿轮的畸变量, 各项指标应符合技术要求。

7. 常见缺陷及防止办法 由于控制不当, 可造成贫碳或超碳, 这可通过补碳或扩散来消除, 无论补碳或扩散都必须按图 12-35 工艺中给出的平衡温度进行控制。另外一种缺陷是畸变, 引起畸变的因素很多, 应特别注意装炉方式对畸变的影响。如果齿轮内孔胀大, 可在高温回火后, 再加热到 630~650℃, 均热后出炉空冷, 内孔用水冷, 用这种方法, 一般可缩回 0.2~0.4mm。

#### 16.4.1.2 锥齿轮沿齿沟中频淬火

1. 技术要求 采用 42CrMo 钢调质, 硬度要求 220~270HBS。齿面淬火硬度要求 ≥50HRC, 硬化层深度 2~3mm。

2. 制造工艺路线 锻坯→正火→车齿坯→粗、精铣齿→中频感应加热沿齿沟淬火→检查

3. 热处理工艺 中频设备: BPS100/8000; 感应器见图 16-36, 硅钢片组合式结构; 淬火方法: 在专用机床上进行沿齿沟连续淬火; 处理参数: 电流 65A, 输出功率 28kW; 功率因数:  $\cos\varphi=1$ ; 感应器移动速度: 4mm/s; 冷却液: 聚乙二醇。

#### 16.4.1.3 锥齿轮的离子渗氮

近年来, 石油钻机直角箱用锥齿轮, 有用离子渗氮 (或气体渗氮化) 工艺取代的趋势。由于渗氮层表面硬度高, 深层渗氮件的屈服强度也很高, 特别是变形小, 渗氮后齿轮的接触面积大, 增加了承载能力, 又延长了齿轮的寿命。离子渗氮弧齿锥齿轮主要用钢有 25Cr2MoV 钢和 42CrMo 钢。

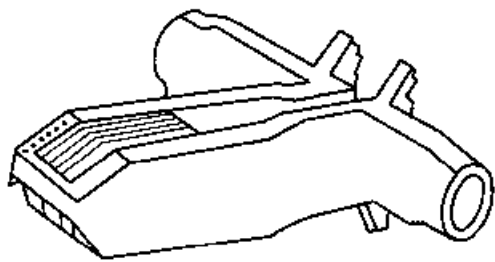


图 16-36 中频沿齿沟淬火感应器示意图

1. 技术要求 调质处理后硬度要求 250~280HBS, 渗氮层深 0.5~0.7mm, 表面硬度  $\geq 600\text{HV}$ 。

2. 制造工艺路线 锻造→正火→车齿坯→粗滚齿→调质→精滚齿→离子渗氮→检查。

3. 离子渗氮工艺 离子渗氮可在各种类型的离子渗氮炉中进行, 其工艺可使用常用离子渗氮工艺, 或快速渗氮工艺。常规渗氮工艺为 510~530℃ 渗氮 10h, 快速渗氮多用二段或三段渗氮工艺。渗氮时间为 30h。图 16-37 是 25Cr2MoVA 钢的硬度梯度曲线。

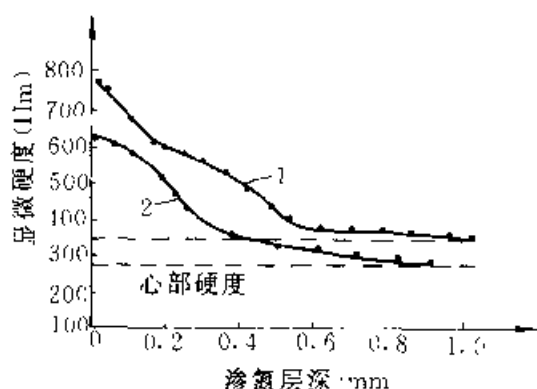


图 16-37 25Cr2MoVA 钢硬度梯度曲线

1—快速渗氮 2—常规渗氮

## 16.4.2 转盘齿轮的热处理

转盘带动方钻杆旋转, 实现钻井工艺。转盘大小锥齿轮承担着很大的转矩和输出功率。转盘齿轮的主要失效形式为磨损。

### 16.4.2.1 转盘齿轮的外形及主要参数

以 2P 520 转盘从动轮为例, 其外形如图 16-38 所示, 主要参数为  $m=20$ 、齿数  $z=58$ , 压力角  $\alpha=20^\circ$ , 外径  $\phi=1160\text{mm}$ 。

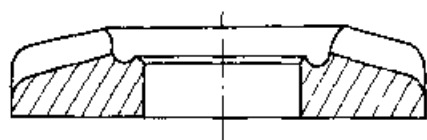


图 16-38 转盘齿轮外形图

转盘齿轮的主要热处理方式有调质和离子渗氮。

### 16.4.2.2 调质

采用 42CrMo 钢制造, 硬度要求为 269~302HBS, 制造工艺路线为: 锻坯→正火→粗加工→调质→精加工→成品。调质处理工艺规范见表

16-26。

表 16-26 转盘齿轮调质处理

工序	加热温度 /℃	保温时间 /h	加热设备	冷却方式
淬火	860~870	3	箱式炉	油冷
高温回火	560~600	4.5	箱式炉	油冷

### 16.4.2.3 转盘齿轮的离子渗氮

离子渗氮齿轮采用 35CrMo 钢制造, 硬度要求为 180~220HBS。要求离子渗氮层深度为 0.4~0.5mm, 表面硬度  $\geq 500\text{HV}$ 。主要齿轮的调质硬度为 235~272HBS, 离子渗氮层深为 0.5~0.6mm, 表面硬度为  $\geq 500\text{HV}$ 。脆性均应  $\leq \text{II}$  级。

离子渗氮齿轮的制造工艺路线为: 锻坯→正火→粗加工→去应力退火→精加工→离子渗氮→精加工→成品。

转盘齿轮的预备热处理工艺规范见表 16-27 所示。

表 16-27 转盘齿轮预备热处理工艺规范

齿轮类型	工序	加热温度 /℃	保温时间 /h	加热设备	冷却方式
从动齿轮	正火	880~890	3	箱式炉	空冷
主动齿轮	淬火	860~870	3	箱式炉	油冷
	回火	600~610	4.5	箱式炉	空冷

离子渗氮在 LD-500BZ 型炉内进行, 工艺如图 16-39 所示。主动齿轮保温 28h, 从动齿轮保温 20h。

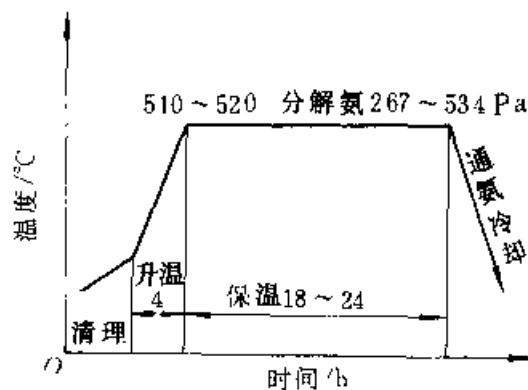


图 16-39 转盘齿轮的离子渗氮工艺

正火或调质后检查硬度应符合技术要求, 离子渗氮后, 对工件用超声波硬度计检查硬度, 硬度



值应 $\geq 50\text{HRC}$ ，对随炉试块进行显微检查测定渗层深度，检查脆性。按GB/T11354执行。

常见的缺陷及解决方法见表16-28。

表 16-28 常见缺陷及解决方法

缺陷	原因	解决方法
渗层不均匀	通氮量过大，温度不均匀，装炉不当	正确选择通氮量，合理装炉
硬度低	温度高，供氮量不足	严格控制参数
渗层浅	温度低，时间短	执行工艺，准确测量
局部烧伤	清洗不净，孔槽未屏蔽	零件清洗十净，屏蔽

## 16.5 化工机械零件的热处理

### 16.5.1 压力容器的热处理

压力容器是石油、化工、机械等行业广泛应用的一种焊接构件。它的运行条件苛刻，制造工艺复杂，如果容器一旦破坏，后果极其严重。为了确保容器的运行安全，正确选择材料和合理进行热处理，在容器制造中占有重要地位。

#### 16.5.1.1 压力容器的失效与材料

压力容器是在特定的压力、温度、介质下工作的。所受压力可以从 $0.1\sim 100\text{MPa}$ 以上；工作温度范围为 $-200\sim 500^\circ\text{C}$ 。工作介质可以是酸性、碱性或其他腐蚀性介质。

失效分析表明，压力容器失效事故中除操作

因素外，由于冷热加工、热处理、焊接等工艺过程中带来的制造缺陷，化学介质的均匀腐蚀、点蚀等环境因素常导致压力容器发生以下几种失效：

(1) 脆性破坏，大部分发生在较低温度下，常在焊接缺陷、内部缺陷及应力集中处产生。

(2) 过量的塑性变形，在高温下的压力容器蠕变或工作压力超高，会引起容器局部导致过量的塑性变形。

(3) 低周疲劳，在循环载荷作用下，由于工作应力往往超过材料屈服强度，使压力容器产生较大的反复塑性变形，导致最后损坏。

(4) 应力腐蚀，在应力和能够引起应力腐蚀的介质共同作用下因产生应力腐蚀裂纹而导致压力容器破坏。

(5) 氢腐蚀损坏，在具有一定压力的氢和温度共同作用下，氢和钢中的碳反应生成甲烷而形成氢腐蚀裂纹，导致容器的破坏。

压力容器的可靠性和所选用的钢材性能有着密切关系。压力容器用钢在承受压力时必须有足够的稳定性，要具有足够的强度、塑性和韧性。压力容器要经过各种成形工艺，所以它还应有良好的冷热加工性能和焊接性能。对于在腐蚀介质下工作的压力容器，材料必须具有相应的耐蚀性和抗氢能力；在高温下工作的容器用钢必须保证组织稳定；低温下工作的容器要保证在使用温度下有足够的韧性。常用压力容器用碳钢和低合金钢及其标准力学性能见表16-29。常用低温钢和不锈钢的力学性能见表16-30，常用耐热钢和抗氢钢及其力学性能见表16-31。压力容器用不锈钢铸件的力学性能列于表16-32。

表 16-29 压力容器用碳钢和低合金钢的力学性能

钢号	公称厚度 /mm	热处理状态	回火温度/℃ ≥	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$A_{KV}$ /J	HBS
					≥			
20	≤100	N	—	370~520	215	24	27	102~139
35	≤100	N	—	510~670	265	18	20	136~200
	>100~300	N, N+T	590	490~640	255	18	20	130~190
16Mn	≤300	N, N+T	600	450~600	275	19	34	121~178
15MnV	≤300	N, N+T	600	470~620	315	18	34	126~185
20MnMo	≤300	Q+T	600	530~700	370	18	41	156~208
	>300~500			510~680	355	18	41	136~201
	>500~700			490~660	340	18	34	130~196

(续)

钢号	公称厚度 mm	热处理状态	回火温度/℃ ≥	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$A_{kv}$ /J	HBS
20MnMoNb	≤300	Q+T	630	620~790	470	16	41	185~235
	>300~500			610~780	460	16	41	185~233
15CrMo	≤300	N+T, Q+T	620	420~610	275	20	34	118~180
	>300~500			430~600	255	19	34	113~178
30CrMo	≤300	Q+T	580	620~790	440	15	27	185~235
	>300~500			610~780	430	15	20	180~233
12Cr1MoV	≤300	N+T, Q+T	680	410~610	255	19	34	118~180
	>300~500			430~600	245	19	34	113~178
12Cr2Mo1	≤300	N+T, Q+T	680	510~680	310	18	41	136~204
	>300~500			500~670	300	18	41	133~200
1Cr5Mo	≤500	N+T, Q+T	680	590~760	390	18	34	174~220

注：当附加保证模拟焊后热处理试样的力学性能时，回火温度可另行规定。

表 16-30 压力容器用低温钢和不锈钢的力学性能

钢 号	公称厚度 mm	热处理状态	回火温度 ℃ ≥	常温拉伸试验			低温冲击试验	
				$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ (%)	试验温度 ℃	$A_{kv}$ /J
20D	≤50	N+T, Q+T	600	370~520	215	21	20	20
16MnD	≤200	N+T, Q+T	500	450~600	275	19	40	20
	>200~300						30	20
09Mn2VD	≤200	N+T, Q+T	600	420~570	260	22	-50	27
16MnMoD	≤300	Q+T	600	510~680	355	18	40	27
09MnNiD	≤300	Q+T	600	420~570	260	22	-70	27
20MnMoD	≤300	Q+T	600	530~700	370	18	-30	27
	>300~500			510~680	355		-30	
	>500~700			490~660	340		-20	
08MnNiCrMoVD	≤300	Q+T	600	600~770	480	17	-40	47
10Ni3MoVD	≤300	Q+T	600	610~780	490	17	-50	47

表 16-31 压力容器用耐热钢和抗氢钢的力学性能

序号	钢 号	热处理 状态	力 学 性 能				$\alpha_K$ /J·cm <sup>-2</sup>	持久强度 (10万h)/MPa
			$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)		
1	16Mo	调质	≥400	≥250	≥25	≥60		
2	12CrMo	调质	≥420	≥270	≥24	≥60	≥140	
3	15CrMo	调质	≥450	≥240	≥21	—	≥60	≥110(500℃)

(续)

序号	钢 号	热处理 状态	力 学 性 能				$\alpha_K$ $J \cdot cm^{-1/2}$	持久强度 (10万h) MPa
			$\sigma_b$ MPa	$\sigma_s$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\phi$ (%)		
4	12Cr1MoV	调质	$\geq 480$	$\geq 260$	$\geq 21$	—	$\geq 60$	—
5	13CrMo44	调质	440~550	$\geq 300$	$\geq 22$	—	$\geq 60$	—
6	13CrMoV42	调质	500~650	$\geq 300$	$\geq 20$	—	$\geq 60$	—
7	12Cr12MoWV8	调质	$\geq 550$	$\geq 350$	$\geq 18$	—	—	$\geq 125(580^\circ C)$
8	10CrMo9 10	调质	550~600	$\geq 270$	$\geq 20$	—	$\geq 90$	—
9	Cr5Mo	退火	$\geq 400$	$\geq 200$	$\geq 22$	$\geq 50$	$\geq 120$	—
10	2 $\frac{1}{4}$ -Cr1Mo	退火	415~585	$\geq 205$	$\geq 18$	$\geq 40$	—	—

## 16.5.1.2 压力容器的热处理工艺

1. 正火 压力容器制造中的正火处理主要用于以下场合:

(1) 改善母材综合力学性能, 提高塑性和韧性。如 16Mn 等钢为热轧状态使用钢种, 当截面较大时, 通过正火可以在强度水平接近热轧状态的基础上, 提高塑性和韧性。

(2) 改善电渣焊的焊缝组织, 提高综合力学性能。

(3) 细化热冲压封头的组织, 提高塑性和韧性。

(4) 用于必须在正火状态下使用的钢材, 如 15MnTi。

压力容器常用钢种的正火工艺列于表 12-33。

表 16-32 压力容器用不锈钢铸件的力学性能

钢 号	公称厚度 'mm	热 处 理 状 态	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_s$ MPa	$\delta_5$ (%)	HBS
			$\sigma_s$			
0Cr13	$\leq 100$	A (860~900°C 缓冷)	110	205	20	110~183
1Cr13	$\leq 100$	Q + T (950~1000°C 空冷或油冷, $\geq 620^\circ\text{C}$ 回火)	585	380	16	167~220
0Cr18Ni9	$\leq 100$	Q (1010~1150°C 快冷)	520	205	35	139~187
	$> 100\sim 200$		490	205	35	131~187
00Cr19Ni10	$\leq 100$	Q (1010~1150°C 快冷)	480	175	35	128~187
	$> 100\sim 200$		450	175	35	121~187
00Cr18Ni5Mo3Si2	$\leq 100$	Q (950~1050°C 快冷)	590	390	20	175~235
0Cr17Ni12Mo2	$\leq 100$	Q (1010~1150°C 快冷)	520	205	35	139~187
	$> 100\sim 200$		490	205	35	131~187
00Cr17Ni14Mo2	$\leq 100$	Q (1010~1150°C 快冷)	480	175	35	128~187
	$> 100\sim 200$		450	175	35	121~187
1Cr18Ni9Ti	$\leq 100$	Q (1000~1100°C 快冷)	520	205	35	139~187
	$> 100\sim 200$		490	205	35	139~187
0Cr18Ni10Ti	$\leq 100$	Q (920~1150°C 快冷)	520	205	35	139~187
	$> 100\sim 200$		490	205	35	131~187

正火操作要点:

(1) 钢板正火装炉时, 应相互保持 150~200mm 的距离, 并应垫平, 筒节正火应竖放, 下垫高度大于 300mm 的平支座。筒节之间应保持 200mm 以上的距离。

(2) 正火温度应根据钢种、使用性能指标要求确定, 正火温度提高, 强度升高。

(3) 升温时工件温差不得大于 50℃, 保温温差不大于 20℃。

(4) 保温时间从工件与炉膛温度一致时开始计算。一般按每毫米工件厚度 1.5~3min 计算, 厚度按工件最厚处计算。总加热时间不少于 30min。

(5) 根据钢板的厚度和技术要求可选用静止空气冷却或风冷、喷雾冷却。

表 16-33 压力容器用钢的正火工艺

钢 号	加热温度/℃	保温时间	冷却方式
16MnR	900~920	以每毫米保温 1.5~3min 计算	静止空冷或风冷, 以及喷雾冷却
16MnVR	930~970		
15MnV	940~980		
15MnTi	940~980		
16MnDR	900~920		
14MoMoV	910~950		
18MnMoNb	910~950		
13MnNiMo54	910~950		
16Mo	900~950		
15CrMo	930~960		
14CrMo	930~960		
12CrMo	930~960		
12Cr2Mo	930~960		

2. 调质 对容器钢板的调质即水淬和回火。在厚壁压力容器, 目前已开始用调质处理来提高壳体材料的强度和韧性, 以更好地发挥材料的潜力。常用的调质钢种有 14MnMoV 钢, 18MnMoNb 钢等。

调质的淬火温度、保温时间、加热及操作注意事项与正火相同。

压力容器封头和筒节可采用喷淋水柱或浸入水槽两种方法淬冷。由于浸入淬冷设备简单、操作

方便, 应用较为普遍。淬火操作的关键是保证工件的入水温度不低于  $A_{c3}$  点, 并注意控制工件的冷却速度。在一批工件连续淬火时, 水温不应高于 80℃, 否则工件的冷却达不到激冷的要求。淬火后的回火参阅下段叙述。

3. 回火 回火的目的主要是改善钢材的组织性能, 回火在正火或淬火后进行。各钢种最佳回火温度范围见表 16-34。具体回火温度的选择取决于力学性能的要求, 可通过预先的回火试验来确定。

表 16-34 各种压力容器用钢最佳回火温度

钢 号	最佳回火温度范围/℃
16Mn, 19Mn5	580~620
15MnV, 15MnTi	620~640
13MnNiMo54	580~600
12CrMo	640~660
15CrMo	660~680
4MoMoV	610~660
18MnMoNb	620~640
12CrMoV	720~740
$2\frac{1}{4}$ Cr1Mo	650~670

回火保温时间一般按工件最厚处的厚度每毫米保温 3~5min 来计算, 最少保温 1h。回火保温后空冷, 有回火脆性的钢可以风冷或水冷。

#### 4. 去应力退火

(1) 去应力退火的目的是:

1) 消除焊接接头中的内应力和冷作硬化, 提高接头抗脆断的能力。

2) 在低合金钢接头中改善焊缝及热影响区的碳化物, 提高接头高温持久强度。

3) 稳定结构的形状, 消除焊件在焊后机加工和使用过程的畸变。

4) 促使焊缝金属中的氢完全地外扩散, 从而提高焊缝的抗裂性和韧性。

(2) 压力容器符合下列条件之一者应进行去应力退火。

1) 对接焊缝处的厚度 ( $\delta$ ) 超过以下数值时:

15MnV 钢:  $\delta > 28\text{mm}$  (如焊前预热  $\delta > 32\text{mm}$ ); 14MnMoV、18MnMoNb、20MnMo、

20Cr3NiMoA、15CrMo、Cr5Mo 钢等任何厚度。

碳钢:  $\delta > 35\text{mm}$  (如焊前预热  $\delta > 38\text{mm}$ )。

16Mn 钢:  $\delta > 30\text{mm}$  (如焊前预热  $\delta > 35\text{mm}$ )。

2) 冷成形和中温成形的筒体厚度  $\delta$  符合以下条件者:

碳素钢: 16MnR,  $\delta \geq 0.03D_k$  (mm); 其他合金钢:  $\delta \geq 0.025D_k$  (mm)。式中  $D_k$  为筒节内径 (mm)。

3) 冷成形封头 (奥氏体不锈钢除外) 都应进行去应力退火。

4) 图样注明有应力腐蚀的容器, 以及图样或工艺专门要求去应力的零件。

(3) 常用钢去应力退火工艺 常用钢去应力退火的温度和保温时间列于表 16-35。

表 16-35 各种压力容器用钢的去应力退火温度及保温时间

钢 号	最低的去应力退火温度 / °C	最短保温时间		
		50mm 以下	50~125mm	125mm 以上
20, 16Mn, 19Mn5	600	24min / 10mm	1.5h - (6min / 10mm)	1.5h - (6min / 10mm)
15MnV, 15MnTi	600			
12CrMo, 15CrMo	650			
14MnMoV, 18MnMoNb, 13MnNiMo54	600		24min / 10mm	5h - (6min / 10mm)
12CrMoV, 2 $\frac{1}{4}$ Cr1Mo	680			

去应力退火可分为整体和局部两类:

1) 整体去应力退火, 压力容器整体去应力退火可以用外部加热和内部加热, 热源可以是电、煤气或天然气等。操作原则如下:

①准备工作, 对于薄壁直径较大的容器应采取防畸变措施。容器的密封面和高精度螺孔的地方须用涂料保护。

②容器入炉时, 炉温应低于 300~400°C。

③板厚在 25mm 以下者, 升温速度不大于 200°C/h, 板厚在 25mm 以上者, 升温速度应小于 150°C/h。

④尽可能使容器整体的温度均匀一致。升温时沿工件的全长, 温差不应大于 50°C; 保温温差不应大于 20°C, 保温后随炉冷到 300~400°C, 最后将工件移到炉外空冷。

⑤如因容器过长需要进行调头退火时, 其重复加热部分不应小于 1500mm, 并对露在炉外的近炉部分 1000mm 范围内采取保温措施。

内部加热是将电加热器放入容器内部加热, 外部用绝热材料进行保温的一种去应力方法。也可用燃油、燃气在容器开口处用烧嘴加热, 以容器为燃烧室, 外部以绝缘层保温。电加热时, 温度均匀性好, 温度控制精度高。

2) 局部去应力退火, 压力容器的局部去应力退火主要用于环焊缝的去应力。施工程序如图 16-10 所示。其操作要点及注意事项如下:

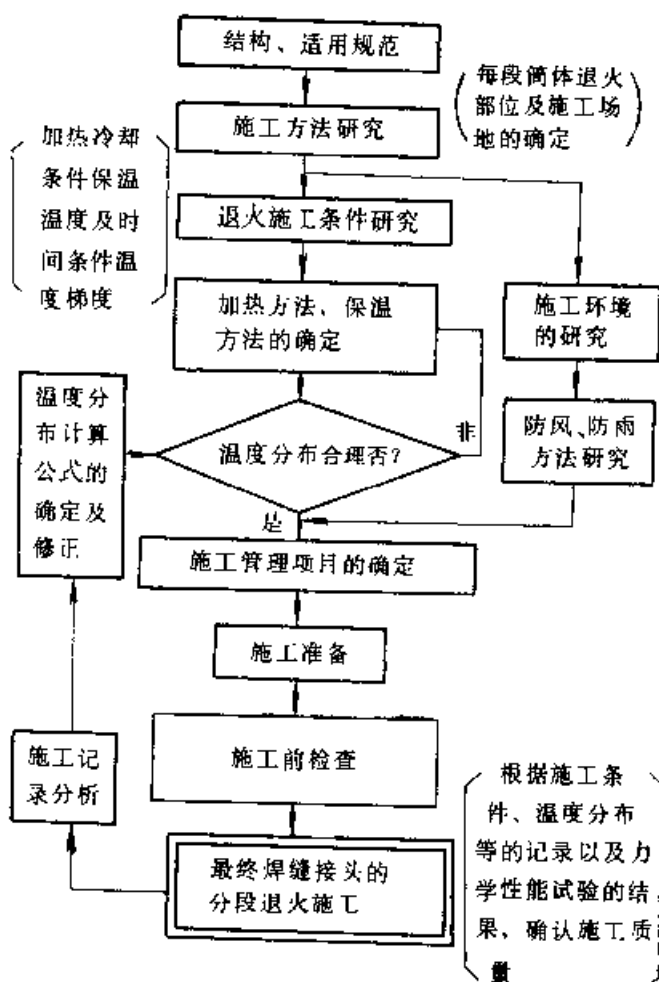


图 16-10 去应力退火的程序

①应在整个环缝区进行退火,不得用局部烘烤代替,以免因温度梯度过大产生新的应力。

②局部加热区的宽度  $B$  (mm) 应满足

$$B \geq \sqrt{D\delta} \quad (\text{根据英国 BS5500 规范})$$

式中  $D$  — 容器内径 (mm);

$\delta$  — 容器厚度 (mm);

或者满足

$$B \geq 10 \cdot b \quad (\text{根据美国 ASMEV}_{11.1} \text{ 规范})$$

式中  $b$  — 熔敷金属宽度 (mm)

③保温区的宽度  $B_2$  (mm) ASMEV<sub>11.1</sub> 规范对此不做规定,重要容器可根据 BS5500 规范按下式选用

$$B_2 \geq 10 \sqrt{D\delta}$$

④加热速度  $c$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )  $c \leq 5500/\delta$

⑤加热温度可根据钢种及保温时间综合确定。

⑥保温时间在正常加热温度下,按公式确定  $\tau \geq 5875/\delta$  (min)

⑦局部退火的温度梯度一般不作规定,重要容器可按 BS5500 标准执行,即最高加热温度和最高加热温度 1/2 点的距离应大于  $2.5 \sqrt{D\delta}$  (mm)。

⑧冷却速度不得大于  $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$

局部退火的加热方法可用中频加热、火焰加热,电阻带加热等方法。电阻带加热较先进,热效率高,加热均匀精确,可实现多点温度自动控制。图 16-41 是红外加热方法在容器局部退火时的安装示意图。

### 5. 压力容器常见的热处理缺陷

(1) 去应力退火裂纹,焊后去应力退火过程中往往在焊缝热影响区接近熔合线的粗晶区产生细小断续的裂纹,通常称作去应力退火裂纹。产生这种裂纹的原因,主要是钢内存在较多的碳化物形成元素,具有较高的沉淀硬化倾向,其次是钢材在较高的奥氏体化温度下,使碳化物全部溶解于固熔体中,并且奥氏体晶粒急剧长大,为碳化物在以后的加热过程中产生晶内沉淀创造了条件,最后是焊件中存在较高的内应力。为防止去应力退火时形成裂纹,应该选用对这种裂纹不敏感的材料;采用低氢焊条焊接,高温预热后焊接,以及选用正确的去应力退火规范等都有助于避免产生这种裂纹。

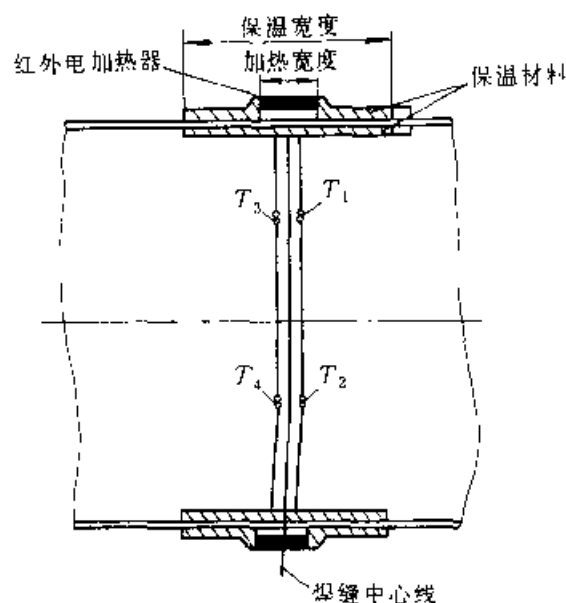


图 16-41 容器的局部去应力退火装置

( $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  为测温点)

(2) 畸变,压力容器在热处理后的畸变是由于装炉不当或淬火和正火的不正确操作引起。通过改进装炉方法,使用专用工具或设置加强肋,可减少畸变。

## 16.5.2 典型容器的热处理

### 16.5.2.1 高压上管箱的热处理

高压洗涤器是大型尿素装置的关键设备之一,高压上管箱是高压洗涤器的重要部件,其结构尺寸见图 16-42,设计压力 15.9MPa,设计温度为  $198^{\circ}\text{C}$ ,操作介质为氨基甲酸氨。

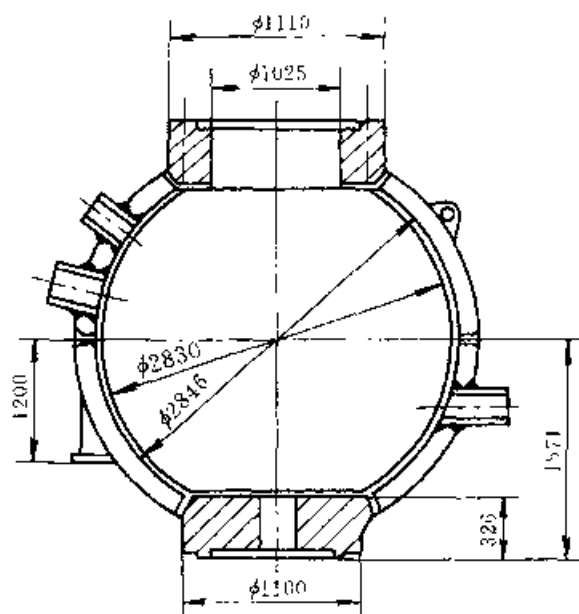


图 16-42 高压上管箱

1. 材料 各部分所用材料如表 16-36 所示。

表 16-36 高压上管箱各部分所用材料

部件名称	材 料	验收标准	硬度 (HBS)
球壳	19Mn5	DIN17135	
法兰	20MnMo	JB755 73	140~210
衬里	X2CrNiMo18 12(MoD)	DIN17410 30-A 10S-9162	120~80

2. 制造工艺路线 板材复验→下料→热压→划线→车削纵缝坡口→组焊→划线和车削顶部坡口→组焊顶部坡口→组焊顶部法兰→划线和钻孔→组焊人孔等→第一次去应力退火→车半球内面→堆焊→第二次去应力退火→堆焊→车削衬里部位及赤道环缝坡口→组焊衬里→上下半球组焊→第三次去应力退火→水压试验。

### 3. 热处理

(1) 第一次去应力退火, 半球纵缝、法兰、人孔等件组焊后, 大面积带板堆焊前应作去应力退火, 具体工艺是 300℃ 以下装炉, 以 60℃/h 的速度升温到 560℃ 时, 保温 1h, 然后以 ≤50℃/h 的速度降温到 300℃ 空冷。

(2) 第二次去应力退火, 半球经堆焊后再进行去应力退火, 其工艺是在 300℃ 以下装炉, 以 <70℃/h 的速度升温到 560℃ 后保温 30min, 然后以 40℃/h 的速度降温至 300℃, 空冷。热处理工件进行表面喷砂处理, 同时进行超声波测厚, 着色测厚检查, 并进行铁素体含量测定, 铁素体含量(体积分数)应 ≤3%。

(3) 第三次去应力退火——环缝退火, 上下半球组焊后的焊缝为最终焊缝, 需进行去应力退火。对于用 X2CrNiMo25-22-2 型耐尿素腐蚀不锈钢堆焊的面层, 其热处理最高温度为 570℃, 否则将使耐蚀性降低, 采用电加热器能够可靠地使最高温度控制在 (530±10)℃, 不会发生面层过热问题。

焊缝去应力退火用的电加热器的安装位置如图 16-43 所示。电加热器分别装置在焊缝的内外表面, 宽约 200mm。为了提高热效率和温度均匀度, 在电加热器外面装陶瓷纤维保温, 采用多点热电偶测温 and 温度自控, 可保证温度的精确控制。焊

缝去应力退火的工艺规范: 通电后以 58℃/h 的速度升温, 到 530℃ 均温 30min, 保温 1h, 然后以 62℃/h 的速度降温到 300℃ 以下空冷。

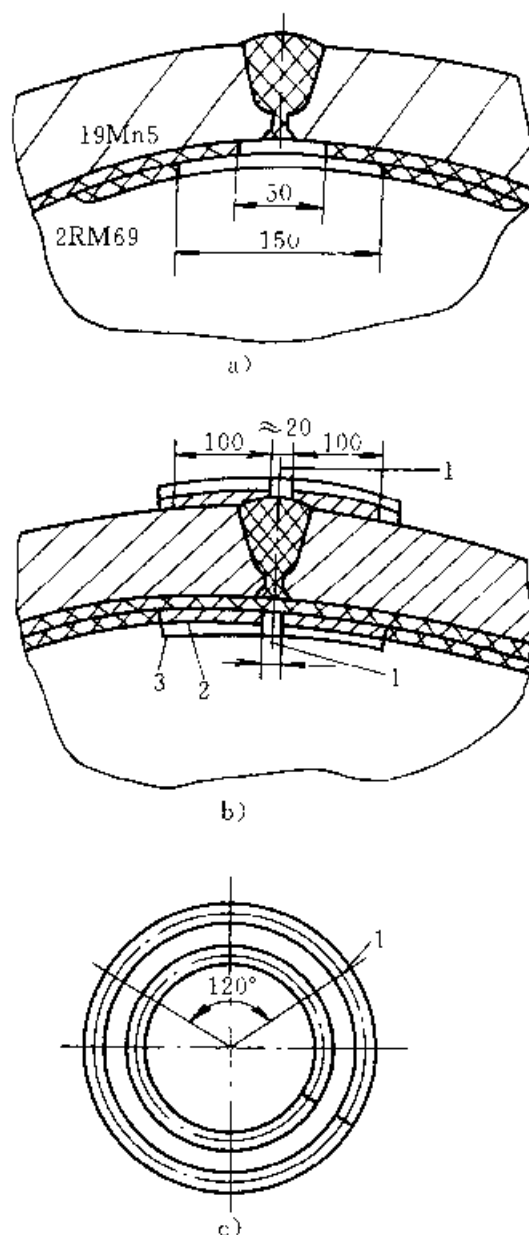


图 16-13 电加热器安装位置

a)、b) 是环缝内外安装电加热器的前后

剖面图 c) 热电偶测温点布置图

1—热电偶 2—加热器 3—保温层

### 16.5.2.2 液化气储罐

液化气储罐逐步向大型化发展。为了消除焊缝附近的脆性, 防止在使用中产生裂纹, 焊后的退火工艺由过去的在普通加热炉中进行整体退火, 发展到内部电加热和分段单独退火后再用电热对接缝单独退火, 现以 30m<sup>3</sup> 液化气储罐为例介绍如下:

(1) 材料为 16Mn 钢。

(2) 尺寸,  $\phi 2100\text{mm} \times 7000\text{mm}$ ,  $\delta$  20.18mm。

(3) 热处理方法为焊后去应力退火

(4) 内部电加热设备及控温。用12块电加热器, 每块30kW, 总功率为360kW, 分四组, 每组三块, 每组用星形接线。加热装置布置见图16-14。分区加热, 在每区设一支控制热电偶, 4个测温热电偶。热电偶用螺母固定在容器外壁

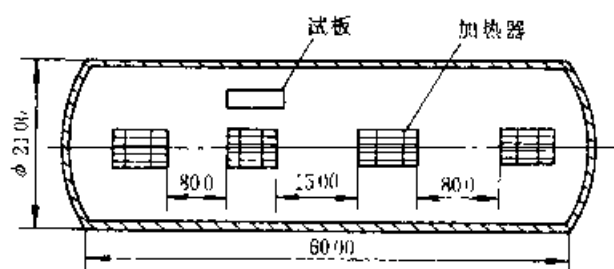


图16-14 加热器布置图

为保证热处理的效果和温度均匀度, 容器外壁可用铁丝将50mm厚的岩棉捆扎或用保温活块进行保温。

为防止加热后自重畸变和扭曲畸变, 退火地点选定后, 底部应垫平, 中间加放一鞍式支座。加热后由于产生线膨胀, 沿轴线方向伸长, 所以在端部加滚轮。

(5) 热处理工艺, 热处理工艺曲线如图16-45所示。

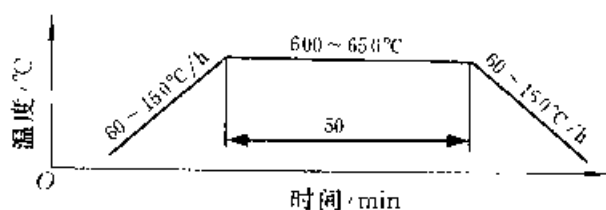


图16-45 热处理工艺曲线

要求(1) 升温 and 降温阶段沿缸长度温差不大于  $150^{\circ}\text{C}/1.5\text{m}$ 。

(2) 保温阶段沿缸体长的温差最大  $50^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 升温、降温过程在低于  $300^{\circ}\text{C}$  时, 允许以较大速度升温 and 降温

### 16.5.3 压缩机阀片的热处理

压缩机是化工机械中广泛使用的设备。阀片是压缩机的重要易损件。压缩机在压缩和输送压力较高的气体时, 阀片迅速地上下运动, 受到频繁的冲击、磨损, 传输的介质常是有腐蚀性的, 工作条件极为苛刻。阀片的失效方式有磨损、腐蚀及疲

劳等。

#### 16.5.3.1 阀片用钢及技术要求

为了提高阀片的寿命, 必须正确选择材料, 合理进行热处理。服役条件和失效分析表明, 阀片必须具有高的疲劳强度和冲击韧度, 高的耐磨性和高的抗腐蚀性。30CrMnSi 钢经淬火并中温回火, 然后再进行低温离子渗氮处理才可满足上述要求。为了保证高的疲劳强度和高的冲击韧度, 对原材料的非金属夹杂物和带状组织进行控制也是十分必要的。

对 30CrMnSi 钢制阀片的技术要求是:

1) 带状组织  $\leq 1$  级, 非金属夹杂物  $\leq 2.5$  级。

2) 淬火回火后基体硬度为  $37 \sim 42\text{HRC}$ 。

3) 低温离子渗氮后表面硬度  $\geq 55\text{HRC}$  (用超声波硬度计检查), 渗氮层深为  $0.08 \sim 0.15\text{mm}$ , 脆性检查  $< 1$  级。

#### 16.5.3.2 热处理

制造工艺路线为: 下料  $\rightarrow$  热平整  $\rightarrow$  冲中心孔  $\rightarrow$  粗车内外圆  $\rightarrow$  粗磨平面  $\rightarrow$  消除带状组织正火  $\rightarrow$  淬火  $\rightarrow$  回火  $\rightarrow$  精车内外圆  $\rightarrow$  再次磨平面  $\rightarrow$  稳定化处理  $\rightarrow$  精加工  $\rightarrow$  低温离子渗氮  $\rightarrow$  检验。

1. 消除带状组织的正火 当带状组织超过 1 级时, 需进行正火以消除带状组织, 其工艺是: 在  $920 \sim 950^{\circ}\text{C}$  的盐浴炉中加热  $15 \sim 20\text{min}$  后空冷。

2. 淬火和回火 为了细化组织, 提高阀片的使用寿命, 阀片的淬火温度较正常温度可以低一些。因阀片较薄, 为了校正畸变, 可用加压回火。具体工艺是: 在  $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$  的盐浴炉中加热、保温 (时间按  $1.2\text{min}/\text{mm}$  进行计算), 油淬; 回火前应将阀片清洗, 然后装在专用的胎具内加压调平, 并将阀片与胎具一起装入箱式电炉中在  $120 \sim 450^{\circ}\text{C}$  回火, 回火保温时间按  $1.5\text{min}/\text{mm}$  计算 (胎具厚度应计算在内), 然后空冷。

3. 稳定化处理 为了消除和均衡残留应力, 稳定尺寸, 减小渗氮后的畸变, 阀片在渗氮前须进行稳定化处理, 其工艺是: 将磨削加工过的阀片装入胎具内, 放入低于  $300^{\circ}\text{C}$  的箱式电阻炉中, 于  $400 \sim 420^{\circ}\text{C}$  保温  $4 \sim 6\text{h}$ , 然后随炉降温到  $300^{\circ}\text{C}$  以下出炉空冷。

4. 低温离子渗氮 阀片的渗氮应以不降低基体硬度为前提, 为此, 必须采用低温离子渗氮。



低温离子渗氮可在 50A 或 100A 的离子渗氮炉中进行,渗氮前应将阀片清洗脱脂,采用专用挂具将阀片按 20mm 距离隔升。真空度为 13.3Pa 时,开始通氮,并缓慢升温,当温度达 400~420°C 时,保温 4~6h,随炉降温到 150°C 出炉。

### 16.5.3.3 检查

正火后用金相法检查带状组织,淬火、回火后抽检硬度均应符合技术要求。离子渗氮时,炉内放入显微检查试块,渗氮后进行显微组织检验,层深应达到技术要求,显微组织应力  $\gamma' + \alpha$ ,脆性应小于 1 级。

## 16.5.4 低温压缩机壳体的热处理

乙烯冷冻透平压缩抗壳体在 -100~-120°C 低温下工作,受着交变负荷。其结构复杂,应力集中严重,其主要失效形式是低温低应力脆断。这种失效往往没有先兆,突然断裂,难以预防,危害性大。正确选择材料和热处理对于低温工作的压缩机壳体有着十分重要的意义。

### 16.5.4.1 材料及技术要求

为了保证机壳的安全运行,机壳材料必须具有一定的强度和高的塑性,高的低温韧性,同时还要有良好的铸造工艺性能。镍含量对低温冲击韧度和断裂韧度的影响见图 16-46,图 16-47。可以看出,  $w(\text{Ni})$  为 5% 的低碳钢可以满足低温壳体的技术要求,用 ZG10Ni5 钢较合适。

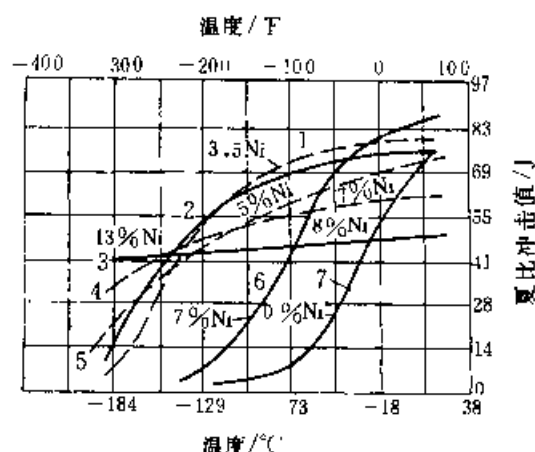


图 16-46 镍对低碳钢正火状态低温冲击值的影响

- 1— $w(\text{Ni})=3.5\%$  2— $w(\text{Ni})=5\%$   
3— $w(\text{Ni})=13\%$  4— $w(\text{Ni})=8\%$   
5— $w(\text{Ni})=7\%$  6— $w(\text{Ni})=7\%$   
7— $w(\text{Ni})=0\%$

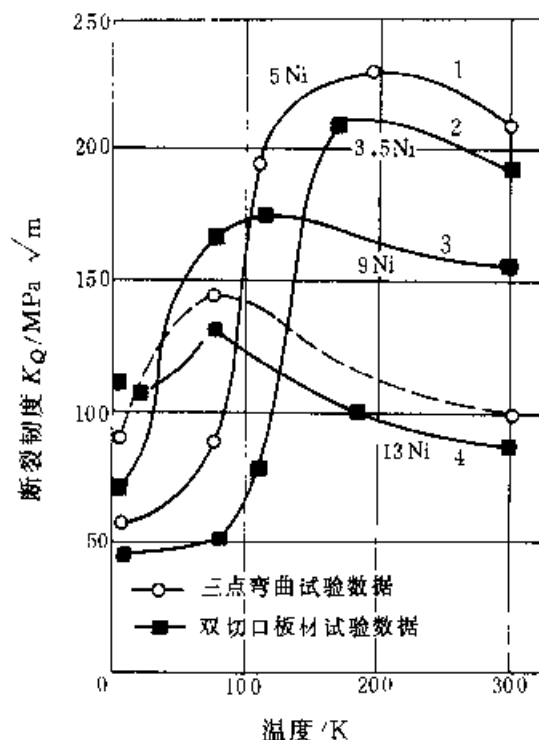


图 16-47 随镍含量的变化,铁合金的断裂韧度  $K_Q$  与温度的关系

- 1— $w(\text{Ni})=5\%$  2— $w(\text{Ni})=3.5\%$   
3— $w(\text{Ni})=9\%$  4— $w(\text{Ni})=13\%$

ZG10Ni5 钢的化学成分如表 16-37 规定。力学性能要求如表 16-38 所示。

### 16.5.4.2 热处理

制造工艺流程为:铸造→退火→粗加工→一次正火→二次正火→回火→半精加工→二次回火→精加工。

ZG10Ni5 钢机壳铸造后树枝状组织严重,组织粗大,退火后,显微组织得到细化。为了提高低温韧性,机壳还需经过两次正火与回火处理。为消除与平衡内应力,提高尺寸稳定性,精加工后需进行二次回火。

必须指出,由于机壳形状复杂,退火和正火加热时,一方面必须规定装炉温度(不得高温装炉),另一方面要控制升温速度,并在 650°C 均热 2h,具体热处理工艺规范见图 12-48。

为了进一步提高壳体材料的低温韧性,采用临界区热处理是有效的方法之一。通过临界区热处理可以细化晶粒,细化组织,减少 P、S 等有害杂质在晶界上的偏析,降低韧脆转变温度,改善低温韧性。图 16-49 是 ZG10Ni5 钢壳体的临界区热处理工艺曲线。与图 16-48 工艺不同之处是回火

之前采用了  $(750 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  的临界区正火工艺 (ZG10Ni5 钢的  $A_{c1}=630^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c2}=790^{\circ}\text{C}$ )。

机壳热处理后需进行硬度检测、拉伸试验和低温冲击试验, 其结果应符合技术要求。

表 16-37 ZG10Ni5 钢化学成分

化学成分	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
含量(质量分数)(%)	$\leq 0.12$	$0.15 \sim 0.35$	$0.30 \sim 0.60$	$4.75 \sim 5.25$	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	$\leq 0.04$

表 16-38 低温压缩机机壳用钢的力学性能

力学性能 指标	室温拉伸试验				$-102^{\circ}\text{C}$ 冲击试验			
	$\sigma_s$	$\sigma_b$	$\delta_5$	$\psi$	冲击韧度 $a_K/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$		夏氏冲击功/J	
	MPa	MPa	(%)	(%)	三个试样 平均值	单个试样 最低值	三个试样 平均值	单个试样 最低值
技术要求	$\geq 291$	$\geq 441$	$\geq 24$	$\geq 35$	$\geq 60$	$\geq 50$	$\geq 20$	$\geq 16$

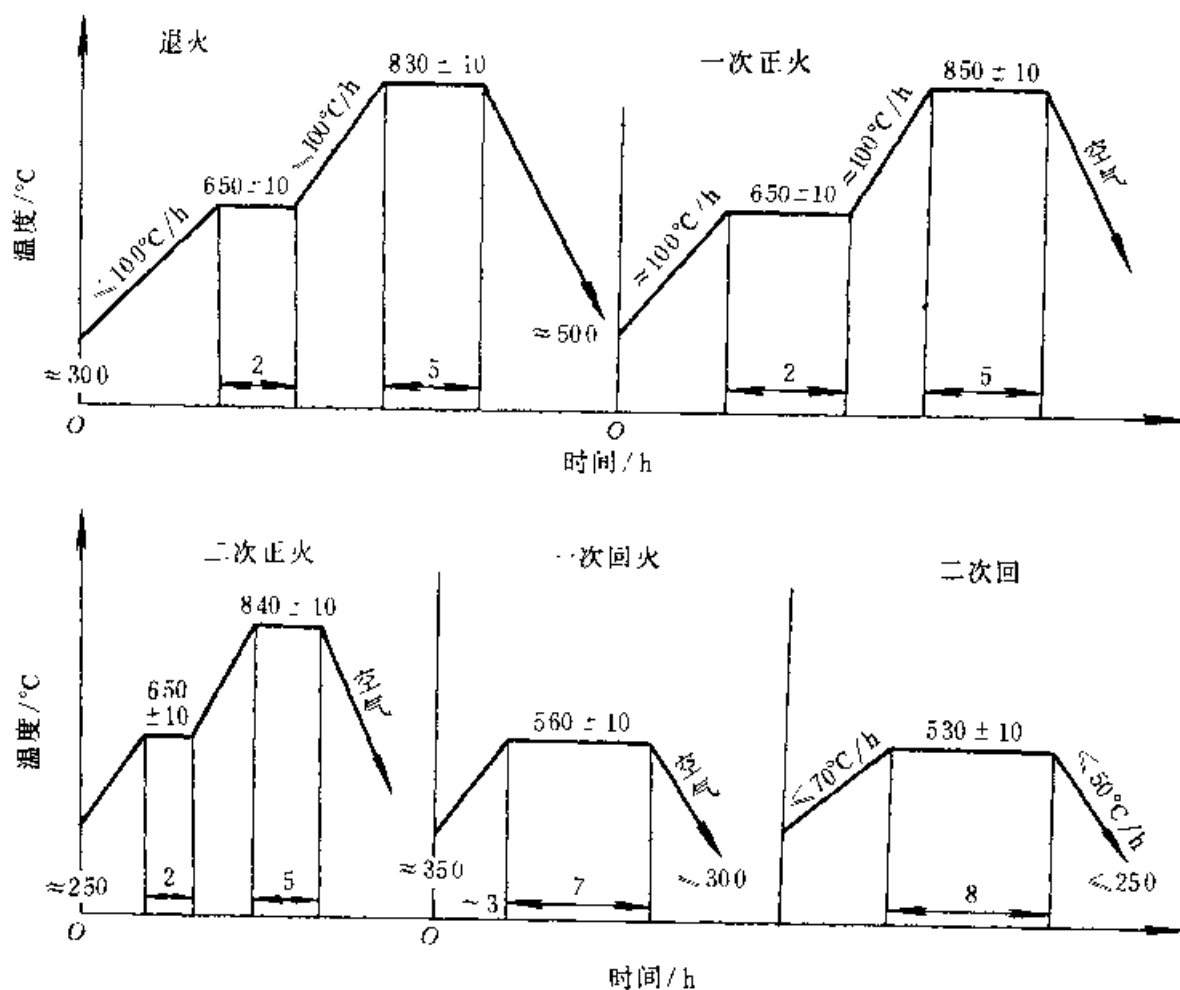


图 16-48 ZG10Ni5 钢机壳的热处理工艺曲线

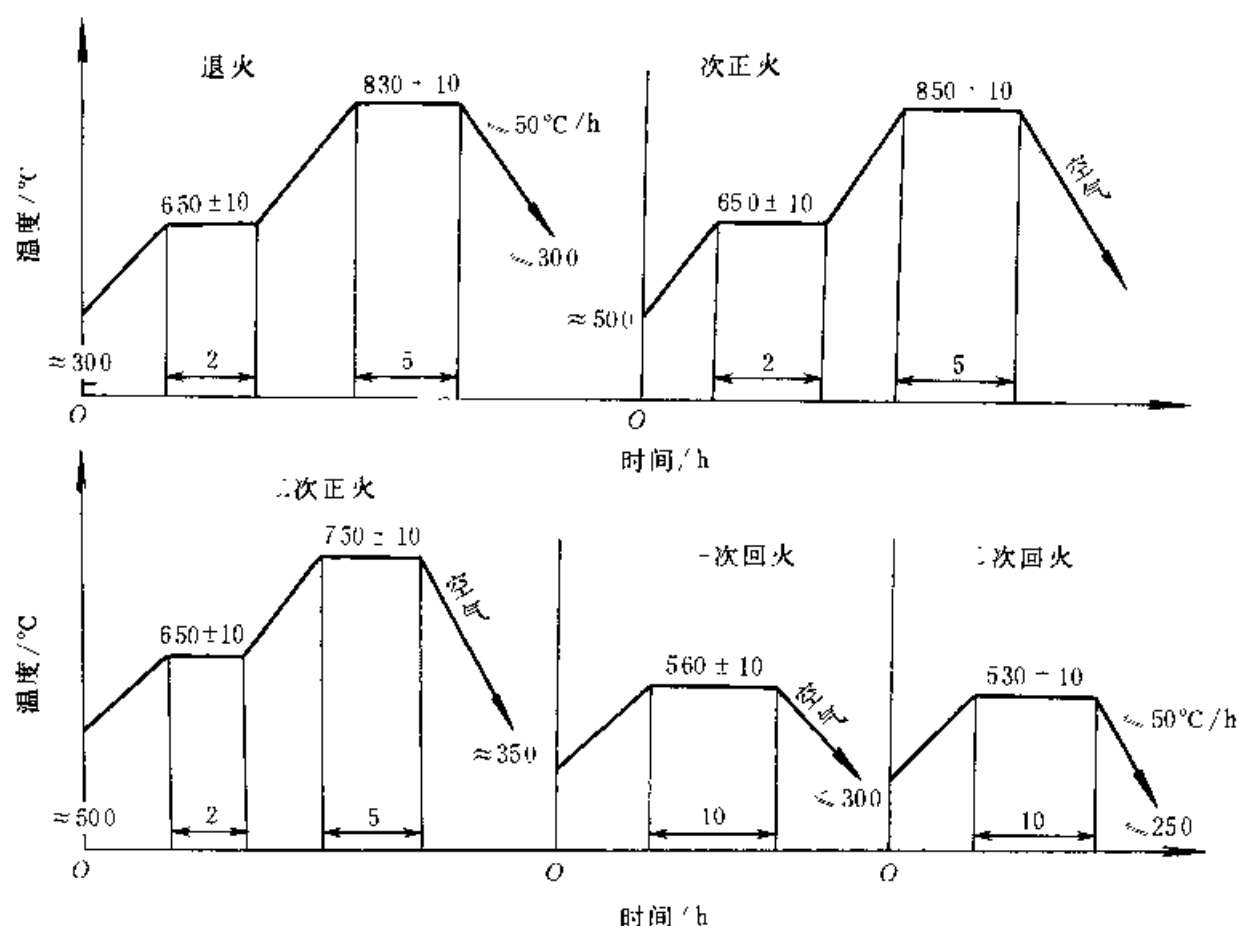


图 16-49 2G10Ni5 钢机壳临界区热处理工艺曲线

## 参 考 文 献

- 1 西安交通大学. 金属的疲劳, 1978
- 2 吴连生. 断裂失效分析. 理化检验, 1985 (3)
- 3 华东石油学院. 石油矿场机械. 北京: 石油工业出版社, 1978
- 4 石康才. 泥浆泵缸套的气体三元共渗. 石油钻采机械, 1979 (4)
- 5 宝鸡石油机械厂. 用尿素甲醇溶液碳氮共渗试验总结. 陕西机械, 1977 (4)
- 6 兰州石油机械研究所. 国外石油钻井往复泵易损件近况. 石油钻采机械通讯, 1977 (4)
- 7 张连山. 国外石油钻机刹车衬材质问题综述. 石油钻采机械, 1980 (6)
- 8 张嗣伟. 钻机绞车刹车副的研究. 石油矿场机械, 1981 (1)
- 9 郑志峰. 滚子链国外技术综述. 石油钻采机械, 1979 (2)
- 10 西安交通大学强度室. 石油钻机链条销轴机械性能试验. 石油钻采机械, 1977 (6)
- 11 李水生. 高性能钻机传动链条的试验报告. 石油矿场机械, 1985 (5)
- 12 陈质如. 国内外石油钻机链条材料及其热处理工艺对比分析. 石油钻采机械, 1980 (7)
- 13 李荫松. 链条滚子的冲击试验. 石油钻采机械, 1985 (10)
- 14 西安交大强度室. 几种国产合金结构钢的断裂韧性. 西安交通大学学报, 1974 (4)
- 15 周宗杨. 抽油杆用钢及其热处理概况和发展趋势. 石油钻采机械, 1985 (2)
- 16 石康才等. 离子渗氮在石油机械中的应用. 金属热处理, 1987 (4)
- 17 董树森. 大型尿素装置高压洗涤器的制造. 石油化工设备, 1985 (3)
- 18 森田哲夫(H). 大型圆筒形储罐焊缝分段退火的施工. 石油化工设备, 1986 (6)
- 19 刘效臣.  $30\text{m}^3$  液化气储罐整体电热退火工艺. 石油化工设备, 1986 (9)
- 20 范岳昌.  $30\text{CrMnSiA}$  阀片的低温离子渗氮. 金属热处理, 1983 (5)

- 
- 21 谭朝鑫. 5%镍钢组织、性能和热处理工艺的研究. 第二届全国热处理年会论文集
  - 22 中华人民共和国机械工业部. 压力容器用碳素钢和低合金钢锻件. 北京: 机械工业出版社, 1991
  - 23 中华人民共和国机械工业部. 低温压力容器用碳钢和低合金钢锻件. JB4727, 北京: 机械工业出版社
  - 24 中华人民共和国机械工业部. 压力容器用不锈钢锻件. JB4728. 北京: 机械工业出版社
  - 25 周上祺等. 快速深层渗氮处理工艺的设计. 第五届全国化学热处理学术交流会论文集, 1996. 10
  - 26 王秀容. 氮基气氛热处理及碳势控制. 中国石油学会石油工程学会首届热加工技术研讨会论文选集, 1991. 7
  - 27 魏庆诚等. 渗硼在石油钻头生产上的应用. 中国石油学会石油工程学会首届热加工技术研讨会论文选集. 1991. 7

## 第 17 章 液压元件的零件热处理

榆次液压件厂 纪洪年

### 17.1 概述

液压技术当前已发展成为一门较为成熟的应用技术。液压传动与机械传动和电传动相比具有输出功率大、运动平稳、易实现无级变速等优点,已日益广泛地用于冶金、机械、石油、化工、电子、轻工等各个行业的机械装备中。

液压技术的广泛应用,对液压元件的性能和质量提出了越来越高的要求。在性能上要求向高压、大流量、高转速、高容积效率等方向发展,在结构上要求微型化,在质量上则要求有高的可靠性。液压元件的零件的特点是体积小而精度要求高,在工作过程中承受复杂的服役条件。因此,在选材与热处理上应保证有高的强度,良好的韧性,高的耐磨性和尺寸稳定性。

液压元件的零件热处理工艺有如下特点:

(1) 应用预备热处理,改善材料的组织和性能,为零件最终热处理做准备。

(2) 普通应用化学热处理工艺(渗碳、渗氮、碳氮共渗和硫氮碳共渗等),提高零件的耐磨性和疲劳强度。

(3) 广泛采用马氏体分级淬火,减小零件淬火畸变。应用稳定化处理 and 冷处理,以保持零件的尺寸稳定。

(4) 应用少无氧化脱碳的热处理方法。

本章将重点介绍齿轮泵、叶片泵、柱塞泵和液压阀等液压元件中的主要零件的热处理。

### 17.2 齿轮泵零件的热处理

齿轮泵由泵体、前后泵盖及在泵体内互相啮合旋转的一对齿轮组成。结构简单、紧凑、工艺性好。在使用中对污物不敏感,工作可靠。它的主要热处理零件有齿轮、泵轴及泵体等。

#### 17.2.1 齿轮的热处理

齿轮泵齿轮在工作时,除与机械传动齿轮一

样其齿面受到脉动接触应力和摩擦力作用,齿根受到脉动弯曲应力作用外,整体还受到弯曲疲劳应力作用。为保证泵的性能和使用寿命,齿轮必须具有高的强度和高耐磨性。因此,中、高压齿轮泵齿轮多采用低碳合金钢制造,如 20CrMnTi、20CrMo 等。低压齿轮泵齿轮则用 40Cr 钢等制造。

液压泵齿轮的制造工艺路线安排多是经滚齿、剃齿后进行热处理,热处理后齿面不再进行精加工,这就要求在热处理过程中不能出现氧化、脱碳现象,因而采用炉内油淬的可控气氛炉。有时在滚齿后进行热处理,而后再进行珩齿,则允许在热处理后有微量氧化、脱碳层存在,在这种情况下,可采用井式炉进行滴注渗碳,在油淬前的转移过程中有少量氧化脱碳。

为保证齿轮端面和轴颈的垂直度,磨加工应用角度磨床,这时齿轮端面易产生磨削裂纹造成废品。对此除在磨削工艺上采取措施外,在热处理工艺上也应采取措施,即严格控制表层碳浓度( $w(C)$  0.8%~0.9%之间)和残留奥氏体量(按 JB1673 标准控制应小于 5 级)。齿轮热处理工艺见表 17-1。

#### 17.2.2 齿轮泵轴的热处理

轴是传递转矩的零件,工作中受到冲击扭转应力和液压力产生的弯曲疲劳应力作用。轴颈部分还承受磨损。因此泵轴应具有较高的强度和硬度,同时具有良好的韧性。泵轴的失效形式多为轴头键槽处局部断裂或整体扭断。

中、高压齿轮泵泵轴采用 42CrMo 或 40Cr 钢制造。当轴与齿轮做成一体时,则与齿轮材料相同(20CrMo, 20CrMnTi)。齿轮泵泵轴的热处理工艺见表 17-1。

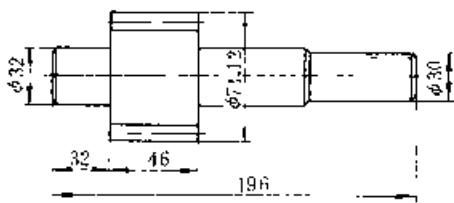
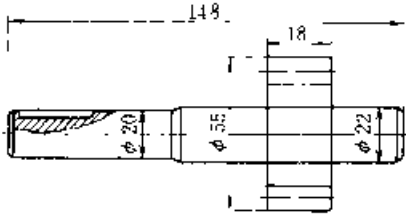
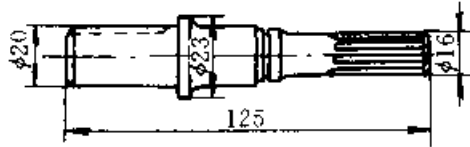
#### 17.2.3 泵体的热处理

齿轮泵泵体材料过去多为高强度灰铸铁

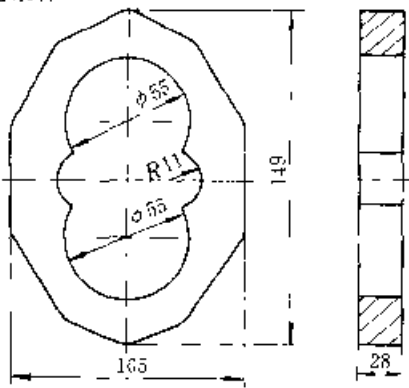
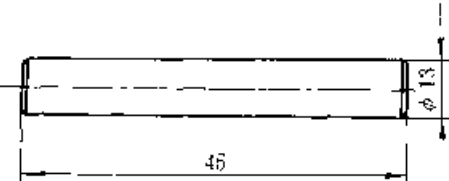
HT300 等。随着齿轮泵压力的提高, 铸铁材料已不能满足要求。特别是在液压力作用下, 齿轮被推向低压油腔一侧, 齿顶与泵体接触产生刮研, 这一现象称为“扫膛”。“扫膛”对泵的压力和容积效率

均产生不良影响。为提高泵体的强度和减少“扫膛”的影响, 泵体材料采用变形铝合金或铸铝合金, 需经固溶热处理并时效强化。齿轮泵零件的热处理工艺见表 17-1。

表 17-1 齿轮泵零件热处理工艺

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处理工艺
1	<p>CB H 齿轮泵内轮</p>  <p>材料: 20CrMnTi 技术要求: 全渗碳层深度为 0.8~1.1mm, <math>\phi 30\text{mm}</math> 处表面不渗碳 表面硬度为 58~63HRC 心部硬度为 32~45HRC 同轴度 <math>\leq 0.03\text{mm}</math></p>	<p>锻造 <math>\rightarrow</math> 正火 <math>\rightarrow</math> 机加工 I (滚、剃齿) <math>\rightarrow</math> 渗碳 <math>\rightarrow</math> 淬火 <math>\rightarrow</math> 回火 <math>\rightarrow</math> 矫直 <math>\rightarrow</math> 机加工 I</p>	<p>锻后正火: <math>(940 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 箱式炉加热, 保温 2.5h, 出炉散片空冷 渗碳, 淬火、回火: <math>\phi 30\text{mm}</math> 处表面镀铜或涂防渗剂, 采用可控气氛炉进行渗碳, 载气为吸热式气氛, 富化气为 <math>\text{C}_2\text{H}_6</math>。渗碳后直接在热油中进行马氏体分级淬火, 再进行回火, 热处理工艺曲线见图 17-1</p>
2	<p>CBF 型齿轮泵齿轮</p>  <p>材料: 20CrMnTi 技术要求: 全渗碳层深度为 0.8~1.1mm, 键槽处不渗碳 表面硬度: 58~63HRC 心部硬度: 32~45HRC 同轴度 <math>\leq 0.05\text{mm}</math></p>	<p>锻造 <math>\rightarrow</math> 正火 <math>\rightarrow</math> 机加工 (滚齿) <math>\rightarrow</math> 渗碳 <math>\rightarrow</math> 淬火 <math>\rightarrow</math> 回火 <math>\rightarrow</math> 矫直 <math>\rightarrow</math> 机加工 II (珩齿)</p>	<p>锻后正火: <math>(940 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 2.5h, 出炉空冷 (<math>156 \sim 207\text{HBS}</math>) 渗碳, 防渗准备同上, 在井式炉中滴注渗碳, 渗剂为甲醇和煤油, 降温后直接淬火。工艺曲线见图 17-2 回火: <math>(180 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 1~2h</p>
3	<p>CBM 齿轮泵轴</p>  <p>材料: 42CrMo 技术要求: 硬度 38~43HRC 同轴度 <math>\leq 0.05\text{mm}</math></p>	<p>机加工 <math>\rightarrow</math> 淬火 <math>\rightarrow</math> 回火 <math>\rightarrow</math> 机加工</p>	<p>淬火: 在吸热式可控气氛炉加热, 加热温度为 <math>(840 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 30min, 油冷 回火: <math>(480 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 1h, 用 GSO50/80 井式炉滴甲醇保护加热</p>

(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处理工艺
1	齿轮泵体  材料: ZL106 (ZL401) 技术要求: 硬度: $\geq 90\text{HBS}$	锻造 → 固溶处理 → 时效 → 机加工	固溶处理: 加热到 $(515 \pm 5)^\circ\text{C}$ , 保温 6h, 水冷, 使用 GSO50/80 井式炉加热 时效: 加热至 $(180 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 保温 8h (RJJ-24 井式炉)
5	定位销  材料: 45 钢 技术要求: $35 \sim 40\text{HRC}$	机加工 → 淬火 → 回火 → 机加工	淬火: 盐浴炉加热到 $(810 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 保温 15min, 水淬 回火: 加热到 $(410 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 保温 1h

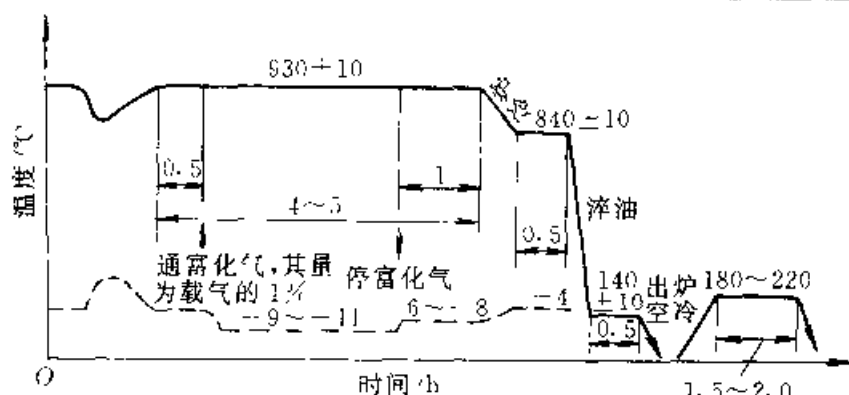


图 17-1 齿轮泵齿轮热处理工艺曲线 (虚线为炉内露点变化曲线)  
设备型号: SOH-SL-M1 可控气氛炉

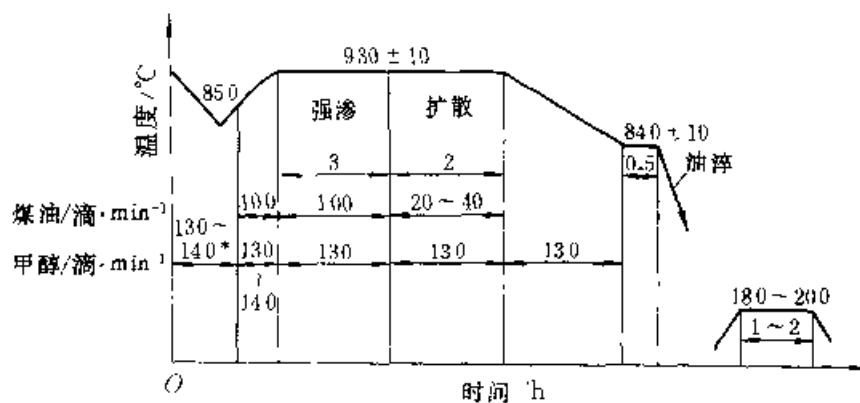


图 17-2 CBF 齿轮泵齿轮在井式炉中渗碳淬火工艺曲线  
设备型号: GSO50/80

\* 装炉排气时, 连滴甲醇 3~5min 后, 调整至 130~140 滴/min

## 17.3 叶片泵零件的热处理

叶片泵是由转子、定子、叶片和配油盘相互形成封闭容积的体积变化来实现泵的吸油和压油。叶片泵结构紧凑,零件加工精度要求高。叶片泵分为单作用式和双作用式两大类。前者又称为可调节叶片泵或变量叶片泵,后者又称为不可调节叶片泵或定量叶片泵。由于变量泵和定量泵结构形式不同,零件受力和选材也就不同。另外,结构相同,压力级别不同的泵选材也不一样。叶片泵主要热处理零件有:转子、定子、叶片、轴和配油盘等。

### 17.3.1 转子的热处理

泵在运行时,转子在轴的带动下高速旋转,这时转子与配油盘和叶片均形成摩擦副,转子端面和叶片槽面受磨损。同时高压油通过伸出槽外的叶片周期地作用于转子上,使转子槽底孔处承受很大弯曲疲劳应力。

转子需要有良好的耐磨性,否则将由于磨损而使间隙密封破坏,泵的容积效率降低,严重时,泵不能工作。转子还必须具有高的强度和韧性,以保证泵的使用寿命。

转子的失效形式主要有:

(1) 转子槽底孔处因弯曲疲劳应力作用而产生疲劳断裂,一般称为“断臂”。

(2) 转子端面或转子槽侧面产生磨损。

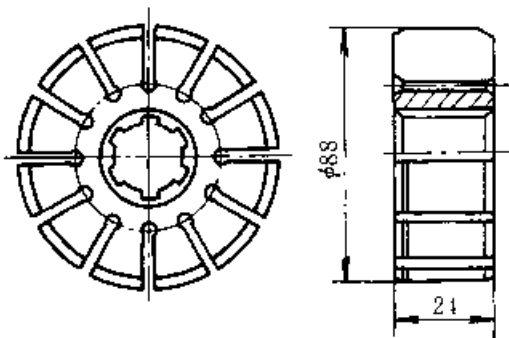
为满足转子的性能要求,中、高压叶片泵转子采用合金渗碳钢 12CrNi3、20CrMnTi、20CrMnMo 等制造。低压叶片泵转子可采用 40Cr 钢制造。转子热处理工艺见表 17-2。

### 17.3.2 定子的热处理

定子内表面呈椭圆形,长半径和短半径之间过渡曲线为一特殊曲线,曲线形式对泵的性能和寿命都有很大影响。定子和叶片组成摩擦副,当泵工作时,叶片在高压油的作用下,紧紧压在定子内表面而滑动,使定子受到磨损。定子要具备高的耐磨性和尺寸稳定性,同时还应有较高的强度。

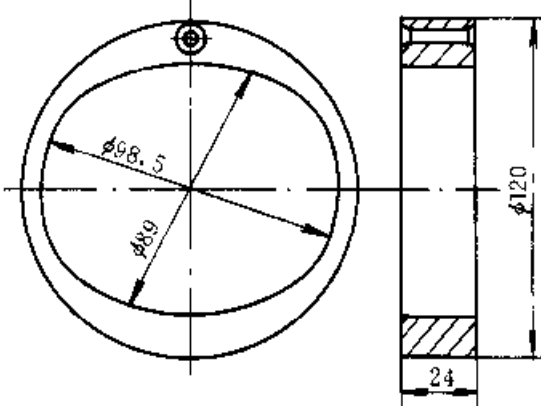
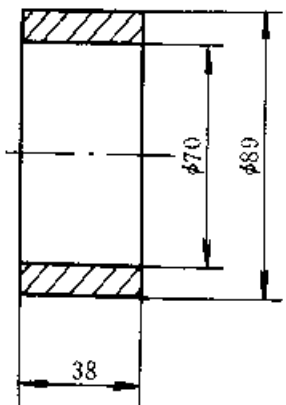
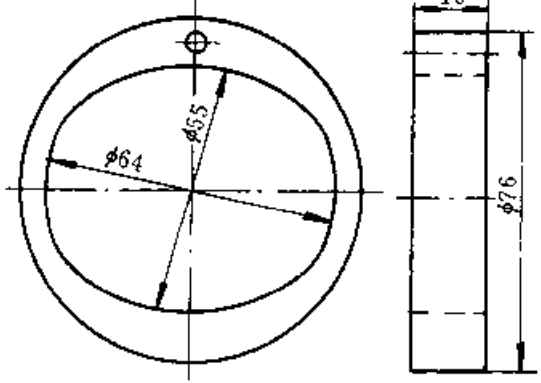
定子多为内表面过渡区受磨损而失效。对小排量定量泵定子材料一般选用轴承钢 GCr15 制造,经淬火、回火处理。大排量定量泵定子则用 Cr12MoV、38CrMoAlA 等钢制造。而变量泵定子由于受不平衡液压力作用,选用韧性较好的 3Cr2W8V 钢制造。为提高定子的耐磨性, Cr12MoV 和 3Cr2W8V 钢在淬火、回火后再进行氮碳共渗处理。定子热处理工艺见表 17-2。

表 17-2 叶片泵零件热处理工艺


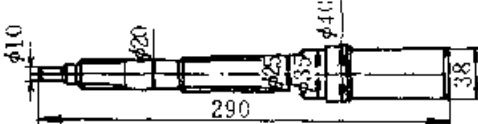
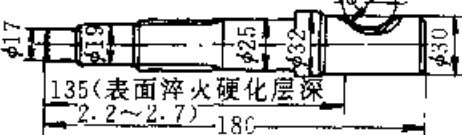
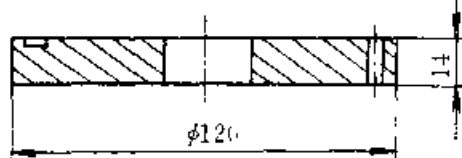
序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处理工艺
1	<p>转子</p>  <p>材料: 12CrNi3</p> <p>技术要求:</p> <p>全渗碳层深度为 1.2~1.4mm</p> <p>硬度: 58~63HRC</p>	<p>正火→机加工→</p> <p>渗碳→淬火→回火</p> <p>→机加工</p>	<p>原料正火: 在箱式电炉中加热到 <math>(920 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 4h, 出炉空冷</p> <p>渗碳、淬火: 采用可控气氛热处理炉时载气为吸热式气, 富化气为 <math>\text{C}_2\text{H}_2</math>, 工艺曲线见图 17-3</p> <p>采用井式炉滴注渗碳时, 渗剂为甲醇和煤油, 渗碳后直接淬冷, 工艺曲线见图 17-4</p> <p>回火: 加热到 <math>(180 \pm 10)^\circ\text{C}</math>, 保温 1.5h</p>



(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处理工艺
2	定子  材料: GCr15 技术要求: 硬度: 58~63HRC	锻造→球化退火 →机加工→淬火→ 回火→机加工	球化退火: 加热到 $(800 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 4h, 炉冷至 $680 \sim 700^{\circ}\text{C}$ , 保温 4~5h 后, 炉冷至 $600^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷。 组织和硬度按 JB1255-81 标准要求 淬火: 盐炉加热工件到 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 15min, 再在 $(170 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 硝盐炉中马氏体分级淬火 回火: 加热到 $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h
3	定子  材料: Cr12MoV 技术要求: 基体硬度为 48~53HRC 氮碳共渗化合物层深度为 5~10 $\mu\text{m}$ 渗层硬度为 800~900HV <sub>0.05</sub>	机加工→淬火→ 回火→机加工→氮 碳共渗→研磨	淬火: 预热 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 加热 $(1030 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ (采用 RYD 75 盐浴炉加热), 保温 15min, 在 $520 \sim 560^{\circ}\text{C}$ , 保温 10min 进行分级淬火后空冷 回火: 在 $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温 1.5h 氮碳共渗: 共渗温度为 $(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h, 出炉空冷
4	定子  材料: 38CrMoAlA 技术要求: 渗氮层深度为 0.3~0.5mm 表面硬度 $\geq 900\text{HV}_{0.2}$ 心部硬度为 250~280HBS	机加工→调质→ 机加工→离子渗氮	调质: 在箱式炉中加热到 $(940 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温 30min, 油淬, 再加热到 $(630 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火, 保温 1h 离子渗氮: 设备容量为 30A 时, 加热温度为 $(550 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 10~12h, 炉冷

(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热 处 理 工 艺
5	叶片  材料: W18Cr4V 技术要求: 硬度: >60HRC 氮碳共渗: 扩散层深 0.03~0.05mm	机加工→淬火→ 回火→机加工→氮 碳共渗→研磨	淬火: 盐炉加热, 预热至 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 转至高温盐浴加热到 $(1270 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1min, 再在 $(540 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 进行保温 1min 的分级冷却后空冷 回火: 在 $(560 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 进行三次回火, 每次保温 1h 氮碳共渗: 在 $(530 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温 20min, 空冷或油冷
6	叶片泵轴  材料: 12CrNi3 技术要求: 全渗碳层深度为 0.7~1.0mm 表面硬度为 58~63HRC 同轴度 $\leq 0.15\text{mm}$	正火→机加工→ 渗碳→淬火→回火 →矫直→机加工	正火: 加热至 $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 2h, 出炉, 空冷 渗碳: 淬火: 在井式炉中加热至 $(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 滴注甲醇和煤油渗碳, 时间为 4h, 降温至 $(800 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 0.5h, 直接淬火到油槽中 回火: 加热到 $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1h
7	叶片泵轴  材料: 45 技术要求: 调质硬度为 235~269HBS 表面淬火后硬度为 55~60HRC	调质→机加工→ 高频感应淬火→回 火→机加工	调质: 加热到 $(830 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h, 水冷, 在 $(530 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火, 保温 2h 高频感应淬火: 采用连续加热淬火, 移动速度为 6mm/s, 加热温度为 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$ , 喷水冷却 回火: 加热到 $(160 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1h
8	配油盘  材料: HT300 技术要求: 氮碳共渗的化合物层深度 $5 \sim 10\mu\text{m}$	机加工→去应力 退火→机加工→氮 碳共渗→研磨	去应力退火: 加热到 $(590 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 3h, 炉冷到 $300^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷 氮碳共渗: 在 $(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 进行氮碳共渗 3h, 空气预冷至 $350^{\circ}\text{C}$ 左右水冷

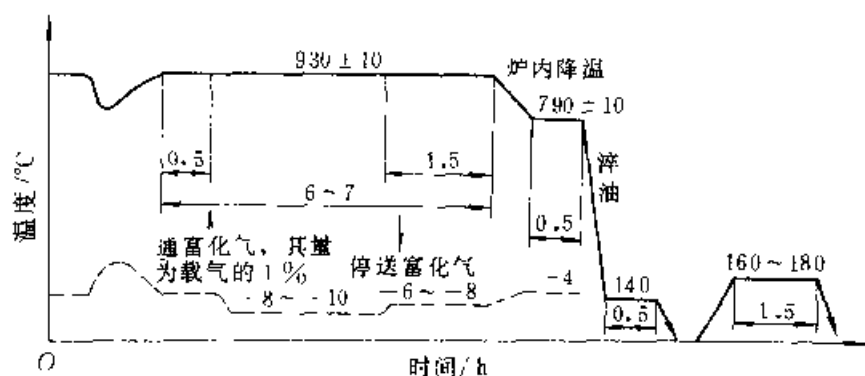


图 17-3 转子可控气氛热处理工艺曲线（虚线为炉内气氛露点变化曲线）

设备型号：SOH SL-MI 可控气氛炉

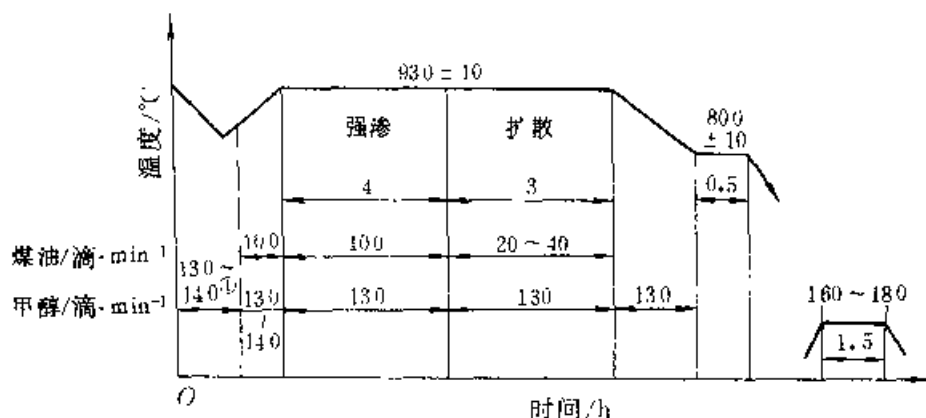


图 17-4 转子滴注式渗碳工艺曲线设备型号：GSO50/80 井式炉

①装炉排气时，先滴甲醇3~5min后调整到130~140滴/min

### 17.3.3 叶片泵轴的热处理

泵轴在工作时承受扭转和弯曲疲劳，在花键和轴颈处受磨损。因此，要求轴具有高的强度，良好的韧性及耐磨性。变量泵轴因受液压力作用，性能要求比定量泵更高一些。

叶片泵轴选用材料分两类：一类为合金渗碳钢 12CrNi3 等，另一类为中碳钢 45 或中碳合金钢 40Cr、42CrMo 等。前者经渗碳淬火处理，后者则在调质后进行高频感应淬火。

### 17.3.4 叶片的热处理

叶片泵在运行过程中，叶片在高压油的作用下，紧紧地与定子内表面接触而滑动，这时叶片顶端将产生大量摩擦热，使叶片局部温度升高。为保证叶片在高温下具有耐磨性，要求选材具有良好抗回火性。另外叶片从转子槽内伸出时，在高压油作用下承受大的弯曲应力，所以用于制造叶片材料要有高的强度。

为满足叶片使用性能的要求，均选用高速钢

W18Cr4V 来制造。为提高叶片的耐磨性，在淬火、回火后再进行氮碳共渗，叶片很薄，且加工精度要求高，为此，热处理过程中要严格控制其畸变。主要措施是铁丝捆扎、垂直吊挂加热。叶片热处理工艺见表 17-2。

### 17.3.5 配油盘的热处理

配油盘又称侧板。配油盘和转子端面、叶片端面相对滑动而产生磨损，严重时间隙密封破坏，泄漏量加大，泵的容积效率下降。因此，配油盘应具有良好的耐磨性能。

低中压泵配油盘一般采用青铜制造，而高压泵则采用 HT300 高强铸铁制造，并施以低温的化学热处理以提高其耐磨性。近年来已开始利用粉末冶金方法压制配油盘，然后进行气体氮碳共渗。配油盘的热处理工艺见表 17-2。

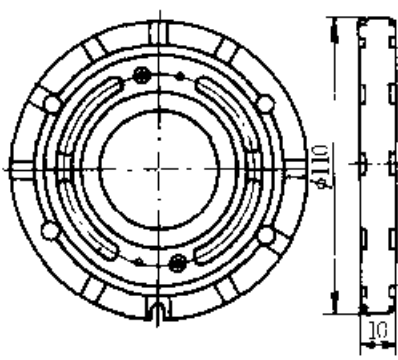
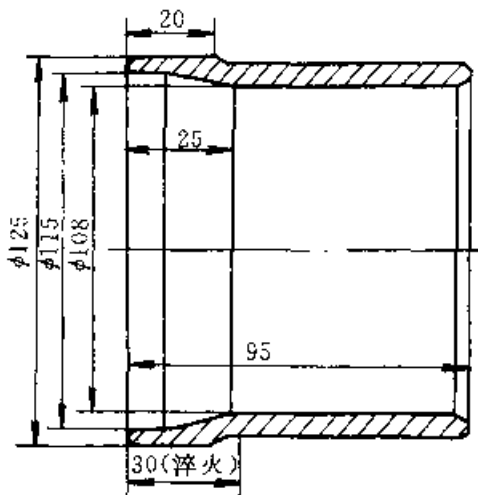
## 17.4 柱塞泵零件的热处理

柱塞泵是依靠柱塞在缸体柱塞孔中作往复运动而产生的容积变化来实现吸油和压油过程。

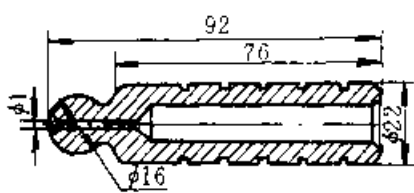
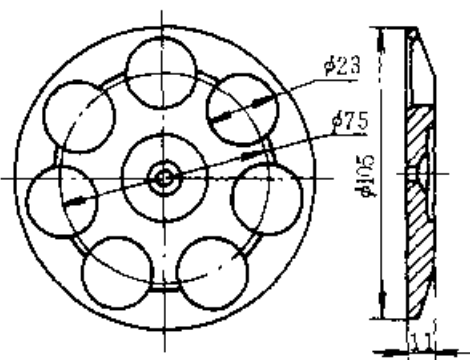
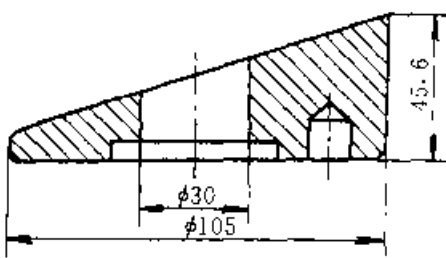
柱塞泵压力高、排量大、效率高,其结构较齿轮泵和叶片泵要复杂,零件加工精度要求高。柱塞泵的主要零件在工作时都承受压应力作用,因此其材料的选用和热处理工艺安排着重从提高耐磨性方面考虑。柱塞泵分径向和轴向两大类,规格型

号很多,现就用量较大的 CY14—1 型轴向柱塞泵零件为例介绍其热处理工艺。柱塞泵的主要零件有配油盘、缸套、柱塞、回程盘、斜盘及传动轴等,其热处理工艺见表 17-3。

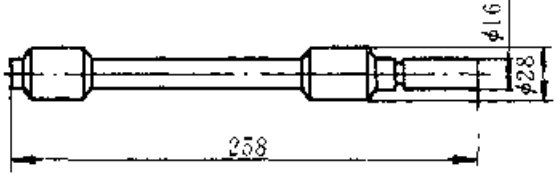
表 17-3 柱塞泵零件热处理工艺

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热 处 理 工 艺
1	<p>配油盘</p>  <p>材料: 38CrMoAlA 技术要求: 渗氮层深度 0.3~0.5mm 表面硬度: 800~1000HV 心部硬度 250~280HBS</p>	<p>调质 → 机加工 → 离子渗氮</p>	<p>调质, 箱式炉加热到 <math>(940 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 3~5h, 油淬, 再加热到 <math>(630 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 进行保温 4~5h 的回火</p> <p>离子渗氮: 工件温度约 <math>350^{\circ}\text{C}</math>, 渗氮 10~12h</p>
2	<p>缸套</p>  <p>材料: GCr15 技术要求: 局部淬火, 硬度为 60~65HRC</p>	<p>锻造 → 球化退火 → 机加工 → 淬火 → 回火</p>	<p>球化退火: 加热到 <math>(800 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 4h, 炉冷至 <math>700^{\circ}\text{C}</math>, 保温 4~5h, 炉冷至 <math>600^{\circ}\text{C}</math> 以下出炉</p> <p>淬火: 在盐浴炉中局部加热至 <math>(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 保温 10min, 油淬</p> <p>回火: 加热到 <math>(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 保温 2~3h, 空冷</p>

(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处理工艺
3	<p>杆塞</p>  <p>材料: 20CrMnTi 技术要求: 全渗碳层深度 0.8~1.2mm 硬度为 58~63HRC</p>	<p>正火→机加工→ 渗碳→淬火→回火 →机加工</p>	<p>正火: 加热到 <math>(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 1.5h, 空冷</p> <p>渗碳淬火: 在井式炉中进行滴注甲醇和煤油在 <math>(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 渗碳, 渗碳时间为 5~6h, 然后降温到 <math>(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 直接淬火</p> <p>回火: 在 <math>(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math> 进行 1h 的回火</p>
4	<p>回程盘</p>  <p>材料: GCr15 技术要求: 硬度为 60~65HRC</p>	<p>机加工→淬火→ 回火→机加工</p>	<p>淬火: 在盐浴炉中加热到 <math>(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 10min 油淬, 或在 <math>180^{\circ}\text{C}</math> 硝盐槽中进行马氏体分级淬火, 分级时间为 10min</p> <p>回火: 加热到 <math>(160 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 2h</p>
5	<p>斜盘</p>  <p>材料: 38CrMoAlA 技术要求: 渗氮层深度为 0.3~0.5mm 表层硬度为 <math>\geq 800\text{HV}</math> 心部硬度为 250~280HBS</p>	<p>调质→机加工→ 离子渗氮</p>	<p>调质: 箱式炉中加热到 <math>(940 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 3~5h, 油淬, 再进行 <math>(630 \pm 10)^{\circ}\text{C}</math>, 保温 4~5h 的回火。</p> <p>离子渗氮: <math>(550 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 10 \sim 12\text{h}</math>, 炉冷</p>

(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处 理 工 艺
6	<p>传动轴</p>  <p>材料:42CrMo 技术要求: 硬度为 251~283HBS</p>	调质→机加工	调质:加热到 $(850\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ,保温 1h,油淬,再进行 $(640\pm 10)^{\circ}\text{C}\times 1\sim 2\text{h}$ 的回火

17.5 液压阀零件的热处理

液压阀在液压传动系统中属控制元件。其作用是控制液压系统的油流方向、压力和流量,以达到系统所应有的功能。几乎所有的阀都是通过阀心在阀体中的移动来改变通流面积或通路来实现控制作用。阀的主要热处理零件有滑阀、阀座、提动阀及提动阀座等。

17.5.1 滑阀的热处理

滑阀与阀体组成摩擦副,且两者配合要求非常精确,一旦发生磨损,配合间隙加大,将造成泄漏增加,降低阀的使用性能。为此要求滑阀具有良好的耐磨性。同时也要具备一定的强度和韧性,以耐高压油的冲击。

滑阀材料可选用低合金渗碳钢 15CrMo、15Cr 等,亦可选用 45 钢。前者多用于尺寸小且压力高的阀,后者应用于大型阀。滑阀的热处理工艺

见表 17-4。

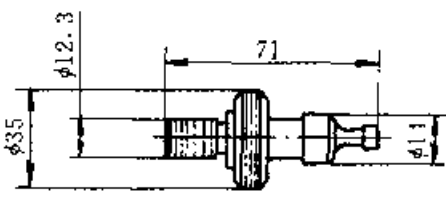
17.5.2 阀座的热处理

阀座与滑阀以锥面相互配合,工作中将产生冲击磨损。所以要求表面耐磨而心部要求良好韧性。阀座多用 15CrMo 制造,热处理工艺见表 17-4。

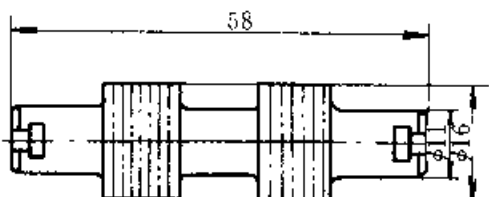
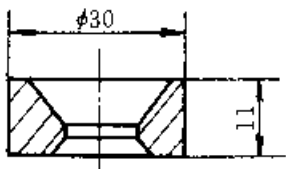
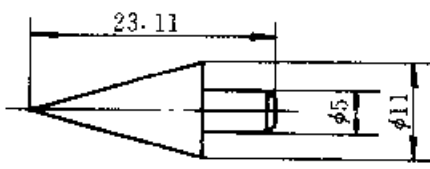
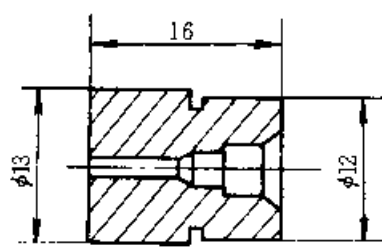
17.5.3 提动阀和提动阀座的热处理

提动阀和提动阀座组成一对偶件,相互配合面很小,近似线接触,以保证控制的灵敏和准确。在工作过程中,提动阀在弹簧的作用下与提动阀座在配合处发生冲击磨损,往往因提动阀锥面被局部磨损或冲击产生缺陷而造成高压油的泄漏,使整个阀失去控制作用。提动阀应具有高的强度和耐磨性。可选用 Cr12MoV 或 3Cr2W8V 钢制造。为提高其耐磨性,在淬火、回火后,最终进行氮碳共渗处理。

表 17-4 液压阀零件热处理工艺

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处 理 工 艺
1	<p>溢流阀滑阀</p>  <p>材料:45 技术要求: 硬度为 55~60HRC 淬硬层深度为 0.8~1.2mm</p>	锻造→正火→机加工→感应淬火→回火→机加工	<p>正火:在箱式炉中加热到<math>(850\pm 10)^{\circ}\text{C}</math>,保温 1~2h,出炉空冷</p> <p>感应淬火:加热温度为<math>880\sim 900^{\circ}\text{C}</math>喷水冷却,在<math>\phi 36\text{mm}</math>、<math>\phi 12.3\text{mm}</math>、<math>\phi 14\text{mm}</math>处分三次完成</p> <p>回火:加热到<math>(180\pm 10)^{\circ}\text{C}</math>,保温 1h</p>

(续)

序号	零件名称及技术要求	工艺流程	热处 理 工 艺
2	电磁阀滑阀  材料: 15CrMo 技术要求: 全渗碳层深度为 0.5~0.8mm 渗层硬度为 58~63HRC	正火→机加工→ 渗碳→淬火→回火 →机加工	正火: 在箱式炉中加热到 $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1h, 空冷 渗碳淬火: 在井式炉中进行 $(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 的滴注渗碳, 渗剂为甲醇和煤油, 渗碳时间为 3h, 降至 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 0.5h, 直接淬入油中 回火: 加热到 $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h
3	溢流阀阀座  材料: 15CrMo 技术要求: 全渗碳层深度为 1.2~1.5mm 渗层硬度为 58~63HRC	正火→机加工→ 渗碳→淬火→回火 →机加工	正火: 加热到 $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h, 空冷 渗碳淬火: 在井式炉中进行 $(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 的滴注渗碳, 渗剂为甲醇和煤油, 渗碳时间为 6~8h, 降温到 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 0.5h, 直接淬入油槽冷却 回火: 加热到 $(180 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h
4	提动阀  材料: Cr12MoV 或 3Cr2W8V 技术要求: 硬度为 45~50HRC 氮碳共渗: 化合层厚度为 5~10μm	机加工→淬火→ 回火→机加工→氮 碳共渗	淬火: 在盐浴炉中预热至 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 再加热到 $(1030 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 6~8min 后移入 $(540 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 硝盐浴中分级淬火, 保温 10min 后取出空冷 回火: 在 $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温 1h 氮碳共渗: 在 $(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 进行氮碳共渗 1.5~2h
5	提动阀座  材料: 42CrMo 技术要求: 调质硬度为 28~32HRC 氮碳共渗: 化合层厚度为 10~20μm	调质→机加工→ 氮碳共渗	调质: 在箱式电炉中加热到 $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5h, 油淬, 再在 $(580 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 1h 进行回火 氮碳共渗: 在 $(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 进行氮碳共渗 1.5~2h 后水冷

提动阀座在提动阀的冲击作用下,接触面将逐渐增大,使封油性能降低。因此,提动阀座应具有较高强度,在承受提动阀冲击时,不致产生大的塑性畸变。提动阀座选用42CrMo钢制造,原料调质后加工并进行氮碳共渗。提动阀和提动阀座热处理工艺见表17-4。

## 17.6 液压元件的零件热处理的质量检验

液压元件的零件热处理后的质量检验项目及  
要求见表17-5。

表 17-5 质量检验项目及要求

检验项目	退火	正火	调质	淬火回火	高频感应淬火	渗碳	渗氮	氮碳共渗
硬度	按工艺规定检查布氏硬度,检查数量为每批抽检1%~3%	一般不做硬度检查,如有特殊要求,按规定检查	按工艺规定进行检查,每批抽检3%~5%	按工艺规定进行检查,检查数量根据工艺稳定性和零件重要性而定,一般件抽检10%~20%,重要件100%,关键件不允许有软点	同淬火回火要求	渗碳后一般不做硬度检查,如渗碳后有加工工序,则抽检硬度,不得大于28HRC	按工艺规定检查维氏硬度,同时检查脆性	一般不进行硬度检查,有特殊要求时按规定进行
显微组织	轴承钢按JB1255规定检查,球状1~3级,碳化物网≤3级合格。碳素工具钢球状2~8级每炉抽检1件	结构钢正火后晶粒度≥5级,为均匀的铁素体加片状珠光体组织,每炉抽检1件	泵轴等主零件调质后应为均匀索氏体组织,不允许存在游离铁素体,每炉抽检1件,对次要件不做金相检查	轴承钢马氏体1~3级高速钢淬火后奥氏体晶粒度9~10级,回火充分程度≤2级,每批抽检2~3件	按GB5617-85标准测定硬化层深度,淬硬后马氏体3~7级,每批抽检1件	测定渗碳层深度,合金钢测全渗层,碳钢测至过渡区的1/2。直接淬冷时,按照JB1673规定检查,表面碳化物1~5级,残留奥氏体≤5级,每炉检查用材料试样1件	测定渗氮层深度,按GB/T11354-89	一般不做金相检查,只用10%氨基氯化铜溶液检查化层,即滴在零件表面2min不变色为合格。必要时,按GB/T11354
畸变	畸变量不能超过加工余量的1/3			按工艺规定进行畸变检查,检查数量为100%(经桥直零件必须进行去应力退火后再检查)				
外观	所有经过热处理件必须全部进行外观检查,不允许有开裂、烧伤、磕碰、腐蚀等缺陷							
其他	其他项目如力学性能、化学成分、物理性能等需要检查时,按规定进行。对易产生淬火开裂件100%进行无损探伤检查							

## 参 考 文 献

- 1 安运铮主编. 热处理工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 2 金属机械性能编写组编. 金属机械性能. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 3 陈愈等编. 液压阀. 北京: 中国铁道出版社, 1983



# 第 18 章 手表、自行车、缝纫机 和纺织机械零件的热处理

上海轻工热处理厂 钱中南

上海飞人有限公司 沈长安

手表、自行车、缝纫机这些轻工产品都直接为个人生活服务,生产批量很大,要求质优价廉而且耐用。手表零件主要要求走时准确和长期使用稳定,它必须具有很高的精度与耐磨性。自行车零件在结构上比较简单,但有一定的工作载荷,为了保证较长的使用寿命,要求零件具有高的强度和好的耐磨性。缝纫机零件形状比较复杂,但工作载荷不大,而运转速度甚高,尤其是工业缝纫机。因此应具有良好的稳定性与尽量低的噪声,既要耐磨,还应有高精度。纺织机械零件在高速运转中使用,要求质量可靠、稳定,有些零件既要不损伤纤维,又要有耐磨损、耐疲劳和耐大气腐蚀等性能。

## 18.1 手表零件的热处理

手表系计时机械,要求走时准确,稳定性高,外壳美观和良好的抗腐蚀性。对机心零件的主要要求是精度和寿命。

机械式手表主要由传动零件与少量弹性元件构成。其失效形式为传动磨损以致失去必要的精度、脆断和弹性元件的弹性松弛或疲劳断裂。

### 18.1.1 手表零件用材与热处理工艺

手表零件加工余量小,常以微米计,热处理后硬度允差范围小,一般仅为 $\pm 30\text{HV}$ ;表面质量

要求很高,必需保持光亮,不允许有氧化与脱碳,故常采用钟表专用材料。热处理加热时,零件应置于保护气氛或少无氧化、无脱碳的介质中进行。特别要注意减少热处理畸变,因为零件极为细小、产量大,一旦畸变超差,就很难矫正。

常用的手表零件专用钢材料牌号及化学成分列于表 18-1。

手表零件中的弹性零件是一种特殊要求的零件,按其服役要求,分别采用冷拔弹簧钢丝、硅锰钢、不锈钢弹簧钢及不随温度变化的恒弹性材料等。其他零件的常用材料的类型、牌号及用途示于表 18-2。

由于手表零件材料大多数采用高碳钢,因而热处理工艺通常为退火、淬火、回火及化学热处理,以达到表面强化的目的。由于零件表面质量的特殊要求,故选择的淬火冷却介质与通常机械零件所用的不同。

统一机心手表、秒表的淬火回火工艺示于表 18-3;零件常用淬火冷却介质及其性能参见表 18-4。

为满足手表零件机加工工艺的需要(多数零件要经冲压成形),故在工艺过程中常要进行去应力退火、低温退火及低温回火等工艺,其工艺规范见表 18-5。

表 18-1 手表零件常用钢材牌号及化学成分

(%)

钢 号	(质 量 分 类)						备 注
	C	Si	Mn	P	S	Pb	
Y100Pb	0.95~1.05	$\leq 0.30$	0.35~0.55	$\leq 0.030$	0.04~0.06	0.15~0.30	国产易切削高碳钢

( ) 本章由侯心月提供第一节稿件;杨郁澄、施省时、王同梁提供第二节稿件;李寿松、沈长安提供第三节稿件;王素葆、谢维之提供第四节稿件。

(续)

钢 号	(质 量 分 类)						备 注
	C	Si	Mn	P	S	Pb	
200AP	0.95~1.05	0.10~0.30	0.35~0.55	≤0.030	0.04~0.06	0.15~0.25	瑞士 Sandvik 钢厂生产的易切削高碳钢
15P	0.72~0.78	0.15~0.30	0.30~0.50	≤0.020	≤0.015	0.17~0.25	Sandvik 易切削带钢
ASK 1100	0.90~1.00	≤0.35	≤0.85	≤0.03	0.03~0.09	0.15~0.35	日本易切削高碳钢
2R15	≤0.020	0.35	1.8	Cr20	Ni25	Mo4.5	Cu1.5
15R10	0.08	0.6	1.2	Cr18	Ni9		
11R50	0.09	1.2	1.3	Cr17	Ni8	Mo0.7	
ASSAB300	0.75~1.00	0.10~0.35	0.3~0.6	≤0.03	≤0.05		
Diaflex			1.0	Cr15	Ni20	Mo1	Co: 10 W: 1 Ti: 1 Fe 余
40KHXM	0.07~0.12	≤0.5	1.8~2.2	Cr19~20	Ni: 15~17	Mo6.4~7.4	Co: 30~41 Fe 余

表 18-2 手表零件常用材料的类型、牌号及用途

材料种类	牌 号	制造的零件名称
高碳易切削钢棒	Y100Pb	条轴, 中心齿轴、过齿轴、秒齿轴、擒纵内轴、叉轴、摆轴、柄轴、拉挡轴、立轮、离合轮、拨针轮、跨齿轴、分轮、各种螺钉
	20AP	
	ASK—1100	
高碳(或易切削)钢带	T10A	擒纵轮片、快慢针、活动外租环、大钢轮、小钢轮、拉挡、离合杆、压簧、棘爪、跨轮爪片
	15P	
不锈钢	19-9Mo	发条、发条外钩
	0Cr18Ni9, 1Cr18Ni9	表壳、柄帽
	1Cr18Ni9Ti	后盖、衬环
	0Cr18Ni9(+S+Mo+Cu)	表壳
	2R15, 15R10, 11R50	离合杆簧、棘爪簧、表带簧
琴钢丝	ASSAB300	离合杆簧、棘爪簧、表带簧
恒弹性合金	Ni42CrTi	游丝
高弹性合金	Diaflex, 40KHXM	发条
铅黄铜	HPh63—3 HPh60—2	夹板、条盒轮、擒纵叉、双圆盘、中心轮片、过轮片、秒轮片、时轮及位钉等
	HPb59—1	
锌白铜	BZn15—21—1-8,	摆轮
	BZn14-21—1—0.4	
铍青铜	QBe2, QBe 2.5	摆轮

表 18-3 统机手表的钢制零件淬、回火工艺

零件名称	材料	硬度要求 (HV)	淬火温度 /°C	回火温度 /°C
摆轴	20AP	770±30	770~780	200~210
条轴、大钢轮、小钢轮	20AP、T10A	680±30	800~820	250~260
	15P			230~240
叉轴、棘爪、拉挡钉	20AP、T10A ASSAB300	680±30	780~800	250~260
中心齿轴、过齿轴、秒齿轴、擒纵齿轴立轮、离合轮、拨针轮、跨齿轴、小钢轮衬套、拉挡轴、日历定位杆钉	20AP Y100Pb	630±30	780~800	290~310
擒纵轮片、快慢针、活动外桩环、跨轮压片、拉挡、离合杆、压簧、日历定位杆	20AP 钢带	630±30	770~780	290~300
	15P T10A		780~800	250~260
柄轴、分轮、叉夹板螺钉、棘爪螺钉、外桩螺钉、表盘螺钉、跨轮压片螺钉	20AP Y100Pb	530±30	780~800	350~360
夹板压簧螺钉、小钢轮螺钉、大钢轮螺钉、同机螺钉	50	500±30	800~820	350~360
	20AP、Y100Pb		780~800	390~400

注：1. 工艺温度必须按零件材料成分偏差及形状复杂程度、尺寸大小等因素综合考虑，以确定选择上限或下限。

2. 工艺时间应按设备、装置等因素确定。在装量为 20~80g 的管状保护气氛炉中淬火加热的时间一般不超过 15min。

3. 250°C 以下回火通常可采用油浴，250°C 以上回火必须采用保护气氛光亮回火炉或真空回火炉。

表 18-4 手表零件常用的淬火介质

名称	使用温度 /°C	性能
工业白蜡(又称石蜡)	80~120 最高 150~160	石蜡加热到 80~120°C 时熔融成为液态，冷却能力较矿物油大，零件淬火后表面光亮度较其他油高。提高加热温度，可用作分级或等温淬火，减小零件的畸变，缺点是需增加一道脱蜡清洗工序。当使用温度在 110°C 以上时，挥发较甚，污染室内空气。
医用凡士林	150~160	无色透明，加热至 150~160°C 时，具有高的流动性，冷却能力大于一般矿物油，零件表面光亮度好，用于分级或等温淬火的冷却介质，减小热处理畸变。缺点是清洗比矿物油麻烦，须先用热油清洗，然后再用汽油清洗。
电容器油	常用 30~50 一般 70~80 最高 150~160	冷却性能与一般矿物油相同，耐温较高，回火时表面光亮度比一般矿物油高。提高加热温度可作分级或等温淬火的淬火介质。缺点是低温时粘度较大，吸水性较差。
26~30 号汽轮机油+1%菜籽油	常温	零件表面光亮度较好，吸水性比电容器油好，缺点是应用了部分食用油。

表 18-5 手表零件的低温回火,去应力退火与低温退火工艺

工艺名称	加热温度 °C	保温时间 min	适用零件	处理方法
低温回火	160~180	30~60	擒纵轮片,分轮、齿轮类压簧等	油浴
	200~220	60		
去应力退火	250~260	30	各种琴钢丝制弹簧	油浴或保护气氛光亮回火炉
	290~300	60	擒纵轮部件,分轮,化学镀镍零件,过盈配合组件的镀前处理	保护气氛光亮回火炉
低温退火	600~700	60~180	拉挡挤钉坯料,冷墩螺丝、搓丝、轧牙螺钉坯料,以及其他冷轧材料、改善机加工工艺性能的零件	马弗电炉(固体保护剂保护,保护气氛光亮退火炉、真空退火炉)

## 18.1.2 手表零件的典型热处理工艺

### 18.1.2.1 摆轴

手表零件中,轴类占有很大比重,其中以摆轴的尺寸最为细小,工作条件最苛刻。轴榫与宝石轴承相接触,每小时摆动达 18000~36000 次,常因轴榫的磨损和受冲击使轴尖弯曲或折断而失效。因此,摆轴须具有高硬度 ( $(770 \pm 30) \text{HV}$ )、强度、刚度及适当的冲击韧性。摆轴选用 Y100Pb 或 20AP 易切削高碳钢制造,并经淬火、回火处理,以满足所需的力学性能。

1. 摆轴的制造工艺 自动车加工 → 检验 → 淬火 → 回火 → 定长度 → 消除毛刺 → 磨轴榫 → 清除毛刺 → 擦光 → 化学镀镍。

2. 摆轴的热处理工艺 为防止畸变,摆轴及其他轴类均采用马氏体分级淬火。加热设备为 T 形管状保护气氛加热炉,装量为 20~80g。淬火剂为石蜡,淬后零件需经热油仔细清洗,否则回火油冷时会被蜡化。经热处理后,摆轴的硬度应为  $(770 \pm 30) \text{HV}$  (相当于 59~61HRC)。摆轴的热处理工艺曲线如图 18-1 所示。

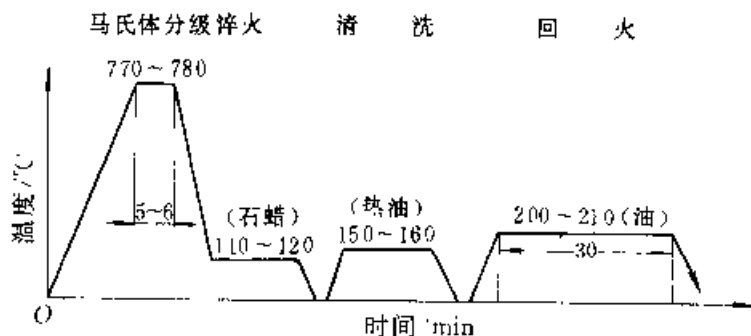


图 18-1 摆轴热处理工艺

### 18.1.2.2 擒纵轮片

擒纵机构的作用在于保证手表准确地计量时间。擒纵轮传递的力矩虽不大(约  $0.2 \text{g} \cdot \text{mm}$ ),但服役条件苛刻(即单向运动、冲击方式、与叉瓦接触面积小),对运动的灵敏度和准确性要求很严,所以它必须具有一定的硬度、耐磨性、冲击韧度和高精度。选用的材料 T10A 和 15P。技术要求:硬度为  $(630 \pm 30) \text{HV}$ 、热处理后畸变极微、表面无氧化脱碳。

#### 1. 制造工艺路线

落料 → 滚齿 → 冲中心孔 → 中心孔倒角 → 淬火 → 第一次回火 → 串光 → 滚抛 → 第二次回火 → 电镀 → 铆合。

#### 2. 热处理工艺

(1) 淬火:在  $770 \sim 780^\circ\text{C}$  通入甲醇裂化气或净化城市煤气的保护气氛炉内加热,然后在  $110 \sim 120^\circ\text{C}$  石蜡中进行马氏体分级淬火。

(2) 第一次回火:T10A 在  $180^\circ\text{C}$  油浴中回火 30min; 15P 在  $160^\circ\text{C}$  油浴中回火 30min。回火目的是降低淬火脆性,以利于下一道滚抛工序,同时又不使淬火硬度下降过多(回火后硬度约为  $770 \sim 780 \text{HV}$ )。

(3) 第二次回火:T10A 在  $300 \sim 310^\circ\text{C}$  的通入甲醇裂化气或净化城市煤气的回火炉中保温 1h 后空冷; 15P 在  $250 \sim 260^\circ\text{C}$  的同样炉内回火 1h 后空冷。

### 18.1.2.3 拉挡

拉挡是手表上发条与拨针系统中的主要零件之一,应具有较高强度、硬度和一定的韧性。设计要求硬度为  $(630 \pm 30) \text{HV}$  (或  $(530 \pm 30) \text{HV}$ )。

表 18-6 拉挡材料、制造工艺路线及热处理工艺

序号	材料及技术要求	制造工艺路线	热处理工艺
1	T10A 硬度要求: $(630 \pm 30)$ HV	坯料 → 串光 → 挤钉 → 再结晶退火 → 落料 → 攻螺纹 → 淬火 → 回火 → 镶钉 → 抛光 → 电镀	再结晶退火: 加热温度: $680 \sim 700^{\circ}\text{C}$ (在通入甲醇裂化气或净化城市煤气炉中) 保温时间: $1.5 \sim 2\text{h}$ , 炉冷至 $500^{\circ}\text{C}$ 以下空冷 光亮淬火: 加热温度: $780 \sim 800^{\circ}\text{C}$ (在通入甲醇裂化气或净化城市煤气炉中) 冷却: 油淬 回火: $290 \sim 310^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ (保护气氛炉)
2	08F、10F (渗碳) 硬度要求: $(630 \pm 30)$ HV 渗碳层深: $0.12 \sim 0.15\text{mm}$	挤二钉 → 落料 → 机加工 → 渗碳 → 淬火、回火 → 滚抛 → 电镀	1) 固体渗碳: $900 \sim 930^{\circ}\text{C}$ 渗碳 $1 \sim 1.5\text{h}$ , 出炉空冷 淬火: $780 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $300 \sim 310^{\circ}\text{C} \times 45\text{min}$ 2) 气体渗碳: 渗碳剂: $85\% \sim 90\%$ 甲醇 + $10\% \sim 15\%$ 丙酮, 在 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 裂解; 渗碳温度: $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$ , 渗碳时间: $40 \sim 45\text{min}$ 直接油淬; $300 \sim 310^{\circ}\text{C} \times 15\text{min}$ 回火
3	08F、10F (淬、回火) 硬度要求: $(530 \pm 30)$ HV	挤二钉 → 落料 → 机加工 → 淬、回火 → 滚抛 → 电镀	在碳氮共渗气氛 (乙醇 + 二乙醇胺 $(1:1)$ , $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ (裂解)) 中进行 $980 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 加热, 保温 $5\text{min}$ , 水淬; 回火: $200^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$

拉挡材料一般用 T10A 淬火回火或 08F、10F 钢渗碳淬火来达到技术要求。在实际生产中对 08F 和 10F 钢也采用表 18-6 中的工艺 3。不同材料制的拉挡的工艺流程及热处理工艺见表 18-6。

#### 18.1.2.4 拉挡钉 (拉挡镶钉)

材料为 ASSAB300; 硬度要求为  $(680 \pm 30)$  HV。

##### 1. 制造工艺路线

剪断 → 高温回火 → 冲钉 → 热处理 → 滚抛 → 镶钉。

##### 2. 热处理工艺

(1) 高温回火:  $560 \sim 570^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 1.5\text{h}$  (用铸铁粉装箱保护), 空冷。硬度达到  $(340 \pm 30)$  HV。

(2) 淬、回火: 在保护气氛炉中加热到  $780 \sim 800^{\circ}\text{C}$ , 油淬, 回火温度为  $250 \sim 260^{\circ}\text{C}$ 。硬度达到  $(680 \pm 30)$  HV。

#### 18.1.2.5 螺钉

螺钉材料为 50 钢; 硬度要求为  $(530 \pm 30)$  HV。

##### 1. 制造工艺路线

冷镦 → 再结晶退火 → 搓丝 → 铣槽 → 淬火 → 串光 → 回火 → 电镀。

#### 2. 热处理工艺

(1) 再结晶退火: 退火温度为  $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$ , 保温  $1 \sim 2\text{h}$  (保护气氛炉), 空冷, 硬度  $\leq 180\text{HV}$ 。

(2) 淬火: 在保护气氛中加热到  $820 \sim 840^{\circ}\text{C}$ , 保温后油淬; 串光后在  $300 \sim 320^{\circ}\text{C}$  炉中加热回火。

#### 18.1.2.6 发条

发条是机械式手表的动力源, 正常使用时每 24h 上条一次。其储能、释放, 反复数千次或更多, 承受反复变动应力的使用, 最后导致发条产生疲劳断裂。故要求发条材料本身具有高的弹性极限、弹性模量和弹性储能。经合适的热处理后, 获得较高的疲劳极限, 使发条在工作状态下保有低的力矩落差、力矩变动率和力矩疲劳衰减率, 以保证使用期内发条的稳定性和走时精确性。同时由于表面质量对疲劳强度有极大的影响, 任何微小的缺口、划痕、表面粗糙和氧化脱碳等都会降低疲劳寿命。因此, 对发条的加工及材料热处理都有很高的要求。此外, 要求发条具有耐腐蚀和无磁性等性能也是很重要的。各国手表发条材料主要有镍铬不锈钢、钴基高弹性合金钢及镍基高弹性极限合金钢等三种类型。我国统机手表发条材料采用

2Cr19Ni9Mo 镍铬不锈钢。

#### 1. 2Cr19Ni9Mo 钢发条的制造工艺

熔炼浇铸→锻、轧→粗拉及退火→固溶热处理→酸洗→机加工(精拉、冷轧)→时效(定形)→电解清洗→上架→涂型烧结→测力矩→盘条→包装。

为了保证发条材料的内部质量,应在真空中频感应电炉中熔炼,真空度不小于  $6.67 \times 10^{-2}$  Pa,并进行真空浇铸。

通过锻造,打碎铸锭的柱状结晶和细化晶粒。最后锻成  $25\text{mm} \times 25\text{mm}$  方坯。始锻温度为  $1180^\circ\text{C}$ ,终锻温度应高于  $850^\circ\text{C}$ 。

热轧加热温度为  $1150 \sim 1170^\circ\text{C}$ ,终轧温度不低于  $950^\circ\text{C}$ ,最后轧成  $\phi 8\text{mm}$  盘条。

2. 热处理工艺 盘条需经退火处理以消除应力,提高塑性,准备粗拉丝。每次拉丝后,都应作同样的退火处理,并应在具有保护气氛的炉内进行。退火工艺与下一道固溶热处理采用同样参数,即  $(1170 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,保温 15min 后水冷。

固溶热处理后,为取得强化并获得应有的弹性,材料再继续细拉、精拉到  $\phi 0.55\text{mm}$  细丝,再经数道冷轧,达到尺寸后进行刮边、冲头和冲孔。

发条的时效处理:温度为  $510 \sim 530^\circ\text{C}$ ,保温 1~2h,在真空炉中处理,真空度为  $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。

时效的目的有二:

(1) 从过饱和固溶体中析出细小均匀分布的强化相,使材料的性能达到  $\sigma_s = 2100 \sim 2300\text{MPa}$ ,硬度达到 500HV。

(2) 使发条的形状稳定。

#### 18.1.2.7 游丝

游丝是一种阿基米德螺旋线形小弹簧,是手表调速机构的重要元件,对手表走时精确有着决定性的影响。当游丝的宽度、厚度与摆轮转动惯量一定时,振动的周期就只受材料的弹性模量与游丝长度的影响。因此,游丝的材料应具备的最主要性能就是较高的弹性模量、较低的弹性模量温度系数、尽量小的线胀系数、较高的弹性极限和疲劳寿命。其次,制造过程中的冷热加工质量也是很重要的一个环节。

国内统机手表游丝材料选用镍基恒弹性合金 Ni42CrTi。由于游丝的截面尺寸很小,仅为  $0.038 \sim 0.040\text{mm} \times 0.145 \sim 0.16\text{mm}$ ,形状复杂而精度要

求又很高,故其制造过程十分复杂。

#### 1. 制造工艺路线

冶炼浇铸→锻造→冷轧、再结晶退火→粗拉、再结晶退火→中拉、再结晶退火→固溶热处理→酸洗→细拉丝、轧丝→时效(定形)→手工加工到成品→包装。

冶炼浇铸应在  $6.67 \times 10^{-2}\text{Pa}$  压力的中频感应真空电炉中进行。

#### 2. 热处理工艺 各种热处理工艺见表 18-7。

表 18-7 游丝加工时各热处理工序的工艺规范

工序名称	工序目的	工艺规范
锻造 加热	铸锭及锻坯的 开锻加热	预热: $(800 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温 30min 加热: $(1120 \pm 20)^\circ\text{C} \times$ 1h(始锻) 终锻温度 $> 850^\circ\text{C}$
冷轧 后再结 晶退火 处理	消除应力、软化	加热: 在 100% BaCl <sub>2</sub> 盐 浴中加热到 $(1060 \pm 20)^\circ\text{C}$ 保温 30min 冷却: 水冷
粗拉 后再结 晶退火 处理	消除应力、软化	每拉一道,处理一次 $(1060 \pm 20)^\circ\text{C}$ 保温 30min, 水冷, $(\phi 7.5 \sim$ $\phi 4.5\text{mm}) (1020 \pm 20)^\circ\text{C}$ 保温 30min, 水冷, $(\phi 7.5 \sim$ $\phi 3.0\text{mm})$
中拉 后再结 晶退火 处理	消除应力、软化	每拉一道,处理一次 $980 \pm 20^\circ\text{C}$ 保温 30min, 水冷
固溶 热处理	获得过饱和固 溶体,以便 1) 细拉丝 2) 时效处理	$(1050 \pm 5)^\circ\text{C}$ 保温 20min, 水冷
时效 (定形)	1) 析出沉淀硬 化相,强化材料满 足高弹性要求 2) 固定盘丝的 形状	加热温度: $750^\circ\text{C}$ 真空度: $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 保温时间: 15min 冷却方式: 风冷(或随炉 冷至 $100^\circ\text{C}$ 以下出炉)

注: 1. 粗、中拉再结晶退火及固溶热处理均在 100% BaCl<sub>2</sub> 盐浴中加热。

2.  $750^\circ\text{C}$  加热已属过时效状态,这是由于时效处理后“手工加工”工艺的需要。

## 18.1.2.8 铜和铜合金制手表零件的热处理

手表零件除用钢材制造外,还采用铜和铜合金制造,这些零件也需进行热处理,其工艺规范如表 18-8 和表 18-9 所示。

表 18-8 铜和铜合金手表零件的热处理工艺

零件名称	材料牌号	技术要求	热处理工艺规范
夹板 日历 字盘	HPb63-3	时效,保持原有硬度	加热温度:260~270℃ 保温时间: 油浴、硝酸盐浴 1.5~2h 空气循环加热炉 2~4h
	HPb60-2	155~185HV	
表盘 字块	H68、H62	再结晶退火	箱式炉或保护气氛连续自动退火炉,加热温度:90~110HV 600~650℃
	H68、T2	再结晶退火	箱式炉或保护气氛炉加热,600~650℃水冷或空冷 80~100HV
摆轮	QBe2.5	棒料:固溶热处理+时效	固溶热处理:780~800℃保温 15min,水冷 时效: 320~350℃保温 1~2h
		板料:时效	

注:1. 夹板在油浴中时效后,冷却到 150℃ 以下取出在油中冷却,滤干后,在专用清洗机中清洗,清洗液配方见表 18-9。

2. 夹板在硝酸盐浴中时效后,在清水中冲洗干净、烘干。

3. 手表板加热时间取上限,小夹板取下限。

4. 再结晶退火的加热时间应按实际装料数量及方式来决定。

表 18-9 夹板在油浴时效后清洗时的清洗液成分

名称	6501 洗涤剂	105 洗涤剂	油酸皂	水
含量(kg/100L)	1.5	0.5	0.5	余量

## 18.1.3 手表零件热处理质量检验要求

手表零件经热处理后的质量检验有硬度、金相、畸变和外观四项内容,具体要求与检验方法见表 18-10。

表 18-10 手表零件热处理质量检验要求

检验项目	检验方法与工具	检验要求
硬度	轴类零件测量断面,板状零件测量平面,计比零件按轻工业部规定进行 工具:Hauser 2:9A 或 ISO-M4~M104 光学维氏硬度计(或类型其他维氏硬度计,测硬度时载荷≤1kg 即 HV1)	按图样设计要求
显微组织	检验摆轴尖,金相显微镜	马氏体 1.5 级以下,轴尖表面无明显脱碳现象
畸变	按典型畸变零件测体积膨胀,外形弯曲畸变。工具:千分表、环规、投影仪,工具显微镜等	按图样或工艺规定的要求
外观	目测或放大镜(放大 25 倍)观察	无氧化色、发黑、斑点,保证表面光亮或按工艺规定的要求

注:夹板的应力检验方法,可参阅轻工业科学技术通讯 1965.3 期《黄铜零件的腐蚀试验设备》一文,在工厂中使用比较方便。

## 18.1.4 手表零件热处理缺陷及预防措施

手表零件对零件的精度及表面质量要求很多。零件经热处理后,由于各种原因会产生多种疵病。零件发生上述的疵病后,必须正确分析产生疵病的原因,提出应采取的预防措施及解决问题的方法。表 18-11、表 18-12、表 18-13、表 18-14 和表 18-15 分别为手表零件热处理缺陷、产生原因及预防措施的解决方法。

表 18-11 统机零件的体积畸变

零件名称	体 积 畸 变	产生原因	防止及解决措施
条轴	轴颈 $+0.002 \sim -0.003$ 轴肩 $+0.002 \sim +0.004$	热处理前后 组织比容的变 化	1) 控制淬火前的坯料尺寸, 保证抛磨裕量 2) 控制淬火加热温度、稳定膨胀量
大钢轮	外圆 $+0.02 \sim +0.03$ 方孔 $-0.001 \sim -0.002$		1) 滚齿时公差控制在下限 2) $250 \sim 260^{\circ}\text{C}$ 马氏体分级淬火
小钢轮	外圆 $-0.02 \sim +0.03$ 内孔 $\approx -0.001$		1) 滚齿时公差控制在下限 2) $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 热油淬冷
擒纵轮片	外圆 $-0.01 \sim +0.015$ 中心孔 $\approx 0.001$		

注: 表中畸变量为统计数字, 与原材料成分偏差、原始组织及热处理前机加工等均有关系。一般以长期生产的统计数字为依据, 用控制机加工裕量的方法来控制膨胀超差。

表 18-12 典型的形状畸变零件

零件名称	畸变形式	产生原因	防 止 措 施
秒齿轴	轴颈弯曲 轴杆弯曲 轴小尾巴 弯曲	1) 滚齿机下料时碰弯 2) 滚刀未按时刃磨, 增加了滚削应力 3) 机床调整不精确 4) 工序流转过程中碰弯 5) 热处理操作不当	1) 严格控制热处理前滚齿坯料的质量, 不允许有机加工弯曲畸变 2) 热处理时, 先作消除应力处理, 并控制淬火加热温度, 适当提高冷却油温 3) 流转过程中不许碰弯
中心齿轴	轴管弯曲	1) 来料有微小弯曲 2) 中心孔偏, 壁厚不均匀 3) 滚齿机顶弯 4) 矫中心孔碰弯 5) 热处理淬火时碰弯	1) 自动车加工来料严格控制不允许弯曲 2) 保证中心孔精度 3) 控制滚齿精度 4) 保证矫孔机垂直度 5) 热处理细心操作
大钢轮	盆形 瓦状形	1) 多数是修中心方孔时冲头刃口不锋利, 修孔内应力大, 造成淬火后变成盆形 2) 二次淬火会增加畸变数的百分比 3) 大钢轮螺钉帽沉槽, 造成一面不对称, 淬火后畸变 4) 瓦状畸变 一般是因原材料为盘料内圈曲率半径小, 落料后, 本来就有瓦状畸变, 淬火后, 畸变量及百分比增大	1) 修孔冲头应定期定量刃磨, 保证刃口锋利, 减少冲孔时应力 2) 瓦形畸变要求材料平直 3) 控制热处理淬火温度和适当提高淬火介质的温度 4) 避免返工二次淬火 5) 内应力严重时, 在淬火前, 先作一次去应力退火
擒纵轮片	平面畸变 (翘曲)	因来料不平或模具刃口不锋利造成	1) 来料保证平直 2) 模具定期磨修
	齿距不等 分	1) 原材料原始组织不均匀, 球化不完全, 使淬火后体积效应不均匀造成 2) 滚齿加工裕量过大, 尤其是铣齿加工裕量过大, 加大铣削应力, 淬火后造成齿距变化 3) 热处理返工, 多次淬火, 增大了齿距变化	1) 严格控制滚齿裕量 2) 严格遵守热处理工艺, 尽量避免多次返工



表 18-13 统机表典型零件热处理后硬度不均匀

零件名称	硬度不均匀类型	产生原因	防止措施
大钢轮	单件上硬度不均匀	在周期式炉中加热淬火,零件相互堆叠,在淬火时没有散开,在重叠处冷却速度不均,产生了一个零件上硬度不均匀	1) 淬火时,尽量使零件散开,摇动淬冷料框,增加冷却速度,以保证冷却均匀 2) 采用自动连续淬火炉
压簧	单件上硬度不均匀		
条轴	单件上硬度不均匀	在手表零件中,条轴比较粗大,周期式炉次装料过多,油的流速小,在正常淬火温度下,不易全部淬硬	1) 装料不宜过多 2) 适当提高淬火加热温度 3) 提高淬冷油温或用石蜡溶液作淬冷剂,提高冷却能力
叉轴	批量不均匀	叉轴是手表零件中最小的零件,加热时,堆积密度大,装料过多,淬火时易产生不均匀现象;同时也易卡在铲底,延缓了零件入油时间,零件温度下降,影响淬火硬度	严格控制装料量,不能因零件小而不恰当地增加装量。淬火时,操作要快速振动,不使零件因粘铲而降低温度
摆轴	单件不均匀 批量不均匀	1) 摆轴由于淬火温度为下限,仪表若稍偏差,便易造成实际加热温度偏低,使零件淬火硬度不足或不均 2) 贫碳会造成轴类硬度不合格	1) 经常核对炉温,严格控制工艺温度 2) 控制保护气氛内碳势,避免发生贫碳现象

注:其他零件如螺钉、快慢针、中心内轴等,因热处理或原材料问题,都能发生淬火后硬度不均匀现象,应加以注意。

表 18-14 手表典型零件脆断形式

零件名称	脆断形式	产生原因	防止措施及解决方法
摆轴	磨轴颈脆断 铆合座子碎裂 磨轴颈扭断	1) 淬火温度偏高,马氏体组织粗化,脆性增大 2) 磨床自动上料机构磨损,上料运转过程中折断 3) 硬质合金磨轮太细,或磨损后未经修磨,使轴颈扭(弯)断 4) 电镀氢脆 5) 铆合机精度不够,造成座子碎裂	1) 严格控制淬火温度 2) 及时修复上料机构 3) 磨轮要及时修磨,金刚石磨轮粒度要选择合理 4) 电镀后应有人工工序:260℃加热1h 5) 铆合机精度要保证工艺要求
擒纵轮片	1) 滚抛锁面或磨齿时产生断齿 2) 组装铆合后电镀时发生轮辐开裂	1) 淬火温度偏高 2) 磁性未退尽,在磨锁面时零件互相钩断 3) 电镀氢脆	1) 严格按工艺热处理 2) 滚抛前必须退尽磁件 3) 电镀前增加一次去应力处理 4) 轮片和轮轴分别电镀后再铆合
拉挡 (指镶钉工艺)	1) 镶钉时碎裂 2) 电镀时或电镀后碎裂	1) 淬火温度偏高 2) 钉、孔过盈配合裕量过大 3) 电镀氢脆	1) 严格按工艺淬火 2) 严格控制过盈量和钉、轴端部无畸变现象 3) 电镀前去应力处理
柄轴	折断	1) 淬火温度过高 2) 截面变化处的应力集中	1) 严格按工艺淬火操作 2) 截面变化处尽可能采用圆弧过渡,不允许有锐角,以减小应力集中

表 18-15 手表零件热处理后的表面质量疵病

表面疵病类型	产生原因	防止措施
氧化色	1) 淬冷时零件与空气接触 2) 回火时料罐内空气未排尽,有漏气现象,或保护气中氧比例高 3) 工作中保护气中断 4) 煤气净化炉或裂解炉漏气 5) 净化炉温度在 500℃ 以下,或裂解炉裂解不完全 6) 光亮回火前零件表面未清洗干净 7) 真空回火时,真空度不够或漏气	1) 淬火时零件避免与空气接触 2) 控制保护气成分,把氧气降到最小限度,防止回火罐漏气,工作时将空气排干净 3) 工作时保护气不能中断 4) 防止煤气净化炉或裂解炉漏气,维持正常的工作温度 5) 光亮回火前零件先清洗干净 6) 保持必要的真空度(压强在 1.33Pa 以下)
脱碳	淬火加热炉内保护气碳势不够,不能保证炉气碳势和零件含碳量的平衡	控制好保护气氛的碳势
发黑	1) 淬火加热炉的 T 形漏料管内空气未排出,易造成第一、二批淬火件表面发黑 2) 保护气氛中 CO 和 CH <sub>4</sub> 含量过高,当零件升温到 400~500℃ 范围时,析出炭黑,沉淀在零件表面	1) 淬火前必须把 T 形漏料管内空气排除干净 2) 保护气氛必须控制 CO 与 CH <sub>4</sub> 的含量或进行净化处理,防止炭黑析出
斑点	1) 零件表面没有清洗干净,表面有锈斑,淬火后变成黑斑 2) 光亮回火的零件表面清洗不彻底对研磨零件表面会产生白斑、黑斑,对抛光零件表面会产生黑斑或蓝色印斑	1) 淬火前零件必须清洗干净,无锈斑 2) 研磨、抛光零件在回火前,需彻底清洗掉研磨和抛光时的磨料
油斑	1) 油浴回火时,回火油老化 2) 零件未全部浸没在油中,在油面上的部分易出现油斑及氧化色 3) 油浴回火后清洗不干净,则吹干后表面发黄	1) 更换新油 2) 油浴回火时全部零件应浸没在油中 3) 油浴回火后,零件必须清洗干净

## 18.2 自行车零件的热处理

自行车是代步工具,又是运动器械,使用时要求自重轻、骑行轻快和安全舒适。因此自行车的整体结构及零件的设计、选材与加工方面都要保证有足够的强度、良好的刚性和耐磨性。同时,制造成本低廉也是极为重要的。

自行车的传动系统是完全处于开放状态,其失效类型是典型的磨粒磨损形式。故要求零件表面必须具有高硬度和高耐磨性,传动零件必须进行热处理,以满足各项力学性能的要求。

自行车零件的用材除选用一般的结构钢外,

基本上都选用自行车工业用钢,通过进行化学热处理(如渗碳、碳氮共渗等)来强化表面。

自行车零件中的主要传动件有:中轴、左右轴碗、前后轴挡、前后轴碗、前叉上下挡、前叉碗、钢珠、传动链条与飞轮等。这些零件的常用材料及热处理方法见表 18-16。

自行车主要传动零件所受的弯曲应力和表面接触应力较小,故化学热处理时一般广泛采用可控气氛气体渗碳或气体碳氮共渗(浅层)的工艺(渗层厚度为 0.2~0.6mm),以取代传统的含剧毒氰盐化学热处理,从而改善了劳动条件、减少了“三废”,保护了环境。其热处理技术条件见表 18-17。

表 18-16 自行车零件常用材料及热处理方法

材料牌号	热 处 理 方 法	零 件 举 例
Q215 B.F(B2F)	渗碳直接淬火,回火	一般传动零件,如前叉上、下挡,前叉碗
Q235-B(B3)	碳氮共渗直接淬火、回火	较重要传动零件如左、右中轴碗
10	渗碳直接淬火、回火	主要传动零件,如前后轴碗
	碳氮共渗直接淬火、回火	
20	渗碳(空冷),再加热淬火、回火	主要传动零件如中轴
	渗碳(空冷),中频感应淬火、回火	
	渗碳直接一次淬火,再加热二次淬火、回火	主要传动零件如前后轴挡
	碳氮共渗直接淬火、回火	
20CrMo	渗碳直接一次淬火,再加热二次淬火、回火	最主要传动零件如高级自行车前后轴挡
	碳氮共渗直接淬火、回火	
Q195 B.F~Q235-B.F (BY1F~3F)	碳氮共渗直接淬火、回火	飞轮零件
20MnSi,45	淬火获得板条马氏体(45钢调质)	链片
Q215 B.F(B2F), 18CrMnMo,45	碳氮共渗、淬火、回火	链销、滚子、衬套
	淬火、中温回火	弹簧卡片

表 18-17 自行车主要零件渗碳、碳氮共渗后的技术条件

零件名称	材料牌号	中间 退火 (HRB)	渗碳或碳氮共渗后经淬火回火后的技术条件						
			C、N 含量 (%) (质量分数)	渗层深度 /mm	表面 硬度 (HRA)	显微组织	耐磨性 /min	韧性	畸变 /mm
中轴	20	<60	C:0.8~1.0	0.7~1.0		M≤4级 C少量(不		矫直时不 断裂	弯曲 ≤0.3
左、右 中轴碗	B3		C:0.8~1.0 或	0.3~0.5	80~83	出现明显的碳 化物,并以小、	45	内径受压 变形1%时 不裂	
前后轴挡	20或 20CrMo	<60	C:0.7~0.9 N:0.1~0.25	0.4~0.6	80~84	分布在马氏体 基底上	前碗挡:50 后碗挡:60	—	
前、后 轴碗	10			0.3~0.5			同中轴碗		
前叉上挡	Q215 B.F		C≥0.7	0.15~0.30	淬火			内径受压 变形1%时 不碎裂	
前叉下挡	(B2F)				≥80				
前叉碗	Q235 B.F (B3F)				回火 ≥78				
飞 轮 零 件	外套	Q195-B.F (BFY1F)	C:0.8~0.9 N:0.2~0.3	0.35~0.50	≥80	表层:针状 马氏体+少量			圆度≤ 0.12, 平 度≤0.1
	平挡	Q215 B.F (BY2F)		0.25~0.40	≥71	残留奥氏体			
	丝挡	Q235 B.F		0.25~0.40	≥71	心部:板条 马氏体+铁素			
	千斤	(BY3F)		0.3~0.15	≥77	体			

(续)

零件名称	材料牌号	渗碳或碳氮共渗后经淬火回火后的技术条件						
		中间 退火 (HRB)	C、N含量 (%) (质量分数)	渗层深度 mm	表面 硬度 (HRA)	显微组织	耐磨性 /mm	韧性
链条零件	链销 (B2F)	Q215-B.F		0.2~0.3	72~82	表层: 针状 马氏体+少量 残留奥氏体		
	链条 (B2F)	18CrMnMo				心部: 板条 马氏体+铁素 体		冲击变形 碎裂片无尖 角
	滚子 (B2F)	Q215-B.F		0.15~0.25	62~72			
	衬套 (B2F)	08F, Q215-B.F		0.1~0.2	61~74			

### 18.2.1 自行车零件的热处理工艺

#### 1. 制造工艺路线

断料 → 机加工 → 清洗 → 渗碳(空冷) → 加热淬火 → 清洗 → 检验 → 回火 → 检验 → 滚光 → 矫直 → 磨弹道 → 检验 → 入库

#### 18.2.1.1 中轴的热处理

中轴是自行车主要传动零件之一, 使用过程中的通常失效形式为低荷接触疲劳引起的外层剥落和磨损。由于中轴是最主要的受力零件, 故选用优质低碳 20 钢来制作, 要求渗碳层深度为 0.7~1.0mm。

#### 2. 热处理工艺

(1) 气体渗碳工艺见图 18-2。

(2) 渗碳后的淬火、回火工艺见图 18-3。

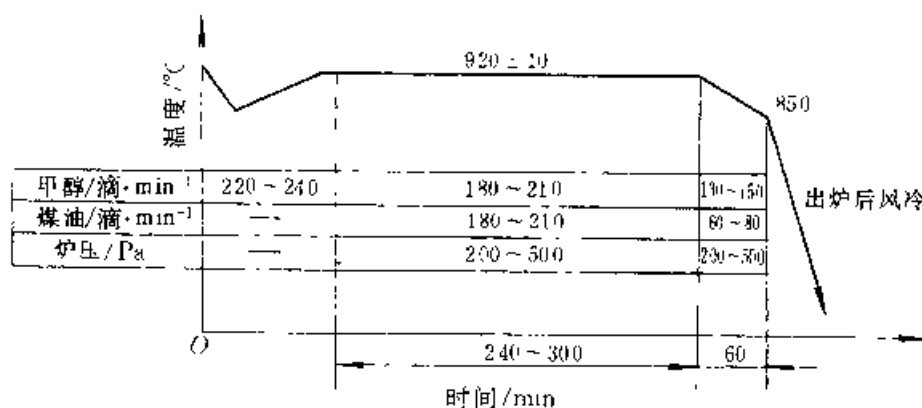


图 18-2 20 钢中轴气体渗碳工艺

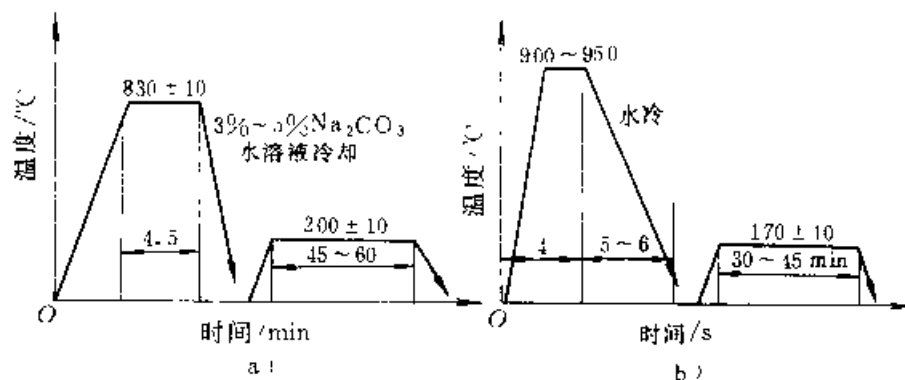


图 18-3 中轴渗碳后淬火、回火工艺

a) 盐浴加热淬火 b) 中频感应淬火

## 18.2.1.2 碗、挡等零件的热处理

自行车碗、挡零件均是在低载荷下因接触疲劳引起的外层剥落而损坏。制造时采用低碳钢坯料经退火后冲制或挤压成形,再经机加工后进行热处理,用Q215-B钢制的前叉碗、前叉上下挡和用10钢制的前、后轴碗坯料的中间退火工艺见图18-4,用Q235-B钢制的左右中轴碗和用20钢制的前、后轴坯料的中间退火工艺参见图18-5。

各类碗挡零件的气体碳氮共渗工艺列于表18-18所示。

## 18.2.1.3 飞轮零件的热处理

飞轮是自行车传动系统中的关键部件,由外套、平挡、丝挡和千斤等零件组合而成。在与链条配合传动时,飞轮的齿轮受到滑动摩擦,齿根部受到链条的拉力而产生弯曲。飞轮的内部弹道及内齿也同样受到低载荷的滚动接触和摩擦,所以磨损是飞轮的主要失效形式,应采取表面强化的工

艺来提高其耐磨性。

飞轮零件的选材及技术条件见表18-19。

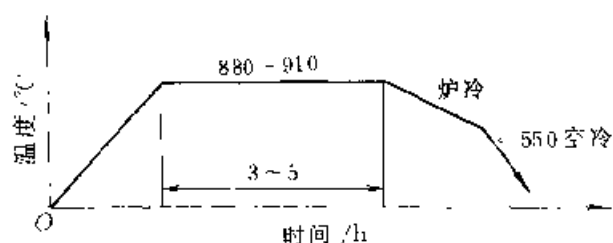


图 18-4 B32 钢制碗、挡坯料的中间退火工艺

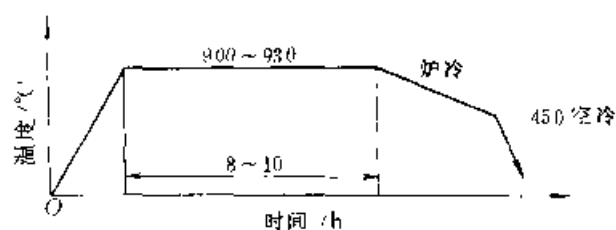


图 18-5 B33 钢制碗、挡坯料的中间退火工艺

表 18-18 自行车碗、挡零件的气体碳氮共渗工艺

零件	渗层/mm	气体碳氮共渗工艺
20 钢 前、后轴挡	0.4~0.6	<p>设备:RM-75-9D 滴控箱式气体渗碳炉,装炉量:7000 只(表面积 215m<sup>2</sup>)</p> <p>渗碳剂:载体剂甲醇,渗碳剂甲醇+甲苯混合液,供氮剂液氮</p> <p>碳势监控:CO<sub>2</sub> 红外仪,CH<sub>4</sub> 红外仪</p> <p>工艺曲线:</p> <p>回火:180℃(油浴)加热,回火 2~3h(或不回火)</p>
10 钢 前、后轴碗		<p>设备:RG-45-9Q 滚筒式渗碳炉(载体、渗剂同上)</p> <p>工艺曲线:</p> <p>回火:(200~100)℃(硝酸盐浴)加热,回火 1h</p>

(续)

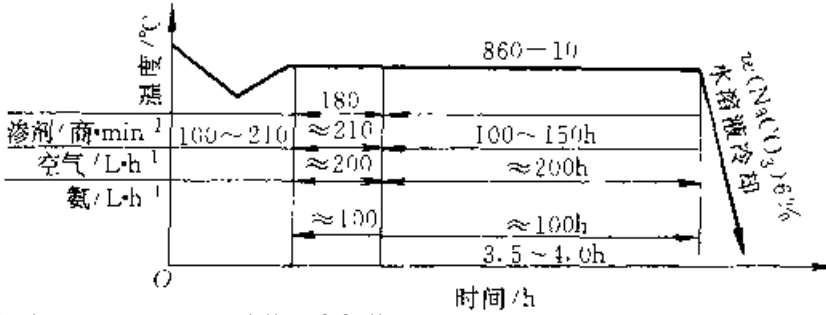
零件	渗层/mm	气体碳氮共渗工艺
Q235-B(B3) 钢中轴碗		设备: RQ3-75-9 井式气体渗碳炉 渗剂: 煤油  回火: (200±10)°C × 1h (硝盐浴中加热)

表 18-19 飞轮零件的材料及技术条件

零件名称	材料	技术条件		
		有效硬化层深度/mm	硬度(HRA)	畸变/mm
外套	Q195-B.F(BY1F)	0.35~0.50	≥80	圆度≤0.12, 平度≤0.1
平挡		0.25~0.4	≥71	
丝挡	Q235-B.F(BY3F)	0.25~0.4	≥71	—
千斤		0.3~0.15	≥77	

1. 制造工艺路线 见表 18-20。

表 18-20 飞轮零件的制造路线

零件名称	制造工艺路线
外套	锻造→车加工→热处理→清洗→煮干
平挡	→砂光→发黄
千斤	剪断→轧形→冲断→热处理→清洗→滚光→发黑

2. 热处理工艺 对于飞轮外套及平挡、丝挡等零件的气体碳氮共渗推荐采用网带式连续加热炉或滴注式箱式多用炉。生产能力平均为 300kg/h 的连续式气体渗碳炉的主要技术规范见表 18-21。

表 18-21 平均生产能力为 300kg/h 的连续气体渗碳炉的主要技术规格

工作炉炉膛尺寸/mm(长×宽×高)	7650×1220×992
炉膛容积/m³	9.26
工作炉加热功率/kW	352
平均生产能力/kg·h	300
料盘尺寸/mm(长×宽×高)	600×400×50
装炉高度/mm	350
工作炉内料盘排数	单排
工作炉内料盘数(只)	17

		(续)
最高工作温度/°C		950
气氛类型		R <sub>r</sub>
原料气		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
发生炉产气量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>		28~30
工作炉内压力/Pa		180~200
淬冷油槽容积/m <sup>3</sup>		6
清洗池容积/m <sup>3</sup>		5
回火炉外形尺寸/mm(长×宽×高)		2200×1424×1400
炉气控制	发生炉	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> 红外仪各一台
	工作炉	CO <sub>2</sub> 红外仪一台

飞轮平挡、丝挡零件是在 RM-75-9D 滴控箱式多用炉中进行碳氮共渗处理的,其余零件则在上述气体渗碳炉生产线(连续炉)上进行碳氮共渗处理。以飞轮外套为例,其淬火、回火的热处理工艺见表 18-22。

飞轮零件千斤的气体碳氮共渗工艺:

设备:功率为 45kW 的回转式气体渗碳炉,最高工作温度为 950°C;气氛类型:滴注式炉内裂解气;平均生产能力:15~20kg/h。具体工艺见图 18-6。

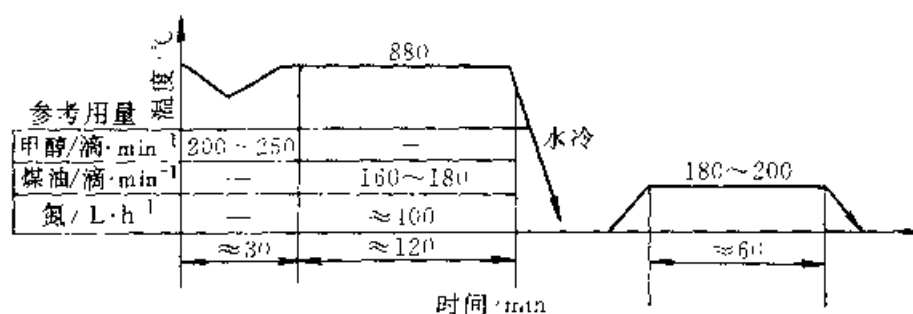


图 18-6 飞轮零件千斤气体碳氮共渗工艺

表 18-22 连续式气体渗碳炉

中外套的碳氮共渗工艺

工作区域	I 区	II 区	III 区	IV 区
工作温度/°C	840	870	870	840
Rx 气用量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	8	5~6	5~6	8
富化气 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	—	0.12~0.14	0.08~0.1	—
供氮剂/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	—	—	0.24	0.36
共渗区碳势控制: φ(CO <sub>2</sub> )(%)	0.2~0.3			
载气 Rx 控制: φ(CO <sub>2</sub> )(%)	0.35~0.45			
淬冷油温度/°C	160~120			
淬冷油类型	L-NA30 全系统损耗用油			
回火	180°C×1.5h			
推料周期/(min/盘)	15			

## 18.2.1.4 自行车链条零件的热处理

自行车链条是传递动力的部件,除了处于磨粒磨损条件下工作而需要较高的表面耐磨性外,还因脚踏动力及路面颠簸而产生冲击,因而又需要有一定的韧性。材料常选用低碳钢经碳氮共渗或用低碳合金钢进行淬火以获得板条状马氏体组织(普通自行车);或用中碳优质低合金钢经淬火、中温回火处理(高级自行车)。

链条零件的选材及热处理要求见表 18-23。

1. 链片热处理 链片在工作时受到拉伸,要求有一定的抗拉强度和抗塑性伸长能力,故普通自行车采用 20MnSi、19Mn 钢淬火成板条马氏体;高级自行车则用 40Mn 钢淬火、中温回火处理,以保证单片的拉断力>450kg。

设备:滚筒式或网带式加热炉,炉内滴入甲醇进行裂解作为保护气氛。

20MnSi 或 19Mn 钢链片和 40Mn 钢链片的

热处理工艺分别见图 18-7 和图 18-8。

表 18-23 自行车链条零件的材料及热处理技术要求

零件名称	材料	热处理技术要求
链片	20MnSi 或 45	20MnSi: 淬火获得板条马氏体, 71~74HRA; 45: 调质
链销	Q215-B.F (B2F), 18CrMnMo	碳氮共渗、淬火, 渗层深度: 0.2~0.3mm, 硬度: 74~82HRA
滚子	Q215-B.F (B2F)	碳氮共渗、淬火, 渗层深度: 0.15~0.25mm, 硬度: 62~72HRA
衬套	08F, Q215-B.F (B2F)	碳氮共渗, 淬火, 渗层深度: 0.1~0.2mm, 硬度: 64~74HRA
弹簧、卡片	45	淬火, 中温回火, 硬度: 71~75HRA

2. 销轴、滚子、衬套的热处理 这类零件的主要技术要求是要求有表面耐磨性和一定的韧性。其中销轴需承受冲击力,故要求热处理后的芯部组织为板条状马氏体。

设备: 滴注式滚筒炉或网带炉。热处理工艺见图 18-9 和表 18-24。



图 18-7 20MnSi、19Mn 钢链片的热处理工艺

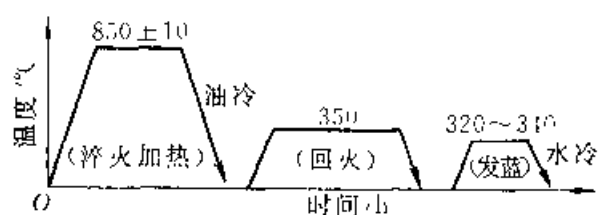


图 18-8 40Mn 钢链片的热处理工艺

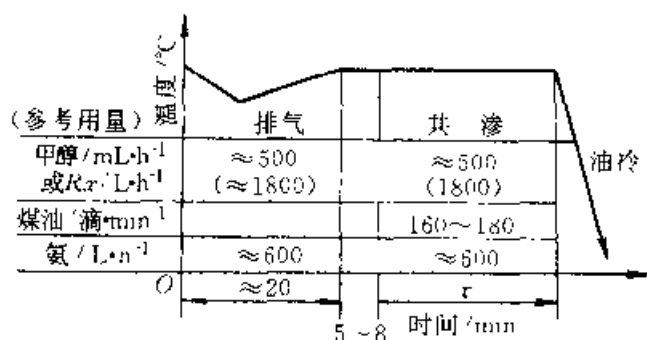


图 18-9 销轴、滚子、衬套  
的气体碳氮共渗工艺

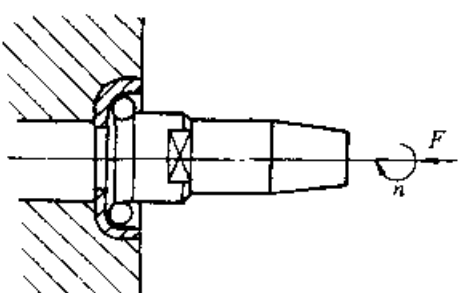
表 18-24 销轴、滚子、衬套  
气体碳氮共渗工艺参数

零 件	共渗温度/ $^{\circ}\text{C}$	共渗时间 $t/\text{min}$
销轴	900~910	80~120
滚子	900~910	50~70
衬套	880~900	50~60
零 件	回 火	
销轴	180~200 $^{\circ}\text{C}\times 1.5\text{h}$	
滚子	180~200 $^{\circ}\text{C}\times 1.5\text{h}$	
衬套	160~180 $^{\circ}\text{C}\times 1.5\text{h}$	

## 18.2.2 自行车零件热处理质量检验

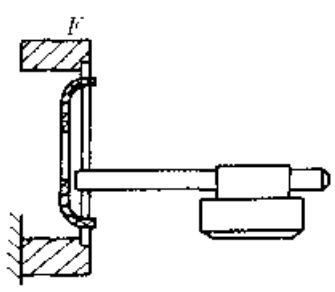
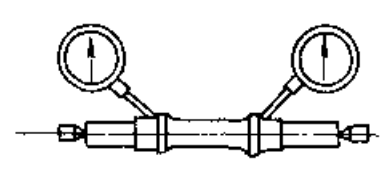
自行车零件热处理后的质量检验项目、方法及标准见表 18-25。

表 18-25 自行车零件热处理质量检验

检 验 项 目	检 验 标 准	检 验 方 法
中间退火硬度	$\leq 60\text{HRB}$	洛氏硬度计 HRB, 抽检
渗层 C、N 浓度 (%)	C: 0.7~0.9; N: 0.1~0.25	金相法(失效分析用化学分析法)
渗层深度/mm	见表 18-7	1) 实物抽检 2) 金相法: 碳钢, 渗层深度=过共析层+共析层+1/2 亚共析层 合金钢, 渗层深度=过共析层+共析层+亚共析层 3) 硬度法: 从表面测至硬度为 550HV 处的垂直距离(GB9450 88)
表面硬度	见表 18-7	1) 洛氏硬度计 2) 渗层 $\geq 0.4\text{mm}$ 时, 载荷 600N $< 0.4\text{mm}$ 时, 载荷 150N
显微组织	见表 18-7	金相法
中轴及轴挡、碗 耐磨性	中轴 45min 前碗、挡 50min 后碗、挡 60min 试验后滚部分表面 无任何剥落、凹陷 和磨损现象	 <p>图为专用试验机 压力 <math>F=2000\text{N}</math> 转速 <math>n=2000\text{r/min}</math></p>



(续)

检验项目	检验标准	检验方法
轴颈韧性	按规定检验方法进行,结果无碎裂现象(或无碎裂声)	 <p>图为专用台钳,逐渐施加压力(<math>F</math>)直到变形达1%内径)</p>
中轴畸变度	弯曲 $\leq 0.3\text{mm}$	 <p>图为专用同心度检测装置</p>

(续)

### 18.2.3 自行车零件热处理常见缺陷及防止措施

自行车零件热处理常见缺陷、形成原因及防止补救措施见表18-26。

表 18-26 自行车零件热处理常见缺陷、形成原因及防止补救措施

缺陷类型	形成原因	防止及补救措施
渗层深度不足	1) 温度偏低,时间不足 2) 气氛碳势偏低 3) 装炉量过多	1) 严格按工艺操作 2) 针对具体原因解决(如经常校验各类仪表,保证温度及碳势示值的正确和控制精度等) 3) 返修加工
渗层深度超差	1) 温度过高,时间过长 2) 气氛碳势偏高	1) 同上1)、2) 2) 一般作报废处理
渗层不均匀	1) 零件表面不清洁 2) 炭黑太多 3) 炉温分布不均匀 4) 气氛分布不均匀 5) 零件装载密度过大 6) 淬火介质搅拌程度不够	针对具体原因解决,如改造设备,保证炉温,气氛的均匀性和淬火介质的搅拌流动良好;加强前清洗工序;严格控制炉内气氛碳势;工件装载密度适当等

缺陷类型	形成原因	防止及补救措施
渗层化合物或呈网状	1) 气氛碳势过高,炉温偏高 2) 操作失当,共渗后至淬冷的时间间隔太长	严格控制碳势与工艺温度,淬火前不让工件温度下降过多 返修:在稍低碳势的气氛中作适当时间的扩散,以缩小碳氮化合物的大小;或在稍高温下加热再淬火以消除碳氮化合物网
硬度偏低	1) 因C、N浓度过高或淬火时温度偏高,使奥氏体稳定性增加而淬火后残留奥氏体量过多 2) 淬火介质老化,冷却能力下降	1) 严格按工艺操作 2) 添加或调换新的淬火介质 3) 重新淬火

## 18.3 缝纫机零件的热处理

缝纫机是与人们衣着密切相关的精密机械,按用途可划分为家用缝纫机和工业缝纫机两大类,并可派生出各种型号、各种特殊用途的品种。缝纫机的整机就是一台具有多种运动机构组合成的精密复杂机器。其内部零件又是形状怪异、件小壁薄的复杂件;要求工作时运转平稳、振动小、声响小,虽然服役时载荷不大(零件表面都承受摩擦

运动),但要求高耐磨与高精度,这导致缝纫机的成本很高,生产难度很大。

家用缝纫机的工作环境较好,工作时运转速度不高(一般不超过1000r/min),其零件主要采用易切削普通碳素钢和优质碳素钢制造;而工业缝纫机的服役条件相对较差,工作时运转速度较高(5000~10000r/min),其零件主要采用优质碳素钢和优质低合金钢制造。

缝纫机零件的热处理绝大多数为低碳钢的化学热处理(浅层渗碳、渗氮或碳氮共渗)来强化零件表面提高耐磨性。

### 18.3.1 家用缝纫机零件的热处理

家用缝纫机零件多数采用价廉的低碳易切削碳素钢或优质碳素钢制造,热处理工艺通常采用浅层气体碳氮共渗处理,来达到设计的技术要求。其主要零件的选材、热处理及技术要求见表18-27。

表 18-27 缝纫机主要零件的选材、热处理及技术要求

零件名称	材料牌号	热处理	技术要求
梭心套壳	Q215-B.F (BY2F)	气体碳氮共渗、淬火、回火	渗层:0.12~0.25mm,硬度:551~888HV
	Q235-B.F (BY3F)		畸变:( $\phi 20.7$ ) $\pm 0.05\text{mm}$
摆梭	15, Q215-B.F (BY2F)		渗层:0.5~0.6mm,硬度:509~795HV
	Q235-B.F (BY3F)		
送布牙	15		渗层:0.15~0.20mm,硬度:509~795HV
夹线板	Q215B.F (BY2F)	淬火、回火	渗层:0.25~0.38mm,硬度:77~84HRA
	Q235-B.F (BY3F)带钢		
梭床圈	10 钢盘元		渗层:0.23~0.25mm,硬度:509~795HV
机针	T9A		579~626HV ( $\approx 54\sim 56\text{HRC}$ )

#### 18.3.1.1 梭心套壳的热处理

梭心套壳是缝纫机勾线机构中重要部件梭心套中的关键零件,其外形如图18-10所示。它要求表面具有高硬度、高度光洁与光亮的表面,以达到防止缝线折断和美观的技术要求。

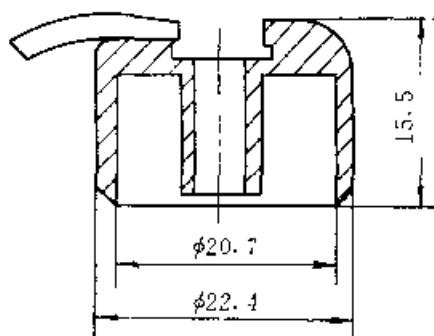


图 18-10 梭心套壳外形

1. 制造工艺路线 梭心套壳是一个形状极为复杂,是一个轻而薄又不均匀对称的零件,因而它的制造周期很长,工序达几十道之多,选其主要加工路线为:落料→墩扁→软化退火→磷化→冷挤压成形→各种机加工→去磷→机加工→热处理→滚光、滚亮→整形→装配。

#### 2. 热处理工艺

(1) 软化退火,软化退火的目的在于降低坯料的硬度和提高塑性,以利于下一道工序——冷挤压成形。使用设备:箱式煤气退火炉。退火工艺:800~900℃、长时间保温后随炉冷却后出炉。退火后的硬度为70~110HBS。

(2) 某厂气体碳氮共渗工艺,梭心套壳的中温气体碳氮共渗是采用连续式的热处理生产方式,这就需要采用机械化程度较高的连续作业炉来实现技术要求。由于梭心套壳零件内外径是不同的圆,因而它的壁厚是极不均匀的,最薄处仅0.50mm,最厚处为1.2mm,这导致淬火时会产生较大的变形,而技术要求变形量仅为 $\pm 0.05\text{mm}$ 内。其次,硬度要求为50~65HRC(由HV值换算而得),渗层厚度为0.15~0.20mm。为此,采用下述设备和工艺来满足上述技术要求:

1) 滴注式震底炉(TDGS)。采用甲醇+煤油+氨气为渗剂进行炉内裂解,在850℃条件下进行气体碳氮共渗热处理工艺见图18-11。

2) 尤乃弗网带炉。采用甲醇+乙醇+氨气为渗剂,在850℃条件下进行裂解和余热气化来实现气体碳氮共渗。其用量为:甲醇—2~3mL/min。

乙醇 1.5~2mL/min, 氮气—250l/h;

3. 质量检验及常见缺陷 核心套壳零件热处理的质量检验项目及标准见表 18-28。采用滴注式震底炉进行碳氮共渗处理时的常见缺陷类型、形成原因及预防、纠正措施见表 18-29。

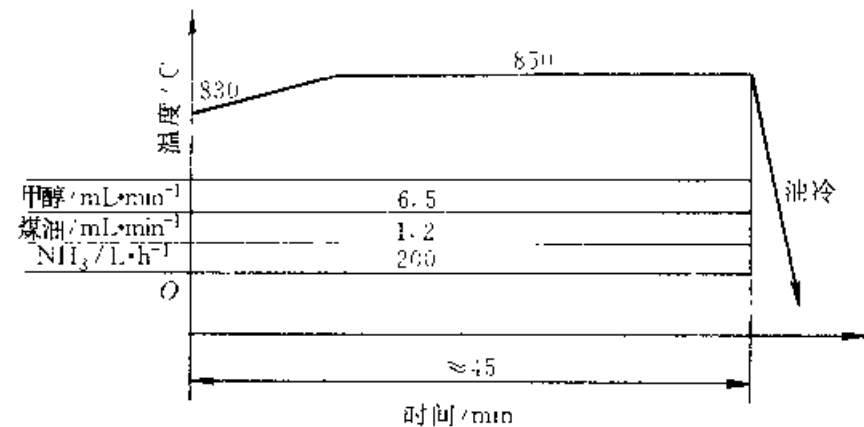


图 18-11 核心套壳气体碳氮共渗工艺

气氛成分(质量分数): CO<sub>2</sub>≈1.1%, Q<sub>2</sub>≈0.1%, CO≈23.2%,  
H<sub>2</sub>≈64.5%, CH<sub>4</sub>≈1%, N<sub>2</sub>≈7.5%

18.3.1.2 摆梭的热处理

摆梭(见图 18-12)也是梭床部件中的一个很重要的零件,它在快速往复运转和扬尘较多的条件下工作。要求表面有高硬度与高耐磨性。

1. 制造工艺流程

下料→热剂压(或真空钎焊)  
→正火→机加工→热处理→清洗  
→回火→精加工→擦光。

摆梭形状复杂、壁薄、件小,故采用热挤压成形或真空钎焊而成,正火是为了改善切削加工性能。

2. 气体渗碳与碳氮共渗工艺

材料: Q195 硬度: 76HRA 以上

有效硬化层深度: 0.35~0.45mm

表 18-28 核心套壳热处理质量检验项目和标准

检验项目	检验方法	检验手段	检验标准
渗层深度	过共析层+共析层+1.2亚共析层	金相显微镜	0.15~0.20mm
硬度	打点	HD-9-15 硬度计	551~868HV(50~65HRC)
显微组织	450×	金相显微镜	表层: 碳氮马氏体+少量碳氮化合物+少量残留奥氏体 中心: 原始组织(珠光体+铁素体)
粗糙度		粗糙度仪 RM 20	< 1.6
畸变量		扁萁规, 百分表	φ20.7 者以±0.05mm 为合格

表 18-29 核心套壳气体碳氮共渗的常见缺陷、形成原因及预防、纠正措施

缺陷类型	特征	形成原因	预防及纠正措施
渗透	整形时易折碎	共渗温度过高; 保持时间过长; 渗剂用量过大	严格按照工艺规范操作
硬度不足	硬度值低于标准, 零件塑性大, 表面光洁(亮)程度不够	1) 渗剂用量过低 2) 滴液管道堵塞 3) 工件进炉速度太快, 造成堆积 4) 工件在炉内停留时间太短 5) 局部漏气	1) 严格按照工艺操作 2) 经常检查滴液管, 及时疏通 3) 检查、杜绝设备漏气现象 4) 返修(退火、重新淬火)
硬度太高	硬度超过规定值, 整形时易折断	1) 渗剂用量过大 2) 共渗时间过长 3) 氮流量过大 4) 炉内工件装量过少	1) 严格按照工艺操作 2) 进料均匀, 防止出现大面积空缺无工件
畸变大		1) 热处理前也有部分工件超公差 2) 工件在炉内因震动前进时互相碰撞造成畸变 3) 进料口机械撞伤 4) 振底时间不稳定	1) 小心操作, 防止机械撞伤 2) 适当提高淬冷油温度 3) 对已畸变工件整形 4) 采用滴控箱式气体渗碳炉或网带式气体渗碳炉

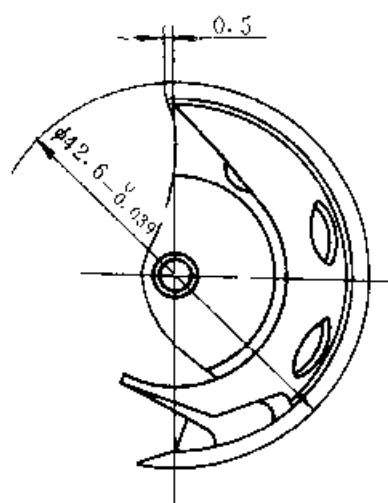


图 18-12 摆梭

(1) 工艺 I: 设备: RQ<sub>3</sub>-75 井式气体渗碳炉。渗剂: 甲醇 + 煤油。工艺见图 18-13。

(2) 工艺 II: 设备: RM-75-9D 滴控箱式多用炉。渗剂: 甲醇 + 甲苯混合液 + 氨气。工艺见图 18-14。

3. 质量检验与常见缺陷 摆梭热处理后的质量检验见表 18-30。常见缺陷及预防、纠正措施见表 18-31。

### 18.3.1.3 夹线板零件的热处理

夹线板是一种形小壁薄(1mm)的圆形小零件,系冲压而成。缝纫机工作时缝线不断与其摩擦,故要求夹线板的表面具有高硬度和高的光洁、光亮及无毛刺,(以防断线)。所用材料为 Q215 BF(BY<sub>2</sub>-F)。

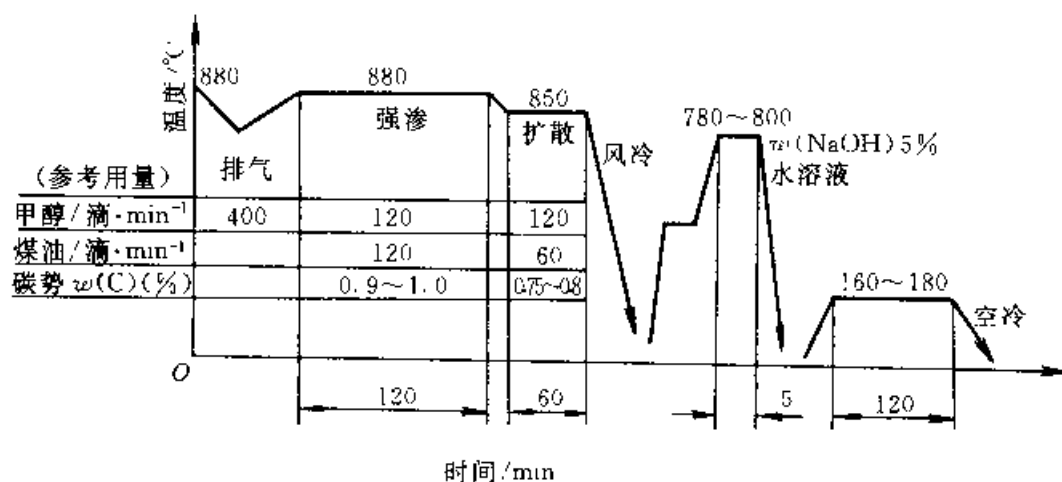


图 18-13 摆梭气体渗碳工艺(I)

注: 100 滴 ≈ 3.5mL。

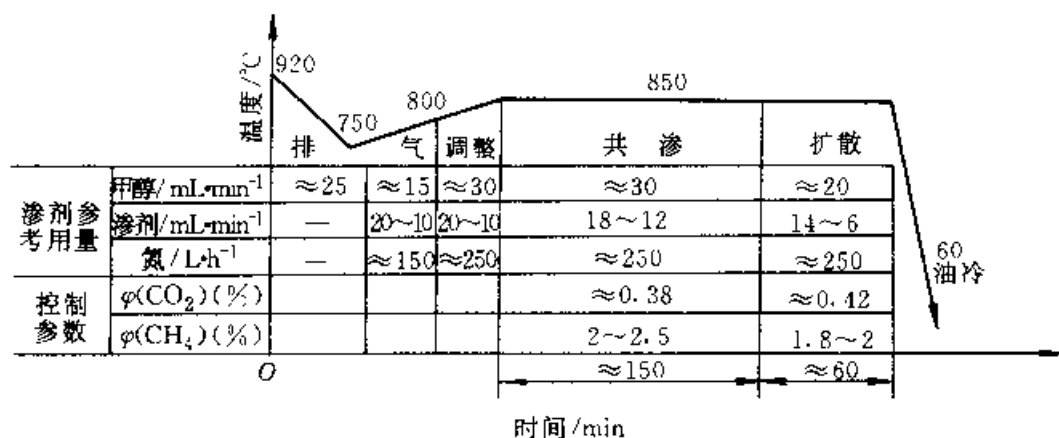


图 18-14 摆梭气体碳氮共渗工艺(II)

表 18-30 摆梭零件的热处理质量检验

检验项目	检验方法	检验设备	检验要求
渗层深度	过共析层—共析层+1.2 $\phi$ 共析层	金相显微镜	0.5~0.6mm
硬度	打点	洛氏硬度计	50~63HRC
显微组织	金相法, 450 $\times$	金相显微镜	表层: 碳氮马氏体+碳氮化合物+少量残留奥氏体, 无碳化物网 心部: 珠光体+铁素体
外观	目测		表面清洁, 呈灰白色

表 18-31 摆梭零件的热处理常见缺陷及预防、纠正措施

缺陷类型	特征	形成原因	预防及纠正措施
爆角与开裂	断裂(脆性)	因零件形状复杂, 壁厚不均, 导致淬火开裂	淬火前采用合适的预冷, 或采用稍缓和的淬火介质
硬度不足	低于规定值	渗剂用量不足, 或共渗时间不够	严格按工艺操作, 返修品可退火后重淬
畸变		因形状复杂, 淬火时热应力与相变应力引起畸变	已畸变的零件进行矫正, 采用网带炉或箱式气体渗碳炉

## 1. 制造工艺路线

圈料带材退火→轧直、切断→落料→热处理→磨平面→擦光→滚镀。

## 2. 热处理工艺 夹线板零件的热处理是采

用气体碳氮共渗处理, 典型工艺见图 18-15。所用设备为 RG—45—9B 滚筒式电阻炉, 渗剂为甲醇—煤油—氨气。

## 3. 质量检验与常见缺陷 夹线板的热处理

质量检验要求见表 18-32 所示, 常见缺陷与预防补救措施如表 18-33 所示。

## 18.3.1.4 梭床圈零件的热处理

梭床圈(图 18-16)工作时将摆梭紧压在梭床内, 故其平面要求平整、光洁和光滑度极高。由于工作时其内圆与摆梭间相对滑动而产生摩擦, 故要求具有高硬度与高耐磨性。选用材料为 Q215 BF(BY<sub>2</sub>F)。

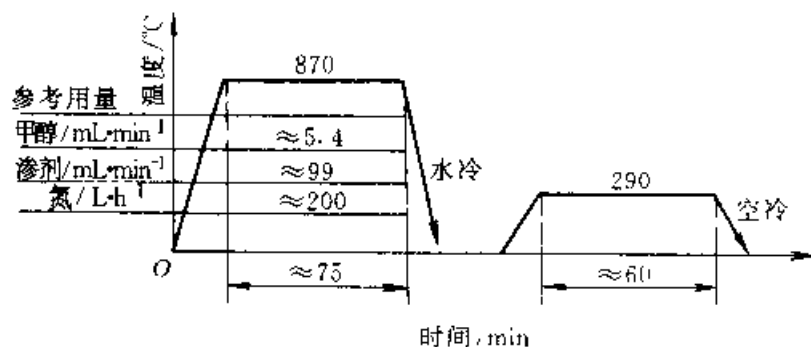


图 18-15 夹线板气体碳氮共渗工艺

表 18-32 夹线板热处理质量检验项目及要

项 目	方 法	设 备	要 求
渗层深度	金相法, 100 $\times$	金相显微镜	0.25~0.38mm
硬度	打点(10点)	洛氏硬度计	77~84HRA
显微组织	金相法, 450 $\times$	金相显微镜	表层: 碳氮马氏体+碳氮化合物+少量残留奥氏体 心部: 珠光体+铁素体

表 18-33 夹线板热处理常见缺陷、产生原因和预防、补救措施

缺陷类型	特 征	产生原因	预防及补救措施
细粒状托氏体	小黑点	内氧化或冷却速度不够	加快冷却速度, 掌握好共渗层中氮浓度
硬度不足	低于规定硬度值	在本工艺规定温度下煤油裂解不完全, 炭黑影响共渗结果	提高甲醇用量, 稀释煤油, 或适当提高 NH <sub>3</sub> 用量
畸变	弯曲	滚筒式炉胆转速太快, 热态下工件受撞击, 造成畸变	调低炉胆的转速

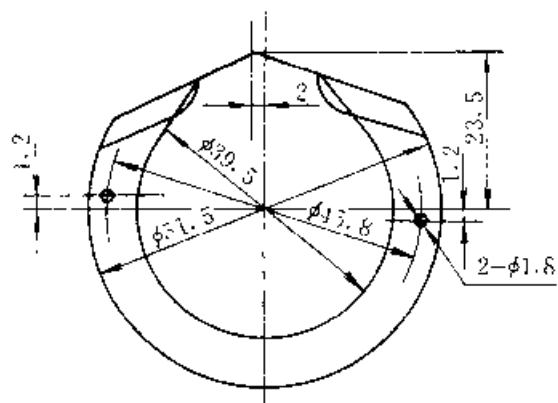


图 18-16 梭床圈外形

## 1. 制造工艺路线

落料→折弯→压扁→冲头→钻孔→去应力→退火→粗磨工作面→热处理→清洗→矫直→磨削。

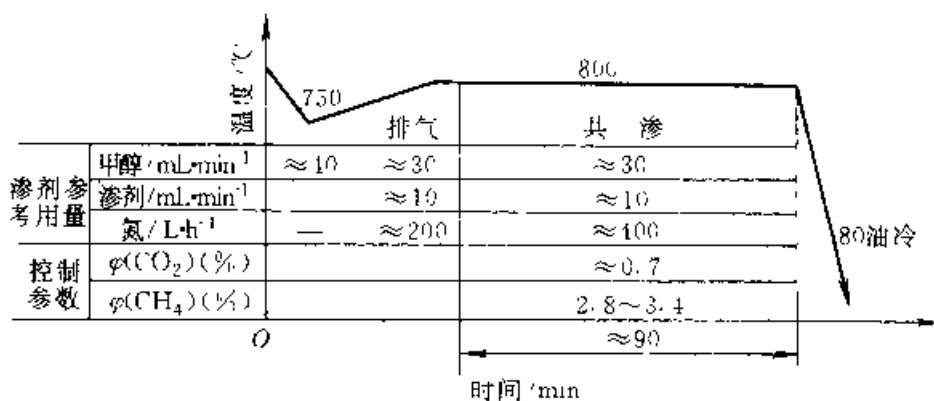


图 18-17 梭床圈的气体碳氮共渗工艺

## 2. 热处理工艺

(1) 去应力退火, 加热到 600~650℃, 保温 3~4h 后随炉缓冷后出炉。

(2) 气体碳氮共渗, 某厂在滴注式箱式多用炉上进行的气体碳氮共渗工艺见图 18-17 所示。

## 18.3.1.5 机针的热处理

缝纫机机针的工作状态是不断快速地穿刺缝料, 不断进行摩擦。故要求机针尖锐锋利、无毛刺、高度平直, 并具有高的耐磨和一定的韧性。一般选用 T9A 钢经淬火、回火处理后, 硬度要求达到 54~56HRC(≈579~620HV)。

## 1. 制造工艺路线

落料→打头→切齐→刻字、矫直→冲针孔→铣槽→磨外形→软擦→热处理→轧直→穿眼→硬擦→磨针尖→抛光→镀铬→平直→包装。

2. 热处理工艺 某厂机针热处理工艺如图 18-18 所示。选用设备为带马弗网带炉, 采用氨分

解气体保护气氛。

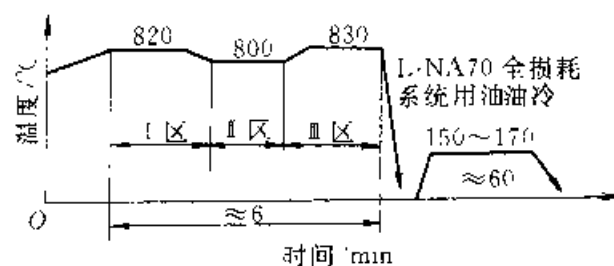


图 18-18 家用缝纫机针的热处理工艺

3. 机针热处理质量检验和常见缺陷 机针热处理后的质量检验见表 18-34。热处理常见缺陷、产生原因及防止、补救措施参见表 18-35。

## 18.3.1.6 送布牙零件热处理

送布牙是缝纫机送料机构中的一个重要零件, 其工作状态是将被夹在“压脚”与“送布牙”之间的“缝料”按一定速度运送

向前或后退, 但送布牙与缝料之间不能产生松动, 否则无法运送缝料, 同时送布牙还与“针板”间有着滑动摩擦, 所以送布牙要求有高硬度、高耐磨性和一定的光洁和光滑。

## 1. 制造工艺流程

失蜡铸造→机加工→热处理→机加工→滚镀。

## 2. 热处理工艺 材料:

Q215-BF(BY<sub>2</sub>F); 渗层深度 0.3~0.5mm; 热处理工艺采用气体碳氮共渗处理, 工艺规范见图 18-19。

表 18-34 缝纫机针热处理质量检验要求

检验项目	检验方法	检验设备	检 验 要 求
原材料 组织 硬度	金相法 打硬度	金相显微镜 硬度计	1) 原材料进厂前, 已作球化退火
			2) 进厂检验要求: 球状珠光体 硬度≥55HRB
热处理 后硬度	针杆和柄部 表面测硬度	显微 硬度计	淬火: 713~ 766HV(≈60~ 62HRC) 回火: 579~ 620HV(≈54~ 56HRC)

(续)

检验项目	检验方法	检验设备	检 验 要 求
显微组织	金相法, 450×	金相显微镜	细针状马氏体
表面光亮程度	对照样板目测		与参照样板同级别
塑性			可弯曲 $\geq 0.10$ mm

表 18-35 缝纫机针热处理常见缺陷、原因及防止补救措施

缺陷类型	特征	形成原因	预防及补救措施
硬度低于规定	硬度值	装料太多,保温时间太短,网带进速太快	1) 严格按工艺操作 2) 返修:退火后重淬
弯曲	曲线槽侧凹进		整形轧直
光亮不够	不亮	1) 淬火硬度不够 2) 软擦不光	1) 退火后重淬 2) 重新擦亮

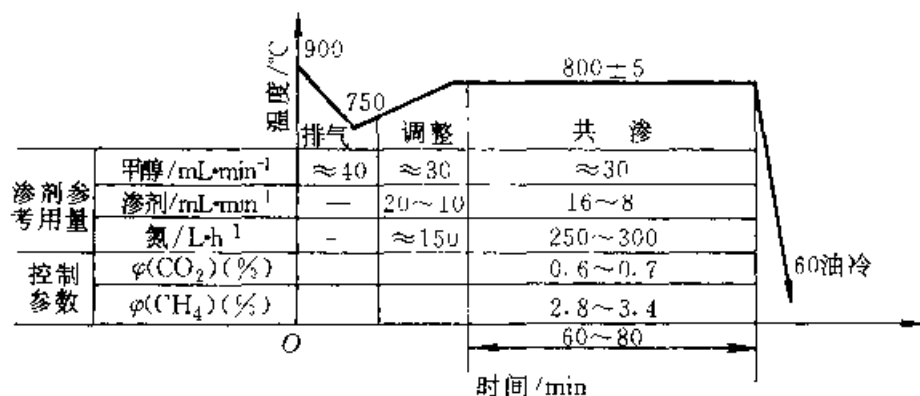


图 18-19 送布牙气体碳氮共渗工艺

工业缝纫机零件的材料选用范围见表 18-36, 表面硬化层深度的选用见表 18-37, 相应的热处理设备选用列于表 18-38。

表 18-36 工业用缝纫机零件的材料选用

零件类别	使用材料
轴类	15Cr, 20Cr, 20CrMo
连杆, 曲柄类	15Cr, 20Cr, 10Cr, 38CrMoAl
导轮类	15Cr, 20Cr, T16A, GCr6, GCr15
齿轮, 齿条类	20Cr, 40Cr, 20CrMo
梭钩, 梭壳类	B2, 10, 15, 20Cr
机针类	9Cr2, GCr6, GCr15
滚柱类	GCr6, GCr15, 20Cr
弹簧类	70, 65Mn, 60Si2MnA
机壳类	HT150 HT200

### 18.3.2.1 弧齿锥齿轮的热处理

弧齿锥齿轮是工业缝纫机的主要传动零件, 传递的力矩虽不大, 但要求在 3000~12000r/min 的高速运行中保持良好的稳定性和低噪声, 热处理质量要求较高。锥齿轮的主要磨损是在齿面和后端面, 失效形式是齿端面的磨损和齿顶部的剥落。

1. 技术要求及使用材料  
弧齿锥齿轮的用材应具有良好的可加工性, 热处理后具有高耐磨性、疲劳强度和小的畸变。常用材料、热处理方法

及硬度要求见表 18-39。

表 18-37 工业用缝纫机零件表面硬化层深度的选用

零件有效厚度/mm		硬化层深度/mm
轴类(直径)	板类(厚度)	
φ1~φ2	0.6~1.2	0.05~0.15
φ3~φ5	1.2~3.2	0.1~0.3
φ5~φ10	3.2~5	0.2~0.4
φ10 以上	5 以上	0.2~0.5

### 18.3.2 工业缝纫机零件的热处理

工业用缝纫机的特点是运行转速高, 工作环境较差, 要求热处理后具有比家用缝纫机更好的耐磨性和更高的精度。选材及热处理方面的特点是:

(1) 大部分零件采用优质低碳合金钢。

(2) 由于零件服役时表面载荷不大, 而耐磨性及精度要求较高, 故适宜采用较低温度的奥氏体氮碳共渗或铁素体氮碳共渗浅层处理, 从而也有利于减少热处理畸变。

表 18-38 工业用缝纫机零件热处理设备的选用原则

对热处理设备的要求	推荐用的设备类型
1) 要适合于薄层化学热处理工艺,工艺参数易于控制,且能确保工艺执行的稳定性	1) 滴控箱式气体渗碳炉
2) 要适合于解决零件形状不规则、件小、壁薄、结构复杂及易产生热处理畸变的特点	2) 连续式可控气氛网带炉
3) 根据零件要求,能实现多种热处理工艺操作,以适应工业用缝纫机生产的多品种、小批量要求	3) 滚筒式可控气氛炉
4) 要求能耗低、无污染,使用原料气来源比较有保障	

表 18-39 弧齿锥齿轮常用材料、热处理方法及硬度要求

材料	热处理方法	硬度要求
20CrMo	碳氮共渗、淬火、回火	$>760\text{HV}$
	气体氮碳共渗	$>760\text{HV}$
40Cr	调质处理	24~28HRC
	气体氮碳共渗	$>760\text{HV}$

## 2. 锥齿轮的制造工艺路线

下料→粗车→正火(20CrMo)或调质(40Cr)→精加工→铣齿→碳氮共渗、淬火与回火(20CrMo)或氮碳共渗(40Cr)→研磨。

3. 坯料的预先热处理 20CrMo 钢机加工要求硬度为 156~217HBS,采用正火处理以改善可切削性;40Cr 钢要求硬度为 24~28HRC,采用调质处理以改善基体组织提高基体强度。调质温度为  $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ ,油淬,回火温度为  $(620 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ ,水冷。

4. 最终热处理 见表 18-40。

表 18-40 弧齿锥齿轮的热处理工艺

工 艺	工 序
气体碳氮共渗	$800 \sim 860^{\circ}\text{C}$ 碳氮共渗→直接淬火(油冷, $80^{\circ}\text{C}$ )→ $180 \sim 200^{\circ}\text{C}$ , 2h 回火
奥氏体氮碳共渗	$(780 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 氮碳共渗→直接淬火(油冷, $80^{\circ}\text{C}$ )→ $180 \sim 200^{\circ}\text{C}$ , 2h 回火
气体氮碳共渗	$(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 1h, 油冷

## 5. 质量检验和常见热处理缺陷及防止措施

检验部位:端面硬化层深的测定采用硬度法(氮碳共渗的零件采用金相法测定化合物层深和扩散层深度)。常见热处理缺陷及防止措施见表 18-41。

## 18.3.2.2 包缝机主轴的热处理

高速包缝机主轴(图 18-20)形状复杂,截面差异大,工作时以  $7000 \sim 15000\text{r/min}$  高速运转。除表面承受摩擦外,还承受扭转疲劳作用,主要失效形式是因磨损而失去精度和因应力作用而导致变形。

1. 选用材料及技术要求 一般讲,主轴材料选用 20Cr 钢进行碳氮共渗或 40Cr 钢进行离子渗氮处理。主轴表面硬度要求是:60~65HRC。图中 A、B、C 三段的同心度公差为 0.01mm。

## 2. 制造工艺路线

毛坯→粗加工→正火或调质→精加工→热处理→矫直→磨削(粗磨、精磨、研磨)。

3. 热处理工艺 预先热处理工艺见表 18-12。

最终热处理工艺:20Cr 钢主轴在  $840^{\circ}\text{C}$  进行气体碳氮共渗后直接淬油,  $180^{\circ}\text{C}$  回火 2h;40Cr 钢主轴进行离子渗氮,工艺如图 18-21。

4. 常见热处理缺陷及防止方法见表 18-43。

表 18-41 螺旋锥齿轮热处理常见缺陷、原因及防止措施

缺 陷	产生原因	防止措施
切削加工时,表面不太光洁	正火硬度偏低	1) 正火温度用上限,加快正火冷却速度(风冷或喷雾冷却) 2) 不完全淬火: $760 \sim 780^{\circ}\text{C}$ , 油淬
齿顶崩裂	碳氮化合物过多,呈大块或网状分布	严格控制炉气碳势
齿面硬度偏低	残留奥氏体量过多	调正表面碳氮浓度,防止渗碳(共渗)温度过高
齿顶擦伤、剥落	中间管理不善、运输不当	处理后的成品轻拿轻放,避免互相碰撞





图 18-20 包缝机主轴

表 18-42 包缝机主轴的预备热处理工艺

材料	工 艺	目 的	工 艺 参 数	硬度(HBS)
20Cr	正火	1) 改善可切削性 2) 减小最终热处理时零件的畸变	880~900℃ 加热后空冷	143~170
10Cr	调质	1) 为渗氮做好组织准备 2) 提高精加工表面的光洁程度	淬火: 830~860℃ 加热后水冷 回火: 510~570℃ 加热后水冷	241~286
	去应力退火	减少渗氮后零件的畸变	500~550℃ × 1h 后炉冷至 250℃ 出炉空冷	

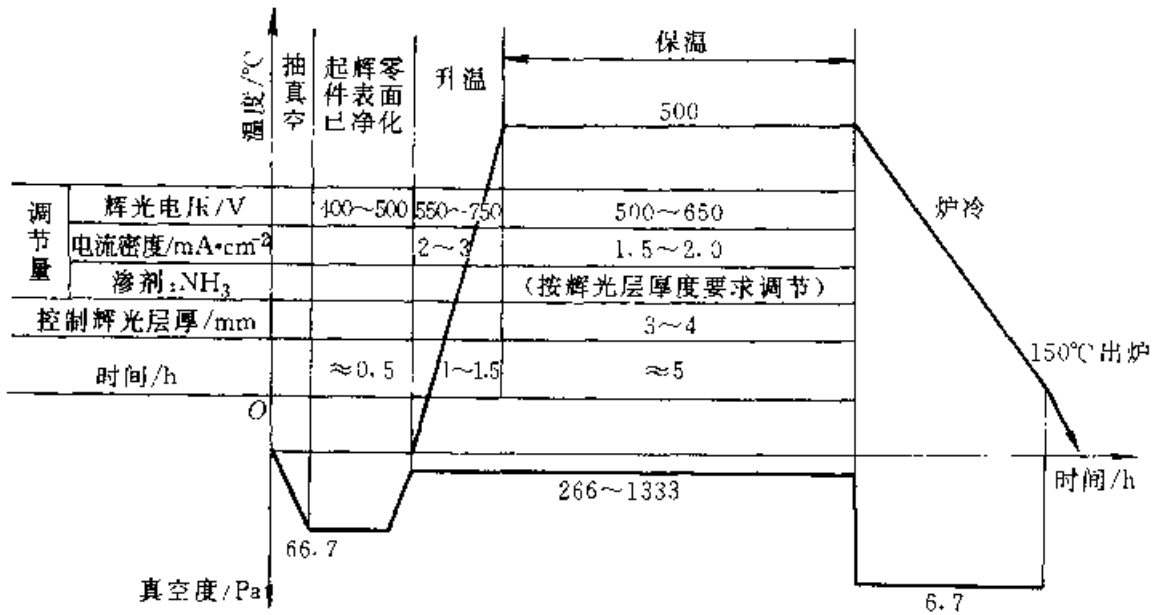


图 18-21 40Cr 主轴离子渗氮工艺

- 注意事项:
1. 抽真空达 66.7Pa 后方可通氮加电压。
  2. 辉光层稳定后增加电压、电流密度, 开始升温。
  3. 随时注意调节电压和氮流量, 以保证渗氮温度。
  4. 按辉光层 3~4mm 厚度调节  $\text{NH}_3$  流量控制。

表 18-43 主轴碳氮共渗时常见缺陷、原因及防止方法

缺陷类型	产生原因	防止方法
翘曲	热处理加热、冷却不均匀	尽量做到加热、冷却均匀
淬火开裂	淬火温度过高, 组织过热, 冷却太激烈	校正炉温, 适当降低淬火温度, 采用热油淬冷, 增加去应力工序
渗层浓度过高或偏低	炉内碳势失控	严格控制炉内碳势
渗层深度超差或不足	共渗温度偏高或偏低, 时间过长或过短	校正炉温, 严格控制共渗时间



(2) 正火:加热到 900℃,保温 2~3h,然后风冷。要求硬度≈200HBS

碳氮共渗:采用二段碳氮共渗工艺。设备为 RM 75 9D 滴注箱式多用电阻炉 20Cr 钢挑线

杆的二段碳氮共渗工艺见图 18-23。二段碳氮共渗工艺与其他工艺的比较如表 18-47 所示。

4. 常见热处理缺陷及防止措施见表 18-48。

表 18-46 挑线杆常用材料及技术要求

材 料	成 形 方 法	技 术 要 求		工 艺 方 法
		有效硬化层深度/mm	硬度(HV)	
20Cr	锻压成形	0.25~0.35	≥688	碳氮共渗
15CrMo	锻压成形	0.25~0.35	≥688	碳氮共渗
38CrMoAl	热压成形	0.15~0.25	≥800	氮碳共渗

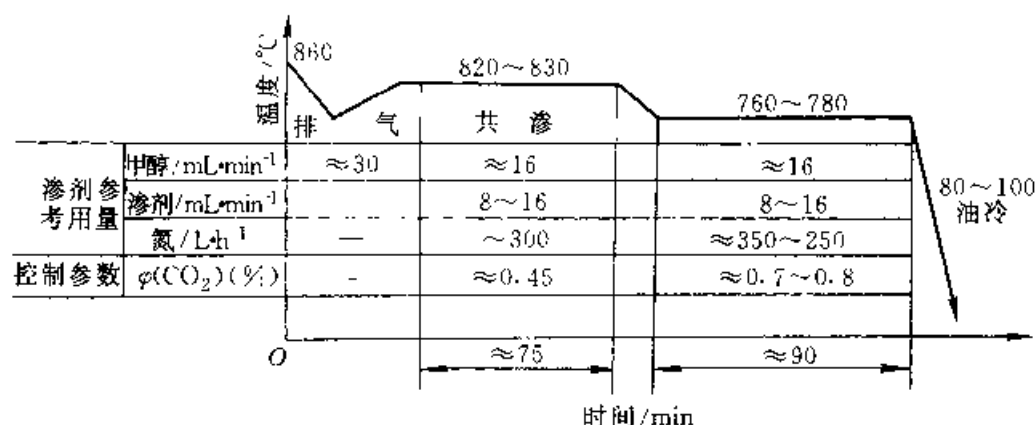


图 18-23 20Cr 钢挑线杆的二段碳氮共渗工艺

表 18-47 不同碳氮共渗工艺条件下挑线杆处理后的测定结果

工 艺	硬度 (HRC)	98N 载荷下 的磨耗/mg	畸变/mm		有效硬化层 /mm
			内孔	两平面不平度	
840℃×105min	58~63	20.4	0.005~0.02	0.04~0.07	0.35~0.45
820~830℃×75min→760~780℃×90min	60~64	9.4	≤0.01	≤0.05	0.33~0.39
760~780℃×210min	60~64	12.1	≤0.01	0.02~0.05	0.28~0.32

表 18-48 常见热处理缺陷及防止措施

缺 陷 类 型	产 生 原 因	防 止 措 施
硬度不均匀,有软点	1) 装炉量过多,或工件表面有油污 2) 淬火油老化	1) 清洗工件,均匀装料 2) 添加新油
渗层不足	1) 炉气成分不佳 2) 原材料有误 3) 原材料脱碳	1) 严格控制炉气 2) 原材料防止混料 3) 预备热处理防止氧化脱碳
渗层超差,易断裂	1) 共渗时间过长 2) 炉温超差 3) 仪表失控	1) 正确确定共渗时间 2) 严格控制温度 3) 定期校验仪表
产生磨削裂纹	1) 炉气中含氧量过高 2) 原材料晶粒粗大 3) 通氮量过多	1) 控制炉气 2) 控制预备热处理时材料的晶粒度 3) 通氮量按工艺规程控制

## 18.4 纺织机械零件的热处理

许多纺织机械工作时都处于连续运转状态,

虽然承受的载荷较轻,但对设备所用零件的可靠性、稳定性及均匀性要求较高。一些与纤维直接接触的零件还被要求既不损伤纤维,又要耐磨损、耐

疲劳和耐腐蚀等性能。

纺织机械中的典型零件有:针布、罗拉、钢领、锭子、针筒、计量泵和卷曲轮等。根据它们产量大的特点,故热处理时多采用专用设备和连续作业炉;按零件的不同要求,来选用不同的材料和热处理方法。

### 18.4.1 工作条件及材料选择

#### 18.4.1.1 针布

针布包覆在梳棉机的锡林·道夫滚筒表面和盖板平面上,起梳理纤维的作用,故要求针部齿尖锐利、光洁、耐磨,包覆后针尖组成的表面几何形状平直。按针布的结构类型,有弹性针布和金属针布两大类,目前高产梳棉机上的针布已经广泛采用金属针布。

1. 弹性针布(包括盖板针布) 弹性针布由底布和植在底布上面的梳针组成,如图18-24所示。图中 $H=(9\pm 0.2)\text{mm}$ ,针尖密度:锡林道夫用弹性针布为 $56\sim 78$ 个/ $\text{cm}^2$ ( $360\sim 500$ )个/ $\text{in}^2$ ,盖板针布针尖密度为 $28\sim 71$ 个/ $\text{cm}^2$ ( $180\sim 160$ 个/ $\text{in}^2$ )。图中:1—弹性针布,2—盖板针布。

近年来,随着纺织工业的发展,弹性针布在钢丝材料、热处理、针尖截面形状、针尖排列及底布结构等方面,都作了不少改进。

2. 金属针布 金属针布适应高产高速的要求,适纺性强,抄针周期长等。金属针布齿形如图18-25所示。

由线材压迫成形的金属针布,还需有一定的韧性,盘重100kg以上的钢丝经热处理后,应具有较好的耐磨性。一般采用60钢制作针布。

#### 18.4.1.2 罗拉(参见图18-26)



图18-25 金属针布齿形

罗拉的功能是牵引和喂入纱条,故要求罗拉具有如下性能:

(1) 表面具有正确的齿形沟槽和符合规定的表面粗糙度。

(2) 齿形的分度要正确,同心度要好,既能保证充分握持纤维,又不会损伤纤维。

(3) 要求能耐磨、耐大气腐蚀,要求具有足够的扭转与弯曲强度,不允许杂质和粘性物质附着于它的表面,以保证正常工作。

(4) 具有良好的可切削性以便获得高的制造精度。

(5) 具有互换性,减少机械因素对牵伸功能不均的影响。

罗拉的失效形式为齿部磨损或轴承挡磨损后影响罗拉的正常运行而失效,故热处理后应具有良好耐磨性,一般采用45钢,精梳机罗拉选用20CrMo合金钢。

#### 18.4.1.3 锭子

锭子的功能是纤维束的加捻卷绕机构。分为粗纱锭子(图18-27)和细纱锭子(图18-28)两大类,细纱机的锭子比粗纱机锭子的转速要高。锭子的运转状态直接影响纱的产量与质量。

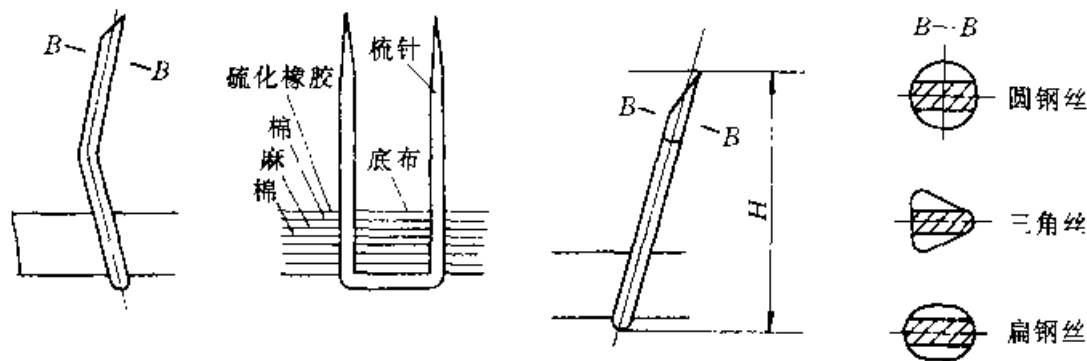


图18-24 弹性针布

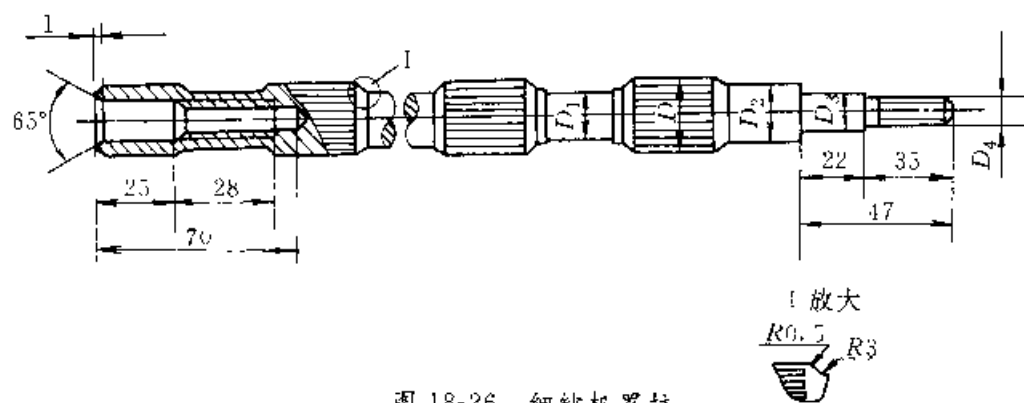


图 18-26 细纱机罗拉

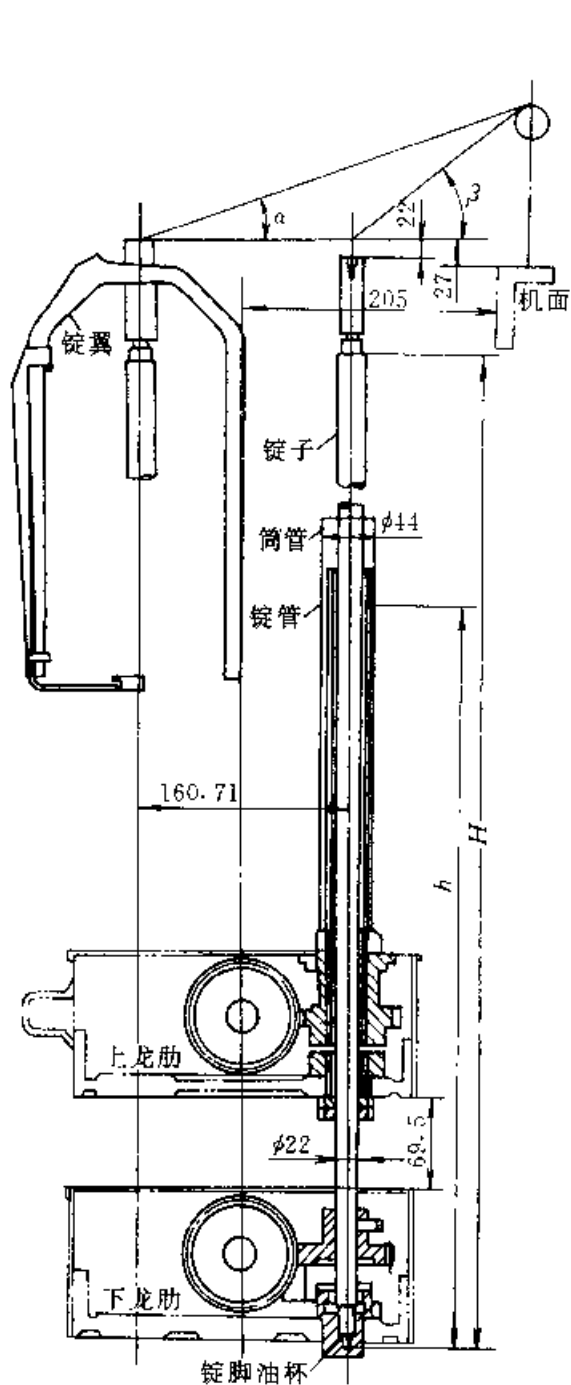


图 18-27 粗纱锭子示意图

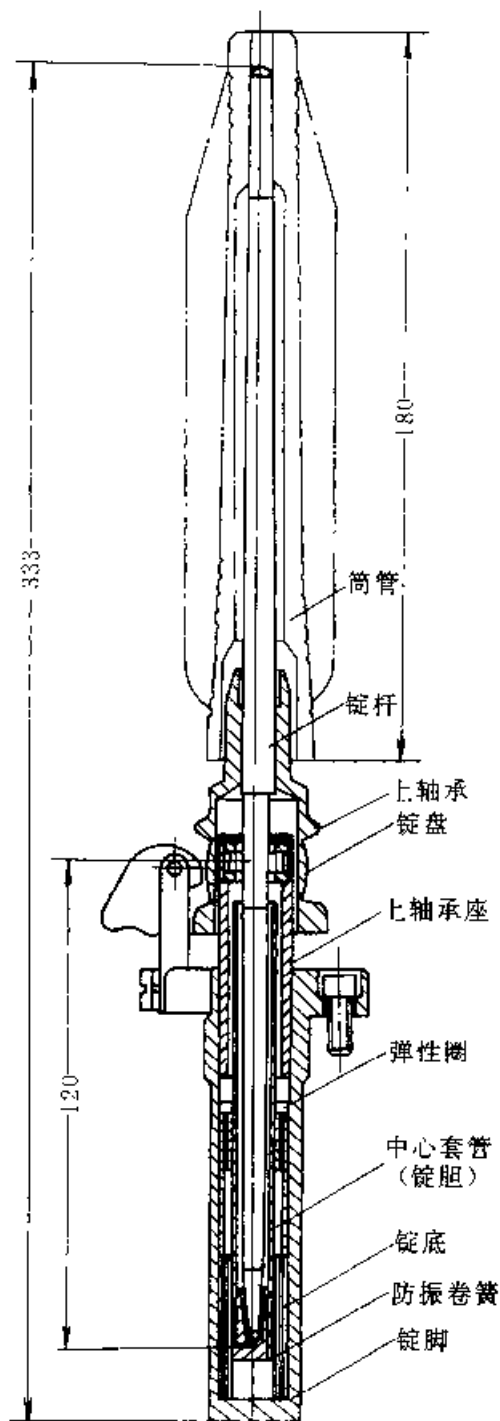


图 18-28 细纱锭子示意图

对细纱锭杆的技术要求极高,应达到:

(1) 旋转平稳,锭杆是一根高速旋转的轴,转速在  $15000 \sim 18000 \text{ r/min}$ ,轴承挡直径为  $7.8 \text{ mm}$ ,且必须保持平直、坚韧而富有弹性。部颁标准规定:当锭杆上端弯曲相当于锭杆总长的  $1/20$  时,并维持  $15 \sim 20 \text{ s}$  后,其残余变形不得超过  $0.01 \text{ mm}$ 。

(2) 热处理后应坚硬耐磨,一般要求使用期达到十年左右。

(3) 功率消耗低 锭子消耗的功率占全机功率的  $30\% \sim 60\%$ ,故必须降低每一锭子的功率消耗。

(1) 润滑油消耗要少。

总之,锭子的寿命与机加工、热处理、装配、润滑和使用保养等环节有关。一般选用  $\text{GCr15}$  钢制造锭杆(图 18-29 和图 18-30)。

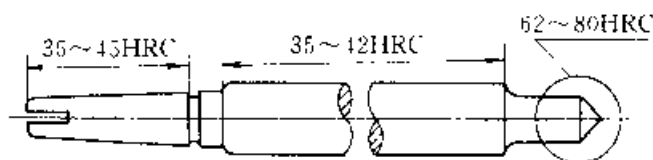


图 18-29 粗纱锭杆

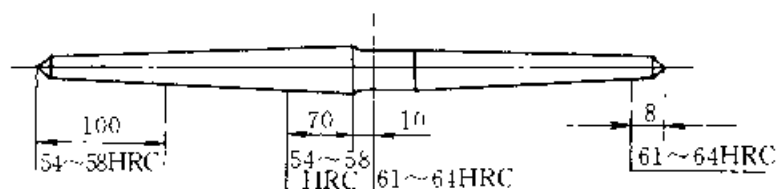


图 18-30 细纱锭杆

#### 18.4.1.4 钢领

钢领是对棉、毛、丝、绢、化纤等线的卷绕与加捻的专用件,本身不转动,是纱线拖着钢丝圈在钢领内高速运动的轨道(线速度达到  $35 \sim 40 \text{ m/s}$ )。钢丝圈在其内侧圆弧上干摩擦,运转时需要抗咬合、高硬度和耐磨损。钢领品种按形状分类有平面钢领、锥面钢领和竖边钢领等,如图 18-31,图 18-32,图 18-33 所示。其中平面钢领采用  $20$  钢制造,锥面钢领和竖边钢领采用铁基粉末冶金制造。钢领的使用寿命一般要求在 2 年左右。

#### 18.4.1.5 针筒

针筒是袜机和纬编机的主要部件,其功能是编织过程中正确安排织针的位置及织针往复运动的轨道。针筒外表面的针槽应沿外圆周上均匀分

布,光洁程度要求高,随着针织机的级数增多,针槽数量也相应增加,制造难度也相应随之增高。纬编机针筒内侧的针口因与织物摩擦,需要耐磨性好。针筒的种类很多,图 18-34 是镶钢片下针筒示意图

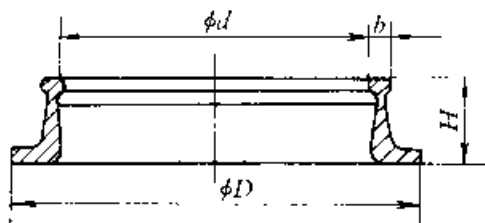


图 18-31 平面钢领

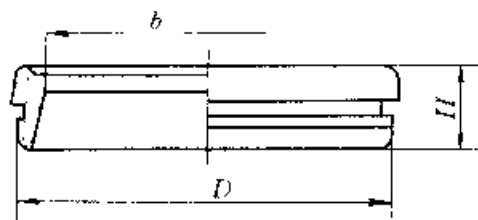


图 18-32 锥面钢领

袜机针筒采用  $38\text{CrMoAlA}$  或  $20\text{CrMnTi}$  钢制造,纬编机针筒采用  $45$  钢制造。

#### 18.4.1.6 三角

三角是针织机上应用最普遍、也是最有效的一种凸轮。它的功能是控制针在针槽中作上下运动,故是成圈机构中最基本和最主要的零件之一。三角需满足如下要求:

- (1) 控制针的动程,提高成圈的均匀性。
- (2) 表面形状能与针踵之间接触良好,尽可能避免针与三角的撞击。
- (3) 表面光洁,有良好的耐磨性。
- (1) 系列化与通用化。

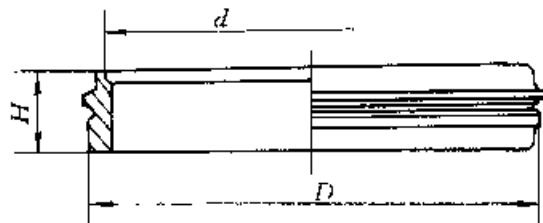


图 18-33 竖边钢领

三角的材料采用  $\text{Cr12MoV}$ ,经真空淬火后硬度达到  $62 \sim 65 \text{ HRC}$ 。

## 18.4.1.7 计量泵

计量泵是齿轮泵的一种,是化纤纺织丝工艺流程中的重要元件,其特定的功能是将熔融的丝液定量地输送到喷头。

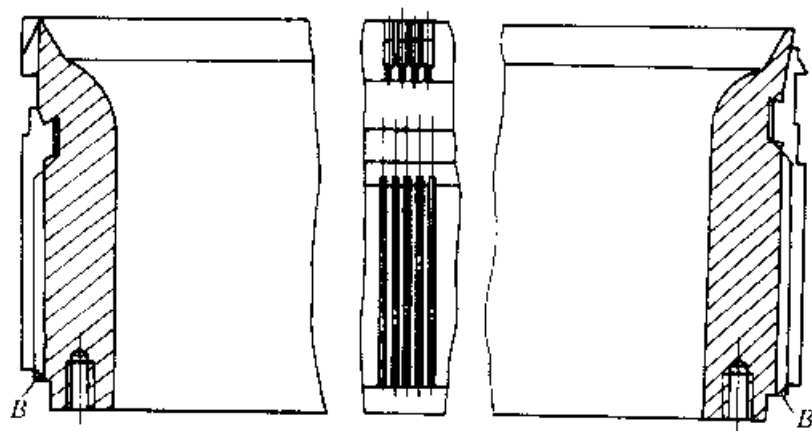


图 18-31 针筒

计量泵适用于低转速、高粘度和高压的工作条件,在输送涤、锦、丙纶熔融丝液时,工艺温度通常控制在 290℃ 左右;流量不均率严格控制在  $\leq 2.5\%$ ;不允许内间咬住、漏液、计量不准等不

良情况发生,制造精度要求很高。

计量泵一般承受的压力为 6MPa,较高压力有 35MPa。正常运转速度为 5~40r/min,公称输出量每转为 0.6~50L。

计量泵零件要求具有很高的尺寸稳定性、耐磨损、耐高温等性能,要求齿轮精度在 6 级以上。计量泵零件采用 W6Mo5Cr1V2 钢制造。

## 18.4.1.8 卷曲轮

卷曲轮是涤纶短丝后处理设备卷曲机上的重要零件,其功能为将平直的涤纶丝束在卷曲轮的作用下成卷曲状,被卷曲纤维的袋数最高为 100 万袋,线速度最高为 240m/min。卷曲轮要有具有耐磨、耐腐蚀及表面硬化层均匀等特性,它采用 4Cr13 不

锈钢制造。

表 18-49 列出纺织机械典型零件用材料及热处理技术条件。

表 18-49 纺织机械典型零件用材料及热处理技术条件

零件名称		选用材料	渗层深度 mm	技术要求		
				硬度	平直度(或圆度)	显微组织
针布	金属针布	60 钢		针尖 720~780HV 根部 $\approx 20\text{HRC}$		1.5~2 级马氏体
	弹性针布	55 钢		58HRC 以上 长度 1~1.5mm		
罗拉	细纱机罗拉	45 钢		齿部及轴承档 35~61HRC		
	精梳机罗拉	20CrMo 钢		$\geq 79\text{HRA}$		马氏体( $\leq 3$ 级)+粒状碳化物( $\leq 2$ 级)
钢领	钢领	20 钢	渗碳 $\geq 0.40$	81HRA 以上	平行度 0.08mm 圆度 0.25mm	回火马氏体(1~2级) +粒状碳化物(无网状)
	粉冶钢领	铁基粉冶金合金		$> 60\text{HRA}$		
针筒	袜机(针筒)	20CrMnTi 钢 38CrMoAlA	渗氮 0.06~0.08	700HV 以上		
	纬编机(针筒)	45 钢		50~55HRC		
锭杆	粗纱机锭杆	T10A 钢		见图 2-17-31 及 32	平直度 $< 1.0\text{mm}$	
	细纱机锭杆	GCr15 钢			平直度 $< 0.15\text{mm}$	

(续)

零件名称	选用材料	渗层深度 mm	技 术 要 求		
			硬度	平直度(或圆度)	显 微 组 织
计量泵	泵板	W6Mo5Cr4V2	$\geq 62\text{HRC}$		晶粒度 9.5~11 级
	齿轮、轴 轴承等	W6Mo5Cr4V2	$\geq 60\text{HRC}$		晶粒度 9.5~11 级
卷曲轮		4Cr13	50~55HRC 深 $> 5\text{mm}$		
三角		Cr12MoV	62~65HRC		

## 18.4.2 热处理工艺

### 18.4.2.1 针布

#### 1. 弹性针布

##### (1) 制造工艺路线

植针(自动车)→齿尖高频感应淬火→检验→包装→入库。

(2) 热处理工艺,针布钢丝按 GB8347—82 进行高频感应淬火。设备为 5kW、1100kHz 高频发生器,加热及淬冷装置如图 18-35。淬火加热温度 $\approx 900^{\circ}\text{C}$ ,水淬。

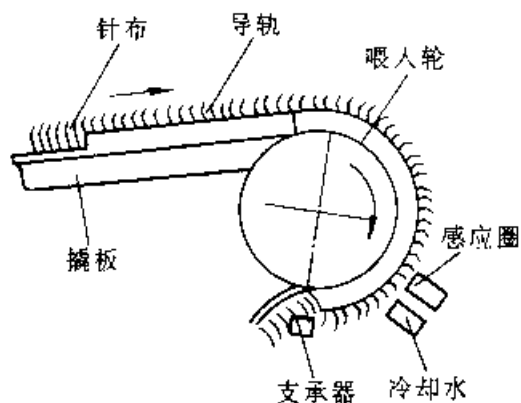


图 18-35 弹性针布淬火示意图

#### 2. 金属针布

##### (1) 制造工艺路线

线材退火→轧扁成形→退火→冲齿→齿尖淬火→回火→检验→包装→入库。

(2) 热处理工艺见图 18-36。

1) 坯料退火,光亮退火工艺温度  $700\sim 750^{\circ}\text{C}$ ,炉冷,硬度为  $220\sim 260\text{HBS}$ 。

2) 火焰淬火加热温度为  $840\sim 880^{\circ}\text{C}$ ,油冷,油浴回火温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 。

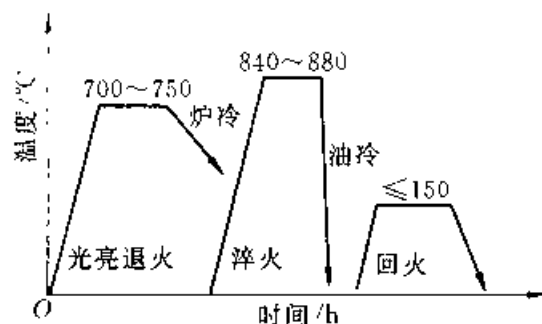


图 18-36 金属针布热处理工艺

金属针布冲齿淬火示意如图 18-37。

### 18.4.2.2 罗拉

#### 1. 细纱机罗拉

##### (1) 制造工艺路线

冷拉棒料→下料→矫直→磨外圆→车削成形→刨齿或轧齿→高频感应淬火→回火→清洗→矫直→磨外圆、端面及内孔→车削→镀硬铬→检验→入库。

(2) 热处理工艺,见图 18-38。高频感应淬火温度为  $850\sim 870^{\circ}\text{C}$ ,水冷,淬硬层深 $\approx 0.5\text{mm}$ ;回火温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ,保温 2h。淬硬后硬度梯度如图 18-39。

#### 2. 精梳机罗拉

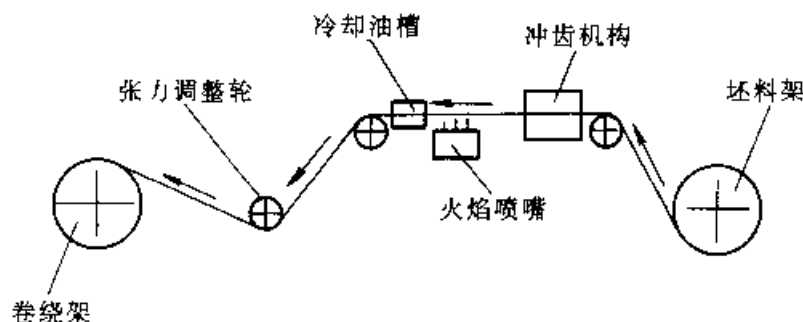


图 18-37 针布齿尖淬火示意图



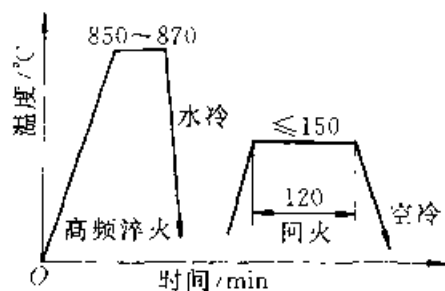


图 18-38 细纱机罗拉的高频感应淬火工艺

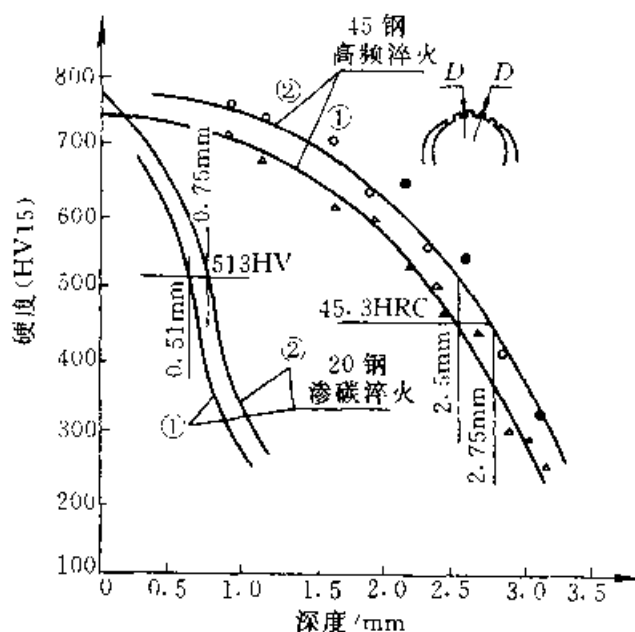


图 18-39 细纱机罗拉淬火后硬度梯度

#### (1) 制造工艺路线

冷拉棒料→下料→正火→矫直→车削→冷打沟槽→离子渗氮→检验→入库

(2) 离子渗氮热处理工艺，离子渗氮温度为 $\approx 520^{\circ}\text{C}$ ，每次处理周期为24h（其中保温10h），化合物层厚 $8\mu\text{m}$ 。硬度为 $>700\text{HV}0.2$ ，离子渗氮设备为LD-MC-75特长型离子渗氮炉。

(3) 碳氮共渗热处理工艺，精梳机罗拉采用20钢或低碳合金钢制造时，经碳氮共渗淬火后，表面硬度 $\geq 79\text{HRA}$ ，其工艺见图18-40所示。

#### 18.4.2.3 锭杆

##### 1. 粗纱机锭杆

#### (1) 制造工艺路线

热轧棒料→下料→车削→热处理→矫直→磨削→检验→入库。

(2) 热处理工艺，中段采用中频感应加热(8kHz)，温度为 $800\sim 830^{\circ}\text{C}$ ，水冷，回火温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ；锭尖、锭尾采用火焰淬火，水冷。

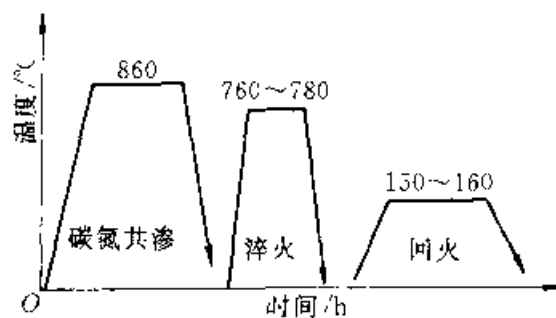


图 18-40 精梳机罗拉碳氮共渗工艺

#### 2. 细纱机锭杆

#### (1) 制造工艺路线

热轧棒材→下料→热轧成形→车削→热处理→检验→上油→入库。

(2) 热处理工艺 见图18-41。

#### 18.4.2.4 钢领

#### 1. 制造工艺路线

冷轧带钢→落料成形→冲孔→切边→压平→机械加工→热处理→滚光→检验→防锈→包装→入库。

2. 热处理工艺 钢制钢领的热处理为碳氮共渗，温度为 $860\sim 880^{\circ}\text{C}$ ，油淬； $150^{\circ}\text{C}$ 左右油浴回火。

#### 3. 铁基粉末冶金钢领

#### (1) 制造工艺路线

压制坯料→机械加工→热处理→滚光→检验→注油→检验→包装→入库。

(2) 热处理工艺同钢制钢领。

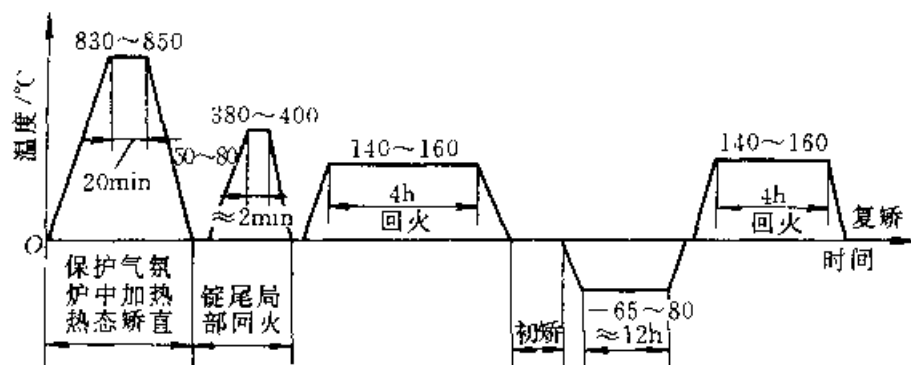


图 18-41 细纱机锭杆热处理工艺

## 18.4.2.5 针筒

## 1. 纬编机针筒

## (1) 制造工艺路线

45 钢锻件 → 退火 → 粗车 → 精车 → 铣槽 → 超声波感应淬火 → 检验 → 入库。

## (2) 热处理工艺

1) 锻件退火: 在炉内加热到  $850 \sim 890^{\circ}\text{C}$ , 保温 5 ~ 4h 降温到  $700 \sim 730^{\circ}\text{C}$ , 再保温 6 ~ 8h, 然后炉冷。

2) 内侧坡口的超声波感应淬火温度约  $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ , 水冷或固体二氧化碳冷却。图 18-42 为针筒内侧坡口淬火位置示意图。

## 2. 袜机针筒

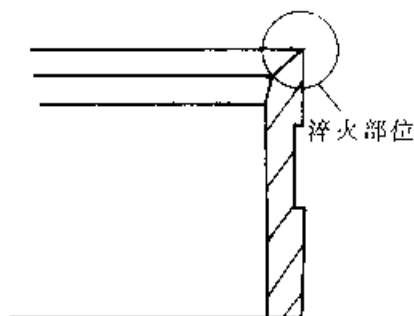


图 18-42 针筒内侧坡口淬火位置示意

## (1) 制造工艺路线

锻件 → 退火 → 粗车 → 去应力退火 → 精车 → 铣槽 → 渗氮(氮碳共渗) → 检验 → 入库。

(2) 热处理工艺, 锻件退火后硬度要求是 180HBS, 坯料去应力退火及氮碳共渗工艺见图 18-43。

## 18.4.2.6 计量泵

## 1. 制造工艺路线

型材 → 下料 → 机加工 → 热处理 → 精磨 → 去应力退火 → 精磨 → 装配 → 检验 → 入库。

2. 热处理工艺 计量泵全部零件均需进行热处理, 工艺规范如图 18-44 所示。

## 18.4.2.7 卷曲轮

## 1. 制造工艺路线

锻件 → 退火 → 粗加工 → 热处理 → 组装 → 粗磨 → 精磨 → 检验 → 入库。

## 2. 热处理工艺

(1) 锻件退火: 加热温度  $(820 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 保温 2h, 炉冷至  $400^{\circ}\text{C}$  左右出炉空冷。

(2) 表面淬火: 超声波感应加热, 温度为  $1020 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ , 水冷。回火温度为  $200 \sim 220^{\circ}\text{C}$  保温 4h 后空冷。

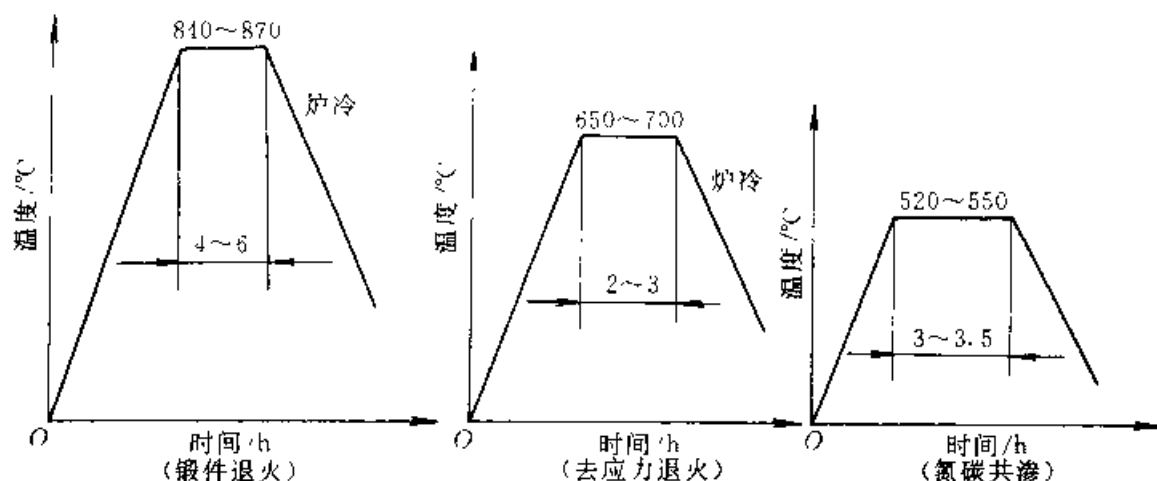


图 18-43 袜机针筒热处理工艺

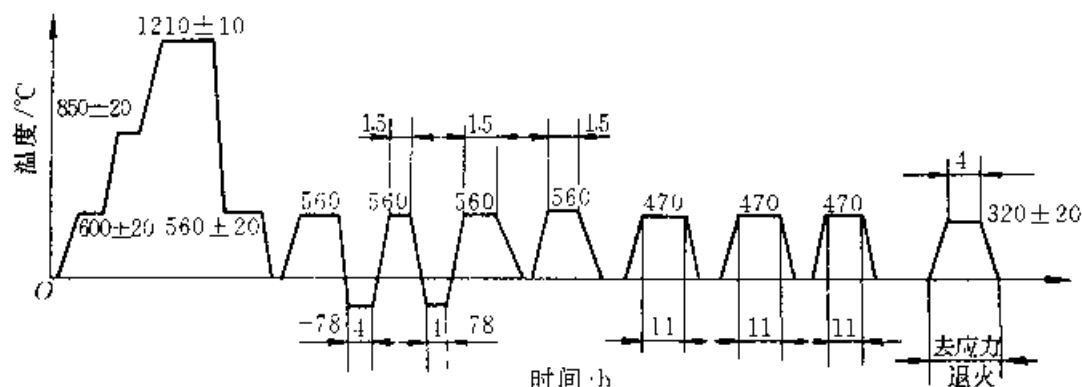


图 18-44 计量泵零件热处理工艺示意图

## 18.4.3 热处理质量检验与控制

纺织机械典型零件的热处理质量检验如表 18-50 所示。

## 18.4.4 常见热处理缺陷及防止方法

纺织机械典型零件常见的热处理缺陷及防止方法见表 18-51 所示。

表 18 50 典型零件热处理质量检验项目

零件名称	项 目	技 术 要 求	检 验 方 法
钢领 (钢质)	硬度	$>81.5\text{HRA}$	用锥氏硬度计检验,折算
	平行度	$<0.08\text{mm}$	专用检测仪器
	圆度	$<0.25\text{mm}$	
	深度	$\leq 0.4\text{mm}$	用金相显微镜抽检
锭 杆 (细纱机)	硬度	见图 18-30	洛氏硬度计抽检 1%
	平直度	$<0.15\text{mm}$	百分表,抽检 10%
	脆断性	由 1.2m 高度自由落下到铁板上,不允许脆断	100% 检验
	弹性	残余变形量 $\leq 0.01\text{mm}$	抽检
	显微组织	马氏体 3 级—粒状碳化物	
锭杆 (粗纱机)	硬度		洛氏硬度计抽检
	平直度	$<1.0\text{mm}$	百分表
金属针布	硬度	尖部长度 $<0.8\text{mm}$ , 720~780HV 背部 $\approx 20\text{HRC}$	维氏硬度计抽检 抽检
	齿尖显微组织	1.5~2 级马氏体	金相显微镜抽检
弹性针布	硬度	尖端长度 1~1.5mm, $>58\text{HRC}$	显微硬度计抽检,折算
	显微组织	2~3 级马氏体	金相显微镜抽检
袜机针筒	硬度	700HV 以上	显微硬度计抽检
	深度	0.06~0.08mm	金相显微镜抽检
纬编机针筒	硬度	50~55HRC	100% 检验
罗拉 (细纱机)	硬度	55~61HRC	洛氏硬度计抽检
	平直度	$<0.04\text{mm}$	百分表,100% 检验
罗拉 (精梳机)	硬度	$\geq 79\text{HRA}$	洛氏硬度计抽检
	全长变形量	$<0.5\text{mm}$	百分表 100% 检验
计量泵	泵板硬度 齿轮,轴等	$\geq 62\text{HRC}$ $\geq 60\text{HRC}$	检验,硬度是否均匀 洛氏硬度计抽检
卷曲轮	硬度	50~55HRC, 淬硬层深 $\approx 2\text{mm}$	GB5617—85

表 18-51 纺织机械典型零件常见的热处理缺陷及防止方法

零件名称	常见热处理缺陷	产生原因	防止方法
钢领	软点、硬度不均	多用炉进气管道漏气,富化气配比不合适	1) 不使管道及炉子漏气 2) 严格执行工艺规程
	畸变超差	内应力	3) 考虑去应力措施
	硬度不均	火焰没有调整合适	调整火焰
金属针布	包覆后,针尖组成的平面不平整	坯料硬度不均	检查坯料退火工艺规程执行情况
弹性针布	硬度不够	感应圈与针布间距离不合适,前进速度不合适	严格执行工艺规程
罗拉	硬度不够	1) 淬火温度不正常 2) 淬火机前进速度不对 3) 原材料混乱	检查工艺规程执行情况 复核原材料
锭杆	断裂	淬火温度不正常 原材料组织不合适	1) 严格执行工艺规程 2) 检查原材料组织
	不耐磨,显微组织不合适,硬度不够	1) 表层脱碳超差 2) 淬火介质不合适	严格执行工艺规程
纬编机针筒	硬度不够	感应圈与零件之间距离不合适,淬火介质的量不合适	严格执行工艺规程
计量泵	齿轮咬死	配合精度失调	加强检测
	不耐磨	硬度不均匀	严格执行工艺规程,温度要均匀
卷曲轮	不耐磨	硬度不均匀	严格执行工艺规程

## 参考文献

- 裘汲、何葆祥、汪曾祥. 小件的热处理. 北京:机械工业出版社,1984
- 上海手表厂. 手表零件应用城市煤气作为保护气氛的光亮热处理;控制气氛应用资料汇编. 北京:机械工业出版社,1974
- 上海自行车链条厂. 链条零件的自动化热处理;控制气氛应用资料汇编. 北京:机械工业出版社,1974
- 棉纺学. 北京:纺织工业出版社,1980
- 针织学. 北京:纺织工业出版社,1980
- 天津纺织工学院主编. 纺织机械设计原理. 北京:纺织工业出版社,1982

## 第 19 章 飞机零件的热处理

中国航空工业总公司 301 所 吴颖思  
北京航空材料研究院 王广生

### 19.1 飞机零件材料和热处理特点

飞机零件根据工作条件的不同,分为飞机机体和发动机零件两类。飞机机体零件的特点是重量轻、尺寸大、材料比强度高、并具有足够的抗冲击性能和良好的抗疲劳性能。目前飞机零件材料 60%~70% 采用铝合金,常用的热处理强化铝合金有:LC4, LC9, LY12 及 2021, 7075、7050 等牌号;20%~25% 采用结构钢,大多为高强度钢和超高强度钢,如 30CrMnSiA, 30CrMnSnNi2A, 40CrMnSiMoVA, 40CrNi2Si2MoVA (300M) 等。而发动机零件材料追求其高温性能,还要求优良的抗腐蚀性能和抗疲劳性能,主要采用铁基、镍基和钴基高温合金,也采用不锈钢、钛合金和结构钢。

为了使飞机飞行性能高、质量好、安全可靠,飞机零件要通过严格热处理,以获得最佳的综合性能。为确保航空热处理质量,实行热处理全面质量控制,不仅仅依靠最终检验,而且注重热处理全过程的质量控制,即在零件热处理生产中对影响质量的诸因素,如生产环境、设备和仪表、工艺材料、技术文件、工艺和生产过程、生产管理以及人员素质等实施全面而严格的控制。只有热处理全过程的质量控制与最终检验的相互结合才能保证零件的热处理质量。

航空零件热处理的另一个特点是热处理工艺复杂多样,以满足不同零件工作条件的需要。航空结构钢大量采用调质处理,以获得较高抗疲劳性能;广泛应用等温淬火,以获得良好综合性能,减少淬火畸变。为获得高耐磨性和抗疲劳性能,广泛采用渗碳、渗氮等化学热处理;为满足抗高温氧化、抗腐蚀性能要求,采用了渗金属(如渗铝、渗硅等)工艺;航空不锈钢中马氏体不锈钢采用淬火回火处理;沉淀硬化不锈钢采用固溶—调整处理时效工艺;高温合金热处理工艺主要是退火、固

溶、时效处理。铝合金、镁合金、钛合金及铜合金等均要以严格的工艺参数进行热处理,以达到使用性能要求。

航空热处理广泛采用真空热处理、保护气氛热处理、可控气氛化学热处理等先进热处理技术,确保高质量的热处理产品。

### 19.2 飞机起落架外筒的热处理

#### 19.2.1 服役条件及失效方式

起落架是供飞机起飞、着陆、滑行和停放使用的,属重要受力部件,直接影响着飞机的使用和安全。它不仅承受静载荷,而且承受很大的冲击力和疲劳载荷,特别是主起落架的外筒,在着陆瞬间承受着复杂交变的压力、拉力、扭力和弯矩;同时外筒还作为减震器的一个组件;由于内腔充气而承受较大的内压力,所以要求零件有较高的抗拉强度,具有足够的冲击韧度和抗疲劳性能;为了减轻结构的重量,要求有很高的比强度和良好的综合性能。起落架外筒大多是采用超高强度钢制造的焊接结构件或整体结构件(见图 19-1)。

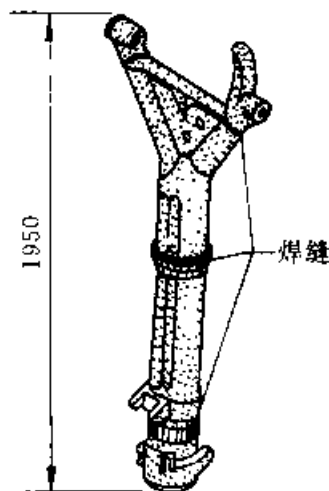


图 19-1 主起落架外筒示意图

## 19.2.2 使用材料和零件技术要求 (见表 19-1)

表 19-1 材料和零件技术要求

材 料	技 术 要 求						
	$\sigma_L$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$	$\phi$	$a_{K1}$	HRC	脱碳层 'mm
			(%)	(%)	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1/2}$		
			不 小 于				
30CrMnSiNi2A	1667 ± 100	—	9	45	590	45~50.5	≤0.15
40CrMnSiMoVA	1865 ± 100	—	8	35	590	50.5~53.5	≤0.075
40CrNi2Si2MoVA (300M)	1965 ± 100	1572 ± 100	8	30		52~55	≤0.075

## 19.2.3 工艺路线

锻造 → 正火 → 退火 → 机械加工 → 去应力退火  
→ (焊接 → 去应力退火 →) 淬火 + 回火 → 校正 → 去  
应力回火 → 精加工 → 去应力回火 → 喷丸 → 探伤 →  
表面处理 → 探伤 → 喷漆。

## 19.2.4 热处理工艺 (见表 19-2)

表 19-2 起落架零件热处理工艺

材 料	热 处 理 工 艺
30CrMnSiNi2A	1) (900 $\pm$ 10) $^{\circ}\text{C}$ 保温 1.5h, 油淬, 250~300 $^{\circ}\text{C}$ 回火空冷 2) (900 $\pm$ 10) $^{\circ}\text{C}$ 保温 1.5h, 硝盐等温 (180~300 $^{\circ}\text{C}$ ) $\times$ 1h, 热水冷却, 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 回火 3h 空冷
40CrMnSiMoVA	(920 $\pm$ 10) $^{\circ}\text{C}$ 保温 1h, 硝盐 等温 (180~230 $^{\circ}\text{C}$ ) $\times$ 1h, 热水 冷却, 250~300 $^{\circ}\text{C}$ 回火 3h 空 冷
40CrNi2Si2MoVA (300M)	(870 $\pm$ 10) $^{\circ}\text{C}$ 保温 1h, 油淬, 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 回火 2h, 回火两次

热处理过程中既要防止脱碳, 又要防止增碳,  
还要防止吸氢。热处理后检验硬度、力学性能、变  
形量、脱碳层及探伤。

## 19.2.5 常见热处理缺陷及预防措施 (见表 19-3)

表 19-3 常见热处理缺陷及预防措施

热处理 缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
强度、 硬度超差	材料化学成分波动	根据成分调 整热处理参数	按调整后的 参数进行重新 淬火
焊缝热 影响区裂 纹	1) 焊后未及 时放入热炉缓 热 2) 淬火时未 预热	1) 严格焊接 工艺操作 2) 控制升温 速率或增加预 热	补焊后重复 热处理 (限一 次)
淬火裂 纹和校正 裂纹	1) 复杂件未 预热或返淬次 数超过规定 2) 冷校正时 冲击应力过大 或校正操作, 校正 后未进行消除 应力回火	1) 严格按照 要求进行预热 和返淬 2) 正确进行 校正操作, 校正 后应及时进行 消除应力回火	
脱碳层 深度超过 要求	涂料过期或 配比不当, 或施 工不当; 保护气 控制不当; 真 空热处理的真 空度或压升率 不合适	严格控制涂 料质量和喷涂 工艺。 严格控制保 护气氛热处理 工艺参数。	去除超标脱 碳层

## 19.3 飞机蒙皮的热处理

### 19.3.1 服役条件和性能要求

飞机的外形由蒙皮形成和保持,它使飞机获得很好的空气动力特性。蒙皮分为上机翼、下机翼和机身蒙皮等,由于它承受空气动力作用,并将作用力传递给机体骨架,受力复杂。一般飞机蒙皮要求压缩强度高、刚度和抗应力腐蚀能力好,而下机翼和机身蒙皮除上述要求外,还要求有较高的疲劳强度、疲劳裂纹扩展抗力和断裂韧性。此外,蒙皮直接与外界接触,还要求表面光滑

### 19.3.2 使用材料和零件技术要求 (见表 19-4)

表 19-4 使用材料和零件技术要求

材 料	技 术 要 求		
	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ (%)
LY12	390~410	255~265	$\geq 15$
LC4	480~490	400~410	$\geq 7$
LC9	480~490	—	$\geq 7$

### 19.3.3 工艺路线

轧板→退火→清理→固溶热处理→拉伸成形→自然时效→机械加工→表面处理。

### 19.3.4 热处理工艺 (见表 19-5)

表 19-5 蒙皮热处理工艺

材料	热 处 理 工 艺
LY12	495~503℃ 保温 0.4h 水冷,室温自然时效 96h 以上
LC4	465~475℃ 保温 0.4h 水冷, (120±5)℃ 人工时效 24h 空冷
LC9	(460~475)℃ 保温 0.4h 水冷, (135±5)℃ 人工时效 8~16h 空冷

热处理后应检验力学性能、硬度、显微组织和表面状态。

### 19.3.5 常见热处理缺陷及预防补救措施 (见表 19-6)

表 19-6 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
显微组织不合格(过烧或包铝层扩散)	淬火温度偏高或保温时间过长,升温速度过慢	严格控制工艺温度,避免保温时间过长	
变形严重	1) 轧制应力过大 2) 装炉或淬火方法不当	1) 淬火后及时进行约 3% 的预拉伸 2) 严格按照规定挂装	1) 手工校正 2) 强制装配

## 19.4 压气机叶片的热处理

### 19.4.1 服役条件和性能要求

压气机主要由转子(包括压气机盘和工作叶片)、定子(包括内外环和整流叶片)及压气机匣组成。在飞行中,进入压气机的空气被压缩,随着增压比的增加气体温度不断升高,高压压缩比的压气机出口温度可达 550~650℃。

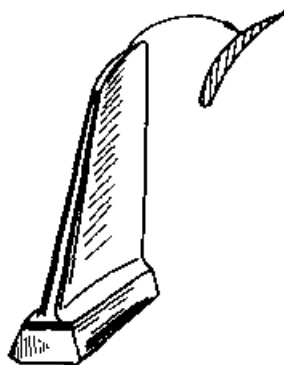


图 19-2 压气机  
工作叶片示意图

压气机部件中的叶片前几级温度低,一般用铝合金、结构钢或钛合金制造;后几级温度较高,采用高强度耐热钢、钛合金或高温合金制造。转子工作叶片(见图 19-2)承受着很大的惯性离心力及气体力载荷,这些载荷可引起叶片产生很大的拉伸、弯曲和扭转应力。此外,由于叶片上气流的速度、压力场不均匀,往往还引起叶片产生振动,

由于受热不均还会产生热应力。因而压气机工作叶片要求有足够的比强度和比刚度,以避免在工作转速范围内产生共振损坏;要求有较高的抗应力疲劳和抗热疲劳能力,以承受在气动力扰动和振动影响下的振动负荷和热应力;要求有较好的韧性和低的缺口敏感性,以抵御外物对它的冲击;还要求对大气有抗腐蚀和抗氧化的能力。

#### 19.4.2 使用材料及零件技术要求(见表 19-7)

表 19-7 使用材料及零件技术要求

材 料	技 术 要 求				
	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta_5$	$\psi$	(HBC)
	MPa	MPa (%)	(%)	(%)	
	本 小 于				
LY2	432	275	10		—
30CrMnSiA	横向 883	736	9	15	260~320
	纵向 794	622	4.5	21	
1Cr11Ni2W2MoV	叶身 1078	883	12	50	310~375
Cr17Ni2	叶身 834	638	12	45	254~287
1Cr12Ni2WMoVNb	叶身 932		13		283~323
GH4033	20°C 883	588	13	16	254~325
	700°C 687	—	15	20	
GH4169	1270	1033	12	15	≥316
TC1	588	—	15	30	270~365
TC6	20°C 950	—	10	30	
	450°C 588	—	—	—	≥332
TC11	1030~1225	930	9	30	270~365

#### 19.4.3 工艺路线

1) 压气机工作叶片工艺路线:

锻造→退火→淬火+回火→机械加工至成品。

2) 压气机导向叶片工艺路线:

①锻造导向叶片的工艺路线与工作叶片基本相同。

②冷轧导向叶片:

板材下料→退火→第一次粗轧→退火→第二次粗轧→退火→……→第  $n$  次精轧→第二次精轧→淬火+回火。

#### 19.4.4 热处理工艺(见表 19-8)

表 19-8 热处理工艺

材 料	热 处 理 工 艺	检 验 项 目
LY2	(505±5)°C 保温 2h 水冷, (180±5)°C 时效 16h 空冷	1) 100% 检验硬度
30CrMnSiA	(880±10)°C 保温 3~4h 油淬, (610±30)°C 回火 2~2.5h 水冷	2) 力学性能
1Cr11Ni2W2MoV	预备热处理: (730±10)°C 保温 3~4h 空冷; 然后 ≤850°C 入炉, (1010±10)°C 保温 1h 空冷, (580±20)°C 回火 3.5~4.5h 空冷	
Cr17Ni2	预备热处理: (700±10)°C 保温 3~4h 空冷; 随后 ≤850°C 入炉, (1020±10)°C 保温 1~1.5h 油冷, (530±10)°C 回火 4h 空冷	
1Cr12Ni2WMoVNb	冷轧成形, (700±10)°C 时效 2~3h 空冷	
GH4033	固溶热处理: ≤850°C 入炉, (1080±10)°C 保温 8h 空冷, (700±10)°C 时效 16h 空冷	
GH4169	固溶热处理: 950~980°C 保温 1h 空冷或油冷; (720±5)°C 时效 8h, 以 50°C/h 的冷却速度冷至 (620±5)°C 时效 8h	
TC1	退火: (730±20)°C 保温 1h 转入 600~650°C 保温 2h 空冷	
TC6	双重正火: (870~920)°C 保温 1h 空冷, 再加热到 660~650°C 保温 2h 空冷	
TC11	双重退火: 950~980°C 保温 1h 空冷, 再加热到 (530±10)°C 保温 6h 空冷	



19.4.5 常见热处理缺陷及预防补救措施  
(见表 19-9)

表 19-9 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救办法
力学性能不符合技术指标	1) 加热不足, 温度不当或过回火 2) 锻造冷却时堆冷	1) 严格控制工艺参数 2) 锻造后确保冷却充分	重新热处理
冷轧叶片表面产生麻点	1) 热处理前叶片清洗不干净 2) 热处理加热时表面产生氧化皮	1) 加强热处理前的清洗 2) 真空热处理时, 确保真空度和压升率符合要求	
Cr17Ni2 叶片晶间腐蚀	热处理冷却速度过慢	确保冷却速度符合要求	
钛合金叶片真空热处理时变色	1) 真空度不足 2) 设备压升率高 3) 氩气纯度不足	提高设备真空度及降低压升率, 保证氩气纯度	采用除氢处理或轻抛光
钛合金叶片氧化	热处理时被加热介质中的氢污染	降低介质中氢含量, 控制为微氧化气氛	采用除氢处理或轻抛光

气冲击所产生的很高弯曲载荷; 转子高速旋转时叶片产生很大离心力; 还承受热交变和振动载荷, 涡轮工作叶片是航空发动机中受力和受热最严峻的零件, 导向叶片的工作条件是温度高, 其温度比工作叶片高 100℃ 左右, 所受热温度既不稳定又不均匀, 因此, 要求有良好的抗热疲劳性能。也就是说, 工作叶片着重要求强度指标和承受动载荷能力, 而导向叶片着重在抗热疲劳性能, 但两者都要有高的抗氧化能力, 即高的热稳定性; 足够的热强度, 即能在高温下具有抗蠕变和断裂能力, 以及耐燃气腐蚀的能力。

涡轮叶片的叶身的构造与压气机工作叶片有些相似, 但由于涡轮的特殊工作条件, 叶身的几何形状具有某些不同之处, 如叶身厚度更大, 剖面更为弯曲 (见图 19-3), 为了降低承受的工作温度, 大部分为空心结构

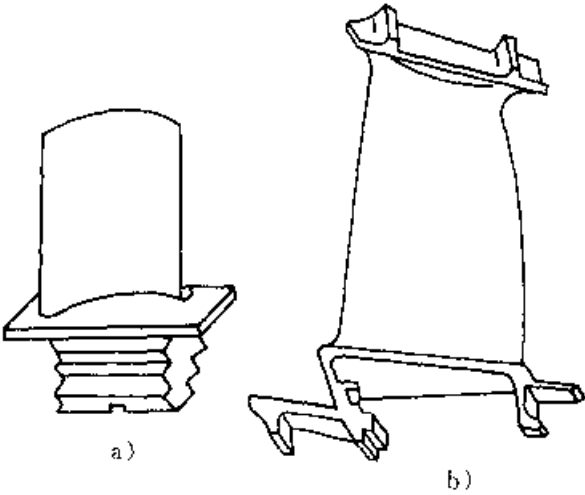


图 19-3 涡轮叶片示意图

a) 工作叶片 b) 导向叶片

19.5 涡轮叶片的热处理

19.5.1 服役条件及性能要求

涡轮叶片分为转子的工作叶片和静子的导向叶片。工作叶片在高温燃气气氛中工作, 承受着燃

19.5.2 使用材料及零件技术要求 (见表 19-10)

表 19-10 使用材料及零件技术要求

材料	技 术 要 求											备 注
	室 温 性 能				高 温 性 能							
	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	HBS	试验温 度/°C	$\sigma_b$ / MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	持 久		
	不 小 于						不 小 于			$\sigma_r$ MPa	$t/h$ (不 小于)	
GH4033	883	588	13	16	255~321	700	686	15	20	432	60	纵向
GH1037		—	—	—	269~341	800	667	6	10	—	—	—
						850	—	—	—	169	50	

(续)

技 术 要 求													
材料	室 温 性 能					高 温 性 能							备 注
	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta_5$	$\psi$	HBS	试验温度 ℃	$\sigma_b$	$\delta_5$	$\psi$	持 久			
	MPa	MPa	(%)	(%)			MPa	(%)	(%)	$\sigma$	b (不		
	不 小 于						不 小 于			MPa	小于)		
GH4049	—	—	—	—	302~363	900	569	10	14	216	80	—	
GH118	—	—	—	—	344~363	980	—	—	—	116	60	—	
GH220	1044	—	10	—	285~341	950	562	16	18	—	—	—	
						910	—	—	—	216	60	—	
						800	785	2.0	3.0	—	—	—	
K403	—	—	—	—	750	—	—	—	615	50	—		
					800	665	1.0	8.0	—	—	—		
K406	—	—	—	—	—	800	—	—	—	270	50	—	
						850	—	—	—	—	—	—	
K438	—	—	—	—	343	800	785	3	3	—	—	—	
						850	—	—	—	365	50	—	
K17F	—	—	—	—	378~438	900	880	4	4	355	70	—	
K18B	760	690	3	—	—	760	—	—	—	530	50	—	
K23	850	750	3	—	HRC37~41	850	—	—	—	325	32	—	

19.5.3 工艺路线

1. 变形高温合金制造的涡轮叶片

(1) 锻造叶片：毛坯→固溶热处理→时效处理→粗加工→涂渗防护层→精加工

(2) 锻造叶片：毛坯→固溶热处理→时效处理→精加工。

2. 铸造高温合金制造的涡轮叶片：

(1) 铸造毛坯叶片→固溶热处理或固溶热处理+时效处理→粗加工→涂渗防护层→精加工。

(2) 铸造无余量叶片（包括定向结晶或单晶叶片）→真空（或保护气氛）中固溶热处理或固溶热处理+时效处理→涂渗防护层→精加工。

涂渗防护层工艺亦可作为最终工序。

19.5.4 热处理工艺（见表 9-11）

表 19-11 热处理工艺

材 料	热 处 理 工 艺				其 他
	工 序	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式	
GH4033	固溶热处理	1080±10	8	空冷	
	时效	700±10	16	空冷	
GH4037	一次固溶热处理	1180±10	2	空冷	—
	二次固溶热处理	1050±10	4	空冷	
	时效	800±10	16	空冷	
GH4049	一次固溶热处理	1250±10	2	空冷	包埋法渗铝：装箱后 500℃ 入炉，保温 2h，升至 (850±10)℃ 保温 (10±3) h，随箱冷却；950℃ 扩散 2h，随箱冷却（渗层深度：0.005~0.02mm）
	二次固溶热处理	1150±10	4	空冷	
	时效	850±10	8	空冷	

(续)

材 料	热 处 理 工 艺				其 他
	工 序	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式	
GH118	固溶热处理	1190±10	1.5	空冷	—
	时效	1150±10	6	空冷	
	次固溶热处理	1220±10	4	空冷	
	二次固溶热处理	1050±10	4	空冷	
GH220	时效	950±10	2	空冷	为标准热处理工艺
	一次固溶热处理	1220±10	4	空冷至 1070±30℃, 转入另炉	
	二次固溶热处理	1070±10	2.5	空冷	
	时效	950±10	2	空冷	
K403	固溶热处理	1210±10	4	空冷	包埋式固体渗铝氩气保护
	渗铝	950	2		
	扩散处理	1000	2		
K406	时效	980±10	5	空冷	—
K438	固溶热处理	1120±10	2	空冷	—
	时效	850±10	24	空冷	
K17F	一次固溶热处理	1180±10	2	空冷	—
	二次固溶热处理	1080±10	4	空冷	
	时效	850±10	24	空冷	
	渗铝后扩散处理	950	6~8		
K18B	固溶热处理	1180	2	空冷	—
K23	固溶热处理	1190±10	15min	于 45min 内炉冷至 1000℃再空冷	—

注：热处理后检验硬度和力学性能，渗铝者应检验渗层深度。

### 19.5.5 常见热处理缺陷及预防补救措施 (见表 19-12)

表 19-12 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
叶片表面严重氧化	加热介质中含氧或水量过高	1) 加热采用高纯度氩气 (露点在 -46℃ 以下) 保护 2) 采用真空加热	有余量的叶片可抛光去掉氧化层
表面合金元素贫化	真空加热时表面合金元素逸出	采用适当的真空度	—
叶片表面出现点腐蚀	1) 处理前表面未清洗干净 2) 含硫物质沾污表面, 使表面形成低熔点物 3) 残碱对镍基合金有强腐蚀作用	1) 加强清洗工作, 避免表面被腐蚀物沾污 2) 加强对加热设备工作室的清理 3) 清洗好的叶片禁止赤手接触	—
叶片变形	1) 加热速度太快 2) 第二相溶解析出造成体积效应	采用分级加热	—

(续)

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
渗铝件渗层过厚、漏渗、渗层不连续、氧化	1) 渗铝时间超长, 温度过高 2) 不渗铝部位保护欠佳 3) 渗箱中空气排除不净	1) 准确控制渗铝时间和温度 2) 不渗部位必须保护可靠 3) 沉积和扩散过程中保证空气无法进入	退除渗层, 重渗

## 19.6 涡轮盘的热处理

### 19.6.1 服役条件和性能要求

涡轮盘是发动机的重要热端部件之一。发动机工作时高速旋转产生的离心力, 使盘承受大的拉应力; 而转子叶片此时产生的离心力作用在盘的榫槽, 使之也受拉应力; 盘还承受温差引起的热应力。一般认为: 中心轮毂部位温度低, 受离心力大; 榫齿部位温度高, 榫槽受拉应力大。因此涡轮

盘要求具有足够的屈服强度、抗拉强度和高的塑性; 还应具有高的抗热疲劳性能, 具有适当的蠕变强度、持久强度, 良好的抗高温氧化及燃气腐蚀性性能。一般采用铁基或镍基高温合金制造。

涡轮盘工作中易产生轮心炸裂、榫齿疲劳掉块, 腹板及封严齿开裂等故障。

### 19.6.2 使用材料及零件技术要求 (见表 19-13)

表 19-13 使用材料及零件技术要求

技 术 要 求												备 注
材 料	室 温 性 能					高 温 性 能						
	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	HBS	试验温 度/°C	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	持久性能		
	不 小 于						不 小 于			$\sigma$ MPa	$t \cdot b$ (≥)	
GH2036	833	588	15	20	277~311	650	—	—	—	373	35	
GH2132	930	620	20	40	255~321	650	735	15	20	392	100	
GH2135	883(801)	588(588)	13(10)	16(13)	255~321	750	—	—	—	343	50	
GH761	1078	882	10	13	271~388	650	931	8	10			
						700	—	—	—	441	50	
GH901	1130	810	9	12	302~388	575	960	8	—			
						650	—	—	—	621	23	
GH4033	883	588	13	16	255~321	700	—	—	—	451(432)	40(60)	
GH4133	1060	735	16	18	285~363	750	—	—	—	291(343)	100(90)	
GH698	1128	706	17	19	285~341	750	—	—	—	412(363)	50(100)	
GH710	980	814	4	—	378~393	980	—	—	—	120	30	
GH500	1100	750	10	—	≥350HV	850	—	—	—	216	50	
K418	735	685	5	—	33~37HRC	750	—	—	—	605	40	铸造数据
K19H			—		366~385	760	—	—	—	695	单个最小寿命 40, 平均最小寿命 80	

## 19.6.3 工艺路线

## 1. 变形高温合金涡轮盘制造工艺流程

(1) 锻造盘坯→固溶热处理+时效处理→机械加工→消除应力处理→精加工。

(2) 锻造盘坯→退火→粗加工→固溶热处理+时效处理。

(3) 锻造盘坯→固溶热处理→机械加工→时效处理→机械加工至成品。

## 2. 铸造高温合金整体涡轮制造工艺流程

铸造毛坯→固溶热处理+时效处理→机械加工至成品。

## 19.6.4 热处理工艺(见表 19-14)

表 19-14 热处理工艺

材 料	热 处 理 工 艺				检 验 项 目
	工 序	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	
GH2036	固溶热处理	1140±10	80min	水冷	1) 100%检验硬度 2) 室温力学性能 3) 高温力学性能
	分级时效	660±10	16	继续升温	
		780±10	14~8	空冷	
GH2132	固溶热处理	990±10	1~2	油冷	
	时效	710±10	12~16	空冷	
GH2135	固溶热处理	1140±10	4	空冷	
	一次时效	830±10	8	空冷	
	二次时效	650±10	16	空冷	
GH761	固溶热处理	1120±10	2	水冷	
	一次时效	850±10	4	空冷	
	二次时效	750±10	24	空冷	
GH901	固溶热处理	1090±10	2~3	水冷或油冷	
	一次时效	775±5	4	空冷	
	二次时效	710±10	24	空冷	
GH4033	固溶热处理	1080±10	8	空冷	
	时效	750±10	16	空冷	
GH4133	固溶热处理	1080±10	8	空冷	
	时效	750±10	16	空冷	
GH698	一次固溶热处理	1120±10	8	空冷	
	二次固溶热处理	1000±10	4	空冷	
	时效	775±10	16	空冷	
GH710	一次固溶热处理	1170±10	4	空冷	
	二次固溶热处理	1080±10	4	空冷	
	一次时效	845±10	24	空冷	
	二次时效	760±10	16	空冷	
GH509	一次固溶热处理	1120±10	2	空冷	
	二次固溶热处理	1080±10	4	空冷	
	一次时效	845±10	21	空冷	
	二次时效	760±10	16	空冷	
K418	固溶热处理	1180±10	2	空冷	
	时效或铸态	930±10	16	空冷	
K19H	时效	870±10	16	空冷	

19.6.5 常见热处理缺陷及预防补救措施  
(见表 19-15)

表 19-15 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
开裂	加热速度过快	采取分级加热,使轮盘充分预热、热透	
粗晶、混晶	常产生于带轴的 I 级盘,主要由于锻造时变形不均匀所致	改进锻造工艺,使变形量超过临界变形量	
过热、过烧	固溶热处理温度不当	严格控制工艺参数	
持久性能偏低	固溶热处理冷却过慢引起析相长大	针对各种合金选择适当的冷却方式	重新固溶热处理

19.7 涡轮轴的热处理

19.7.1 服役条件和性能要求

涡轮轴是涡轮发动机的主轴,它与压气机轴通过联轴器联接,涡轮力矩通过涡轮轴传给压气机。涡轮轴主要承受扭转力矩、轴向载荷和弯曲力矩,因此要求有较高屈服强度和疲劳强度,其热端要有一定的抗氧化性能、耐腐蚀性能和蠕变强度。涡轮轴示意图见图 19-1。

19.7.2 使用材料和零件技术要求(见表 19-16)

19.7.3 工艺路线

(1) 锻造毛坯→正火+退火→粗加工→淬火+回火(或固溶热处理→时效处理)→机械加工至成品。

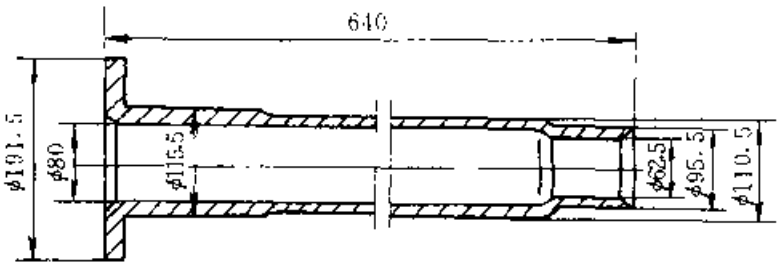


图 19-1 涡轮轴示意图

表 19-16 使用材料和零件技术要求

材料	技 术 要 求									
	室 温 性 能					高 温 性 能				
	$\sigma_t$ MPa	$\sigma_{-2}$ MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	HBS	试验温 度/℃	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	持久性能
	不 小 于						不 小 于			
40CrNiMoA	980	835	12	55	293~341	—	—	—	—	—
1Cr11Ni2W2MoV	880	735	15	55	269~321	—	—	—	—	—
9Cr17Ni4Co4Nb	1090	865	13	55	311HRC	—	—	—	—	—
GH901	1130	810	9	12	302~388	575	960	8	—	—
						650	—	—	621	23
GH4169	1270	1033	12	15	≥346	650	1005	12	—	—

表 19-17 涡轮轴的热处理工艺

材 料	热 处 理 工 艺				检 验 项 目
	工 序	加 热 温 度 / $^{\circ}\text{C}$	保 温 时 间 /h	冷 却 方 式	
40CrNiMoA	淬火	$850 \pm 10$	-	油淬	1) 100% 检验硬度 2) 力学性能
	回火	$650 \pm 5$	-	水冷或空冷	
1Cr11Ni2W2MoV	预备热处理	$1000 \sim 1020$	-	空冷	
		$700 \pm 20$	-	空冷	
	最终热处理	$1100 \pm 10$	-	油淬	
		$660 \sim 710$	-	空冷	
0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶热处理	$1040 \pm 20$	-	水冷或空冷	
	时效	$580 \pm 10$	4	空冷	
GH901	固溶热处理	$1090 \pm 10$	2~3	水冷或油冷	
	一次时效	$775 \pm 5$	4	空冷	
	二次时效	$710 \pm 10$	24	空冷	
GH4169	固溶热处理	$950 \sim 980$	1	油冷或水冷	
	分级时效	$720 \pm 5$	8	以 $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的冷速 冷至 $620^{\circ}\text{C}$	
		$620 \pm 5$	8	空冷	

(2) 锻造毛坯→调质(或固溶热处理—时效处理)→机械加工→消除应力退火→机械加工至成品。

#### 19.7.4 热处理工艺(见表 19-17)

#### 19.7.5 常见热处理缺陷及预防补救措施(见表 19-18)

表 19-18 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救方法
40CrNiMoA 钢晶粒粗大	热处理淬火温度过高、高温加热时间过长	严格控制热处理工艺	重新热处理, 先高温回火, 再淬火回火处理
GH4169 性能不合格	时效时从 $720^{\circ}\text{C}$ 冷至 $620^{\circ}\text{C}$ 时冷速过快, 时效不充分	严格控制时效工艺	重新时效

## 19.8 燃烧室的热处理

### 19.8.1 服役条件和性能要求

燃烧室是把喷嘴喷出的燃料与压气机引来的压缩空气混合进行燃烧的地方, 是发动机的重要部件之一。典型火焰筒示意图见图 19-5。

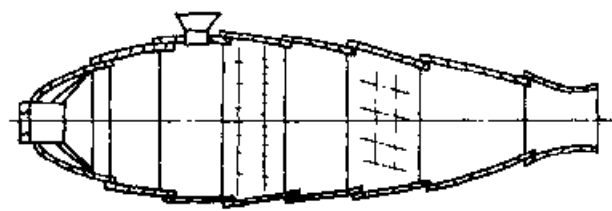


图 19-5 典型火焰筒示意图

燃烧室所处的工作条件是十分恶劣的, 除了承受由于气体压力、轴向力产生的静载荷外, 还要承受由于压气机和涡轮工作时或燃烧室燃烧过程中引起空气流或燃气脉动所产生的交变力, 这个交变力作用在燃烧室壁上, 产生交变应力, 容易产生疲劳裂纹; 燃烧室壁在高温下工作, 且温度不均匀, 产生很大的热应力, 容易产生挠曲、变形; 发动机在各种不同飞行条件下及不同转速下工作, 燃烧室的工作状态变化激烈, 温度急骤升降, 承受着热冲击, 使之易烧蚀和开裂。

表 19-19 使用材料和零件技术要求

材料	技 术 要 求									
	室 温 性 能					高 温 性 能				
	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta_5$	$\psi$	HBS	试验温 度/℃	$\sigma_b$	$\delta_5$	$\psi$	持久性能 $\sigma_r$ MPa $t/h$ ( $\geq$ )
	MPa	MPa	(%)	(%)			MPa	(%)	(%)	
1Cr18Mn8Ni5N	635		10							
GH1016	735		35			900	186	40		
GH1140	673		40	45		800	223	40		
GH99	1128		30			900	373	15		118 30
GH163	1030		15			700	785	10		
GH3030	686		30			700	294	30		
GH3039	735		40			800	245	40		
GH3044	735		10			900	196	30		
GH3128	735		10							
GH188	856	380	15		$\leq 292$	815				165 23

(续)

因此燃烧室应有足够的塑性、良好的抗热冲击、抗热疲劳及抗畸变的性能,还要有高的抗氧化及防止燃烧产物腐蚀的化学稳定性。

### 19.8.2 使用材料和零件技术要求(见表 19-19)

### 19.8.3 工艺路线

板材冲压成形→中间退火→冲压成形→零部件组焊→消除应力退火→组焊→固溶热处理→机械加工至成品。

### 19.8.4 热处理工艺(见表 19-20)

表 19-20 热处理工艺

材 料	固溶热处理工艺
1Cr18Mn8Ni5N	(1070±10)℃ 水冷或空冷
GH1016	(1160±10)℃ 空冷
GH1140	1050~1090℃ 空冷
GH99	1120~1160℃ 空冷
GH163	1040~1080℃ 空冷, (750±10)℃ 保温 16h 空冷
GH3030	980~1020℃ 空冷

材 料	固溶热处理工艺
GH3039	1050~1090℃ 空冷
GH3044	1120~1160℃ 空冷
GH3128	1140~1180℃ 空冷
GH188	(1180±10)℃ 空冷

### 19.8.5 常见热处理缺陷及预防补救措施(见表 19-21)

表 19-21 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救办法
零件表面严重氧化	1) 加热时,保护气氛量不足,或重氧化管道泄漏 2) 真空度不足,压升率高	1) 加强设备检查及检修 2) 操作时加强生产过程的检查	允许情况下可采用喷砂、喷丸清理
零件表面腐蚀	1) 热处理前未清理干净 2) 加热炉内有腐蚀介质 3) 装夹夹具未具清理干净	1) 应加强处理前的清洗和清理 2) 清理加热炉 3) 清理装夹夹具	



(续)

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救办法
变形	1) 成形和焊接应力未消除 2) 装炉、装挂不当	1) 热处理前增加消除应力处理 2) 热处理时采用正确装挂方式	进行校正,校正后力回火

19.9 航空齿轮的热处理

19.9.1 服役条件和性能要求

航空齿轮是用来传递动力和改变运行速度的,因此在功率传递机构如减速器中,使用各种形式的齿轮。齿轮工作时一对啮合的齿轮面之间相互滑动,从而产生很大的摩擦力,容易造成齿面磨损;齿轮间的接触,产生了接触应力,一旦超过材料疲劳极限,就会造成齿轮的接触疲劳破坏;而轮齿根部还承受交变的弯曲应力,易造成弯曲疲劳破坏。为此,要提高齿面的塑变抗力,即提高齿面的硬度,可采用表面硬化处理,一般是渗碳、碳氮共渗或渗氮。为了提高接触疲劳强度,除使渗层有一定深度外,还应控制渗层碳化物的形态、大小和分布状况。提高轮齿弯曲疲劳强度的基本途径是

提高齿根处材料的强度,因此,航空上常用齿轮钢一般是含碳量范围  $w(C)$  为 0.10%~0.20% 的高淬透性钢,渗碳后进行淬火、低温回火使用。渗碳层深度可取模数的 15%~20%,或取节圆处齿厚的 10%~20%。齿轮示意图见图 19-6。

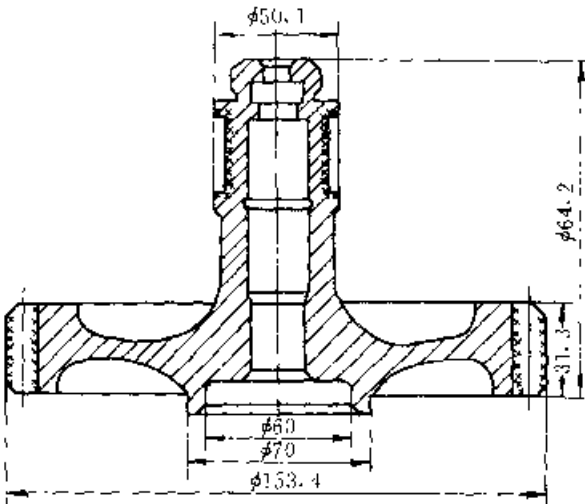


图 19-6 齿轮示意图

19.9.2 常用材料和零件技术要求(见表 19-22)

表 19-22 常用材料及技术要求

材 料	技 术 要 求					HBS
	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{-1}$ /MPa	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$a_K$ /kJ·mm <sup>2</sup>	
	不 小 于					
15CrA	590	390	13	50	885	170~302
12CrNi3A	885	635	12	55	1175	262~363
12Cr2Ni4A	1030	785	12	55	980	293~388
14CrMnSiNi2MoA	1080	885	12	55	980	321~415
18Cr2Ni4WA	1030	785	12	50	1175	321~388
32CrMoA1A	930	785	13	50	980	285~321
	980	835	13	50	880	292~302

## 19.9.3 工艺路线

对于负荷大的航空齿轮采用锻件毛坯,而小模数、小负荷的齿轮则采用棒材加工。其工艺路线如下:

(1) 锻件毛坯 → 正火或调质处理 → 机械加工 → 渗碳及渗后热处理(淬火+低温回火) → 机械加工至成品。

(2) 锻件毛坯 → 正火或调质处理 → 机械加工

→ 镀铜(非渗碳表面) → 渗碳 → 除铜 → 淬火 + 低温回火 → 机械加工至成品。

(3) 锻件毛坯 → 正火或调质处理 → 机械加工 → 渗碳 → 机械加工 → 淬火 + 低温回火 → 机械加工至成品

(4) 锻件毛坯 → 正火 + 调质处理 → 机械加工 → 镀锡或镀铜 → 渗氮 → 机械加工至成品。

## 19.9.4 热处理工艺(见表 19-23)

表 19-23 热处理工艺

材料	渗碳工艺或预备热处理工艺	最终热处理工艺或渗氮工艺
15CrA	渗碳: $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保护箱冷却	一次淬火: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬 二次淬火: $780 \sim 810^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $(160 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 空冷
12CrNi3A	渗碳: $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保护箱冷却	一次淬火: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬 二次淬火: $780 \sim 810^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $(160 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 空冷
12Cr2Ni4A	1) 普通渗碳工艺 $(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 渗剂: 甲醇+丙酮, 5~8h, 炉冷。当硬度 $\geq 38\text{HRC}$ 时进行高温回火 $(580 \pm 20)^{\circ}\text{C}$ 3~4h 2) 氮基渗碳工艺: $\leq 800^{\circ}\text{C}$ 通入氮气+甲醇, $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 1.2\text{h}$ 通入氮气和渗剂 $w(\text{苯}): w(\text{甲醇}) = 2:1$ , 保持 $(925 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 碳势 $w(\text{C}) 1.15\%$ , 后期碳势 $w(\text{C}) 0.8\%$ , 空冷或炉冷	一次淬火: $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬 二次淬火: $(790 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $(160 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 空冷
14CrMnSiNi2-MoA	$(920 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 渗碳 8~12h 渗剂为甲醇+乙酸乙酯	淬火: $800 \sim 840^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 空冷
18Cr2Ni4WA	1) 普通渗碳工艺 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 1.2\text{h}$ 滴入渗剂 $w(\text{苯}): w(\text{甲醇}) = 2:1$ , $(925 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 继续滴入渗剂渗碳, 空冷或箱冷 2) 氮基渗碳工艺 $\leq 800^{\circ}\text{C}$ 通入氮气和甲醇, $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 1.2\text{h}$ 通入氮气和渗剂 $w(\text{苯}): w(\text{甲醇}) = 2:1$ , 保持 $(925 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ , 碳势 $w(\text{C})$ 为 $1.15\%$ , 后期 $w(\text{C}) 0.8\%$ , 空冷或箱冷	淬火: $840 \sim 870^{\circ}\text{C}$ 油淬 回火: $150 \sim 170^{\circ}\text{C}$ 空冷
38CrMoAlA	$(940 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 空冷正火 $(930 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬或温水淬 $600 \sim 670^{\circ}\text{C}$ 油冷或空冷	$500 \sim 510^{\circ}\text{C}$ 28~30h 通氮渗氮, 氮分解率 20%~30% $525 \sim 535^{\circ}\text{C}$ 30~35h 通氮渗氮, 氮分解率 30%~50%

## 19.9.5 常见热处理缺陷及预防补救措施(见表19-24)

表 19-24 常见热处理缺陷及预防补救措施

热处理缺陷	产生原因	预防措施	补救办法
渗层深度偏浅	1) 设备密封不好 2) 装炉量过多 3) 渗碳(氮)温度偏低 4) 气氛碳(氮)势偏低 5) 零件表面污染	1) 渗前应检查设备密封性 2) 控制好装炉量,注意装夹方法 3) 维持好炉内碳势 4) 校准温度 5) 调整碳(氮)势到达要求 6) 入炉前认真清洗零件	进行补渗
渗层超深	1) 渗温超高 2) 渗时间超长 3) 工艺设计不当	1) 正确制定工艺 2) 加强仪表校验	
表面硬度偏低	1) 表面碳(氮)浓度偏低 2) 渗后冷却或淬火时表面脱碳	1) 加强炉气碳(氮)势控制 2) 冷却罐内加少量渗碳剂;淬火时采取保护措施	在深度允许的情况下可补渗
心部硬度超差	1) 心部硬度偏低,是因为铁素体过多 2) 心部硬度过高是由于淬火温度偏高	1) 降低淬火温度 2) 渗碳后增加高温回火	1) 重新淬火 2) 进行冷处理
渗碳层出现网状碳化物	1) 渗碳后冷却速度太慢 2) 渗碳温度过高	增加渗碳后冷却速度	增加正火处理
渗碳层碳化物呈块、杆及多边形状	1) 渗碳时碳势过高,扩散时间短 2) 原始组织晶粒粗大 3) 渗碳温度偏高	严格控制炉温、碳势,调整渗碳与扩散时间的比例	采用高温正火
渗氮层出现鱼骨状氮化物	零件表面脱碳层未加工去除干净	协调冷却工艺,确保彻底去除脱碳层	
零件变形	1) 可发生在渗碳过程,也可发生在淬火过程 2) 装炉或装夹不当 3) 机加工应力过大 4) 零件截面相差太大	1) 正确装炉和装夹,必要时设计吊挂夹具 2) 渗碳前增加消除加工应力处理	在允许情况下进行校正,校正后增加磁粉检验和回火
漏渗	1) 保护层太薄 2) 炉内气氛中有害介质破坏了防渗层	1) 控制镀、涂防渗层质量 2) 加强控制气氛	

## 参 考 文 献

- 1 《航空制造工程手册》总编委会,航空制造工程手册:热处理分册。北京:航空工业出版社,1993
- 2 中国航空材料编辑委员会,中国航空材料手册:第一、二、三、四册。北京:中国标准出版社,1988
- 3 北京航空材料研究所,航空材料学。上海:上海科学技术出版社,1985