

本书对零件在加热、淬火、回火、表面淬火以及化学热处理工艺过程中出现的常见热处理缺陷进行了归纳，重点对缺陷产生的原因、影响因素等进行了分析和探讨，同时提出了预防和改进的措施。另外结合常见热处理缺陷进行了实例分析，具有较强的参考价值 and 指导作用。

本书可供热处理企业和科研单位的技术工人、管理人员解决工程实际问题时参考，也可供大中专院校的机械工程设计和热处理专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理常见缺陷分析与对策/王忠诚编著. —北京: 化学工业出版社, 2007.9

ISBN 978-7-122-01145-9

I. 热… II. 王… III. 钢材-热处理-缺陷-分析
IV. TG162.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 138230 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 蒋宇

文字编辑: 张绪瑞
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 北京市兴顺印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张 11 字数 296 千字

2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为了满足机械零件的工作需要，确保符合设计和使用要求，要对零件进行必要的热处理，使其具有良好的组织结构和理想的力学性能。热处理也是提高零件产品质量和使用寿命的重要手段和方法，因此零件的热处理在整个加工过程中占有十分重要的地位。与此同时新工艺、新设备、新技术的不断涌现，也给零件热处理产品质量的提高奠定了坚实的基础，提供了更为广阔的技术手段和工艺方法，必将为减少机械零件的热处理缺陷做出重要贡献。

目前我国的机械设计人员、热处理技术人员迫切需要进行系统的热处理专业知识的学习，以适应不断发展的机械行业的要求。这样不仅有助于加深对基础理论的理解，同时可正确指导生产过程中零件的设计和热处理操作，对零件的选材、零件的形状设计、热处理的具体技术要求等有重要的帮助作用，同时便于发现、分析和判断可能出现或已经出现的热处理质量或缺陷，从人、机、料、法、环、检等六方面入手，采用必要的硬度检测、金相分析、成分化验等先进的检测手段，找到产生缺陷的具体原因，对症下药，为今后零件的热处理连续作业提供可靠的质量保证。

本书正是基于我国机械行业的热处理现状编写而成的。书中比较详尽地介绍了钢铁零件在热处理过程中缺陷产生的原因和防止措施，从理论到实践进行了系统的分析和探讨，因此本书将为从事零件设计和热处理的技术人员提供必要的帮助。

本书围绕着零件的热处理缺陷的产生共分六章进行编写，第1章简要介绍了常见热处理缺陷以及分析方法等；第2~6章详细分析了零件在加热过程、淬火过程、回火过程、表面热处理和化学热处理过程中产生缺陷的种类与原因，同时提出了对预防热处理缺陷所采取的措施和方法。

笔者既从事过刀具和模具的普通热处理，又对化学热处理有深入的研究，在立足于生产实际的基础上，结合笔者二十多年的实践经验，列举了部分缺陷实例分析，因此本书对于现场热处理生产具有较强的指导意义和实用价值，同时本书还可作为机械设计专业和热处理专业的教学参考书。

本书在编写过程中得到山东大学齐宝森教授的指导与帮助，济南沃德汽车零部件有限公司齐立永工程师提供了部分图片，在此向他们谨致以深切的谢意！

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者和专家批评指正。

王忠诚
2008年1月

目 录

第 1 章 常见热处理缺陷的类型及分析方法	1
1.1 热处理常见的缺陷类型	2
1.1.1 热处理裂纹	5
1.1.2 热处理变形	7
1.1.3 热处理性能不合格	7
1.2 缺陷分析的步骤和方法	7
1.3 热处理缺陷的对策方略	13
第 2 章 加热过程中产生的缺陷及其对策	17
2.1 氧化与脱碳	17
2.1.1 氧化和脱碳的机理	17
2.1.2 零件加热常用介质的作用和防止氧化和脱碳的措施	24
2.1.3 其他影响零件氧化和脱碳的因素	59
2.1.4 钢铁零件的表面腐蚀	63
2.1.5 零件表面氧化和脱碳的后续处理	64
2.2 过热和过烧	65
2.2.1 过热	65
2.2.2 过烧	69
2.2.3 防止零件过热和过烧的措施	71
2.3 氧化和脱碳实例分析	72
2.3.1 钢板弹簧的氧化和脱碳	72
2.3.2 螺栓的表面脱碳	73
2.3.3 汽车连杆的脱碳	76
2.3.4 热锻 40Cr 连杆螺栓的局部过烧造成断裂	77
第 3 章 淬火过程中产生的缺陷及其对策	79
3.1 概述	79

3.2	淬火应力分析	84
3.2.1	热应力	85
3.2.2	组织应力	87
3.3	淬火裂纹	89
3.3.1	淬火裂纹的特征	89
3.3.2	淬火开裂原因和形式	90
3.3.3	淬火裂纹的一般特点	97
3.3.4	影响零件开裂的因素和防止措施	99
3.3.5	其他裂纹	118
3.3.6	导致淬火零件裂纹的淬火加工	129
3.4	淬火变形	130
3.4.1	热处理变形的机理	130
3.4.2	影响零件变形的因素	133
3.4.3	零件热处理变形的规律	152
3.4.4	减小变形的热处理工艺的选择	157
3.4.5	其他防止零件变形的的方法	158
3.4.6	工件热处理变形的校直方法	160
3.5	淬火后硬度不均匀、硬度不够	181
3.5.1	淬火后硬度不均匀	182
3.5.2	淬火后硬度不足	183
3.6	工具钢的淬火缺陷	187
3.6.1	碳素工具钢和合金工具钢常见热处理质量缺陷	188
3.6.2	高合金钢和高速工具钢常见热处理质量缺陷	194
3.6.3	工具钢热处理时的基本思路	213
3.7	实例分析	217
3.7.1	圆板牙的热处理及变形的控制	217
3.7.2	65Mn 金刚石圆锯片基体的热处理和变形的控制	221
3.7.3	高速钢拉刀热处理变形的控制	223
3.7.4	塞规淬火裂纹及其控制	227
3.7.5	柴油机摆臂轴淬火剥落裂纹和防止措施	228
第 4 章	回火过程中产生的缺陷及其对策	230
4.1	硬度不足	230

4.1.1	加热温度和保温时间的影响	230
4.1.2	回火温度的影响	231
4.1.3	冷却速度、冷却介质以及化学成分的影响	232
4.1.4	零件表面脱碳	233
4.2	硬度偏高	233
4.3	回火裂纹	235
4.4	回火脆性	237
4.5	实例分析	240
第 5 章	表面淬火缺陷及其对策	242
5.1	高频淬火缺陷	243
5.1.1	感应淬火的意义和作用	243
5.1.2	感应加热表面质量的检查	245
5.1.3	常见的高频表面淬火缺陷	247
5.1.4	提高高频淬火件性能的措施和要求	259
5.2	电接触加热表面淬火缺陷	260
5.3	火焰加热表面淬火缺陷	262
5.3.1	火焰加热表面淬火的意义和应用	262
5.3.2	火焰加热表面淬火常见缺陷和防止措施	263
5.3.3	影响火焰淬火表面质量的因素	267
5.4	实例分析	268
5.4.1	齿轮的表面淬火开裂	268
5.4.2	60 钢轴的高频淬火出现螺旋状软带	269
5.4.3	感应淬火时孔洞的边缘出现淬火裂纹	271
第 6 章	化学热处理缺陷及其对策	273
6.1	渗碳	273
6.1.1	渗碳的作用	273
6.1.2	渗碳零件的热处理	275
6.1.3	零件渗碳后常见的热处理缺陷和预防措施	281
6.1.4	渗碳零件的变形	286
6.1.5	渗碳零件裂纹形成原因和采取的措施	294
6.1.6	零件渗碳后的机械加工	298

6.2 渗氮	299
6.2.1 对渗氮零件的技术要求	301
6.2.2 零件渗氮的缺陷和防止措施	305
6.3 氮碳共渗	311
6.3.1 气体氮碳共渗	312
6.3.2 液体氮碳共渗	315
6.4 气体碳氮共渗	317
6.5 实例分析	323
6.5.1 齿轮的渗碳畸变	323
6.5.2 渗碳齿轮的磨削裂纹	326
6.5.3 气门液体软氮化后表面腐蚀和粗糙度超差	328
参考文献	336

第 1 章

常见热处理缺陷的类型及分析方法

热处理是指将固态金属材料以一定的速度加热到要求的温度，在此保温一定的时间，用以获得奥氏体组织和成分的均匀化，并实现晶粒的长大，随后进行冷却的过程。因此热处理的主要目的是赋予钢铁材料或其他材料具有一定的性能，能够满足零件使用过程和工作环境的性能要求。热处理不仅能改善钢铁材料的加工工艺性能和使用性能，充分发挥材料的潜力，更重要的是能显著提高钢铁零件的力学性能、产品质量和延长零件的使用寿命。热处理之所以使钢铁的性能发生改变，是因为金属的原子结构即铁本身具有同素异构转变，钢铁材料在加热和冷却过程中，即通过热处理的方法来改变其内部的组织和结构，因而获得所期望和要求的组织和性能，探讨加热和冷却时内部组织变化规律即为热处理原理。

不同化学成分决定了钢铁材料热处理后的力学性能存在明显的差异，即使同一材料采用不同的热处理手段改变其内部的组织结构，故也具有不同的性能。可以说热处理是充分发挥金属材料潜在性能极为有效的工艺方法之一，零件进行热处理的目的是为了获得所期望的组织和性能。了解热处理对零件组织和性能的影响，编制正确有效、可操作性强、产品质量得到保证的热处理工艺是十分重要的，根据零件的工作条件和使用状况，一定要合理选材，既考虑经济性，又要分析采用哪种热处理方式可满足零件的技术要求。钢铁零件的热处理过程是由加热、保温和冷却三个阶段组成的，因此，根据加热温度、冷却方式和使用目的不

同，热处理通常分为退火、正火、淬火、回火以及化学热处理等工艺方法，在生产实践中应具体问题具体分析，用最经济、最实用、最有效的工艺方法获得最佳的产品质量，这是热处理工作者的重要职责。

1.1 热处理常见的缺陷类型

钢铁零件在热处理过程中，因裂纹、变形、磨损、腐蚀等原因而失去原有的工作能力的现象称为失效或缺陷，失效分析的目的是从外部和内部因素两方面分析原因，以便采取有效的预防和补救措施，防止其再次发生。产生的质量缺陷问题可以归纳分为两个方面。一类为先天性的缺陷，如零件的结构设计不合理、原材料或毛坯本身的缺陷，在热处理过程中产生或扩展成热处理缺陷。这是热处理工作者无法解决的，只有要求设计人员正确了解因设计不良造成的后果，选用材料正确，制定合理的技术要求，避免截面的急剧变化和打印标记，采取锐角过渡，需要注意原材料的缺陷如化学成分波动和不均匀、杂质含量偏多、严重偏析、非金属夹杂物、疏松、带状组织、折痕、发纹、白点、微裂纹、氧化脱碳和划痕等，要严格控制该类缺陷。同时要求原材料检验人员认真把关，努力避免出现质量问题的材料投产。另一类为后天的因素，例如零件的热处理工艺制定不合理、操作不当、设备和环境条件不合适、后续的机械加工工序不当、零件在使用过程中出现早期的失效等，因此在热处理生产中要特别重视对零件热处理的过程控制，做到预防为主、减少变差、杜绝浪费，把影响产品质量的人、机、料、法、环和检六大因素分析透彻，认真领会，用最低的成本并采取有效措施生产出优质的产品。为便于理解和系统分类，现将常见热处理缺陷的类型和产生的原因归纳总结，具体见表 1-1 和表 1-2。

从表 1-1 和表 1-2 中可知，淬火裂纹和淬火变形是热处理过程中的致命缺陷，一旦出现该类情况将会造成难以挽回的损失，即人

表 1-1 热处理缺陷的种类

热处理的类别		缺陷的形式
普通热处理	退火与正火	软化不充分,退火脆性,碳化物石墨化,表面氧化和脱碳,过热,过烧,网状碳化物,球化组织不良,蔡状断口和石状断口,组织反常
	淬火	淬火裂纹,淬火变形,硬化不充分,淬火软点,氧化,脱碳,过热,过烧,放置裂纹,放置变形,鱼鳞状断口,表面腐蚀
	回火	回火裂纹,回火脆性,回火软化,回火变形,表面腐蚀,残余应力过大,性能不合格
	冷处理	冷处理裂纹,冷处理变形,冷处理不充分
	后续处理	磨削裂纹,磨削烧伤,磨削淬火,酸洗脆性,浸镀脆性
表面硬化处理	表面渗碳和碳氮共渗	渗碳过度,异常组织,渗碳不均匀,内部氧化,表面剥落,表面硬度不足,表面碳化物不合格,心部组织不合格,渗碳层深度不足,心部硬度不合格,表面硬度不合格,表面脱碳
	氮化或氮碳共渗	白亮层,剥落,渗层硬度低,渗层深度不足,渗层网状或脉冲组织,变形,心部硬度低,渗层脆性,耐腐蚀性差,表面氧化
	表面淬火(高频淬火、火焰淬火等)	变形,裂纹,表面硬度过高、过低,硬度不均匀,硬化层不足,烧伤,晶粒粗化(过热),螺旋状回火带,斑疤
特种热处理	真空热处理	表面合金元素贫化,表面增碳或增氮,表面不光亮,淬火硬度低,表面晶粒长大,粘连
	气氛热处理	表面增碳或增氮,表面不光亮,氢脆,表面腐蚀,氧化,脱碳

表 1-2 热处理缺陷问题产生的原因

类别	影响因素	
非热处理原因或先天性原因	零件的设计不合理	零件的截面尺寸变化大,存在有棱角,表面划伤或有打印痕迹,材料的选用不当,零件承受的负荷过大
	材料自身的缺陷	脱碳层过厚,非金属夹杂物超过要求,组织偏析,碳化物的分布不均匀,杂质(P、S)含量过多,表面折叠,表面微裂纹,白点

续表

类别	影响因素	
热处理因素 和未规范加工 和使用	制定的热处理工艺 不合理	过热, 淬火温度低, 加热不均匀, 淬火完全冷却, 冷却不均匀, 二次淬火, 鱼鳞状断口, 渗碳, 氧化脱碳, 球化退火不良, 未及时回火
	后续机械加工不当	磨削裂纹, 磨削烧伤, 磨削淬火, 电火花加工裂纹, 酸洗
	零件的使用缺陷	安装不当, 应力过于集中, 使用的工作环境温度高, 堆焊修理不当, 过度使用而未及时更换

力、物力和财力的巨大浪费, 直接影响到生产作业的进行, 因此热处理操作者必须采取可行的措施, 避免出现此类事故的发生。除此之外, 残余应力、组织不合格、性能不合格、脆性以及其他缺陷属于第三位的缺陷, 具体见表 1-3。

表 1-3 一般的热处理缺陷

分类	主要的表现形式
脆性	退火脆性, 回火脆性, 热脆性, 蓝脆性, 低温脆性, 氢脆性, 浸镀脆性, 酸脆性, 碱脆性
硬度	淬火软点, 退火不良, 硬化不充分, 过度回火, 不完全淬火, 硬度不均匀
金相组织	碳化物石墨化, 魏氏组织, 异常组织, 晶粒粗大, 混晶, 内部氧化, 带状组织, 条纹组织, 鱼鳞状断口, 黑点, 白点, 过热组织, 燃烧组织
表面缺陷	表面氧化, 脱碳, 渗碳, 白层, 磨削烧伤, 剥落, 晶界腐蚀, 应力腐蚀开裂, 起泡, 凸起, 浸镀不良, 发黑处理不当
热处理工艺的缺陷	奥氏体化温度和淬火温度, 加热时间和保温时间, 冷却介质和冷却方法, 冷却效果和硬化层, 形状和尺寸效应, 淬火硬度和淬火深度, 残余应力, 残余奥氏体
力学性能的不足	切削性, 冷镦性, 屈服强度, 疲劳强度, 冲击韧性, 耐磨性, 耐蚀性

钢铁零件的热处理质量与操作者有很大的关系, 由于加热失误会出现零件的氧化、脱碳、过热、回火裂纹和回火脆性等, 而冷却的失误会引起淬火裂纹、淬火应变、回火裂纹、淬火软点、退火脆

性、回火脆性以及冷处理裂纹，后续处理的失误造成零件表面的磨削烧伤、磨削裂纹、酸洗脆性和浸镀脆性等，因此应引起高度的重视。资料介绍，产生热处理缺陷的原因可从金属材料的相变（组织变化）、热应力的作用、元素的析出和与外界的化学反应等几个方面进行分析。

首先淬火过程中产生的裂纹是由于过冷奥氏体转变为马氏体，发生组织转变，比体积增大，热应力和组织应力综合作用的结果；其次磨削加工产生的磨削裂纹是由于冷却不良，造成零件表面受热温度高于马氏体的分解温度（转变为托氏体或索氏体），发生了二次淬火；淬火软点是由于冷却过程中冷却不均，表面出现了非马氏体组织（珠光体）；淬火变形尤其是形状的改变则是由于冷却过程中相变应力和热应力引起的，即应力造成的；通常谈到的回火脆性和退火脆性是碳化物在晶界上析出而出现的缺陷；而浸镀脆性是初生态的氢原子作用的结果；最后要提到零件表面的氧化、脱碳等缺陷是零件在加热过程中同加热介质或冷却过程中的空气接触，与氧气发生化学反应的结果。

随着科学技术的进步，越来越多先进的热处理设备和工艺已经应用于钢铁零件的热处理过程中，影响热处理缺陷的因素大大减少，缺陷发生的概率降低。

1.1.1 热处理裂纹

零件在热处理结束后，由于材料或操作不当，可能出现淬火裂纹、回火裂纹、磨削裂纹、冷处理裂纹等致命缺陷，它们直接造成零件的报废，无法挽救，因此必须采取有效的措施，避免此缺陷的发生。表 1-4 列出了常见的裂纹类型。

表 1-4 常见的裂纹类型

裂纹类型	常见裂纹的特征或状态
淬火裂纹	纵向(轴向)裂纹,横向裂纹,指甲状裂纹,一字形裂纹,十字形裂纹,同心裂纹,放射线状裂纹
回火裂纹	回火龟裂,直线裂纹

续表

裂纹类型	常见裂纹的特征或状态
放置裂纹(淬火延迟裂纹)	时效裂纹,搁置裂纹,残余应力裂纹,氢脆裂纹
磨削裂纹	龟裂,龟甲状裂纹
感应加热淬火裂纹	脱落裂纹
渗碳裂纹	剥落、脱落裂纹
脱碳裂纹	切断裂纹
冷处理裂纹	切断裂纹
电火花加工裂纹	变质层裂纹

从表 1-4 可知,各种裂纹的具体表面形式是不同的,因此在实际热处理过程要认真分析和正确区分,找出原因,为零件的热处理质量的提高提供正确的依据。

现将钢铁零件中易发生的裂纹和其具体表现形态列于表 1-5。机械零件一旦出现裂纹,将直接造成零件的报废,影响到正常的使用,因此在热处理过程中或使用状态下最忌讳裂纹的产生。应该在零件材料的选用、零件的优化设计与相关技术要求、机械加工(制

表 1-5 常见裂纹的形态和特征

序号	检查的项目	观察的要点和思路
1	裂纹的大小	宏观裂纹,微观裂纹(观察倍数、方法)
2	显微镜观察	在晶粒内、晶界上,出现混合组织
3	发生的部位	表面的、内部的,从表面到心部的
4	表面的张开度	紧闭、张开尺寸等
5	裂纹的扩展方向	与表面成直角,与表面平行,与表面有一定的角度,与主应力呈直角,与主应力平行,与主应力斜角
6	路径	直线,锯齿,分叉,曲线,扇形,断续,连续
7	裂纹的具体形状	圆环,螺旋,同心状,双重
8	断口的形状	平行于壁,会聚于壁,呈半月形,呈三角形,菱形
9	裂纹内部形态	空壳状,充满氧化物,充满外来物
10	裂纹周围的组织	脱碳,变形,夹杂物,其他等
11	分布	单一,多条,均匀分布,集中,偏向一边,对称分布
12	开裂的部位	切口底部,平滑部位,切削面,焊接部位,其他

造)和具体热处理工艺以及最终质量检验等几个环节,对具体的零件根据其服役条件和工作问题,合理选材和提出最佳的热处理要求,同时注意冷热加工的顺序,确实做到产品质量得到有效的保障。

1.1.2 热处理变形

零件在热处理加热和冷却过程中,其内部的组织结构要发生变化。钢的热处理的目的是通过改变钢的结构、成分等,获得要求的硬度和力学性能,以发挥其潜在的性能。因此在钢加热到奥氏体状态后,要进行快速冷却,过冷奥氏体转变为马氏体或贝氏体组织。在冷却过程中首先产生热应力的作用,随着马氏体或贝氏体的形成产生了相变应力,二者共同作用,造成零件的形状发生了改变,即出现零件的变形。从热处理的过程来看,变形是难以避免的,但通过改变零件的设计,尽可能将棱角变为圆弧、孔或槽镀塞、截面悬殊处设计为一定的锥形等,可达到减小变形的目的;另外零件要设计成对称形式,选用优质的钢材,同时有效利用磁滞效应,采用压板校直板状或条状零件。

1.1.3 热处理性能不合格

零件的热处理缺陷除裂纹和变形外,其余的缺陷归纳为硬度不合格、表面氧化和脱碳、表面有软点、金相组织不合格、表面剥落、表面腐蚀等,它们也直接影响到产品的使用寿命,甚至造成零件早期的损坏,对正常的作业带来困难。因此热处理性能不合格是不可忽视的重要缺陷,在零件的实际生产过程中要引起高度的重视。

1.2 缺陷分析的步骤和方法

零件在热处理过程中,影响其热处理的质量因素众多,因此会出现这样或那样的热处理缺陷,正确地从人(man)、机(machine)、料(material)、法(method)、环(enviroment)、管理

(managemengt) 和检 (test) 等七个方面进行综合分析, 借助于检测手段, 及时准确地对缺陷的类别、性质和产生的原因进行分析和判断, 从而制定科学有效的改进和挽救措施, 为零件的热处理提供质量上的保障, 同时从经济、可靠、生产效率和劳动的作业环境等各个方面考虑, 提高零件的使用寿命, 这是热处理工作者的一个重要任务, 美国哈佛大学的德鲁斯教授 (U. R. Andrews) 指出, “无论多小的意外事故, 都是组织管理上的失误”。由此可见管理的重要程度, 因此在实际的热处理工程中要认真分析和处理可能出现的缺陷, 采取措施杜绝类似事情的发生。

零件的缺陷分析是一项系统工程, 是综合性的管理工程技术和多种现代科学技术的汇总。它具有三个特性: 集合性、关联性和目的性。一般分析缺陷采取故障树分析法和失效模式及后果分析法 (FMEA 与 FMECA)。其中故障树 (FTA) 分析法应明确三个目的: 查明与缺陷发生有关的可能的原因、明确地把分析对象的过程或结果形象地表示出来以及方便计算出缺陷的概率等。而 FMEA 则具有以下特点: 利用表格形式分析缺陷; 从低层向高层分析, 对潜在的缺陷按要求影响程度确定等级, 提高改善的措施; 全面分析缺陷的产生。因此, 应用上述分析方法对出现的热处理质量问题进行分析, 就能正确判断和得出结论, 用于指导热处理工作者进行产品热处理缺陷的分析, 从而避免质量问题的再次发生。

(1) 分析的思路和程序

对零件在热处理过程中出现的缺陷, 要深入生产现场, 亲眼看到实物, 把听到和看到的进行综合考虑, 查明原因, 确定对策, 排除故障和影响因素, 解决出现的质量问题。日本的大和重久提出了 GOLT 精神, 即 Go (去现场)、Observe (认真观察)、Listen (听取情况)、Think (分析和思考), 实践证明该程序是指导一切热处理工作的思路, 避免少走弯路, 同时有助于确定缺陷产生的根源。

分析缺陷应注意从以下几个方面入手: 分析缺陷产生的原因; 分析的对象; 入手的部位; 承担的任务; 完成的时间; 如何去做;

分析的水平等。即“5W2H”原则。进行现场缺陷分析时还应使用合理的工具，便于及时记录和找出第一手的资料。下面为几种常用的工具：相机（带闪光灯），内外千分尺，外径千分尺，放大镜（10倍左右），导线，镊子，磁铁，软毛刷，画线器，钢丝刷，溶剂，样品袋，刮刀或锉刀，标签，基本机械工具。

对热处理后出现的零件质量缺陷，一般正确的分析步骤如下。

① 首先到现场调查研究，了解缺陷发生的时间、地点、失效经过和部位，分布的具体特征，以及出现缺陷的数量和比例，保护好试样的原始状态，认真观察外形和断口的特征，考虑选取试样的部位或方法，有可能做出初步的判断，对零件的使用功能、工作条件和使用时间进行详细的了解。收集缺陷部件的背景资料，查找相关的工作记录，了解产品原始的质量检验报告等。

② 热处理缺陷产生的原因是多方面的，缺陷多出现在加热温度、加热方法、冷却介质和冷却方法等几个方面。对于化学热处理过程的缺陷，应从活性介质的种类、具体的成分、均匀程度以及零件的材质等进行分析。

③ 认真了解零件的整个机械加工流程，在分析时要注意原材料的质量状态，也要了解机械加工过程中零件表面温度的变化，更要知道该零件的服役状态和受力状态，因为这有助于做出正确的判断。应当清醒地认识到锻造和零件的预备热处理的热加工工艺对最终产品质量的影响。要善于结合零件加工前后的状态，尤其是几个关键的工序应特别注意。

④ 认真观察缺陷的特征，对于简单零件的缺陷分析可借助于放大镜、测量硬度等进行分析，对于比较复杂的零件在必要时要进行相关的理化分析实验，比如钢的火花鉴别、无损探伤检验（表面和内部的探伤）、化学成分的分析（光谱分析、电子探针等）、组织结构分析（如X射线衍射分析）、金相检验以及宏观检验、力学性能测试等，拟订出针对性的分析方案，选定必要的试验项目和试验内容。热处理工作者要掌握断口知识和火花检验技术，这有助于从基础做起，对缺陷做出正确的判断。

⑤ 对于缺陷部位的取样应进行认真考虑，本着力求有代表性的位置，如有必要，可在缺陷处和非缺陷处分别选定、标号、切取、保存、清洗，进行对比检查。

需要注意，试样的选取、标号、清洗和保存应遵循以下要求。

a. 取样和标号。在切割时远离断口、裂纹；照相，同时应有代表性。

b. 断口的保护与保存。用泡沫塑料、布包扎后置于干燥器中。

c. 断口的清理。断口表面往往由于保护不好而容易造成污染和锈蚀等，应在观察前对断口进行清洗。常采取以下几种方法：用压缩空气或毛刷除掉表面的物质；油脂可用丙酮、氯仿等有机溶剂清洗零件的断口，去油渍后再用酒精清洗、吹干；将 AC 纸在丙酮中软化后紧贴在断口上；轻微氧化物可用醋酸纤维素薄膜多次空白复型，后用超声波振荡清洗；严重的锈蚀可用 15% 磷酸 + 有机缓蚀剂在室温下清洗，用蒸馏水冲洗后吹干；当断口有防护涂料时，采用电化学电解清洗；化学蚀刻法清洗等。

断口的分析要点如下。

a. 检查破断的起始点（表面、心部）的位置。

b. 起始点数量的多少和范围。

c. 观察有几处起始点，其产生的先后顺序。

d. 断口的起始点源于材料缺陷、应力集中、加工刀痕。

e. 起始点的位置与应力集中是否一致。

f. 引起断裂是静载荷还是冲击载荷。

g. 断口类型是纤维状还是结晶状，是否具有贝壳纹，最后断裂的位置。

h. 零件的工作环境是否有污染，断口有无污染。

⑥ 对所取得的信息、数据进行分析与评价，根据检测的结果解释判断的判据，认真分析清楚缺陷产生的根源，报告应提供必要的技术数据，结论的根据要充分、可靠，写出有建议的报告。

(2) 断口的表现特征和形式

零件出现断裂应进行正确的分析，从表面到内部的金相显微结

构都有具体的表现。首先了解以下断口的宏观特征。

① 静载拉伸断口 出现此类断口的原因多半是零件的强度不足，外加载荷过大等造成的。其断口又分为脆性拉伸断口和塑性拉伸断口。脆性断口特征为平直，无缩径现象。塑性拉伸断口上具有三个区域，即纤维状区、放射状区和剪切唇，断口的起始点在中心附近，形成了剧烈的凹凸不平的纤维状部分，同时也垂直于最大拉应力方向，随后急速扩展为光亮的放射状部分，最后在外缘沿最大切应力发生剪切破坏，从而形成比较平滑的灰色剪切唇，具体如图 1-1 所示。

可以看出断口呈杯形，如果出现材料的脆性增大、加载速度的增加以及温度的降低等，将使放射状部分增多，甚至没有纤维状和剪切唇等。

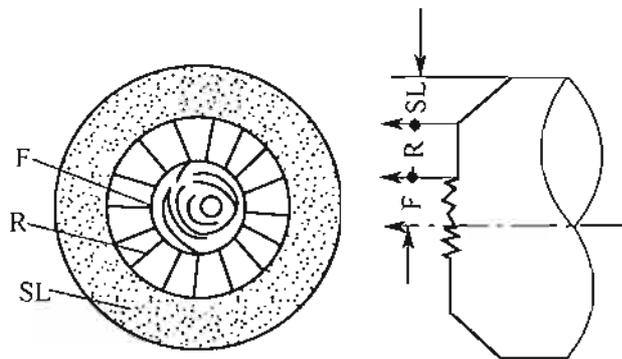


图 1-1 静载拉伸断口的三部分示意
F—纤维状区；R—放射状区；SL—剪切唇

② 扭转断口 在零件单向扭转的过程中，最大切应力发生在垂直于扭转轴的平面上，而最大的正应力存在于与扭转轴呈 45° 的所有平面上。注意塑性材料的扭转断口与扭转轴垂直，而脆性的断口与螺旋轴呈接近 45° 角，并呈螺旋状。

对塑性材料而言，如为单纯的扭转载荷，则扭转断口最终破断在心部，假如同时还有较小的弯曲载荷，则最后的破断还有许多破断区域在心部。通常扭转破断发生在花键、键槽等部位。

③ 疲劳断口 在使用过程中，疲劳断裂占有很大的比例。疲劳断裂从其受载的情况分为弯曲疲劳、扭转疲劳和反复伸拉疲劳。

常见的疲劳断口按断裂过程可分为三个阶段：疲劳核心区（疲劳源）、疲劳裂纹扩展区和最终的破断区。疲劳核心区（裂纹源）可用肉眼或低倍放大镜等大致观察出来，一般表面硬化发生在表皮下，如零件脱碳或应力集中，而内部组织存在缺陷如夹渣、空洞和成分偏析，也可能在心部发生；疲劳裂纹扩展区常为贝壳状或海滩

状，贝壳状的推进线是从疲劳核心开始向四周推进，呈现出弧形的线条，其垂直于疲劳裂纹扩展的方向；最终的破断区是指零件的疲劳裂纹扩展到一定的扩展深度，零件的载荷面积不足以支承外夹载荷，发生突然破断。

④ 弯曲疲劳断口 零件承受纯弯曲疲劳载荷时，表面所受应力很大，而中心为零。其规律为疲劳源存在于表面，沿最大正应力相垂直的方向扩展，当零件截面尺寸的强度承受不住外加载荷后，将会造成零件在该截面断裂。

弯曲疲劳是零件使用中常见的失效原因。根据零件的工作受力情况，通常将弯曲疲劳分为单向弯曲疲劳、双向弯曲疲劳和旋转弯曲疲劳，其表现形式存在明显的不同。分析断口的形状和特征以及三个区域的分布和大小，有助于判断零件具体的受力情况和断裂的形式，为正确设计零件和解决相关的工作条件提供有效的保证。下面将不同应力大小以及载荷下疲劳断口状态列于表 1-6。

表 1-6 不同载荷方式应力状态下断口的形式

应力状态	高名义应力			低名义应力		
	无应力集中	中等应力集中	严重应力集中	无应力集中	中等应力集中	严重应力集中
拉伸或拉压						
单向弯曲						
反复弯曲						
扭转变曲						

⑤ 扭转疲劳断口 扭转疲劳断口也存在可见的三个区域，如脆性材料断口与零件呈 45° 角，而韧性材料为平直的断口形态。图 1-2 所示为汽车上 $\phi 35\text{mm}$ 的拉杆扭转疲劳断口，硬度为 52~55 HRC，从图中可以看到裂纹源在拉杆很小的纵向剪切面上，随后发展为 45° 角扭转面和纵向剪切面，疲劳发展区始终围绕起始的 45° 角的面。

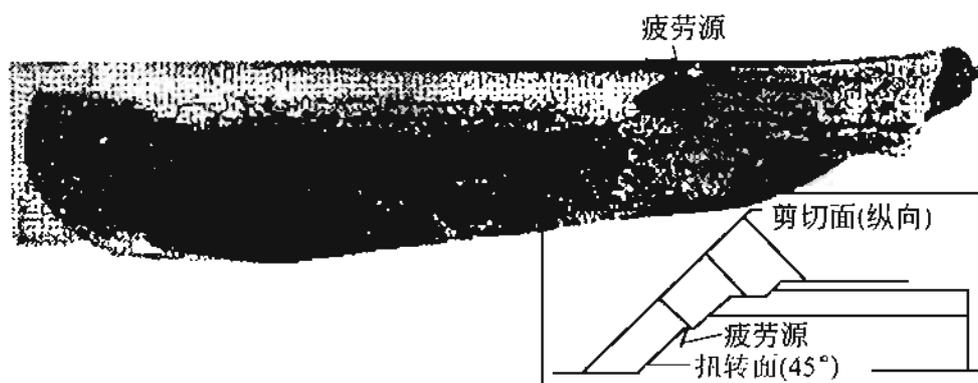


图 1-2 35 钢拉杆扭转疲劳断口

通过分析断口的特征和具体形态，可以确定断裂源和裂纹的扩展途径，推断出载荷的具体类型，判断材料的性能以及推测零件的工作环境和周围介质，为解决实际工作中出现的各类断口提供依据。

由于产生零件热处理缺陷的原因十分复杂，因此分析的思路和方法也不尽一致，要具体情况具体分析，只有通过不断的生产实践和分析，逐渐丰富分析问题和解决问题的能力，对缺陷分析得准确，才能真正指导热处理工作。

1.3 热处理缺陷的对策方略

零件经过热处理出现的质量问题和缺陷在前面已经做了介绍，因此如何正确对待和处理出现的问题是热处理工作者的重要职责。零件热处理的目的是为了获得要求的组织和力学性能，因此围绕该技术要求采用相关的热处理工艺方法和手段是重要举措，是完成组

织转变的根本所在。在机械零件的实际热处理过程中，要根据工艺和图纸的具体要求，在材料和技术要求已经确定的前提下，根据零件的硬度、金相组织、力学性能、变形量、耐磨性、耐蚀性、疲劳强度、抗咬合性等具体情况，同时结合零件的形状结构、对称程度、尖角和棱边、截面的变化、表面硬化的程度和范围、中心孔和凹槽的位置以及其他影响到质量的因素，要经过反复的工艺试验找到合理的热处理工艺参数，从而为批量热处理作业提供技术保证。从降低零件制造成本和确保产品质量的角度出发，采用最佳的热处理工艺流程、尽可能地利用低耗的热处理设备，生产出质优价廉的产品。

零件的热处理过程是由几个阶段组成的，其作用各不相同，因此具体分析每个阶段和环节可能产生的热处理质量缺陷，对于指导正确操作和减少热处理缺陷具有重要的作用和意义。从影响产品热处理质量的因素出发，结合零件热处理的工艺流程、采用的设备和加热介质、冷却介质和冷却方式、回火温度等，可以较容易地分析和判断出现的缺陷等。下面根据零件的热处理过程，分别介绍各过程出现的常见缺陷。

(1) 加热过程中产生的缺陷

对于加热过程而言，需要选择热处理加热设备和加热介质，这里会出现或容易产生的是零件表面会受到氧化性加热介质的作用，同时加热温度超出工艺要求使奥氏体的晶粒过于粗大甚至晶界熔化，这对零件的外观和内部质量造成严重的影响，因此在实际过程中要围绕该类缺陷分析采取可行的措施。

(2) 淬火过程中产生的缺陷

零件在加热结束完成了奥氏体的均匀化后，要进行冷却以获得要求的组织和力学性能，此时应根据零件的材质和具体硬度等要求选择理想的冷却介质，理想的冷却介质为在高温下快冷、低温下(300℃)缓慢冷却。通常冷却介质为空气、水、油(矿物油、植物油等)、5%~10%盐水、5%~15%碱水、合成冷却剂、水淬-油冷、水淬-硝盐冷却、碱浴、硝盐浴、氯化盐浴等，这些冷却介质

的冷却性能是有很大区别的，尤其需要提出的是对盐水、碱水、油、碱浴、硝酸盐浴、氯化盐浴等而言存在冷却介质性能降低（老化）的问题，如果没有及时发现将成为产生缺陷的重要根源，淬火零件硬度不足、软点、淬火裂纹和变形超差是其常见的热处理缺陷。

（3）回火过程中产生的缺陷

零件淬火结束获得了高硬度的淬火马氏体组织或硬度略低的下贝氏体组织，但此时的组织并不稳定，其脆性很大，无法在生产中使用，必须进行回火处理才能得到要求的组织和性能。因此回火的工艺参数对零件的热处理质量将产生重要的影响，例如出现硬度的高低、回火脆性、回火裂纹以及其他缺陷，在回火过程中必须采取有效措施，才能确实避免上述缺陷的产生。

（4）表面淬火缺陷

前面提到的为零件的整体热处理，使零件内外均获得要求的硬度和要求。而表面淬火处理是仅对零件的表面进行硬化处理，心部仍为处理前的组织状态，因此表面淬火温度、加热时间、硬化层深度等对零件的热处理变形和开裂、硬度的高低、使用寿命的长短等有直接的影响。了解表面淬火缺陷的产生机理，有助于提高操作者对产品质量问题的认识，并在实际的热处理过程中自觉遵守操作要求，为制造合格的产品奠定良好的基础。

（5）化学热处理缺陷

零件的化学热处理是在零件的表面上进行渗金属或非金属原子的热处理工艺，以获得要求的表面性能（如高的耐磨性、耐蚀性、抗咬合性、高的疲劳强度等），这种工艺赋予零件具有复合材料的双重作用和效果。但如果出现工艺制定不当、过程参数变化等将会造成零件的变形和开裂、组织不合格、硬度不符合要求等，因此对于零件的化学热处理而言，应当引起足够的重视，否则零件将完全失去化学热处理的意义。

零件的热处理应安全、节约和切合实际，同时要向作业环境的凉爽、清洁和安静方面发展，热处理的要点是加热和冷却技术的选

择、温度与时间的合理搭配、冷却介质的性能、钢材的质量和零件的形状、预备热处理的效果等，因此在零件的热处理过程中要考虑到诸多因素的作用和特点。针对容易出现的质量缺陷，在编制热处理工艺时要采取相应的措施，这是一项十分重要和复杂的过程，需要从影响热处理质量的因素入手，经过反复的工艺试验和调整，才能制定出最佳的热处理工艺流程和工艺参数，因此正确的热处理工艺是确保零件热处理质量合格的前提和基础，一旦出现上述质量问题都可从人、机、料、法、环和检等几个环节进行分析和判断，就可找到产生缺陷的根源。

第 2 章

加热过程中产生的缺陷及其对策

钢在热处理设备加热过程中离不开加热介质，即热量通过加热介质传递给零件，来完成对其表面和内部的加热，满足零件锻造加热、退火、正火、回火以及化学热处理等的需要。在科学技术发展的今天，加热的介质种类较多，按照零件在加热过程中零件表面有无成分的改变分为氧化性加热介质、还原性加热介质、中性加热介质三类。现在如果能够采用还原性加热介质和中性加热介质进行零件的加热，无论从原材料的热处理和表面的处理，还是随后的机械加工，都会节省钢材、降低制造成本，同时可成倍地提高零件的使用寿命，从而真正实现我国科技强国的战略目标，为世界的发展做出应有的贡献。

2.1 氧化与脱碳

钢铁热处理的目的是用于改善材料的组织状态和消除内应力，获得需要的组织和力学性能。钢铁零件在锻造和热处理过程中，是在热处理加热炉内完成加热过程的。零件加热的方式一般有三种，即传导、对流和辐射。加热的介质按对零件表面有无影响，分为空气、可控气氛或保护气氛、流动粒子、盐浴、真空等几种，其中对零件基本无影响的为真空、可控气氛或保护气氛等。

2.1.1 氧化和脱碳的机理

钢在热变形、退火和热处理过程中，如果在没有保护性的介质

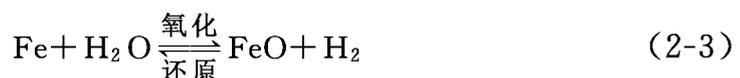
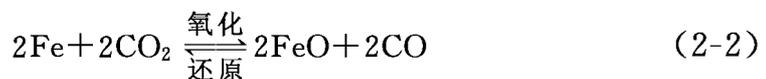
或气氛中加热，钢表面的铁和合金原子将会与加热介质中的氧化性物质起化学反应，生成氧化物，造成表面脱碳和变质等现象，严重影响零件的力学性能，甚至会造成产品的报废。因此在零件的热加工过程中必须控制炉内的气氛，确保实现零件的无氧化和脱碳加热，一旦出现该类缺陷要采用磨削、车削的加工方法或抛丸（喷丸）处理去除，也可采用化学的方法如硫酸或盐酸进行清理，但需注意防止氢脆现象的发生。

钢的氧化和脱碳发生的原因是多方面的，同加热设备性能、加热方法和方式、使用的热源、加热的介质等有很大的关系，如何采取必要的技术措施和保护手段实现零件的无氧化和脱碳加热、确保其零件热处理后的表面质量是热处理工作者的首要任务，必须认真对待和分析，以有效的措施和方法实现零件的无氧化和脱碳。

2.1.1.1 钢的氧化

钢的热处理离不开加热介质和热处理设备。常规的加热介质有气体、可控气氛、熔融盐浴、流动粒子、真空等，下面分别加以介绍和分析，探讨其对钢的表面质量的影响。

在一般的气体介质（如空气）中， O_2 、 CO_2 和水蒸气等是氧化脱碳性强的气体，它们一般按下列化学反应进行，从而造成钢的表面被氧化，即钢在氧化性气氛中加热，在零件的表面将产生氧化层，化学分析表明氧化层从表到里依次为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO ，其形成的机理为表面的氧气含量高，与铁强烈作用生成 Fe_2O_3 ，中间部分为 Fe_3O_4 ，内层形成了氧含量较低的 FeO ，另外随着炉内氧含量的增加和加热温度的提高氧化层的厚度会不断增加。在实际的热处理过程中要将氧化性气氛消除，并确保工艺温度符合技术要求。



从上述四个化学反应可知，钢表面的铁被 O_2 、 CO_2 、水蒸气等氧化，损耗了金属，同时造成零件的表面产生锈蚀和麻点，粗糙不平。另外因表面氧化皮的存在而影响淬火冷却的均匀性，造成工件表面的不均匀或硬度不足。因此资料 [12,20] 介绍，钢表面的氧化皮是造成淬火软点和淬火开裂的根源。

通常钢铁零件的急剧氧化是在 525°C 以上发生的，钢铁与空气中的氧结合形成氧化铁，它低于脱碳的温度。氧化扩展的快慢程度取决于固溶体的成分，作为工具钢，其中的铬含量以及碳化物相的特性影响较大。资料 [21] 介绍，高碳钢的氧化皮十分致密，而低碳钢的则疏松易于剥落，在 570°C 以下形成的氧化物由表到里依次为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 ，而 570°C 以上则为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO ，如图 2-1 所示。上述氧化皮与基体的结合性差，同时各自的膨胀系数不同，因此会一块块剥落，这样既消耗了金属，又造成零件表面质量的下降，因此在加热过程中应采取必要的措施，杜绝零件在氧化性气氛中完成热处理。

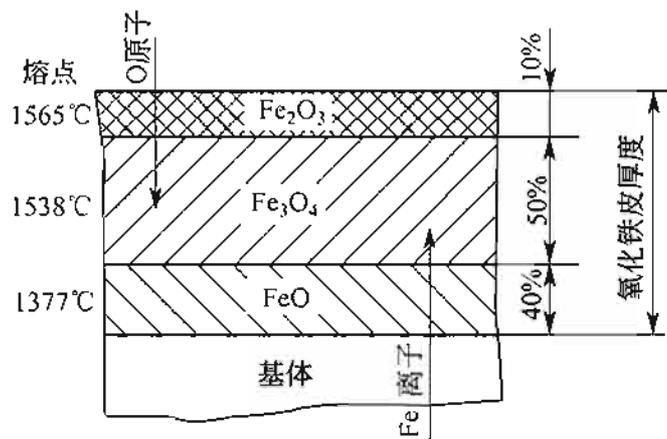
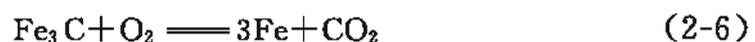


图 2-1 氧化过程示意

钢铁零件在空气中加热将发生氧化反应，脱碳在高温下 (800°C) 进行得十分强烈，溶解于钢中奥氏体的碳和碳化物中的化合碳被空气中的 O_2 氧化烧损而脱碳：



热处理炉内气体介质成分含有 H_2 、 N_2 、 CO 、 CH_4 、少量 CO_2 以及水蒸气等各类保护和可控气氛，它们对钢铁零件的表面作用有很大的差异。 CO_2 为燃烧产物的主要组分，在高温下引起钢表面的氧化和脱碳，但对铜和铜的合金无化学作用，因此常用作该类材料的保护气氛。 CO 对钢铁具有还原作用，可使钢的表面增碳。 CO_2 氧化还原反应在 $570^\circ C$ 以下进行。随着炉内氧含量增加和加热温度的提高，氧化程度增加，氧化层厚度的增加如图 2-2 所示。

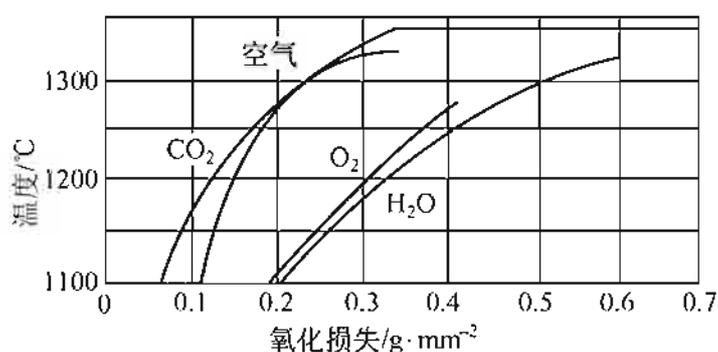


图 2-2 加热和气氛对氧化速度的影响



因此钢在 $CO-CO_2$ 的混合气体中可以发生脱碳或增碳反应，即

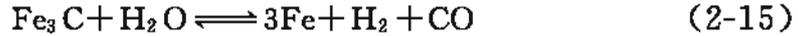


水蒸气在高温下对钢有氧化和脱碳作用。 H_2 作为一种还原性气体，在高温下可使钢的表面氧化物得到还原。钢在 H_2-H_2O 气氛中的氧化还原反应为：



上述反应是可逆的，因此可以实现对炉内成分的合理控制，确保零件在热处理加热过程中实现无氧化和脱碳加热。

图 2-3 所示为钢在 H_2-H_2O 气氛中加热后发生的氧化还原反应：



另外纯氢对钢也有脱碳作用，其脱碳程度取决于炉温、水蒸气的含量、加热时间以及钢中原始的含碳量等因素，当 H_2 中水蒸气的含量提高时，则氧化脱碳的作用将更加剧烈。图 2-4 所示为 40 钢脱碳层与加热时间的对应关系。

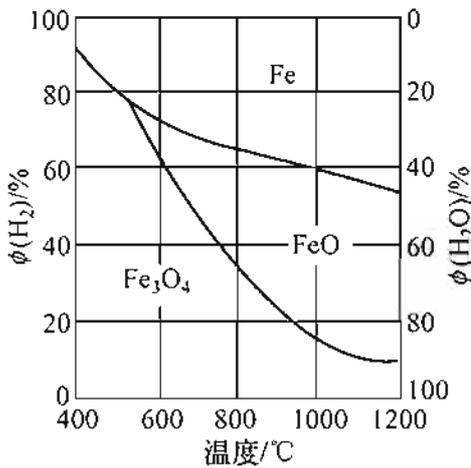


图 2-3 H_2-H_2O 和钢的平衡相图

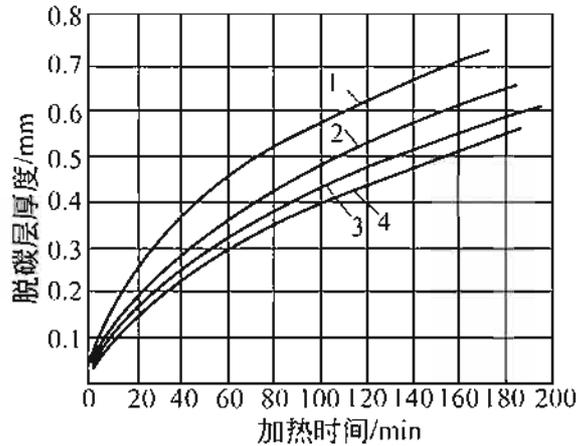


图 2-4 40 钢脱碳层厚度与加热时间的关系
(加热温度 $850^{\circ}C$ ，炉气中 H_2 为 $8\% \sim 12\%$ ，其余为 N_2)

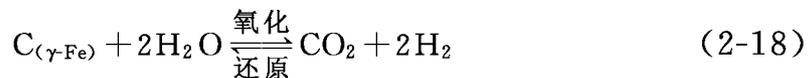
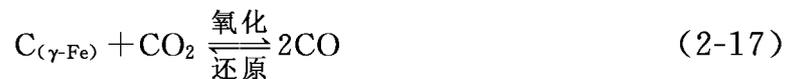
1— $H_2O/H_2 = 0.065$ ；2— $H_2O/H_2 = 0.045$ ；
3— $H_2O/H_2 = 0.033$ ；4— $H_2O/H_2 = 0.025$

2.1.1.2 钢的脱碳

钢的脱碳是指钢件在加热过程中，由于炉内脱碳性气氛与钢表面的碳原子发生化学反应，即钢表面的碳原子部分或全部被烧掉，因此降低了其表面的含碳量，从而影响到零件的表面质量和力学性能，常规而言是不允许的。无保护加热造成脱碳总是不可避免的，实验表明脱碳后的表面组织为铁素体，内部为奥氏体组织，在淬火后二者转变为马氏体的过程中表面产生拉应力的作用，将会造成表面的变形和开裂，表面硬度、抗拉强度和疲劳强度等普遍下降，出

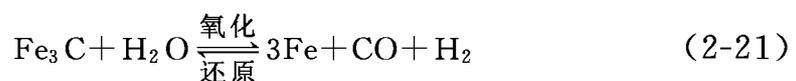
现零件的早期失效，因此必须避免该类现象的发生。

钢在加热过程中离不开加热体和加热的介质。热处理加热设备种类较多，加热的方式有传导、对流和辐射三种，任何热处理设备均具有其中的一种或几种传热方式。通常在加热的介质炉气中存在有 O_2 、 CO_2 、 H_2O 和 H_2 等气体，它们和钢表面的碳发生化学作用，造成碳含量的下降。钢的脱碳过程有两个环节：一是表面的碳原子被氧化；二是表面的碳失去，引起表面碳浓度的降低。根据化学平衡原理，心部碳向表面扩散移动，因此脱碳层会不断增加，时间越长则脱碳越严重。下面为零件在脱碳时的化学反应式：



从上述几个反应式来看，钢件表面的碳原子分别与氧化性的气体作用生成了相应的气体，碳含量则低于钢的原始成分，无法获得要求的组织和性能，因此实现无脱碳的热处理是至关重要的举措。

同时还应当清醒地看到， O_2 、 CO_2 、 H_2O 和 H_2 等气体除发生以上作用外，它们也可同钢中的 Fe_3C 反应，使其失去碳原子：



因此，无论是钢表面的碳原子还是渗碳体中呈化合态的碳原子，一旦发生脱碳则使零件表面的含碳量降低，造成淬火后硬度和耐磨性的减弱，尤其是造成零件疲劳强度的明显下降。上述炉内的气氛中 O_2 、 CO_2 、 H_2O 和 H_2 属于氧化性的气体，在加热的过程

中引起钢表面的氧化和脱碳，而 CO 、 CH_4 则为还原性气体，可以使氧化层和脱碳层得到还原，恢复钢表面的原始成分状态。需要说明的是，除 H_2 外，在还原性和氧化性的气氛中，如含有水蒸气，它将会造成表面的明显脱碳。作为气体加热介质而言，为了确保加热过程中不出现上述缺陷，应当采用在还原性或保护气氛中完成零件的热处理，这是热处理工作者一直努力的方向。目前陆续开发了一系列的加热方法，实现了不改变零件的表面成分和状态的保护介质的加热。

从脱碳产生的机理来看，脱碳的实质为钢中的碳原子在高温下与氧和氢等发生作用，生成了一氧化碳，一般而言钢的氧化和脱碳是同时进行的，其扩散均在 A_{c1} 相变点以上高温下强烈发生，因此控制好炉内的成分即可避免氧化和脱碳现象的出现，尤其是水蒸气必须去除。当钢表面的氧化速度小于碳从内层向外层扩散的速度时会发生脱碳，即在氧化性较弱的氧化性气氛中会发生脱碳现象。相反，当钢表面的氧化速度大于碳从内层向外层扩散的速度时会发生氧化。

脱碳对工具钢而言，轻度（0.6%~0.8%）不会明显造成过共析钢硬度的降低，但会减少残余奥氏体中碳化物的含量。在淬火温度下，加剧表层的晶粒的粗化和长大，使钢的强度下降。如有严重的脱碳（0.4%~0.5%），会使钢淬火和回火后硬度大大降低，耐用度下降，同时将引起淬火裂纹的出现，从而加剧零件之间的粘连。因此，对工具钢来说，确保零件加热过程中无氧化和脱碳是提高热处理产品质量的前提。

零件的表面被氧化和脱碳后其表面状态十分粗糙，失去光泽，在热处理过程中将导致淬火裂纹、软点、硬度不足等缺陷，造成抗拉强度和疲劳强度的明显下降。对高速工具钢而言，表面脱碳使工件的红硬性降低，表面脱碳后将严重降低刀具的耐用度，脱碳和未脱碳部分淬火后比体积不同而产生差异，影响到刀具的结合部分的强度等，因此应当注意避免该类问题的出现。

弹簧钢表面如存在脱碳现象，将显著影响疲劳强度，严重的影

响抗拉强度。而对螺栓的标准件而言，脱碳造成螺纹表面硬度降低、螺纹脱扣、强度明显降低等，无法满足螺栓的工作需要。因此脱碳是不允许的，在加热过程中应采取保护措施，确保产品质量合格。

钢铁表面脱碳后，含碳量与内部基体的碳成分存在差异，因此淬火后过冷奥氏体转变为马氏体，表面的热应力和组织应力的共同作用造成内外的膨胀量的差异，容易出现零件的淬火裂纹。资料[18]介绍，如表面为完全脱碳，则不会造成淬火裂纹的出现，其原因在于表面只有热应力，内部为拉应力，因此表面受到压应力的作用。需要说明的是因为操作不当所致的表面脱碳将使表面变硬，不会发生塑性变形，如残留的含碳量低于0.3%，不会开裂，而高于0.4%则存在开裂的倾向，因此残留碳含量的多少直接影响到零件的产品质量问题，这一点应引起热处理技术人员的重视。

2.1.2 零件加热常用介质的作用和防止氧化和脱碳的措施

氧化和脱碳几乎是零件在热处理过程中难以避免的，它是零件表面和加热介质作用的结果，因此控制氧化和脱碳的措施也必须从这两方面着手，一是改变零件在加热过程中介质的成分，二是将加热零件与加热介质隔离。严格控制零件在加热过程中表面不受外界气氛的作用，即可达到零件热处理的要求，零件的表面状态则不会改变。

完成常规热处理的加热介质通常有气体、燃气、保护气氛、熔融盐浴、流动粒子、真空等，它们在加热中对零件表面状态的影响明显不同。因此控制表面氧化、脱碳的方法可归纳为两类：改变加热介质的成分和性质；工件在加热过程中与炉气隔绝。加热介质在高温下与零件的表面发生化学作用，加热温度、加热速度选择不当，装炉量不符合要求等，均会对零件的加热造成一定的影响，钢铁零件在570℃以上即被氧化，氧化后的表面烧损、无光洁，影响其力学性能、磨损性能和切削性能等，同时对炉衬等有一定的危害性。同样，表面脱碳将严重影响零件的性能和寿命。为了系统了解

和便于选择加热介质，现对常用的加热介质的性质和在加热过程中需采取的措施分别加以介绍。

2.1.2.1 空气

从我国热处理设备的发展趋势来看，箱式炉和井式炉在国内热处理企业还占有 40% 的比例，其加热的介质为空气。由于空气中的氧气、二氧化碳和水蒸气等氧化性气体在一定的温度下与零件表面的碳等发生反应，使零件表面出现氧化和脱碳，因此应尽可能地加以避免。

对于只能进行空气加热的设备来说，如不采取一定的保护措施，势必造成表面的氧化脱碳，因此要采取措施来加以控制。在空气等氧化性气氛中实现对钢铁零件的加热，除氧气外，不含水汽的氢气对表面没有影响，但当含水量在 0.05% 左右时，将会造成零件表面的脱碳。

资料介绍，如钢在无保护的空气中加热，随着温度的升高和时间的延长，其表面的氧化和脱碳越严重，具体数值见表 2-1。

表 2-1 50 钢在电炉加热 3h 氧化和脱碳情况

加热温度/℃	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
氧化皮/mm	0.06	0.07	0.15	0.32	0.33	0.35	0.42
脱碳层/mm	—	0.01	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05

为了解决零件在空气中加热而表面不被氧化和脱碳的问题，对于箱式和井式等电阻炉而言，应采取必要的方法和有效措施，使零件的表面与加热介质隔离或隔绝，则可避免零件的表面氧化和脱碳的发生，同时也确保表面质量状态和成分保持不变，获得要求的组织和力学性能，满足零件服役条件的需要。下面介绍几种常见的保护方法，供实际应用中参考。

(1) 涂料保护

涂料保护是指将零件用涂料涂覆，通过其能隔绝与氧化性气氛的接触，完成零件的加热过程。如何保证涂料在加热中和淬火前不脱落，而冷却后及时离开零件表面，完成零件的淬火处理，是选用

涂料的宗旨和基本要求。

对涂料的要求如下。

① 在加热过程中不允许脱落和破裂，具有良好的保护效果。

② 涂料中的元素不会渗入零件的表面，也不会与钢中的元素起化学反应，性能稳定。

③ 不会降低零件的冷却性能，对冷却介质无危害。

④ 零件淬火后可自行脱落，不会影响淬火性能。

⑤ 无粘连现象。

⑥ 对零件无腐蚀。

常见涂料的配方和应用具体见表 2-2。

表 2-2 推荐的常用涂料配方

序号	涂料牌号和名称	主要组成物质	适用范围及举例
1	3 号涂料	玻璃料、氧化铬、云母氧化铁、滑石粉、改性膨润土、虫胶液、乙醇等	适用典型材料：30CrMnSiA、40CrNiMo、Cr12、Cr12MoV、40Cr、2Cr13、45、T8 以及钛合金等 使用温度 800~1000℃，时间为 1.5h 以内
2	4 号涂料	玻璃料、氧化铬、氧化铝、滑石粉、改性膨润土、虫胶液、乙醇等	适用的典型材料：1Cr18Ni9T、GH-140、GH-35 等 使用温度 1000~1100℃，时间在 1h 以内
3	5 号涂料	玻璃料、钛白粉、改性膨润土、虫胶液、乙醇等	适用热作模具钢材料：5CrNiMo、5CrMnMo 等 使用温度为 800~900℃，时间为 2~4h
4	202 涂料	氧化铝、氧化硅、钾长石、氧化铬和碳化硅粉末以及硅酸钾黏结剂	适用于各种钢材的热处理加热保护，并可用于锻件的退火加热 使用温度为 800~1200℃
5	玻璃润滑剂+耐火黏土	80%玻璃润滑剂+20%耐火黏土，加水稀释	适用于 980~1050℃ 加热时的防氧化措施

为了确保零件的无氧化和脱碳加热，要求零件表面清洁、无油污和锈迹；涂料要搅拌均匀，无颗粒状；零件上的涂料厚度应均匀；晾干后或烘干后进炉内加热等。应当特别注意的是零件之间堆

放时不要碰掉涂料层，否则脱落部位在加热时将产生氧化和脱碳。

另外采用石墨粉+机油（或水玻璃）混合后刷涂1~2mm厚，将其在200~300℃加热后浸入硼砂水溶液中，此时零件表面黏附一层硼砂层。该方法的缺点为加热时易于剥落、开裂，降低了零件表面的淬火温度，难于清洗等，所以一般很少使用。

(2) 保护加热

除涂料实现保护加热外，防止零件氧化和脱碳的措施还有将零件埋进石英砂，采用铸铁屑封箱或添加木炭等，另外采用不锈钢套或罐密封加热，如有条件采用密封罐抽成真空后向内通入保护性气体也可实现零件的无氧化脱碳。装箱加热虽可保护和减少零件的氧化和脱碳，但其具有加热时间长，操作繁琐，对零件有增碳或脱碳的作用。目前各种防氧化脱碳的固体保护剂种类较多，应根据材料的成分、热处理后的加工状态以及需要的技术指标来综合考虑。装箱加热主要用于热锻模的回火、高碳钢和高速工具钢退火等。

2.1.2.2 保护气氛

钢的热处理应当在还原性气氛中进行，在加热过程中能保护工件。免于氧化、脱碳的炉气即为保护气氛，作为淬火加热工序应确保零件的表面状态没有发生改变。热锻模具、结构钢零件保护加热时通常的保护气氛的成分详见表2-3。

表 2-3 部分保护气氛的成分比例

类型	空气与气体的比例	成分的组成比				露点/℃
		CO	H ₂	CH ₄	N ₂	
I	6 : 1	10.5	15.5	1.0	73	-40
II	24 : 1	20	38	0.5	41.5	-23

零件在加热过程中，为保护零件免于氧化和脱碳，在具有还原性的气氛中完成热处理，可以获得无氧化、不脱碳的光亮表面，提高表面质量，同时也省去了酸洗、抛丸或喷砂工序，提高作业效率，明显降低生产成本，因此国内外关于保护气氛的热处理炉已经得到了推广和应用。

保护气氛的种类很多，为了便于了解其特性，下面分别加以介绍，供零件在加热过程中正确选用。同时应特别注意在气氛的选择上，要考虑到产品的批量、材料的类型、热处理设备的现状、工艺水平的高低、热处理产品质量的技术要求等，在经过工艺验证后才能确定采用何种保护气氛，这对于保护零件的表面质量至关重要。

(1) 可控气氛

可控气氛炉内的气氛可以进行有效控制，确保其在一个合理的范围内，实现零件热处理无氧化和脱碳现象的发生。

① 可控气氛的原理 其原理在前面已经讲解，根据化学反应的平衡原理，增加正方向反应产物 CO 和 H₂ 的含量将导致正反应过程的停止或减弱，假如 CO 和 H₂ 的含量升高到一定程度，反应将朝逆方向进行，即得到还原性气氛。控制好炉气中 CO₂/CO 和 H₂O/H₂ 的比值，就能完全控制整个化学反应的趋势和方向，也就能控制钢铁零件表面的氧化和脱碳的过程。

图 2-5 表示钢铁零件在不同温度下 CO₂/CO 及 H₂O/H₂ 的比值与铁的氧化-还原反应的平衡关系，两条曲线分别为 BOC 和 AOD。

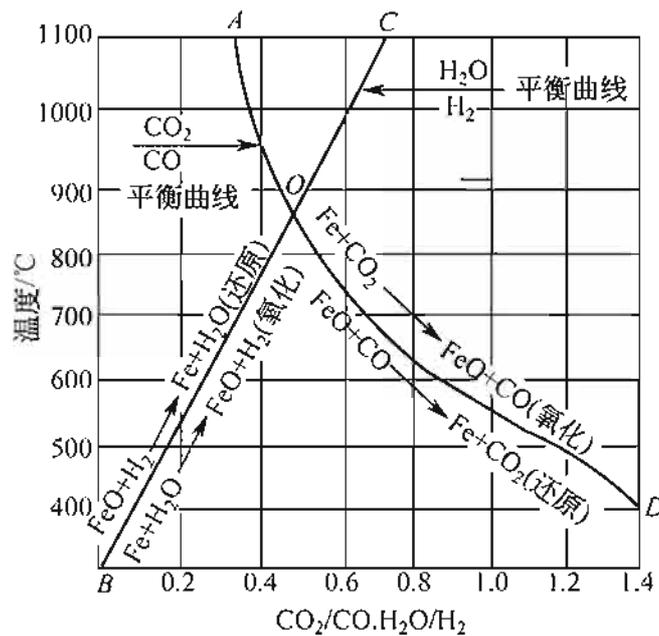


图 2-5 钢在不同温度下 CO₂/CO 及 H₂O/H₂ 的比值与铁的氧化-还原反应的平衡关系

从图 2-5 中可以看出两条曲线的变化规律不同，但其共同点为在两条线的左侧均为还原区域，而右侧是氧化区域，另外在 *BOD* 区间内 CO_2/CO 的氧化区与 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 的还原区重叠。下面重点分析钢铁在炉内气氛中温度和 CO_2/CO 及 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比值的对表面质量状态的影响。查找 *AD* 线在 950°C 时，当气氛中的 $\text{CO}_2/\text{CO}=0.4$ ，则炉内氧化和还原的速度相等，整个反应处于平衡状态。此时钢表面无氧化和脱碳现象发生，即可实现无氧化脱碳的加热过程。相反，如果 CO_2/CO 比值大于 0.4，将发生 $\text{Fe} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{FeO} + \text{CO}$ 氧化反应，钢中铁原子被氧化成氧化铁，而 CO_2/CO 比值小于 0.4 又会发生 $\text{FeO} + \text{CO} \longrightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ 的还原反应，氧化铁被还原为铁原子。随着温度的改变， CO_2/CO 的平衡值也会发生变动，即温度越高则平衡值越小。因此，为了确保钢铁零件在保护气氛中不被氧化，要求加热温度提高时， CO_2/CO 的平衡值应愈小愈好。

需要注意的是热处理炉内的炉气会同时包含有 CO_2 、 CO 、 H_2O 和 H_2 ，因此在某一温度下进行炉内成分的分析时，要综合考虑气氛的作用。从图 2-5 中大致可以看出，在热处理常用加热温度范围内（ $700\sim 950^\circ\text{C}$ ）要避免钢的氧化，应使炉内气氛 CO_2/CO 的值相应控制在 $0.4\sim 0.7$ ，而 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比值应为 $0.4\sim 0.5$ 。

在不同的加热温度下，钢中的含碳量与 CO_2/CO 及 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 的比值具有一定的平衡关系。从图 2-5 中可知，要防止钢的脱碳发生，只有将 CO_2/CO 及 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 的比值控制在更小的范围内。这一点需引起高度重视，例如在 850°C 加热含碳量小于 0.5% 的碳钢，应将 CO_2/CO 及 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 的比值均降到 0.04 以下，才能防止钢的脱碳。总之，根据炉内零件的化学成分、炉内气氛、装炉方式和热处理设备的类型等几个方面进行考虑，将炉内的气氛只要控制在一定的温度范围内，即可确保钢加热时免于氧化和脱碳。

需要注意的是，为确保零件在可控气氛中实现无氧化、脱碳加热，要求炉内的保护气氛稳定；炉膛密封性要好，避免空气的混入；炉内气体呈现正压。因此在实际的热处理过程中严格执行工艺要求是确保零件表面质量的前提，同时应当切实做好保护气氛不间

断的相关准备工作。

② 几种常见的可控气氛 关于可控气氛的选用原则为：钢铁零件的化学成分、热处理的技术要求，原料的来源和成本价格等。在实际热处理过程中采用多种气氛，确保零件在加热过程中无氧化脱碳现象，实现零件表面状态的清洁和成分的稳定。

我国目前的网带式加热炉多采用可控气氛保护加热，用于处理气门、轴承、标准件、弹簧、螺纹刀具等小型大批量零件，均取得了良好的经济效益和社会效益，同时也借鉴和吸收了国外许多成熟的经验和热处理技术，使我国采用可控气氛热处理设备的制造水平得到很大的提高，既可处理中温的零件，也可生产在 1050℃ 温度以上工作的可控气氛热处理设备。我国目前常用的可控气氛有三种：放热式气氛、吸热式气氛和滴注式气氛。它们的作用和特点归类如下。

a. 放热式可控气氛 它是液化石油气 [主要成分为丙烷 (C_3H_8) 和丁烷 (C_4H_{10})]、城市煤气或天然气 (主要成分为甲烷 CH_4) 等原料气与空气按一定比例混合后，完全靠自身的燃烧反应 (放热反应) 制备而成的。燃烧产生的气氛中 CO_2 和 H_2O 较多，无法防止脱碳，一般常作为低碳钢和中碳钢零件的无氧化加热。只有经过净化处理的放热气氛才能防止零件表面的脱碳，同时有可能适于渗碳等化学热处理的载体气 (稀释气)。目前国内生产的流动粒子炉采用气体燃烧的热量来加热颗粒，完成对工件的加热，其炉内气氛即为放热式气氛，通常的热处理气氛可以满足零件的热处理技术要求。

b. 吸热式可控气氛 它是将原料气 (如液化石油气、城市煤气或天然气) 与空气按一定比例混合后进行吸热反应 (外部加热) 制备而成的。从反应的性质来看，吸热式气氛比放热式可控气氛中 CO 和 H_2 的含量高， CO_2 和 H_2O 的含量明显降低。该气氛可用于防止零件的氧化和脱碳，用于碳氮共渗或渗碳等，其应用十分广泛。吸热式气氛的成分控制通常用露点仪或红外线分析仪来测定，用电子装置进行自动控制，精度和灵敏性好，这是重要的工艺监控

手段和措施。

需要指出，气氛中含有较多的 H_2 ，应注意防止出现爆炸现象，要采取必要的防范措施。另外考虑到由于气氛与钢中的铬元素发生化学反应，将会造成钢表面铬的减少，因此不适于铬合金钢零件的保护加热。

c. 滴注式可控气氛 将甲醇 (CH_3OH)、煤油和苯等碳氢化合物直接滴入高温加热的炉膛内，通过这些有机物的高温裂解或裂化，产生含有 CO 、 H_2 和 CH_4 等还原性的混合气体，实现零件在热处理过程中的无氧化脱碳加热。在生产中常将甲醇作为滴入剂，完成保护性加热。考虑到其裂解产物碳势较低，还需补充炉气的碳势，即通常要另外滴入乙醇 (C_2H_5OH)、异丙醇 (C_3H_7OH) 和丙酮 (CH_3COCH_3) 等第二种液体。其滴入量和滴入剂的成分应根据零件的材质、装炉量、炉膛、技术要求、密封程度、零件的装炉方式以及保温结束后冷却介质等综合考虑来确定。

通常滴注式可控气氛具有成分制备简单、原料来源广、操作方便和易行、生产效率高、效果稳定等优点，因此目前国内外热处理企业普遍使用该类气氛进行零件的保护性加热或化学热处理。为保持炉内成分的均匀和稳定，在井式炉和箱式炉的上方应添加搅拌风机。

编者接触了大量的国内外热处理设备，采用单一的介质提供需要的成分十分困难，一般采用几种液体或气体同时滴入或通入炉膛，这样才能满足零件表面无氧化脱碳的需要。在网带式渗氮和碳氮共渗炉内，为确保零件的光亮淬火或退火，一般是甲醇和氮气同时供应。

(2) 氨分解气

除了上述三种保护气氛外，在实际热处理过程中还可采用另外的保护措施。氨分解气是指将氨加热后分解为氮气和氢气，二者与加热的零件不产生化学反应，常用于铬合金钢（如不锈钢、耐热钢等）的退火、钎焊、固溶以及光亮淬火等，这样可节约大量较高价格的纯氢作保护气体。当然，向炉内通入氢气、氮气（中性气体）

和氦气（惰性气体），同样可起到保护气体的作用。

随着科学技术的进步和对零件热处理表面质量要求的提高，真空炉已经得到一定程度的普及和推广，炉膛内抽成真空状态，使内部氧化性物质（主要指氧）的含量微乎其微，确保了零件加热或冷却中无氧化脱碳现象。也可向内充入一定量的高纯氮气作为加热介质，提高加热的效果。

2.1.2.3 熔融盐浴

盐浴炉的加热和导电介质为中性的熔融盐浴，零件在其内部加热，不会与空气接触，加热速度快，因此氧化和脱碳的倾向小。零件在盐浴炉中加热具有以下几个特点。

① 首先是加热速度快。热的传递方式为传导和对流，可以迅速通过盐浴将热量传递给零件，从而实现快速加热。

② 其次是零件的加热均匀。由于熔融的盐浴流动性好，零件的整体同时受到加热，不存在加热快慢的先后问题，组织的转变是同时进行的。

③ 再次是零件的变形小。由于零件在盐浴中加热时呈悬挂状态，仅仅存在自身重力的作用，而盐浴流动的作用力较小，故在加热过程中盐浴炉处理的零件的变形量是比较小的。

④ 另外可以完成对零件的局部加热。利用其盐液面上下温度的差异，根据零件组织转变相变点的不同，对要求零件为两个硬度的零件，采取盐浴即可满足不同硬度的需要。

⑤ 最后能够进行零件的快速加热。将盐浴温度提高到正常淬火温度 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 以上，将零件放入盐浴中加热，在很短的时间内即可完成组织的加热过程。该方法同高频加热相类似，达到节能、提高生产效率和减轻操作者劳动强度的作用。

由以上特点来看，熔融盐浴应符合以下要求，才能满足工件的加热需要。

① 盐浴的成分要稳定。

② 对加热的零件、坩埚和炉衬等材料的侵蚀性小。

③ 对金属和钢材的氧化脱碳不严重，内部成分可以得到良好

的控制。

- ④ 零件加热状态下盐浴的蒸发量少。
- ⑤ 零件带出的盐浴少，温度稳定。
- ⑥ 热处理的零件表面易于清洗。
- ⑦ 盐浴无毒，对环境无危害。

从以上特点来分析，盐浴炉加热的优点显而易见，因此目前国内热处理企业使用的加热设备中其仍占有 25%~30% 的比例。其盐浴用盐的配方较多。根据零件的材质和技术要求不同，可以采用低温、中温和高温进行零件的加热淬火处理，来达到图纸和工艺文件的技术要求等。

(1) 盐浴炉氧化和脱碳的原因

目前我国热处理企业的加热设备有盐浴炉、高温箱式炉、燃气炉、可控气氛炉和真空炉等，根据加热温度的高低可分为低温、中温和高温三种类型，生产中常见的盐浴加热配方见表 2-4。

表 2-4 几种常见的盐浴加热配方和使用范围

盐浴成分	熔点 /℃	使用的温度 /℃	主要加热的钢种
100% BaCl ₂	970	980~1350	高速钢以及高合金钢淬火加热
50% BaCl ₂ + 50% NaCl	690	720~950	碳钢和合金钢淬火加热
70% BaCl ₂ + 30% NaCl	650	700~1000	碳钢和合金钢淬火加热, 高速钢以及高合金钢预热
50% KCl + 50% NaCl	670	700~1000	碳钢和合金钢淬火加热
50% BaCl ₂ + 30% KCl + 20% NaCl	540	560~800	高速钢、高合金钢预热以及分级淬火

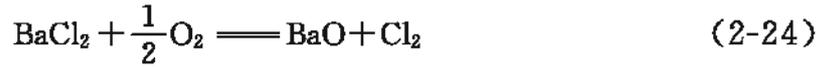
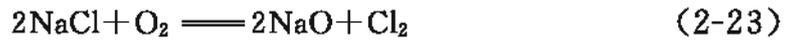
中温盐浴的成分有三种，即 70% BaCl₂ + 30% NaCl、50% BaCl₂ + 50% NaCl 和 50% KCl + 50% NaCl，三者的使用温度是基本相同的，唯一需要注意的是前者主要用作高速钢和高合金钢的预热盐浴，由于 BaCl₂ 含量较高，因此可确保高温下盐浴的稳定。50% BaCl₂ + 50% NaCl 加热后的零件的清洗比较困难，需要引起重视，必须进行煮沸、刷洗或喷丸等处理。资料 [21] 介绍，采用盐浴实现零件的加热，如脱氧及时，则 BaCl₂ 具有最佳的效果。需

要注意的是，如 BaCl_2 中含有少量 NaCl ，在 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 高温下将会加剧挥发，因此难于控制加热的温度。资料 [21] 介绍， BaCl_2 和 NaCl 的混合盐在 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 加热时，蒸发量达到最大。对于盐浴成分为 $70\% \text{BaCl}_2 + 30\% \text{NaCl}$ 的熔盐，也可实现对零件的可靠加热，而 $50\% \text{KCl} + 40\% \text{NaCl}$ 的盐浴的加热效果差。从以上分析来看，作为需高温淬火的零件，根据零件的化学成分、尺寸的大小、截面的尺寸等，建议采用二次预热进行零件的热处理。

资料 [6,21,22] 介绍，新盐对零件具有最佳的加热保护效果，钢铁零件在盐浴炉的加热过程中熔盐中的氧化物与钢件表面接触，不断吸收零件表面中的铁和碳元素，另外工件和夹具表面的氧化皮以及熔盐与低碳钢电极、炉膛和耐火材料等作用产生氧化皮落于炉内，加上空气中的氧气和水蒸气不断地与熔盐接触发生缓慢的化学反应，在零件的表面生成金属氧化膜，它将导致钢中的铁和碳发生氧化，出现氧化物和碳化物，如有条件电极采用抗氧化性较高的 $25\%\sim 28\%$ 的铬钢制造，这样可避免其本身无氧化脱碳，因此对盐浴成分的稳定、零件表面的质量状态等都会具有良好的作用。对于使用的工装夹具等要定期地进行煮盐、喷丸净化或钝化处理，喷丸大多采用 $0.3\sim 1.5\text{mm}$ 的钢丸，压力为 $5\sim 6\text{kgf/cm}^2$ ($1\text{kgf/cm}^2 = 0.0980665\text{MPa}$ ，下同)，时间为 $15\sim 30\text{min}$ ，而钝化则采用盐酸清洗，目的是将其表面上存在或黏附的氧化皮、盐渣等清除干净。需要特别注意的是淬火用盐本身常含有杂质（氯化盐本身含有的有害杂质，如硫酸盐、碳酸盐和水分等），该杂质在高温作用下分解成氧化物（其中硫酸盐还直接与钢作用，产生氧化脱碳以及腐蚀现象），该类氧化物将造成零件的表面氧化脱碳。因此在使用盐浴的过程中要严格控制盐浴内氧化物的含量，同时不断清除氧化性物质，防止或减少零件的氧化脱碳。可以了解到在零件的加热过程中内部的氧化物会对其表面产生作用，降低零件表面碳的含量和铁的含量，对零件的表面质量和力学性能带来不利影响，也是热处理过程中不允许存在的。

钢在盐浴中氧化脱碳，零件在盐浴炉中持续加热时，由于空气

与盐浴表面的接触，部分盐会被氧化而出现变质。盐浴的介质通常为 NaCl、BaCl₂、KCl 等，其常规反应为：



随着加热时间的延长，氧化物明显增加，将会引起零件的氧化和脱碳。30% BaCl₂ + 70% NaCl 在 800℃ 和 100% BaCl₂ 盐浴在 1250℃ 温度下造成氧化物的含量增加和 W18Cr4V 长时间氧化，具体如图 2-6、图 2-7 所示。当盐浴炉中含有硫酸盐、氟化物、氯化

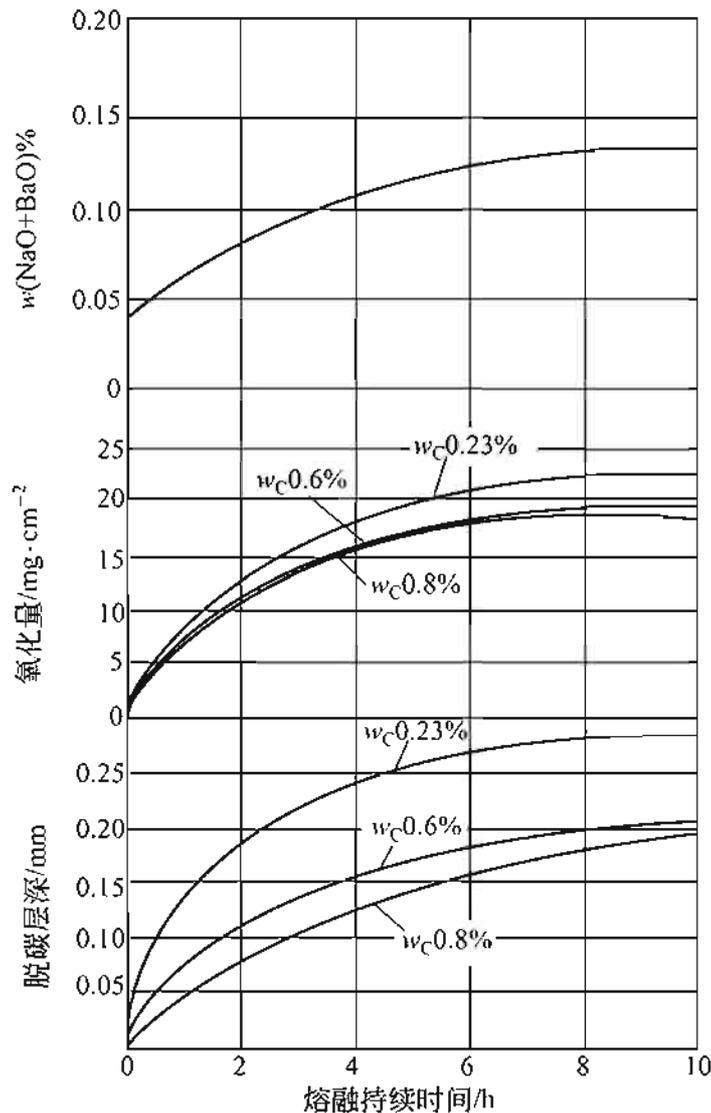


图 2-6 盐浴在 800℃ 加热时氧化物增长量及不同含碳量的钢在加热时的氧化与脱碳程度

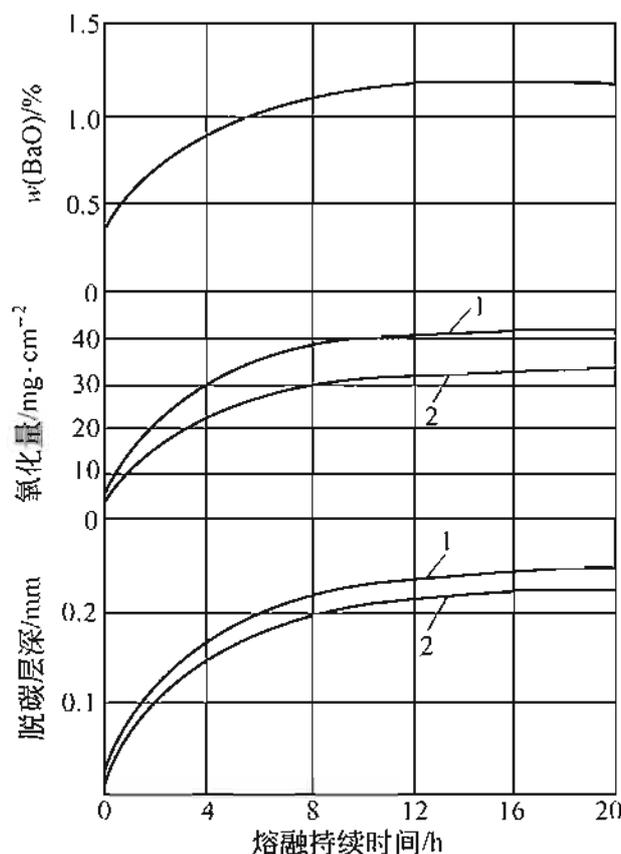
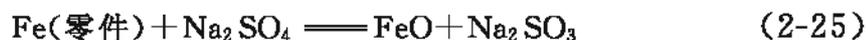


图 2-7 盐浴在 1250°C 氧化物的增长量及
高速钢在其中加热时的氧化与脱碳
1—W18Cr4V；2—W18Cr4V1Co4

物等杂质，会引起零件和盐浴坩埚的严重腐蚀，增大零件初期的氧化和脱碳。但长时间使用后，其氧化性逐渐减小。需要注意含硫对钢有较大的危害作用，因此要控制其含量，避免造成对零件表面的严重氧化和脱碳。

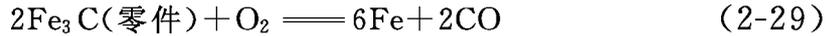
高温盐浴下零件的表面有时产生腐蚀和麻点，其原因是盐浴中有 2% 左右的 CaSO_4 、 Na_2SO_4 、 MgSO_4 等杂质，它们与零件中的铁和碳化物等反应：



在更高的温度下（1200°C）盐浴中的 Na_2SO_4 将发生分解反应：



上述反应的产物使零件表面发生脱碳现象：



(2) 通常采用的检验氧化物的方法

对盐浴炉而言，其检查的方法较多，但在实际热处理生产过程中经常采用的方法是利用薄的碳素工具钢钢带在盐浴中加热一定时间，淬火后根据该片的强度情况来判断炉内的氧化脱碳情况。

通常选厚度为 0.08mm、宽度为 30mm、长度为 120mm 的 T10 无氧化皮的钢带，放入盐浴炉中正常加热（按要求的温度和时间进行），淬水冷却后检查该片表面和硬度的情况（以中温炉为例）。

① 淬火后钢带是软的，则炉内盐浴存在一定氧化性物质，证明有脱碳现象，加热效果差。

② 淬火后钢带是脆的、可折断，则炉内盐浴成分良好，可满足零件的热处理需要，完全可以进行批量作业，适合大批量作业。

③ 淬火后钢带淬硬适当、有弹性，则炉内基本有轻微脱碳现象，但可以进行生产作业，对产品的质量和性能基本无影响。

对于高温盐浴炉而言，也可使用剃刀片来检测炉内的脱碳情况，即按工件正常的加热温度和时间处理零件，水冷后进行弯曲检测，方法同上。

(3) 控制盐浴中氧化物的措施和方法

利用加入的脱氧剂（简称校正剂）与盐浴中的碳化物发生作用，生成高熔点密度大的化合物，沉淀在盐浴的底部，以此去掉盐浴中的氧化脱碳物质。

脱氧剂的种类较多，在使用过程中要根据炉温的高低、材料的差异进行合理选择。脱氧时应首先关掉吸尘装置，确保脱氧的效果。脱氧有两种措施：一是还原作用法，是指将足够还原能力的物质放入盐浴中，产生还原反应来清除盐浴中的氧化物，一般物质为碳化硅、炭粉和木炭等；二是沉淀生成法，利用添加的物质与盐浴

中氧化物反应，生成熔点较高的沉淀物，沉于炉底，可以及时清理出来。一般采用的脱氧物质有二氧化硅（硅胶）、硼砂、二氧化钛和硅钙铁等。

在实际生产过程中，各热处理厂家普遍采用沉淀生成法，该方法具有易于操作、脱氧效果好、时间短等优点，因此得到了广泛的应用。脱氧、捞渣的次数一般随着零件质量和季节的变化来确定，通常是每4~8h脱氧一次，8h捞渣一次。在脱氧过程中应陆续加入干燥的脱氧剂，保持10~15min即可。捞渣时必须切断电源，其程序为先清除盐液面以及电极上的污物后再进行捞渣，挖渣要彻底。要采用专用的挖渣勺，不要使盐炉底部盐渣堆积成坡形，缩小炉膛的加热体积，以免影响对零件的加热效果。

① 中温炉的脱氧 将炉温升到900℃以上，陆续加入脱氧剂后，用不锈钢棒加以搅拌，反应结束炉温降至850℃捞渣和化验，当成分中氧化钡的含量小于0.5%时才能正常加热工件。脱氧剂的配比有以下两种：

- a. 硅钙铁：二氧化钛=3：1（质量比）；
- b. 硼砂：二氧化钛：硅钙铁=4：2：1（质量比）。

资料 [2] 介绍，在300kg的中温盐浴中，也可采用加入二氧化钛0.4kg、硅胶0.2kg、硅钙铁0.2kg和无水氯化钡0.5kg进行脱氧处理。

② 高温炉的脱氧 将炉温升至1300℃加入高温脱氧剂，当炉温降至1200℃左右即可挖渣。其脱氧剂的配比为：

- a. 二氧化钛：二氧化硅=2：1；
- b. 二氧化钛：硅钙铁：二氧化硅=4：2：1。

另外也可用硅砖进行脱氧，效果不错。

(4) 减少盐浴中氧化物升高的措施

① 加入的氯化盐应在炉台上烘干后使用，防止水分带入盐浴中。

② 有条件尽可能对零件和淬火夹具进行抛丸或喷砂处理，预防铁锈或氧化物物质的带入。

③ 按时脱氧捞渣，一般盐浴每工作6~8h要添加脱氧剂，可

确保其炉内氧化物的含量控制在要求的范围内。

④ 在正常工作时应禁止用风扇对着盐浴面吹风，以防炉内氧化物的升高。

2.1.2.4 燃料气体

除了采用盐浴等方法可进行钢铁零件的加热外，原始的燃料燃烧产生的热量也可完成对零件的加热，如火焰加热，例如煤、天然气、液化石油气、城市煤气、油等固体、液体或气体燃料，利用其燃烧时产生的热量达到加热零件的目的。当火焰加热时，加热介质既是热源又是加热介质，它们与空气接触燃烧放出大量的热，其燃烧的产物中有 CO_2 、 CO 、 O_2 、 H_2 等气体，另外还有 N_2 。为了使燃料燃烧得更加充分，必须有过量的 O_2 存在。

从燃烧的产物和剩余的气体来分析，加热介质中的 O_2 、 CO_2 可使零件的表面发生氧化脱碳现象， H_2 使零件表面脱碳。对于火焰炉，估计炉气中的含氧量在 2%~4% 范围内可以使用，如含氧量高，通过减小送风量等措施可降低氧化性气体，达到减少氧化和脱碳的目的。

近年来国内外的热处理制造厂不断开发出新的热处理设备，但燃气炉、燃油炉仍不失为一类生产效率高、质量稳定、节约能源、燃烧充分的加热设备，尽管会出现零件表面的部分氧化或脱碳现象的发生，采用电子点火装置，同时控温的精度和炉内温度的均匀性可与其他的热处理设备相媲美，加上进出料的机械化和自动化程度的提高，在热处理领域占有比较重要的位置。高温燃气炉用于奥氏体耐热钢气门的固溶、高速工具钢和高合金钢的淬火等，已经走向成熟，一般其装炉量为盐浴炉的 10~20 倍，同时考虑其成本，费用仅为盐浴炉的 2/5。炉温的均匀性也符合热处理的工艺要求。

2.1.2.5 流动粒子

利用加热的流动粒子进行零件的热处理加热和冷却，这个过程是在流动粒子炉中实现的，其原理是在炉子的底部通入混合的可燃气体，气体燃烧吹拂炉膛内的加热介质（粒子），零件受到加热粒子的反复撞击，完成其加热或冷却过程。

通入气体除空气外，最为重要的是气体燃料，目前多采用城市煤气、液化石油气、天然气等，它们具有高的燃烧值，通过调整炉内气氛的燃烧产物即得到可还原性气体，不仅可实现零件的渗碳或碳氮共渗等化学热处理，同时完全可以进行零件的无氧化脱碳的加热和冷却，起到作为保护气体的作用。

对流动粒子的选择有一定的要求，一般应具有以下几个特点。

① 粒子有足够的强度，可实现加热过程中不产生碎块或产生碎块的概率很低，可确保加热的正常进行。

② 粒子的来源广，成本低，易于制取。

③ 粒子与零件不会发生化学反应（进行化学热处理的工艺除外），确保零件热处理后表面质量的稳定。

④ 粒子的消耗量应尽可能地减小，同时重量轻。

目前国内外流动粒子炉采用的粒子多为硬度高的氧化铝圆球颗粒，也有采用石墨颗粒进行加热的，因此流动粒子炉能够实现零件的无氧化和脱碳加热。资料 [30] 介绍，经流动粒子炉处理的零件的疲劳强度明显提高，其原因在于粒子对零件表面的冲击和碰撞造成表面产生很高的压应力作用。

另外需要指出的是零件的感应加热，它是利用电磁感应的原理来实现对零件表面的加热，其加热温度一般在 $850\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，由于加热时间很短，在空气还未对加热的表面进行化学作用时零件的表面已经冷却了，因此采用该类热处理工艺也可满足零件表面少或无氧化和脱碳的目的。目前高频淬火热处理工艺已经得到了极为广泛的应用，尤其如长轴、齿轮等直径和高度或厚度比值相差悬殊的零件，实践证明感应淬火是十分经济和节能的热处理工艺。而对于要求加热温度在 $1000\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范围内的工艺，建议在 100% 的氯化钡盐浴中进行。

2.1.2.6 真空炉和加热介质

热处理炉为实现金属材料热处理的主要设备。随着工业技术的发展，对零件的表面和内在质量提出了新的要求，零件表面光亮、无氧化脱碳，提高了零件的耐磨性、使用寿命和疲劳强度，因此推

动了热处理技术的更新和发展，它直接代表了零件的热处理的最高工艺水平。因此，从某种意义上说，热处理技术高低直接代表了工艺水平。目前国内外热处理制造公司均致力于开发和研制先进热处理设备，技术含量高和设备自动化程度高的设备相继推出，为提高零件的工艺水平奠定了良好的基础。其中真空炉是发展最快的热处理设备，它具有其他热处理设备无法比拟的优点。

(1) 真空热处理的特点

真空热处理是指将零件在真空状态下进行加热、保温和冷却的工艺方法，零件在负压下加热，炉内空气已稀薄到无法对零件进行化学反应。它是随着航天技术的发展而迅速开发出来的新技术，也是近几十年来热处理设备中具有前途的一种，它可替换盐浴炉、电阻炉和燃气炉。真空炉是依据电极的辐射作用实现对工件加热的，辐射加热速度比较慢，因此工件的内外加热较为均匀，工件的变形小。由于真空炉内气压很低，氧气的含量对工件的铁元素氧化不起作用，因此避免了工件在真空炉加热过程中出现氧化和脱碳现象的发生，保持了工件表面的原始状态，工件清洁和光亮。图 2-8 所示

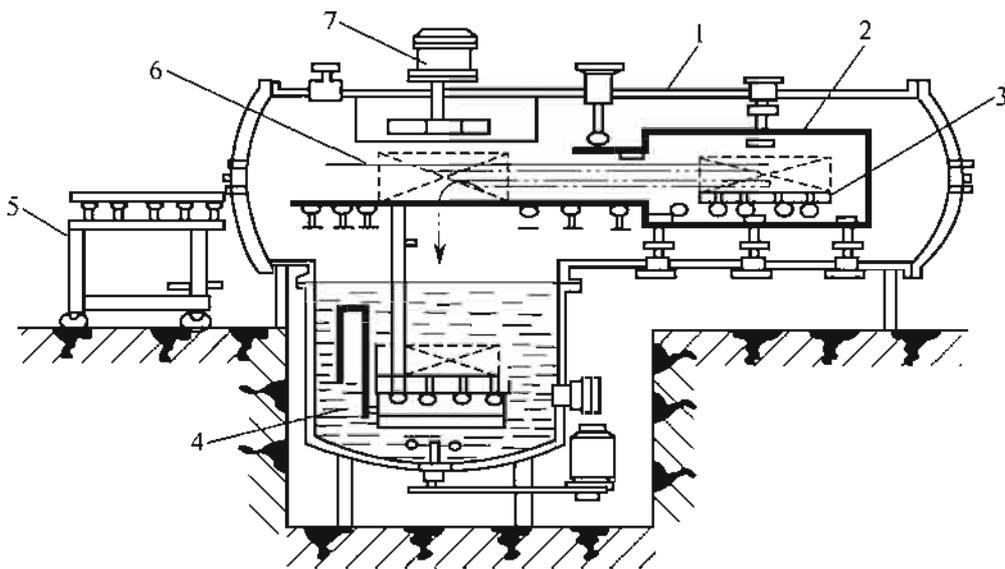
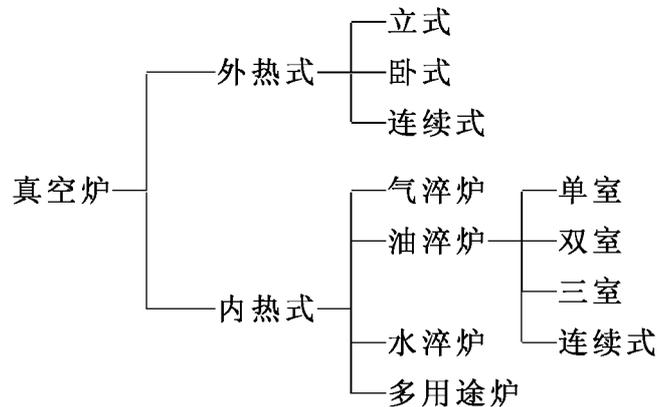


图 2-8 淬火及渗碳两用双室卧式真空炉

1—炉壳；2—加热室；3—瓶车；4—淬火油槽；
5—手推车；6—气冷室；7—电风扇

为双室真空炉。

由于航空航天、轴承、工具等行业对金属材料在热处理过程中的氧化、脱碳、腐蚀吸气、表面粗糙度及尺寸精度的技术要求越来越高，用一般的热处理方法已不能满足这些要求，尤其是航空和航天零件的特殊性，从而促进了真空热处理技术的迅速发展。自1946年第一台真空炉在美国问世以来，各国均潜心研制各种类型的真空炉，我国在1975年生产了第一台油淬真空炉，国外高压真空气淬炉于1977年在联邦德国的IDSEN公司诞生，真空气淬炉、油淬炉、水淬炉及多用途炉相继出现。各种类型归纳总结如下：



我国航天行业自20世纪70年代初开始制造和使用真空炉，到20世纪90年代，全国各大热处理厂均拥有一台以上真空炉（包括淬火炉和回火炉等），但大多数选用的为油淬真空炉，使我国的工具和其他零件的热处理工艺水平有了较大的飞跃，缩短了与发达工业国家热处理技术的差距，我国的真空炉的制造技术水平与国外基本相当。

真空炉不仅用于普通的工件的淬火、回火、退火和正火，而且可进行化学热处理，如真空渗碳（包括真空碳氮共渗）、真空离子渗碳和辉光离子渗氮等，同时可完成金属的烧结、钎焊和真空镀膜等，真空渗碳渗层均匀和重现性好、表面清洁光亮和消耗的气体少，节约了气源。

(2) 真空炉种类、特点、应用及主要技术参数

几十年来，国内外真空炉制造厂家致力于真空炉的研制和开发，目前已制作了适合处理各种材料的系列真空炉，满足了工具、航空航天等零件的需要。由于真空炉在热处理设备中的特殊地位，因此研究其发展并依托处理零件的优势，已经成为充分认识和利用真空炉的首要任务。下面分别介绍真空炉的分类及设备的优点以及真空炉的具体技术指标。

① 真空炉的作用和分类 真空的定义是指抽真空后，炉内的压力小于 1atm (1atm=101325Pa，下同) 时，里面的空气十分稀薄的情况。此时在加热零件的过程中氧气的氧化作用已微乎其微，对零件的表面不会产生氧化效果，经真空炉热处理后的零件表面光亮，确保其表面的元素成分和状态不变。由于加热是依靠电极的辐射来完成，因此零件加热缓慢，故变形量小，尤其对要求变形十分严格的工具、模具等零件是热处理的首选设备。根据炉内真空度的高低不同，分为低真空、中真空和高真空三种。通常使用的为中真空和高真空状态，真空度分别为 $1.33\sim 0.133\text{Pa}$ 和 $1.33\times 10^{-2}\sim 1.33\times 10^{-3}\text{Pa}$ ，一般使用的真空度范围为 $10^3\sim 10^{-4}\text{Pa}$ 。

按照真空炉冷却时使用的冷却介质分类，真空炉分为水冷真空炉、气淬-油冷真空炉、油冷真空炉以及气冷真空炉几种；按结构形式分为单室、双室、三室和连续作业炉等。

a. 外热式真空炉 结构简单，炉罐不进行水冷，故称为热壁真空炉或真空马弗炉。零件放在已抽成真空的炉罐中，从外部间接加热。图 2-9 所示为外热式油淬真空热处理炉。

该类真空炉的特点如下。

- i. 结构简单，操作维修方便，造价低。
- ii. 炉罐内无电热元件和隔热材料等，易于清理，容易获得真空。
- iii. 无气体放电和其他安全隐患，可靠性好。

b. 内热式真空炉 真空炉靠电阻加热，加热元件、隔热屏、炉床和其他构件等均装在加热室内，依靠电极的热辐射实现对零件的加热。电热元件在炉膛的中部构成一个加热区，确保零件的均匀

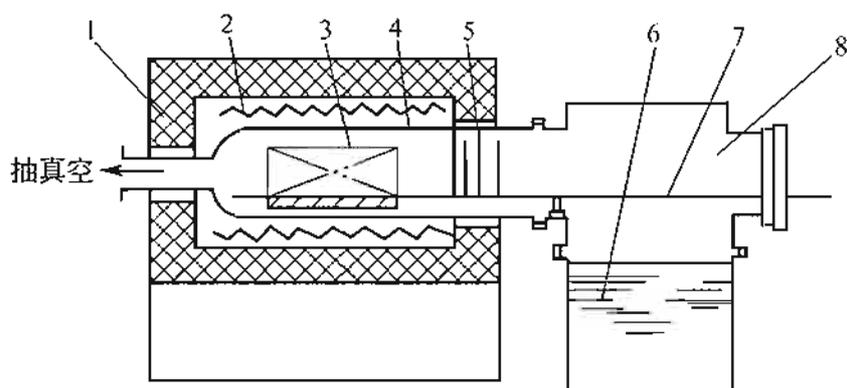


图 2-9 外热式油淬真空热处理炉

1—炉体；2—电热元件；3—工件；4—真空罐；5—隔热屏；
6—淬火油槽；7—传动机构；8—冷却室

加热，在加热元件的外部装有金属辐射屏或非金属隔热屏，炉床在加热区的中央。内热式真空炉的种类和形式很多，占国内外真空炉数量的 80% 以上，常用于退火、淬火、回火、烧结和钎焊等。同外热式的真空炉相比，具有以下特点。

i. 炉子的热惯性小，加热速度和冷却速度快，热效率和生产效率较高。

ii. 无耐热炉罐，故可制作的炉膛不需受到限制，容量也不受限制，炉内可达到更高的温度。

iii. 炉温的均匀性好，可达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，因此工件受热均匀，零件的变形小。

iv. 零件加热期间不需通入保护气体，提高了加热元件的使用寿命。

v. 炉内结构复杂，加热区受到一定的限制。

vi. 炉体体积大，需要配备的真空系统容量要增大。

考虑到零件材质的差异，故其淬透性大不相同，选用的淬火介质的冷却性能区别较大。因此对高合金钢，其淬透性高，采用气淬真空炉；对于低合金钢或工具钢的真空处理采用油冷真空炉；对于碳钢等淬透性的零件，使用水冷真空炉。图 2-10 所示为内热式真空炉常见炉型。

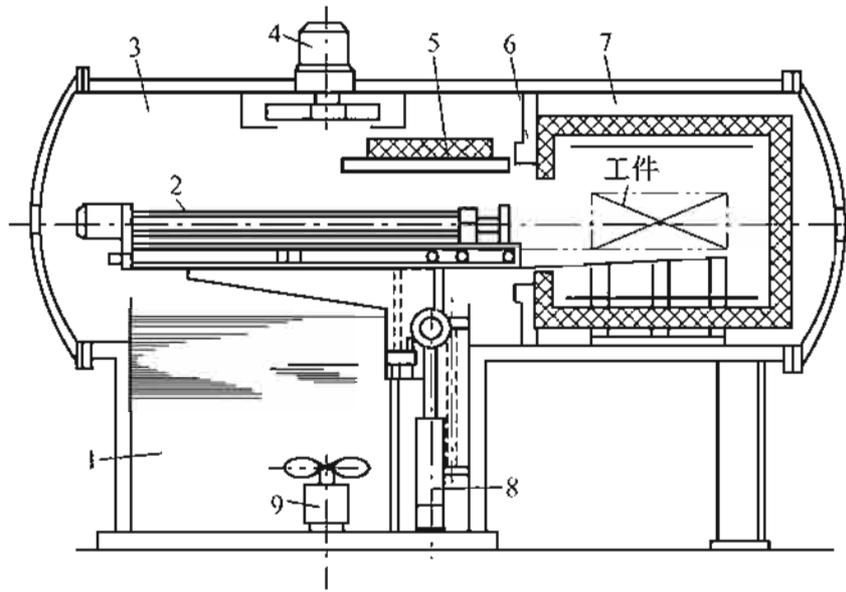


图 2-10 ZC2 系列内热式真空炉

- 1—淬火油槽；2—水平移动机构；3—整体式炉体；4—气冷
 风扇；5—翻板式中间门；6—中间墙；7—加热室；
 8—升降机构；9—油搅拌器

目前国内双室油冷真空炉的型号有 ZC 系列、WZ 系列、VCQ 系列等；单室气淬炉有 VFC 系列、VVFC 系列、HPV 高压气淬系列等。它们具有各自的加热和冷却特点，其技术已经成熟，得到使用厂家的认可和肯定，正发挥十分重要的作用。

真空炉可以实现真空淬火和回火、真空退火、真空固溶和时效、真空烧结、真空化学热处理以及真空镀膜等，因此真空炉可实现别的热处理设备无法处理的复杂工艺，随着社会的进步和科学技术的发展，它必将发挥巨大的作用。美国的海斯公司和德国的德固萨公司已经开发了水淬真空炉和硝酸盐淬火真空炉，为淬透性差的碳素钢等实现了真空热处理，因此从某种意义上讲真空炉为几乎所有的有色金属和黑色金属退火、淬火、回火、化学热处理等提供了保障。

② 真空炉的热处理特点 与其他类型的热处理炉相比，真空炉具有以下优点。

a. 设备自动化程度高，完全实现机械化操作，设备本身有自锁功能，保护真空炉的安全使用。

b. 炉膛洁净，工件热处理变形小，仅为盐浴变形量的 $1/10 \sim 1/4$ ，减少了零件的磨削加工余量。

c. 具有除气和脱脂作用，显著提高工件的力学性能，延长提高零件的使用寿命。

d. 节省电力和能源，蓄热损失小，污染气氛低于其他任何的保护气氛，无公害，操作安全性可靠，工作环境好。

e. 真空加热可避免零件的氧化和烧损，工件无氧化、脱碳，表面光亮，确保零件表面的化学成分和表面状态保持不变，减少了热处理表面缺陷，生产成本低。

f. 零件无氢脆的危险。

从上述几点来看，盐浴炉、空气电阻炉（井式电阻炉和箱式电阻炉）、燃气炉等热处理设备根本无法达到以上要求，因此真空炉在热处理领域具有广阔的市场前景，将为零件的热处理提供更佳的处理方法。真空炉的优点是由下列原因决定的。

a. 真空炉具有防止氧化的作用。金属和合金在真空中加热时，如果真空度低于相应的氧化物的分解压力，这种氧化物就会分解，形成的游离氧立即被排出真空炉，使零件的表面质量进一步改善。金属的氧化和氧化物的分解，具体见下式表示： $2Me + O_2 \longrightarrow 2MeO$ 。当真空炉中氧的分压大于氧化物的分解压时，金属被氧化。而 MeO 的分压大于真空中的氧分压， MeO 会分解出金属来。金属氧化的分解压力如图 2-11 所示。一般而言，绝大多数钢铁零件在 $13.3 \sim 1.33 \times 10^{-3}$ Pa 范围内进行加热冷却后获得光亮的表面。

b. 真空的脱气作用。金属脱气可提高金属的塑性和强度，真空度越高和温度越高，脱气时间长，则越有利于金属的脱气效果，因此钢的抗拉强度提高，造成氢脆断裂所需的氢浓度越低，而真空热处理的脱气作用便可满足这一要求。

c. 真空的脱脂作用。用于易损伤的金属箔、线材等金属零件的脱脂。油脂为碳、氢、氧的化合物，零件进行机械加工使用的切削液、润滑剂和防锈油等，在真空加热时油脂分解为氢、二氧化碳

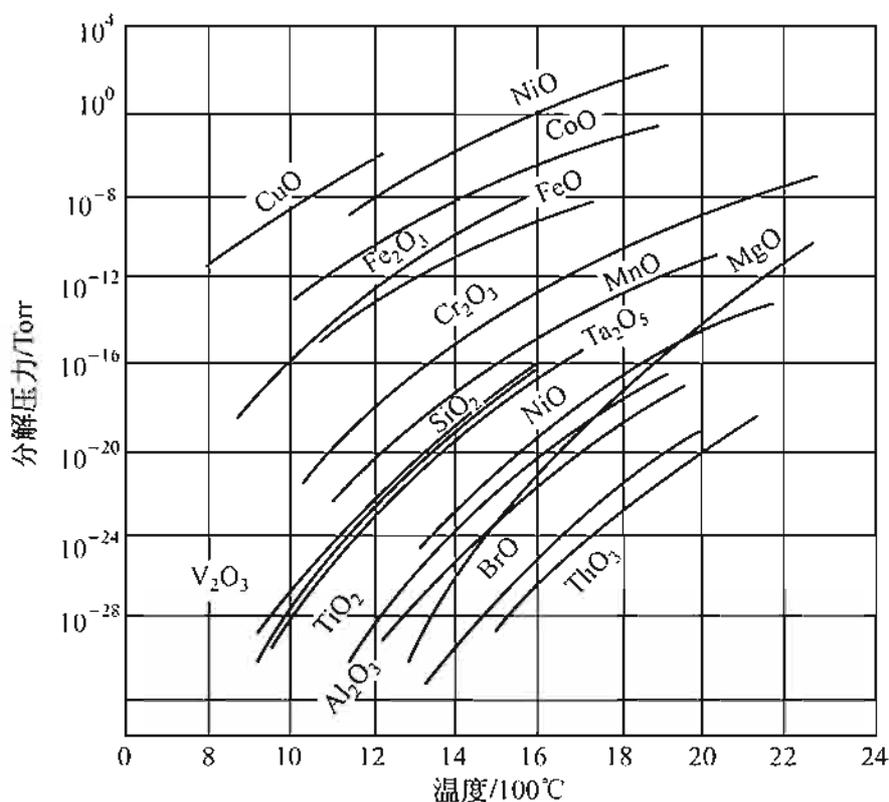


图 2-11 金属氧化分解压力 (1Torr=133.322Pa)

和水蒸气等，蒸气压较高，在真空中加热时被挥发分解，随后被真空泵抽走。油脂会影响真空炉内的清洁度，零件表面存在污物等，将对真空泵的性能产生重要影响，因此零件在入炉前要清洗干净。

d. 真空下元素的蒸发。在常压下金属热处理时，合金与金属元素的蒸发微乎其微，而在真空状态下，零件表面层中的常见合金元素如锌、镁、锰、铝、铬等在蒸气压较高时极易挥发，因此造成表面合金元素的贫乏（减少），使表面的组织成分发生变化，零件的力学性能变差。尽管零件的表面不会产生氧化和脱碳现象，但需注意在真空加热的状态下零件表面的合金元素和状态有明显的变化，为了避免这种情况的发生，为了保证零件表面的光亮度，减少合金元素的蒸发，先抽真空到较高的真空度后，随即充入高纯氮气，使真空炉内的压力维持在 26.6~200Pa，即可防止金属元素的蒸发，加热效果十分明显。对于含有上述元素的钢在 800℃ 以下可直接升温，在 800℃ 以上加热时则通入一定量的中性气体等，有助

于防止元素的蒸发。

真空炉存在的不足为，由于是靠辐射加热工件，因此加热速度慢，另外在真空状态下部分合金元素会出现蒸发现象，需要在高温状态下及时充入氮气，才能避免这种情况。

③ 真空炉的热处理应用 真空炉在我国的发展时间不长，由于生产成本低和一次性投资大，因此其应用的范围也受到一定的限制。在国外工业发达国家真空炉的数量在 23% 以上，与可控气氛炉基本相当，其发展的进度很快，机械化程度和工艺水平更高，几乎可以实现金属材料的全部热处理工艺，如淬火、回火、退火、渗碳、氮化、渗金属等热处理工艺，完成气淬、油淬、硝酸盐淬和水淬等淬火处理。具体应用见表 2-5。

对工模具钢而言，在真空炉内加热时，减少了辐射换热，加热的速度缓慢，零件的各部分受热均匀，因此变形量很小。冷却后的零件表面处于压应力状态，故零件具有良好的综合作用，疲劳强度和抗拉强度明显提高，使用寿命比普通的盐浴炉处理的零件提高 2~10 倍。

表 2-5 真空热处理炉及其应用情况

使用范围		真空炉类别及特点	处理的材料	应用实例
真空 热处理	退火、正火 固相除气	有炉罐或无炉 罐真空炉	Cu、Ni、Be、Cr、 Ti、Zr、Nb、Ta、 W、Mo	电器材料、磁性材 料、弹性材料、高熔点 金属、活泼金属等
	淬火、回火	内部具有强制 冷却装置的真空 炉	高速钢、工具钢、 轴承钢、高合金模 具钢等	工模具、夹具、量 具、轴承和齿轮等机 械零件
真空 烧结、焊 接、压接	烧结	感应烧结真空 炉、电阻烧结真空 炉等	W、Mo、Ta、Nb、 Fe、Ni、Be、TiC、 WC、VC 等	超硬质合金、高熔 点金属材料和粉末冶 金零件等
	铅焊	电阻真空炉、感 应真空炉	铝、不锈钢、高温 合金	飞机零件、火花塞 等使用的不锈钢、高 温合金零件的铅焊等
	压接	电阻真空炉、感 应真空炉	碳钢、不锈钢	

续表

使用范围		真空炉类别及特点	处理的材料	应用实例
表面处理	化学气相沉积	电阻加热、感应加热、电子束加热	金属及其碳化物、硼化物等沉积于金属或非金属基体上	工具、汽轮机叶片、飞机零件、火箭喷嘴等
	物理气相沉积	电阻加热、感应加热、电子束加热	金属、合金、化合物等沉积于金属、玻璃、陶瓷、纸张上等	各种材料的真空涂(镀)膜制品,部分工具和模具的表面超硬处理等
	离子渗碳	离子渗碳炉	碳钢、合金钢	齿轮、轴类和各种销子等机械零件
	离子渗氮	离子渗氮炉	合金钢、球墨铸铁	齿轮、轴类和工模具等机械零件

耐热钢、不锈钢等零件经真空退火后,表面光洁,提高了零件表面的耐腐蚀性和对晶粒间的耐腐蚀能力。另外可实现真空堆焊、软化退火、真空镀膜等,其他热处理设备是无法比拟的。

机翼大梁、起落架、高强度螺栓等飞机重要零件的材料为30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A,经真空热处理后,抗拉强度提高,而其塑性和韧性没有发生明显的变化,断裂韧性降低,而低温的冲击韧性较高。疲劳强度提高了100倍以上,冲击磨损和低温拉伸寿命分别提高1.5~2.4倍和1.6~3.5倍,显示了真空热处理的优势。

④ 真空炉的主要技术参数 真空炉的各项技术指标与其他热处理设备有相似之处,但因其炉膛内必须能承受负压的作用,并能保持加热零件的无氧化脱碳,由于其特殊的结构和加热的特点,因此有些技术要求相对比较严格。具体的主要技术参数归纳如下。

- a. 额定功率(kW)和电压(V)。
- b. 电极相数。
- c. 炉膛的有效加热区尺寸(mm)。
- d. 额定工作温度(°C)。
- e. 炉温的均匀性(°C)。

- f. 最大装炉量 (kg)。
- g. 极限真空度 (Pa)。
- h. 工作真空度 (Pa)。
- i. 压升率 (Pa/min 或 Pa/h)。
- j. 空炉抽空时间 (min)。
- k. 空炉升温时间 (min)。
- l. 工件转移时间 (min)。
- m. 气体的消耗量 ($\text{m}^3/\text{炉}$)。
- n. 冷却水的消耗量 (m^3/h)。
- o. 外形结构尺寸 (m)。
- p. 炉体总质量 (kg)。

在上述技术参数中，最重要的有极限真空度、工作真空度和压升率，它们是整个真空炉的关键特性，是衡量设备技术水平的硬指标，如果达不到则根本无法实现真空热处理的目的。因此，它们既是设计的要求，更是验收过程中必不可省的指标。而压升率是指真空炉达到极限真空度后关闭所有的阀，在单位时间内炉内压力的上升情况，这是检验真空炉气密性的数据。通常极限真空度小于 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ，而工作真空度在 $1.33 \sim 13.3 \text{ Pa}$ ，压升率不大于 0.67 Pa/h 。

(3) 真空炉的结构和加热元件

① 真空炉的结构 真空炉是由炉体、真空机组、液压系统、控制系统、冷却系统等几部分组成的，对于气冷真空炉要具备氮气储气罐，为防止停水或水压不足等要备有高空水槽，防止因停水而烧坏或烧蚀密封件、电极等。

真空炉的炉体和炉门由高强度钢板焊接而成，为双层水套结构形式，炉门由齿轮、齿条传动开启和关闭，灵活方便。

加热室是圆形结构，石墨管状加热器和冷却气体喷嘴沿加热室的周围成 360° 均匀分布，高级碳毡及柔性石墨纸作为保温材料，结构轻巧固定。

真空炉根据加热的形式可分为外热式和内热式两种。内热式是

真空炉生产厂家的首选炉型，按结构的不同可分为单室、双室、三室以及连续式等真空炉，有气冷、油冷和气油两用炉。真空气淬使用纯度在 99.999% 以上的氮气，可进行不锈钢、高合金模具钢、高速工具钢和铁镍基合金等淬火。真空油淬采用的是 ZZ1、ZZ2 两种真空淬火油，具有低的饱和蒸气压，用于合金钢的淬火。

② 真空炉采用的加热材料 真空炉的加热元件有金属和非金属之分，分别叙述如下。

a. 金属加热元件 通常分为两种：一种为贵金属，如钼、铂、钨、钽等；另一类为一般金属，如镍铬耐热合金、铁铬铝合金、钼钨合金等。

b. 非金属加热元件 有石墨和化合物两种。化合物有碳化硅、硅化钼、二氧化钼等。其中碳化硅在高温下易黏结分解，而二氧化钼在 1300℃ 时会软化。只有石墨具有加工性能好、耐高温、耐急冷急热性好、塑性好、辐射面积大、抗热冲击性能好等特点，适于制作加热元件。

目前真空炉的加热元件常选用石墨棒（管）或加热管等，具有膨胀系数小、高的发热性、易于加工、价格适中等特点，可做成棒状、板状、管状和带状等。它们在真空状态下产生的热量通过辐射传递给工件，因此该类真空炉的加热速度慢，对于大型零件应进行充分的预热，必要时进行分段加热，既能克服内外加热后的温差，又能减小零件加热的变形，有利于零件的热处理质量得到保障。

③ 隔热屏（炉衬） 是加热室内主要的组成部分，其作用为使加热元件与炉壳分开，确保加热室的尺寸和有效加热区范围，通过隔热屏的隔热和保温减少热损失，确保零件在加热过程中温度分布的均匀性。考虑用的材料应具有耐火度、绝缘性、抗热冲击性和耐腐蚀性、良好的热透性等特点。一般有三种，即多层金属隔热屏、石墨毡隔热屏和夹层复合隔热屏。对于温度在 1100℃ 以下的真空炉，使用不锈钢炉衬；而对于 1100℃ 以上，则采用钼等高温合金、石墨毡以及陶瓷等材料。石墨毡作为一种新型的隔热材料，具有密度小、热导率小、无吸热性、耐热冲击性好和易于加工等特点。

④ 真空炉的冷却系统 根据零件的材质的淬透性，确定合理的冷却方法。同正常的热处理淬火一样，真空冷却有强制风（气）冷、油冷、气转油冷、硝盐或水冷等几种方法。一般来讲，对具体的真空炉而言，其冷却方式是固定的。风冷系统由鼓风机、高效热交换器、导流管和喷嘴组成，采用炉内循环形式的结构，具有冷却速度快的特点。

根据高压气淬炉的工作特点，其冷却方式有四种：真空冷却、加压冷却（ $0.1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ）、负压冷却（700Torr，风机启动）和自然冷却（700Torr，风机不启动）。依据零件的技术要求可选用不同的冷却方式，实现零件的淬火、回火、退火、烧结、钎焊、化学热处理、真空镀膜以及物理和化学沉积等。

需要说明的是，为了防止高温下部分金属元素的蒸发，降低零件的物理、化学性能，可采用分压保护，即向炉内充入高纯氮气，使炉内气体保持在一定的压力范围内，可抑制零件表面合金元素的升华。

⑤ 真空系统 由机械泵、增压泵和扩散泵组成，炉体上装有真空计等测量仪表，随时观察炉体内的真空度，确保零件在真空状态下实现无氧化热处理。机械泵、增压泵组成的抽真空系统可获得中真空状态，机械泵、增压泵和扩散泵组成的真空系统能够完成高的真空度要求。

⑥ 炉内传动机构 是推进零件和推出真空炉必须具有的专门装置，通常为链条传动、气动、液压传动等。对双室或三室真空炉来说，炉内传动机构既能保证室与室之间零件的传送，又必须不阻碍隔热挡板（门）的密封。

⑦ 电器控制系统 由磁性调压器、可控硅半控整流桥自耦调压器、微机控温仪等组成，实现了设备的自动化和机械化。设备具有自锁功能，任何错误的操作和指令不会对真空炉造成危害，因此真空炉的安全性系数很高。

（4）真空炉技术的发展前景

目前发展起来的抽空炉是按真空炉设计的，指炉膛在粗抽空后

(67Pa)，然后充入保护气体（氮气）来加热处理零件，其特点为成本低、耗气量小，同时又具备真空炉和可控气氛炉的优点，因此发展前景十分广阔。

关于热处理炉的发展，一直向新型节能热处理炉迈进，在设计中设备的性能很大程度上取决于加热元件（包括电极辐射和燃气辐射的质量）、炉内耐热构件、传输运动部件、高温风扇及炉子的密封性等。设备节能和密封性好才能提高炉温的均匀性，大力推广采用可控气氛炉，减少零件的氧化和脱碳，不断改善工作条件和劳动条件，实现设备的机械化和现代化，其发展趋势见表 2-6。

表 2-6 真空热处理技术的发展趋势

具体技术和装置	第一代情况	第二代情况	第三代现状	未来的发展趋势和努力方向
加热技术	真空辐射	真空辐射 负压或载气加热	负压或载气加热，低温正压对流加热	低温正压对流加热，提高加热的效率实现真空局部加热
冷却技术	负压冷却 加压冷却	加压冷却(2×10 ⁵ Pa) 高压冷却(5×10 ⁵ Pa)	高压冷却(5×10 ⁵ Pa) 增压冷却(10×10 ⁵ ~20×10 ⁵ Pa)	氢气、氦气、氮气混合冷却技术，气体回收技术等
结构	开放型	开放型	密闭型	密闭型结构推广
炉床结构	陶瓷毡、石墨毡	硬质预制	高强度碳质材料	高强度碳质整体结构
进出料机构	台车、吊车或吊架式	分叉式机构	进出辊底式结构	各种形式的无人操作形式
自动控制	元件手动，PID 温控，继电器控制动作	多采用 PID 温控，PC 单板机控制	智能化仪表+PC 单板机控制	多种工艺有存储，CRT 显示计一台或多台群控

(5) 钢铁材料的真空热处理工艺规范

从前面介绍的真空炉适合处理的材料来看，只有淬透性好的钢铁材料才能进行真空热处理，即冷却方法为气冷或油冷的工件。目

前用于水冷和硝盐冷却的真空炉很少，本书不进行介绍。表 2-7 列出了部分常见材料的真空炉热处理工艺。

表 2-7 部分常见材料的真空炉热处理工艺规范

钢 号	淬火温度 /℃	真空度 /Pa	冷却 介质	回火温 度/℃	硬度 (HRC)
G13 型不锈钢	1000~1050	充气维持	油或气	660~790	17
GH132	980~1000	充气维持	气	200~300	34
Cr12MoV	950~1000	$133.3 \times 10^{-1} \sim 133.3 \times 10^{-2}$	油或气	700~720	58
9Mn2V	780~810	$133.3 \times 10^{-1} \sim 133.3 \times 10^{-2}$	油		62
5CrMnMo	820~860	$133.3 \times 10^{-1} \sim 133.3 \times 10^{-2}$	油或气		50
3Cr2W8V	1075~1125	$133.3 \times 10^{-1} \sim 133.3 \times 10^{-2}$	油或气		46
4SiGrV	860~900	$133.3 \times 10^{-1} \sim 133.3 \times 10^{-2}$	油或气		57
8Cr13	850~880	充气维持	油或气		55
W18Cr4V	800~850 预热, 1270~1285 加热	$666.5 \times 10^{-1} \sim 666.5 \times 10^{-2}$	气或油	550~570	63
W6MoCr4V2	800~850 预热, 1210~1230 加热	$666.5 \times 10^{-1} \sim 666.5 \times 10^{-2}$	气或油	540~560	63
W6MoCr4V2Co	730~850 预热, 1190~1210 加热	$666.5 \times 10^{-1} \sim 666.5 \times 10^{-2}$	气或油	540~560	64
30CrNiMo	830~860	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	气		
30CrMnSi-A	900~930	10^{-2}	油		

真空炉的热处理工艺参数是工件获得需要的力学性能和组织的保证，根据工件的材质、技术要求和装炉方式，结合真空炉的加热特点，经过具体参数的调整和对比，对处理后工件要进行产品外观、硬度和金相晶粒度等几个方面的检查，才能确定合理的工艺参数。因此应当注意明确真空炉热处理过程中的工艺参数。应当引起注意的是，任何设备都具有不足之处，因此真空热处理同其他热处理方法一样同样存在缺陷。真空热处理与保护气氛热处理常见的缺陷概括见表 2-8。

通常的真空炉的具体工艺参数为真空度、升温速度、预热温度及预热次数、预热时间、淬火加热温度和淬火保温时间、冷却方法等。下面以高速工具钢为例加以介绍，所使用的为单室高压气淬真空炉（以 HPV-200 型为例）。

表 2-8 真空热处理与保护气氛热处理常见的缺陷

热处理种类	常见的热处理缺陷
真空热处理	①部分金属表面元素蒸发而贫化；②表面有氧化色或不光亮；③表面增氮或增碳；④工件之间粘连；⑤淬火硬度不足；⑥工件表面晶粒粗大
保护气氛热处理	①表面增氮或增碳；②表面氧化或脱碳；③氢脆；④表面不光亮、粗糙度差；⑤表面腐蚀

① 工件预热及加热过程中的工艺参数的确定

a. 真空度。用机械泵、增压泵及扩散泵抽空。炉内真空度至 10^{-1} Pa，可以送电加热。

b. 升温速度。该炉空炉升温至 1300°C 需 40min，在正常装炉量情况下。升温速度为 350/h，加热过程中有三个升温区域。即 A：炉内温度至 850°C ；B： $850\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ；C： $1050\sim 1210^{\circ}\text{C}$ （或 1260°C ）。按此升温速度，不会出现仪表与炉温不同步的现象。

c. 预热温度及时间。采取两次预热。一次预热温度为 $830\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，二次预热温度为 $1030\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 。传统的两次预热为： $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ ， $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。由于真空炉加热速度较慢，完全可以防止变形和开裂，因而没有必要采用较低的预热温度。

一次预热保温时间： $t_1 = 30 + 30 + 1.5D$

二次预热保温时间： $t_2 = 25 + 0.5D$

式中， t_1 、 t_2 分别为一次、二次预热保温时间，min； D 为工件的有效厚度，mm。

炉温达到二次预热温度后，转动分压开关，这时压力范围已在 FRV-2 真空计设定为 $60\sim 6000$ Pa。开始分压，此过程直到加热结束。采取这个措施，是为了防止工件的某些元素如 Cr、Mn、Al 等部分合金元素在高温高真空状态下升华，从而降低工件的物理和化学性能。使用分压保护，向炉内充入氮气，使炉内的气氛维持在一定的压力范围内，能抑制表面元素的升华。

d. 淬火加热温度及保温时间。当热处理温度相同时，真空淬火的晶粒度比普通盐浴炉加热的晶粒度大一级，这是由于真空的除气作用使钢材阻止晶粒长大的气体杂质和气体化合物得以去除，但

对材料的冲击韧性没有影响。工艺试验表明，真空淬火温度比盐浴淬火温度应降低 10℃ 左右，这样二者晶粒度基本一致。常见三种材料的真空淬火温度见表 2-9。

表 2-9 淬火加热温度的选择

高速钢牌号	淬火加热温度/℃
W18Cr4V	1250~1270
W6Mo5Cr4V2	1200~1220
W9Mo3Cr4V	1220~1240

保温时间： $t = 20 + 0.5D$

式中， t 为保温时间，min； D 为工件的有效厚度，mm。

其最长保温时间不宜超过 50min。

② 工件冷却过程中工艺参数的确定 工件经真空炉加热保温结束后，需要进行快速冷却，以获得要求的马氏体组织。这里有三个重要的工艺参数：冷却介质、冷却压力和冷却时间。在工艺试验中应根据工件选择气冷还是油冷，需要对冷却压力和时间进行反复调整。一般高速钢分级冷却的温度为 550~620℃。在马氏体转变温度范围以外存在两个转变区域，上部转变温度为 650~760℃，组织为粒状珠光体 (P)，下部转变为 175~350℃，组织为贝氏体 (B)，350~650℃ 之间为过冷奥氏体 (A) 稳定区域，自淬火温度至 700℃ 应快速冷却，这是为了减少碳化物的析出。基于此点，将热电偶插入工件中，以机用丝锥为例，冷却介质为高纯氮气（纯度为 99.999%），得出产品规格、冷却压力和冷却时间的关系，见表 2-10。

表 2-10 气体冷却压力与时间的对应关系

规格	冷却压力(炉上压力值)/10 ⁵ Pa	冷却时间(淬火温度至 600℃)/min
≤M3	2.7~3.0	2.7~3.0
>M3~M8	3.0~3.5	
>M8~M20	3.5~4.0	
>M20~M36	4.0~4.5	
>M36~M80	4.5~5.0	

冷却前储气罐上压力应大于 $8 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。实践证明，采用上述压力，确保了工件快速冷至稳定区域，避免了碳化物的析出，金相组织正常，硬度达到 65 HRC，晶粒度为 9.5~10 级，表面光亮，变形量极小，不足盐浴处理变形量的 1/4，因此降低了热处理后的磨削成本。

高速钢制造的机用丝锥的真空气体淬火热处理工艺规范曲线具体如图 2-12 所示。

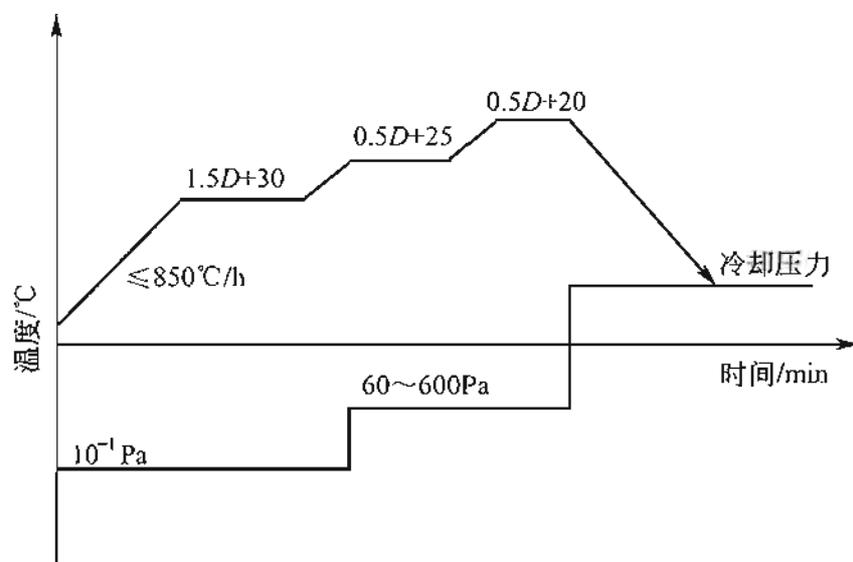


图 2-12 机用丝锥真空气体淬火热处理工艺规范

③ 工件真空炉回火过程中工艺参数的确定 真空炉回火过程中的工艺参数同前所述。真空度比预热时要高一些。由于回火炉温度较低，因此回火后的工件光亮度比淬火时稍差一点。另外，真空回火效果一般比盐浴回火差一些，这是由于工件在真空状态或氮气保护下气体流动性差，而一般的加热传热方式为辐射，故加热速度慢，受热条件差，故保温时间比盐浴炉长，一般为硝盐炉回火时间的 4~6 倍，但对使用性能没有影响。

(6) 真空炉与盐浴炉处理高速钢圆板牙各项指标的对比

圆板牙是常用的螺纹刀具，由于是内螺纹，盐浴炉处理的高速钢圆板牙的螺纹中径难以保证，其关键在于热处理后的变形量超过了尺寸要求。解决该问题的措施是选择真空热处理。目前用盐浴炉

处理圆板牙主要有以下几个主要问题。

① 产品淬火后螺纹和外圆变形过大，从而导致产品精度超差。

② 淬火后弯曲变形，从而导致螺纹牙型角的变化。

③ 淬火后牙型凹处有多余盐渍，直接影响牙型表面粗糙度，并给回火后加工带来不便。

④ 淬火后变形，导致四分之一螺距发生变化。

⑤ 淬火后去渣工艺过程中，螺纹有变化。

用 HPV-200 高压真空气淬炉处理的高速钢圆板牙，经工艺验证，完全满足工艺要求。主要检测项目见表 2-11。

表 2-11 高速钢圆板牙两种处理方式的对比

序号	项 目	盐浴炉	高压真空气淬炉	备 注
1	硬度(HRC)	63~66	65~66	
2	螺距偏差/mm	±0.05	±0.01	
3	25.4mm 螺距偏差/mm	±0.02	±0.008	
4	牙型高低减量	10% <i>H</i> 高	2% <i>H</i> 高	<i>H</i> 为螺纹牙型高度
5	淬火变形(弯曲度)/mm	0.25	0.05	
6	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	6.3	1.6~3.2	
7	淬火后加工情况	磨削加工	不需加工	
8	外观质量	有斑点盐渍	银白光亮	
9	淬火废次品率	5%~7%	无废次品	无氧化脱碳
10	牙型变化	±40'	±8'	
11	使用寿命/月	8	20	以 M12 为例

搓丝板经不同温度真空淬火与盐浴淬火使用寿命的情况比较见表 2-12。可以看出真空热处理后搓丝板的寿命大幅度提高，显示出明显的优势，因此在工具制造业广泛采用真空淬火技术。

表 2-12 搓丝板在盐浴淬火和真空淬火使用寿命的比较

搓丝板名称	材 料	加工件数/万件				提高寿命 /倍	
		盐浴炉处理	真空炉处理温度/°C				
			1030	1050	1080		1120
木螺纹搓丝板	Cr12MoV	16	48	88	96	134.4	平均 3.4
螺栓搓丝板	9SiCr	30	—	82	—	—	1.7
丝锥搓丝板	9SiCr	2	—	—	—	—	2

(7) 真空炉处理工件的发展前景

经过反复试验证明上述工艺参数正确合理，完全能指导实际的热处理生产，没有出现金相及硬度不合格的问题，切削试验及寿命试验均表明各项技术指标优于盐浴处理的工件。其原因如下。

① 在真空状态下加热，热量的传递方式为辐射，尤其是两次预热，升温速度比较慢，因此使工件的厚薄不均的部分、表面与心部的温差较小，工件的膨胀和收缩也就比较均匀，真空淬火变形量为盐浴炉的 $1/10 \sim 1/3$ 。

② 由于真空的脱气作用特别是去除了氢，没有氢脆，增强了晶界强度，提高了弯曲性能。

③ 盐浴处理的工件其表面受拉应力作用，经回火、喷砂后受压应力，在磨削后又呈拉应力。而真空炉处理的工件始终受压应力作用，压应力可显著提高工件的疲劳强度和断裂韧性，使用寿命提高了 $4 \sim 10$ 倍，为降低生产制造成本、节约能源提供了依据。

总之，真空热处理后的工件获得良好的表面状态，具有脱气、蒸发、去除氧化膜及表面污物的效果，因此克服了盐浴炉处理过程中的氧化、脱碳、腐蚀等疵病而引起的淬火硬度不足、硬度不均匀、因淬火应力不均而出现的耐磨性下降，以及变形大、裂纹和冲击韧性下降等热处理缺陷，因此，真空炉取代盐浴炉等炉型势在必行。

2.1.3 其他影响零件氧化和脱碳的因素

零件在热处理加热和冷却过程中，除了因热处理炉的加热介质在零件表面产生质量缺陷外，其他相关的热处理工艺参数也有不同的影响，例如零件的加热温度、加热时间、钢材自身的化学成分等，综合分析上述因素对于正确指导热处理的生产、降耗节能、制造出成本低廉的优质产品是十分重要的。

(1) 加热温度和炉内气氛

钢铁零件热处理的目的是意义在于通过加热和冷却获得要求的组织和性能。而组织是一切性能的基础，零件在加热时，采用高于相变点以上的温度 (A_{c1} 、 A_{c3} 或 A_{cm}) 进行充分加热，确保得到奥

氏体化状态，为淬火做好组织上的准备。因此钢铁零件的加热温度是重要的工艺参数，应引起热处理操作者和工作者的高度重视，必须认识加热温度的影响和作用，才能对零件进行正确的热处理，生产出符合技术要求的产品。

零件加热过程中采用较高的温度时，增加了表面氧化和脱碳的概率，因此在保证零件达到充分加热、成分均匀化的前提下，选择加热规范应尽可能采用较低的温度。为了确保产品质量，对于高合金钢或易变形的模具采用一次预热或多次预热，同时确定合理的最终加热温度。

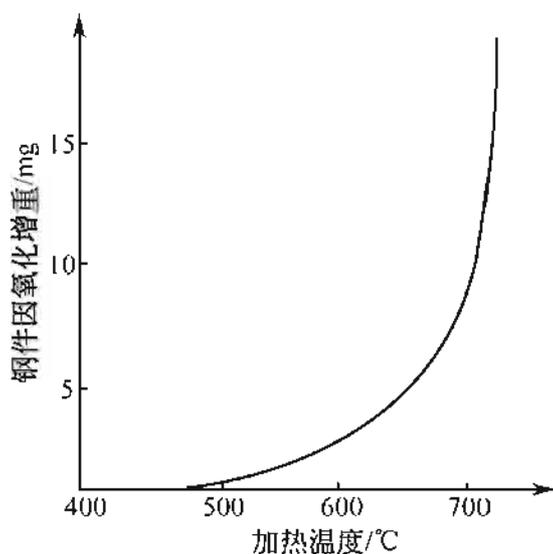


图 2-13 钢的氧化速度与加热温度的关系

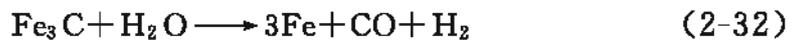
随着气氛中氧含量的升高以及加热温度的提高，零件表面的氧化加剧，氧化层加厚，氧化层达到一定的厚度则形成氧化皮，将使零件的尺寸减小，由于氧化皮和钢本身的膨胀系数不同，故使氧化皮脱落，影响了零件的表面质量，加速了钢材的氧化进度，具体如图 2-13 所示，严重的影响淬火时的冷却速度，造成软点或硬度不足。从图中可知在 600°C 以上时形成的氧化膜以 FeO 为主

，它是不致密的，氧和铁原子容易通过这一氧化膜而渗入内部，使氧化层的厚度增加。而在 600°C 以下时，氧化膜由比较致密的 Fe_3O_4 组成，因此氧化的速度比较缓慢。因此一般零件采用较低的加热温度，或缩短在高温下的停留时间，有助于减少氧化倾向。

钢件表面产生氧化皮，将造成表面粗糙度的升高，因此在加热过程中一般不允许出现氧化皮，事实证明氧化皮会造成零件出现淬火软点、表面开裂，使钢的表面质量状态下降，零件的强度降低和力学性能下降，因此其危害十分严重，钢的表面氧化一般同时伴随

着表面脱碳。

脱碳的危害是明显降低钢的淬火硬度、耐磨性以及疲劳性能，作为高速工具钢将降低其红硬性和耐磨性，失去作为刀具钢的意义。脱碳其实质是钢表面的碳原子在高温下氧和氢、水蒸气和二氧化碳等与之反应生成 CO 或甲烷等物质。炉内成分中氧和氢、水蒸气、二氧化碳、硫酸根、碳酸根等氧化性物质愈多，则表面的氧化愈严重。其具体化学反应如下：



上述反应是可逆的，其中只有 CO 和 CH₄ 可以进行钢铁零件表面的增碳，事实上氧化和脱碳是同时进行的。当钢表面的氧化速度小于碳从内层向外层扩散的速度时，将造成表面的脱碳，反之发生脱碳现象。因此，一般而言，在氧化性相对较弱的氧化气氛中会产生较深的脱碳层。

即使是氮基气氛的加热介质，加热温度提高也将使氧化性增强，表面的氧化和脱碳更加明显，前面已经叙述，具体的加热脱碳情况如图 2-4 所示。

表面脱碳后，其碳含量降低，因此在金相组织中碳化物的含量明显减少，造成表面硬度的降低，影响了零件的表面组织和使用性能，脱碳造成零件表面金相组织的差异。通常按脱碳的严重程度，分为全脱碳和半脱碳两部分，具体如图 2-14 所示。

从图 2-14 中可以看出，

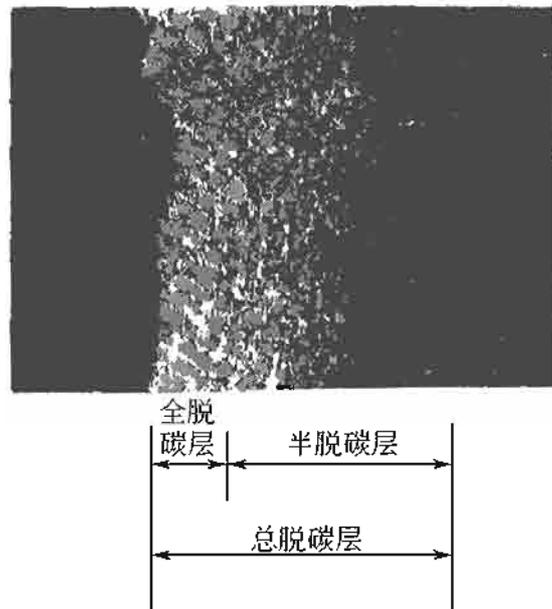


图 2-14 钢的脱碳层典型组织 (×100)
(38CrMoVA 钢)

全脱碳层为最外面一层，其显微组织为白色的铁素体，半脱碳层是从全脱碳层的内界到钢的含碳量为原始组织状态处的距离。

需要引起注意的是脱碳后钢的表面形成铁素体的晶粒，根据温度的高低分为柱状和粒状两种，如图 2-15 所示。通常在 670°C 以上才会有明显的脱碳现象。资料 [33] 介绍，钢在 $A_1 \sim A_3$ 或 $A_1 \sim A_{\text{ccm}}$ 温度加热，强化了脱碳的倾向，形成了柱状的脱碳，这同脱碳后晶粒度的变化有很大的关系。而钢在 A_1 或 A_3 以上温度加热，如果为弱脱碳，则形成的表面为柱状晶粒。随着温度的提高，加热介质的氧化性增强，因此钢的氧化脱碳严重。

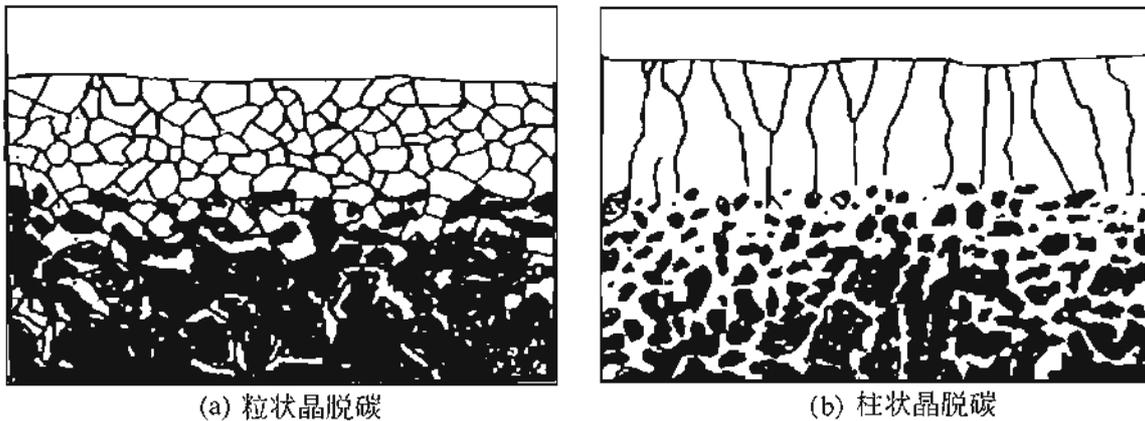


图 2-15 钢氧化脱碳后的两种组织状态

(2) 加热或保温时间

零件的氧化和脱碳的过程既是化学作用的过程，又是原子的扩散过程，加热温度提高和保温时间延长都将加剧零件表面的氧化和脱碳过程，尤其是加热温度更为强烈。一般氧化速度随温度按抛物线规律增加。在 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 以上加热时，温度每增加或提高 100°C ，则氧化的趋势提高 10 倍。

零件在热处理炉内加热一定的时间，其目的是为了充分加热后得到奥氏体组织。在一定的加热温度下，奥氏体转变的充分程度与钢中的化学成分密切相关，待转变完成后即可进行冷却处理，从而完成组织转变，达到零件热处理所需的性能、硬度、金相组织。零件热处理的主要技术要求多为提高其耐磨、耐蚀以及尺寸稳

定性，因此在加热时只要时间合理即可满足要求，如果时间延长，则零件与加热介质的接触时间增加，势必提高零件在加热过程中氧化和脱碳的概率，对零件的表面状态会产生不良的影响。

零件的加热或保温时间应根据热处理炉的特征、零件的材质、装炉方式、装炉量的大小、有效尺寸、截面的变化、零件的复杂程度、对变形和硬度的要求等进行综合考虑，有时可根据经验确定加热或保温时间，也可经过实践验证，采用正交法进行时间的确定不失为一种良好的措施。

需要指出，对截面尺寸大的碳素钢、合金钢结构钢或高合金钢以及高速工具钢等，尤其是高合金钢以及高速工具钢，由于其热导率低，零件的内外温差较大，如果直接在淬火温度下加热，将造成零件内外组织转变的不同步，热应力的增大超过材料的抗拉强度，会引起零件的开裂。因此采取预热或分段加热的方法，既能确保零件内外温度的一致，更重要的是为其最终的热处理奠定良好的基础，可有效避免零件的开裂。

(3) 钢的化学成分

钢的化学成分对零件表面质量有一定的影响。一般而言，钢的抗氧化性、脱碳性很差，含碳量越高，钢铁零件脱碳倾向越严重。尤其是钢中 Si、Mo、Mn、Al 等合金元素，当其合金元素的含量较高，则脱碳的概率增加。

2.1.4 钢铁零件的表面腐蚀

需要注意的是零件的表面腐蚀也是一种质量缺陷，这多半同零件表面不清洁，存在油污、盐迹和其他腐蚀性物质有关。编者处理的气门锻模材质为 3Cr2W8V，是在盐浴炉中完成加热的，清洗干净后封箱在箱式炉中回火，有时在砂光后型腔内观察到腐蚀麻点，造成锻模无法使用。经过分析和试验发现，气门锻模在盐浴炉淬火后，型腔内黏附的氯化钡无法清洗干净，在 570~620℃ 的回火过程中氯化钡将锻模的表面腐蚀，造成麻点的产生。针对出现的质量缺陷，要求操作者盐浴加热后，在 60~80℃ 静止机械油中冷却 3~

4min, 立即擦拭干净型腔表面的残盐, 随后进行时效处理。经过生产实践验证, 效果十分明显, 杜绝了腐蚀缺陷的出现, 解决了锻模热处理的质量问题, 同时也为表面要求严格的零件的热处理提供了参考依据。从这个问题来分析, 零件热处理后的质量和表面状态同零件的整个热处理过程以及相关的加热介质和冷却介质有直接的影响。因此, 当存在热处理质量缺陷或问题时, 要学会从质量管理的角度来判断和处理。日本的大和雄重久在这方面做了大量的工作, 从人、机、料、法、环和检等六方面分析, 对热处理过程中出现的质量问题进行了十分深入的探讨和研究, 成为热处理工作的重要指南。

2.1.5 零件表面氧化和脱碳的后续处理

零件一旦在加热过程中出现了表面氧化和脱碳, 其危害性很大, 除了降低表面硬度、力学性能难以得到保证外, 同时很容易造成磨削裂纹等, 因此必须采取必要的措施来消除其对零件的使用性能的影响。根据目前的加工手段和工艺方法, 通常是分机械加工方法和化学加工方法两种, 要针对具体零件的形状、技术要求、复杂程度以及使用条件等确定最佳的加工方法。

(1) 机械加工方法

采用车削、磨削等去除掉零件表面的氧化皮和脱碳层, 其前提是必须不会影响零件的使用尺寸和要求, 对仅仅脱碳的零件也可重新进行渗碳处理, 这样可挽救部分脱碳零件, 避免造成零件的整体报废。

采用强力抛丸或喷砂同样可达到去除氧化皮和脱碳层的目的。资料介绍, 该类措施既可解决表面质量缺陷, 消除可能产生的负面作用, 同时表面得到了加工强化, 表面产生了压应力, 因此能够提高零件的疲劳强度和使用寿命等。汽车弹簧钢板进行抛丸处理后疲劳强度提高了数倍甚至十几倍, 由此可见该方法是具有实际应用价值的。

(2) 化学加工方法

在机械加工行业中，考虑到零件的氧化皮和脱碳层与基体的结合强度明显降低，二者可采用表面腐蚀的工艺方法来加以消除。通常使用盐酸或其他酸性介质来清理零件的表面。应当注意酸洗或浸泡的时间。事实证明，如果超过了一定的时间，很容易在零件的表面产生“氢脆”，其原因在于酸中的氢原子渗入零件的表面，造成晶界的脆性增大，韧性明显降低，强度低于断裂应力。

2.2 过热和过烧

2.2.1 过热

(1) 过热产生的原因

亚共析钢或过共析钢在远高于 A_3 或 A_{cm} 温度下长时间加热将导致钢实际晶粒度的粗大，过热钢呈石状断口，表面呈小丘状粗晶结构，无金属光泽。零件在热处理设备中加热时，由于超过淬火加热温度过高或在高温下停留时间过长等，使奥氏体晶粒迅速长大，以致力学性能显著下降，或晶粒显著长大的现象称为过热。资料 [18,42~44] 介绍，一般规律为，如果钢材的加热温度超过预定的奥氏体化温度 150°C 以上，通常称为过热。碳钢及合金钢温度大于 950°C ，工具钢以及高碳铬轴承钢温度大于 1000°C ，其特征为淬火后马氏体针粗大、针叶细长，将会引起淬火后零件的变形和开裂，而粗大的马氏体针还会造成零件机械强度的降低、韧性的显著下降，马氏体的裂纹呈节状。因此，在零件的加热过程中有针对性地分析零件的具体结构、材料的特性和热处理技术要求等，在热处理设备的选定、工艺的执行以及冷却方式等几个方面综合考虑制定出切实可行的成熟工艺，对特殊部位等采取必要的保护手段，尽可能避免过热现象的出现。

零件在加热过程中出现过热的原因较多，从影响产品质量的六大因素进行分析，通常为人、机、料、法、环和检，它们构成了零件热处理后能否满足技术要求的基本要因，因此任何缺陷或不足都应从以上几个方面找到真正的根源，然后采取相应的措施和通过合

理的工艺，就能确保零件热处理的目的。

零件中出现马氏体裂纹是发生淬火裂纹的根源，不管采用断续淬火、分级淬火还是等温淬火均无法防止淬火裂纹的产生。零件发生过热还同热处理加热设备类型有关，其概率自高至低的趋势为燃油炉、电炉、盐浴炉、流动粒子炉、可控气氛炉、真空炉等。

综观零件的过热特征，不难发现影响过热的因素可归纳为以下几点。

① 零件的原材料组织不良，如工具钢锻造后退火后球化组织不合格，或碳化物偏析、有网状碳化物。

② 加热时温度过高或保温时间过长，造成晶粒的急剧长大。

③ 零件在热处理设备加热区内放置不当，在靠近电极或加热元件附近产生过热。

④ 对截面尺寸变化大的零件，由于加热方式和放置等工艺方法选择不当，在零件的薄壁、尖角或尺寸较小位置处会产生过热现象。

(2) 零件过热的特征和防止措施

零件在热处理过程中，由于加热温度过高，将出现过热组织，其过热组织一般包括结构钢的晶粒粗大、马氏体的粗大、残余奥氏体的过多、魏氏组织，高速钢的网状碳化物、共晶组织（即莱氏体组织）、萘状断口，马氏体不锈钢（耐热钢）中的铁素体过多等，同时过热零件的外表粗糙，犹如鳄鱼皮一般。具体特征和预防措施见表 2-13。

表 2-13 钢的组织过热主要特征和预防或挽救措施

过热名称	主要特征	预防挽救措施
晶粒粗大	奥氏体的晶粒度粗于 3 级	① 为防止零件在加热过程中出现过热现象，根据选用的热处理设备制定正确和合理的热处理工艺参数，在操作过程中要严格控制加热温度、保温时间；同时对大型或复杂零
马氏体粗大	板条或针状马氏体长度在 7~8 级	
残余奥氏体过多	组织中碳含量和合金元素多的材料，在淬火后组织中残余奥氏体多	
魏氏组织	亚共析钢的铁素体在奥氏体晶界以及解理面析出，呈现细小的网格组织	

续表

过热名称	主要特征	预防挽救措施
网状碳化物	过共析钢在显微组织中出现网状沿晶分布碳化物	件采取预热、分段加热或降低加热速度的措施,尽可能消除晶粒长大的因素 ② 通过多次的正火或退火来细化晶粒,为重新进行热处理做好组织上的准备 ③ 对于石状断口组织,要通过高温变形来细化晶粒后,再进行退火处理,才能最后热处理
石墨化(黑脆)	高碳钢退火组织中有部分渗碳体转变为石墨,断口呈灰黑色	
共晶组织	高速钢过热出现共晶莱氏体组织	
萘状断口	断口有许多取向不同,比较光滑的小平面,像萘状晶体一样闪闪发光	
石状断口	在纤维状的断口上,呈现不同的取向、无金属光泽、灰白色的粒状断口	
δ 铁素体过多	Cr13 型不锈钢过热,在组织中有大量的 δ 铁素体	

从过热的原因和后果来分析,采取正确选择加热温度、适当缩短保温时间、严格控制炉内温度等工艺措施和方法,可基本避免出现过热现象的发生。零件的过热组织如图 2-16 所示。

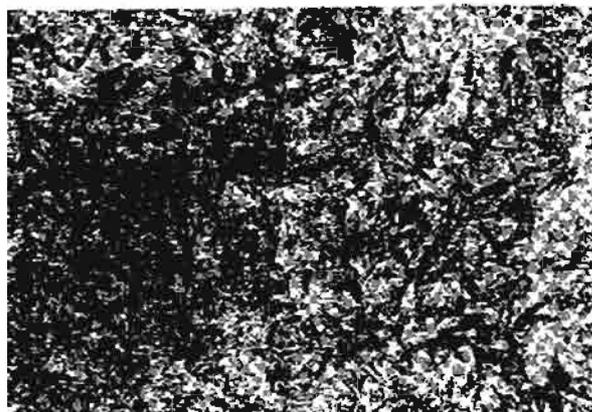


图 2-16 9SiCr 淬火过热组织

对于已经产生过热的零件,要根据其具体要求进行挽救,按正常热处理工艺消除过热组织的难易程度。一般分为稳定过热和非稳定过热两种。非稳定过热组织是指过热 1~2 级,采用正火、退火后可以细化晶粒,重新按正常的工艺淬火,即可达到零件的技术要求。考虑到零件已经有过热的情况,为了确保零件热处理后的技术要求和力学性能,应当采用较低的加热温度和短的加热时间。而稳定过热组织是无法采用正常的热处理工艺消除的,只能通过另外的方法来解决,例如高温变形和退火的复合工艺可处理该类过热组织。

魏氏组织是过热的一种特殊的组织,是指合金中有一个发展相

沿着母相的某一晶面呈片状析出，母相的晶面称为惯性面。产生原因是钢材在轧制、锻造、焊接和热处理过程中，由于加热温度过高、保温时间过长，使奥氏体的晶粒长大而变得非常粗大，冷却时冷却速度比较快，此时的析出相不能沿着某些晶粒边界析出，而是沿着某些晶面呈片状析出。在抛光后用酒精腐蚀，显微组织中可观察到针状白色的为铁素体，而黑色的为珠光体。铁素体呈针状，具有这种组织的材料脆性大，将会造成脱碳和韧性的明显降低。魏氏组织的特征如图 2-17、图 2-18 所示。

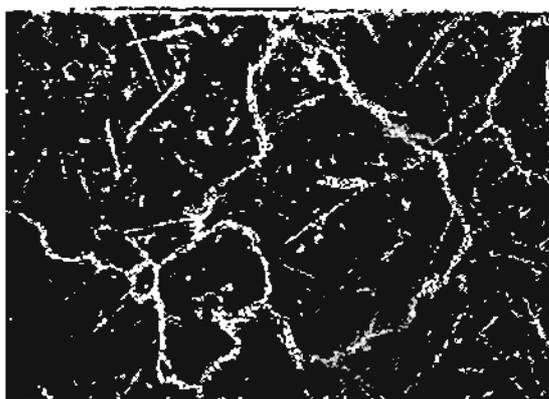


图 2-17 高碳钢的魏氏组织 ($\times 400$)

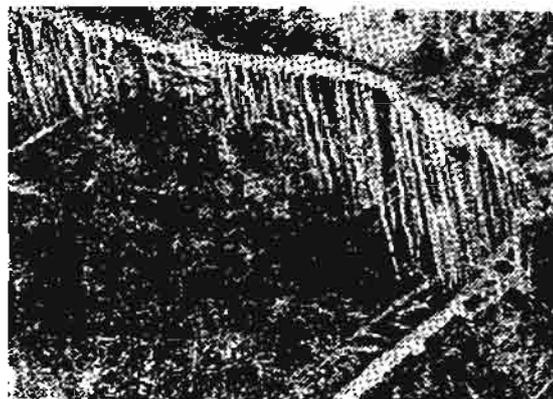


图 2-18 中碳钢具有魏氏组织的倾向 ($\times 400$)

魏氏组织的出现将造成零件力学性能的严重降低，脆性增加，零件的塑性和冲击韧性等明显降低，无法满足零件的工作需要，因此在实际的热加工过程中应避免此类缺陷的出现。魏氏组织形成的条件为：钢中含碳量小于 0.6%；粗晶粒是形成魏氏组织的必要条件；钢连续冷却时不适当的冷却速度；锰促使亚共析钢中魏氏组织的形成。

因此，防止魏氏组织出现的控制措施为严格控制热处理工艺参数。另外消除魏氏组织的方法是加热到稍高于 A_{c3} 点，让铁素体溶解，此时奥氏体晶粒也不致长大。

需要注意到，零件在过热的前提下对其进行快速冷却，容易形成没有规律性、显微裂纹为沿晶分布的淬火裂纹，称为过热淬火裂

纹，特征为组织粗大，裂纹沿晶界分布。图 2-19 所示为中碳钢过热后的淬火组织。



图 2-19 中碳钢过热引起的淬火裂纹

零件过热后增大了变形和开裂，明显降低了力学性能，而零件的塑性和韧性降低得更为显著。表 2-14 所列为过热对 45 钢力学性能的影响。

表 2-14 过热对 45 钢力学性能的影响

钢的组织状态	σ_b /kgf · mm ⁻²	σ_s /kgf · mm ⁻²	δ_5 /%	ψ /%	a_k /kgf · m · cm ⁻²
过热后有粗大的晶粒	64.2	33.7	15.5	24.5	1.6
过热后有魏氏组织	53.5	34.4	9.5	17.5	1.3
过热后重新细化处理	68.3	45.1	26.1	51.5	5.4

注：1. 1kgf · mm⁻² = 9.80665MPa。

2. 1kgf · m · cm⁻² = 9.80665J · cm⁻²。

对于含碳量 0.6% 以下的亚共析钢或过共析钢，由于过热引起晶粒的粗大，有时易于促使零件在冷却时形成魏氏组织，其特征为亚共析钢内部的先共析铁素体、过共析钢内部的先共析渗碳体分别从晶界开始，以针状或片状伸入晶粒内，而且定向分布于基体上。对于出现的过热组织可以进行正火处理。对严重过热的合金结构钢，应在 $A_{c_3} + 100 \sim 200^\circ\text{C}$ 进行扩散退火。对于高速钢，不会出现针状马氏体，只有粗大的马氏体晶粒，经多次回火后可以观察到碳化物形状的改变，由于温度较高，晶粒边界的碳发生溶解，冷却时析出，随着过热程度的增加，碳化物的析出呈线段状、半网状，严重的呈网状，造成基体强度的降低，容易出现淬火裂纹。

2.2.2 过烧

(1) 过烧的概念和原因

金属和合金在氧化性气氛中加热，由于加热温度在 1200℃ 以上，使奥氏体的晶粒晶界发生严重氧化甚至熔化的现象称为过烧，

其表面粗糙不平，显微组织粗化，并在晶间形成氧化物，在特定的晶界面形成具有一定几何特征的冷却转变组织。零件晶界之间的强度很低，脆性大，在外力作用下会沿晶断裂，无法满足零件力学性能的要求，对于重要的零件而言，只能进行报废处理。零件的过烧多在钢轧、锻等过程中产生，因此严格控制零件的加热温度、合理选择工艺参数是防止过烧的重要手段。过烧组织使零件的性能严重恶化，是产生热处理裂纹的重要原因之一，故零件在热处理过程中是不允许出现这类致命缺陷的。图 2-20 所示为典型的过烧组织。

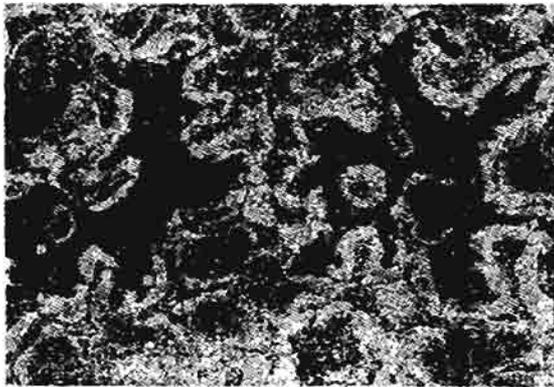


图 2-20 W18Cr4V 淬火过烧组织 (×500)

从图 2-20 中可以看出，晶粒的晶界已经熔化，碳化物呈现空洞，宏观断口为灰色无光泽。零件的过烧将造成人力、物力和财力的严重浪费，应引起热处理操作者的高度重视。

(2) 过烧的特征

对于高速钢和不锈钢工件而言，其内部的碳化物在加热过程中，由于加热温度过高或保温时间过长或温度失控，很容易造成零件的过热或过烧，由此引发热处理裂纹的产生。对断裂的高速钢刀具进行显微分析，表面有许多裂纹存在，有一定数量的共晶莱氏体，其形状为尖角，同时有局部熔化现象。一旦温度升到 1300℃ 以上，则将产生晶界熔化，引起组织的过烧。因此，对于高合金钢和高速钢等而言，要严格控制炉内温度和保温时间，采用超温报警、自动断电等控制手段，从根本上避免出现过烧缺陷的发生。

零件在锻造或热处理时，如果加热温度过高，也会产生过烧，甚至开裂，其特征是在材料表面上呈龟状裂纹，严重时在裂纹处存在黑色的氧化物。进行金相分析可看到粗大的呈网络分布的裂纹，该类缺陷通常还伴随着晶粒粗大、魏氏组织以及裂纹附近的氧化、

脱碳现象，因此其危害很大，必须采取相应的措施防止发生此类缺陷。图 2-21 所示是 40 钢在锻造时所产生的缺陷，左侧显示材料表面粗糙不平，右侧为自表面伸向内部的裂纹，从图中可以看出在裂纹的表面附近有脱碳现象。

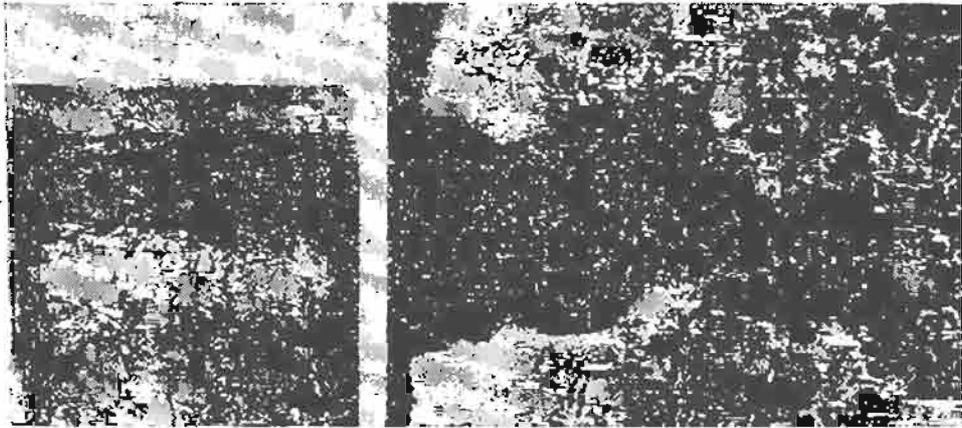


图 2-21 40 钢锻件的粗糙表面和表面裂纹 (2%硝酸酒精溶液)

2.2.3 防止零件过热和过烧的措施

零件在热处理过程中，良好的热处理组织是获得技术要求的基础和根本，一旦出现热处理缺陷，将会造成人力、物力和财力的浪费，更为严重的是有可能带来灾难性的事故，因此决不可掉以轻心。现将零件在实际热处理过程中采取的措施归纳如下。

① 根据零件的热处理技术要求，确定采用的热处理加热设备和加热介质，正确选择淬火加热温度和高温停留（或保温）时间，进行工艺试验，合理确定该零件的各项工艺参数，必要时采用正交法筛选出最佳的热处理工艺，例如温度、时间、放置方式、装炉量等。

② 防止设备的控温仪表失灵，要定期鉴定，确保其灵敏度。对连续生产热处理炉要 8h 或 12h 校验温度，同时检查热电偶的外套有无烧损而影响控温。

③ 经常观察炉膛的颜色深浅，对于盐浴炉除采用热电偶控制外，还要用光学高温计等来观察炉内颜色与零件的加热温度是否一致，要及时排除故障。必要时采用金相法观察零件的晶粒度，来确定最佳的加热温度。

④ 合理装炉，尤其是零件在盐浴炉中加热时，其吊挂方式与加热源（电极）的距离、是否插入底部盐渣等有直接的关系，另外零件必须在热处理设备中加热有效区进行加热，避免出现零件本身内外温差的增大。

2.3 氧化和脱碳实例分析

2.3.1 钢板弹簧的氧化和脱碳

钢材的表面脱碳是很难避免的，区别在于脱碳层厚薄的差异，因此在零件的加热过程中如何采取必要的措施进行预防和控制是热处理操作者的首要任务。对于零件热处理后需要全加工的，轻微的脱碳是允许的，而热处理后不再进行加工的零件，它将降低零件的硬度、使用寿命和疲劳强度等，严重的会成为废品，造成人力、物力和财力的损失，对于弹簧钢板而言脱碳的危害更大，因此要引起高度的重视，在实际的热处理工艺执行过程中确保实现无氧化脱碳加热。

通过对 55Si2Mn 不同脱碳层厚度的钢板弹簧进行弯曲疲劳试验，表明钢板表面脱碳层越深则疲劳强度越低（当脱碳层深 0.141mm 时，疲劳极限只有 35kgf/mm²），而无脱碳层则明显提高（57kgf/mm²），具体见表 2-15。因此脱碳层的存在对钢板弹簧的使用寿命有重要的影响，只有确保材料热处理前后的表面状态（成分、受力状态等）没有改变，才能满足其高疲劳强度的需要。

表 2-15 脱碳层深度对钢板弹簧疲劳寿命的影响

试验编号	交变负荷 /kgf · mm ⁻²	表面脱碳层深度/mm	调质硬度 (HRC)	疲劳极限 /kgf · mm ⁻²	交变弯曲最大应力 /kgf · mm ⁻²	断裂时交变应力变化次数/次
1	0~65	无脱碳	45~48	57	65	315000
2		0.089	43~44	35		245000
3		0.141	44~45	35		131000
4		0.147	43~44	20		129000
5		0.203	42	17		127680

注：1kgf · mm⁻² = 9.80665MPa。

资料介绍，通过分析 55Si2Mn 脱碳对疲劳极限的影响，可以确定脱碳与未脱碳二者的疲劳强度相差 59%。

一组中吨位载重车的钢板弹簧进行台架疲劳试验，按要求其正常的疲劳寿命在 50 万次以上，而部分弹簧只有 20 万~30 万次。经过检查，材料的化学成分合格，该弹簧的硬度为 477 HB，显

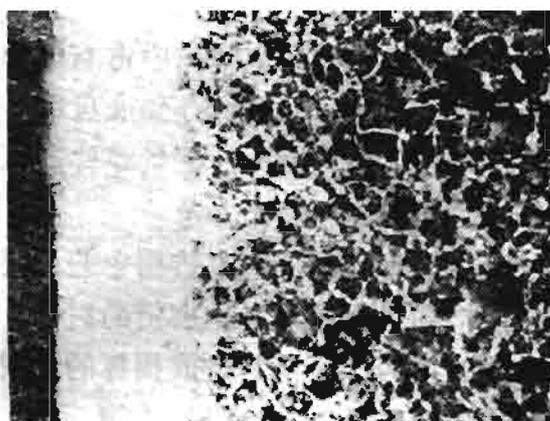


图 2-22 钢板弹簧的严重脱碳 (×100)

微组织为回火托氏体+少量的条状索氏体，组织属于正常状态，但钢板弹簧表面存在严重的脱碳现象（图 2-22），脱碳层总厚度在 0.35~0.45mm。可见表面的严重脱碳降低了材料的疲劳强度，因此在反复交变应力的作用下造成早期的疲劳断裂。

对弹簧钢板进行应力抛丸和弹簧棱边喷丸，可以明显提高其使用寿命。喷丸后使钢板表面呈现塑性变形，提高了抗拉强度，可以抵消工作过程中承受的弯曲压应力，抗拉强度提高 25% 以上。通常抛丸是对板簧的凹面喷射，抛丸或喷丸可除掉弹簧钢板上黏附的残盐或油垢及氧化皮等，使表面清洁呈银灰色，砂粒直径为 0.5~1mm，压力为 0.3~0.66MPa，喷射角度为 30°~40°。喷丸强化处理可明显提高疲劳寿命、耐蚀性和耐热性。采取强压（弯、扭、拉）也是改善弹簧拉应力松弛的有效方法。该方法主要用于承受循环载荷，容易发生疲劳损坏的各种压缩弹簧、钢板弹簧和扭杆弹簧等，在其成形及热处理后进行。研究发现，弹簧经过强化喷丸处理后减轻了或消除了弹簧表面的缺陷（如小裂纹、凹凸、缺口以及表面脱碳等）的有害作用，表层产生循环的塑性变形、加工硬化和有利的残余压应力，可有效提高疲劳寿命。

2.3.2 螺栓的表面脱碳

螺栓、螺母、弹簧垫圈和销轴广泛应用于机械行业和汽车生产

中，起到连接、紧固、定位以及密封零件的作用，因此要求拧紧螺栓必须均匀拉伸，其本身要承受预紧力的作用，同时具有高的抗拉强度和弯曲强度、一定的抗剪切能力等。螺栓、螺母、弹簧垫圈和销轴的应用十分广泛，在实际工作中它们要承受拉力、压力、剪切力、扭转力及摩擦力等外力的综合作用，螺栓连接零件的载荷不同，故应力状态不尽相同，因此制作紧固件的材料应具有高的强度和韧性，同时要求耐磨性好，零件表面不允许有脱碳现象。

一般螺栓是在钢材冷拔后冷镦成形的，其表面不再进行机械加工，对切削成形的螺栓和螺母的表面应无脱碳层，必须在脱氧良好的盐浴炉中进行热处理，但对于冷镦成形则原材料的脱碳层仍然保留在零件的表面，经过滚压后被挤向牙尖，如图 2-23 所示。因此，为确保产品质量，必须在能控制碳势的可控气氛炉中进行适度复碳处理。对不同的脱碳层进行反复的装卸试验，结果表明表面脱碳程度直接影响着螺栓的寿命，具体影响情况见表 2-16。

表 2-16 螺栓螺纹脱碳对使用寿命的影响

名称	螺栓规格	编号	试验结果			脱碳层深度/mm	
			扭矩 /kgf·m	次数	结论	总脱碳 层深度	全脱碳 层深度
柱螺栓	M10×1.5	1	4	15	脱扣	0.72	0.61
		2	4	4	脱扣	0.90	0.77
		3	4	4	未脱扣	不明显	—
		4	4	30	未脱扣	不明显	—
	M12×1.75	1	10.4	7	脱扣	0.72	0.54
		2	10.4	6	脱扣	不明显	—
		3	10.2	2	脱扣	0.99	0.72
		4	10.2	10	未脱扣	不明显	—
		5	10.2	10	未脱扣	轻微脱碳	—
	M14×2	1	12.0	—	脱扣	轻微脱碳	—
		2	12.0	10	未脱扣	0.63	0.36
		3	12.0	10	未脱扣	轻微脱碳	—

注：1kgf·m=9.80665N·m。

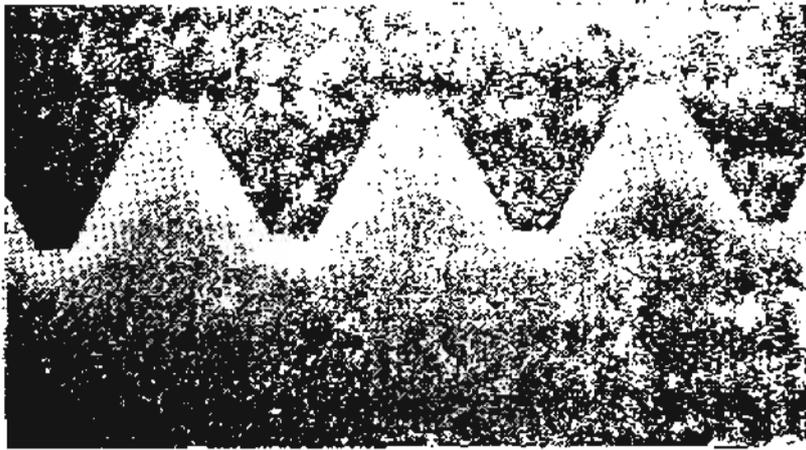


图 2-23 螺栓螺纹顶部的严重脱碳

资料介绍，含碳量不同的铬钢螺栓，经过调质处理后进行疲劳试验，含碳量不同则调质处理后的硬度存在差异，因此疲劳寿命显著不同，具体如图 2-24 所示。表面增碳或脱碳集中反映在螺纹的连接处（牙型面），当螺纹表面碳含量增高，则造成此位置韧性的降低，脆断倾向增加；相反，表面脱碳后，强度降低导致出现早期的疲劳断裂。可以看出，在含碳量为 0.4% 时，相当于 40Cr 钢表面的含碳量，此时具有最高的疲劳寿命。因此，如果表面出现脱碳或增碳，都会降低其疲劳寿命，实现螺栓的无氧化加热显得尤为重要。

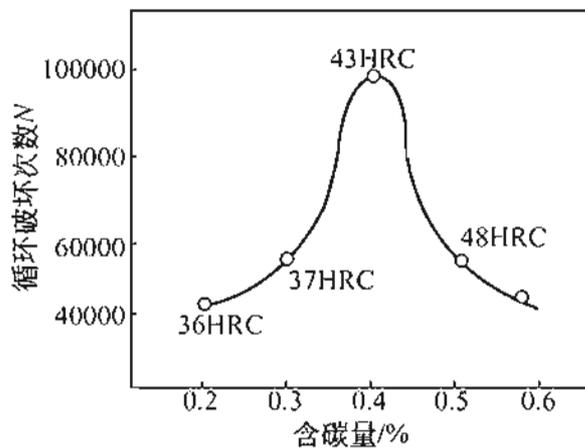


图 2-24 不同含碳量的铬钢经调质处理后硬度与疲劳强度的关系

螺栓是采用冷拔工艺而制成的，在制造过程中有时因材料表面本身存在发纹，导致端部开裂。冷拔时常见的缺陷是出现横向裂纹，此时检查会发现裂纹附近有塑性变形现象。因此，对螺栓而言，冷拔工艺不当或材料自身的缺陷均会造成零件的报废。

考虑到螺栓生产批量大，对螺纹部分要求十分严格，因此其热处理设备应具有连续生产能力和自动化程度高、质量稳定、造价和运行成本低等特点。目前国内外的标准件制造企业将保护气氛连续作业炉应用于热处理中，其主要设备炉型有振底炉、网带炉和铸链炉等，振底炉和网带炉的应用最为广泛。从成本和维修、热效率等几方面来比较，振底炉最佳，网带炉居中，在加热过程中滴入甲醇、乙醇，通入高纯氮气即可实现螺栓的保护性加热。网带炉又分为马弗罐和无马弗罐两种，在实际热处理过程中大多采用无马弗罐可控气氛炉进行标准件的加热和回火等。考虑到中温加热对网带的使用寿命影响不大，一条网带的维修期限长达2~3年，既节省了停炉检修的费用和时间，同时进行连续化的作业生产，提高了热处理的效率，因此国内大部分标准件热处理企业开始应用网带炉完成其加热和回火过程。

对于采用盐浴炉加热的螺栓，在原材料不脱碳的前提下，要对盐浴进行充分脱氧，选择合理炉温和保温时间，对淬火工装、卡具、吊具等按时进行酸洗除锈，如有条件进行定期的喷砂或抛丸处理，可确保盐浴成分中氧化物的含量符合技术要求。

资料 [38] 介绍，40Cr 制作的发动机螺栓在装配和使用过程中因拉长、拉断而失效，分析出现该问题的主要原因在于基体的强度不足、表面出现严重脱碳以及外加的载荷过大等。一般螺栓调质处理后的硬度为 285~321 HB，如果在螺纹处脱碳严重，特征为其表面为白色的铁素体，螺纹的根部也明显脱碳，在断口根部附近将出现明显的疲劳裂纹。

2.3.3 汽车连杆的脱碳

某中型载重车的连杆在使用较短时间内发生了疲劳断裂，如图 2-25 所示。通过分析该零件（40 钢）的化学成分，表面符合技术要求，硬度为 225 HB。对断裂部位进行金相分析，如图 2-26 所示。连杆的心部组织为回火索氏体，但表面严重脱碳，深度为 0.18~0.20mm。连杆的表面脱碳后疲劳强度降低，故在其工作过程中该部位产生疲劳裂纹，发生了早期的疲劳断裂。



图 2-25 连杆的断裂

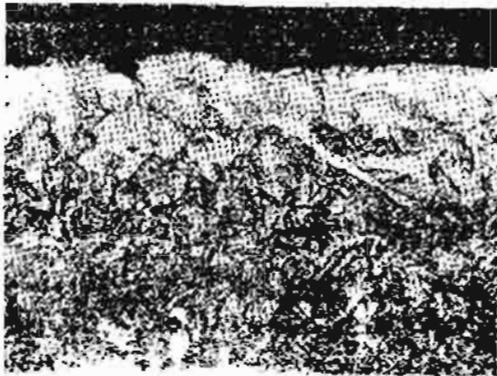


图 2-26 连杆表面的严重脱碳

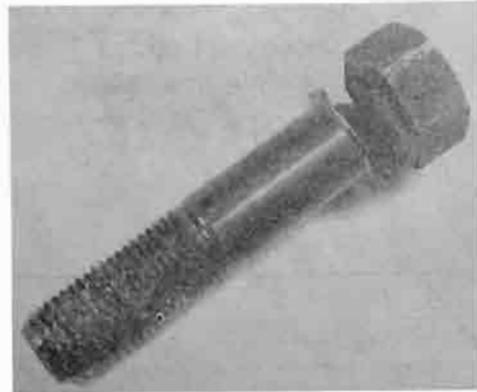


图 2-27 断裂的 40Cr 热锻连杆螺栓

2.3.4 热锻 40Cr 连杆螺栓的局部过烧造成断裂

汽车连杆螺栓采用 40Cr 等中碳低合金结构钢制造，经过调质处理后加热锻造成形，常见的热处理缺陷一般有表面脱碳、游离铁素体过多、未溶碳化物过多和组织过烧等。图 2-27 所示为断裂的螺栓，其位置在螺纹的终结处。通过对断裂位置金相组织的观察，发现在回火索氏体中存在有沿晶界的裂纹，呈棕黑色裂纹，其两侧有白色的条状铁素体存在（图 2-28）。在随后的进一步分析中，发现裂纹中间出现大块的氧化物（图 2-29）。

从裂纹的特征可知，裂纹中间的氧化物表明螺栓内部出现裂纹是在其淬火前已经存在，说明连杆螺栓在热处理炉内加热时因高温加热时间长出现局部过热，而后在锻头（或锻造）过程中形成了不规则的裂纹。因此加热时的过烧是不均匀存在的，在实际的热处理过程中应严格控制加热温度和保温时间，加强金相组织的监督和抽查，确实将材料的热处理质量控制落实到具体的操作过程中去，从

根本上抓好零件的热处理质量。



图 2-28 断裂的 40Cr 钢连杆螺栓的金相组织 ($\times 100$)



图 2-29 裂纹中间的大块氧化物 ($\times 500$)

第 3 章

淬火过程中产生的缺陷及其对策

3.1 概述

作为零件热处理的重要工序，淬火冷却是完成零件热处理组织转变、获得要求的使用性能的关键步骤，也是热处理工作者实际工作的要点和重点，它同时包括了加热设备、加热介质、冷却方法的选择、冷却介质的确定、介质温度和时间的要求、组织的特征等，因此掌握具体零件正确的热处理思路，善于分析和预见可能出现的缺陷，并采取必要的手段和措施，是零件热处理产品质量得到保证的前提。学会从影响产品质量的人、机、料、法、环和检六大因素出发，找出直接和间接的原因和根源，为各种零件的热处理提供最佳的产品质量，另外从经济性、实用性、可操作性等几方面确立热处理工艺手段显得尤为重要。

零件通过一定的热处理获得了要求的组织和力学性能，满足了其使用的目的，因此组织是性能的基础和前提，根据零件的具体工作和服役条件来明确主要性能的技术要求，从而制定切实合理的热处理工艺，得到理想的组织。因此，零件在加热和冷却过程中的工艺参数是至关重要的，它决定了零件的性能。为便于了解和分析热处理工艺对零件热处理质量的影响，有助于理顺思路和确定工艺要求，避免出现热处理质量缺陷，现将常用钢的热处理工艺、组织和性能要求列于表 3-1。

零件的组织与性能与材料的化学成分密切相关，根据其使用的工作状态、具体的技术要求、周围环境和介质的关系等来合理地选

表 3-1 常见钢种热处理工艺、组织和性能

材 料		一般热处理工艺 (种类)	要求的组织状态	使用性能要求
结构钢		①调质 ②淬火+低温回火	①索氏体 ②回火马氏体+少量 A'	力学性能
弹簧钢		①形变强化 ②淬火+中温回火	①变形索氏体 ②托氏体	弹性和一定的强度
不锈钢	奥氏体钢	①固溶处理 ②稳定化处理	①奥氏体 ②奥氏体+TiC 或 NbC	耐蚀性
	马氏体钢	淬火+中温回火	回火马氏体+碳化物	耐蚀性
	沉淀硬化型	固溶+时效	马氏体或奥氏体+沉淀硬化	耐蚀性、力学性能
工具钢	普通工具钢	淬火+低温回火	回火马氏体+细小碳化物+残余 A'	高硬度、耐磨性和红硬性
	高速钢	淬火+高温回火	回火马氏体+碳化物	高硬度、耐磨性和红硬性
模具钢	冷作模具钢	淬火+低温回火	回火马氏体	高硬度、耐磨性、高韧度
	热作模具钢	淬火+高温回火	托氏体+碳化物	高回火抗力、高硬度、抗热疲劳性
量具钢		淬火+低温回火(个别加冷处理)	回火马氏体+残余 A'	耐磨性、稳定性
渗碳钢		渗碳+淬火+低温回火	表层为回火索氏体+细小碳化物,心部为回火马氏体+少量铁素体	表面较高硬度,心部具有良好韧性
氮化钢		调质+渗氮	表层为氮化索氏体+细小网状氮化物,心部为索氏体	表面高硬度 心部强韧性
碳钢,合金钢,工具钢,不锈钢	渗硼		单相 Fe ₂ B	耐磨、高硬度、耐冲击性好
			Fe ₂ B+FeB	耐蚀、耐磨而不耐冲击
高温合金		渗铝	外层化合物层: FeAl ₃ , Fe ₂ Al ₅ 次层化合物+固溶体: FeAl, Fe ₂ Al ₅ 第三层固溶区: Fe ₃ Al, FeAl	抗高温氧化,耐热腐蚀

择材料。一般钢铁材料的成分、组织和性能的关系如图 3-1 所示。

零件经过热处理后获得的组织和性能要求是否符合工艺和技术要求，需要通过对随炉试样质量检验来确定和检查。除了进行常规的硬度、屈服或抗拉强度等性能检验外，还要对性能、热处理的缺陷等进行分析，例如氧化、脱碳、耐磨性、耐腐蚀性、红硬性、过热和烧伤等，一般采用相关的热处理质量检验标准。有些零件的缺陷需要进行工艺方法和金相组织检验。目前国家相关的热处理检验标准完全可以满足对零件热处理质量的控制，下面将其列于表 3-2。

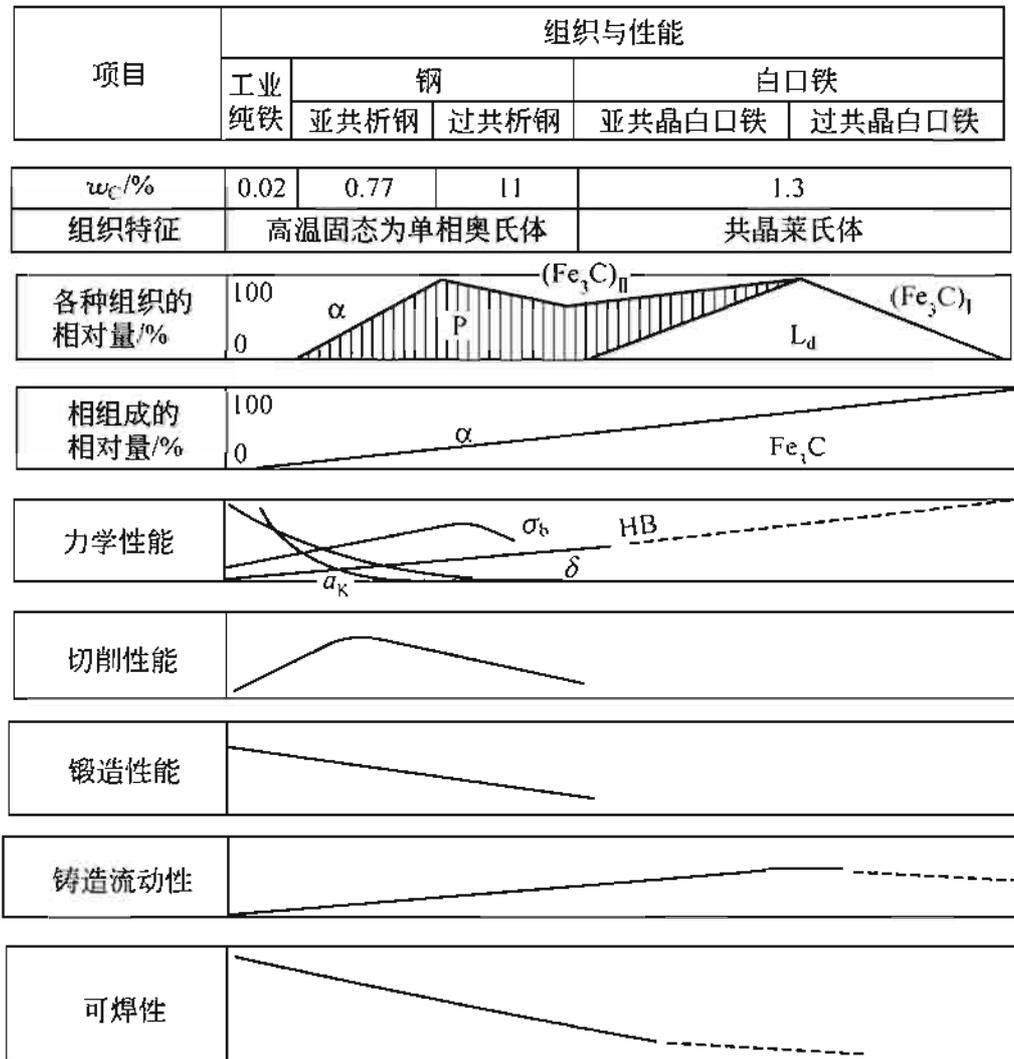


图 3-1 钢铁材料的化学成分与组织和性能的关系
 $(Fe_3C)_I$ ——一次渗碳体 $(Fe_3C)_II$ ——二次渗碳体

表 3-2 部分常见零件热处理标准和金相组织检验标准

标准名称	标准编号
低、中碳钢球化体评级	JB/T 5074—1991
中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级	JB/T 9211—1999
钢件感应淬火金相检验	JB/T 9204—1999
珠光体球墨铸铁件感应淬火金相检验	JB/T 9205—1999
钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定	GB/T 5617—1985
钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验	GB/T 11354—1989
高碳合金钢冷作模具显微组织检验	JB/T 7713—1995
热作模具钢显微组织评级	JB/T 8420—1996
薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检验	JB/T 7710—1995
球墨铸铁金相检验	GB/T 9441—1988
球墨铸铁热处理工艺及质量检验	JB/T 6051—1992
工具钢热处理金相检验及评级	JB/T 36003—1987
高碳铬不锈钢滚动轴承零件热处理质量标准	JB/T 1460—1984
滚铬钢滚动轴承零件热处理质量标准	JB/T 1255—1991
钢铁零件渗金属层金相检验方法	JB/T 5069—1991
汽车渗碳齿轮金相检验	JB 1673—1975
汽车碳氮共渗齿轮金相检验	JB 2782—1979
钢的正火与退火处理	GB/T 16923—1997
钢的淬火与回火处理	GB/T 16924—1997
真空热处理	JB/T 9210—1999
盐浴热处理	JB/T 6048—1992
钢铁件感应淬火回火处理	JB/T 9201—1999
钢铁件火焰淬火回火处理	JB/T 9200—1999
钢件渗碳与碳氮共渗淬火回火	JB/T 3999—1999
钢的气体渗氮	GB/T 18177—2000
气体碳氮共渗	JB/T 4155—1999

零件在热处理加热和冷却过程中，因为诸多因素的影响，可能出现零件的质量问题和缺陷。资料介绍，冷却过程中出现的质量问题占零件热处理的 70%~80%，其中裂纹为 20%~30%，变形为 40%~50%，硬度不均均为 40%~20%。可见，抓好冷却过程的质量控制，从冷却介质的成分、温度、流动性，到零件在内部的运动等，以及零件冷却的时间和零件的具体形状、结构等方面进行充分考虑。零件的材料决定了对淬火加热和冷却方式的选择，在确保能够得到要求的组织和性能的前提下尽可能采用冷却缓和的介质，从而避免热处理缺陷的产生，提高零件的热处理产品质量。下面将钢

常见的淬火缺陷和预防措施列于表 3-3。

表 3-3 钢的常见淬火缺陷和预防措施

缺陷分类	产生原因	预防和补救的措施
变形	(1) 工件的形状不对称或厚薄悬殊 (2) 机械加工应力大, 淬火前未消除 (3) 加热和冷却不均匀 (4) 工件的加热夹持方式不当 (5) 淬火组织的转变	(1) 改进工件的结构设计, 合理选材, 调整加工余量, 增加工艺孔 (2) 增加预热或去应力退火工艺 (3) 采用多次预热、预冷淬火、双液淬火、分级淬火、等温淬火等多种操作方法 (4) 合理支承捆绑淬火加热工件 (5) 对变形工件进行校直
硬度低	(1) 原材料有混料现象 (2) 加热温度低, 保温时间短 (3) 冷却速度太慢 (4) 加热温度过高, 保温时间过长, 增加了奥氏体的稳定性, 淬火后保留了大量的残余奥氏体 (5) 加热时工件表面脱碳 (6) 钢材内有超标的其他杂质	(1) 对钢材进行火花鉴别 (2) 按正常的淬火工艺规范操作, 重新淬火前应先正火或退火处理 (3) 以大于临界冷却速度的冷速快速冷却 (4) 采用冰冷处理提高硬度 (5) 对盐浴定期进行脱氧捞渣, 或采用保护气氛加热 (6) 选用符合技术要求的钢材
开裂	(1) 由于轧制或锻造不当, 出现缩孔、夹层和白点等 (2) ① 原材料非金属夹杂物偏析带状、网状、堆集等 ② 原材料有混料现象 ③ 冷却不均匀, 应力集中, 零件形状复杂、截面厚薄不均, 尖角、拐角和加工刀痕 ④ 冷却不当, 冷却剂选择不当 ⑤ 重复淬火中间未退火处理, 未及时回火 (3) ① 淬火温度过高, 引起组织的过热、断口白亮光, 晶粒粗大 ② 原始组织中碳化物偏析严重或未球化	(1) 严格控制产品质量, 确保原材料的合格 (2) ① 用锻造降低碳化物的级别, 热处理时采用预冷、分级淬火、等温淬火等, 及时回火 ② 进行火花鉴别 ③ 改进设计, 确保厚薄均匀、无引起淬火开裂的缺陷 ④ 选用合理的冷却介质和淬火方法 ⑤ 淬火前应进行退火处理 (3) ① 严格控制加热温度按工艺文件的规定执行, 加强过程的金相组织检验 ② 采取正火处理或进行球化退火

续表

缺陷分类	产生原因	预防和补救的措施
软点	(1) 工件表面局部脱碳或附着有脏物 (2) 淬火介质中有杂质或使用温度过高 (3) 冷却介质冷却能力差 (4) 工件的冷却方法不当, 工件之间互相接触 (5) 预备热处理不当, 在钢中保留了大量的大块铁素体	(1) 选择合适的预先热处理工艺 (2) 保持介质的清洁, 合理降温, 防止工件的脱碳 (3) 更换淬火冷却介质 (4) 工件要分散冷却 (5) 重新淬火, 但应经正火或退火处理方可进行
脱碳	(1) 在氧化性气氛中加热 (2) 盐浴脱氧捞渣不良 (3) 加热温度过高, 保温时间过长	(1) 采用保护气氛加热或表面涂料保护 (2) 定期对盐浴脱氧捞渣 (3) 按工艺规范执行 (4) 对已脱碳的淬火件采用渗碳的方法加以补救
腐蚀	盐浴中硫酸盐含量超过工艺规定的范围	(1) 选择符合技术要求的加热用盐 (2) 用镁铝合金或木炭除去盐浴中的硫酸盐

3.2 淬火应力分析

钢铁零件在热处理加热和冷却过程中, 由于热胀冷缩和发生组织相变时新旧组织比体积 (或比容) 的差异, 必然发生体积的变化。需要特别注意的是, 零件在冷却的过程中表面和心部存在温度的差异, 加上组织相变的不同时性和相变量的不同, 将造成钢铁零件表面和心部的体积变化无法同步进行, 因此产生内应力的作用。按照其产生的原因和机理的差异, 可将其分为两种, 即热应力和组织应力, 它们对于零件的热处理变形和表面的技术要求有十分重要的影响, 下面分别介绍如下。

零件均有一定的直径、厚度和长短, 为满足其使用和服役条

件，除选用合理的材料，进行机械磨削或切削加工外，一个重要的方面是如何采用最佳的热处理工艺和手段，使其赋予应有的组织和获得理想的力学性能，达到零件的技术要求。

零件在热处理过程中，热处理应力是引起零件几何形状改变的原因。考虑到零件内部热应力既有有利的方面，也有需克服的致命缺陷，因此掌握控制内应力的方法对于生产出合格的产品至关重要。

内应力的组成一是热应力，在热胀状态下快速冷却，进入冷却状态，从而产生了热应力；二是组织应力，是指在冷却过程中零件自奥氏体转变为马氏体组织，二者存在比体积的不同，因此组织转变时同一零件的体积先后膨胀，引起了比体积的变化，以及组织转变的不同步性。内应力为热应力和组织应力的复合作用，从而引起工件的变形。另外零件的吊挂、装炉不当，冷却时的碰撞，产品设计形状缺陷，选材不当以及热处理工艺参数等也将会对零件的内应力有一定的影响，最终影响到零件的变形。

3.2.1 热应力

热应力是指零件在热处理加热和组织转变过程中零件各部分之间存在温差，造成热胀冷缩先后不一致而产生的内应力。零件从高温冷却时，体积收缩，零件的表面冷却快，将首先受缩，而心部冷却慢，最后收缩。零件冷却的初期，表面的收缩会受到未转变的心部的阻碍，而心部受到表层的挤压。在冷却的后期则情况与此相反。因此，在零件的冷却过程中，其各部分收缩的不一致性，产生了内应力。由于零件内部产生内应力的作用，按作用性质分为张应力和压应力两种，按形成原因分为热应力和组织应力两类。热应力是零件在加热和冷却过程中产生的，其内部各点温度不同步性，因此温度越高热应力增大，通常零件心部产生的热应力最大。热应力的形成是比较复杂的，其大小取决于材料的热导率和热膨胀系数。资料 [45] 介绍，热应力的大小与热膨胀系数和热导率的比值成正比。钢和铸铁中各种相的热膨胀系数和热导率见表 3-4，常用钢的热导率和热膨胀系数见表 3-5。

表 3-4 钢和铸铁中各种相的热导率和热膨胀系数

相组织名称	热导率/ $\text{cal} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	热膨胀系数($20 \sim 100^\circ\text{C}$)/ $10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$
铁素体	0.18	12~12.5
珠光体	0.12	10~11
奥氏体	0.10	17~24
渗碳体	0.017	6.0~6.5
石墨	0.036	7.8~8.5

注：1cal=4.1868J。

表 3-5 常用钢的热导率和热膨胀系数

材料牌号	热导率(100°C)/ $\text{cal} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	热膨胀系数($20 \sim 100^\circ\text{C}$)/ $10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$
08	0.193	14.6
40	0.141	14.6
70	0.162	13.8
50Mn2	0.0965	14.7
40Cr	0.078	15.3
30CrMnSi	0.07	14.22
12CrNi3A	0.074	15.3
30CrNi3A	0.097	13.5
GCr15	0.096	15.33
T13	0.093	14.3
Cr12MoV	0.047	12.2
W18Cr4V	0.062	10.4~15.3
1Cr13	0.06	12.0
1Cr18Ni9Ti	0.039	18.2
YT15	0.09	6.51
YG8	0.18	4.5
9Cr18Mo	0.07	12.0
1Cr23Ni18	0.038	17.5

注：1cal=4.1868J。

从表中可以看出，热导率越大则热应力越小，热膨胀系数越小则热应力降低。由此可见材料的热应力与存在的组织状态有关，产生的应力塑性变形大小是有区别的，在实际的热处理过程中应具体分析并采取必要的措施，控制零件的变形量使之符合技术要求，满足工作需要。热应力变形的实质是零件内外热胀冷缩的不同步性，

引起零件体积的重新分布，导致了零件的变形。

3.2.2 组织应力

组织应力是在零件的加热和冷却过程中存在温度差，导致零件内各部分组织转变非同时性和不一致性而形成的内应力。淬火马氏体的比体积比奥氏体大，因此奥氏体向马氏体转变时必然引起零件的体积膨胀。在淬火过程中，为了获得马氏体组织，要采取大于临界冷却速度的冷速进行冷却，因此要产生显著的组织应力。零件各部分的冷却速度不同，表面温度冷到 M_s 点以下发生组织的转变和体积的膨胀。图 3-2 所示为在淬透的情况下零件表层和心部产生组织应力的变化过程。

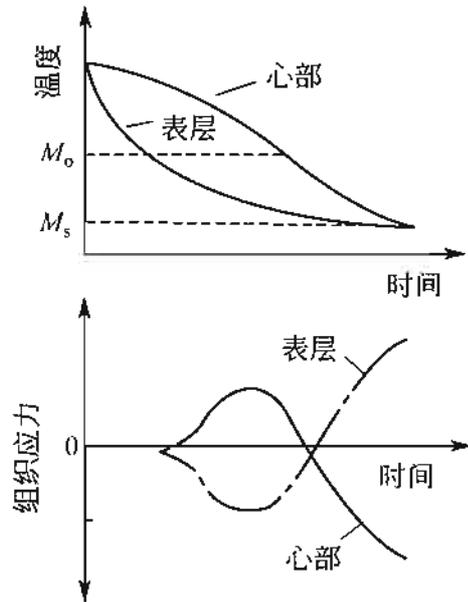


图 3-2 淬火过程中产生组织应力示意

零件在热处理过程中热应力和组织应力同时存在，因此两种应力相互作用，当两种应力在某一瞬间综合效果超过材料的屈服强度，引起不可逆组织的应力变形，就造成零件的变形。

组织应力引起变形的基本规律与热应力的作用情况相反，等温层面积使最后冷却的长度尺寸胀大，短面缩小，尖角突起，表面内凹，因此热处理过程引起组织应力变形，同时也造成热应力变形和体积的变形。影响淬火钢中应力分布的因素大致见表 3-6，表 3-7 列出了引起体积变化和形状变化的原因。

零件中内应力的消除方法是进行去应力退火，由于材料在塑性状态下应力使工件“复苏”而变形，因此温度提高则材料的塑性越好，应力的消除越彻底。事实证明去应力退火的温度在 500°C 以下没有效果，一般温度在 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，例如 45 钢采用 550°C ，38CrMoVA1 使用 600°C 进行退火处理。其去应力的温度与材料的屈服强度有关。资料 [46] 介绍，屈服强度高则退火温度也需要提高，

表 3-6 不同因素对淬火钢中内应力的影响

影响因素	引起的变化	造成的后果
奥氏体的成分	①碳和合金元素均降低钢的热导率,增加零件的温差 ②合金元素提高奥氏体和马氏体的屈服强度 ③含碳量愈高,马氏体与奥氏体的比体积差愈大 ④改变了 M_s 点 ⑤马氏体相变塑性 ⑥改变 A_{c1} 温度 ⑦改变钢的淬透性,影响淬硬与未淬硬区的范围	①增大了热应力和组织应力 ②增大了热应力和组织应力 ③增大了组织应力 ④对组织应力有明显的影响 ⑤降低组织应力 ⑥对热应力有一定的影响 ⑦改变应力的分布
奥氏体化温度	①改变奥氏体化的成分和奥氏体的均匀度 ②改变温度差	①改变组织应力的分布 ②对热应力有较明显的影响
零件的形状和尺寸	①影响冷却过程中零件内的温度差和相变的时间差 ②影响淬硬区的分布	改变热应力和组织应力
淬火介质	影响零件的冷却速度	
淬火冷却方法	改变零件内的温度场和相变的时间差	

表 3-7 引起体积变化和形状变化的原因

热应力作用	产生的过程	体积的变化	形状的变化
淬火	加热到奥氏体温度,并保温一定的时间	奥氏体形成 碳化物的分解	残余应力的松弛 热应力 外加应力 组织应力
	冷却过程	马氏体的形成 非马氏体的形成	热应力 组织应力
冷处理	冷却到 0°C 以下,保温,再升到室温	马氏体	热应力 组织应力
回火	加热到回火温度,保温一定时间	马氏体的分解 残余奥氏体的转变 α 相的变化 碳化物的聚集长大	应力松弛 热应力 外加应力 组织应力(作用小)
	冷却	残余奥氏体的转变	热应力 外加应力 组织应力(作用小)

去应力退火多用于减小零件的变形，尤其是对减小零件渗氮后变形十分有益。

当零件的内应力超过材料的弹性极限，则产生塑性变形。资料[46]介绍，淬火时工件产生内应力，一般材料的热膨胀系数 $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，弹性模量 $E = 205.8 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ，淬火温度 $T_1 = 830 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，冷却后 $T_2 = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。工件加热后快冷，由热胀到冷缩状态下工件的内应力的计算：
$$F = \frac{\alpha E}{1 - \mu} (T_1 - T_2) = 2197 \text{ MPa}。$$

由此可见一般钢的弹性极限小于该数值，因此不可避免地产生塑性变形。

3.3 淬火裂纹

3.3.1 淬火裂纹的特征

零件在加热和冷却过程中，受到热应力和组织相变时组织应力的双重作用，因零件的加热速度过快，导致零件各部分的温度存在差异，容易造成零件的淬裂、变形和软点等热处理质量缺陷，而当热应力和组织应力之和超过钢的抗拉强度时，就导致零件的开裂。因此零件产生淬火开裂不是单纯某一个原因造成的，了解其材料的机械加工流程和热处理状态，是热处理工作者分析和判断的重要依据，只有这样才能正确分析和找出开裂的真正原因。

淬火裂纹通常发生在淬火应力最大的区域，例如圆形零件两段的边缘圆周处、厚薄不均的结合处、尖角和棱角、键槽等位置。淬火裂纹的特征分为宏观和微观两种，下面分别介绍。

(1) 淬火裂纹的宏观特征

① 淬火裂纹多起源于零件的棱角、空洞、凹槽、截面突变等应力集中处，有时因零件本身的几何形状、特殊的部位和具体的技术要求，受冷却速度的影响产生非应力集中的部位，应当具体分析和判断。

② 淬火裂纹一般始端粗大，尾部细小，方向和分布没有一定

的规律性，在零件的纵横方向上均能出现，如果加热温度高则局部位位置会出现龟裂。

③ 裂纹的深度和宽度与零件的内部残余应力的的大小有直接的关系，事实表明残余应力越大则淬火裂纹越深和越宽，当淬火应力过大时，超过了材料的脆断强度，导致零件的开裂。

(2) 淬火裂纹的微观特征

① 淬火裂纹沿着奥氏体的晶界而扩展，有时在裂纹的两侧还有细小的裂纹，故裂纹为曲折状，晶粒越大则裂纹扩展越大，零件的应力过大则造成穿晶断裂。

② 裂纹两侧的金相组织没有变化，即无氧化、脱碳现象，如图 3-3 所示，假如进行高温回火则裂纹两侧可能出现轻微的氧化。

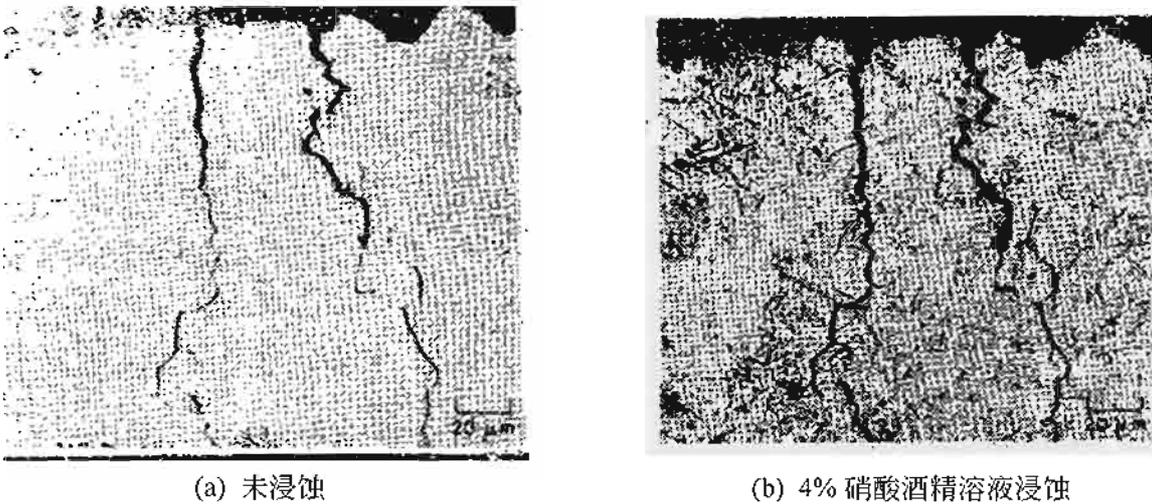


图 3-3 钢中淬火裂纹 ($\times 100$)

一般而言，淬火裂纹多是由于淬火工艺中的热处理工艺参数不当造成的，除此以外，零件的原材料中的化学成分偏析、淬透性过高、存在大量的非金属夹杂物、粗大的晶粒等，都能增大零件淬火开裂的趋势，因此对出现淬火开裂问题应具体分析，不可妄下结论。

3.3.2 淬火开裂原因和形式

实际的热处理生产过程中，零件的冷却速度快，造成其内外温度存在温差，形成了热应力，在 M_s 点以下形成的马氏体的比体积

和奥氏体比体积不同，则形成了组织应力，当二者内应力的合力超过钢材的抗拉强度（或破断强度），将造成零件的开裂。除原材料自身的缺陷造成零件出现淬火裂纹外，它还同零件的结构设计不合理、形状不规则（壁厚、截面突变、尖角等）、钢材选用不当、淬火温度控制不准确、冷却速度不符合要求（在 M_s 点附近未从淬火介质中提出）、操作不当、淬火后未及时回火、零件的表面粗糙、锻后未退火而直接淬火等因素有直接的关系。最常见的淬火裂纹的基本类型如图 3-4 所示。由于裂纹的形成原因不同，它在钢件中分布的状态和形式也有差别，钢件一旦产生宏观的淬火裂纹，将直接做报废处理，因此应特别注意避免出现开裂。

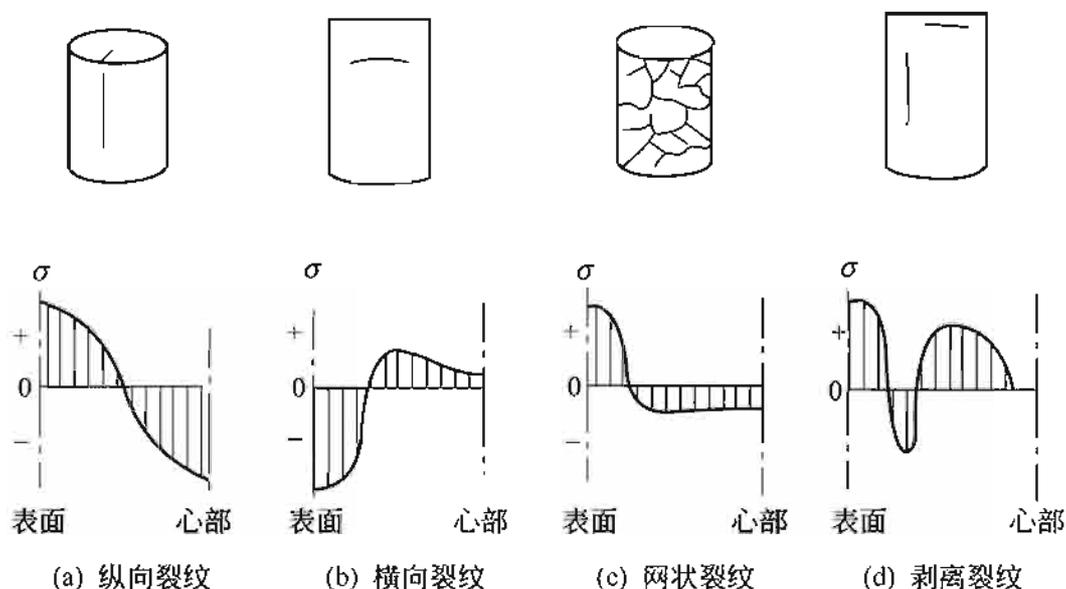


图 3-4 钢件淬火裂纹的基本形态

纵向（轴向）裂纹主要是切向拉应力造成的 [图 3-4(a)]；横向（弧形）裂纹是拉应力引起的 [图 3-4(b)]；网状裂纹主要是表面上在两向拉应力作用下形成的 [图 3-4(c)]；剥离裂纹产生在很薄的硬化层内，是径向拉应力过大造成的 [图 3-4(d)]。

① 纵向（轴向）裂纹沿轴向分布，从表面向内部扩展，其裂纹的走向与轴向平行，在淬透零件表层切向拉应力比轴向应力大时才能出现。原因为：工件被完全淬透，心部转变为马氏体，导致表

面切向拉应力过大，钢的含碳量越高则越容易形成纵向裂纹；如果零件的尺寸在淬裂的敏感尺寸范围内或原材料存在严重的带状偏析，也将产生裂纹的出现。资料 [3] 介绍，W18Cr4V 钢制作的大直径的管螺纹机用丝锥，如果冷却过于激烈，容易出现该类裂纹。影响纵向裂纹的因素还有钢的含碳量高、淬火温度提高、零件的尺寸大、空心圆柱或套筒，以及非金属夹杂物、碳化物、带状组织等将造成钢的横向强度和韧性的降低，在淬火冷却过程中出现裂纹的概率增加。判断轴向裂纹的原因的金相组织分析如图 3-5 所示，从图中可以对裂纹是非淬火裂纹还是淬火裂纹进行正确识别，它们具有不同的特征。

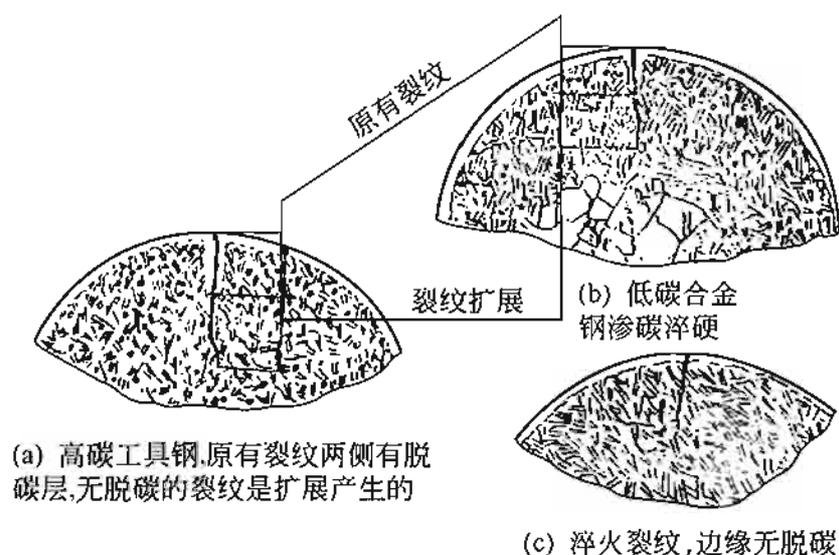


图 3-5 判断轴向裂纹原因的金相分析示意

防止出现纵向（轴向）裂纹的措施为：采用等温、分级淬火等冷却方法，使工件不被完全淬透，减少拉应力的产生；避开淬裂敏感尺寸区。

② 淬火裂纹中的横向裂纹和弧形裂纹的特征为断口与轴线垂直，其裂纹源于内部，呈放射状向外扩展。其发生的原因一般为：工件未淬透，在零件的硬化层和非硬化层之间的过渡区存在有一个最大的轴向拉应力峰，引起横向裂纹的出现，该类裂纹出现在直径大、材料的淬透性差的零件上；零件表面淬火后在硬化与非硬化区

域间存在较大的切应力或轴向拉应力，造成自过渡区形成裂纹，逐渐扩展到表面，形成弧形裂纹，以及零件的表面上出现棱角（尖角）、截面变化悬殊、凹槽、中心孔、销孔、螺纹时，将造成应力集中，也形成弧形裂纹。大型锻件产生横向裂纹在于其未淬透，而冶金缺陷如白点、气泡以及夹杂物等易作为裂纹源，当应力大于裂纹扩展的临界应力时就出现该类裂纹。

防止出现横向裂纹和弧形裂纹的措施为：选择合适的硬化层分布；采用减少内应力的淬火方式（例如预热等）；进行合理的工件设计，减少应力集中；采用预热、预冷等减小应力的措施等。

弧形裂纹产生的原因与横向裂纹相类似，裂纹从内部开始出现，而有时在零件的棱角、截面突变处、尖角或凹槽等区域，常发生在未淬透或渗碳淬火的零件中。另外在销孔、槽、中心孔等，由于冷却慢，硬化层薄，因此在硬化层的过渡区内受到拉应力的作用，出现弧形裂纹。高碳钢中的弧状裂纹如图 3-6 所示，这是在冷却速度最快的尖角附近所形成的裂纹。

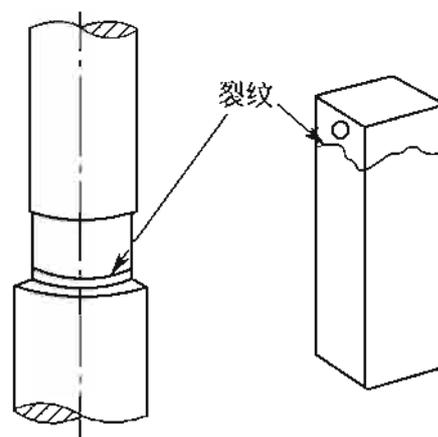


图 3-6 高碳钢中的弧状裂纹

另外淬火钢件上存在软点也易形成裂纹，其特征是细小的裂纹围着软点，但范围很小。

③ 网状裂纹（龟裂）的形成与零件表层受轴向拉应力和切向拉应力有关，当具有的两向拉应力较大，而表层硬度高、脆性大、断裂强度低时容易出现这类裂纹。其外部特征如图 3-7 所示。从图 3-7 中可以看出，网状裂纹深度较浅，通常在 0.01~1.5mm，裂纹的走向无规律性，与零件的外形无关。一般而言，表面脱碳的高碳钢和渗碳零件淬火后极易形成该类裂纹，其原因在于脱碳后表面、内部形成的马氏体的含碳量低于内部的含碳量，故形成的内外马氏体的体积差大，从而造成表面产生很大拉应力的作用，造成表面形成网状裂纹，另外工件因过热或过烧，使晶界处强度降低，沿晶界

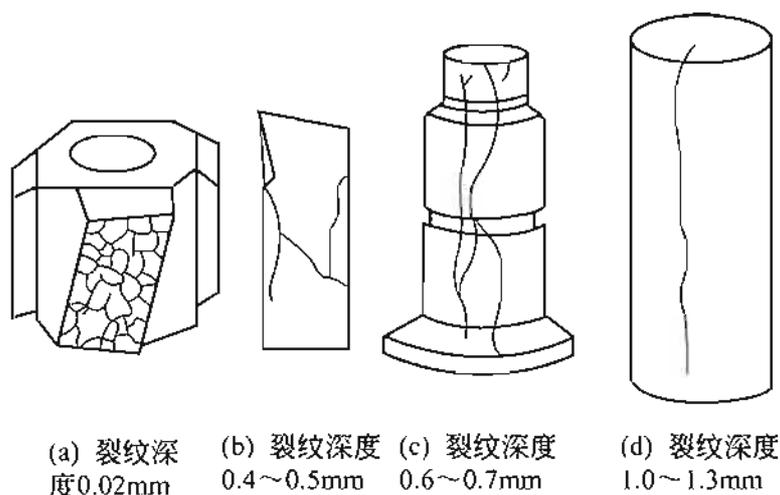


图 3-7 网状裂纹

开裂。

采取的措施为：采用无氧化、脱碳加热设备和介质；采用充分脱氧的盐浴炉加热工件；渗碳后避免空冷；严格执行淬火工艺，防止出现工件的过热或过烧。

影响网状裂纹形成的因素较多，但都同表面的两个拉应力有关，因此下列情况容易出现此类裂纹。

a. 零件表面出现脱碳，则形成了特殊的应力分布，将表面的应力变成拉应力，如高碳钢脱碳后淬火出现网状裂纹。

b. 机械加工未将原材料的脱碳层去掉，高频或火焰加热淬火则出现网状裂纹。

c. 表面脱碳层的碳含量高于 0.4%，易于开裂，而小于 0.4% 则不会出现网状裂纹。

d. 高碳钢淬火后未及时回火或回火不良等，内部残余应力过大，在随后的磨削过程中冷却不良会造成表层产生大的磨削应力，它与残余拉应力相互叠加，造成表面出现磨削龟裂。

④ 剥离裂纹常发生在零件的高频淬火、火焰淬火或其他的表面淬火过程中，如果零件的表面温度高，出现过热现象，沿淬硬层组织分布不均匀，容易形成剥离裂纹。

剥离裂纹与零件的表面平行，表面淬火件则沿圆形开裂。剥离

裂纹产生于零件表层十分薄的区域内，在内部存在两向均匀的压应力，径向应力为拉应力，如图 3-8 所示。

应力与硬化层内组织的不均匀有关，在过渡区极薄的区域内，裂纹严重时扩展，造成表层的剥离。

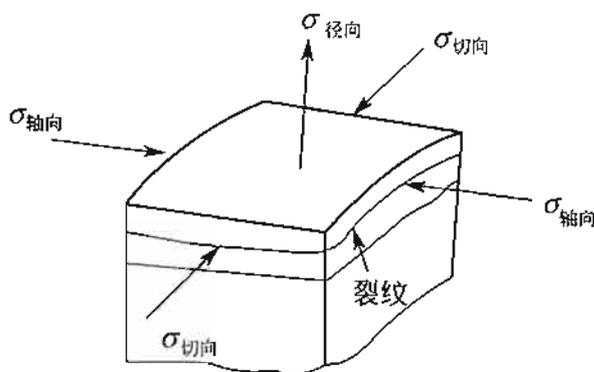


图 3-8 剥离裂纹的应力状态示意

产生裂纹的原因为表层和心部组织的比体积不同，在表层形成轴向、切向压应力，而径向为拉应力，并向内部突变，裂纹产生于急剧变化的过程中。

采取的预防措施为：加快或减慢高频淬火、火焰淬火和渗碳等的冷却速度；使渗层或表面组织与基体组织过渡区均匀。

需要注意，剥离裂纹具有很大的危害，因此在实际热处理过程中应尽可能加以避免。对渗碳零件而言，加快或减慢冷却速度，可得到均匀一致的马氏体或托氏体组织，防止出现剥离裂纹。

除上述四种淬火裂纹基本形态外，还有没有固定形态特征的应力集中裂纹。应力集中裂纹是零件在热处理过程中需要高度重视的问题。影响该类裂纹的因素较多，首先它同零件的几何形状、截面尺寸的突变、设计要求、材料的特性有关，图 3-9 所示为 40 钢拉臂在尺寸最薄弱的位置出现开裂；其次与加热和冷却的工艺流程以及有无采取必要的措施有关；另外同加工的零件表面上的加工刀痕、打印的标记等存在直接的联系，图 3-10 所示为应力集中产生的裂纹。在零件的热处理过程中，造成应力集中的因素归纳为以下几条。

① 从零件的形状上看，零件壁厚发生突然变化，出现尖锐凹角、切口、凹槽、尺寸不均急剧变化、凸缘、切削刀痕等形状外观缺陷。

② 材料内部出现带状、条状、网状非金属夹杂物。

③ 碳化物以及其他冶金缺陷等。

这些因素都将造成钢材的脆化，造成淬火应力集中。

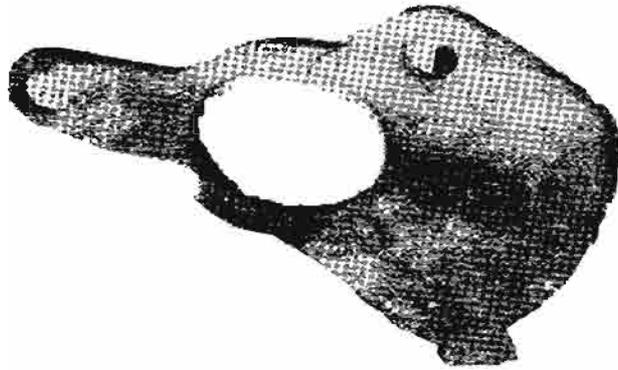


图 3-9 40 钢拉臂的应力集中淬火裂纹



图 3-10 高速钢铰刀的应力集中裂纹

由于零件差异，热变形开裂形成原因不同。一种情况是零件成形前加热温度过高或保温时间过长，造成晶粒的晶界面和富碳的偏析区熔化，表面层和晶界面被氧化。另一种情况是零件变形前加热速度太快，锻件中部存在横向裂纹，在半径方向由拉应力引起开裂。其原因为毛坯加热不足，心部的温度低，此时材料的延展性差，出现中心疏松。锻锤的宽度与锻件的直径或长度一样，用平锤锻大毛坯，切入的裂纹有助于降低径向应力。对 40~50mm 的毛坯，没有预热锻锤，造成毛坯边缘冷却，出现裂纹。

淬火裂纹是零件在马氏体相变温度区淬火时产生的，由于应力的重新分布产生裂纹，一般在冷却的 5~7s 或 10~60min 开裂，原因在于零件冷至 M_s 点时未及时把零件从冷却介质中提出，造成任

其冷却到底。淬火裂纹通常在一段时间内发生，有时在未回火前或回火后从表面开裂，这多发生在淬透或淬硬深度大的工具等零件上，纵向裂纹始于表面终止于内部。对于低淬透性工具钢而言，当在水中急冷时表面产生马氏体，心部的温度高达 $140\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，将会产生弧形裂纹。该类裂纹始于应力集中区（锐角、直或孔的边缘），有时可能扩展到零件的表面上。

从上面的分析可知，热处理裂纹的实质就是在拉应力作用下产生的，为零件内部热应力和组织应力下的脆性断裂，内应力大于材料的破断抗力时即发生开裂现象。资料 [19] 介绍，当内应力大于破断抗力时，在淬火过程中开裂；当二者基本相近时，淬火后零件立即开裂；

当内应力小于破断抗力但接近破断抗力时，如淬火后不及时回火，放置一段时间将发生开裂现象。图 3-11 表示形成淬火裂纹的条件。

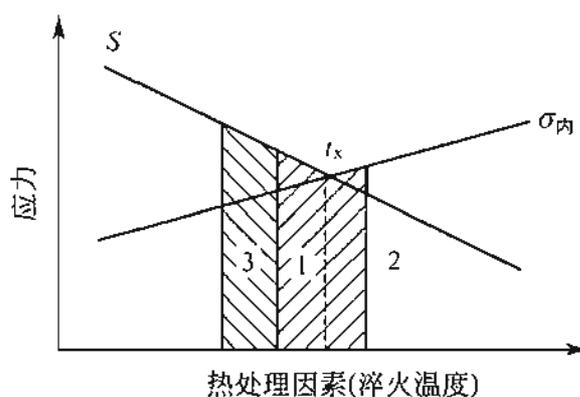


图 3-11 形成淬火裂纹的条件

S 为破断抗力；1—强度约等于 S ，立即开裂；
2—强度大于 S ，淬火过程中开裂；3—强度小于 S ，表明如不及时回火也会开裂

3.3.3 淬火裂纹的一般特点

零件在加热保温结束后，进行快速冷却以完成组织的转变，获得要求的组织和力学性能等，满足零件的工作需要。理想的冷却方式为在 C 曲线鼻子处快速冷却，而在 M_s 点以下缓慢冷却（如分级、等温、空冷等），避开危险区域，使零件的内外温度均匀一致，在冷却过程中同时发生组织的转变，减小热应力和组织应力的作用，可实现零件的无开裂和变形，符合零件的热处理技术要求。

如果零件淬火冷却过程中出现开裂，则应具有以下特点。

① 断面裂纹处有少许红色锈迹、梨黄色或发现新的裂纹，则

是冷却过程中发生的。

② 如断面出现黑色的氧化层，则是锻造过程中造成的。

③ 裂纹处晶粒粗大，发白亮光，是过热和温度过高引起的。

④ 磨削面呈现龟裂，为磨削后加工不良所致。

⑤ 凸起或粗细不均匀部分，发现裂纹，说明加热与冷却不均，或是设计上的原因造成的。

⑥ 尖角、槽部、刻印部分出现裂纹，则为应力集中造成的。

淬火裂纹与其他的裂纹是有区别的，淬火裂纹的断口暗无光泽或略带有白色，稍微带有红色的铁锈（水冷时）或渗出油（油冷时），裂纹的部位在截面形状突变处、尖角、缺口、孔穴、模型接线飞边、机械加工刀痕等。从显微镜上看，裂纹是沿奥氏体或马氏体晶界出现的，可穿过或绕过马氏体针，具有瘦直而刚健的曲线，棱角性较强，在单条主裂纹两侧沿晶界分布着细小裂纹等。

资料 [6,36,42,44,48] 介绍，热处理后的工件是否有裂纹，常采用下列方法来辨别。

① 敲击听音法：将工件挂起，轻轻敲击一端发出响声，如果声音不清脆而呈破哑的浊音，则工件表面有裂纹。

② 油浸法：将工件浸入油中（机械油等）一定时间，取出后用棉纱擦干，再涂以白粉（粉笔末），如果工件表面有油渍线纹渗出，表示该处有裂纹存在。

③ 磁力探伤法：将工件放在磁力探伤机上，表面撒以铁粉，通电，如有吸附铁粉处则存在裂纹。

淬火温度高出现的裂纹由粗变细，尾部细尖，周围呈现过热特征（晶粒粗大或粗大马氏体）。冷却速度快引起的裂纹是穿晶分布，比较直，没有分支小裂纹。为避免淬火裂纹的产生，应当严格执行热处理工艺，从人、机、料、法、环和检等六大因素进行综合考虑。在热处理过程中产生的裂纹是多种多样的，其形成的机理也不相同，因此裂纹有分布淬火裂纹和非淬火裂纹两种，为便于区分现将二者的差异列于表 3-8。

表 3-8 热处理淬火裂纹与非淬火裂纹的特征

裂纹类型	裂纹形成的原因	宏观特征	显微组织特征
淬火裂纹	出现在淬火冷却后期或冷却后,由于零件的内外存在温差,引起了不均匀的胀缩产生的热应力和组织变化产生的组织应力的综合作用,当拉应力超过材料的强度极限时产生脆性断裂	①总是显现瘦直而刚健的曲线,棱角线较强 ②裂纹深度不超过淬硬层,有断续串裂分布现象 ③裂纹端面有可能渗入水、油的痕迹	①沿奥氏体晶界或马氏体晶界出现,有时穿过“马氏体针”或绕过“马氏体针”,或出现在马氏体针中间等 ②存在有沿晶分布的小裂纹 ③裂纹两侧的显微组织与其他组织无明显区别,表面无氧化、脱碳现象
非淬火裂纹	工件原材料表面和内部存在因冶金和前道工序残存的内部裂纹和缺陷,在淬火前没有暴露,淬火冷却时由于内应力的作用扩大而呈现出来	①一般都显得软弱无力,尾部粗而圆钝 ②裂纹为锯齿形,则是非金属夹杂物引起的裂纹	①其裂纹两侧的显微组织与其他区域不同,有脱碳层存在 ②因夹杂物引起的裂纹两侧和尾部有夹杂物分布,但无脱碳现象

3.3.4 影响零件开裂的因素和防止措施

(1) 零件的表面形状和状态的影响

零件的材质和尺寸大小是确定零件热处理工艺的基础,而截面的变化则直接对零件的技术要求产生重要的影响。如设计的零件横截面突然发生变化、形状复杂、厚薄悬殊、出现直角、缺口或倒角半径过小、开口位置不当、倒角尖锐、开孔位置不当等造成应力集中,这些因素将对冷却过程中产生的热应力和组织转变产生的组织应力起到不利的影 响,造成内应力的增大,如超过材料的破断抗力,将引起零件纵向和横向的开裂。因此,对小孔、薄壁处或凹槽部位等形状复杂的零件,要防止出现过热或冷却过急,一般采用铁皮或石棉绳等进行包扎,或填充耐火土或石棉绳等,使该部位的加热和冷却均匀,防止出现淬火裂纹。

零件在机械加工过程中,产生在零件上的刀痕(伤)、划痕、毛刺,表面粗糙度差,校直不当,以及打印的标记等,在热处理的过程中这些地方的内应力增大,同样可能会造成零件的开裂,另外零件的冷热加工质量也有一定的影响。

应力集中部位就是淬火应力容易集中的位置,一般出现在零件

上的切槽、刀纹、尖锐凸凹部位、打印标记痕迹和截面突变处等，因此要避免零件出现上述原因造成缺陷。棱角的棱是指内侧的圆角，而角为外侧的边缘，对于棱角处应做成半径至少 3mm 的圆弧。实践表明，当半径为 15mm 时，可完全消除掉棱角效应。图 3-12 所示为常见的应力集中部位发生淬火裂纹的零件。

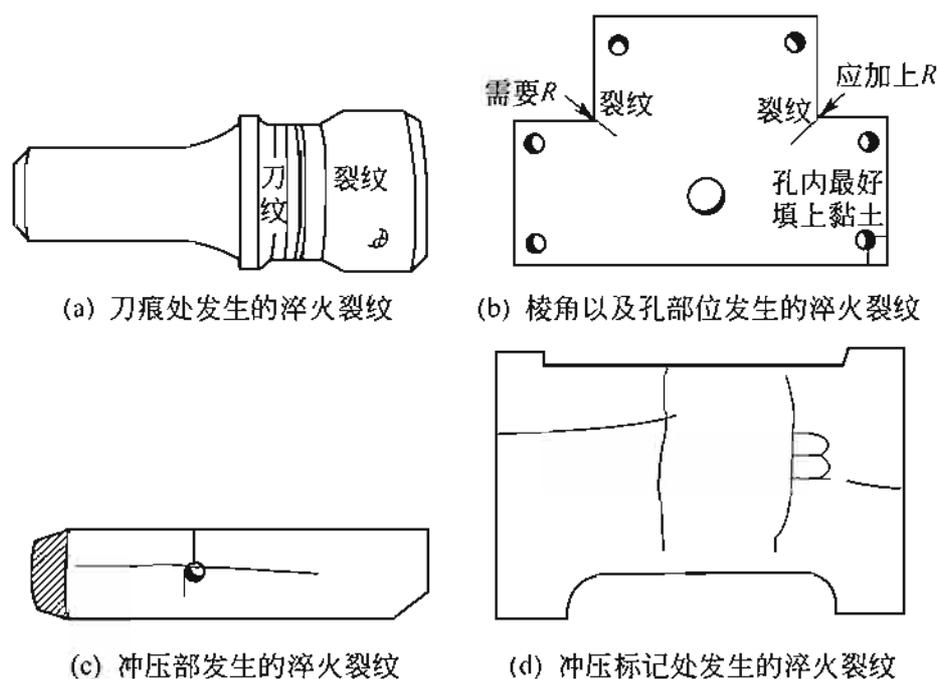


图 3-12 几类零件发生的淬火裂纹

引起淬火裂纹的零件的尺寸称为危险截面，一般在直径 20mm、板厚 15mm 处最容易出现淬火裂纹，这一点应引起热处理工作者的高度重视。

零件的形状是影响淬火裂纹的主要因素，容易发生淬火裂纹的部位大致是一定的：零件横截面形状突变、尖角、缺口、孔穴、模型接线飞边等。这也充分说明零件的形状和结构不合理是造成淬火裂纹的主要原因。图 3-13 所示为几种存在上述情况时出现开裂的具体位置。从图中可以看出，设计人员对零件的形状的设计必须既要考虑到零件的具体工作条件和使用目的，另一方面又要降低零件热处理过程中出现变形和开裂的概率，因此应消除和改进有可能出现的淬火裂纹问题，如出现易于发生淬火裂纹的形状，不管热处理

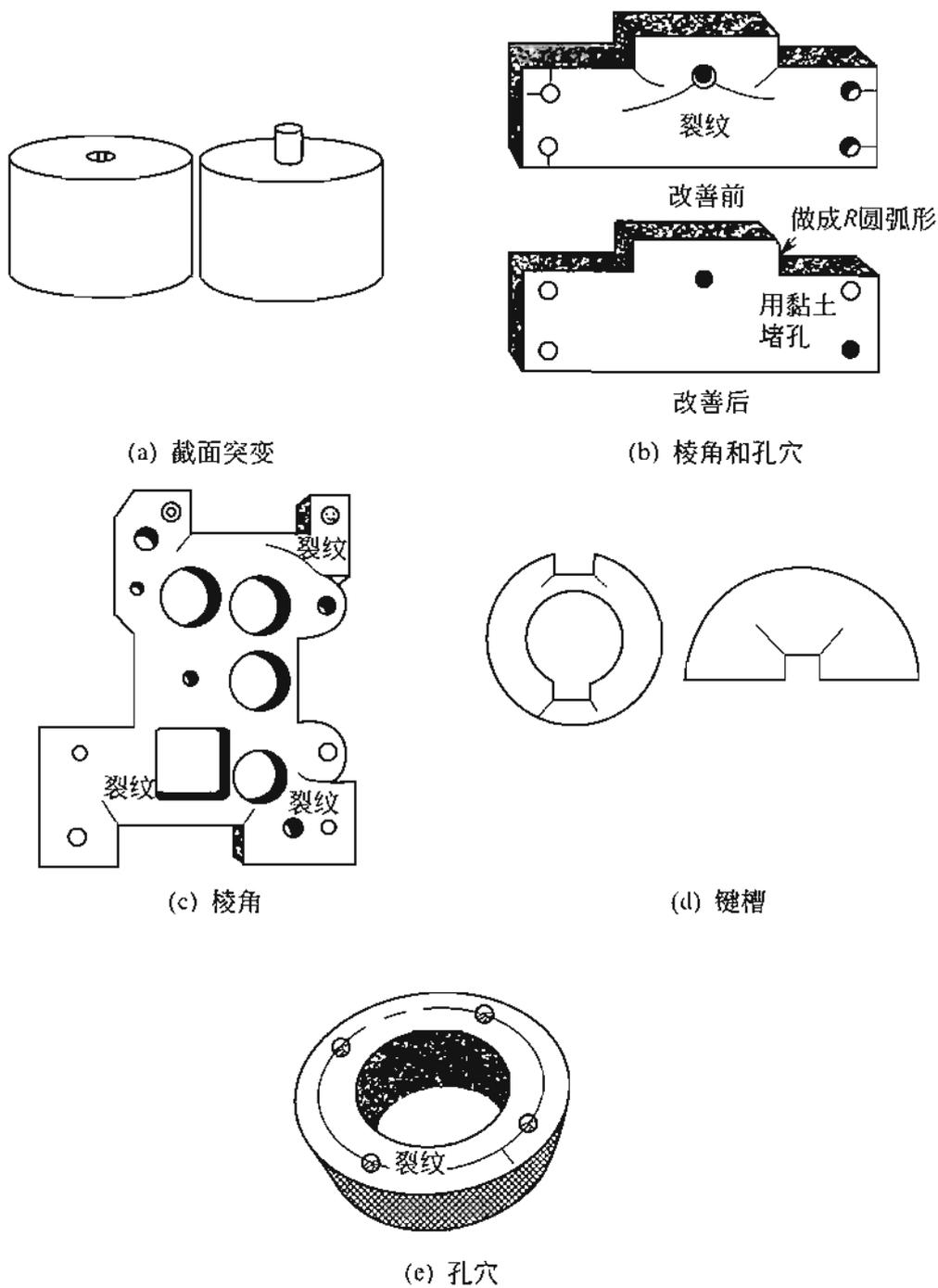


图 3-13 发生淬火裂纹部位示意

技术水平多高，也难以避免淬火裂纹的产生。因此，零件形状的设计应本着均热均冷、均缩均胀的原则，即断面要均匀、没有缺口效应等。

零件的热处理对其形状有两点最基本的要求：一是尺寸的截面

变化要尽可能地小，即使确实需要变化也应有过渡，零件的形状应规则；二是没有产生缺口效应的部位。如能满足以上要求，则零件的淬火裂纹就可以避免。截面积出现不均匀变化，零件的薄部位在淬火冷却时，先进行马氏体的转变而得到硬化，而厚截面部分发生马氏体的膨胀，使薄的部分产生拉应力的作用，在厚薄的相连处产生应力集中，出现淬火裂纹。另外在零件的槽口、盲孔、粗糙的加工刀痕、凹凸不平、打印标记等处，在淬火时将有利于产生热应力和组织应力的集中。因此，为避免在截面的尺寸上等方面出现问题，可从以下几个方面采取措施，具体截面改进如图 3-14、图 3-15 所示。

① 壁厚和壁薄部位不要连成一体，如果确实有必要，要做成组合式结构。

② 适当开调整壁厚的工艺孔，使零件的冷却均匀。

③ 将盲孔改为通孔，便于冷却介质的流动。

④ 把实心的粗大圆柱状零件改为筒状。

⑤ 使截面的变化均匀，壁薄处加筋，或做成斜坡。

⑥ 壁厚不均匀处尽可能改为均匀对称。

棱角产生淬火裂纹的主要原因是缺口效应作用的结果，因此在实际的零件设计中应将尖角、棱边处加工成圆弧形。资料 [18,49,50] 介绍，圆角半径如为 15mm，则棱角效应可全部消除；半径为 5mm 时，可使尖角的影响减半；即使加工到半径为 1mm，也比尖角强。这样可有效避免裂纹的发生。图 3-16 所示是对有棱角的改进思路或措施。

从以上分析可知，有效防止淬火裂纹出现的措施有以下三点：改正零件不合理的形状；使零件的内外部分同时冷却生成马氏体组织；马氏体化的速度尽可能地慢，确保内外组织转变的一致性。零件的断面均匀、圆角过渡可有效避免产生应力集中，因此良好的设计要求截面厚度均匀、形状对称、平滑过渡和加开工艺孔等，对形状复杂、尺寸大、大型凹模等建议进行分级淬火、等温淬火等，可避免应力集中。

零件的形状对零件的淬火裂纹有直接的影响，具体如图 3-17

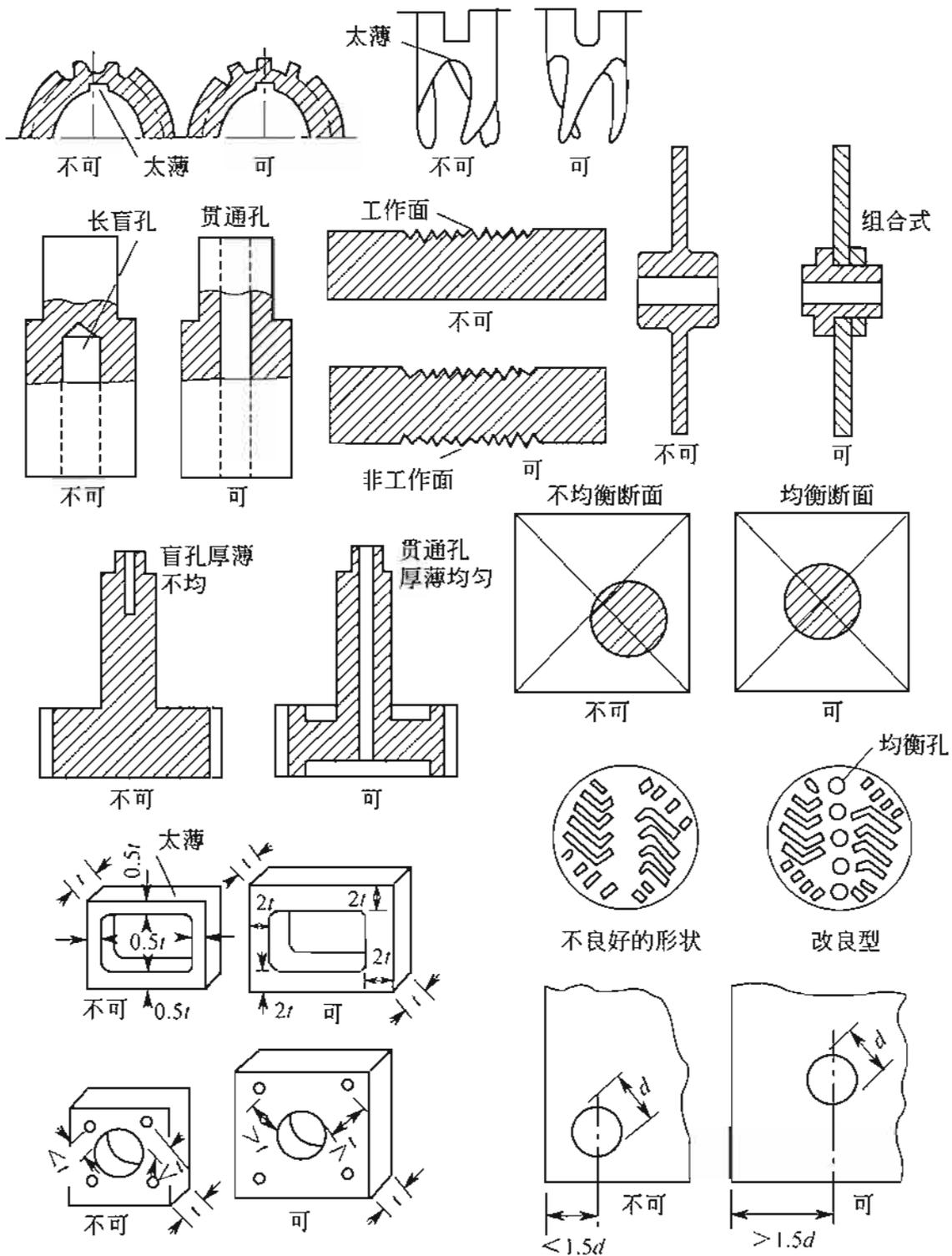


图 3-14 不均匀截面零件的改进设计实例 (一)

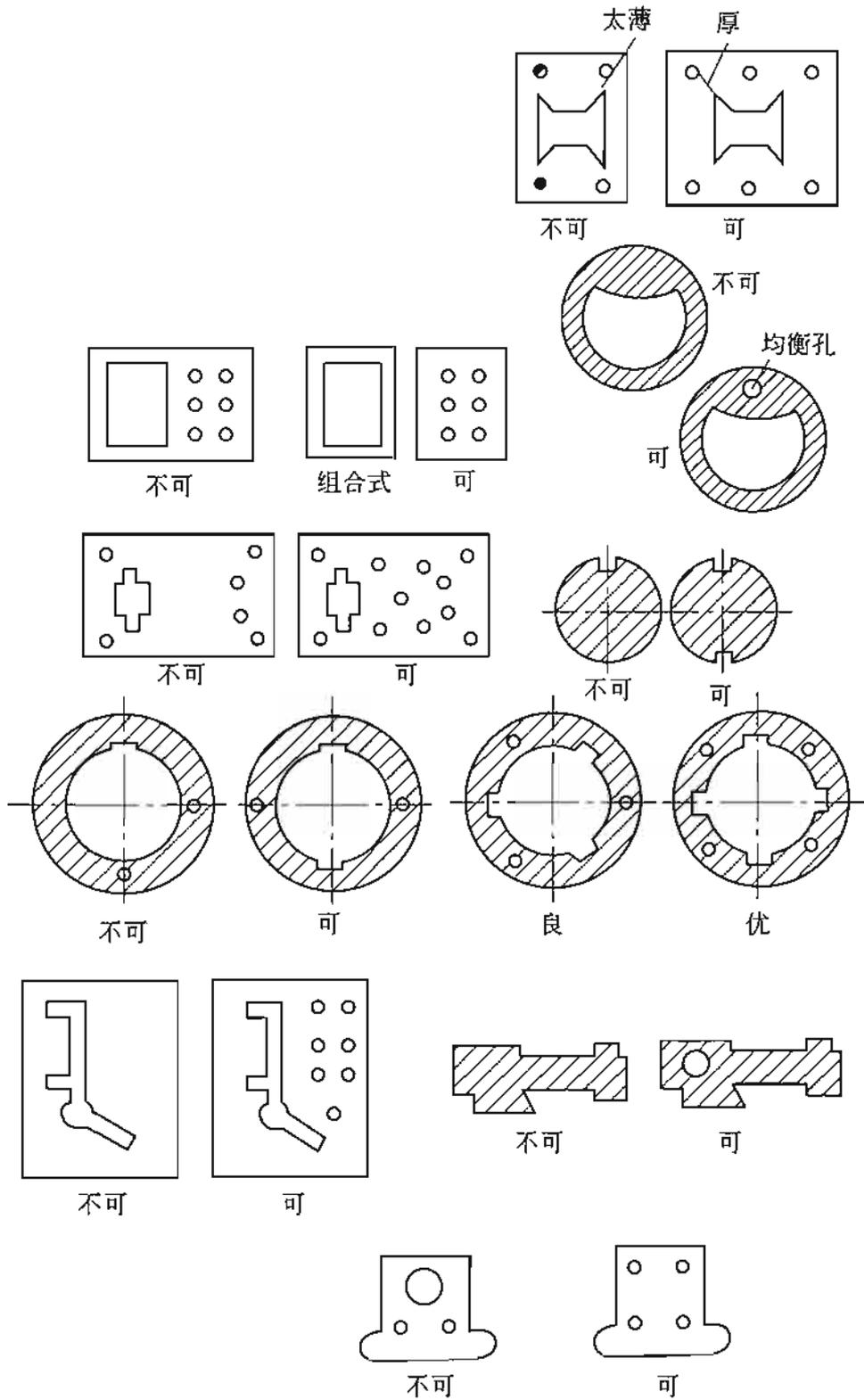


图 3-15 不均匀截面零件的改进设计实例 (二)

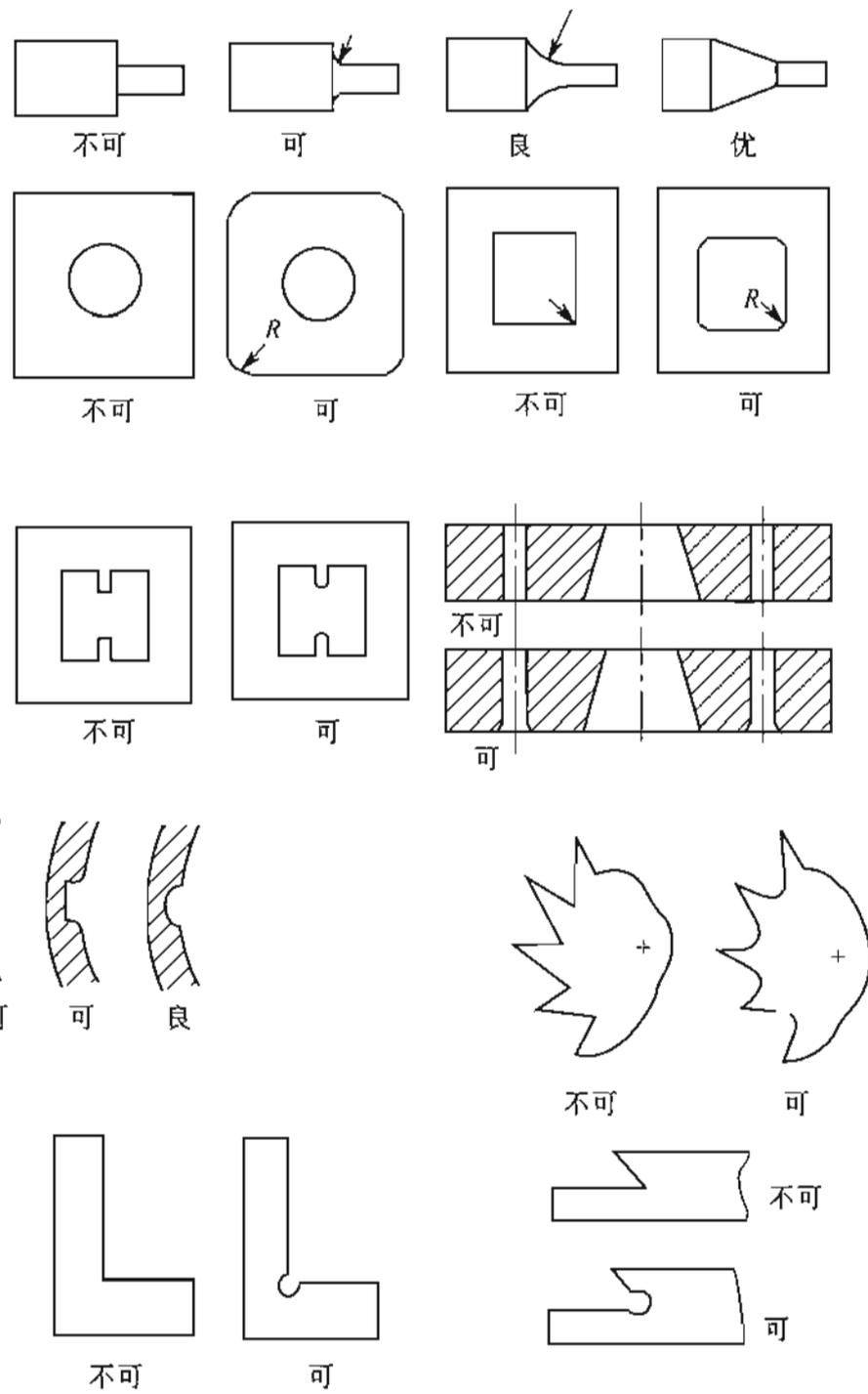


图 3-16 有尖角零件棱角的改进设计

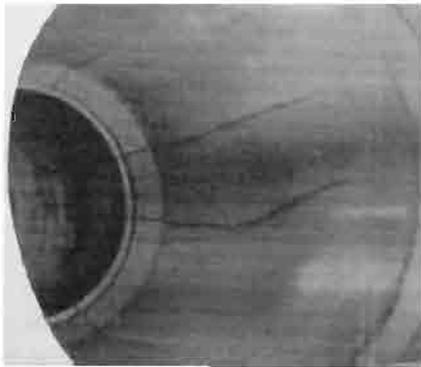


图 3-17 35CrMo 钢内孔
淬火裂纹

所示。对圆套或空心厚壁管等而言，淬火裂纹发生在内孔壁上。

(2) 零件的材料和初始组织

正确选择零件用钢是十分重要的一步，应满足零件的使用条件要求、具有较好的加工工艺性能、较好的经济性等，另外确保热处理后容易达到设计性能要求，可防止开裂的倾向和减小零件的热处理变形。因此零件的材料是热处理过程中一切技术要求的

根本，其质量的好坏直接决定了零件的使用寿命和工作状态，同时也会对零件的热处理工艺参数的确定带来很大的难度，因此原材料的入厂质量检验是十分重要的工作，不合格的原材原则上不允许投产和使用。原材料的质量决定了零件的热处理质量，如在机械加工或其他工序中能够去掉或加以改善其质量缺陷，不影响零件的热处理和零件的具体使用等，是可以使用的，但必须进行认真的检查。下面将导致淬火裂纹的因素列于表 3-9。

钢分为亚共析钢、共析钢和过共析钢。亚共析钢、共析钢的原始组织通常为粒状珠光体或马氏体组织，加热后形成更加饱和的奥氏体。而过共析钢为莱氏体组织，加热后内部的碳化物分布将十分均匀。资料 [21] 介绍，原始组织中晶粒度细小、网状碳化物和共晶碳化物以及偏析符合材料的要求，则在加热和冷却过程中造成零件开裂的概率小。

对于钢中原始组织，如果存在碳化物不均匀（偏析）、化学成分不合格、组织不合格、原材料内部存在裂纹等，将会有可能在加热时造成过热或开裂。为此应当降低加热温度，尽可能采用下限温度加热，必要时通过金相检查来确定合理的温度。另外需要特别注意的是需要重新淬火的零件，尤其是比较复杂、厚薄悬殊大、合金元素多的零件，必须进行中间退火或正火处理，方可进行正常的热处理，否则将引起零件出现淬火裂纹。另外零件表面严重粗化、形

表 3-9 导致形成淬火裂纹的因素

影响因素名称	各种相关的具体因素
材料因素	(1)原材料缺陷:①宏观偏析;②固溶体偏析;③存在裂纹;④表面严重脱碳;⑤内部夹杂物超标;⑥内部疏松;⑦夹渣 (2)原始组织不合格:①晶粒粗大;②魏氏组织;③组织应力大;④锻造流线差;⑤碳化物组织偏析严重;⑥出现铁素体+珠光体带状组织 (3)出现锻造或轧制缺陷 (4)溶入了氢 (5)材料的选择不当
工艺因素	(1)机械加工不当:①有打印的压痕;②刀痕或划痕;③磨削烧伤 (2)零件外形的设计不合理 (3)未进行预热,加热速度过快 (4)奥氏体的加热温度过高 (5)保温时间过长 (6)表面脱碳 (7)渗碳淬火处理中渗碳量过高 (8)淬火后的冷却速度过快 (9)加热或冷却不均匀 (10)淬火后未及时回火 (11)零件落入油槽底部的水中 (12)冷却介质和冷却方法不当

状复杂的大型锻件锻后不进行退火而直接进行淬火也容易产生淬火裂纹。需要注意的是含碳量在 0.40% 以上的碳钢是淬火危险的钢种,尤其是淬火时在 330℃ 以下最容易发生淬火开裂,这一点应当引起热处理工作者的高度重视。

(3) 淬火温度和加热时间等技术条件

为了使零件热处理后获得要求的硬度和组织,尤其片面追求高硬度,有时采用提高淬火加热温度或在淬火温度下长时间加热,零件加热不均造成奥氏体晶粒长大和变粗,使冷却后的组织强度降低,马氏体粗化脆性增大,断裂强度降低,因此增大了零件开裂的概率。同时钢材的成分和淬火介质对淬火开裂的影响也不容忽视,因此从某种意义上讲出现淬火裂纹是各方面因素和质量缺陷综合作用的结果。另外它与零件的淬火温度过高、加热不均匀等有一定的

关系，因此严格控制加热温度、确保炉温的均匀性、合理放置零件等是热处理过程中应特别引起注意的几点，同时应遵循加热时间和时间的相互关系，必要时进行金相检验，以合理确定理想的热处理工艺参数。

因此，尽量减少淬火硬化层的部位和程度，采用对零件进行局部硬化或调整局部的硬度，如图 3-18、图 3-19 所示，既能完成零件的热处理，又能避免零件的变形和开裂。

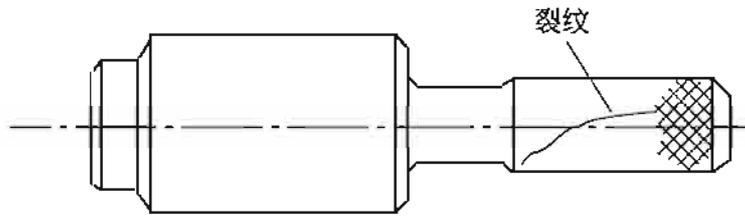


图 3-18 塞规的淬火裂纹示意

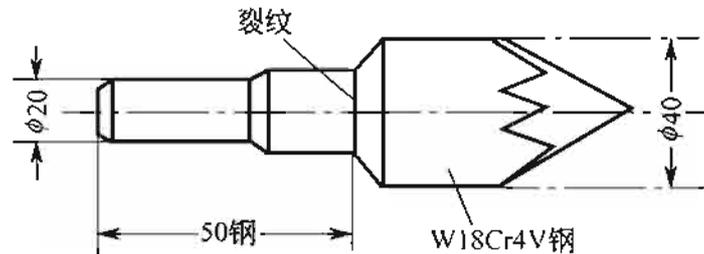


图 3-19 扩孔钻的淬火裂纹示意

热处理工艺的设计质量和现场的操作质量对零件的淬火开裂有十分重要的影响，因此应正确安排和实施冷热加工工艺，实现操作规范，确保各方面保证加热和冷却质量。

零件截面尺寸较大，合金元素的含量较高，如高合金钢、高速钢、高铬合金钢等，由于本身具有较多的碳化物，因此导热性差，另外如果形状复杂、加热过度等，没有进行必要的预热措施或加热速度过快等，加热过程中热应力的增大势必造成零件的开裂，这一点务必注意。对于热处理后没有达到要求的返修件，如果未进行退火或正火处理而直接加热淬火，将会造成零件的二次淬火，增加了淬火开裂的倾向。

如果零件的加热没有根据零件材料的特点来进行合理的加热，

加热温度高或加热速度快等，假如钢材的组织不良等，将造成零件表面和内部温差的增大，当淬火后内应力超过正断抗拉强度，零件将会出现开裂。

过热是一种常见的加热缺陷，通常表现为组织粗大、材料的性能降低，并成为淬火开裂的根源之一。低碳钢和低碳合金钢淬火后正常组织为呈有序排列的条状低碳马氏体，而过热后马氏体排列方向性明显，同时马氏体条粗大；中碳钢和中碳合金钢的正常淬火组织是条状马氏体+少量片状马氏体，出现过热时则马氏体粗化，同时呈条束状分布。表 3-10 为 45 钢淬火组织与淬火温度的对应关系。

表 3-10 45 钢马氏体针长度与淬火加热温度的关系

淬火加热温度 /℃	马氏体针的长度/ μm		组织特征
	一般长度	最大长度	
765~770	<7	<7	细针马氏体+30%铁素体
800~810	7~11	12	细针马氏体
830~840	11~14	18~21	少量马氏体呈条束状分布
860~865	11~15	18~21	少量马氏体呈条束状分布
890~900	18~28	52~56	约 1/3 马氏体呈条束状分布(过热组织)
950	32~48	70~105	马氏体显著呈条束状分布(严重过热)
980	40~70	70~105	马氏体显著呈条束状分布(严重过热)

淬火温度过高，形成的裂纹会沿晶界分布，在显微组织中有过热的特征，此时粗大晶粒形成的马氏体呈针状，热应力和组织应力增大，当其超过钢的正断抗拉强度，引起零件开裂，这种情况多出现在高碳钢和高速钢的淬火中。一般认为，淬火温度高容易发生淬火裂纹，这主要与钢的淬透性即钢的淬透深度有关，通常淬火温度和淬火裂纹之间有一定的关系，一类为温度越高淬火裂纹的概率增加（指小零件），另一类为温度越高裂纹概率降低（指大型零件），最后一类为随钢淬火温度的升高而变化。需要注意的是零件的过热容易发生在薄壁处、尖端处以及锐角处等，它们为淬火裂纹的多发位置。过热淬火开裂的一个重要原因是晶粒长大，晶界强度降低，裂纹沿晶界分布。过热从温度上讲比正常淬火温度高 100℃ 以上，



图 3-20 45 钢过热淬火裂纹的金相组织
($\times 250$, 4%硝酸酒精浸蚀)

过热容易发生在炉壁附近以及加热火焰的接触处，因此热处理现场出现工件的开裂多因炉内温度分布不均匀造成。发现过热应立即停止淬火，将工件取出炉外空冷，在火色消失后（约 550°C 左右）再加热至正常的淬火温度加热，此时应注意工件的尖端、锐角以及截面突变处，否

则容易在该位置出现淬火裂纹。图 3-20 所示为 45 钢过热淬火后的显微组织，裂纹明显沿晶界分布，马氏体针比较粗大。

在零件的加热过程中，在重视奥氏体化温度的同时更要关注冷却方法，均匀的急冷可有效防止零件的开裂和弯曲，因此均匀搅拌冷却介质是实现零件获得要求的技术指标的重要条件之一。需要注意的是对于采用输送带型的冷却槽，其零件热处理后随着滑道送入淬火介质中后散落在输送带上，与输送带接触的下面部位冷却慢，而上面冷却快，因此造成冷却不均匀，容易引起淬裂或变形。针对此类问题可采取冷却介质有足够的深度，使零件落在输送带前的温度已经低于 M_s 点，这样在输送带上不会出现高温的零件。关于冷却介质的搅拌有两种方式，一是自槽底向上喷液，另一种以螺旋桨自侧面搅拌，理想的状态是在热处理冷却槽内，在零件落入冷却介质的上面，自侧面横向流动为宜（自上而下则形成紊流，无法均匀冷却）。

(4) 表面脱碳

零件在加热过程中，因为加热介质中存在氧化性气体，造成其表面发生氧化和脱碳，这将严重影响表面质量，如果脱碳层深在 $1.5\sim 2\text{mm}$ ，淬火后因内外组织成分的差异表面将产生拉应力的作用，这是由于脱碳后表面形成的低碳马氏体的比体积比心部金属

小，会产生表面裂纹。

资料 [33] 介绍，高碳钢（指含碳量大于 0.5% 以上）发生表面脱碳是最危险的，该类钢内部发生马氏体相变，有相当大的体积变化，造成零件的表面产生拉应力作用，更容易产生淬火裂纹。

一般而言，如零件表面存在脱碳，因此有发生淬火裂纹的可能，其原因是脱碳层的马氏体的膨胀量小于母体的膨胀量，二者存在差异的结果。事实上表面脱碳未必就会出现淬火裂纹，应根据表面脱碳层残余碳量的多少来确定。资料 [18] 介绍，当残余碳量小于 0.3%，则不会发生淬火裂纹；而当残余碳量高于 0.4%，则容易出现淬火裂纹。渗碳可以防止开裂，其原因在于过共析钢（含碳量在 0.85%~0.90%）使马氏体的膨胀量变大，在表面产生了压缩残余应力。

关于脱碳的问题要进行正确认识和分析。如果裂纹两侧的脱碳层中铁素体呈大晶粒并与裂纹近似垂直时，为热处理加热裂纹；如果铁素体作无规则的排列，则为锻造缺陷；如果没有进行锻造，则为原材料本身具有裂纹。资料 [52] 介绍，40Cr 制造的转子轴经过锻造和淬火后发现裂纹，金相检查裂纹的两侧存在脱碳层，铁素体呈较大的柱状晶粒，晶界与裂纹基本垂直。由此可知此裂纹是在锻造过程中形成的，淬火加热中引起裂纹两侧的氧化脱碳，造成铁素体晶粒的形核，因此随着加热时间的延长裂纹两侧的碳浓度降低，裂纹的开口向内部扩展，为铁素体的长大提供了便利条件。在实际热处理过程中，应对出现的裂纹进行正确分析和判断，才能指导零件的热处理工作。

（5）冷却介质、冷却速度和介质的温度

为了实现零件的热处理，要根据材料和技术要求合理选择冷却介质，使钢材与淬火介质的冷却强度相适应。一般而言，淬火方法是防止淬火开裂的首要选择，水冷比油冷危险，盐水比油冷危险，盐浴（包括碱浴、硝酸盐浴等）的开裂倾向较小。对必须采用冷却强烈的介质，如能淬火前在空气中预冷，则会收到意想不到的效果。因此理想的手段和措施是降低钢在马氏体相变区的冷却速度，在相

变点区域以上快速冷却，在马氏体相变区缓慢冷却，确保零件内外温度的一致性，避免产生组织转变的不同步性。冷却介质应做到均匀冷却，必要时加搅拌器，目的是确保零件在淬火过程中介质温度的一致。淬火内应力的分布直接影响淬火钢的组织形态，零件在获得 50% 马氏体时，即约在 120~150℃ 会发生淬火裂纹，这可从钢的理想冷却曲线中得到结论，根据零件的材质选用热浴淬火、等温淬火等。材料的相变点 $M_s = 561 - 474w_C - 33w_{Mn} - 17w_{Ni} - 21w_{Mo}$ (°C)，在 M_s 点附近进行冷却则可避免零件的开裂， $M_f = M_s - 215 (\pm 15)$ °C， M_s 点越低则易于引起淬火开裂，而在 M_s 点以下快冷即水淬油冷水冷时间过长、或分级淬火取出后立即进行清洗等，会直接造成零件的开裂。资料 [18] 介绍，若 M_s 点下降 8℃，淬火裂纹则为原来的 6 倍。因此对零件进行分级、等温淬火就是减少开裂的方式之一。通常的淬火介质有硝酸盐浴、碱浴、硝酸盐和碱的混合液。常见的盐浴等温或分级淬火的成分见表 3-11。

表 3-11 常见盐浴分级或等温淬火的介质成分组成以及使用范围

淬火介质的组成成分	熔点/°C	使用温度/°C
50% NaNO ₃ + 50% NaNO ₂	221	250~500
50% NaNO ₃ + 50% KNO ₃	220	240~500
50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂	145	160~500
53% KNO ₃ + 47% NaNO ₂	140	150~400
25% NaNO ₂ + 25% NaNO ₃ + 50% KNO ₃	175	205~600
50% NaNO ₃ + 50% KNO ₂	143	160~550
55% KNO ₃ + 45% NaNO ₂	137	150~550
55% KNO ₃ + 45% NaNO ₂ (另加 3%~5% H ₂ O)	130	130~360
50% KNO ₃ + 40% NaNO ₂ + 7% NaNO ₃ + 2%~3% H ₂ O	100	110~125
70%~80% NaNO ₃ + 20%~30% KNO ₃	—	300~550
80% KOH + 20% NaOH (另加 3% H ₂ O)	130	150~250
84% KOH + 14% NaOH + 2%~3% H ₂ O	140	150~300
85% KOH + 14% NaNO ₃ + 2%~3% H ₂ O	140	150~300
75% (35% NaOH + 65% KOH) + 20% NaNO ₂ + 5% KNO ₃	160	180~280
80% NaOH + 20% NaNO ₂	250	280~350
95% NaOH + 5% NaNO ₃	270	300~350
70% NaOH + 20% NaNO ₂ + 10% NaNO ₃	260	280~350

需要注意的是，上述介质配比不同则其温度的使用范围有较大差异，在实际热处理过程中，应根据工件的材质、技术要求、几何形状以及具体的组织和性能等合理选择淬火介质和冷却方法，从冷却设备的选择，到淬火工艺装备的应用，都应认真做好工艺验证工作，目的是确保工件淬火后的产品质量合格，降低或消除产品的变形和开裂，发挥出该材质的特性，满足零件的使用要求。

利用选择冷却介质来调整淬火应力的大小，零件自高温急冷产生较大的热应力，表层形成残余压应力，有利于防止淬裂。而在危险区产生相变应力，在零件的表面形成残余拉应力，则有利于淬火裂纹形成。因此是否发生裂纹取决于热应力和相变应力之和的大小和分布情况。

调整残余奥氏体的数量，有助于减少淬火裂纹的发生。资料[49]介绍，如果工件淬火后存在5%~7%的残余奥氏体，它不会受外力作用而轻易改变，因而有缓冲作用，对于齿轮可使齿面间接触良好，用于轴承则有助于延长滚动寿命。由于残余奥氏体为软韧性相，在冷却过程中可很好吸收马氏体形成时产生的畸变能，具有缓和相变应力的作用。因此，采用分级淬火、等温淬火或进行贝氏体淬火，可有效防止淬火裂纹的出现，为零件的正确热处理提供思路 and 方向。

碱浴和硝盐浴具有较大的冷却能力，淬火后的工件表面呈银灰色，洁净，如加入水则可显著降低其熔点，提高冷却速度。水的具体加入量见表3-12。加水后的冷却速度提高1倍以上，工件的硬度可提高1~2 HRC，多用于进行贝氏体或马氏体的淬火或等温淬火。应当注意，碱浴的缺点为有较强的腐蚀性，对皮肤有损坏，因此现场要加通风装置，赤热的工件浸入后碱液会剧烈沸腾、飞溅，

表 3-12 推荐碱浴和硝盐浴中可添加的水量

冷却介质的温度/℃	水的添加量(占整槽介质重量的比例)/%
220	1~2
260	0.5~1
320	0.25~0.75
370	0.25

主要用于碳钢的淬火。

盐与碱、硝酸盐的混合液用于进行工件的淬火发蓝处理，可省去一道发黑或表面处理工序。其特点为处理后变形小、光洁度好和有一定的抗锈蚀能力。多用于形状复杂、要求变形小的碳素工具钢、渗碳钢、工具钢和合金钢等淬火。

应当了解淬火的冷却速度与淬火裂纹的关系，零件的快速冷却导致产生热应力，零件的外层为压应力，而内层为张应力（或拉应力），可以有效地防止淬火裂纹的产生。但在组织转变的过程中（ $M_s \sim M_f$ ），相变的应力增大。在该温度范围内，冷却速度越大，相变应力明显增加，也就容易出现淬火裂纹。

事实上任何零件的热处理过程都存在热应力和组织应力的共同作用，其力的总和的正负决定了淬火零件是否发生淬火裂纹，具体如图 3-21 所示。从图中可知应力合成的结果为：在 A 或 B 区域内冷却速度过慢和过快应力均为负，而介于二者之间的应力为正，是淬火裂纹的发生区域。油冷不会产生裂纹，因此充分利用热应力来减少相变应力是实现零件无淬火裂纹的重要方法。

另外，为防止出现淬火裂纹的产生，在零件冷却到接近 M_s 以

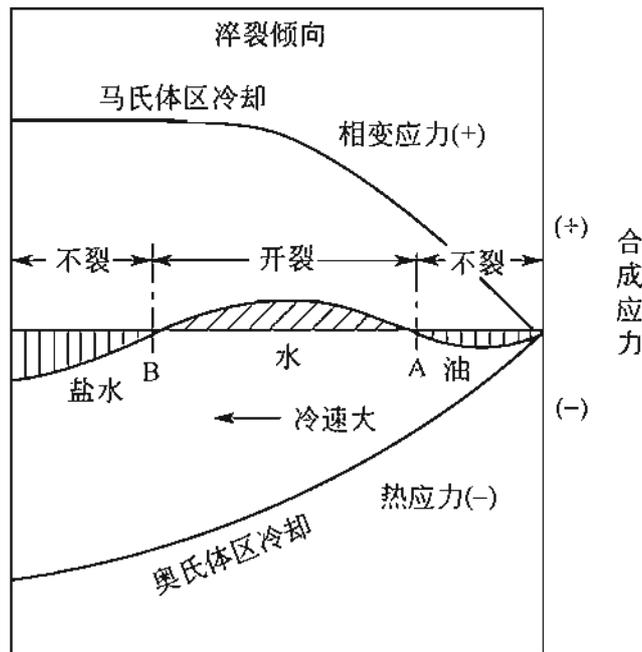


图 3-21 冷却速度与淬火裂纹的关系

上取出进行缓冷，即一般淬火到 230°C 左右提出空冷，是十分适宜的。此断续淬火将淬火裂纹降为零，但应注意合理控制冷却速度，改变冷却速度的温度是在稍高于 M_s 点，否则反而会诱发淬火裂纹的产生。

水是常见的淬火介质。资料 [18] 介绍，水的温度、零件的直径与淬火裂纹有一定的关系，直径越大和水温越低则越难发生淬火裂纹，其原因在于水的温度升高，热应力减小，相变应力增加；直径增加则为有芯淬火，表面呈现压应力的作用，故不会造成淬火裂纹的出现。图 3-22 所示为水的温度、零件的直径与淬火裂纹的关系，以及裂纹的形状。

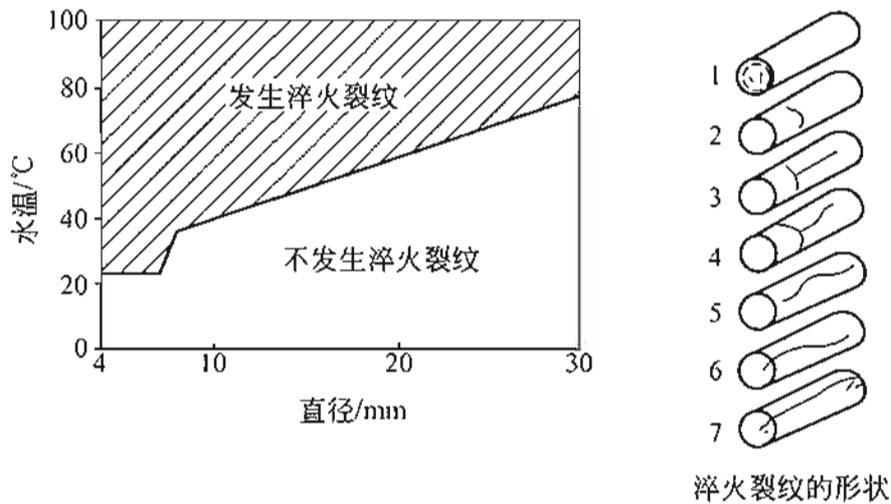


图 3-22 水温、零件直径与淬火裂纹的关系

(材料成分：C 含量 0.6%、Cr 含量 0.5%、Si 含量 1.6%，直径为 4~38mm)

淬火裂纹发生的时间并不是在淬火的瞬间发生的，是在 M_s 点以下冷透时出现的。低温开裂的原因为自奥氏体化温度快速冷却而收缩的过冷奥氏体在 M_s 点得到马氏体组织后体积膨胀，这种过分激烈的转变最终造成淬火的开裂。图 3-23 所示为钢的加热、淬火引起长度的变化（膨胀曲线）。

零件的冷却方法除上述外，根据零件的形状和技术要求，还可采用浸渍淬火、喷射淬火、压缩空气淬火等，但应注意的是要考虑尽可能消除对零件的开裂和变形的影响，从而确保零件的热处理

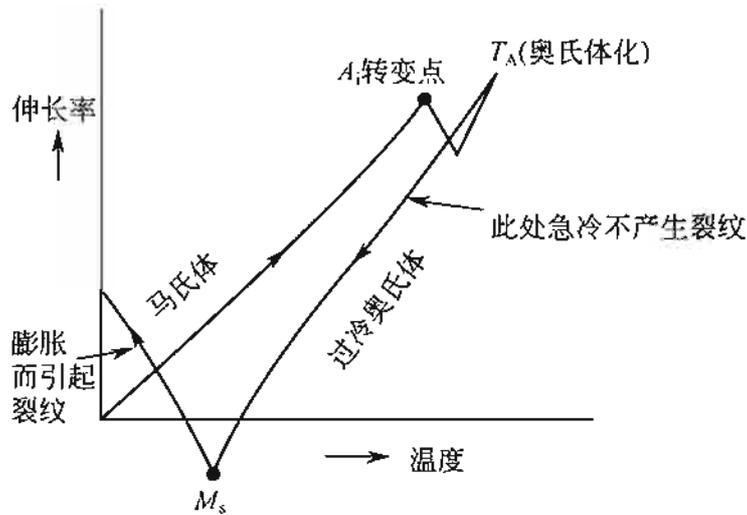


图 3-23 钢的加热、淬火引起的长度的变化（膨胀曲线）

质量。

(6) 残余奥氏体和回火的影响

残余奥氏体是冷却结束后存在的一种不稳定的组织，其余量随在 M_s 点区域的冷却速度的不同存在差异，因此在此温度缓慢冷却，则过冷奥氏体得到稳定化，含量增加。由于过冷奥氏体是一种软而韧的组织，其含量越多越能吸收马氏体造成的急剧膨胀等，缓和了相变应力，因此防止了淬火裂纹的发生。

零件的回火是确保尺寸稳定，获得要求的组织、硬度和力学性能的重要热处理工艺，在回火过程中要发生一系列组织结构的变化，它消除了内部的热应力和组织应力的作用，其微观内应力和宏观内应力会随之消除，淬火显微裂纹也会焊合或添合等，减少了四方马氏体的晶格，零件经回火后得到最终的性能。另外碳化物的形成和残余奥氏体的转变将会产生新的内应力，可能会发生重新分布等。如果回火不充分（温度过低、时间短、淬火后未及时回火等），回火加热速度快或冷却速度过快等，组织的转变没有完成，不仅尺寸难以保障，更有可能造成零件的变形和开裂。高速钢制造的大型刀具如回火不及时或不充分，极易发生开裂现象，造成零件的报废。因此应当引起操作者的高度重视，只有这样才能满足零件的热处理要求，生产出合格的产品。

零件的淬火开裂绝大部分是在冷却介质中取出空冷过程中出现的，在放置过程中一部分尚未转变的残余奥氏体继续向马氏体转变，也是淬火过程的继续，因此零件的内部组织转变应力增加，造成零件的淬火开裂。同时也应看到淬火内应力在放置过程中也会重新分布，有可能在应力集中的部位出现开裂。因此及时回火既可降低淬火过程中产生的内应力，又能提高零件的破断强度，可有效避免零件的开裂。淬火后如来不及回火，最基本的原则是要将零件放在 100℃ 的热水中保温，也可防止零件的开裂。

关于回火加热速度的问题，需要注意淬火马氏体组织在 100℃ 和 300℃ 有两次收缩现象，而在以后的加热过程中则不会再次收缩，如图 3-24 所示，即缓慢加热到 300℃ 不会有裂纹的产生。另外，从工艺上来讲，采取断续淬火（余热 200℃ 左右）和分级淬火，以及立即回火，同样可起到降低裂纹出现的概率的作用。

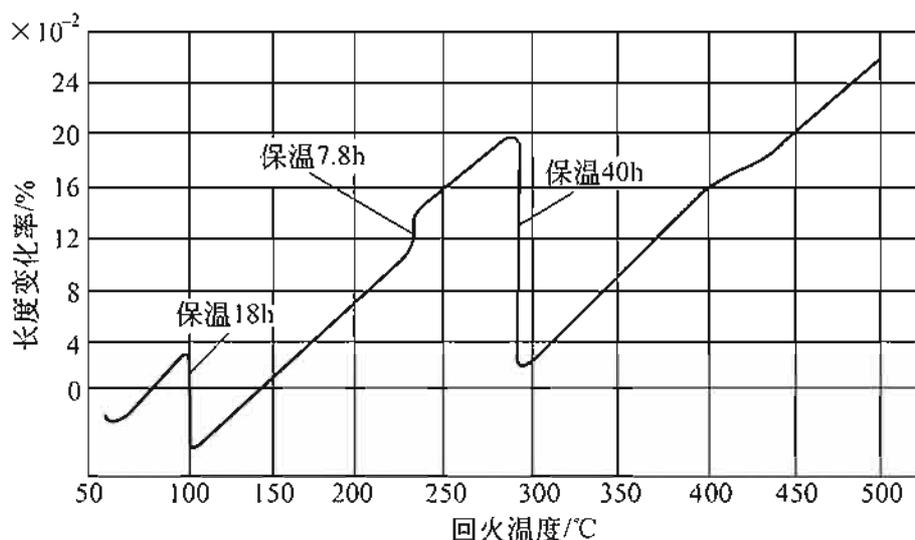


图 3-24 淬火碳素工具钢回火长度的变化

(7) 零件淬火前各工序对淬火裂纹的影响

对于大型零件进行正确的锻造，有利于消除冶金缺陷（如偏析、疏松、夹杂物和发纹等），降低裂纹发生的概率。资料 [3] 介绍，高速钢的碳化物不均匀性差，采用重新改锻，在 1100 ~ 1150℃ 加热、锻粗、拔长反复成形；均匀加热，采取轻锤快打，逐

渐加大加压力。锻造不良，内部出现过热或内裂等，高碳钢锻造后冷却不良，将出现网状碳化物。

零件的预备热处理是为最终的热处理做好组织上的准备，一般有正火、退火、调质处理和球化退火等，对于要求十分严格的零件应在粗加工和精加工之间加上除应力退火处理。要根据零件的具体要求来选用热处理设备、加热速度和加热温度等，要充分考虑到零件的过热对性能的影响等，对中碳钢、高碳钢等的预备热处理时要特别注意，制作的高速钢冲模采用亚温淬火，保持一定的韧性和硬度，明显提高了冲头的使用寿命。同时缩短保温时间也可防止淬火裂纹的发生。

3.3.5 其他裂纹

在热处理过程中如何区分和判断是淬火裂纹还是非淬火裂纹，可从以下几个特征来分析。如零件表面存在发纹，在淬火后得以发现，则裂纹截面有两侧会有不同程度的脱碳；如存在非金属夹杂物，则裂纹呈曲折锯齿状，沿裂纹两侧有严重的夹杂物，裂纹由粗变细，但尾部呈圆秃状裂纹，无脱碳现象。上述为非淬火裂纹。而分辨裂纹两侧脱碳层是热处理过程中造成还是由于锻造造成的，应进行具体分析和判断。当裂纹两侧脱碳层的铁素体呈粗大晶粒并与裂纹近似垂直，则是在热处理过程中加热造成的脱碳；反之，铁素体呈无规则排列，则裂纹在淬火前已经存在。资料 [19] 介绍，如果零件经过锻造则为锻造裂纹，而没有进行锻造加工则为原材料脱碳所致。

除热处理淬火裂纹外，零件热处理后有的还要进行冷处理、时效处理、表面处理、磨削或车削加工等工序，如果处理不当，可能会形成冷处理裂纹、时效裂纹、磨削裂纹、电镀裂纹、延迟裂纹以及疲劳裂纹等。综合分析出现上述质量缺陷的原因，在于淬火时的宏观内应力、微观内应力、显微内部裂纹等共同作用的结果。

(1) 冷处理裂纹

冷处理裂纹常形成纵向裂纹和横向裂纹。对某些量具或精密零

件，为了确保尺寸的稳定性，减少内部残余奥氏体的含量，采用在 $-80\sim-60^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行冷处理，此时淬火应力与残余奥氏体转变为马氏体产生相变应力和比体积变化；而急冷或急热产生的热应力过大；低温状态下材料的强度降低等，如处理不当将有裂纹产生，与淬火裂纹相同。研究表明，高速钢工具经过该工艺处理后，明显提高了使用寿命。零件在 $100\sim130^{\circ}\text{C}$ 温度下回火，组织中则有 $10\%\sim30\%$ 左右的残余奥氏体，因此要进行冷处理，在冷却过程中部分残余奥氏体转变为马氏体，应力增大，而材料在低温下的脆性明显提高，但也确保了零件尺寸的稳定。

零件在淬火后温度偏高，或用水清洗后未冷却直接放置到低温状态下，此时冷却速度过快，尚未转变的残余奥氏体开始迅速生成马氏体组织，体积膨胀，表层的拉应力提高，而在低温状态下材料的脆断抗力明显降低，当内部应力超过脆断抗力，则发生零件的开裂。

零件的结构形状复杂和尺寸过大等对冷处理后的质量也有一定的影响。结构复杂、尺寸过大，如冷处理的温度过低和冷却过快等，则提高了内应力作用，实质同淬火裂纹是一致的。为避免出现冷处理裂纹，在实际生产过程中采取将零件冷却到室温后再进行冰冷处理；对截面变化大、厚薄悬殊、形状复杂的零件或个别部位，进行石棉包扎保护；冰冷处理后的零件温度回升到室温后，应立即进行回火和时效处理，以消除内应力的作用，如果来不及进行回火也要在 $80\sim100^{\circ}\text{C}$ 的热水中保温一定的时间，以免造成零件的开裂。

(2) 时效或放置裂纹

该类裂纹多发生在合金材料的焊接件中，呈弧状裂纹，如GH141镍基高温合金。在固溶处理时碳化物全部溶解于基体中，而后在 $740\sim800^{\circ}\text{C}$ 时效处理， M_{23}C_6 碳化物薄层在晶界上形成，因此降低了合金晶界抗拉强度，合金脆化而出现裂纹。而工件未充分回火，残余奥氏体未充分转变，随着时间的延长内部应力重新分布，加上残余奥氏体数量较多，继续发生组织转变而造成开裂。

采取的措施为对 GH141 镍基高温合金进行焊前时效处理，控制固溶处理的速度，然后进行标准化的热处理。同时严格回火工艺，延长回火时间或增加次数，进行冰冷处理等。

(3) 磨削裂纹

零件经过热处理满足了技术要求，随后要进行车削或磨削加工处理，得到符合要求的成品零件。尤其是经过化学热处理后并进行淬火的零件，必须对其表面加工，其中外圆磨削是常用的加工工艺，但因加工不当将出现磨削裂纹。因此一般是指淬火后应力过大或未及时回火，以及回火不充分（不足），或残余奥氏体过多等，即使在正常条件下进行磨削，也会造成磨削裂纹的产生。

磨削裂纹在零件的研磨表面可用肉眼或磁力探伤发现。通常有三种类型：呈现为细小网络状分布的裂纹；裂纹呈细小长条状，并与砂轮进给方向呈交叉分布；呈细小点状分布，类似蠕虫等。垂直于裂纹切开进行金相分析，一般会发现表面有一层黑色的回火层，如磨削压力过大会产生一层白色硬化层，裂纹的深度在回火层内，与表面裂纹垂直，在尖角处呈交叉状。

淬火零件在最后的磨削过程中，如果因磨削参数选择不当，如磨削砂轮过硬、磨削量过大、冷却条件不良等，造成砂轮在磨削过程中随着磨削热而升温，在 100℃ 时表面发生第一次收缩，但零件的内部仍处于膨胀状态，因此表层受张应力的作用发生龟裂（第一种裂纹），裂纹与磨削进给方向垂直，呈平行线状，深度在 0.1~0.2mm。当表面的磨削热量达到 300℃，将发生第二次收缩，表面呈现网状裂纹（第二种裂纹）。对裂纹的检验方法是采用热酸蚀法，其显微组织为托氏体或索氏体组织。因此，严格控制磨削工艺参数，零件的表面应充分冷却、及时修正砂轮等，完全可以避免磨削裂纹的产生。磨削裂纹的两种形态如图 3-25 所示。

淬火裂纹和磨削裂纹产生的原因不同，因此其裂纹的形态不同，淬火裂纹是在淬火过程中发生的，而磨削裂纹是在磨削的表面上产生的。磨削裂纹的方向必定与磨削方向垂直，其形状呈龟裂或龟甲状，而淬火裂纹只是呈断裂形状，如图 3-26 所示。另外淬火

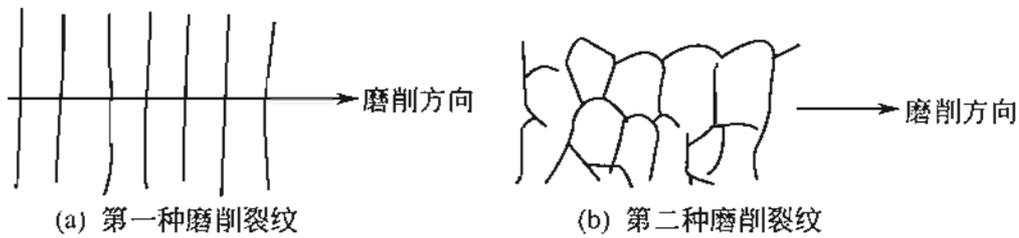


图 3-25 磨削裂纹的两种形态

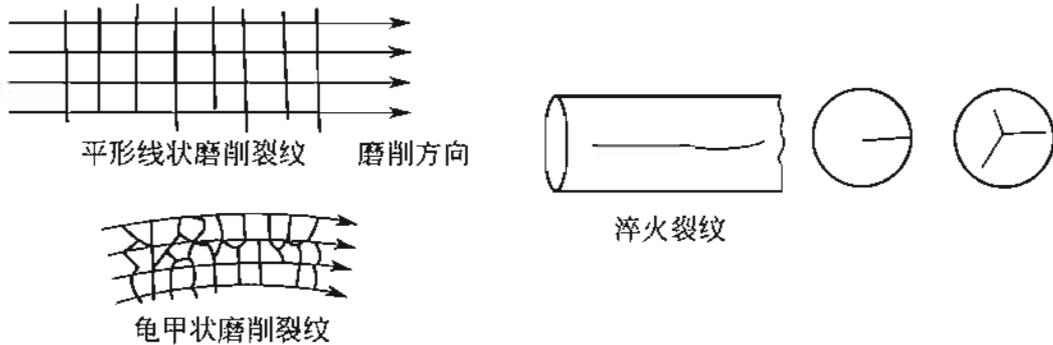


图 3-26 磨削裂纹与淬火裂纹二者形态的差异

裂纹多发生在截面尺寸急剧变化的部位、呈尖锐凹凸形的凸角处、有孔洞的部位等，打标记及刻印所引起的裂纹也可断裂为淬火裂纹。

磨削裂纹的特征为裂纹细而浅，呈龟裂或较有规则地排列成辐射状，如图 3-27~图 3-29 所示，垂直于磨削方向，严重的呈网状裂纹。其产生原因如下。

① 零件磨削的温度到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，则马氏体分解，零件的表面体积缩小，而内部未受热，使表层承受拉应力而开裂，当磨削温度在 200°C 以上时表层变为索氏体或托氏体组织，表层又发生体积的收缩，表层的拉应力超过了脆断抗力，零件表面出现龟裂。

② 当磨削后的表面温度在 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，其速度达到 $600^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，如冷却不充分，磨削产生的热量足以使零件的表面薄层重新加热到奥氏体状态，再次进行淬火处理，形成了淬火马氏体，造成体积的膨胀。

③ 表层中有残余奥氏体转变为脆性的马氏体组织。

由于磨削形成的热量使零件的表面温度升高，此时产生的磨削

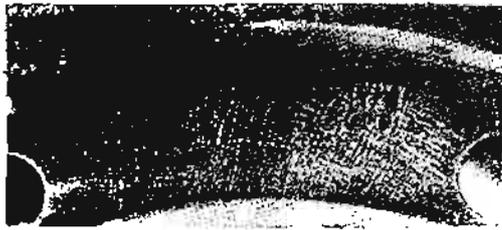


图 3-27 磨削裂纹（龟裂）

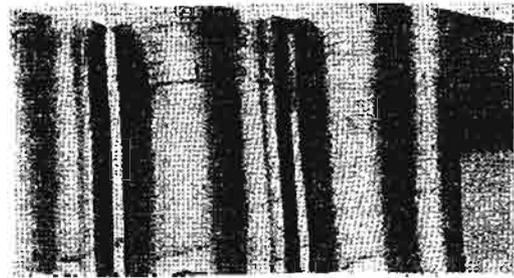
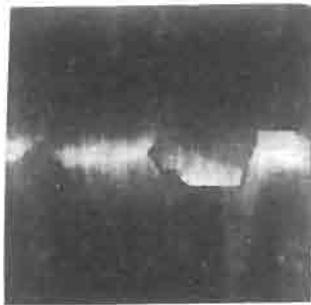
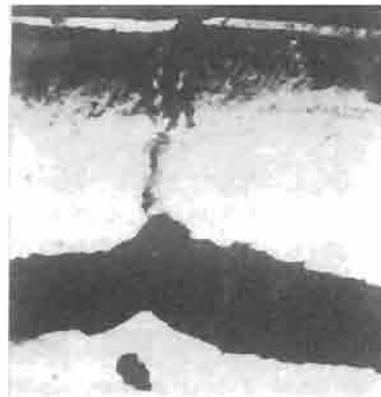


图 3-28 圆柱体表面的磨削裂纹



(a) 龟裂形态



(b) 磨削裂纹金相照片(×100)

图 3-29 曲轴轴颈上的磨削裂纹

拉应力、组织应力和热应力共同作用，最终导致了磨削裂纹的产生。

分析裂纹是磨削裂纹后，要进一步地判断和确定是砂轮的磨削工艺不当，还是零件本身的组织不良或回火不足等原因造成的，要对裂纹附近的组织进行深入的检查，首先是有无粗大的渗碳体网络，其次是过多的残余奥氏体，有无表面磨削烧伤等，这样可得出正确的结论。

磨削烧伤是指零件表面因为冷却不良或磨削量过大，造成零件的表面出现退火的现象。其检查方法为：用温水洗干净零件的表面，用 5% 的硝酸酒精溶液腐蚀 50~60s，直到表面变黑，再用温水清洗干净，放入 50% 的盐酸水溶液中 3s，温水洗净烘干检查。如腐蚀面混有明亮斑点（马氏体组织）或暗斑点（托氏体或索氏体组织），则表面已经烧伤。一旦出现这种缺陷，将造成表面硬度不

均，零件的耐磨性和强度明显降低，甚至会出现废品，无法满足零件的工作条件，因此在零件实际磨削过程中这是绝对不允许的。热处理后的零件在后续的磨削加工过程中，因为磨削不当均会产生磨削退火和磨削裂纹，不同粒度的砂轮对不同材料、不同硬度的零件可能产生不同类别的磨削裂纹。

零件在磨削过程中表面发热，随后进行快速冷却（激冷）是造成表面产生开裂的主要原因，通常是砂轮长久磨削后表面被砂粒和金属屑堵塞，表面产生严重的发热，表面的瞬间温度在 850℃ 以上，达到淬火加热温度，激冷后产生表面淬火，造成淬火开裂。磨削热是砂轮与零件接触产生的，它同砂轮的种类、粒度、零件的材质等有直接的关系。资料 [42] 介绍，零件的硬度提高，则硬质碳化物的数量越多，造成热导率的降低，因此磨削热量使零件的表面温度升高。例如高碳钢或含有铬、钼等的合金钢，在磨削过程中如参数不当，则很容易造成磨削裂纹的产生。

应当注意材料的原始组织状态对磨削质量有一定的影响。资料 [53] 介绍，如组织中出现三级以上的网状碳化物，则在磨削过程中产生的裂纹也呈网状分布。另外，材料热处理后组织不同，则对产生磨削退火和磨削裂纹具有不同的影响，一般规律为组织中碳化物越多，其热传导性能差，硬度越高，零件的脆性严重，磨削开裂的倾向就越严重，而零件中存在较多的残余奥氏体组织，零件表面的硬度高，也容易产生磨削裂纹。零件在磨削过程中，加工条件除了材料和热处理工艺等因素外，在磨削加工中因磨削加工的条件、工艺参数的改变等均可能导致产生磨削裂纹。下面将热处理零件在磨削过程中产生裂纹的因素、发展趋势和改进办法汇总列于表 3-13，磨削裂纹和工艺过程之间的关系和预防措施等见表 3-14，从中可以分析和了解其对磨削裂纹的影响。

（4）电镀裂纹

为提高部分零件的耐腐蚀性和抗咬合性，需要对其进行电镀处理。零件在电镀或酸洗过程中，由于零件和溶液作用产生的氢会渗入到钢中，造成内应力的增大，造成钢的脆性提高，出现电镀裂纹。

表 3-13 淬火零件产生磨削裂纹的原因、发展倾向和改进的措施

产生磨削裂纹的因素	磨削裂纹的发展倾向	预防或改进的措施
砂轮粒度	粒度越细,则越容易产生磨削裂纹	适当更换粒度粗的砂轮
砂轮硬度	硬度越高,砂粒黏结越牢,磨削时易糊塞变钝,零件表面易于开裂	降低砂轮粒度,改用中软或软砂轮
砂轮锋利度	磨削时产生的金属屑糊塞砂轮的间隙,造成锋利度差,磨削性能降低,摩擦力增大,产生热量,容易造成表面裂纹	定期用金刚石笔修整砂轮的切削面,以形成新的锋利的刃口
冷却情况	砂轮磨削时冷却效果不佳,冷却介质的性能低、流动量小,造成磨削热急剧上升,产生磨削裂纹	选用冷却性能好、流动性好的冷却介质,加大冷却流量,将油质改为水质,以提高冷却性能
切削加工面积	砂轮磨削零件时,二者的接触面积越大,冷却性能越差,热量增大,并在短时间内迅速上升,造成零件表面裂纹	根据零件的具体要求,尽可能地减少磨削的接触面积
砂轮的进给量	进给磨削量越大,则产生的热量高,造成表面出现磨削裂纹	适当减少砂轮的进给量
相对线速度	在同样切削量的情况下,相对线速度越小,越容易产生磨削裂纹	在确保零件的精度和粗糙度的前提下,提高砂轮的线速度与零件的转速

表 3-14 磨削裂纹和工艺过程的关系及其预防措施

工艺或方法	影响因素	对磨削裂纹形成的作用	预防措施
热处理	碳化物分布形态	如表层网状碳化物较多,其本身导热性差,如该区域达到较高的温度,热膨胀使碳化物形成较大的相变位移,造成微裂纹并扩展	①控制好零件的终锻温度,防止碳化物沿晶界析出 ②反复锻造和进行扩散退火 ③热处理淬火前进行高温正火处理
	残余奥氏体的含量	零件存在较多的残余奥氏体,会在磨削过程中发生应力诱发相变,造成比体积剧变,组织应力变大,将导致开裂	①采取合理的热处理工艺,控制残余奥氏体的数量 ②采用多次回火或进行冷处理
	残余应力	如表层存在残余拉应力,而磨削时又产生较大的拉应力,二者叠加,容易形成裂纹	①冷却时采用等温淬火、分级淬火、预冷等措施 ②加热过程中采用预热或分段加热 ③改进回火的工艺和方法

续表

工艺或方法	影响因素	对磨削裂纹形成的作用	预防措施
热处理工艺	表面脱碳	脱碳层的硬度低,造成零件和砂轮的挤擦,增加磨削热量,促使磨削开裂	采用保护气氛、可控气氛、真空以及进行充分脱氧的盐浴加热
	晶粒粗大	晶粒粗大和晶界粗化,使位错的密度增加,晶界能增高,缺陷相对集中或相互作用	确定合理的热处理工艺参数,在温度和时间上严格控制,避免出现零件的过热和过烧
磨削工艺	磨削速度过大;砂轮未修整平衡;工件高低水平相差悬殊;冷却不当	磨削工艺不当,磨削热增加,成为瞬间高温的根源。热量来不及扩散,涌集在表层很窄薄的区域类,造成陡峰的温度分布,加上迅速冷却,在局部引起较大的综合内应力,二次淬火和回火造成拉应力变大,导致磨削裂纹的产生	①适当降低砂轮的磨削速度和进给量,或采取间隔磨削 ②做好砂轮的平衡,正确选用砂轮,并进行修整 ③磨削过程中要充分冷却

需要注意的是,电镀温度提高、在酸洗或活性介质中停留时间长、溶液的浓度提高等都会使氢原子的吸附能力增强,造成零件产生氢脆现象。因此,在实际电镀过程中,除了避免上述三项外,对电镀后的零件及时回火也是防止出现电镀裂纹的重要措施。

为了便于分析和判断裂纹的形态,现将磨削裂纹、热处理裂纹和锻造裂纹的特征汇总于表 3-15。

(5) 放电加工或电火花线切割加工引起的淬火裂纹

它是在液体中通过火花放电来进行的熔融加工,其加工面由再凝固淬火层+高温的淬火层构成,因此电火花加工的零件表面可能有淬火裂纹的产生,线条常呈弧尾状。其原因为电火花加工过程中破坏了内部的应力场,并产生 80kgf/mm^2 左右的拉应力,因此其电火花线切割加工表面的熔化层受有拉应力,加上硬度偏高和韧性不足等,造成应力集中而导致线切割时变形和开裂。一般使用时要磨削掉变质层,并进行低温回火。其淬火裂纹如图 3-30 所示,产生这种裂纹的因素和预防措施见表 3-16。资料 [18] 介绍,电火花

表 3-15 磨削裂纹、热处理裂纹和锻造裂纹的特征^[51]

裂纹名称	宏观外形	裂纹源位置	裂纹的走向	周边情况	
磨削裂纹	龟裂、辐射状、直线状,与磨削方向垂直	磨削的表层	沿晶	有时有微弱的氧化和色彩	
热处理裂纹	淬火龟裂纹	龟裂	表面脱碳	沿晶	一般没有或很少氧化
	淬火直裂纹	纵向直线	应力集中处或夹杂物处	穿晶	
	过热过烧裂纹		应力集中处	沿晶	
	弧形裂纹	一般呈弧形	凹槽、凹角、缺口处或组织过渡区	穿晶	一般很少氧化
	回火裂纹		一般在应力集中处	沿晶	
锻造裂纹	折叠	单色分布	与表面呈锐夹角	轧材呈纵向	有氧化物和脱碳
	过热过烧裂纹	龟裂状或鱼鳞状	表面或变形最大区	沿晶扩展	严重氧化和脱碳
	半成品发纹	纵向、直线	发纹处	沿轧制方向	
	加热不足锻造裂纹	一般呈辐射状	锻件心部	穿晶	有氧化脱碳
	终锻温度过低裂纹	有时呈扇形	应力集中处	沿晶或穿晶	略有氧化、脱碳
	铜脆	龟裂状或鱼鳞状	表面或渗铜处	沿晶	有铜相
	热脆		硫化物夹杂聚集处	沿晶	晶界有硫化物夹杂

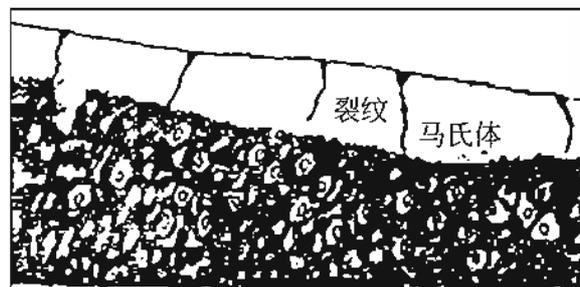


图 3-30 工具钢的电火花加工裂纹

表 3-16 预防放电加工或电火花线切割加工时产生变形和开裂的措施

影响因素	形成的原因	改进和预防的措施
电火花加工工艺	<p>① 电火花加工过程是局部高温放电和迅速冷却的过程,致使表面形成凝固层,产生很大的拉应力作用,而表层是树枝状铸态的熔渗层,脆性大,次表层为厚度较薄的高应力的二次淬火白亮层,表层的高温和马氏体相变都会造成细微的表面裂纹</p> <p>② 电火花加工破坏了原有的应力场分布,造成附加应力叠加过大而开裂</p>	<p>① 调整或改进电火花加工脉冲放电规范,用稳定的放电条件进行加工</p> <p>② 控制进给速度和走丝速度,加强冷却效果</p> <p>③ 减少电火花加工的余量,将余量减小到 3~5mm 以内</p> <p>④ 电火花加工的部位应安排在离表面 8~10mm 以上的中心部位</p> <p>⑤ 电火花加工的形状尽可能对称,加工完毕要及时进行回火处理</p> <p>⑥ 电火花加工后应再次进行回火,以消除因电火花加工产生的内应力</p> <p>⑦ 电火花加工后,应磨去再凝固层,以便确保组织的性能</p>
零件的结构	<p>① 零件整体结构上的尖角、棱边等造成应力集中</p> <p>② 形状不对称,截面突变或厚薄不均</p> <p>③ 加工的尺寸过大,残余应力也大</p>	<p>① 改进零件的结构设计,避免出现尖角等,厚薄力求均匀</p> <p>② 将电火花加工的余量控制在 3~5mm 以内</p> <p>③ 在热处理前预钻工艺孔使工件冷却均匀,以减少内应力</p>
零件的材质	<p>① 碳素钢淬火后残余应力大、强度低,容易引起开裂</p> <p>② 出现严重的组织偏析、夹杂、晶粒粗大、网状碳化物等,影响到零件的强度</p>	<p>① 尽可能地使用淬透性好、强度高的合金钢制造</p> <p>② 严格控制材质的产品质量,必要时采取锻造、球化退火和正火等热加工工艺进行内部组织的改善</p>
热处理	<p>① 淬火后内部存在大量的残余内应力</p> <p>② 零件回火不充分,残余应力未消除</p> <p>③ 热处理工艺不当,产生了过热、过烧或脱碳等,使晶粒粗大,强度降低,韧性下降</p>	<p>① 对零件进行预热、预冷、等温淬火、分级淬火等,减少残余应力。为充分消除淬火时产生的内应力,要进行高温回火,尽可能选用高合金钢</p> <p>② 对零件进行充分回火,或采用二次回火等</p> <p>③ 控制加热温度和保温时间,防止热处理时出现过热和脱碳</p>
磨削加工	<p>① 磨削加工时表面形成了较大的拉应力作用</p> <p>② 磨削时引起二次淬火和回火,造成表面应力增加</p>	<p>① 严格执行磨削工艺规范,控制磨削速度、进给量、砂轮平衡和锋利程度</p> <p>② 磨削后的零件要及时进行回火处理</p>

或线切割后应进行低温回火。目前采用流动粒子炉回火，它具有使用温度广、加热速度快、效率高、炉温均匀性好、可进行炉内气氛的控制、无公害和节约能源等特点，低温回火对防止开裂起到很好的作用。

(6) 氢脆

氢脆是指零件的内部由于氢的渗入而变脆的现象，具有氢脆的零件在一定内部应力的作用下将发生突然的脆性断裂。资料 [38] 介绍，零件的强度越高，则对氢脆越敏感。其断口的特征为断口平齐，无塑性变形，具有明亮的小颗粒状的金属光泽，同时具有放射状的棱条纹等，在金相显微镜下观察组织正常。

在富氢的气氛中加热将造成零件的氢脆，原因在于氢在炉气中容易吸附在钢的表面，同时有向内部扩散的趋势。资料 [6] 介绍，在高温下氢的扩散系数比碳和氮在奥氏体的扩散速度大 3~4 个数量级，当氢的含量在 0.5×10^{-6} 时对零件的表面影响不大。水蒸气也会造成工件的氢脆，因此严格控制其含量是避免产生缺陷的手段之一。

氢脆断口具有清晰的结晶状断口，也称为“冰糖状”断口，在晶界处有时看到一些发纹细线，在晶界或晶粒内还有细小裂纹。零件出现氢脆多发生在酸洗、镀锌、镀铬等表面处理或使用过程中，是由于氢原子渗入零件的内部造成的，如果能及时进行回火处理，回火工艺为 $200 \sim 230^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ ，则可基本消除氢脆现象的出现。

另外，钢在冶炼过程中炉料等未烘干，钢中存在一定量的氢原子，将造成材料的氢脆，因此在实际的炼钢过程中要严格按工艺执行，避免出现氢脆问题。

关于低温脆性是指随着温度的下降零件的韧性降低，在某温度范围内会有一明显变化，此温度称为冷脆温度，一般这与碳元素含量高，内部杂质过多如磷、铜、硅、钼、铬等元素存在有关。

(7) 疲劳裂纹

疲劳裂纹是零件在使用过程中，在应力集中部位出现一条或多条裂纹。如已经产生疲劳裂纹而又未完全破断，在金相显微镜下观

察到裂纹的形貌类似于淬火裂纹，但裂纹的根部不尖锐，呈弯曲闪电状，尖角较圆，裂纹内无氧化脱碳现象。因此，在具体分析疲劳裂纹的同时，要联系零件的实际使用条件，结合断口以及组织状态共同分析，找出失效的原因。

(8) 快速加热裂纹

它也是一种裂纹形式，表现为弧状裂纹，是由于零件直径或厚度较大，尤其是高碳钢、高合金钢和高速钢等，内部合金元素多，形成了较多的碳化物和合金物质等，其自身的导热性差，因此快速加热造成工件内外温度产生很大的温差，内部存在较大的热应力作用。采用预热或分段加热、缓慢加热等措施可避免产生该类裂纹。

3.3.6 导致淬火零件裂纹的淬火加工

淬火零件在淬火后要进行表面的加工处理，才能满足零件的实际工作需要。按处理的性质分为热加工、机械加工和化学加工等。零件淬火后的加工不当将导致裂纹的形成，表 3-17 列出了淬火后加工的具体影响。

表 3-17 淬火后加工因素对淬火裂纹的影响

加工处理的类别	加工工序	产生淬火裂纹的因素和原因
淬火后热处理	回火	①淬火后停留时间长 ②回火时间短,组织未充分转变 ③回火温度过高 ④回火加热温度过快或冷却速度过慢
	冷处理	残余奥氏体在冷处理时发生马氏体的转变,体积膨胀,而周围难以进行塑性变形,马氏体受到压缩作用,而周围组织区域产生拉伸内应力,造成裂纹的发生和扩展
淬火后机械加工	磨削	产生的磨削热使淬火组织回火,出现加工应力;渗碳件中残余奥氏体过高,导致裂纹出现
	喷丸	采用机械撞击的方法,使零件表面的冷作硬化层、内应力以及表面精细结构发生变化,当丸粒速度过高、时间过长、喷丸面积大等,就容易引起裂纹的出现
	校直	利用塑性变形将零件在宏观尺寸范围内发生不均匀的塑性变形等,在校直过程中由于外力的作用又产生了新的微观内应力,导致裂纹的产生

续表

加工处理的类别	加工工序	产生淬火裂纹的因素和原因
淬火后机械加工	拉拔	零件产生明显的塑性变形,表面存在拉应力的作用,导致裂纹的出现
	研磨	零件的表面受压应力的作用,同时应力的梯度很大,呈由外向里急剧下降的内应力,它与淬火应力的叠加形成了有害的合应力
淬火后化学处理	电镀、酸洗	零件进行电镀、酸洗时,产生具有内应力的表面覆盖层,造成淬火零件进一步吸收氢气
	化学活性介质	在酸或碱的化学介质中,停留时间长,内应力升高,出现应力腐蚀开裂

3.4 淬火变形

3.4.1 热处理变形的机理

钢铁零件经过热处理,即要完成加热后得到奥氏体组织,然后根据零件的具体技术要求选择合理的淬火介质冷却,得到要求的组织和获得理想的力学性能等,因此零件在热处理过程中要受到加热和冷却的双重作用。在冷却过程中发生组织转变时,零件受到热应力和组织应力的综合作用,必然要发生零件的形状和体积的变化。其中变形为热处理过程中常见的疵病,它是无法消除的,只能采取必要的措施和合理的方法,减小零件在热处理过程中的变形,并尽可能地使其变形量控制在要求的范围内,最大限度地减少零件的变形和防止开裂,这也是热处理工作者的首要任务。在实际零件的热处理中,要充分考虑到影响变形的内在和外在因素,经过反复的工艺验证才能确定最佳的热处理工艺参数。

钢件在热处理过程中,发生体积和形状的变化,称为热处理变形。将零件加热到较高温度,然后进行快速冷却,就会产生内应力,同时零件的形状、材料成分、机械加工和冷成形过程、工件自重以及摆放方式也会影响零件的变形,因此零件在热处理过程中的

变形是最常见的缺陷之一。淬火变形涉及到三个阶段：加热过程（基于消除内应力）；保温（零件的自重，即下垂弯曲）；冷却（不均匀的冷却和相变）。三个阶段应力相互叠加将导致零件最终的淬火应变，前面已经对热处理内应力产生的原因进行了介绍，这里不再赘述。零件的变形按其特点及产生的原因通常分为体积变化和形状变化两类。

零件热处理后的变形形式通常有两种，即零件的体积变形和形状的变化，下面分别加以介绍。

（1）体积的变化

零件经热处理后其金相组织发生了改变，各种组织的比体积差异会引起零件呈比例的胀缩，体积变化不会影响该零件原来的形状。体积变化是由以下两个原因造成的。

① 热胀冷缩引起的体积变化 零件在加热和冷却过程中，内外各部分的温度存在差异，故引起热胀冷缩的变化量不同。由于热处理前后零件的温度相同，因此热胀冷缩的作用对热处理后体积变化并无显著影响。

② 组织转变引起体积变化 钢铁零件在热处理过程中，必然发生金相组织的转变。由于零件内外组织转变的不同步，获得的组织不同，而各种组织的比体积存在差异，此时产生的应力称为组织应力。零件淬火时冷却速度快，故组织转变前后比体积差距较大，各种组织的晶体结构和晶格常数不同。尤其是钢自淬火过程产生的体积变化最为明显，淬火后马氏体的比体积增大，而残余奥氏体比容体积小，因此淬火体积变化直接与残余奥氏体的数量和未溶解的渗碳体数量有关。

零件热处理前后组织变化必然引起体积的变化，这是热处理后零件体积变化的主要原因。需要指出，影响淬火组织状态的因素，如钢的化学成分、原始组织状态、是否淬透、加热温度的高低和冷却方法等，均对体积的变化有直接的影响。零件在不同组织状态下其体积是不同的，常见组织的比体积见表 3-18。而常用的碳钢组织转变产生的体积变形或尺寸变化见表 3-19。

表 3-18 钢中各组织的比体积变化

组织名称	$w_C/\%$	室温下的比体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
A	0~2	$0.1212+0.0033w_C$
M	0~2	$0.1271+0.0025w_C$
F	0~0.02	0.1271
Fe_3C	6.7 ± 0.2	0.130 ± 0.001
ϵ -碳化物	8.5 ± 0.7	0.140 ± 0.002
石墨	100	0.451
F+ Fe_3C	0~2	$0.1271+0.0005w_C$
低碳 M+ ϵ -碳化物	0~2	$0.1277+0.0015(w_C-0.25)$
F+ ϵ -碳化物	0~2	$0.1271+0.0015w_C$

表 3-19 碳钢的组织转变引起的尺寸变化

组织转变	体积的变化/ $\%$	尺寸的变化/ $\%$
球化 P→A	$-4.64+2.21w_C$	$-0.0155+0.0074w_C$
A→M	$4.64-0.53w_C$	$0.0155+0.0018w_C$
球化 P→M	$1.68w_C$	$0.0056w_C$
A→B _F	$4.64-1.43w_C$	$0.0156-0.0048w_C$
球化 P→B _F	$0.78w_C$	$0.0026w_C$
A→F+ Fe_3C	$4.64-2.1w_C$	$0.0155-0.0074w_C$
球化 P→F+ Fe_3C	0	0

零件的体积变形与各相组织转变时成分和含量有关，而与热处理应力作用的大小无关。体积变化的大小与下列因素和条件有关：淬火前后组织比体积差越大，体积的变形越大；提高淬火温度，奥氏体中合金元素的含量提高，使马氏体的比体积增大，残余奥氏体增加；全部淬透后的零件体积变形最大，而线形减小；采用分级、等温的冷却方法提高残余奥氏体的数量，可减少体积变形量；除回火促使残余奥氏体转变外，其他的回火形式都使零件的体积尺寸收缩。

(2) 形状的变化

热处理时零件形状的变化是由于内应力和外加应力综合作用形成的，在加热和冷却过程中零件的各部分温度有差异，热胀冷缩不均和组织转变不同时，内部就产生了内应力。热胀冷缩不均匀引起

的内应力称为热应力，而组织转变不同时引起的为组织应力。形状复杂、截面尺寸相差大、尺寸大的零件产生的内应力更大，当内应力超过了材料的屈服强度，就要发生塑性变形，因此引起零件形状变化。当达到材料的断裂强度，将导致零件的开裂。零件的自重引起下垂和应力，引起形状的走形、翘曲、弯曲、扭曲等非正常变形。

零件在热处理过程中产生的变形为体积变化和形状变化，最终是两种应力综合作用的结果。因此，认真分析零件变形的规律，对控制和减少零件的变形至关重要。

因此零件的热处理变形是热应力和组织应力共同作用的结果，体积的变化归因于零件相变前后体积差引起零件的体积的突变，而形状的变化是热处理过程中各种复杂应力综合作用下不均匀的塑性变形，二者的作用机理不同。但二者一般是同时存在于零件热处理过程中的，对于某一零件和相对固定的热处理工艺来说，是以一种变形为主的。

3.4.2 影响零件变形的因素

影响零件热处理变形的因素是很多的，其中包括材料的化学成分和原始组织，零件的尺寸、形状，采用的热处理工艺和实际的热处理操作等，它们不但使零件本身的机械强度和形变抗力发生变化，而且也会造成热处理过程中热应力、组织应力和体积效应的作用发生变化，因此影响了零件的变形。从零件热处理变形的机理来看，在热处理的过程中，由于组织的转变，必然发生零件体积和形状的改变，其原因在于钢中组织转变时比体积变化所引起的体积的膨胀，以及热应力引起的塑性变形等。减小淬火应力和提高工件的屈服强度，将有助于控制零件的热处理变形。

零件热处理后的变形是十分复杂的，影响因素很多，例如零件淬火时产生的热应力、组织转变应力、零件的自重等，对于零件的变形都有一定的影响。图 3-31 所示为影响零件热处理变形的要因树枝图，在零件的实际热处理工作过程中供参考。

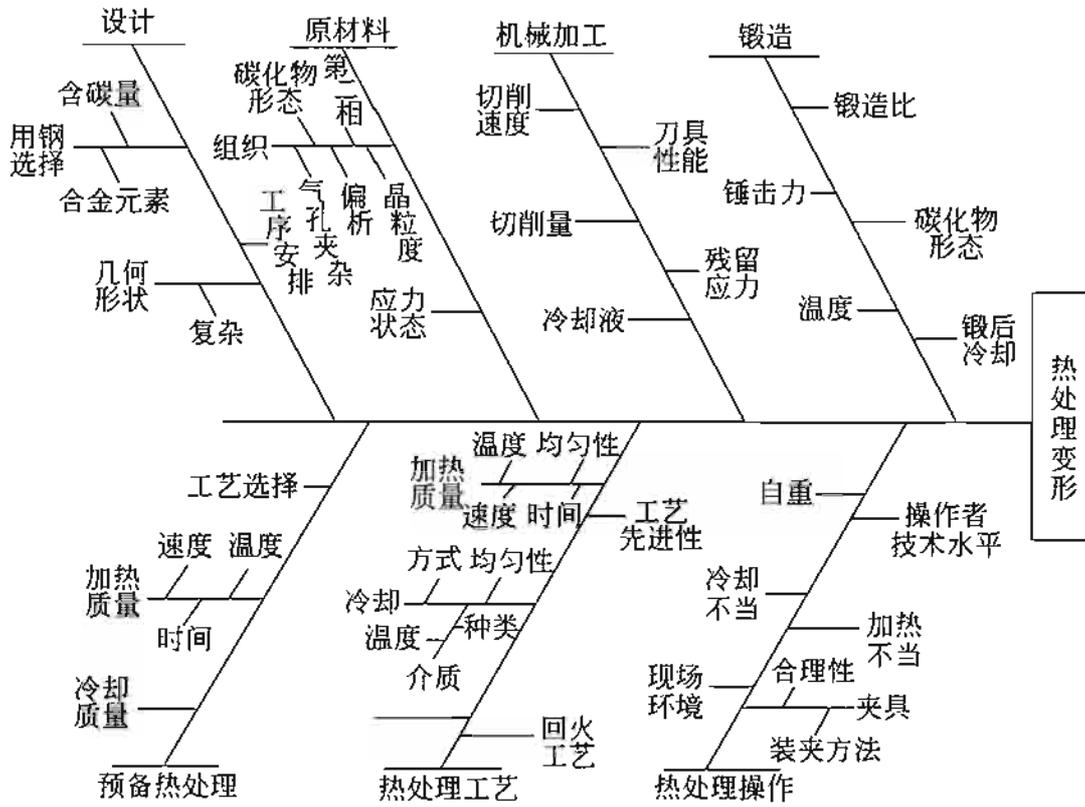


图 3-31 影响零件热处理变形的要因树枝图

因此控制和减小零件热处理变形应从众多影响因素入手，其基本思路为：摸清零件变形的规律，采用七种工具的分层法；分析具体零件；全面了解零件的加工流程；熟悉零件的热处理工艺、操作方法和现场（人员素质、设备状况、周围环境等）；采取措施，对症下药，解决变形问题。

(1) 零件的形状与放置方式的影响

在零件的热处理过程中，各种各样尺寸的零件在热处理后的变形各有不同的规律，同样变形也存在不同的趋势。对于细长零件而言，在热处理炉内的加热放置方式对变形有较大的影响。如放在炉底的零件，以搭桥形式进行放置，将会因零件的自重而产生加热变形；相反，垂直吊挂则变形较小。对板材零件的四周应加以保护，在分析材料的特性和具体技术要求的基础上掌握变形的特征，必要时填加辅助工艺孔或用石棉绳、水玻璃等堵塞孔或螺纹，这样可避免零件出现热处理质量缺陷的概率，提高热处理的产品质量。

如果零件经过调直，加上机械加工的车削或磨削量大，产生很大的加工应力，而最终热处理前的预先热处理工艺不当（如温度低、保温时间短等），加上操作者未能按要求吊挂或合理放置等，可能造成零件产生残余应力，在随后的热处理过程中将出现明显的变形甚至开裂等。

(2) 零件材料化学成分的影响

材料的化学成分决定了零件的硬度和力学性能，同时零件的尺寸大小和具体形状也影响其变形。化学成分影响钢的屈服强度、 M_s 点、淬透性、组织的比体积和残余奥氏体等。首先含碳量直接影响热处理后所获得的各种组织的比体积，一般而言，碳含量愈高则体积变形愈大，具体见图 3-32。同时应注意到碳含量不仅影响体积变化，而且对 M_s 点和残余奥氏体的量也有一定的作用，见图 3-33。从图中可知，含碳量提高后，零件的体积增大， M_s 点降低，残余奥氏体的量增加，随之是材料的淬透性和屈服强度明显提高，

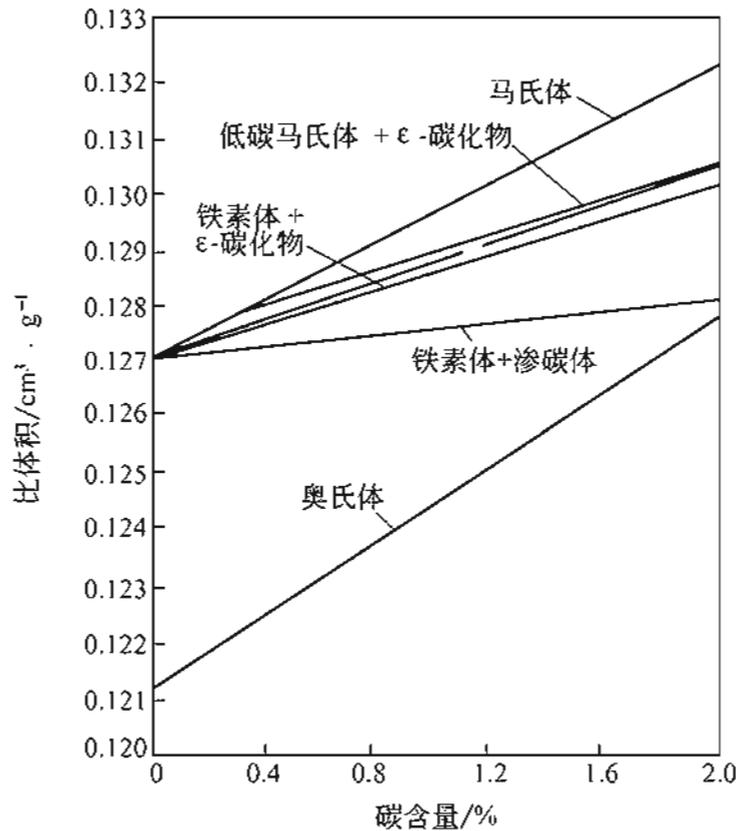
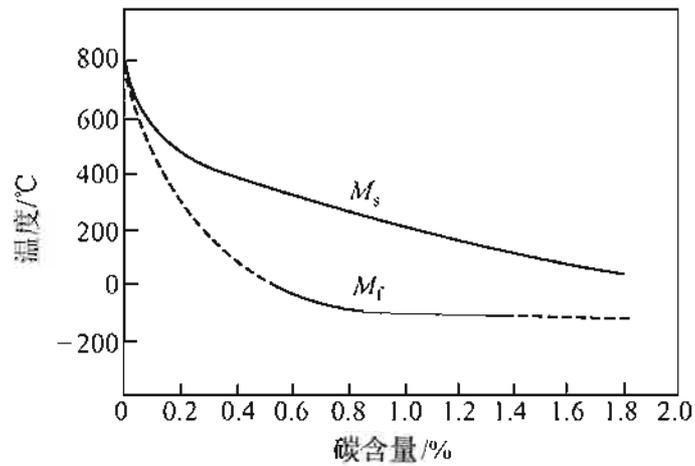
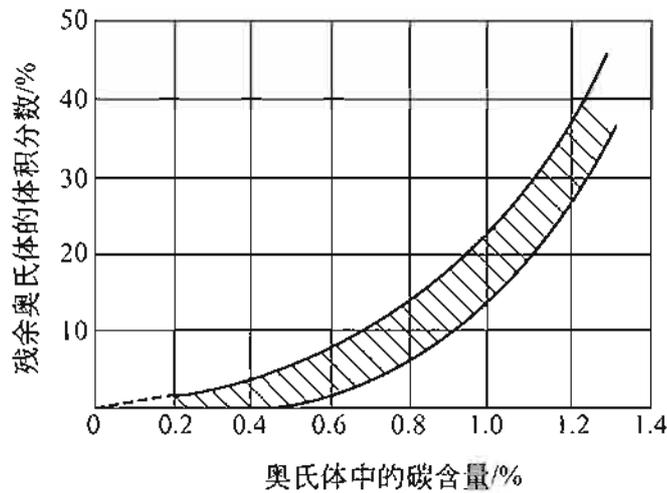


图 3-32 不同组织的比体积与碳含量的对应关系



(a)



(b)

图 3-33 碳钢中的碳含量与 M_s 点、残余奥氏体量之间的关系

造成比体积的变化，使组织应力减小，因此零件的热处理变形减小。

钢中的合金元素对零件热处理的变形体现在影响钢的 M_s 和淬透性上。大量的合金元素如 Mn、Cr、Si、Ni、Mo 等明显降低 M_s 点，残余奥氏体含量提高，因此减小了比体积的变化和组织应力，另外零件的强度提高，使淬火的变形减小。同时也应清醒地看到合金元素的增加使钢的热导率降低，要求有较高的淬火温度，造成零件内外温差的增大，热应力的变形增加，同时也增加了热处理过程的复杂性，因此对于零件的变形控制又是不利的。

对于高合金钢、高速钢制造的零件，合金元素的含量较高，形成了合金碳化物，造成其加热时的导热性差，当淬火温度提高时，将降低材料的机械强度，增加热应力。如果对其快速加热，尺寸大和形状复杂零件的各部分的截面尺寸将不会得到均匀的加热，导致零件各部分的受热膨胀程度不同，热应力使零件出现不均匀的塑性变形，造成形状的变化。

(3) 零件冷却过程对变形的影响

零件的加热和冷却是完成热处理的重要环节，在冷却过程中奥氏体转变为马氏体或贝氏体组织，此时热应力和组织应力的复合作用将直接影响到零件的变形。热应力多产生于冷却的初期，冷却开始阶段其内部仍处于高温状态，具有一定的塑性，在热应力作用下心部因受多向压缩产生塑性变形；而在冷却的后期，零件的温度下降，零件的屈服强度提高，硬度增加，因此塑性变形十分困难；冷到室温后，冷却初期不均匀的塑性变形一直保持到最后，因此要对选用的冷却介质和特性有充分的了解，掌握操作方法和冷却过程的关系，尤其是需水淬油冷的零件，更要有一定的实践经验和处理问题的能力。

(4) 零件的尺寸和形状的影响

从零件热处理的目的来看，要获得零件的硬度和力学性能，必须选择热处理加热设备、加热介质、冷却介质、淬火方法以及合理的操作方式，这必须根据零件的具体材料的淬透性、尺寸和具体形状来确定，否则零件热处理后将难以满足技术要求。

对直径细小的零件以及片状或薄板状的零件，应垂直加热和在静止的介质中冷却，目的是尽可能降低因外力作用造成变形超差的出现，同时在操作过程中要避免零件与物体的撞击或脱落，将影响零件变形的因素控制在预期的范围内。对于带有键槽或凹槽的零件，根据其技术要求来确定如何采取一些保护措施，防止出现零件因截面的变化造成变形超差。一般该部位的硬度要求较低，故可以用石棉绳、键、螺栓等进行必要的添塞、捆绑等，这样可以使该处的变形控制在工艺要求之内，为最后的磨削加工提供可靠的基础。

对于形状复杂、截面形状不对称的零件，具体见图 3-34，由于其形状的特殊，表面在淬火过程中，根据散热的基本规律可知，出现一个表面散热面积大，因此冷却速度快，相反另一个面散热慢，冷却速度降低，这样造成零件的两个面冷却不均匀。资料 [33] 介绍，对 Cr12MoV 钢制造的板状带薄刃面的不对称零件，在 1020℃ 加热后进行等温淬火 (220~240℃)，等温时间越长则变形越小，另外如果采用在零件冷却速度较慢的一侧贴上铁板或其他部件，同样可以起到减小变形的目的。

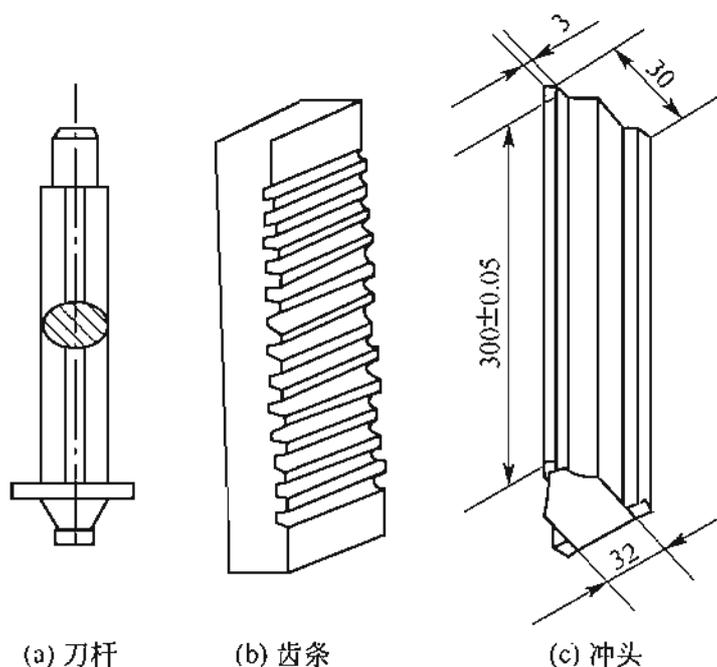


图 3-34 截面形状不对称的零件

零件的截面尺寸变化对其热处理过程中的变形有重要的影响。对高合金钢而言，其变形和开裂的可能性增大，由于这类钢的合金元素多，因此热导率低，内外的温差加大，造成热应力的增加。较大的直径或厚度的零件在加热温度下产生的最大应力见表 3-20。

此时的应力已接近强度极限，因此截面的面积增加，结构设计、成分等不均匀。铸造或锻压等存在残余内应力，因此建议采用逐步升温、阶梯升温方式进行某些零件的热处理。

对套类零件的热处理而言，一般随着内孔的胀缩而胀缩，其基

本规律为内孔在压应力作用下圆周长度减少。表 3-21 为套环状零件的变形趋势。

表 3-20 大件直接加热时可能产生的最大应力

材料牌号	直径或厚度/mm	加热炉温/°C	最大的拉应力 /kgf·mm ⁻²
40Cr	400	850	42
		950	62
40CrNi	600	850	64
		950	75
34CrNiMo	800	850	64
		950	75

注：1kgf·mm⁻² = 9.80665MPa。

表 3-21 套环表面淬火时的零件的变形趋势

淬硬层深度/mm	淬火情况	变形的倾向			备注
		内径	外径	高度	
$\delta < \frac{D-d}{30}$	外圆淬火	微缩	胀大		
	内圆淬火		微胀	略有增加	
$\delta < \frac{D-d}{30}$	外圆淬火	缩小	胀大		
	内圆淬火	缩小	胀大	增加	薄壁套的内径也趋向胀大

注：δ为淬硬层深度，D为外圆直径，d为内孔的直径。

(5) 零件的原始组织对变形的影响

零件进行最终热处理后变形的大小与其原始组织密切相关。组织中碳化物的形态及分布、尺寸的大小、数量以及具体分布，组织内成分的均匀性，部分合金元素或碳化物的偏析，锻造或轧制的纤维方向，残余应力的大小和分布等，都会对零件的热处理变形有不同程度的影响，因此对零件进行合理的预备热处理可消除网状、带状组织偏析导致的奥氏体成分的不均匀，尤其是碳化物的偏析使淬火后的零件具有方向性，沿带状碳化物方向的胀量大于垂直状态尺寸的现状，将粗大的晶粒细化，为零件的最终热处理提供组织准

备，这样零件的热处理变形可控制在要求的范围内。

首先是钢中珠光体的具体形态。球状珠光体或调质处理的组织的比体积比片状珠光体组织的比体积大，其抗拉强度或屈服强度高，因此零件经过预先热处理后获得球状珠光体（一般在2~4级为宜），则热处理后的变形小。资料[33]介绍，对于高碳合金工具钢等，如CrWMn、GCr15、9Mn2V、9SiCr等，在调质处理后得到索氏体组织，使零件淬火后的变形更小，有利于加强对零件热处理变形的有效控制。为了确保零件的热处理变形在要求的范围内，对重要的零件一般在粗加工后进行调质处理，使钢的原始组织比体积增大。零件在最终热处理前获得索氏体组织的目的是改善组织的结构状态，获得一定的力学性能，得到一定比体积的相结构，用以减少最后的热处理变形。

其次是钢中碳化物的形态。沿着平行于碳化物条带的方向进行淬火，将造成零件的膨胀，在垂直方向收缩，碳化物聚集愈粗大，则变形愈难控制，因此只有消除钢中碳化物的偏析，才能有效合理地将变形控制在要求的范围内。

最后要指出，过共析钢中如果存在网状碳化物，则碳原子和合金元素会大量地聚集在网的附近，造成内部成分的差异，别处的碳和合金元素含量明显降低，在淬火过程中造成组织应力的增大，零件的变形量增加。

(6) 零件的应力状态对变形的影响

零件的机械加工过程主要包括塑性成形、焊接、校直、堆焊以及车削、铣削、钻削、刨削、磨削加工等，对于形状复杂的零件，采用进给量较大的方法来加工，势必造成加工的残余应力增大，如果该类应力未得到及时消除，则在热处理过程中将极大影响零件的淬火变形。零件的加热位置不当、夹具不良以及自重等因素直接影响零件的变形。资料[33]介绍，对高速钢制造的 $\phi 50\text{mm} \times 350\text{mm}$ 的锥柄钻头，如果取消消除内应力工序，则淬火后的变形量在0.70~0.75mm，远大于0.15~0.25mm的技术要求。

对于经化学热处理的零件，在粗加工后进行精加工处理。表

3-22 列出了 $\phi 75\text{mm} \times 1970\text{mm}$ 镗杆在不同的工艺参数下的变形情况。

表 3-22 除应力退火工艺参数对镗杆的渗氮变形的影响

序号	类别	工 艺 参 数					弯曲变形量/mm		
		使用的设备	加热温度 / $^{\circ}\text{C}$	加热时间 /min	保温时间 /h	冷却时间 /h	头部	中部	尾部
1	1	盐浴炉	630	40~50	4	3~4	0.045	0.075	0.05
	2		600		4		0.045	0.075	0.05
2	1		620		5		0.18	0.06	0.13
3	2		620		8		0.08	0.07	0.11

从表 3-22 可以看出，高温短时间加热进行除应力退火处理即可满足渗氮零件的技术要求。

(7) 工艺参数对零件变形的影响

零件加热过程中的工艺参数有零件加热的均匀性、加热的温度和加热的速度；冷却过程中的工艺参数有零件冷却的均匀性和冷却速度。这几个常见的工艺参数对零件的变形有直接的影响，下面分别介绍如下。

① 不均匀加热引起的变形 零件在热处理加热介质中，由于加热速度快、加热温度不均匀以及操作不当等，可能造成零件本身加热不均匀。资料 [33,55] 介绍，不均匀加热使零件的变形十分明显。为了减少不均匀加热的出现，在实际热处理过程中要采取一定的措施，确保零件的变形量符合技术要求，也可根据零件的具体形状调整其加工余量。

a. 对于截面尺寸变化明显，形状比较复杂，尤其是导热性差的高合金钢零件，要进行缓慢升温，必要时分段加热或预热，降低零件的加热速度，因此延长了零件的加热时间，使表面和心部的温差减小，故降低了内、外应力，热变形减小。

b. 根据零件的具体形状和材质，对于以体积变形为主的零件，采用快速加热的工艺方法，如进行较高温度和短时间的保温，可以

减轻零件在长时间自重产生的变形；另外也可使零件的表层和局部区域达到相变温度，因此减小了零件淬火后体积的变化，有利于减小零件的变形。另外对于形状复杂而机械加工应力较大的零件，如果在最终热处理精加工前没有进行除应力退火处理，热处理过程中不可避免地会产生较大的变形，甚至造成零件的报废，因此选用适当材料、合理的热处理规范等，防止出现不均匀加热，才能使零件的热处理变形均匀一致或最小，也有利于热处理后零件的校直。同时也应注意到，截面对称、各处壁厚比较均匀时，各部分的冷却比较充分，其变形有一定的规律，这一点应引起设计者的高度重视。

② 加热速度对变形的影响 零件在加热过程中，加热速度的快慢对于零件的变形和热处理质量有重要的影响。加热速度快，则工件表面与心部的温差大，零件中将产生比较大的内应力，造成零件在加热过程中变形的可能性增加，因此从减小变形的角度考虑，加热速度不宜过快，尤其对十分复杂、截面悬殊大、具有键槽或棱角的零件显得更有必要。

但对不同形状、材质和技术要求的零件而言，采用快速加热反而可减小零件的变形，表面加热而心部处于冷态，故减少了热应力和组织应力，表面受压应力作用，内部受拉应力，因此使零件的变形减小；快速加热则奥氏体晶粒无法长大，因此细小的晶粒也有助于控制零件的变形。

③ 加热温度对变形的影响 零件的加热温度是依据材料的相变点及其技术要求而定的，加热的目的是为了使零件获得成分均匀的奥氏体组织，晶粒得到细化，为淬火做好组织准备。通过改变零件冷却时的温差，控制 M_s 点和 A' 的数量，来实现对淬火变形产生影响。对于实心零件和中空零件，其作用有所不同。资料 [33] 介绍，对于低碳钢和中碳合金钢零件，为减少内孔收缩，应降低淬火加热温度，如有可能可进行局部加热。而对于采用 Cr12 等高合金工具钢制造的筒状零件，当加热温度提高后，将造成冷却后残余奥氏体数量增多，孔径缩小。

零件预热温度的选择是有一定规律的，在 500℃ 左右进行预热，这是从弹性体到塑性体转变的温度区间，一旦产生塑性变形则不会回复到原有状态；另外也可将相变点以下作为预热温度，普通钢为 650~700℃，高速钢和高合金钢为 800~850℃，加热会出现膨胀，而在到达相变点又会突然收缩。因此对零件进行预热是减小热处理变形的重要举措，尤其是复杂结构零件、截面突变、存在尖角（或棱角）等，具有更明显的效果。

零件加热温度的选择应根据材料的组织对热处理获得要求的组织和性能的影响、零件本身的化学成分、形状和尺寸等来进行，因此在实际的热处理过程中应进行一系列工艺试验和检测，以确保采用最佳的热处理工艺。

加热的温度提高，高温下抗拉强度和塑变抗力降低，因此高温下的变形量增大；同时温度提高与冷却介质的温度差增大，冷却时产生的热应力和组织应力亦大，造成零件的变形增加。需要注意的是，加热温度的提高使零件的奥氏体晶粒长大，冷却后获得粗大马氏体，引起组织应力的增大，变形量明显加大，不利于零件热处理质量的控制。因此零件的加热温度是热处理过程中一个十分重要的工艺参数，基本原则为在能确保奥氏体成分均匀、可获得要求的组织和性能的前提下尽可能地降低加热温度。

④ 保温时间对零件变形的影响 零件在加热介质中的保温时间确保零件内外温度达到淬火加热温度，并形成均匀一致的固溶了一定量碳和合金的奥氏体。延长保温时间则增加了零件与加热介质接触的时间，零件的变形和氧化脱碳倾向增大，同时奥氏体晶粒容易长大，因此造成零件变形的概率增加。

零件在加热过程中保温时间的选择取决于零件的化学成分、形状尺寸、加热设备的功率、炉内装炉量的大小、原始的材料组织、加热方式以及是否预热等。过短的保温时间同样存在问题，影响到零件的热处理质量，将造成奥氏体均匀化程度降低，碳和合金元素等未得到充分扩散，同时内外温度存在差异，即整个零件的组织 and 温度不均匀，无法满足零件的热处理技术要求等，产生不均匀的

变形。

⑤ 冷却介质对变形的影响 在热处理过程中，淬火冷却是内应力最集中、体积效应最大、最易产生变形和开裂的工序，只有淬火冷却完成组织转变，才能零件获得要求的硬度和力学性能。应选择合理的淬火介质来完成热处理的技术要求，因此冷却介质应满足下列技术要求。

- a. 具有良好的稳定性（不易分解、变质或老化）。
- b. 冷却均匀性好。
- c. 淬火后的零件表面保持清洁，无腐蚀现象。
- d. 工作过程中无大量的烟雾，无毒。
- e. 不易燃烧和爆炸，使用安全。

介质的冷却速度提高，零件截面温差增大，故淬火过程中组织转变产生的热应力和组织应力增大、零件的硬化深度增加，因此整个零件的变形增大。因此，在确保零件硬度的前提下尽可能减小冷却速度，是合理控制零件变形的重要途径。空冷是零件淬火变形最小的方法。资料 [47] 介绍，在零件的 M_s 点以上提高冷却速度，使热应力增加，引起变形的增大；在 M_s 点以下增大冷却速度，由于奥氏体的稳定程度降低，而马氏体转变的数量增加，又使组织应力和组织转变后的体积效应造成的变形倾向增加。因此在 M_s 点以下冷却速度降低，则减小了组织应力产生的畸变，分级或等温淬火使热应力和组织应力明显降低。冷却介质的冷却程度与零件的材质、具体形状和结构尺寸以及零件内外不同的部位有直接的关系。图 3-35 所示为淬火冷却方法和热处理变形的关系，淬火介质分别为油、盐浴和空气。零件的内外和不同部位温差越大，则产生的内应力越大，最终导致热处理变形加剧。从图 3-35 中还可知，在三种冷却介质中，油的冷却最快，空气最慢。就零件的整个变形而言，回火过程中除了在空气和盐浴介质中在厚度方向胀大外，其长度和宽度方向均表现为收缩状态，因此其变形量相差不大。选用变形小的冷却介质如碱浴、硝酸盐浴等，适当缩短水冷的时间。另外，为防止局部尺寸的淬火胀大，可在该位置捆绑铁皮、石棉绳等。应

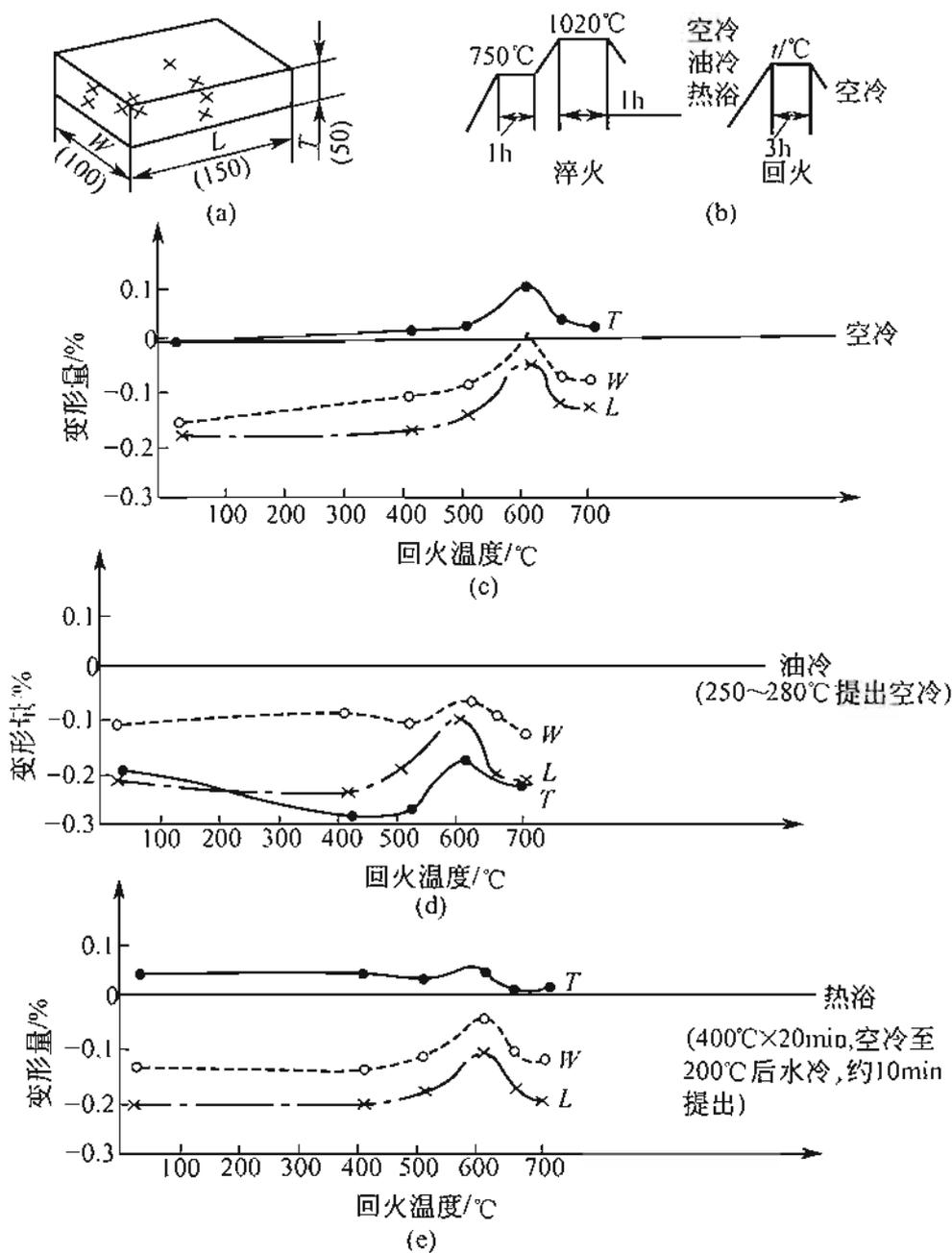


图 3-35 淬火冷却方法和热处理变形的关系

(试验用钢的成分: C 含量为 0.40%, Cr 含量为 5.15%,
Mo 含量为 1.40%, V 含量为 0.80%)

当指出, 淬火冷却速度对零件淬火变形的影响是一个复杂的问题, 在热处理过程中遵循的基本原则为在保证要求的组织和性能的前提下尽可能地降低零件的冷却速度。另外在进行冷却的过程中零件之间的距离对零件的变形有重要的影响, 这一点在碳素钢零件进行水

冷过程中表面得尤为突出，应引起操作者的注意。

资料 [56] 介绍，除了空冷减小零件的变形外，采用调整淬火油的冷却温度，采用热油进行冷却、选择水冷的合理方式，进行马氏体或贝氏体等温淬火等，同样可获得满意的变形结果。

零件的冷却方法一般有多种，通常为空气、油冷、水冷、水淬油冷、分级或等温淬火等工艺方法。5CrMnMo 钢试样在不同冷却方式下的变形见表 3-23。而冷却方法对 CrWMn 钢制小型模具变形的影响见表 3-24。

表 3-23 5CrMnMo 钢试样在不同冷却方式下的变形

试样尺寸/mm	冷却方法	直径变形率 /%	厚度变形量 /mm	硬度 (HRC)
φ95.86×13.23 φ95.97×13.23	在油中冷透	+0.09	+0.02	60
φ99.09×13.23 φ96.02×13.23	水中冷透	+0.44	-0.04	61
φ96.02×13.23 φ96.00×13.23	320℃硝盐冷 30s 转水冷透	+0.23	+0.01	61
φ96.04×13.23 φ95.94×13.23	320℃硝盐冷 30s 空冷	+0.15	+0.01	57

表 3-24 冷却方法对 CrWMn 钢制模具型腔变形的影响

冷却方法	模具型腔的变化	
	尺寸的变化(胀大、缩小)	形状的变化(扭曲)
冷油	变形最大	有轻微的缩小
60~100℃热油	变形比冷油淬火小	有最大的胀大量
在 150℃油炉中等温 2~3h	变形最小	有极小的胀大量
在 150~190℃的硝盐溶 液中分级	变形优于热油淬火	有较大的胀大量；不如在硝盐中的等温效果
在 200~260℃的硝盐溶 液中等温	变形优于 150~190℃硝盐 分级；同 150℃热油相同	有较小的胀大量；不如 150℃热油等温效果

从表 3-23 中可以了解到，320℃硝盐分级后水冷的变形量是空冷变形的 1.5 倍，可见在马氏体转变范围内进行快速冷却对零件的变形影响是十分显著的。因此，为了减小零件的组织应力塑性变形，应尽可能地设法减慢马氏体区的冷却速度，减弱相变的不等时性，使组织应力塑性变形消失。

(8) 时效或冷处理对零件变形的影响

在零件的热处理过程中，为了确保某些精密零件或量具在放置、使用过程中其尺寸和精度的稳定，必须进行零件的时效或冷处理，只有这样才能基本完成组织的完全转变，保持长期的组织稳定。一般而言，低温回火和时效处理可促使 ϵ -碳化物的析出和马氏体的分解，使零件的体积缩小；其引起的应力松弛，导致零件产生形状的畸变。而冷处理使残余奥氏体继续转变为马氏体，零件的体积发生膨胀。由此可见钢的化学成分、回火和时效温度是影响零件变形的重要因素，硬度计用标准试块、精密机床丝杠和部分量具等均进行时效或冷处理，其组织和尺寸稳定不变。

(9) 化学热处理对零件变形的影响

零件在热处理后（调质或正火等处理），为了强化零件表面或改善表面的物理性能和化学性能，如提高表面硬度、耐磨性和疲劳强度，提高零件的抗氧化性以及耐腐蚀性等，故需要对该类零件的表面进行化学热处理。一般是对零件表面进行渗碳、渗氮、氮碳共渗、碳氮共渗、镀铬等，这样完成化学热处理后零件的表面和心部具有不同的化学成分和组织，因此其变形与一般的热处理变形是有区别的。

零件的化学热处理分为两类：一是低温状态下元素进入渗层形成新相，但不会发生相变，如渗氮、氮碳共渗，因此零件的变形小；另一种为高温下奥氏体状态下元素的渗入，发生了相变，因此零件的变形增大，例如渗碳、碳氮共渗、镀铬等。

① 渗碳零件的变形 进行渗碳的材料为低碳钢或低碳合金钢，其基本的组织为索氏体或铁素体+少量珠光体组织，根据零件的化

学热处理要求，在完成渗碳后可进行直接淬火或其他的热处理。渗碳零件的变形规律和大小取决于渗碳钢的化学成分、渗碳层的深度，同时与零件的几何形状和尺寸，以及渗碳中制定的热处理工艺参数等有关。

渗碳零件的形状有细长件、平面件、立方体件等类型。根据热处理变形的一般规律，最大热处理内应力一般产生于最大长度方向上，而表面呈收缩趋势；对于截面尺寸相差悬殊、形状不对称的细长杆件或板件，则冷却快的一面呈凸面。

低碳钢和低碳合金钢的渗碳温度为 $920\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，表面的碳含量提高到 $0.6\%\sim 1.2\%$ ，表面形成了高碳的奥氏体组织。完成渗碳后零件自渗碳温度过冷到 A_{r1} 温度，形成的共析成分的渗碳层未发生相变，高碳的奥氏体降温后发生热收缩。零件的心部受到压缩应力的作用，渗碳层受拉应力的作用，即渗碳层受到拉应力。心部在自 $\gamma\rightarrow\alpha$ 转变时，相变应力的作用结果使零件的抗拉强度降低，导致零件的心部发生塑性变形。

渗碳零件的淬火温度为 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，自淬火温度快速过冷到 M_s 区间，奥氏体发生热收缩，而心部低碳的奥氏体转变为铁素体+珠光体、低碳贝氏体和低碳马氏体等，因此发生了体积膨胀，渗碳层与心部之间产生了较大的内应力。

钢中合金元素的增加和碳含量的提高，经过渗碳后进行淬火，提高了零件心部的硬度，主导应力方向有胀大趋势。图 3-36 表示

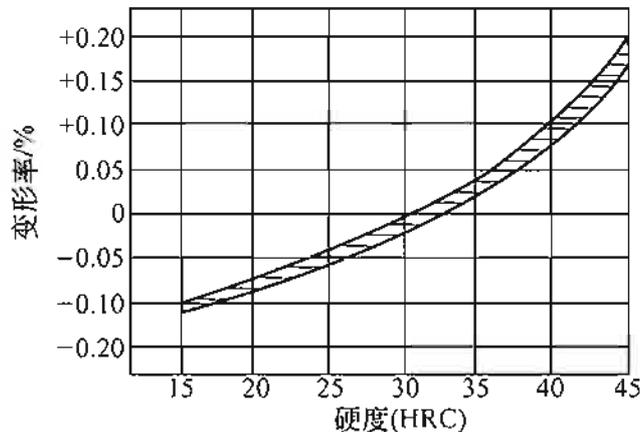


图 3-36 渗碳零件淬火后心部硬度和变形率的关系

渗碳零件淬火后心部硬度和变形率的对应关系，从图中可知心部硬度在 28~32 HRC 时渗碳零件淬火的变形最小。

如果提高渗碳件的淬火加热温度，选用冷却剧烈的淬火介质，则提高了渗碳件的淬透性，导致零件心部硬度的提高，但随之而来的问题是变形量明显增加。

渗碳零件变形过量的原因比较复杂，一方面是钢件表面与心部的化学成分、组织和性能的不一致造成内应力，另一方面为渗碳件的残余应力。资料 [57] 介绍，渗碳淬火后零件截面上热应力和组织应力综合作用的结果为：表面存在压应力，心部受到拉应力的作用。影响渗碳零件淬火变形的因素主要有以下几个方面：碳和合金元素的含量、表面渗碳层的形态、淬火的加热温度、淬火的冷却方式、截面的尺寸、回火加热温度等。下面将影响渗碳零件变形的主要原因和预防措施列于表 3-25。

表 3-25 影响渗碳零件变形的主要原因和预防措施

序号	影响因素	主要原因	预防措施及挽救方法
1	零件的结构	(1)壁厚不均匀 (2)几何形状不对称 (3)渗层不均 (4)不合理的尖角、棱角和凹槽等 (5)截面突变	(1)壁厚设计均匀 (2)几何形状简单、对称,可做成组合式结构 (3)渗层的分布均匀和合理,必要时可车削或磨削掉 (4)锐角和棱角倒钝,凹槽尽可能对称分布 (5)改变截面的设计,使其均匀改变
2	材料	(1)表面的含碳量高 (2)淬透性低 (3)化学成分不稳定 (4)存在 5 级以上的带状组织 (5)锻造流线不对称、不均匀 (6)晶粒粗大	(1)降低表面的含碳量 (2)钢中增加 Cr、Mo、Mn、Ni 等合金元素 (3)确保材料一定的淬透性 (4)采用锻造以及高温正火消除 (5)改变锻造工艺增加锻造比 (6)采用正火细化粗大晶粒

续表

序号	影响因素	主要原因	预防措施及挽救方法
3	预备热处理及切削加工	(1)加热不足或过热 (2)冷却不均 (3)切削用量大,刀痕深 (4)工艺孔位置不当或尺寸过大	(1)采用高温正火(950~970℃) (2)选择合适的淬火介质和方法,获得较为均匀的组织 (3)减少切削用量,提高表面的光洁度 (4)改变工艺孔的位置或缩小尺寸
4	渗碳过程	(1)工件放置不当:装炉、夹持、吊装、安装等不合理或不符合要求 (2)供气、控温、炉温、炉压、碳势不稳,温度太高,时间过长 (3)冷却速度选择不当	(1)吊装要保持平稳,重心要偏低;夹具有一定的刚度,预应力要均匀;装炉和出炉要平稳;温度符合技术要求 (2)选用合理的供气系统、控温系统等,以确保炉温、炉内压力以及碳势的稳定 (3)根据材料的淬透性选择不同的冷却介质和方法
5	淬火过程	(1)加热不均,细长杆或薄片零件的翘曲变形 (2)淬火温度过高 (3)淬火方法的影响:预冷直接淬火变形小,二次淬火变形大,双液、分级或等温淬火变形小 (4)淬火操作方法的影响 ①零件加热时支承和装夹不当 ②进入冷却介质时方向和夹持不当 (5)淬火介质对变形的影响	(1)选择合理的加热方法,工件的加热均匀,减少热应力影响 (2)根据材料和技术要求等,适当降低加热温度 (3)合理选择淬火介质和冷却方法,尽可能采用预冷直接淬火代替一次、二次淬火,采用双液、分级淬火等代替单液淬火 (4)正确使用工具和夹具 ①改进支承和装夹方法 ②改正淬火方式 ③采用压床或夹板 (5)适当提高淬火介质的温度(前提是确保淬透性),采用合理的热校直和冷校直方法
6	回火、冷处理、磨削和时效过程	(1)淬火后未及时回火 (2)冰冷处理易引起局部区域变形过量 (3)零件的磨削量过大,同时未及时进行时效处理 (4)零件的装炉方式不当	(1)淬火后立即回火 (2)尽量不采用冰冷处理,如果必须进行则应紧接着进行低温回火 (3)控制磨削量的大小,磨削后及时时效处理 (4)对细长杆件要垂直吊挂,薄片零件平稳放置,减少应力的作用

② 渗氮零件的变形 零件一般是在 500~570℃ 的温度范围内进行渗氮和氮碳共渗的，由于是在相变点以下进行元素的渗入，故其变形较小。常用于要求表面硬度高而变形要求严格的精密零件。大多用于提高零件表面硬度和抗疲劳性，在一定程度上改善了耐蚀性。该工艺作为零件加工的最后工序，除个别零件渗氮后需要研磨外，一般不再进行任何的机械加工。

一般氮碳共渗气门的工艺流程为：调质处理→进行机械加工→进行除应力退火→进行精加工→气门氮碳共渗。需要注意，渗氮温度提高后，渗氮层越深，表面硬度越低，造成变形量的增加；而渗氮温度降低与升高温度的情况相反。渗氮是没有发生相和组织应力的化学热处理，在相变点以下进行渗氮不会造成体积和形状的严重变形。

零件表面渗入氮原子后，零件表面体积膨胀，原因在于活性氮原子被钢的表面吸收和扩散，并溶解于金属基体中和合金元素形成氮化物。渗氮组织为索氏体（由较细的铁素体和渗碳体组成），当氮原子渗入表面层后，使基体的晶格增加，因此渗入的氮原子越多，则晶格常数越大，使表层胀大，此时表层受压应力作用，而心部存在拉应力，使轴类、杆类等零件在轴向产生伸长倾向，直径越细，屈服强度越低，则伸长量越大。资料 [46] 介绍，铁素体容易和氮原子结合，基体中含有铁素体的比例增大，则胀大变形量增加。影响内应力大小的因素有：零件的大小、渗氮钢的屈服强度、渗氮层的深度以及硬度等。渗氮炉内温度的均匀性会引起尺寸的变化与翘曲变形等形状的改变。

零件经气体渗氮或氮碳共渗后，硬化层和心部的组织差异引起残余应力，渗氮层受压应力而心部为拉应力，由于两种组织的比体积差大，故渗氮层部分压应力大。图 3-37 所示为各种直径的钢的圆柱渗氮一定深度时渗氮层和心部的平均应力，从图中可以看出直径越大则表面的压应力越大。

轴类零件经渗氮后外径胀大，长度伸长，但最大的变形量在 0.055mm 以下。对于套筒类零件，其变形情况取决于壁的

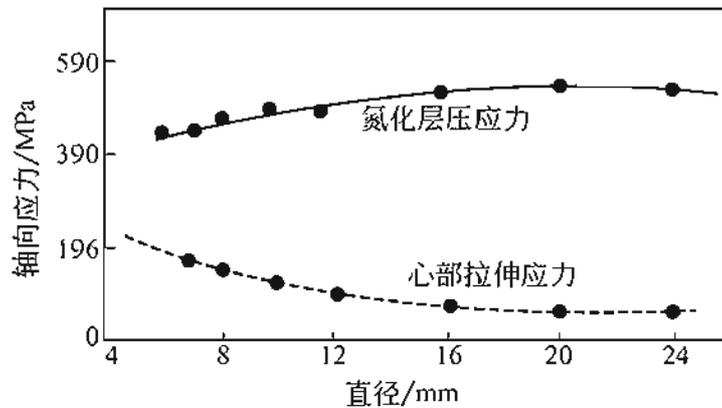


图 3-37 0.3% C、1.3% Cr、1.0% Al 氮化钢气体
渗氮到 0.65mm 时热应力与直径的关系

厚度，当壁薄时，外径和内径均膨胀，厚度增加则内孔有缩小的趋势。零件的弯曲和翘曲变形是渗氮过程中遇到的一些质量缺陷，内应力作用的大小取决于渗氮钢的屈服强度和渗氮层中的含氮量，加上渗氮前的残余应力，组成了引起工件形状变化的根源，另外炉内温度不均匀，零件在炉内分布和装炉方式不合理等将会造成弯曲和翘曲变形等。因此，在实际的零件渗氮处理过程中，要根据零件的技术要求制定热处理工艺规范，并严格执行避免零件之间的碰撞等，是零件进行热处理的重要环节。

3.4.3 零件热处理变形的规律

零件在热处理过程中，其发生热处理变形是热应力、组织应力和体积效应综合作用的结果。零件在热应力的作用下沿最大尺寸方向缩小，沿最小尺寸伸长；而组织应力引起的变形是零件沿最大尺寸方向伸长，最小方向收缩；体积效应引起的变形使零件在各个线度方向上均匀变化。

对轴类零件而言，其基本变形规律为：热应力引起的变形使零件的长度缩短，直径胀大，中间凸起；组织应力使长度伸长，直径缩小，中间凹进；体积效应使零件直径和长度同时增加或缩小。常用轴杆类零件的变形规律见表 3-26。

表 3-26 常用轴杆类零件的变形规律

材 质	材料牌号	热处理工艺	变形趋势		备 注
			直径	长度	
低碳钢	15,20	900~930℃ 渗碳,780~800℃ 水冷或水淬油冷	胀大	缩短	很小尺寸的轴杆件直径、长度均趋向增加
	20Cr,12CrNi3A	900~930℃ 渗碳,800~830℃ 油冷或硝盐	胀大	缩短	很小尺寸的轴杆件直径、长度均趋向增加
碳素结构钢	40,45,50	820~840℃ 水冷或水淬油冷	略缩	伸长	很小尺寸的轴杆件直径、长度均趋向增加;大尺寸轴杆直径趋向胀大、长度缩短
		820~840℃ 油冷或硝盐	略胀	略伸长	尺寸变化比水冷小,扭曲变形也小
合金结构钢	40Cr,40CrNi,40Mn2V,42CrMo	820~840℃ 水冷或水淬油冷	胀大	伸长	大尺寸轴杆件长度缩短,直径趋向胀大
		820~840℃ 硝盐冷却	略胀	略伸长	尺寸变化比水冷小,扭曲变形也小
碳素工具钢	T7,T8,T10,T12	780~800℃ 水冷或水淬油冷	胀大	略伸长	大尺寸轴杆件长度缩短,直径趋向胀大
		800~830℃ 碱浴冷却	略胀	略伸长	随着分级温度的提高,直径胀大量减小,扭曲变形也减小
		800~830℃ 硝盐冷却	略胀	略伸长或略缩短	随着分级温度的提高,直径胀大量减小,扭曲变形也减小
合金工具钢	Cr2,CrWMn,GCr15	820~850℃ 油冷	胀大	伸长	大尺寸轴杆零件长度趋向缩短,直径胀大
		820~850℃ 硝盐冷却	略胀	略伸长	随着分级温度的提高,直径胀大量减小,扭曲变形也减小

续表

材 质	材料牌号	热处理工艺	变形趋势		备 注
			直径	长度	
高速工 具钢	W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2	1260 ~ 1280℃ 油冷或硝盐冷却	胀大	伸长	回火后尺寸增大
		1260 ~ 1280℃ 多次分级等温	略胀	略伸长	回火后尺寸增大
高碳高 铬合金钢	Cr12, Cr12Mo, Cr12MoV	980 ~ 1000℃ 空冷	微量胀 或缩	微量伸长	变形量最小
		1000 ~ 1100℃ 油冷或硝盐冷却	微量胀 或缩	微量伸长 或缩短	回火后尺寸增大
		1050 ~ 1100℃ 油冷或硝盐冷却	略缩	略缩短	回火后尺寸增大
热作模 具钢	3Cr2W8V	1050 ~ 1130℃ 油冷或硝盐冷却	胀大	伸长	大尺寸轴杆零件 长度趋向缩短, 直径 胀大
		1050 ~ 1130℃ 多次分级等温	微量胀 或缩	微量伸长	尺寸变形量减小, 扭曲变形量减小, 回 火后尺寸增加
不锈 钢	1Cr18Ni9Ti	1050 ~ 1100℃ 水冷	胀大	缩短	大尺寸轴杆件变 形趋向为变形量 增加
	0Cr13, 1Cr13, 2Cr13	980 ~ 1050℃ 油冷	胀大	伸长	大尺寸轴杆件长 度的变形由伸长趋 向缩短
	3Cr13, 4Cr13	1000 ~ 1050℃ 油冷或硝盐冷却	略缩	略伸长	随淬火尺寸的增 大以及淬火温度的 降低, 尺寸胀缩

注：轴杆零件的直径小于 25mm。

套类零件的变形规律为：热应力引起的变形使内孔缩小，外径微胀或微缩，高度缩短；组织应力引起的变形与热应力相反；而体积引起的变形使内径、外径和高度同时增大或缩短，在发生马氏体

组织转变时比体积增大，造成零件的膨胀使内外径同时增加。为便于总结，现将部分套类零件的变形情况列于表 3-27。

表 3-27 常见套类零件的变形规律

材质	材料牌号	热处理工艺	变形趋势			备注
			内径	外径	高度	
低碳钢	15,20	900~930℃ 渗碳, 780~800℃ 水冷	缩小	微量胀或缩	缩短	对于尺寸很小或薄壁套环件内径、外径、高度趋向增加
	20Cr, 12CrNi3A	900~930℃ 渗碳, 800~830℃ 油冷或硝盐冷却	缩小	微量胀或缩	缩短	对于尺寸很小或薄壁套环件内径、外径、高度趋向增加
碳素结构钢	40,45,50	820~840℃ 水冷或水淬油冷	胀大	胀大	伸长	随着尺寸的增加,内径趋向缩小
		820~850℃ 碱浴或硝盐冷却	略胀	略胀或缩	略伸长	对尺寸较大零件的内径趋向缩小,其缩小量小于水冷,随着分级温度的降低,内径缩小的趋向增大
合金结构钢	40Cr, 40CrNi, 40Mn2V, 42CrMo	820~840℃ 油冷或水-油冷却	胀大	胀大	伸长	随着尺寸的增加,内径趋向缩小
		820~840℃ 硝盐冷却	略胀	略胀	略伸长	薄壁套环件内径、外径有缩小的趋向
碳素工具钢	T7,T8, T10,T12	780~800℃ 水冷或水-油冷却	胀大	胀大	略伸长	随着尺寸的增加,内径趋向缩小
		800~830℃ 碱浴冷却	略胀	略胀	略伸长	对尺寸较大零件的内径趋向缩小,其缩小量小于水冷,随着分级温度的降低内径缩小的趋向增大
		800~830℃ 硝盐冷却	略胀	略胀	略伸长	对尺寸较大零件的内径趋向缩小,其缩小量小于水冷,随着分级温度的降低,内径缩小的趋向增大

续表

材质	材料牌号	热处理工艺	变形趋势			备注
			内径	外径	高度	
合金 工具钢	Cr2, CrWMn, GCr15, 9SiCr	820 ~ 850℃ 油冷	胀大	略胀	略伸长	随着尺寸的增加,内 径趋向缩小
		820 ~ 850℃ 硝 盐冷却	略胀	略胀	略伸长	对尺寸较大零件的 内径趋向缩小,其缩小 量小于水冷,随着分级 温度的降低内径缩小 的趋向增大
高速钢	W18Cr4V	1260 ~ 1280℃ 油冷或硝盐冷却	胀大	胀大	伸长	回火后尺寸增大
		1260 ~ 1280℃ 多次分级等温	略胀	略胀	略伸长	尺寸的胀大量减小, 回火后尺寸增大
高碳 高铬 合金钢	Cr12, Cr12Mo, Cr12MoV	980 ~ 1000℃ 空冷	微量胀	微量胀	微量 伸长	变形量最小,大尺寸 零件内径有缩小的 趋势
		1000 ~ 1100℃ 油冷或硝盐冷却	微量 胀或缩	微量 胀或缩	微量胀 或缩	回火后尺寸增大
		1050 ~ 1100℃ 油冷或硝盐冷却	微量 缩小	微量 缩小	微量 缩小	回火后尺寸增大
热作 模具钢	3Cr2W8V	1050 ~ 1130℃ 油冷或硝盐冷却	胀大	胀大	伸长	随着尺寸的增加,内 径趋向缩小
		1050 ~ 1130℃, 多次分级等温 冷却	微量 胀或缩	微量 胀或缩	微量胀 或缩	变形量减小,回火后 尺寸有增加
不锈钢	1Cr18Ni9Ti	1050 ~ 1100℃, 水冷	缩小	略胀	缩短	随着尺寸的增加,内 径缩小量增大
	0Cr13, 1Cr13, 2Cr13	980 ~ 1050℃, 油冷	胀大	胀大	伸长	随着尺寸的增加,内 径趋向缩小
	3Cr13, 4Cr13	1000 ~ 1050℃, 油冷或硝盐冷却	略缩	略胀 或缩	略伸长	随着尺寸的增加和 淬火温度的降低,尺寸 胀缩量减小

注：1. 表中主要是适用于高度大于壁厚的套环件。

2. 变形趋势是指壁厚小于 25mm 的套环件。

3.4.4 减小变形的热处理工艺的选择

零件在最终热处理前的毛坯组织应为碳化物呈颗粒状并均匀分布，基体组织应为球状或细片状珠光体组织，零件进行预备热处理可消除或减少零件中的残余应力，改善切削加工性，改善组织，并为最后的热处理做好组织准备。因此毛坯退火后要获得要求的组织结构，才能满足零件的工作需要，事实表明索氏体组织的比体积比退火的大，淬火后比体积的变化最小。因此，选择合理的预备热处理工艺方法，对于减小零件的变形量是十分必要的控制手段。在零件的材料、外形设计和工艺加工路线确定后，一般是按以下程序进行零件的热处理，来控制 and 减小热处理过程中的变形。

① 对变形量要求严格的重要零件，在粗加工后和精加工前，应在 450~600℃ 进行去应力退火处理，以彻底消除机械加工应力和附加（外在）应力。

② 控制加热速度。加热速度应缓慢，做到加热均匀，尤其是大型锻模、高速钢以及高合金钢零件等，另外对形状复杂、厚度不均、变形要求严格的零件等，在加热时要预热或淬火时预冷（如空冷等），以减少热应力的作用，为防下垂应采取吊挂、支撑等方式。

③ 选择合理的加热温度。从提高零件的耐磨性和综合性能以及减小变形的目的出发，加热温度不宜过高，尽量选择下限温度加热，以获得需要的奥氏体晶粒度、确保成分的稳定，同时也可减少冷却时的热应力作用，另外也可以防止组织粗大而引起的其他缺陷。

④ 胀大量与零件的尺寸大小成正比，因此要留有一定的变形加工余量。

⑤ 正确选择冷却方法和冷却介质。对于低淬透性的材料制作的较大截面的零件，为方便淬硬，在要求尺寸精度的前提下应设法提高冷却速度，在 120~140℃ 的硝盐溶液中冷却。

⑥ 为防止出现贝氏体组织，考虑到硝盐的冷却速度不足，应先在冷却速度快的低温盐浴中冷却，再转入温度高的硝盐中等温。

⑦ 为防止回火后的胀大变形，对硬度在 52~60 HRC 的零件，应调整等温温度和时间，但禁止在 240~300℃ 回火。

⑧ 对精度要求较高的零件，尽可能采用贝氏体等温淬火或分级淬火，但时间不宜过长，等温结束后要缓慢冷却，如有尺寸收缩，可提高回火温度进行补救。

⑨ 为防止零件等温淬火后胀大，不能在低温下长时间停留，应立即进行回火处理。

⑩ 对于硬度在 60~64 HRC 的零件，应在 130~150℃ 硝盐中等温至少 40min，或等温后缓慢冷却。

⑪ 零件在热处理后进行粗磨，应控制好磨削工艺参数，防止出现磨削裂纹。

⑫ 进行零件的加压淬火 (press quench) 或模压淬火 (die quench)。

⑬ 对易翘曲部位，在反翘曲后进行淬火处理。

⑭ 对零件尺寸厚薄不均的部位捆绑加强筋或采取其他的措施。

⑮ 对壁厚不均匀位置要开工艺孔或做成可拆卸式，对棱角、键槽和孔等用石棉绳、黏土来填充。

⑯ 适当降低淬火加热温度或采用下限温度加热零件。

3.4.5 其他防止零件变形的办法

零件经过热处理后必然发生体积和形状的变化，因此在材料已经确定的前提下应做好以下工作。

① 对于有尖角、截面较厚、边缘有孔的零件，要采取必要的措施。如图 3-38 所示，用铁皮保护边缘孔，钻辅助工艺孔等，或进行必要的堵塞等，均具有良好的效果。

② 合理布置孔洞的位置。应力求均匀、对称，另外可适当增加或减少变形的工艺孔，这一点尤其适用于模具，从而减小工件的变形。

③ 采用封闭结构。作为有开口的零件，淬火时应力分布不均匀，尤其是开口处容易变形，应尽量使其封闭为佳，使冷热加工密

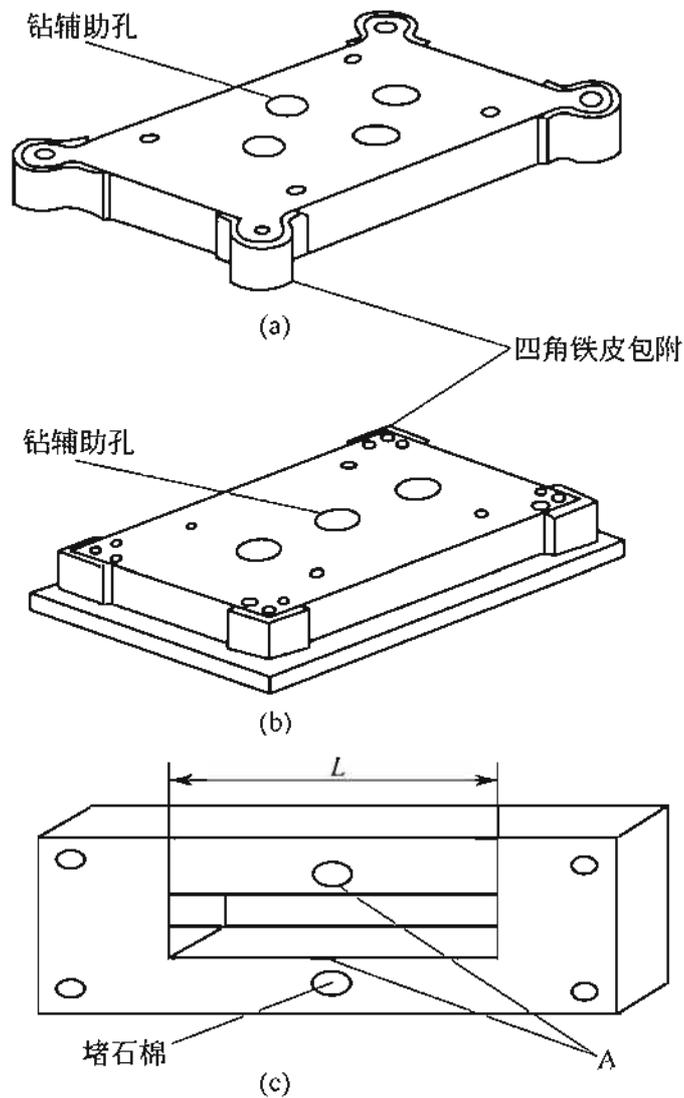


图 3-38 淬火前需采取的保护措施

切配合，例如常见的弹簧卡头如图 3-39 所示，在生产中加工后头部留有一定的加工余量，为了减小淬火时三瓣或四瓣爪的弯曲，淬火前口不铣通（卡头的一端连在一起），大大减小和缓解了淬火变形，待卡头淬火和回火结束，经过孔径的磨削，再用锯片砂轮把头部连接处剖开，保持了原来的尺寸，最后为减少磨削加工应力对变形的影响，在开口前进行消除磨削应力的低温回火。因此弹簧卡头往往先加工成封闭结构，待热处理后开口，则确保变形符合技术要求。这一措施解决了变形的难题，在实际的制造过程中具有重要的作用。

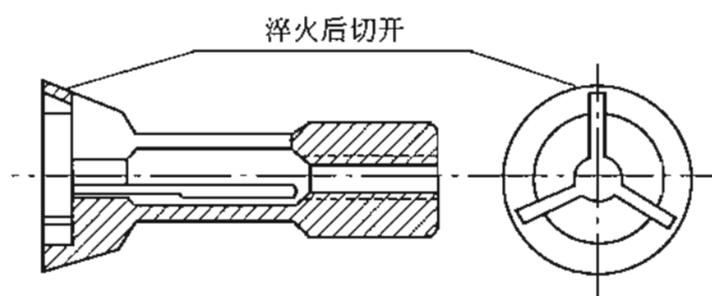


图 3-39 弹簧卡头的封闭热处理

3.4.6 工件热处理变形的校直方法

在零件热处理过程中，为了得到要求的马氏体或贝氏体组织，加热结束后的零件要进行快速冷却，因此必然要发生组织的转变，而变形是热应力和组织应力共同作用的结果，因此零件的热处理变形是无法避免的。如何将零件的变形量控制在合理的范围和防止开裂是热处理操作者需重点解决的首要问题。由于零件的材质不同、原始组织的差异、尺寸和形状也不尽相同等，基本原则为加热和冷却尽可能均匀，减少变形和减少应力作用，因此需从以下几个方面进行探讨和加以校直。

3.4.6.1 减少零件热处理变形的方法和步骤

当零件的机械加工工艺和流程、热处理的技术要求（如硬度、晶粒度、硬化层、表面的质量状态、化学热处理的具体指标以及力学性能等）、零件的具体尺寸和形状、截面的变化等均已确定的前提下，作为热处理工作者应当根据以上客观事实，通过选定热处理炉型，确定加热和冷却介质、淬火方式和方法具体要求，以及有无必要采取其他的保护措施来实现零件的热处理，确保其热处理质量合格，变形量完全符合要求。预防和控制零件的热处理变形，在零件的热处理过程中是十分重要的环节。而挽救和校直变形的零件，是确保零件变形符合要求的重要措施。实现零件的校直，要掌握零件热处理的内应力变形的规律，这对于校直和挽救变形零件意义重大。在实际工作中要有一套规定程序和方法，从而确定相应的热处理工艺参数。减小和控制零件热处理的变形一般有一些途径，例如

正确设计（包括选用材料、结构的设计、技术条件的制定），合理地安排冷热加工工艺，合理的锻造和确定预先热处理、最佳的热处理工艺参数，正确的操作等，下面分别介绍如下。

（1）合理选材和正确设计

① 根据零件的形状大小、技术要求和热处理条件选择材料，用低合金钢代替碳钢、合金钢代替渗碳钢、高合金钢代替低合金钢等，其共同特点为后者热处理后的变形量明显减小。

② 合理设计零件的结构和形状。形状不规则、结构复杂、截面差距大的零件热处理后产生较大的内应力，因此设计时使整个零件孔、工艺孔布局合理，避免截面变化太大，力求对称，尽可能做成组合结构。机械设计人员要与热处理工作者及时沟通，在确保零件满足设计要求的情况下尽可能地避免设计给热处理带来质量隐患。通过堵塞、捆绑和机械固定的方法，对易变形、形状和截面变化不一致，螺孔、键槽等容易明显出现变形或开裂的部位加以保护，采用石棉、耐火泥等把一些非工作或易变形孔、槽等堵塞，从而减少淬火应力以及变形等，对截面变化较大的位置要用石棉绳、铁丝或铁皮等加以捆绑，都具有显著效果。

合理布置零件上孔洞的位置，也是一个重要的方面。零件应力求均匀对称，孔洞的间距要大于壁厚，孔到边缘的距离应大于 $1.5d$ ，不应有过薄的截面，否则在此处产生变形甚至开裂；有时对厚薄不均的零件适当增加或减少影响变形的工艺孔，可起到减小变形的作用；尽可能地采用封闭结构，可避免出现应力不均匀的现象，例如弹簧卡头的头部在热处理后切开也正是考虑到这些因素。

③ 调整零件本身部分硬度要求，对易变形部位的硬度适当降低要求，必要时进行高频淬火、局部淬火等，合理选择淬火和回火方法。

④ 在能够满足硬度要求的前提下采用合金钢、选用不同的冷却方式有助于减小零件的热处理变形。表 3-28 为 Cr12MoV 钢在 800°C 预热后分别在 1020°C 和 1130°C 温度下加热，在不同冷却条件下的变形情况。

表 3-28 Cr12MoV 钢在不同淬火温度和冷却方式下的变形

淬火加热温度 /℃	冷却方式	淬火变形量/mm		长度变形率 /%	硬度 (HRC)
		长度	直径		
1020	水冷 2s 转入 560℃ 氯化盐中停留 3min, 再转入 260℃ 的硝酸盐中停留 15min, 空冷	+0.04~ +0.05	0	+0.04	64.5
	120℃ 的硝酸盐中停留 3min, 转油冷透	+0.10~ +0.13	-0.01	+0.10	64.5
	560℃ 氯化盐中停留 3min, 再转入 260℃ 的硝酸盐中停留 15min, 空冷	+0.06~ +0.08	+0.01	+0.07	63.5
1130	水冷 2s 转入 560℃ 氯化盐中停留 3min, 再转入 260℃ 的硝酸盐中停留 15min, 空冷	-0.68~ -0.66	-0.10~ -0.06	-0.60	44
	120℃ 的硝酸盐中停留 1min, 转油冷透	-0.53~ -0.51	-0.09	-0.45	42

(2) 合理编制零件的机械加工流程、热处理加热温度和加热速度

确保消除产生变形和开裂的因素, 编排合理的加工顺序, 必要时进行除应力退火处理。机械加工和冷成形对热处理影响很大。资料 [21] 介绍, 车削深度在 0.05~0.1mm 时, 此时的平均应力达到 300~600MPa, 同时应力分布不均匀, 只有在 400~600℃ 退火才能消除, 如进行了零件的校直, 为确保淬火后的变形符合要求, 必须进行除应力退火。对于长而薄的零件的磨削变形, 同样进行低温的退火处理, 一般温度比回火温度低 30~50℃。因此, 综上所述可知, 根据加工的具体情况来制定合理的热处理工艺, 对于制造出符合技术要求的零件十分重要。选择各道加工之间的加工配合和具体的加工方法, 制定热处理工艺流程和相关的工艺参数, 对于减小和防止零件在机械加工和热加工过程中出现变形具有重要的作用。事实证明, 二者之间工序的合理安排对于热处理后的变形, 尤其是零件的化学热处理的变形十分必要, 例如主轴类、气门、丝杠、复杂

模具等硬氮化和软氮化，在粗加工和精加工之间必须对其进行去应力退火处理，否则将造成随后的化学热处理过程中零件的严重变形，甚至造成报废。

对于易变形零件而言，还应考虑到预先留有合适的加工余量，其目的是防止因变形、氧化、脱碳或其他因素造成的缺陷，在机械加工中加以去除，例如调质处理零件、渗碳零件、淬火零件等。按照零件在热处理过程中的规律，适当调整零件各部分的加工余量。最后考虑采用特殊的加工方法，来满足零件热处理后变形小的需要。

另外对部分零件需进行锻造和预先热处理等，目的是改善组织、减少残余应力（机械加工应力、热应力）、减少淬火过程中的变形和开裂。合理的锻造是从零件成形、改变组织状态和提高零件的性能等几个方面进行考虑，因此合理的锻造比和锻造方法、合理的加热温度和锻造温度、锻后的冷却方式等都会对零件的变形产生重要的影响。如因内部存在极大的残余应力、晶粒度粗大、冷却不当等，将会加大零件的内应力，造成其变形，甚至开裂。

① 选择适宜的加热温度和加热速度。事实表明，零件的预热是减小变形的一个重要的措施，加热温度越高，零件的淬透性越好，造成淬火后残余奥氏体增多，热应力增大，因此零件产生淬火变形和开裂的倾向越大。因此，对于细长零件，在达到淬火硬度的前提下，淬火加热温度越低越好。要求变形的形状复杂、薄壁悬殊大、导热性差的零件，要缓慢和均匀加热，即升温速度要慢，尽可能选择工艺的下限加热温度，根据零件的技术要求对其进行正确地摆放和吊扎，防止因自重、叠压而变形，必要时采用专用夹具处理。另外，对零件进行预备热处理来改善原始组织，低、中碳钢进行退火或正火处理，使原始组织细化；高碳钢进行球化退火，获得均匀的珠光体组织。对于形状复杂、精密的机械零件，在机加工后进行去应力退火等，均对防止零件变形有良好的作用。

淬火温度选定的基本原则是：尽可能地选用合理的工艺方法，确定适宜的淬火加热温度；对于少量的变形，用相应的工艺方法调

整变形至规定的技术要求。减少加热过程中零件的内外温差和内应力，必须缓慢加热或采用预热，另外应根据季节、有无冷处理设备、带状碳化物分布方向性是否明显、尺寸和精度、冷却方式、硬度要求等确定合理的淬火温度，这对于控制零件的变形至关重要。

② 确定合理的淬火温度和保温时间。在生产中应根据材料、尺寸和形状、加热设备和装炉方式等，多因素考虑加热温度和保温时间。要求以奥氏体转变完成为原则，其晶粒度不宜粗大。不同的热处理设备的保温时间是不相同的，根据要求可调节温度的高低。另外根据零件的变形趋势选择合理的加热方法，如采用间断加热、静止加热、吊挂加热、旋转加热、合理放置等方法，减少零件加热的不均匀性。

由于不同材料的奥氏体化温度存在差异，因此其淬火加热温度一般具有以下规律：亚共析钢的加热温度为 $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，共析钢和过共析钢的加热温度为 $A_{c1} + 40 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。关于加热温度和加热时间确定的基本依据为：保证零件内外截面的温度均达到淬火加热温度；完成奥氏体的相变过程；确保奥氏体成分的均匀化；晶粒不会长大等。

零件的材质决定了其加热时间的长短。加热时间从长到短的顺序为：高速钢和高合金钢 $>$ 低合金工具钢 $>$ 高碳钢 $>$ 低碳钢等。其原因在于碳和合金元素降低了材料的热导率，而合金元素又使钢的组织转变快，另外加上合金碳化物比较稳定，其扩散系数比碳和铁的小，在钢中减慢了碳的扩散，因此保温时间要适当地延长。零件的尺寸和形状对加热时间也有一定的影响，同样装炉方式和装炉量的大小也是不可忽视的因素。不同材料在盐浴炉中的加热时间见表 3-29。

加热时间过长或温度过高，产生的危害是很大的：晶粒粗化、加热和冷却过程中零件的变形和开裂的倾向增大、零件的加热不均匀、组织和性能达不到技术要求等。因此零件在热处理过程中应综合考虑到加热设备、热处理炉的加热介质、材料成分、截面尺寸的形状、装炉方法、硬度和性能以及零件在热处理中的装炉量和彼此

表 3-29 不同钢种在盐浴炉中的加热时间

钢 种	加 热 时 间
碳素结构钢	$D\text{mm} \times 1\text{min} / 2.5\text{mm}$
碳素工具钢、低合金结构钢、渗碳钢	$D\text{mm} \times 1\text{min} / 2\text{mm}$
高合金结构钢、合金工具钢	$D\text{mm} \times 1\text{min} / 1\text{mm}$
高合金钢、高速钢	500~600℃ 一次预热： $D\text{mm} \times 1\text{min} / 1.5\text{mm}$ 750~850℃ 二次预热： $D\text{mm} \times 1\text{min} / 3\text{mm}$ 1100~1300℃ 加热： $D\text{mm} \times 1\text{min} / 5\text{mm}$

注：表中 D 为零件的直径或有效尺寸，对高速钢而言其加热时间最低不应少于 1.5min。

之间的距离等，经过反复的工艺试验和生产实践验证，通过对硬度、变形量、力学性能、金相组织以及其他的手段的检测，必要时使用正交法来确定最佳的加热温度和时间。这是一个复杂的工艺制定过程，要进行细致的分析和实践，只有这样制定的热处理工艺才能真正指导零件的热处理，同时也便于发现和避免出现质量缺陷，生产出质优价廉的零件，实现热处理后零件高的使用寿命的目的。

③ 确定合理的加热速度。减少零件在加热过程中内外温差和内应力，必须采取缓慢加热或采取预热等措施，对于形状复杂的高合金钢零件更是如此。一般盐浴炉的加热速度高于箱式电阻炉和其他热处理设备，预热的作用受热均匀，缩短零件在淬火温度下的加热时间，或减少在高温下变形的倾向和其他缺陷的产生。一次预热温度在 500~650℃ 范围内以及 A_{c1} 附近，该范围为钢铁材料由弹性状态转变为塑性状态的过渡温度区域，如加热速度过快，零件内外温度的不均匀性温差加大，将在某一部位产生塑性变形，而一部分尚未弹性变形，从而产生扭曲变形，因此 A_{c1} 附近要缓慢加热。对某些零件而言，进行快速加热，具有防止表面的热量不会向内部扩散的效果，对于小型工模具、齿轮等则可起到减小零件变形的效果。

(3) 选择合理的冷却方法

冷却过程是零件最易产生变形和开裂的重要环节，因此确定冷

却介质和冷却方式至关重要。冷却时发生复杂的组织转变，产生显著的体积变化、热应力和组织应力的变形，改进现有的操作冷却方法才能保证零件的变形量最小，达到理想的要求。

① 选用冷却介质。对导热性差、淬透性好的零件，选用较为缓和的冷却介质。油冷用于精度不高的零件，一般在冷至 300~400℃ 出油空冷；采用热油淬火，在 150~200℃ 停留一定时间，可减少零件的变形和开裂；可在 300~350℃ 硝酸盐溶液中进行一次分级淬火；在 540~600℃ 和 250~300℃ 分解进行分级淬火（一般为不对称）。因此选择合理的冷却介质可有效减少与控制淬火畸变等质量缺陷。

② 合理的淬火方法。双液、分级、等温等淬火方式均具有减小变形和开裂的作用，它是十分关键的工艺，必须引起高度重视，并在实际热处理过程中正确掌握和运用。选择正确的淬火方式见图 1-11。分级淬火适用于小直径和厚度的零件，对形状复杂、容易发生畸变的高合金工具钢的分级时间应根据零件的尺寸、分级槽的体积等来选择，一般的停留时间为 3~20min。贝氏体等温淬火可在保证较高硬度的前提下保持高的韧性，多用于高合金工具钢制作的模具的热处理，一般温度为 $M_s \sim M_s + 30^\circ\text{C}$ 。几种常用材料的等温温度见表 3-30。

表 3-30 几种常用材料的等温温度和时间

材料牌号	等温温度/℃	材料牌号	等温温度/℃
65	280~350	GCr15	210~230
65Mn	270~350	9CrSi	260~280
30CrMnSi	320~400	W18Cr4V	260~280
55Si2	330~360	Cr12MoV	260~280
60Si2Mn	270~340	3Cr2W8V	260~280
T12	210~220		

另外，选择静止冷却、调整零件在介质中的位置等，同样能起到良好的效果，个别特殊的零件采用工夹具或淬火装置也能减小零件的变形。如零件的硬度要求不同，采取局部淬火，也可减小淬火变形。必要时也可采取下列方法，对于减小零件的变形会有好的效果：空冷；

压板（加压）淬火；限形淬火；预加变形和专用机床淬火等冷却措施。资料 [47] 介绍，碱浴分级淬火冷却时间和内部含水量的大小对碳素工具钢模具变形和硬度有一定的影响，见表 3-31，一般分级时间按 3~10mm 停留 1min 计算，也可按加热时间的 1/3~1/2 计算。

表 3-31 碱浴分级淬火冷却时间、内部含水量等
对碳素工具钢模具变形和硬度的影响

影响因素	对模具变形和硬度的作用
碱浴温度过高	型腔趋向胀大, 淬火后易出现软点
碱浴温度过低	热应力增大, 对减小变形不利, 型腔趋于收缩
冷却时间过长	型腔趋向胀大, 容易引起奥氏体的稳定化, 对硬度稍有影响
冷却时间过短	热应力较大, 减小变形不显著, 型腔趋向收缩, 并影响淬火硬度
内部含水量过多	对减小变形不利, 型腔趋向收缩
内部含水量过少	型腔胀大, 淬火后容易造成硬度不够

对于空心套管，为防止其内径变形，应当对内孔进行喷水冷却，这样可以减小内径的变形；对细长和厚度薄的片状零件，应静止加热和冷却，淬火介质是静止的，操作时要避免失误，否则引起零件与别的物体的碰撞等将造成其明显的变形，同时减少在冷却介质中的左右晃动。

③ 提高零件内部残余奥氏体的含量，可以减小零件的变形。一般更合理的方法是采用不完全等温淬火，对用于过冷奥氏体稳定性较高的合金钢可有效减小零件尺寸的增大和翘曲变形等，通常用于高速钢制造的钻头、刀具等，事实证明效果十分明显。

④ 空冷淬火多用于淬透性高的热稳定性钢，淬火温度较低时，由于温度的梯度较小，产生的热应力和相变应力小，故变形明显减小。该类零件多见高速钢制造的零件，因此高速钢又称“风钢”。

⑤ 形成贝氏体和残余奥氏体组织的等温淬火。多用于冷成形模具和硬度在 52~56 HRC 而有塑性变形的钳工工具，由于组织中没有马氏体组织，因此变形比常规回火至加热温度时产生的变形要小得多。

⑥ 在临界温度范围内淬火。零件在冷却到临界温度时进行淬

火，用于所有的工具钢零件，具有减小线形尺寸的作用。资料 [21] 介绍，高合金钢减小 50%~70%，中合金钢和碳钢减小 75%~80%。另外可控制变形的各向异性，减少翘曲变形，同时也是唯一使内孔缩小的方法。应当注意热处理设备对零件的加热变形有重要影响，电炉和盐浴炉等对减小零件的变形效果十分显著，而反射炉、燃气炉等欠佳。

(4) 制定合理的回火工艺

根据零件的技术要求及时回火，消除组织应力，稳定组织和性能。有的零件（如模具钢、高速钢等）不能冷却到室温，零件表面到 150~200℃ 时立即回火，如果在室温下长时间停留将增大变形倾向或开裂，因此模具钢的热处理回火采用该方法。

在回火过程中控制加热速度，保持零件内外加热的均匀性，是确保零件减小变形的重要举措。对于出现回火脆性的零件要按要求采取必要的措施，禁止在该温度范围内回火或进行快冷，避免出现回火脆性。

调整加热温度，利用改变淬火和回火加热温度来控制残余奥氏体的数量，也可以实现对零件变形的控制。多用于硬度在 58~60 HRC 的模具钢，其材料为高铬合金钢，加热温度提高 15~20℃，淬火后残余奥氏体含量增加，从而减小了变形。同样提高回火温度也可达到控制变形的目的。

在零件的回火过程中进行校直，其机理为利用动塑性效应。在回火时部分马氏体分解和残余奥氏体相变而引起塑性的产生，通过施加外力的作用可使变形得到有效的控制，拉刀、片状零件、细长轴等通常采用回火校直的工艺方法。

需要注意，细长零件在回火过程中容易产生弯曲变形，因此零件要垂直吊挂加热，零件间相互有一定的间隙，尽可能地降低零件重心。如果能在硝盐溶液、油浴等冷却介质中加热回火，则可确保加热的均匀一致性，其零件的变形和性能可得到理想的结果。

(5) 热处理操作对零件变形的影响

在零件的热处理过程中，操作者是重要的执行者，热处理工艺

参数符合技术要求，但如果操作不当，即使零件本身的设计合理，不产生变形或开裂的质量效应，同样会在加热和冷却过程中出现不均匀的变形，增加内应力或造成大的附加应力等，引起零件的变形。

具体的不当操作或因素归纳如下。

① 零件的自身重量引起的热处理变形。多半是零件在炉内搁置或捆扎方式错误造成的，在加热过程中因自重产生扭曲变形，在箱式炉中更要注意此点。零件在盐浴炉和井式炉中加热时应考虑合理吊扎，防止新的附加应力的出现。根据不同零件的形状、重量以及重心的差异合理确定吊扎是至关重要的，其原则为使零件的重量能均匀分布在吊扎的铁丝上，具体见图 3-40。

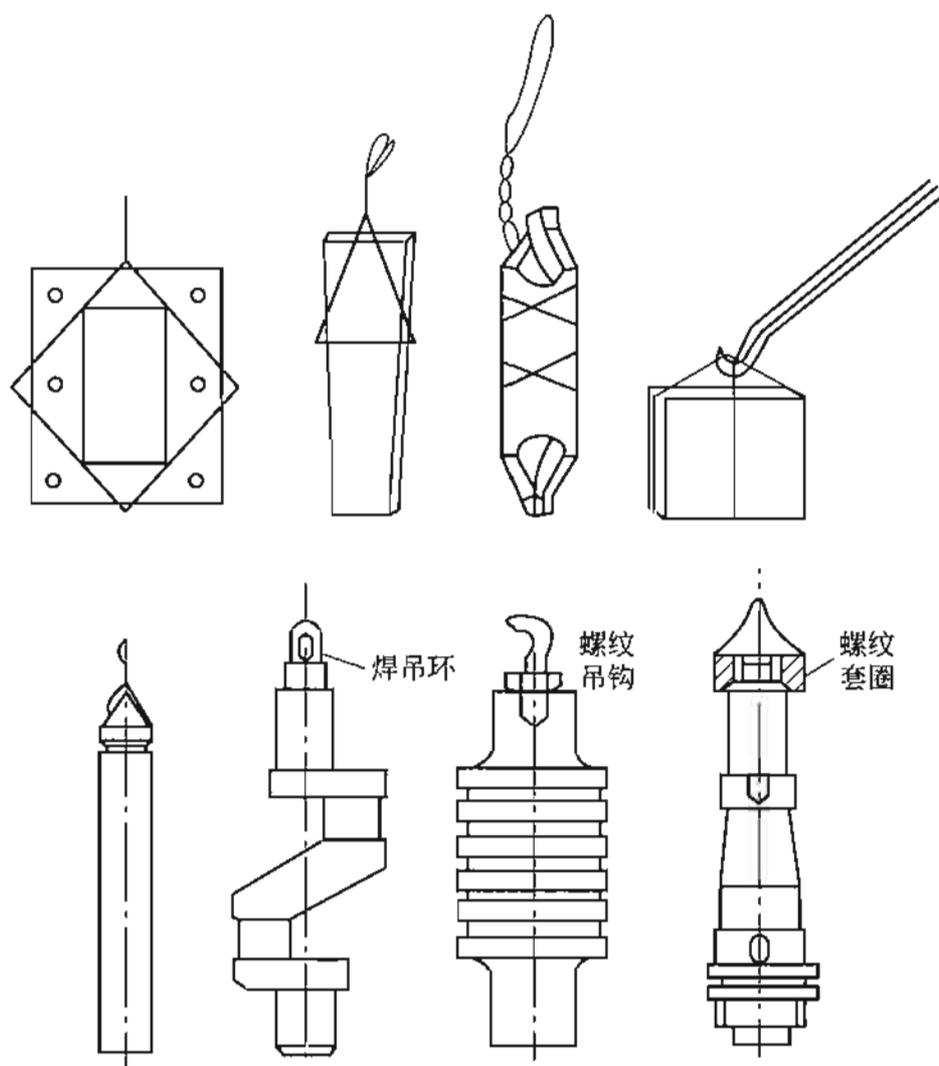


图 3-40 零件的吊扎（或吊挂）方式

② 加热不均匀引起的变形。同零件在炉内受热的不均匀有关，一般在箱式炉中炉口和炉底与电炉丝、喷嘴口处的温度存在差异，盐浴炉靠近电极和上部则温度比其他区域的要高，造成零件的加热不均匀。因此应将零件放在有效的加热区内，同时装炉量、装炉方式、堆放方式等应确保加热、冷却的均匀一致，要检查工夹具是否完好，且不能有大的变形和热处理质量缺陷。

③ 冷却不均匀引起的变形。零件的冷却速度大，会产生很大的热应力作用，此时组织发生马氏体转变，同时发生体积膨胀和组织应力增加，如冷却不均匀势必造成极大的变形，同时应当使零件之间存在一定的距离，尽可能避免贴和，因此在实际热处理过程中必须注意均匀的冷却是确保零件变形小的重要举措。

零件合理的入水方式对于控制零件的变形有重要的影响。为减小零件冷却过程中的变形，零件的淬冷方式应根据零件的形状参照图 3-41 进行，应从以下几个方面进行具体操作。

a. 对于圆柱形、圆筒形以及长方形等细长零件，应使轴向垂直淬入冷却介质。

b. 对于套形、环形等零件，如内孔的尺寸要求严格则要轴向垂直淬入冷却介质，如壁薄而内孔无要求则径向淬入。

c. 对于截面尺寸悬殊较大的零件，截面厚的部位首先冷却，薄的部位最后冷却处理。

d. 对有闭腔的零件，为避免型腔冷却过程中因蒸汽聚集形成蒸汽膜，影响内部的硬度，要使闭腔口向上淬火。

e. 对单边槽形零件，应使其槽口向上，倾斜成 45° 淬入冷却介质。

f. 对于薄形、扁形或板形零件，容易产生变形，要侧向进入冷却介质。

g. 如果零件在工夹具或淬火装置中冷却，其前提是确保零件表面均匀冷却，避免零件的堆积和彼此的紧密接触，造成硬度的不均，带来零件的淬火质量不合格。

另外，根据零件的形状和变形的趋势，要选择合理的冷却方

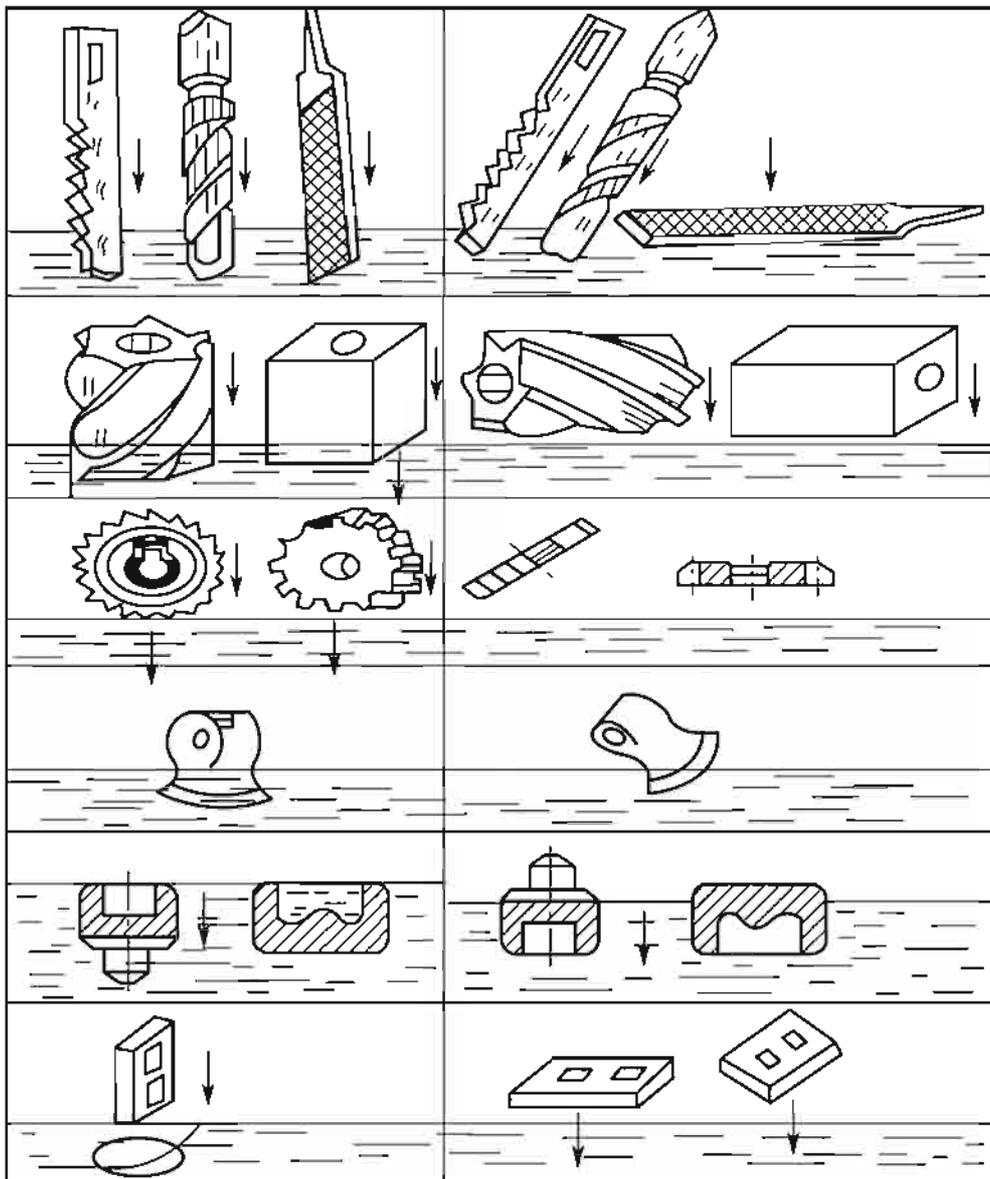


图 3-41 工件淬火浸入方法示例

式。静止冷却用于薄壁或细长零件的淬火，可避免零件运动产生附加应力，减小了变形；而调整淬入冷却介质的方式，使冷却的条件发生变化，可以明显改善零件的变形；改变零件在冷却槽内的位置，对于某些截面不均的零件，在冷却时使冷却速度大的部位贴近冷却槽壁，可以减小该部位的冷却速度，使整体的变形量减小。

采用工夹具或淬火装置等也可起到减小零件变形的作用，通过改变零件各部位的冷却速度（或冷却条件）或进行机械的强制校直，起到减小冷却过程中变形的作用。一是使用合适的淬火夹具，

二是采用专用工装，三是特定的淬火装置等均可起到控制零件变形的作用。

④ 其他操作不良也会引起零件的变形。这同操作过程中违反工艺规定有关。例如零件在出炉过程中零件彼此相互挤撞；出炉时零件与炉膛、炉体或其他硬物碰击；细长轴、薄片等淬火时出现上下或左右不良晃动；双液淬火或分级淬火在第一介质中停留时间长；淬火介质流动性过强，对零件产生了冲击；淬火介质中混有其他杂质（如油中含有水、水中有油或皂化液、硝盐溶液中有过多的盐渣等）。

⑤ 根据零件的形状和变形趋势选择合理的加热方法。对不同形状、尺寸和材质的零件进行加热时，要尽可能地采取必要的措施来减小加热过程中的变形，同时也有利于提高产品质量和生产效率等。通常对截面悬殊的零件，为防止截面薄处过热，在加热过程中应将零件从炉内提出，稍微空冷后再进行加热，目的是使零件的内外温度一致，避免受热不均现象的发生，此种称为间断加热法；对于薄片、细长零件，在盐浴炉的盐浴中翻滚将造成零件发生扭曲变形，因此提高加热温度 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 后，断电后将零件放入进行静止加热，减小加热时的扭曲变形，完成奥氏体成分的均匀化，为淬火做好组织准备；对于某些细长零件，为减小加热时的扭曲变形，在零件的底部或下部吊挂重锤或重物来防止变形，也称重锤加热；对齿轮等环状零件，为确保各部位的加热均匀性，进行快速旋转加热，通常对齿轮等进行齿部加热后，整体冷却，因此减小了变形，类似于高频淬火加热。调整零件在盐浴炉内加热位置，可避免形状不对称的零件的变形倾向等。

对于零件热处理后的变形，如果能够采取合理的校直工艺和措施，将变形量控制在要求的范围内，则尽可能地不考虑由机械加工来修正，不到万不得已是不使用的，这一点应当引起零件设计者和热处理工作者的足够重视。

(6) 采用特殊的热处理工艺

通过采用非常规的热处理工艺，克服零件内外组织转变不同时

性，减小热应力和组织应力，效果比较明显。在热处理过程中，下列方法发挥了重要作用，同时也节约了大量的能源，值得提倡和推广。

① 表面淬火（感应加热、火焰加热、电解加热淬火等），例如螺杆、丝杠、主轴等细长形零件采用表面淬火后既可保证表面有足够的硬度、高的耐磨性和疲劳强度，同时内部具有良好的强度和韧性，零件的整体变形小。

② 形变热处理。

③ 可控气氛和真空热处理。

④ 化学热处理。对零件进行渗氮、软氮化等，则内外组织中的化学成分存在差异，同时其温度在相变点以下，因此避免了整体淬火后变形明显增加的可能，是适用于变形要求严格的零件的热处理工艺方法。

⑤ 超声波淬火。利用超声波能量使淬火介质产生振动，可消除淬火零件表面的蒸汽膜，使冷却速度提高，使淬火剧烈程度增加，冷却更加均匀，可避免零件表面产生软点、软带，内应力和变形则明显减小。

⑥ 快速加热。是指采用提高加热的温度，使零件的表面迅速达到淬火温度，随后完成淬火的热处理工艺，例如齿轮在盐浴炉中转动加热齿部或进行高频加热等。由于加热时间短，表面的奥氏体晶粒没有长大，淬火后表面的热量无法传递到内部，因此仅仅是表面发生了组织的转变，变形明显减小。

3.4.6.2 变形零件的校直

在零件的热处理过程中，尽管采取各种方法来控制零件的淬火变形，但出现变形是不能完全避免的，尤其是一些细长、薄片状或形状特殊的零件，即使在各道工序中均采取了一定的措施和控制方法，但最终还是不可避免要产生一定程度的变形，而采用机械加工又难以控制，必须采用校直的方法来挽救和弥补零件形状和尺寸的变化，因此零件的校直工作也是热处理过程中的一道重要工序，对于控制和解决变形有重要的作用和意义。

零件的校直分为热处理前和热处理后两种类型。热处理前零件的变形一般是原材料本身或机械加工过程中产生了变形，这种变形比较容易校直，这里不再叙述。下面仅对零件热处理后变形的校直进行重点介绍。

零件在热处理过程中，通常的变形有弯曲、凸凹、畸变等，为确保后续机械加工的正常进行，必须对不符合技术要求的变形零件进行合理的校直，因此只有对超过变形要求的零件进行校直来实现零件产品质量的过程控制，才能为后续的机械加工奠定基础。校直方式在热处理过程中根据零件的具体变形情况而定，有时可以采用几种方法并用，以此达到校直的目的。一般的校直方法有机械校直和热处理校直，应根据零件具体的变形特征和状态合理选择校直的方法。机械校直是指利用外力机械或局部加热的方法使变形后的零件产生局部的微量塑性变形，同时残余内应力释放后充分分布，达到校直的目的。由于采用了外力的作用，即强制零件发生变形，为防止零件因残余应力的作用可能有部分的恢复和产生新的变形，因此必须进行去应力退火或低温回火处理，有喷丸、反击、正击和冷压等。而热处理方法是利用热应力实现校直，即热点校直、磨削校直等，利用相变进行压力回火、二次回火硬化、残余奥氏体的马氏体化、冷处理以及模压淬火、模压回火，模压冷处理等。

校直在零件淬火后立即进行，考虑到零件变形的各种趋势和特点，要求热处理操作者技术熟练，了解变形和校直的规律，才能确保零件一次校直的合格率提高，另外需要注意的是产品校直后的磨削量应小于变形量的 $1/2$ 。在热处理生产中有许多用物理机械法可以校直宏观的局部变形，几种重要的方法如下。

① 轴类零件、板类零件的冷压校直。

② 淬火冷却后趁热热压校直。

③ 贝氏体等温淬火后高塑性状态下的趁热校直和冷压校直，以及在回火过程中加压校直。

④ 利用相变超塑性条件的静压固定校直。

⑤ 淬火和回火过程合并后进行淬火压力机床的校直。

- ⑥ 氧-乙炔焰局部加热校直。
- ⑦ 高频局部加热校直。
- ⑧ 尖角锤锤击高硬度零件凹面的冷击校直。
- ⑨ 特定条件下对高硬度的零件表面进行喷砂、喷丸校直。
- ⑩ 电焊焊接应力校直变形和外凸变形的电焊校直。

采用机械化自动生产进行机械校直是十分重要的途径和方法。

(1) 对零件外圆、平面的校直

① 冷压校直法 零件热处理后，由于内应力的作用产生了扭曲变形，应对零件的凸出面最高点施加外力作用，使原伸长部分受到压应力，短边受到拉应力，使凸面在压应力的作用下产生塑性压缩，使凹面在拉应力作用下产生塑性伸长，外力去除后其塑性变形保持不变，达到对变形零件校直的目的。

该方法适用于中碳钢及合金结构钢的退火件、调质件或淬火回火后硬度低于 40 HRC 的零件的校直，多为有色金属棒或板材制件、圆柱形和薄片型零件，同样适用于表面硬而心部软的渗碳件或高频淬火件。使用的校直工具有油压机、螺旋压力机、锤头等，压力的大小应根据零件的大小、形状和弯曲量而定。对钻头的校直在通过借校钻头柄部来达到刃部的校直，而小尺寸的轴、杆类零件用手锤校直。对变形为 S 弯的零件应分段校直，施压过程应当缓慢进行，防止零件的断裂等，具体的冷压校直方法见图 3-42。另外正击校直，也能用于硬度在 40 HRC 左右的零件，一般用铜锤敲击零件的凸起部分。

② 热点校直（加热校正） 利用氧-乙炔对零件的局部凸起部位加热一点或数点到 600~700℃，然后用水或其他冷却介质快冷，使受热点在冷却过程中通过热胀冷缩产生热应力，使零件变形，以符合要求。热点校直应用十分广泛，多用于硬度在 40 HRC 以上零件的校直，诸如含碳量在 0.35%~1.3% 的碳钢、低碳钢和低合金钢的渗碳件，用于圆柱形、板状零件和圆筒形零件，如轴类、管类、圆形零件、刀片等零件的校直。事实表明，零件的硬度越高，则校直的效果越好。

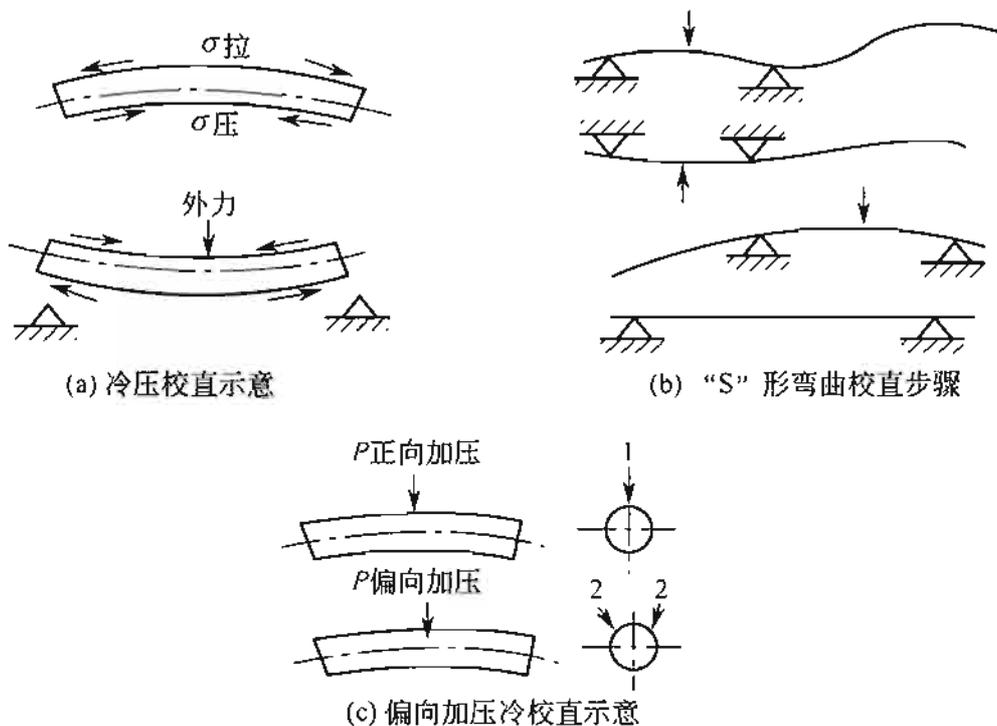


图 3-42 冷压校直法

该方法是在回火后进行的，根据零件的材料性能和技术要求，

禁止对同一部位进行二次加热，

一般加热区域在 10~15mm。在

实际生产中，热点校直和冷压校

直相配合使用效果更好。采用加

热校直，其原理为利用局部的热

塑性进行加压，达到校直的目的，

例如钻头、丝锥、铰刀、卡规、

搓丝板等采用该类方法效果不错。

具体校直见图 3-43。

该方法是在回火后进行的，根据零件的材料性能和技术要求，禁止对同一部位进行二次加热，一般加热区域在 10~15mm。在实际生产中，热点校直和冷压校直相配合使用效果更好。采用加热校直，其原理为利用局部的热塑性进行加压，达到校直的目的，例如钻头、丝锥、铰刀、卡规、搓丝板等采用该类方法效果不错。具体校直见图 3-43。

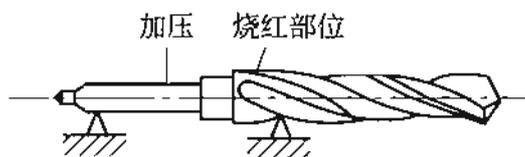


图 3-43 热点校直法

③ 锤击校直法（反击校直法） 使用高硬度的锤头对零件的凹面进行敲击，使表面产生压应力的作用，使锤击的小块面积上产生塑性变形，敲击的凹面向两端扩展并延伸，达到校直的目的。

锤击校直主要用于硬度在 50 HRC 以上扁平零件或变形小、细长的圆柱件或片状板件，此法的原理为连续锤击零件凹处的各个小面积，使该处部位产生塑性变形，底面垫板受力后对凸面的反作用力使该处拉应力松弛，加上锤击的小块面积产生塑性变形，使锤击表面向两端延伸。

其操作要点为先从最低点锤击向两头对称延伸，不能集中某一部位，锤击方向与零件变形方向垂直，有规律地逐渐向两端延伸。多用于高速工具钢或高合金钢的校直。为防止出现零件的应力过大，锤击要在回火后进行，锤击后消除应力回火温度为 150~180℃，保温 3h，消除零件的内应力，确保后续加工和使用过程中不产生变形。使用的锤头要采用高速钢、高碳钢或弹簧钢制造，硬度在 60~65 HRC 为宜，垫板硬度为 40~50 HRC。图 3-44 为反击校直法示意。

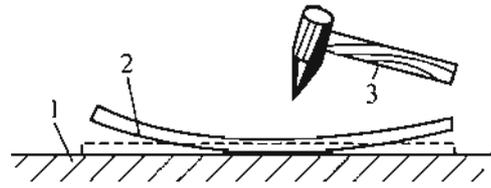


图 3-44 反击校直法
1—平台；2—钢件；3—手锤

对部分回火抗力高的刀具而言，加热到 300~450℃ 进行“热反击校直”，在热状态下产生较好的塑性变形，例如刨刀、卡规、高速钢铣刀薄片等，通过热态冷击可达到校直的目的。另外对硬度较低的零件也可采用正击法进行校直，锤击零件的凸面部分即可达到校直的要求。

④ 淬火校直 淬火校直的原理是，在零件淬火冷却过程中，当零件的温度冷到 M_s 点附近时，奥氏体尚未开始或正在进行马氏体转变时，由于塑性良好的奥氏体的存在以及相变时的高塑性，此时零件具有较好的塑性，组织中保留大量的残余奥氏体，由于奥氏体的塑性好，因此保留大量的奥氏体利于校直，此时具有一定的温度。此方法适用于所有淬火零件的校直，校直效果佳。淬火相变的超塑性效应发生于奥氏体向马氏体的冷却过程中，奥氏体的塑性为校直提供了便利条件。

该方法用于易变形且硬度较高、难以校直的零件，一般在冷却、分级淬火或等温淬火冷却过程中进行校直。对于某些淬透性好、合金元素含量高的合金钢和高合金钢零件，如各种刀具、主轴及锯条、锯片等，采用此法校直效果明显。淬火校直时的关键是控制钢在冷却介质（水、油、硝盐、碱浴、盐浴等）中的冷却时间，利用未转变的残余奥氏体的“大量塑性”实现对零件变形的校直。

具体的冷却时间见表 3-32。

表 3-32 不同钢种在冷却介质中的冷却时间

钢 种	零件要求的硬度(HRC)	冷却介质	冷却时间
高碳钢	≥ 61	10% NaCl	3~4mm 冷却 1s
合金工具钢	≥ 61	20~60℃油	0.12~0.16mm 冷却 1s
中碳钢	≥ 40	10% NaCl	5~6mm 冷却 1s
合金结构钢	≥ 45	20~60℃油	0.16~0.20mm 冷却 1s

淬火校直法尤其适用于淬透性好的高合金钢零件，如高速钢和高铬钢零件。对于低合金钢和碳钢工件在冷却到 200℃左右取出校直，而对于高合金钢零件通过热处理后其奥氏体稳定化，淬火状态下仍保留大量的奥氏体，利用较高的温度和存在的大量高塑性的奥氏体来实现零件的校直，需注意以下几点。

a. 在冷却中不断测量和校直，要控制开始校直的温度，温度低 ($\leq 60^\circ\text{C}$) 则塑性差，没有效果，容易压断。

b. 对薄板形零件要用平板夹住，在压力机上加压进行，为防止开裂应对夹板进行预热处理。

c. 校直后的零件应垂直吊挂，确保均匀冷却。

d. 所有零件在完成校直后应进行低温回火处理，目的是消除内应力的作用。

e. 应使零件的淬火和回火相互协调，既考虑到零件的淬火要求，又兼顾到回火后的实际效果，达到校直的目的。

另外还可以一边在零件的凸面上加压，一边在凹部位加热，实现零件的校直处理。

⑤ 回火校直法 钢在回火过程中，淬火马氏体转变为回火马氏体，使零件的硬度下降，消除部分淬火应力，高合金钢淬火后存在大量的残余奥氏体，在回火温度下又具有高塑性，此时对变形工件进行施加外力加压，起到校直的作用。事实证明，工具钢在 100~200℃进行校直，可明显减小淬火变形，当高速钢在高温回火时 (500~600℃)，强化相弥散硬化一般不会引起线形尺寸

的变化，实际上冷却或加工时零件的各部位产生了不均匀的内应力，引起了塑性变形的结果。

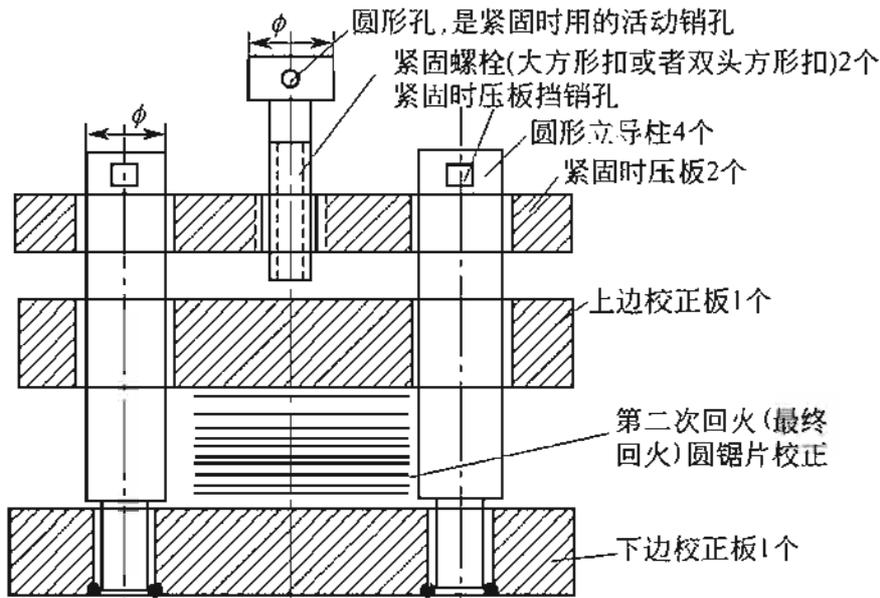


图 3-45 锯片基体的回火

该类校直法常用于回火温度在 300°C 左右的薄片状、碟形弹簧、圆锯片、环状、长条板和圆盘状等零件，如摩擦片、锯片、铣刀等合金工具钢和高速钢零件等。通常是将零件装在专用回火夹具中，如图 3-45 所示，在回火过程中取出，再施加压力。对于变形严重的零件先低温回火后再加紧回火，笔者采用此方法处理的材料为 65Mn、直径为 $\phi 1584\text{mm}$ 、厚度为 7.5mm 的金刚石锯片，基体的变形量在 0.20mm 以下，省去了手工校直工序，极大地提高了生产效率。

零件要充分淬火避免预回火组织的转变，施加需要的压力产生一定的预弹性变形，采用上限回火温度，钢的碳含量越高则回火校直的效果越明显，回火校直的温度在 300°C 以上时才会取得较好的效果。另外还有零件的夹持回火、反弯回火等校直方法。为了减小比较复杂的零件的淬火变形，可以根据零件的变形特点综合运用以上方法，从某一方面入手找出合理的解决办法，也可几种方法并用完成零件的校直。

(2) 对套筒淬火变形的校直

除采用外力对变形零件进行校直外，还可对热处理后膨胀或收缩变形超差的零件进行校直。

① 对于收缩变形的零件而言，在 A_{c1} 温度下加热后快速冷却，零件没有发生组织转变，因此无组织应力的产生，只存在因零件心部和表面热收缩量的差异而形成的热应力作用。零件表面快速收缩，使表面急剧收缩，在塑性转变较好的心部施加压应力的作用，在主导应力的方向上产生塑性收缩变形。影响胀大或收缩的因素较多，需要在具体的热处理过程正确分析和判断零件变形的具体状态，采取合理的方法达到控制套筒变形的目的。

化学成分不同则热处理的热传导和热膨胀系数存在差异，在 A_{c1} 温度下塑性和屈服强度不同，碳素钢和低合金钢收缩明显，而含碳量高的合金钢收缩小。

加热温度应根据 A_{c1} 选择，确保不能发生组织的转变，即在水中冷却不允许淬硬。碳素钢加热温度为 $A_{c1} - 20^{\circ}\text{C} \sim A_{c1} + 20^{\circ}\text{C}$ ；低合金钢为 $A_{c1} - 20^{\circ}\text{C} \sim A_{c1} + 10^{\circ}\text{C}$ ；低碳高合金钢为 $A_{c1} - 30^{\circ}\text{C} \sim A_{c1} + 10^{\circ}\text{C}$ ；奥氏体耐热钢为 $850 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。

该方法多用于各种不同的零件，如内孔、外圆、孔间距、外形尺寸等，轴类零件伸长或局部尺寸收缩。

② 淬火胀大法，用于形状简单的收缩变形的零件。其原理为淬火后零件的过冷奥氏体表面发生马氏体相变，比体积增大，而未发生的马氏体转变或未淬透心部受到拉应力作用，其拉伸的塑性变形致使零件沿主应力方向胀大或拉长。利用淬火时马氏体相变比体积增大，实现胀大的结果。

该方法多用于低中碳钢和低中合金钢的零件。资料 [33] 介绍，采用较高的加热温度水冷时，胀大 $0.20\% \sim 0.50\%$ ，而对于过共析钢 9SiCr、GCr15 可胀大 $0.15\% \sim 0.20\%$ ，淬火后应进行 $200 \sim 280^{\circ}\text{C}$ 的回火处理。

为了便于操作者正确选择和处理零件的变形，现将上述淬火变形的校直方法归纳整理为表 3-33。可以看出，每种校直方法接受

外加载荷方式不同又都可分为许多校直方法。

表 3-33 各种淬火变形校直方法汇总

类别	方法	操作类别
冷态校直	冷压校直法	①正向冷压校直 ②偏向冷压校直 ③砸弯冷压校直
	冷态正击校直法	①冷态正向锤击校直 ②冷态预弯锤击校直
	冷态反敲校直法	①冷态反向锤击校直 ②冷态反向喷砂校直
热态校直	热压校直法	①烧红热压校直 ②局部热压校直
	局部烘热校直法	局部烘热校直
	热态反敲校直法	热态反向锤击校直
	热点校直法	①热点校直 ②热点、加压校直
淬火状态校直	淬火趁热校直法	①趁热正向加压校直 ②趁热镶嵌校直 ③趁热滚搓校直
	残余奥氏体稳定化校直法	①淬火时残余奥氏体稳定化校直 ②回火时残余奥氏体稳定化校直
	局部速冷校直法	①正向局部速冷校直 ②反向局部速冷校直 ③内孔收缩校直
回火状态校直	回火校直法	①回火加压校直 ②回火定型校直 ③偶件配合回火校直

3.5 淬火后硬度不均匀、硬度不够

零件在加热保温结束后，奥氏体内成分已经均匀化，迅速以大于临界冷却速度在要求的冷却介质中完成组织的转变，以获得足够的硬度和理想的组织（如马氏体或贝氏体）。因此在淬火过程中一切影响产品质量的因素都会对零件淬火的硬度和组织产生重要的影响，而淬火后零件表面的硬度是最直接的缺陷特征，它将对零件的

耐磨性、疲劳强度和使用寿命产生很大的影响。

3.5.1 淬火后硬度不均匀

零件经过热处理后出现硬度不均匀，如软点或软带等。软点是指小区域出现硬度低的现象，而其往往成为磨损或疲劳损坏的中心，在十分重要的零件上是不允许出现的。其原因是多方面的，应从影响硬度的人、机、料、法、环和检六大因素进行分析，从影响因素入手。下面将造成硬度不均匀的原因和措施归纳如下。

(1) 淬火后硬度不均匀的原因

① 原材料质量不合格，例如组织晶粒过于粗大或零件表面发生脱碳，淬火后出现硬度不均匀。

② 出现组织的严重不均匀，例如组织不合格（如碳化物偏析、碳化物聚集等）、存在大块的碳化物或大块的自由铁素体等，它们直接影响到表面硬度的均匀性或材料的淬透性，厚截面上下不易淬火，造成硬度不均匀。

③ 淬火加热温度低或保温时间短，炉温分布不均、炉内温差大、零件彼此接触阻挡了热量传递的速度等，造成零件的加热不均，奥氏体成分不均匀，碳化物溶解不足，或者亚共析钢中铁素体未全部溶入奥氏体中，或者零件表面存在氧化皮和盐渣也可造成零件表面硬度的不均匀，另外含钨的合金钢在 950℃ 以上温度进行长时间加热后，钢中形成碳化钨而引起硬度不均，高碳钢、高硅钢则由于过热引起组织石墨化而产生硬度不均等。

④ 零件的表面出现脱碳层或存在有氧化皮、锈斑等，造成表面的脱碳，或者在冷却介质中未上下运动，造成零件的局部形成气泡，阻碍了冷却过程。

⑤ 淬火冷却不良，零件淬火时冷却速度不够快，在冷却介质中没有充分冷却。冷却介质老化、存在杂质，例如冷却水中存在油污、肥皂水、漂浮的杂物，冷却时零件表面存有气泡，或者冷却介质未进行强制循环而导致局部发生蒸汽膜，冷却介质性能下降，零

件淬火后表面硬度不均。

⑥ 尺寸较大的零件冷却不均，一是零件在冷却介质中未作平稳的上下作用运动，二是淬火出现零件堆集现象等，冷却介质未流动或搅拌，因此降低了冷却速度，造成硬度不均匀。

⑦ 在水中淬火冷却的零件由于蒸汽膜的作用，造成局部出现硬度不均，出现软点等。其检验方法有采用锉刀、盐酸腐蚀和研磨表面等几种方法，可根据具体情况选用合适的方法。通常用6~8in (1in=0.0254m) 的中纹平锉刀检查硬度，零件的硬度在60 HRC以上锉刀打滑，硬度在58~60 HRC范围则稍微锉得动，硬度在58 HRC以下锉刀与零件之间有摩擦力。

(2) 一般防止硬度不均匀的措施

① 在零件的加热过程中要采用合理的热处理设备 and 加热介质，例如采用可控气氛炉、盐浴炉、流动粒子炉或真空炉等，避免零件加热时表面出现氧化和脱碳现象。

② 碳素钢淬火时采用10%左右的氯化钠盐水或5%~10%的碱水作为冷却介质，可有效克服硬度不均的缺点。

③ 截面悬殊大和比较薄的零件、有缺口和棱(尖)角的零件等应进行合理的加热和冷却保护，例如在上述部位进行捆绑、添涂等，削弱其质量效应。

④ 对于原材料存在脱碳层而未完全车削或磨削干净的零件，应重新加工除掉脱碳层后才能进行热处理。

⑤ 事先检查零件原材料的组织偏析和碳化物的聚集等缺陷，对出现质量问题的材料采取措施加以消除，例如补充退火或进行锻造等。

⑥ 对冷却介质进行良好的搅拌或喷水冷却，可确保冷却的均匀一致，消除硬度不均现象。

3.5.2 淬火后硬度不足

在热处理冷却过程中，整个零件或较大区域的硬度达不到技术要求等，即硬度不足，其产生原因与淬火后硬度不均匀大致相同。

造成该类缺陷的原因是多方面的，根据零件在热处理过程中具体工艺参数的执行情况，结合实际操作，可从以下几个环节分析产生的具体原因。

(1) 零件加热不足或欠热

零件在加热过程中，实际的淬火加热温度低或保温时间短，组织没有完全转变为奥氏体（得到奥氏体+铁素体），造成零件内部奥氏体成分不均匀，碳化物和合金元素未充分扩散，内部各区域的成分差别很大，造成冷却后硬度的差别增大。

零件在热处理过程中执行了错误的工艺是造成硬度不足的原因之一，将合金工具钢在 $780 \sim 820^{\circ}\text{C}$ 范围加热，或将高速钢在 1100°C 以下加热淬火，即没有在要求的淬火温度内进行正常的热处理，则最终造成零件的加热不均、成分差异以及组织的变化不同，冷却后组织中残留许多未溶的碳化物和合金碳化物等，整体硬度不一致。

零件选用的材料淬透性低，截面尺寸大，造成零件内外硬度的差别很大，或碱浴成分中水分过少等也将对硬度产生一定的作用。因此零件的加热温度以及工件的形状、冷却介质稳定性等是工件热处理过程中必须关注的重点，要对其进行具体分析和探讨，制定出最佳的热处理工艺，发挥材料的组织性能和使用要求。

在零件的加热过程中，因控温仪表出现故障或失灵，造成加热设备停止供电，炉内的加热温度降低，会出现加热不透的现象。另外，如果装炉量太大，造成加热时零件本身温度不均匀等，同样会出现零件加热不足的现象。因此在实际的热处理过程中要定期检验仪表，确定合理的装炉量，确保加热的均匀有效和零件内外温度的一致。

(2) 零件的过热

过共析钢因加热的温度高或保温时间长，出现（晶粒粗大）过热现象，加热的奥氏体中存在过量的碳和合金元素，使 M_s 点大大降低，冷却后得到粗大的马氏体组织，组织的脆性增大，以致淬火后因残余有大量的奥氏体而降低了零件的硬度，对于工具钢而言，

在使用过程中会出现崩刃和折断。另外一类为材料的牌号混淆，导致淬火温度低的材料在高温下晶粒急剧长大，这种情况往往给操作者造成假象——加热温度高了，而很少怀疑材料出了问题。因此，一旦发现过热现象，在检查温度和金相的同时，最直接和简便的方法是进行火花鉴别。

对高碳钢或高碳合金钢而言，如果淬火温度过高，则淬火后残余奥氏体过多，致使硬度不足，因此在实际的热处理过程中要严格执行工艺的规定，确保硬度的合格。表 3-34 所列为 T10 钢的淬火组织与温度的关系。从表中可以看出，未溶碳化物的量随着加热温度的升高而减少，在温度达到 860℃ 以后碳化物全部溶解于奥氏体中。该钢在加热温度 830℃ 以上则出现过热组织。

表 3-34 T10 钢淬火后组织与淬火加热温度的关系

淬火加热温度 /℃	残余奥氏体量 /%	马氏体/%	马氏体/ μm	
			一般	最大
770	微量	3~4	隐针	—
800	1~3	1.5~2	7~11	12
830	5~10	0.5~1.2	18~21	28~35
860	10~15	无	18~21	28~35
890	10~15	无	28~35	35~52
920	15~20	无	28~35	35~52

(3) 零件的冷却速度不够

零件在加热结束后，要以大于临界冷却速度进行迅速冷却，以获得要求的马氏体或贝氏体组织。如果冷却速度不够（或小）则过冷奥氏体发生或部分发生过冷奥氏体向珠光体的转变，出现该类缺陷的因素为冷却速度的选择不当，冷却介质的温度过高或老化，使用碱浴时水分太少或过多，出现硬度不足或软点等，以及零件的尺寸过大等。因此在实际的热处理中选择正确的冷却介质和确保冷却效果，其基本原则是既保证零件的淬火硬度符合要求，又要尽可能地减小零件的变形量。在 M_s 点以上快冷，在 M_s 点慢冷，即可满足热处理的要求。

(4) 零件表面脱碳

零件的加热温度过高，容易产生脱碳。对零件的原材料表面存在的脱碳层，在机械加工中必须去掉，否则零件在加热后的淬火过程中，因表层碳含量低造成淬火后硬度不足，造成零件内外组织不同，产生的内应力增大，有可能出现零件的变形和开裂；同样零件表面本身无脱碳，但在加热过程中因加热介质具有氧化性，使零件表面受到氧化或脱碳的作用，造成表面碳和铁含量的降低，因此淬火后硬度不符合要求。

零件表面脱碳后将造成零件耐磨性和疲劳强度降低，螺纹刀具螺纹表面出现脱碳，其切削性能和精度将无法保证，切制的内外螺纹不合格，直接影响到使用要求。资料 [38] 介绍，汽车弹簧钢板在表面脱碳后疲劳寿命降低了 60% 以上，由此可见零件的表面脱碳对零件的使用寿命影响很大，必须认真对待，确保热处理的零件表面无脱碳现象。

零件在锻造过程中不可避免地会出现一定深度的氧化皮，如果在最终热处理前的机械加工中没有完全车削或磨削去，热处理后此处的硬度将受到严重影响。因此，为确保工件的热处理质量，严禁出现此类问题。

(5) 热处理过程中操作不当

严格执行零件的热处理工艺参数是对操作者的基本要求。许多质量缺陷是因操作不当造成的，加热温度过高则淬火后的残余奥氏体过多，或淬火温度低、保温时间短，淬火时预冷时间过长、双液淬火时在水中停留的时间太短、分级淬火时分级温度太高或停留时间长、奥氏体分解而在显微组织中出现非马氏体组织（如奥氏体组织）等，因此硬度降低，如果回火不足同样会造成硬度不足等。另外，工件使用的原材料如果出现混料，则不可避免地造成硬度不合格，这可通过一般的钢铁火花鉴别知识区分开来。同时淬火后工件的表面颜色也有差异。因此，一旦出现该类问题，要应用掌握的知识 and 技能等分析和判断，找出原因，确保工件的产品质量合格。

资料 [42] 介绍，经过锻造、退火和淬火回火处理后的 40Cr

花键轴在工作过程中发生扭转疲劳断裂，经过分析，表面的硬度低(23~26 HRC)，当技术要求更改为 32~35 HRC 时仍存在断裂现象，将硬度提高到 40 HRC 以上则完全消除和避免了扭转疲劳断裂，使用寿命得到了保障。其原因为硬度低于 40 HRC 以下，花键基体的强度偏低，无法满足其抗扭转的工作需要，因此零件本身的硬度偏低是造成其早期失效的原因之一。

3.6 工具钢的淬火缺陷

零件进行机械加工，完成对加工件的车削，刀具是必不可少的加工工具。刀具在切削加工中的进给量、切削速度和转速都受到切削材料硬度、组织的影响，在车削时刀具由于摩擦的作用，同时要承受切削压力的作用，刀刃的温度可达 600℃ 以上，仍要保持高的硬度、强度和耐磨性，以及良好的红硬性，才能确保刀具的正常工作。因此，为满足刀具的使用需要，必须选用合适的刀具材料，来满足其具体的加工要求。

在刀具的热处理中，其材料的选择十分重要。对刀具材料性能的基本要求如下。

① 具有良好的淬透性。

② 高的硬度和耐磨性，硬度在 60 HRC 以上，耐磨性决定了使用寿命。

③ 高的红（热）硬性，确保在高温工作条件下仍保持高硬度和良好的切削性能。

④ 热处理后变形小。

⑤ 具有足够的塑性和韧性。

根据化学成分以及工具具体的工作条件和技术要求，工具钢一般分为碳素工具钢、合金工具钢、高速工具钢三类，三者的硬度均在 60 HRC 以上。从其上述五个基本要求来分析，高速工具钢性能优于合金工具钢，碳素工具钢最差。因此，在车削零件时要根据材料的硬度和具体技术要求选用合适的刀具材料，来满足实际工作

需要。

工具热处理的类别有退火、正火、淬火和回火等几种。退火或正火的组织状态、硬度等是至关重要的，它必须为最终的热处理做好组织准备，否则将直接影响工具的热处理性能。淬火和回火对于工具的使用寿命和热处理缺陷有重要的作用，其工艺编制和具体的操作是热处理工作者在作业现场应当充分考虑的重点内容。

工具钢的热处理与其他零件的热处理相比，有以下几个方面的不同：一是不同的热处理工艺方法对工具使用的寿命影响很大；二是对工具热处理的质量要求较高；三是工具的形状和尺寸比较复杂，常出现细长或尺寸很大的工具等；四是工具的化学成分以及合金元素的含量对工具各种性能有直接的影响；五是工具热处理过程中要充分考虑和预防产生的热处理缺陷（例如淬火裂纹、变形、硬度不良等），在使用过程中出现早期的破坏和磨损等，这多半同淬火过热或回火不良有关。因此工具钢的热处理的难度高于其他零件的热处理，认真分析和采取必要的技术措施，才能确保工具钢热处理后的技术要求满足切削加工的需要。

工具的热处理条件与韧性是首先要考虑到的，当要求工具有较高的韧性时，通常是通过降低硬度来满足韧性的要求。提高淬火加热温度则造成晶粒度增大、冲击韧性降低，随之出现的是工具耐磨性的提高和寿命的增加，将二者进行综合考虑制定出最佳的热处理工艺规范是热处理工作者的岗位职责和任务。因此，在刀具的实际热处理过程中，要根据刀具的具体技术要求和使用条件确定合理的工艺。

3.6.1 碳素工具钢和合金工具钢常见热处理质量缺陷

碳素工具钢和合金工具钢可制作一般的刀具，其耐热性差，在250℃以下其切削性能和硬度可完全满足需要，因此其适用于低温工作状态，例如手用丝锥、圆板牙、手用锯条、刨刀等通常选用这两类材料。下面将在热处理过程中容易出现的缺陷归纳整理，见表3-35。

表 3-35 碳素工具钢和合金工具钢热处理常见缺陷和预防措施

工序	缺陷名称	产生原因	防止措施	处理方法
淬火与回火	硬度低、出现软点或软带	<p>① 淬火温度低或淬火温度过高、保温时间短</p> <p>② 预热时间过短、预热温度过低</p> <p>③ 装炉量多,零件的排列密集,出现阴阳面</p> <p>④ 原材料存在严重的石墨或存在粗颗粒的碳化物</p> <p>⑤ 钢中存在碳化物偏析与聚集</p> <p>⑥ 原材料表面脱碳(或未切除干净)或加热过程中脱碳</p> <p>⑦ 冷却介质选择不当,淬火时冷却速度过慢、分级或等温淬火温度高或时间长,或盐浴冷却介质恶化,双液淬火时在水中冷却时间短</p> <p>⑧ 回火温度高,回火不充分或空气炉内回火未循环</p> <p>⑨ 炉温加热不均匀,仪表指示值误差大</p> <p>⑩ 零件浸入盐浴面太浅,或零件插入盐渣中,造成零件本身的温度不均匀</p>	<p>① 严格执行热处理工艺,确保淬火温度和时间符合要求,必要时进行金相检查</p> <p>② 选择合理的预热温度和时间,确保零件内外加热的均匀一致</p> <p>③ 合理装炉,避免造成淬火硬度的不均</p> <p>④ 加强原材料的检查,使用符合要求的材料</p> <p>⑤ 选择合理的锻造工艺</p> <p>⑥ 采用车削加工等方法去掉脱碳层,盐浴要定期脱氧和捞渣,空气电阻炉加热时要加保护气氛,或采用真空加热</p> <p>⑦ 根据零件和设备特点正确制定和掌握淬火和回火过程温度、时间等参数,保证介质的清洁和成分的稳定。选用合理的冷却介质,并熟悉操作的工艺流程,对双液淬火的零件要把握好在第一种介质中的时间</p> <p>⑧ 采用盐浴或油回火,并加以搅拌使其流动,确保回火温度的均匀一致,防止出现过大的温差,合理调整盐浴的冷却性能,控制水冷时间</p> <p>⑨ 根据零件的长短、大小等合理选用加热盐浴炉,将零件放在有效加热区内。定期校验仪表</p> <p>⑩ 盐浴炉要及时挖渣,认真检查零件硬度不足的原因</p>	<p>① 如果零件存在较多的残余奥氏体,可通过冷处理或采取重新回火来提高硬度</p> <p>② 退火后重新进行加热和回火处理</p>

续表

工序	缺陷名称	产生原因	防止措施	处理方法
	淬火脱碳	<p>①在盐浴加热过程中,水分、氧以及杂质(如硫酸盐、碳酸盐等)含量超标</p> <p>②夹具或电极上的氧化皮、铁锈等带入炉膛内</p> <p>③炉内有硝酸盐的带入</p> <p>④脱氧不良或捞渣不彻底</p>	<p>①使用氯化钡、氯化钾或氯化钠等在 300~500℃ 进行 2~4h 的脱水处理,不纯物的含量符合规定</p> <p>②盐浴应定期脱氧,控制盐浴中氧化物的含量,对夹具进行抛丸或喷砂处理,也可酸洗,以除净氧化皮或锈迹等,经常清理电极上的氧化皮和附着物</p> <p>③放入盐浴中的零件或工装等必须清洗干净</p> <p>④每班脱氧和捞渣</p>	<p>①脱碳层小于磨削余量的零件可以使用</p> <p>②对脱碳层深度大于磨削量,而回火后表层硬度不低于 55~60 HRC 的零件,可进行退火、渗碳等方法进行补救</p>
淬火与回火	过热和过烧	<p>①淬火温度过高或保温时间长</p> <p>②控温仪表失灵或示值不准</p> <p>③零件和盐浴炉的距离过近或靠近电极、炉丝而局部烧熔</p> <p>④炉底的沉积物过多,电极插入其中,造成炉底温度过高,而零件在沉积物出现过热、过烧</p> <p>⑤零件在加热过程中脱碳或增碳</p> <p>⑥盐浴炉的电极分布不合理,造成炉温不均匀,出现局部过热</p> <p>⑦原材料球化组织不良</p>	<p>①正确控制和确定合理的淬火加热温度和保温时间</p> <p>②淬火夹具的设计应合理,仪表和热电偶应定期校对和鉴定,确保有效</p> <p>③要求零件在有效加热区,避免靠近电极和炉丝</p> <p>④定期捞渣,确保炉膛的深度符合要求,零件的放置要科学合理</p> <p>⑤盐浴及时脱氧,或在可控气氛炉内将碳势调整到要求的范围,检查淬火后零件的金相组织</p> <p>⑥改进电极的分布设计,使整个炉膛内盐浴的温度均匀一致</p> <p>⑦重新进行球化退火处理</p>	<p>①过热不严重者可重新退火处理和进行热处理</p> <p>②过烧零件一律报废</p>

续表

工序	缺陷名称	产生原因	防止措施	处理方法
淬火与回火	畸变	①零件热处理前内部存在有残余加工应力或冷塑性变形应力 ②淬火前存在局部脱碳 ③淬火加热温度高且不均匀 ④加热和冷却速度过大 ⑤淬火时操作失误,零件摆动过大或相互碰撞等 ⑥轴杆状零件在回火时放置不当 ⑦原材料的化学成分不均匀,淬透性低,碳化物分布不均匀	①必要时进行消除应力退火处理 ②将脱碳层去除干净 ③严格控制热处理工艺要求,温度的均匀性应符合规定 ④淬火前预热,冷却时可进行适当的预冷,采用合理的冷却介质和淬火方法,必要时进行双液或分级或等温淬火 ⑤规范操作规程,采用合适的夹具或工装,淬火前断电,在淬火和冷却时要垂直放置,零件之间不要相互挤压和碰撞 ⑥轴杆状零件应垂直摆放回火,薄片状零件在回火时可采用夹具夹紧回火 ⑦选用符合技术要求的原材料	①对发生畸变量小的零件进行校直(反击法),也可进行热点校直 ②对轴杆状零件弯曲超差严重时,可先进行退火,然后校直后重新加热淬火
	裂纹	①淬火时过热或过烧 ②加热速度快或加热不均匀 ③冷却介质选择不当,冷却速度过快,操作不当,或者在双液冷却时水中停留时间长 ④清洗过早 ⑤淬火后回火不及时、回火不充分 ⑥需重新淬火的零件未退火处理而直接淬火 ⑦零件表面脱碳、表面有加工的刀痕,厚薄悬殊大、断面尺寸变化大、形状过于复杂等而未采取相应的措施	①严格控制加热的工艺参数和保温时间,可选用较低的加热温度,对截面变化处用石棉绳或采用特殊夹具,确保各部分冷速相近 ②进行预热或分段加热,炉内的装炉量要符合要求 ③合理控制冷却速度,在能满足硬度要求的前提下应尽可能地选择冷却缓和的冷却介质,例如分级或等温淬火等 ④严禁零件过早地清洗,以防出现过大的内应力作用 ⑤对于容易开裂的零件,在淬火后冷至60~70℃左右要进行炉内回火,并且确保回火	零件一旦出现裂纹,无法挽救处理,只能报废处理

续表

工序	缺陷名称	产生原因	防止措施	处理方法
淬火与回火	裂纹	<p>⑧原材料夹杂物过多,带状组织严重,有网状渗碳体或原材料存在微裂纹,存在粗片状珠光体</p> <p>⑨焊接零件的焊缝处存在气孔、夹杂或脱焊</p> <p>⑩校直时用力过大,酸洗出现敲击裂纹</p> <p>⑪磨削操作不当</p> <p>⑫零件设计时存在尖角、棱边、凹槽或截面急剧变化</p>	<p>充分,回火升温速度要慢,可用阶梯式分段加热</p> <p>⑥需重新淬火的零件应首先退火处理后,再进行二次淬火</p> <p>⑦合理选择加热温度,盐浴及时脱氧,形状复杂的零件要进行预热,硬度要求可适当降低,消除或改善容易造成开裂的外在因素,必要时选择油冷或盐浴淬火处理</p> <p>⑧加强质量检验,选用符合要求的原材料,严格控制原材料的内在质量,也可对材料进行正火+球化退火处理</p> <p>⑨加强焊缝的质量检验,避免出现该类缺陷</p> <p>⑩采用正确的校直方法,校直用力适当,一次锤击或压弯量不要过大,也可选用淬火压床、特殊夹具以及回火夹具等</p> <p>⑪选用合适的磨削工艺,确保零件表面不发生组织的转变</p> <p>⑫改变设计形式,避免出现容易产生应力集中的部位,也可对上述位置进行捆绑、添塞或其他的保护措施</p>	
	腐蚀	<p>①盐浴中含有过多的杂质如硫酸钠、碳酸钠等</p> <p>②盐浴加热过程中混入了硝酸盐,其分解出的氧与零件的表面作用产生麻点</p> <p>③盐液面存在腐蚀性的介质</p>	<p>①严格控制淬火和回火用盐的纯度,防止杂质的混入</p> <p>②杜绝硝酸盐和淬火盐浴的接触</p> <p>③清理盐浴表面的浮渣等氧化性杂质</p> <p>④分级介质采用氯盐,但不</p>	<p>①腐蚀轻微的麻点或凹坑可进行磨削处理</p> <p>②非工作部位出现腐蚀可按合格品处理</p>

续表

工序	缺陷名称	产生原因	防止措施	处理方法
淬火与回火	腐蚀	④以硝酸盐作为直接分级冷却的介质(400~500℃) ⑤在空气炉中加热造成氧化 ⑥淬火时的残盐未去除干净或残盐潮解而腐蚀零件的表面 ⑦盐浴炉脱氧不良或捞渣不彻底 ⑧在硝酸盐中冷却后残盐未清洗干净 ⑨零件与夹具接触处或零件上有铁锈或氧化皮 ⑩回火硝酸盐中氯盐含量过多	宜用吸水性强、难于清洗的氯化钙 ⑤避免在空气炉内加热零件,可在盐浴、可控气氛、真空炉内完成加热工序 ⑥对淬火后的零件应在沸水中煮干净表面的残盐 ⑦认真进行盐浴的脱氧和捞渣 ⑧零件应清洗或进行喷砂或抛丸处理 ⑨喷砂或进行抛丸处理 ⑩回火硝酸盐中氯离子控制在1.5%以下	
退火与正火	石墨碳 (见图3-46)	①碳素工具钢退火温度高、保温时间长以及冷却缓慢,钢中出现片状珠光体、网状碳化物并析出石墨,在石墨碳周围出现大块铁素体,出现石墨碳或表面脱碳 ②承受冷塑性变形量较大或已经淬火成马氏体的钢,退火时更易产生石墨碳	①正确制定退火工艺的热处理工艺规范 ②进行预先冷变形处理 ③对已经淬火的零件采用较低的温度和较短的保温时间重新处理	进行扩散退火处理
	球化组织不良	①退火过程中加热温度低、保温时间不足,产生低级别的细片状或点状碳化物 ②加热温度高,加热时间长,产生大颗粒的碳化物以及粗片状珠光体	①正确制定球化退火的热处理工艺规范 ②合理装炉,确保炉内加热温度的均匀	球化不良的零件重新进行退火处理
	网状碳化物	①退火温度高(在 A_{cm} 以上) ②冷却速度太慢,沿奥氏体晶界析出碳化物 ③锻造始锻温度太高,锻后冷却速度太慢	①严格控制加热温度 ②加大冷却速度	采用高温正火,消除网状碳化物后,再进行球化退火

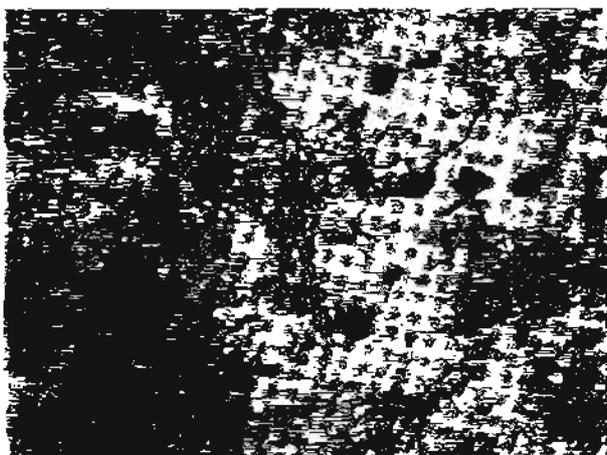


图 3-46 碳素工具钢退火时出现的石墨碳 (×500)

工具钢一旦出现上述质量缺陷，将对刀具的使用寿命产生致命的影响，尤其是对淬火处理后硬度低的刀具在没有进行退火、正火或高温回火的前提下，对其直接淬火处理，这不仅容易造成刀具的畸变，而且有可能出现淬火开裂，因此正确处理和妥善安排刀具的热处理是重要的技术工作，这应当引起热处理工作者足够的重视。

对一般工具钢，热处理质量的检验应从变形量、硬度、金相组织、力学性能等几个方面加以考虑，对处理的具体问题要求从原材料、热处理工艺、操作的具体过程、刀具的技术要求等分析和判断，运用相关的热处理知识和质量管理的方法比较容易找出缺陷产生的根源，同时也有助于提高对缺陷的认识程度，对于零件质量的控制是十分有利的。

3.6.2 高合金钢和高速工具钢常见热处理质量缺陷

高速钢具有二次硬化现象，其性能取决于淬火的加热温度，如淬火温度提高，组织粗化，硬度降低，而残余奥氏体增加；回火温度过高，韧性降低，但刀具的寿命和切削加工性以及耐磨性得到了提高，对车刀、滚刀而言应具有高的耐热性和耐磨性，要保温足够的时间以满足碳化物固溶于基体并发生均匀扩散的需要，而丝锥和拉刀则需要一定的韧性，故采用较低的淬火加热温度。因此根据刀具的工作条件和性能要求，合理设计刀具的热处理工艺，选择热处

理设备和加热、冷却介质和冷却方法，同时考虑采取一定的方法和措施避免和减少热处理质量缺陷，这是一项十分复杂的技术工作，要求工艺的设计者应具有一定的理论和实践经验，为了便于热处理工作者在处理零件的过程中正确处理和应对可能出现的质量缺陷问题，现将高速工具钢常见缺陷介绍如下，供参考。

(1) 鱼鳞状断口

鱼鳞状断口是高速钢常见的缺陷之一，具体见图 3-47，产生的原因一是在锻造后未及时回火而直接进行淬火处理；二是精锻工艺温度不适当；三是淬火后零件没有退火而直接反复进行 2~3 次淬火均会发生鱼鳞状断口。

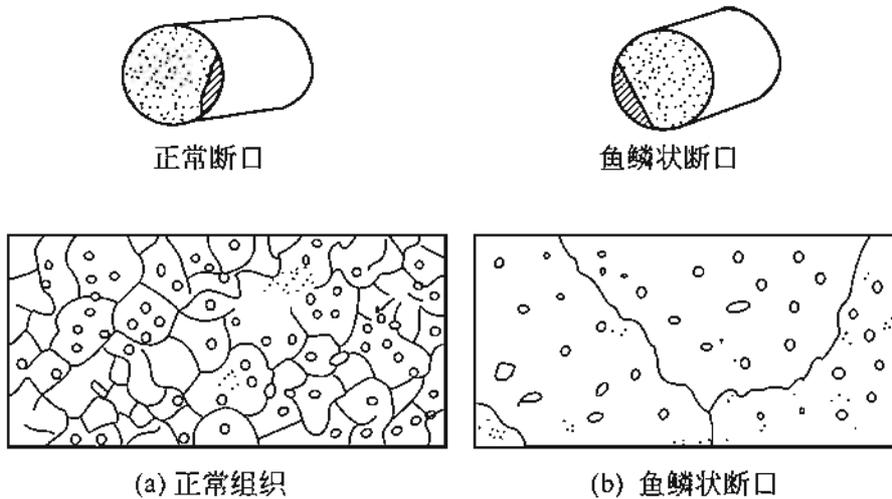


图 3-47 鱼鳞状断口组织（高速钢）

为防止鱼鳞状断口的产生，考虑其他原因需进行重新淬火处理，一般进行中间退火，也可采用高温加工使晶粒细化，再进行退火处理。

(2) 内氧化

内氧化多发生于渗碳过程中，渗碳气体中含有少量的氧，淬火零件表层下的锰和铬受到氧化作用，资料 [18] 介绍，向渗碳炉内通入氮气，起到稀释的作用。

(3) 裂纹

工具钢尤其是高速钢刀具热处理过程中，经常发生的热处理致

命缺陷之一是裂纹，这将造成零件整体的报废，是无法挽救的缺陷。因此在高速钢的热处理过程中，制定合理的热处理工艺参数和严格操作规程等，与此同时采用原材料组织合格的钢材，对于需要锻造成形的刀具，将内部碳化物击碎和均匀化，消除成分偏析，不允许出现内部折叠、氧化皮的卷入、裂纹等缺陷。更应注意的是，锻造后的球化退火降低硬度，改善切削加工性，细化组织为最后的热处理做好组织准备。

高速钢在热处理过程中出现裂纹，一是原材料本身或锻造存在缺陷，在热处理过程中由于热应力和组织应力的双重作用导致零件的开裂；二是零件存在设计的缺陷，存在尖角、凹槽、不规则的形状等，冷却过程中造成该部位出现应力集中而开裂；三是零件的截面突变或厚薄不均，造成加热和冷却过程中，组织转变的不同步和不一致性造成内应力的增大，出现零件的开裂现象；四是零件形状复杂，在加热过程中没有预热或预热不充分，内外温差过大，或者冷却介质选择不当，冷却过于激烈，产生的内应力超过了材料的破



图 3-48 W18Cr4V 钢晶粒度的不均匀长大
($\times 500$, 4%硝酸酒精浸蚀)

断抗力而开裂；五是淬火或回火操作过程中零件未冷到室温而过早清洗等。因此影响高速钢刀具开裂的因素很多，应进行多方面的分析和判断，找出裂纹产生的根源才能保证刀具的热处理质量，为了便于了解和判断产生的裂纹，现将一般裂纹的形式和产生的原因分别介绍如下。

① 碳化物带状堆积造成的裂纹 如果高速钢中出现碳化物堆积，则在正常的淬火温度下出现过热现象，堆积处碳化物拖尾见图 3-48，贫碳区域出现晶粒粗大。资料 [52] 介绍，高速钢齿轮铣刀淬火后在内孔壁上出现裂纹，经金相检验发现裂纹附近的碳化物呈不均匀的带状分布，当钢中的显微组织出现碳化物的聚集时，此处的碳和合金元素的含量较高，造成临界温度降低。

这样按正常的温度加热必然使之出现过热组织，将造成钢的强度剧烈降低，加上堆积又造成各部分成分的不均匀，因此增加了相变应力。加上碳化物带状偏析分布的方向性在淬火冷却时共同作用，很容易产生淬火裂纹，另外钢材的夹杂物多也同样是产生裂纹的根源。因此通过改变锻造比，进行反复锻造，并进行高温退火处理则可避免此类缺陷的发生。因为组织不良而造成零件出现各种质量缺陷，直接影响到刀具的使用寿命，需要提到的是，在高碳和高铬合金钢内其金相组织为珠光体+二次渗碳体的混合相，同时内部存在一定量的共晶渗碳体等，如果呈颗粒状均匀分布于铁素体的基体上，将明显增强耐磨性，假如其呈网状或大块、带状分布，则基体的强度和韧性大大恶化。图 3-49 所示为直径 $\phi 190$ 的 9Cr18MoV 高碳高铬不锈钢，未经适当的锻粗、拔长和反复锻造，在 $1/2$ 半径处存在严重的大块状渗碳体。图 3-50 所示为 9Cr18MoV 钢制造的长切刀，淬火后发现零件表面呈树枝状裂纹，从图中可知裂纹沿渗碳体网状和晶粒边界存在，沿渗碳体网状发展。



图 3-49 直径 $\phi 190$ 的 9Cr18MoV 高碳高铬不锈钢 $1/2$ 半径处存在严重渗碳体 ($\times 500$)

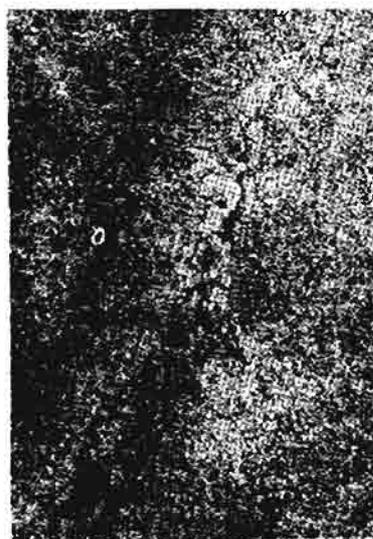


图 3-50 9Cr18MoV 钢切刀淬火后产生树枝状淬火裂纹 ($\times 500$)

② 淬火过热或过烧造成的裂纹 高速钢过烧时在组织上出现完整的碳化物网、次生的莱氏体以及黑色的组织 (δ 相的分解产

物)，具体见图 3-51。过烧造成的裂纹较深，无方向性而且裂纹十分粗糙。造成过烧或过热的原因除了淬火温度高保温时间长以外，还同刀具距盐浴炉电极太近以及热电偶或控温仪表失灵等有关，因此要避免此类缺陷的发生。



图 3-51 W18Cr4V 钢的过烧组织
($\times 500$, 4%硝酸酒精浸蚀)

因此要避免此类缺陷的发生。

③ 淬火时加热速度快 由于刀具合金元素含量高，其导热性差，造成形状复杂的刀具内外存在很大的温差，晶粒度的大小有较大差别。因此冷却时热应力和组织应力的复合作用，造成组织转变存在时间的差异，当内应力大于材料的脆断抗力则造成零件的开裂。对于形状复杂的成形

或大型刀具以及细长薄片形刀具，应进行二次预热或分段加热，同时注意预热温度不宜太高。

④ 冷却速度过快造成的裂纹 高速钢刀具在淬火或回火过程中，如果在马氏体的转变区冷却过快，将造成零件表面张应力的增加，从而引起表面的开裂。如淬火或回火后零件内外温度有较高的温度，清洗过早、回火不足等则容易造成零件的开裂。齿轮滚刀和规格大的丝锥等，因回火冷却不当出现表面裂纹的现象时常发生，因此需要引起操作者的高度重视，必要时回火采用低温入炉，缓慢升温，细长零件垂直悬挂回火。内孔壁纵向裂纹出现在套、圈类的内孔壁上，从端面看裂纹呈放射状，图 3-52 所示为 W18Cr4V 制造的大模数铣刀淬火后开裂的形式，这是内外冷却速度快慢不一致造成的，内孔处于淬火时冷却速度慢，热应力较小，内孔表面在组织应力的作用下处于拉应力状态，而切向拉应力较大，内孔越小则冷却速度越慢，热应力明显减小，切向拉应力相应变的更大，从而造成裂纹的产生。资料 [52] 介绍，W18Cr4V 制作的热锻模在盐浴加热后油冷，发现了裂纹。通过分析，认为锻模的截面尺寸较大，因此冷却时内外的温差增加，在表面转变为马氏体时，而内部仍处

在奥氏体状态，只有在随后的冷却过程中转变为马氏体，因此内部膨胀，致使表层承受很大的拉应力，造成锻模的开裂。针对此缺陷，应当采用分级淬火或空冷，确保零件的内外温度一致性和转变的同时性，则可完全避免出现裂纹的产生，也能为零件的热处理质量提供可靠的保障。

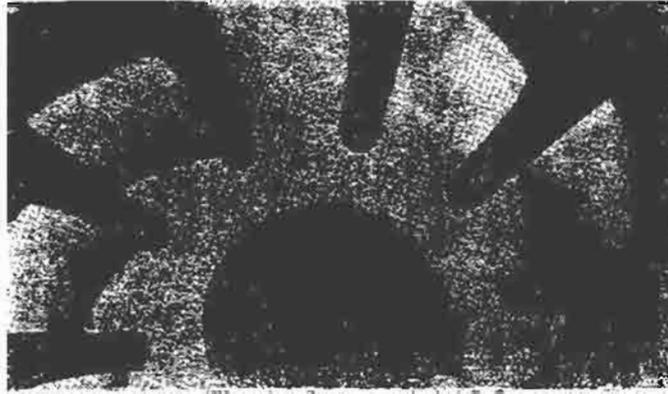


图 3-52 W18Cr4V 制造的大模数铣刀淬火后沿内孔壁形成的放射状裂纹

⑤ 表面脱碳造成的裂纹 高速钢在加热过程中，由于盐浴中氧化物的含量高，或在空气中加热，以及原材料本身的脱碳层没有完全车削掉等，均将造成零件表面出现氧化脱碳现象，如图 3-53 所示。脱碳层内碳含量的降低造成表面强度的下降，与此同时也增加了内外组织转变时的内应力，最终表面受到张应力的作用而开裂，该类缺陷的特征为裂纹浅、长度短，呈无规则分布。

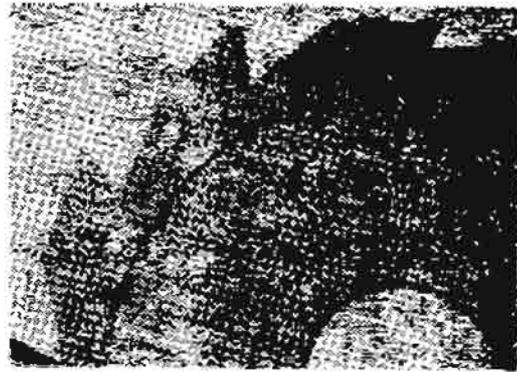


图 3-53 表面脱碳产生的网状裂纹

⑥ 几何形状或切削加工不当造成的裂纹 对于形状复杂、结构设计时截面悬殊、形状过于复杂、有尖角或凹槽、刀具表面不光洁、存在加工刀痕、打印标记等零件，在加热和冷却过程中加剧了相变的不同步性，截面变化处形成了应力集中等，冷却条件选择不当（零件摆动终止的温度低、从冷却介质

中提出的温度过低)，回火的温度低，都会造成零件的开裂。

⑦ 刀具校直过程中的断裂 刀具在热处理加热和冷却过程中，无法避免变形的发生，因此热处理后应进行必要的校直，才能满足刀具随后磨削加工的需要，热处理后的硬度很高，通常采用趁热校直、反冷击法校直、压板校直、热点校直等控制变形的措施，特别需要提出的是，对轴杆形和板状刀具等进行校直时，如果采用反击法，钢锤的硬度应在 60 HRC 以上，锤击面应呈圆弧形（有一定的半径），同时绝对禁止在某一部位用力过猛，否则锤击造成刀具的断裂，有时裂纹很小但在进行酸洗时可清洗发现该类致命的缺陷，因此应引起操作者的高度重视。

⑧ 焊接刀具焊接不良或加热不良造成裂纹 为了节省价格较高的高速钢，通常刀具的柄部采用中碳钢或中碳合金钢，刃部高速钢采用闪光焊或摩擦焊连为一体，以达到节约的目的。焊接过程中出现焊接面（或焊缝）有气孔、杂质、脱焊等，造成该处强度降低，在使用过程中容易断裂；另外在对高速钢部分加热时，如果焊缝浸入盐液面内，造成柄部材料出现严重的过热甚至过烧等同样会出现裂纹现象。

⑨ 刀具的磨削裂纹 刀具热处理回火完毕后进行最后的磨削加工，以得到要求的精度、尺寸和形状等，由于此时刀具的硬度在 60 HRC 以上，在磨削过程中如果工艺参数选择不当，磨削进给量过大，或冷却不均匀等造成表面温度的急剧上升，出现磨削退火、甚至淬火等，表面的组织发生了转变等，表面产生拉应力的作用，导致刀具的开裂等。在丝锥的磨槽、机用丝锥和滚丝轮磨螺纹工序中，因冷却不当则容易出现磨削裂纹，该类裂纹深度在 0.01~0.05mm 以内，通过再次磨削则可消除已有的裂纹。笔者处理过寒冬季丝锥磨槽后出现磨削裂纹的事情，当时水温在 5℃ 左右，操作者对高速钢管螺纹丝锥进行磨槽，检验人员发现槽内有网状的裂纹，通过对作业现场的调查，从影响产品质量的六大因素综合分析后，得出了出现缺陷的原因是操作者对槽部的磨削量过大（达到 0.3mm），产生大量的热，而冷却水温则过低，造成材料的过度冷

却而产生磨削裂纹。

笔者曾分析过一批断裂的 M18 焊接丝锥，刃部材料为 W6Mo5Cr4V2，柄部材料为 45 钢，技术要求刃部硬度为 63~66 HRC、柄部为 30~50 HRC，回火充分。刃部已经处理完毕，需对柄部进行淬火处理，柄部的具体热处理工艺为 820~840℃，保温 7~8min，采用流动水冷却，随后进行 180~220℃ 低温回火，在检查柄部硬度时发现在焊缝高速钢部分出现裂纹。对本批丝锥进行全部外观检查后发现裂纹比例高达 60% 以上，从裂纹的位置和形状来看，几乎没有差别，检查刃部和柄部的硬度和金相组织均正常，检查和分析裂纹处时发现其两侧无氧化和脱碳现象，裂纹均起于焊缝终止于螺纹处，距离 30mm 左右，因此初步判断为淬火裂纹。

对柄部的热处理工艺每道工序进行跟踪，淬火夹具为专用丝锥退柄板，局部盐浴加热（焊缝在盐液面以上 5~10mm 位置）后，迅速在浅水槽中水冷。经过测量，水槽在冷却 M18 丝锥过程中，水面的高度大于该丝锥柄部的长度，由此可见本批丝锥的裂纹根源正是冷却时将高速钢部分也浸入了水中，造成刃部剧烈的冷却，内应力超过了材料的破断强度所致。

对于上述质量缺陷，应当采取一定的预防措施，通常是原材料的碳化物不均匀性小、低倍组织合格，如需锻造则有足够大的锻造比和锤击量；对于形状复杂的刀具进行多次预热；在满足零件红硬性的前提下，对于容易开裂的刀具等尽可能地采用较低的淬火温度，减少过热造成零件的变形和开裂；对开裂倾向大的零件应进行分级或等温淬火，同时冷却到 100℃ 左右及时回火，回火的升温速度应缓慢，可进行阶梯式分段加热；在马氏体的转变区内要缓慢冷却，严禁冷却过程中进行零件的清洗；对于需要进行冷处理的刀具等，必须冷到室温后才能冷处理，冷处理时应分段降温，首先在 -30~-20℃ 停留 2~3min，再降到 -75℃，冷处理完毕后待温度回升到 -30℃ 左右，才能从炉内提出，回升至室温再进行回火处理；零件的截面变化处要避免骤然改变，将棱角倒钝、避免出现刻印痕迹，孔穴、键槽等采用堵塞等方法，应减少应力集中效应，图

3-54 所示为防止工具钢淬火开裂的形状要求。另外因为原材料的组织不良如球化退火组织不良、碳化物偏析等，将造成零件在热处理过程中出现开裂。

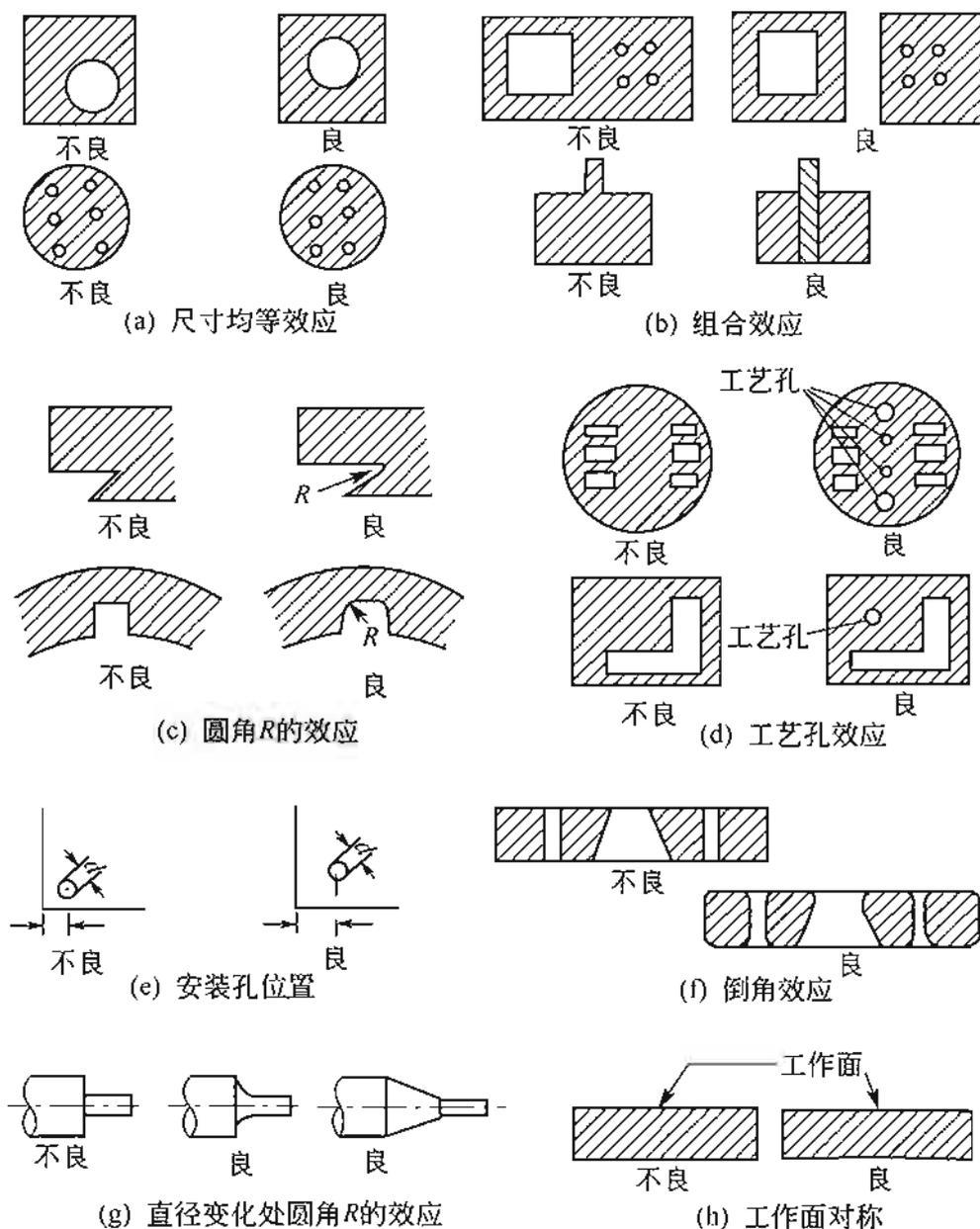


图 3-54 防止工具钢淬火开裂的形状要求

(4) 表面腐蚀（麻点）

零件的表面腐蚀是由于加热介质与零件的相互作用，表面产生了腐蚀麻点，而严重的腐蚀会造成刀具的表面失去原有的性能，无法正常工作。钻头在盐浴加热过程中造成的腐蚀见图 3-55。

产生该类缺陷的原因一是杆部刀具如钻头、丝锥、拉刀等为局部加热时，暴露在盐浴面上受氧、氯、氯化氢等气体的腐蚀，因此在盐浴面与刀具的交界处，空气将刀具表面氧化；二是盐浴中含有硫酸盐等



图 3-55 钻头表面的腐蚀麻点

杂质，硫与刀具产生氧化作用；三是盐浴内脱氧不良，存在大量的氧化物，使刀具脱碳和产生腐蚀麻点；四是盐浴中混入了硝酸盐分解出的原子氧与刀具作用，产生麻点（氧化）；五是在 100% 的硝酸钾中回火时，内部含有大量的氯离子，加上硝酸盐的使用温度过高（超过 600℃），造成硝酸钾在高温下的强烈分解，产生了氧气使刀具受到氧化，产生大量的电化学腐蚀麻点；六是大型刀具高温出炉时在空气中预冷时间过长，与空气中的氧接触，产生斑状麻点，这是高温下空气氧化的结果；七是刀具热处理后的清洗不干净，或刀具的搁置时间过长，上面黏附有淬火残盐或残盐潮解等；八是在表面发黑处理时酸洗时间过长或酸洗温度过高等。因此出现刀具的表面腐蚀，应从以上几个方面查找原因，并采取相应的措施，即可避免出现表面腐蚀现象。

通常为防止刀具在热处理过程中出现表面腐蚀，可采取以下相应的措施和方法：严格控制热处理用盐的纯度，不允许杂质的含量超标；酸洗溶液用酸符合技术要求；刀具热处理后应进行煮沸清洗；必要时进行刀具喷砂或抛丸处理；盐浴脱氧要彻底；在硝酸盐浴中分级等温时，可在硝酸盐中加入质量分数为 2%~4% 的氢氧化钾等，事实证明采取以上措施可有效避免刀具表面腐蚀现象的发生。

零件产生表面腐蚀除以上原因外，还同零件在箱式炉中加热表面保护不良，零件加热结束后在空气中停留时间过长等有关。对于局部高温加热的零件而言，更应注意表面腐蚀带来的危害，笔者在用高温盐浴炉加热直柄钻头、接柄钻头、接柄丝锥等刀具时，发现

在盐浴面处零件的表面出现严重的腐蚀，造成即使磨削到成品尺寸仍存在麻点的质量缺陷。根据其产生的机理，在以后的加热过程中，采用先将零件整体浸入盐浴中，随后提出进行局部加热，由于柄部黏附有盐渍，起到保护作用避免了表面腐蚀现象的发生，解决了困扰热处理的难题。

(5) 硬度不足

高速钢刀具热处理的硬度一般为 63~66 HRC、一般工具钢的硬度为 60~65 HRC，如果经过高温回火后硬度低于技术要求，则硬度不合格，资料 [42] 介绍，高速工具钢淬火后的组织为：60%~70% 高硬度的马氏体 + 20%~30% 残余奥氏体 + 5%~15% 未溶碳化物，因此淬火后的硬度只有通过高温回火，使残余奥氏体转变为马氏体组织，碳化物弥散析出，产生二次硬化现象，才能获得要求的硬度。产生硬度不足的原因有以下几个方面。

① 淬火温度低或加热时间短，钢中的碳和合金元素溶入奥氏体中较少，高速钢的二次硬化效果差，造成淬火后马氏体的硬度降低。

② 热处理加热过程中因炉内盐浴氧化物超标，存在氧化性的物质，造成刀具表面的氧化脱碳现象。

③ 淬火时的分级温度过高，造成合金碳化物自过冷奥氏体中析出或分解为非马氏体组织。

④ 回火温度低于正常的高温回火温度，回火冷却不当（未冷却至室温进行二次回火），存在较多的残余奥氏体等。

资料 [59] 介绍，出现硬度不足时，应确定是否是回火不充分造成的，因此要进行金相检查，以便确定硬度不足的根源，如淬火温度低则晶粒度细小，内部有较多未溶的碳化物；回火不足有部分白色马氏体以及残余奥氏体存在；如为表面脱碳则表面出现铁素体组织等。因此要从以上几个方面分析和判断硬度不足的原因。表 3-36 列出了分析和判断产生硬度不足的原因、操作因素及预防措施，供参考。

表 3-36 高速工具钢硬度不足的原因、操作因素及预防措施

影响因素或原因	操作过程中因素	预防或采取的措施
淬火温度过低或时间短,造成马氏体的合金度低	<ul style="list-style-type: none"> ① 淬火温度选择不当,低于工艺规定的下限温度(仪表指示的温度低) ② 淬火温度控制不准(热电偶失去精度、插入的方法不当等) ③ 出现软点(装炉量过多、零件的加热方式不当) 	<ul style="list-style-type: none"> ① 根据材料牌号和推荐的加热温度,同时考虑刀具的技术要求等选择合理的最佳加热温度,对仪表等定期检查 ② 定期校验热电偶、检测放置的位置是否正确,保护套有无烧损等 ③ 调整零件的装炉量,确保零件在有效加热区域的温度均匀一致、零件之间应有一定的间隙等
淬火温度过高	<ul style="list-style-type: none"> ① 淬火温度选择不当(指示温度过高) ② 淬火温度控制不当(热电偶失去精度、插入的方法不当等) 	<ul style="list-style-type: none"> ① 根据材料牌号和推荐的加热温度,选择合理的最佳加热温度,对仪表等定期检查 ② 定期校验热电偶,检测放置的位置是否正确,保护套有无烧损等
冷却不当	<ul style="list-style-type: none"> ① 出炉至冷却的时间间隔过长 ② 冷却方法选择不合理 ③ 零件表面有氧化皮或粘有残盐 ④ 冷却介质的温度控制不当 ⑤ 冷却介质的流动性差、搅拌不良 ⑥ 零件自冷却介质中提出的温度过高 	<ul style="list-style-type: none"> ① 选择合理的冷却方式和方法,调整加热炉和冷却装置间的距离,或减少间隔的时间 ② 根据零件的热处理要求,选用符合要求的冷却介质和方法 ③ 采用可控气氛炉、表面涂敷防氧化涂料,或迅速除去表面的残盐等 ④ 根据零件的技术要求,盐浴、碱浴、油温以及水温控制在工艺范围内 ⑤ 对冷却介质进行循环或加以搅拌等,确保冷却介质的温度一致 ⑥ 在 M_s 点以上约 50°C 提出空冷
回火时装炉温度过高、回火次数少、马氏体过度分解或残余奥氏体转变量少	于 M_s 点附近装炉回火	<ul style="list-style-type: none"> ① 零件在冷却到 $30\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时立即进行回火处理 ② 确保刀具回火充分 ③ 残余奥氏体过多时则通过冷处理来提高硬度

续表

影响因素或原因	操作过程中因素	预防或采取的措施
氧化和脱碳	①原材料或锻造本身有残余的脱碳层 ②淬火加热过程中造成表面氧化脱碳(在氧化性介质中加热,例如未脱氧的盐浴、空气电阻炉、保护气氛不良等) ③零件加热时温度过高出现过热现象 ④分级等温温度过高,等温时间过长	①加工时要完全去掉材料上或锻坏的脱碳层 ②采用脱氧的盐浴、保护或可控气氛加热 ③严格执行热处理工艺要求,避免在高的加热温度下加热或保温时间过长 ④执行工艺规定的分级等温淬火温度(不超过 650℃)和时间
材料混料	在零件的加工或热处理过程中有另外的非高速钢材料混入	①严格材料的管理 ②必要时进行火花鉴别

(6) 零件的尺寸变化和变形

高速钢在热处理过程要发生热应力和组织应力的共同作用,因此预防热处理的变形和尺寸变化是十分困难的,在操作过程中根据实际的经验加以解决是一种可行的措施和方法。纵观影响零件热处理变形的众多因素可知,材料的种类、工具的形状、热处理的加热和冷却条件、操作过程等均会造成变形,因此掌握其变形的规律有利于控制和改善尺寸变化和变形,表 3-37 为根据生产实际得出的措施,供参考。

表 3-37 防止高速工具钢热处理变形的控制要领

预防的措施	减小热处理变形的思路	实际操作的具体方法
改善或更换材料	①选择淬透性好的材料,以采用冷却缓和的冷却介质,减小冷却速度,达到控制变形的目的 ②确定合理的下料方法,尽可能避免产生新的加工应力和硬化 ③使用硬化钢	①选用淬透性好的材料,例如用低合金工具钢代替碳素工具钢,用高合金工具钢代替低合金工具钢,用微变形钢代替易变形钢等,其淬火冷却的剧烈程度大大降低(可选用盐浴、硝酸盐浴等) ②预先掌握原材料轧制的方向,在加工过程中不破坏其纤维走向,通常进行切割下料 ③采用马氏体时效钢等硬化材料等

预防的措施	减小热处理变形的思路	实际操作的具体方法
改善预先热处理	①对锻造的材料进行退火处理,消除内部的组织不均匀和减小内部的应力 ②在热处理前对其进行除应力退火处理,以消除机械加工应力对热处理的影响	①对材料进行球化退火或进行调质处理,改善组织细化晶粒等,为淬火做好组织准备 ②在粗加工后(车削、磨削等)进行消除应力退火处理
改进零件形状的设计	①使零件的壁厚均匀加热、截面的变化要避免突变 ②对结构复杂的零件(孔穴、键槽等)要做到均匀对称 ③对容易弯曲的细长零件分割成几段 ④对于大型或要求尺寸精度高、而又要求严格的零件采用组合设计,分别进行热处理,有利于对热处理变形的控制	①采用捆绑或做成形状变化均匀,确保厚薄、截面变化一致,然后将不必要的部分去除 ②加必要的工艺孔、键槽等,确保零件的整体对称,加热和冷却的一致 ③可以进行局部加热和冷却,也有利于对变形的校直 ④对组合零件分别热处理,可明显地控制和减小热处理的畸变和变形量
改善热处理条件	采用减小变形的热处理条件	①在满足零件热处理指标的前提下,尽量采用较低的淬火加热温度 ②根据零件的使用条件,采用局部加热硬化处理,或进行高频淬火
改善加热冷却方法	①均匀加热和防止因支承不当而引起变形 ②进行缓慢加热 ③采用加压淬火 ④进行均匀冷却 ⑤采用分级或等温淬火	①合理布置工具的间隔、相对热源位置和支承的方法或措施;确保工具在有效加热区内加热 ②进行预热或分段加热,缓慢加热以确保工具内外温度的一致性 ③对形状特殊、不对称的零件在 M_1 点附近加压冷却 ④确保冷却介质在冷却过程中能均匀流动;在大于冷却速度的条件下尽可能地缓慢冷却;零件的薄壁、截面突变处采用石棉包扎,薄壁处进行吹风冷却 ⑤采用适当的热浴温度和停留一定的时间,确保零件内外整体温度的一致,避免组织转变的不同步性

为防止热处理过程中出现高速钢刀具零件的畸变，还应注意以下几点。

① 淬火前局部加热脱碳造成马氏体相变点的升高，相变不均匀，产生了比较大的内应力作用。

② 加热温度高且温度不均匀。

③ 加热速度快，刀具内外温差过大，冷却速度过大，组织转变出现不同时和不一致。

④ 杆状刀具淬火时未垂直加热，出现摆动、晃动和刀具之间、炉膛或电极的碰撞等。

⑤ 杆状刀具进行回火时，未进行垂直摆放。

⑥ 原材料化学成分不均匀，碳化物偏析严重等。

⑦ 回火不充分，在校直、酸洗时造成残余应力未得到彻底消除。

根据以上问题，在实际热处理过程中应选用工艺规定的下限淬火加热温度，进行淬火前的预热处理，选择合理的冷却介质和冷却方式，采用变形小的分级等温淬火工艺，杆状刀具等在加热和冷却过程中始终保持垂直吊挂，薄片状刀具采用专用夹具夹紧。

高速工具钢热处理后，进行磨削或刃磨加工可获得要求的几何尺寸和性能，为消除或降低在机械加工过程中产生的残余应力，使表面的局部组织得到改变，即为了消除或减轻一些因素的影响，因为这些因素会引起刀具在保存或使用过程中发生不允许的尺寸变化或降低刀具的稳定性。一般是磨削加工后在 $200\sim 230^{\circ}\text{C}$ 保温 $1\sim 2\text{h}$ 可部分消除在油冷过程中产生的内应力，也可在 $500\sim 520^{\circ}\text{C}$ 的硝盐（成分为 $60\% \text{NaNO}_2 + 40\% \text{KNO}_3$ ）中保温 1h 。为了减少在保存时尺寸的变化，具有可靠的尺寸稳定性，刀具磨削可分为两道工序进行（粗磨和最终磨削），进行双重补充回火（粗磨后 $500^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ ，最后磨削后 $200^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ ）。为了提高完全磨削刀具的稳定性，可在空气循环电炉中进行 $275\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的短时间回火，然后在干净的油中冷却，用布擦拭干净后可得到外观匀称、漂亮的金黄色表面，此刀具有高的耐蚀性。

(7) 氧化和脱碳

氧化和脱碳通常发生在高温加热过程中，其危害是不仅造成硬度不良、淬火开裂和热处理的变形等热处理缺陷，而且对刀具的疲劳强度、表面的硬度和耐磨性等性能也有很大的影响，也增大淬火开裂的倾向，其原因是外界侵入盐浴中的水分、氧气的直接和间接作用、盐浴中的氧化性杂质、加热气氛中氧化性气体的存在等复合作用的结果，具体来讲有以下几项。

- ① 盐浴中水、氧以及硫化物、硫酸盐、碳酸盐等杂质的作用。
- ② 淬火夹具或刀具上的氧化皮或锈迹等带入盐浴中，造成炉内氧化物的含量增加。
- ③ 硝盐带进盐炉中。
- ④ 盐浴脱氧不良或捞渣不彻底。
- ⑤ 在空气炉中预热温度高于 550℃。
- ⑥ 在空气电阻炉中退火时无相应的加热保护措施。

根据以上原因，在实际的热处理过程中要对氯化钡使用前在 300~500℃ 烘干 2~4h，以脱去盐浴中的水分，经常清理电极和淬火夹具表面的氧化皮和残盐，定期更换旧的盐浴等。因此对盐浴炉定期脱氧是确保刀具表面无脱碳的基本条件，另外在其他加热介质中，应确保无氧化性气体的存在等，对于加热过程中无法避免的脱碳，建议在机械加工中留出加工余量。常见脱碳情况见图 3-56。

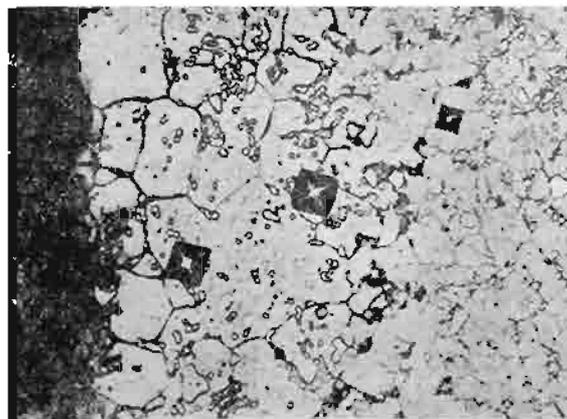


图 3-56 W18Cr4V 淬火脱碳组织、硬度 (×500, 4%硝酸酒精浸蚀)

(8) 蕪状断口

蕪状断口是进行热变形的最后一次加热后温度太高，转变终了的温度在 1000℃ 以上，同时形变量太小，接近临界变形度；或热

塑性变形后退火不充分；二次淬火没有进行中间的完全退火，钢内部奥氏体晶粒发生不正常的长大，促使刀具产生极大的脆性等造成的。该断口造成刀具的脆性大、强度低，直接影响到刀具的使用寿命，因此要严格执行工艺的技术要求。采取的措施为终锻温度不得高于 1000°C ，最后变形量不小于 $5\% \sim 10\%$ ；毛坯淬火前进行充分退火；返修零件或锻后退火处理后才能直接淬火，退火后硬度应控制在 28 HRC 以下。资料 [15] 介绍，萘状断口虽然可以通过热压力加工、多次中间退火或稳定化处理加以消除或部分消除，但缺少实际价值，采用二退二淬处理 W6Mo5Cr4V2 钢存在的萘状断口的宏观、微观组织均正常。高速钢萘状断口形成后难以消除，是组织遗传的作用，只有通过控制碳化物的回溶，使之重新分布钉扎，才能彻底切断遗传途径，有效控制奥氏体晶粒的不均匀长大。常见萘状断口和组织见图 3-57。

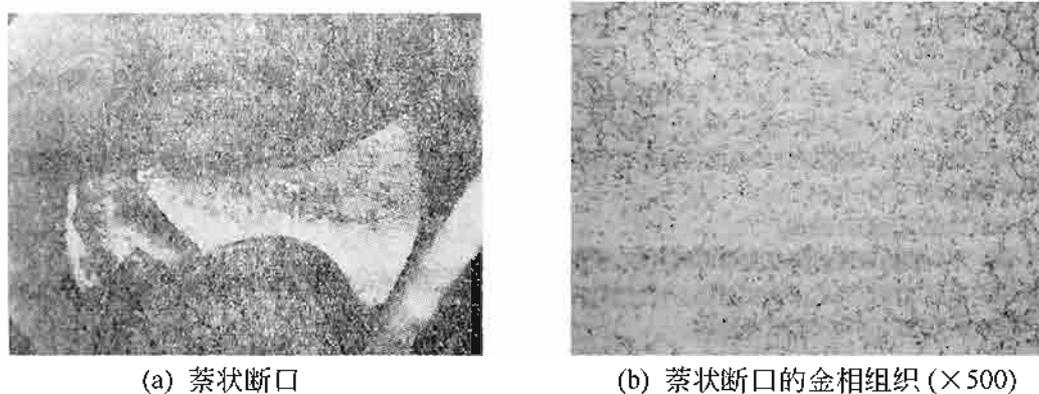


图 3-57 高速钢的萘状断口和金相组织

(9) 过热和过烧

过热和过烧是指淬火加热温度高于工艺规定的上限温度，造成晶粒的过分粗大、甚至出现晶界的部分熔化等，丧失工具钢的特性，这是热处理过程中不允许出现的致命缺陷。其产生的原因如下。

① 淬火加热时温度高于工艺温度，保温时间长。

② 仪表测温误差大，热电偶线接触不良，辐射高温计镜头与盐浴面距离太近。

③ 仪表控温失灵，控制柜磁力开关黏合失去控制。

④ 夹具或刀具距离电极太近或与电极接触，加热过程中碰到电极等，将导致刀具局部过热或过烧。

⑤ 盐浴炉底部盐渣和其他沉积物太多，电极插入其中，造成炉内温度升高，刀具过热或过烧。

⑥ 盐浴炉的电极分布和布局不合理，造成炉温不均匀，出现局部温度过高。

⑦ 温度的控制不严，没有对刀具进行正确的金相检验。

⑧ 原材料碳化物偏析严重，造成局部区域含碳量过高。

针对上述原因，在热处理过程中一要严格按热处理工艺规范操作，二是夹具的设计要合理，能满足刀具等零件的加热要求，三是每班对仪表和热电偶进行校温，定期进行鉴定，最后是对大型刀具出炉淬火时，应断电后进行，可有效避免刀具的过热或过烧，同时也有助于减少变形。过热零件的返修应进行退火处理，首先要求退火前做喷砂处理，以清除表面的氧化皮，防止在盐浴炉退火过程中造成氧化物的提高，出现脱碳和腐蚀麻点；刀具应合理摆放；退火盐浴要彻底脱氧；退火后校直。其次选用较低的淬火温度，适当延长加热时间，并借助于金相组织检查，确保变形和组织合格。

以上列出了高速工具钢常见的热处理缺陷，可以看出淬火加热温度对其影响最大，高速工具钢淬火温度的选择应考虑以下几个方面的因素。

① 淬火后硬度和韧性的合理匹配。不同刀具的工作受力状态和技术要求存在很大的差别，应根据其特点做具体分析，如需要高硬度和高的热硬性则采用较高的加热温度（如车刀等），对要求具有高的冲击韧性，减少崩刃的概率则采用较低的加热温度（如中心钻等），因此要充分考虑选择合理的加热温度，这是获得理想组织和性能的前提。

② 原材料的内部组织中碳化物对淬火温度有重要的影响。事实证明，碳化物的偏析增大，将造成奥氏体晶粒的长大，在碳化物的堆积处出现过热现象，刀具容易出现变形和开裂，故必须采用较

低的加热温度，表 3-38 为常见高速钢淬火组织与淬火加热温度的关系，供参考。

③ 淬火加热温度的高低对淬火晶粒度的大小有直接的影响。不同的高速钢材料淬火温度是有一定的差距，一般同钢中合金元素的含量和形成的碳化物的多少有关，在原材料正常的情况下，淬火的晶粒度是可作为判断淬火温度高低的主要参考依据的。

④ 刀具的形状和复杂程度对淬火温度有一定的影响。对容易变形的刀具（例如薄片状和细长零件锯片铣刀、铰刀、拉刀等），厚薄悬殊、存在尖角棱边、钻孔、凹槽以及其他不规则的刀具（例如三面刃铣刀、无心磨床支片等）应采用较低的淬火加热温度，可明显减小零件的变形和开裂。

表 3-38 高速钢零件淬火组织与淬火加热温度的关系

淬火加热温度/℃	晶粒度级别/×500	相当于放大 100 倍时晶粒度级别
1200	晶界不明显,碳化物未充分溶解	—
1200	晶界不明显,碳化物未充分溶解	—
1240	7 级	12 级
1260	6 级	11 级
1270	5 级	10 级
1280	4 级	9.5 级
1290	3 级(轻微过热)	8 级
1320	2 级(过热组织)	7 级
1320	1 级(严重过热)	6 级

另外，刀具的加热时间在热处理过程中也有重要的作用，高速钢加热时，碳化物的溶解程度取决于加热温度和时间，在温度一定的前提下，应有最佳的加热时间，时间过长和过短均会对刀具产生不良的作用。这需要进行工艺试验，选择要求的加热时间。应当注意，影响加热时间的因素较多，主要有淬火温度、装炉方式和装炉量、炉子的功率和炉膛大小、刀具的几何形状和尺寸大小、控温手段、预热温度以及原材料的碳化物的形态和分布等。通常推荐的加

热系数一般为 $8\sim 15\text{s/mm}$ ，一般大型刀具选小的加热系数，小型刀具采用大的加热系数。应当注意最短的加热时间不少于 30s 。

实际热处理生产过程中，加热时间的确定应通过试验得到适宜的加热时间，刀具在淬火后得到高的硬度和热硬性，最好的力学性能和切削加工性能，经验表明，在刀具的整个加热过程中，保温时间应占 $1/3\sim 1/2$ ，这有利于达到刀具的性能和技术要求。

工具钢的重复淬火是由于热处理过程中未能达到技术要求而进行的修复，但只有采取比较妥善的方法才可以减少因重复淬火出现废品的概率，重复淬火一种是零件未经退火处理直接重复淬火，另一种是将不合格零件退火后再进行重复淬火。将已经淬火的零件经过退火后，可以使钢在上一次淬火过程中对奥氏体已固溶的碳化物再次析出凝聚，故重复淬火后的晶粒不会过分长大，否则钢组织中的碳化物因重复淬火加热而使奥氏体固溶，造成晶粒更加粗大，对钢的韧性有极坏的影响。

需要注意的是，零件经过重复淬火后，产生了新的内应力，如果不经退火处理直接进行二次淬火常会出现淬火裂纹；另外由于零件经过多次加热和淬火，造成表面脱碳层的增加，即降低了表层的含碳量，零件淬火后不会形成马氏体而是珠光体组织，内部的马氏体和外部的珠光体比体积不同，致使零件表面受到强烈的拉应力而促使表层发生开裂。因此针对上述有可能出现的缺陷，应对需重复淬火的零件进行退火处理，同时要确保表面无氧化和脱碳现象，控制淬火温度和合理的加热时间是确保晶粒度合格的基础和前提，这一点务必引起热处理工作者的高度重视。经过处理的零件重复淬火后既可确保韧性、硬度符合技术要求，同时也可有效防止淬火开裂。

3.6.3 工具钢热处理时的基本思路

工具钢的热处理是最为困难的，由于其是加工工具，因此要求其具有高的硬度和良好的耐磨性，同时有足够的强度和韧性，且不产生淬裂、变形脱碳、软点等热处理缺陷，因此只有充分掌握各种工具钢的热处理特性，规定适当的淬火和回火的条件，才能提高工

具钢的稳定性和获得适于用途要求的良好强韧性的配合。具体的思路见表 3-39。

表 3-39 工具钢热处理条件的考虑思路和方法

热处理的类型	工艺参数	技术要求	选择热处理工艺的思路	具体的实施方案
淬火	加热温度	①耐磨性 ②耐热性 ③韧性 ④淬透性	①提高淬透性,提高热处理硬度 ②促进碳化物的固溶 ③防止晶粒的粗化 ④促进碳化物固溶和晶粒的长大	①进行高温淬火(控制 A') ②高温淬火(降低韧性) ③低温淬火(注意淬透性) ④高温淬火(降低韧性)
	冷却	①韧性 ②防止淬裂和变形 ③防止表面粗化 ④淬透性	①获得完全淬火的马氏体组织 ②进行均匀冷却 ③防止与空气接触 ④防止不完全淬火组织的形成	①进行快速冷却(急冷、油冷) ②淬火预热、热浴淬火等 ③在真空状态下或保护性、可控性气氛中冷却 ④采用冷却剧烈的介质
回火	加热温度	①耐磨性 ②耐热性 ③韧性	①提高热处理温度 ②稳定回火组织 ③降低硬度、稳定组织	①进行低温回火 ②对二次硬化钢高温回火 ③提高回火温度(注意避开低温回火脆性区)
	冷却	防止回火裂纹的产生	均匀缓慢冷却	采用慢冷、空冷等
	回火次数	韧性	稳定组织,降低残余应力	进行二次以上的回火

从工具钢的热处理特点来看,预先估计到可能产生的热处理缺陷,以便采取必要、合理的热处理工艺方法,把热处理缺陷控制在最小的范围内是十分重要的。工具钢的正火在于改善热加工钢内存在的粗大网状碳化物;球化退火可改善钢的切削加工性、调整晶粒度和碳化物、消除机械加工和焊接等工序造成的残余应力等,为最终的热处理做好组织准备;除应力退火则可以防止出现淬火开裂和变形;工具钢的淬火和回火确保获得要求的硬度和力学性能等,因此关注工具钢的加工和热处理是确保其质量合格的前提,对每一个

环节都要高度重视，只有这样工具钢的性能才能得到有效的保障。

本章介绍了零件在淬火过程中出现的几种主要缺陷，并进行了原因分析，材料的组织缺陷对零件的产品质量有重要的影响，因此对缺陷进行归纳和系统整理，能为防止和减少缺陷起到指导性的作用，将其列于表 3-40 中，供参考。

表 3-40 材料的组织缺陷对热处理产品质量的影响

缺陷名称	产生的不良作用	原因分析	预防或改进措施
残余奥氏体过多	<ul style="list-style-type: none"> ① 降低材料的强度极限、弹性极限、屈服极限 ② 影响材料的弯曲吸收功和扭转变形 ③ 10% 以下残余奥氏体对旋转弯曲疲劳极限有害 ④ 降低轴承钢滚动疲劳强度 	<ul style="list-style-type: none"> ① 钢中 C、Mn、Ni、W、Mo、V 等元素的含量增加，降低了 M_s 点，残余奥氏体量增加 ② 淬火温度高，会使奥氏体内碳和合金元素含量提高，奥氏体的稳定性增加，造成残余奥氏体量过多 ③ 在 M_s 点以上温度停留时间过长、冷却速度慢，使奥氏体稳定化 	<ul style="list-style-type: none"> ① 降低高碳钢的淬火加热温度 ② 在满足尺寸要求的前提下，尽可能地加快淬火冷却速度 ③ 对零件进行及时的冰冷处理 ④ 应在 300℃ 以上进行回火
表面脱碳	<ul style="list-style-type: none"> ① 降低钢的表面硬度、耐磨性以及零件的疲劳强度 ② 高碳钢脱碳后在淬火过程中造成表面和心部的比体积差 ③ 造成零件磨削裂纹的产生 	<ul style="list-style-type: none"> ① 钢在氧化性气氛中加热，造成脱碳现象 ② 钢在还原性氢气中加热至 700℃ 以上会产生 $[C] + 2H_2 = CH_4$ 的化学反应，引起强烈的脱碳作用 ③ 在未彻底脱氧的盐浴中加热 	<ul style="list-style-type: none"> ① 在可控气氛或保护气氛炉、真空炉等热处理设备中加热 ② 在脱氧充分的盐浴炉中加热 ③ 采用封箱加热
奥氏体晶粒粗大	<ul style="list-style-type: none"> 明显降低零件的冲击韧性，抗拉强度低 	<ul style="list-style-type: none"> 淬火温度高，保温时间长则奥氏体晶粒迅速长大。而钢的化学成分含有难溶解于奥氏体的细小的氮化物或碳化物，将使晶粒的粗化温度升高 	<ul style="list-style-type: none"> ① 采用含有 Al、Ti、Zr、Nb、Mo、W 等合金元素的奥氏体晶粒粗化温度高的材料或钢种 ② 在粗化温度下进行压力加工，采用形变热处理 ③ 采用正火处理细化晶粒

续表

缺陷名称	产生的不良作用	原因分析	预防或改进措施
铁素体晶粒粗化	强度极限和屈服极限降低,脆性转变温度上升	①在相变前奥氏体的晶粒度已经粗大 ②在临界变形区变形后再结晶造成晶粒粗大	①严格执行热处理工艺,获得细小的奥氏体晶粒 ②在临界变形区外进行冷变形
带状组织	沿轧制方向的伸长率、断面收缩率以及冲击韧性有所降低	①钢中合金元素的偏析引起带状组织 ②凝固时产生树枝状偏析	①采用扩散退火 ②进行锻造处理
过共析钢网状碳化物	使钢的冲击韧性降低,容易造成淬火开裂和磨削裂纹	①锻造和热轧后冷却过慢 ②退火和淬火的温度过高	①进行锻造和正火处理 ②进行球化退火处理
亚共析钢魏氏组织	钢的力学性能明显降低,尤其是冲击韧性下降	加热温度高,奥氏体的晶粒粗大,冷却速度过快,造成钢中游离渗碳体沿晶界析出,有的伸向内部形成魏氏组织	①严格控制钢材的加热温度 ②进行退火处理来消除魏氏组织
碳化物带状偏析	①造成力学性能局部差异 ②硬度不均匀,抗磨损性能差	钢锭中存在严重的树枝状偏析,沿轧制方向生成	①对坯料进行反复锻造,消除偏析 ②采用十字形锻造
过共析钢石墨化	①降低了钢的硬度 ②使钢的韧性变差	在 650℃ 附近退火,使部分渗碳体发生分解而形成石墨	①采用 A_{cm} 以上的温度进行正火处理 ②严禁在 650℃ 左右的温度区间内退火
奥氏体不锈钢碳化物析出	①降低了不锈钢的耐蚀性 ②容易产生晶界的腐蚀	完全固溶的奥氏体在 450~850℃ 温度下加热、焊接或在该温度下缓冷,使 $Cr_{23}C_6$ 类碳化物从晶界析出,晶界区附近奥氏体中铬的固溶量减少	①使碳化物完全溶解 ②降低钢的含碳量,使其在危险区也不能析出碳化物 ③加入与碳结合牢固的合金元素

3.7 实例分析

3.7.1 圆板牙的热处理及变形的控制

(1) 圆板牙的应用和材料的选择

圆板牙是用来加工外螺纹的专用工具，在切削过程中其切削锥部分必须有高的硬度、耐磨性，同时又要具有良好的韧性和强度。圆板牙属于薄刃工具，其韧部所受的冲击力不大，制造的材料其组织中含有均匀分布的细小合金碳化物颗粒，淬透性好，淬火应力和变形小，只有这样才能保证上述技术要求。综合考虑到诸多因素，9CrSi 钢为常见的合金工具钢，为过共析低合金工具钢，其主要化学成分为 C 含量 0.85%~0.95%，Cr 含量 0.95%~1.25%，Si 含量 1.20%~1.60%。该钢的合金元素中硅不与碳结合，它在相变点 A_{c1} 以上则完全溶入奥氏体，提高了过冷奥氏体在贝氏体转变区域的稳定性，故明显提高了该钢的淬透性，同时硅采用分级或等温淬火的工艺方法，既获得了高的硬度又减小了变形。

9CrSi 钢退火后，由于硅能防止淬火马氏体析出的合金碳化物的聚集和回火时的分解，因此使其具有一定的回火稳定性，资料 [4] 介绍，该钢在 250~270℃ 温度回火，其硬度仍保持在 60 HRC 以上，表现出在较高的切削速度和温度下，还具有良好的工作状态。可以知道 9CrSi 钢具有热处理变形小、良好的切削加工性及耐磨性和高韧性等特点。

个别资料推荐采用 T12 碳素工具钢，只是出于考虑到通常 M1 以下的小板牙由于加工仪器和仪表螺纹，在切削过程中不受冲击、螺纹尺寸小和切削力小。因此普遍采用 9CrSi 作为加工圆板牙的材料。

(2) 圆板牙的热处理工艺规范

一般圆板牙制造厂家的热处理工序为：预热→加热→检查硬度和金相→冷却→清洗→回火→检查硬度→清洗→发黑。

圆板牙热处理后的具体技术要求：基体平面硬度为 60~63

HRC；针状马氏体级别不大于 3 级；螺纹通规通、止规止，螺纹中径的变形量符合要求，即过端塞规全部通过；内螺纹表面无氧化和脱碳；发黑处理后为棕红色或棕黑色。

圆板牙热处理工艺的制定应依据材料的淬透性和晶粒长大的倾向、球化组织的级别和具体的技术要求等，选用符合要求的热处理设备。分析该钢的 C 曲线可知其淬透性时间小于 10s，故淬透性好。考虑到 9CrSi 钢中含有 Si 元素，故在加热过程中容易出现脱碳现象，因此圆板牙应在盐浴炉、可控气氛炉或真空炉中进行热处理，才能确保产品的技术要求。资料 [5] 介绍，淬火温度与晶粒度的关系见表 3-41。

表 3-41 9CrSi 钢的淬火温度与晶粒度的对应关系

淬火温度/℃	850~860	870~880	890~900
晶粒度（级别）	8	7	5

从表 3-41 中可知加热温度高，则奥氏体的晶粒粗大，力学性能变差，因此采用 850~860℃ 为宜。淬火冷却方式有分级淬火、等温淬火和油冷等，资料 [8,40] 介绍，圆板牙螺纹中径的膨胀量同冷却方法有直接的关系，为控制螺纹中径的变化量符合要求，在实际热处理过程中，采用分级淬火或等温淬火，表 3-42 为不同规格的板牙其淬火温度与分级温度的最佳工艺。从表中可知螺纹的直径大小与加热温度、分级淬火温度的关系。

表 3-42 不同规格的板牙其淬火温度与分级温度的关系

规格	M1~M2.5	M3~M5	M6~M9	M10~M14	M16~M24	M27~M36
加热温度/℃	860~870			850~860		
分级温度/℃	160~170	170~180	180~190	190~210		

注：分级和等温的冷却介质的成分为 50%KNO₃+50%NaNO₂，该冷却介质的熔点为 137℃，正常使用的温度范围为 160~220℃。在淬火冷却时，由于工件和工装带进大量的热量，为保持冷却槽内介质温度的稳定，控制好螺纹中径的变形量，必须在硝盐槽中放入冷却水套或循环水管。同时要捞渣或及时过滤，以免降低硝盐的冷却效果。常见的圆板牙的热处理工艺见图 3-58。

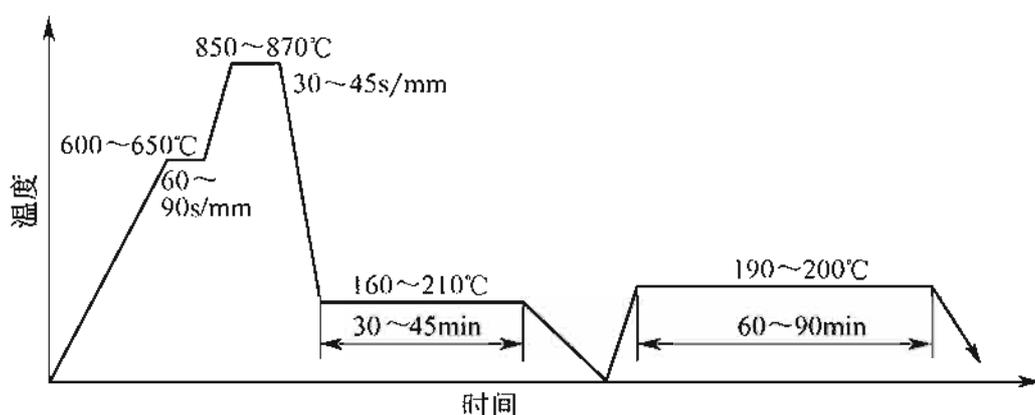


图 3-58 9SiCr 圆板牙的热处理工艺曲线

(3) 圆板牙的热处理变形规律

硝盐的分级和等温淬火的规律为：当加热温度不变时，介质温度越低（要高于 150°C ），螺纹的收缩越大；当分级和等温温度恒定时，加热温度越高（在工艺范围内），则螺纹越胀大。由此可见大规格板牙比小规格板牙的分级、等温温度高。

由此可见淬火加热温度对螺纹的变形有重要的影响，降低加热温度可明显减小螺纹中径的胀大变形量，变形的实质为由于加热温度的提高，使奥氏体中碳和合金元素含量增加，造成淬火后马氏体比体积增大和组织应力塑性变形增加，另外对其进行分级或等温淬火，可以保持圆板牙内外温度的均匀一致性，有利于减少螺纹中径的胀量。资料 [45] 介绍，提高加热温度，主导应力方向的胀大变形明显增加，尤其是超过一般加热温度（大于 870°C ），螺纹的胀量变形增加，一般为 $0.08\% \sim 0.18\%$ 。

(4) 关于控制螺纹淬火的几点注意事项

① 采用挂架加热时，不允许调整槽口向上，那样会造成板牙开裂和变形概率的增加。

② 对特大型板牙（ $\geq \text{M}80$ ）而言，尽管用最低的分级等温温度（ 150°C ），但螺孔依旧胀大（图 3-59），其原因在于板牙外层的冷却速度快，而内部冷却条件差，故外层首先收缩，对内部产生一定的压应力，加上内部有较高的温度，塑变抗力低，容易产生塑性变形，即造成表面大的部位向外伸展，而表面小的部位内缩。将板

牙放入 45 钢制作的淬火夹具套圈内（图 3-60），由于套圈大大减小了外圈的冷却速度，使圆板牙内螺纹和外圆的冷却差缩小，故减小了内应力的作用，因此控制了圆板牙内径的胀大。另外降低加热温度（860℃），分级温度增至 180~190℃ 时，内径的变形也可控制在要求的范围内。

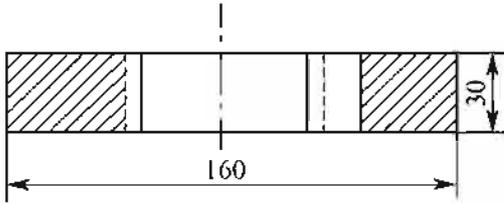


图 3-59 9SiCr 钢制造的大板牙

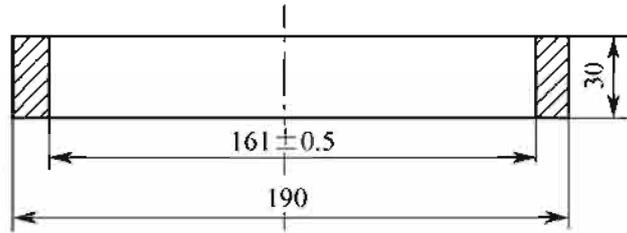


图 3-60 大型圆板牙用淬火套圈

③ 大直径的圆板牙中心组织性能比小直径的差，为减小螺纹的变形应降低淬火加热的温度。

④ 由理论分析，提高等温或分级淬火温度，可使圆板牙的螺纹中径胀大，反之起到缩小的作用。而在实际热处理生产过程中，大规格的螺纹中径缩小而小规格胀大，即大规格的等温处理温度高于小规格的等温处理温度。

(5) 高速工具钢圆板牙的真空热处理

目前国内外工具制造厂开始生产高速工具钢圆板牙，它比 9CrSi 材料的圆板牙具有更大的优越性，如硬度高、耐磨性好，切出的螺纹粗糙度好，因此有广阔的市场。但由于盐浴炉处理的螺纹变形大，螺纹尺寸很难保证（符合要求），笔者采用 HPV-200 型高压气淬真空炉处理的该类圆板牙与盐浴炉处理的结果见表 2-11。

由此可见，真空炉处理的高速钢圆板牙既保证了精度和尺寸的要求，又减小了热处理后的磨削加工余量，笔者将圆板牙的外圆直径和厚度的加工余量分别减少了 2/3，因此提高了生产效率和降低了成本，除此以外，处理的高速钢钻头、铰刀、拉刀、丝锥等其变形量在 0.10mm 以下，无需校直即可进行产品的磨削加工，极大地降低了工人的劳动强度，工作环境舒适。目前真空炉得到国内外工具制造厂的青睐，并日益发挥其重要的作用。

3.7.2 65Mn 金刚石圆锯片基体的热处理和变形的控制

(1) 金刚石圆锯片基体的应用和性能

随着人民生活水平的提高，室内外装饰越来越多的采用大理石材料，因此石材行业得到了迅速发展，石材、混凝土的切割、城市水泥和沥青道路的修补等均需要金刚石圆锯片，在切割过程中除了受到切削力、冲击力、磨损和摩擦力外，同时受到离心力的作用，出现锯片发热、边缘部分发生膨胀和松弛现象。

分析金刚石圆锯片的工作过程可知，在切割石材或水泥、沥青等硬质材料时，锯片受到冲击作用，因此基体必须具有一定的硬度和良好的韧性（刚性），一般选用 65Mn、50CrV 等材料制作基体材料。锯片应满足下列性能要求。

- ① 具有足够的强度和硬度，以保证锐利的切削能力。
- ② 具有较高的韧性、延展性及良好的适张度，确保切削平稳。
- ③ 锯片平整、变形量小，无凹凸、软点等缺陷。

(2) 金刚石圆锯片基体的热处理工艺

圆锯片基体的机械加工流程为：等离子切割→校平→加工工艺孔→车削外圆及平面→钻削给水槽→热处理→校直→精磨外圆及平面→精磨内孔→磨给水槽→电解标记→防锈包装。

对圆锯片基体的具体热处理技术要求为：整体硬度 38～43HRC；端面跳动不大于 1.2mm；平面跳动不大于 0.4mm；径向圆跳动不大于 0.08mm；基体无裂纹、无软点和软带；齿部无翘曲、毛刺等。

采用井式电阻炉、盐浴炉或可控气氛炉等加热，在碱浴中完成冷却，具体热处理工序如下：吊挂→箱式电阻炉加热→碱浴冷却→夹具校直→压紧回火→检查硬度和变形→校直。图 3-61 所示为金刚石圆锯片基体热处理工艺（以直径为 1584mm 的基体为例来编制热处理工艺）。

(3) 控制基体变形的措施

由于选用的加热和冷却设备的差异，在实际生产过程中工艺方

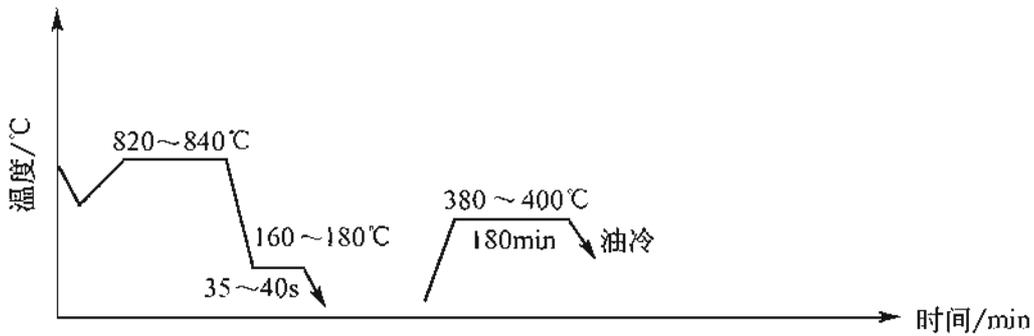


图 3-61 直径 1584mm 65Mn 金刚石圆锯片基体热处理工艺规范

法也各不相同，笔者根据自己设计的生产线制定了上述工艺。各项技术指标符合要求，同时免去了校直工序。工艺参数的选择基于以下几点。

① 加热炉为深坑式扁长型电阻炉，确保基体垂直均匀加热以减少变形。

② 碱浴介质的成分为 83% KOH + 14% NaOH + 3% H₂O，使用温度为 160~190℃，该冷却介质不易老化，有良好的冷却能力，避免软点和硬度不均等缺陷的出现，有利于得到均匀一致的组织。

③ 在碱浴介质中冷却 15s，立即放入竖立的夹板中，在冷却中利用热塑性原理使奥氏体转变成马氏体组织，加压后定型，整个基体变形符合要求，即端面的跳动不大于 0.20mm。

④ 将 15~25 片基体叠压在一起放入回火夹具中加压后，吊进深坑式扁长型电阻炉中回火，在回火过程中吊出拧紧螺母，回火结束后在油中冷却。

采用上述工艺方法，生产的锯片基体跳动量符合技术要求。有些厂家采用盐浴炉加热，单臂吊工位作业，油压机加压冷却等工艺，但劳动强度大、变形量不易控制，有时出现软点等，影响到基体整体硬度的均匀性。

需要引起注意的是，如果出现基体平面凹凸不平，直线度不符合要求，应当改善加热或冷却的不均匀性；而齿部翘曲则是冷却时夹紧速度慢，齿部的温度过低，已经发生了组织转变的缘故。

这里需要说明的是，20世纪90年代，全国锯片基体制造厂家大多采用普通的油冷淬火方式，虽然可以实现基体的热处理淬火硬度的要求，但在热处理过程中出现的最大问题是变形大，为解决这个难题，众多厂家在基体的油冷时间、出油温度、挤压方式等方面做了大量的技术工作，但仍存在以下问题：出油的温度控制比较困难，过高则硬度不足，过低则发生马氏体转变无法控制变形；采用在专用淬火压力机上进行淬火冷却，容易出现冷却不均匀现象，而且生产效率低等，因此众多厂家正倾向于碱浴冷却，一是可确保基体的硬度均匀，二是利用夹具可方便进行校直，三是冷却介质的寿命长。由此可见，控制零件热处理变形的措施应从变形产生的机理、热处理手段、冷却方式以及回火过程等几个方面着手，并经过实际的操作才能确定最佳的热处理工艺，笔者采用的碱浴淬火也正是反复试验的结果。

3.7.3 高速钢拉刀热处理变形的控制

(1) 拉刀的作用和工作条件

拉刀为一种低速切削内孔和外孔的刀具，为多刃阶梯形带齿工具，每齿都有独立的切削作用，是一种高效率的切削加工刀具，可以成批加工零件的内孔。在工作过程中要承受较高的切削性能、摩擦力一定的冲击力作用，因此拉刀具有高的耐磨性和红硬性，同时有较高的力学性能，其结构见图3-62。

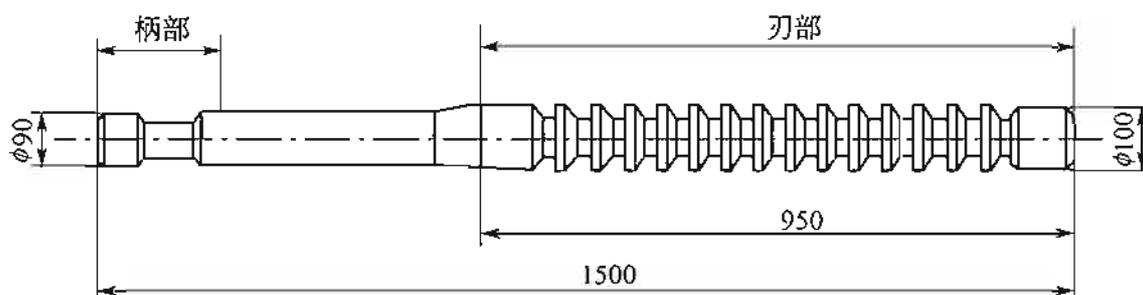


图 3-62 高速钢圆拉刀的结构

根据拉刀的工作状况，采用高速工具钢制作符合其技术要求。热处理后切削齿和精切齿的硬度为 63~67HRC，前后导向部分硬

度大于 55HRC，拉刀夹持部分即柄部为 40~52HRC。拉刀是典型的细长零件，在机械加工和热处理过程中，存在应力的作用，因此在粗加工和精加工之间应安排除应力退火： $600\sim 650^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$ ，保温结束后随炉缓冷至 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷。在热处理中采取必要的工艺措施和手段，确保拉刀的变形符合技术要求，故对拉刀热处理后的变形量有严格的规定。

(2) 拉刀的热处理工艺和变形的控制

拉刀的热处理工序为：装卡→一次预热→二次预热→加热→冷却→热校直→清洗回火→热校直→回火→柄部处理→清洗→检查→表面处理。根据拉刀具体热处理过程中的技术要求，来合理确定最佳的热处理工艺参数。

拉刀的校直主要采用热校直工艺，拉刀切削加工时发热量不大，因此对红硬性要求略低，淬火加热温度可比铣刀、滚刀等降低，这样也有利于控制拉刀的变形。拉刀的长度与直径的比值在 20 以下，因此根据拉刀的工作特性，热处理过程中的变形是影响质量的关键，如何合理控制是热处理工作者的重要任务。

拉刀的预热可采用箱式电阻炉（或井式炉）和中温盐浴炉进行，要求垂直吊挂加热，最后加热在高温盐浴炉中进行，拉刀的高温回火在硝盐炉或电阻炉中进行。为了更好地防止零件的加热变形，在粗加工后进行除应力退火是控制拉刀变形的重要手段。

① 预热。按拉刀的直径不同可分为一次和两次预热，目的是消除机械加工时的车削和磨削应力，确保拉刀内外温度的均匀，有利于减小拉刀的淬火变形。预热温度分别为 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ 和 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，预热时间按最后淬火加热时间的 3 倍和 2 倍计算。需要注意拉刀的装炉量与吊挂方式，避免出现人为的变形等。

② 淬火加热。拉刀的晶粒度应控制在 9~10 级范围内，加热系数为 $8\sim 15\text{s/mm}$ ，拉刀的热处理工艺参数见表 3-43。

表 3-43 不同材料拉刀的热处理工艺参数

拉刀直径/mm	加热温度/°C			加热时间/min
	W18Cr4V	W9Mo3Cr4V	W6Mo5Cr4V2	
≤10	1270~1280	1240~1250	1210~1220	2.5
>10~25				3.5~4
>25~35				4.5~5.5
>35~50				6~7
>50~80				7.5~10
>80~110				11~12.5
>110~130				13~14.5

注：在保证晶粒度的前提下，尽可能取工艺的下限温度，温度越高则拉刀的脆性增加，将降低其切削性能，也不利于对拉刀的校直。

③ 采用分级淬火或等温淬火。拉刀加热结束后立即放在 580~620°C 的盐浴中冷却（简称 235 盐）一段时间（与淬火加热时间相同），待整体温度达到 650~700°C 时，转入 220~250°C 的硝酸盐中保温 30~40min。分级淬火有利于拉刀表面和心部温度的均匀一致，空冷时组织应力减弱，使轴向和径向的变形量减小。如采用热油进行冷却，一是冷却过快，难以掌握拉刀表面的温度，二是热应力和组织应力大，产生明显的弯曲变形，因此建议杜绝采用该类淬火介质。

④ 热校直。快速从 350°C 的硝酸盐分级盐浴中取出后，将拉刀立即擦拭干净，测出弯曲最高点，在螺旋压力机上进行校直，由于拉刀为刃口工具，因此加压时在刀刃上衬木块或铜片等，考虑到拉刀冷速太快，因此要在不低于 200°C 的温度下校直，为防止其反弹，应采取压过的工艺措施。资料 [53] 介绍，对跳动大于 1mm 以上要轻压，不到 0.5mm 可以将两端支承横卧，凸面向上，利用自重校直。对跳动在 0.5~1mm 的拉刀，两端支承利用自然变形进行校直，如果继续上凸则压力校直。

⑤ 清洗回火。开水槽煮净拉刀表面的残盐，拉刀垂直向上插入圆形回火筐中挤紧回火，高温回火在 100% KNO₃ 溶液中进行。回火工艺为 540~560°C × 80~100min × 3 次。

⑥ 热校直。将出炉后的拉刀在手动压力机上校直，一般是表面温度 400°C 左右开始加压校直，冷到室温卸去压力。对于变形大的拉刀可采用回火加以补救，将两根变形的拉刀凸面相靠，两段用铁环定位，用螺栓拧紧后中间塞紧斜铁，然后一起放在回火炉中回火，加热一定时间后取出，根据变形量的大小再次拧紧螺栓，放进回火炉内继续回火较长的时间，也可收到良好的校直效果，高速钢拉刀的回火校直具体见图 3-63。

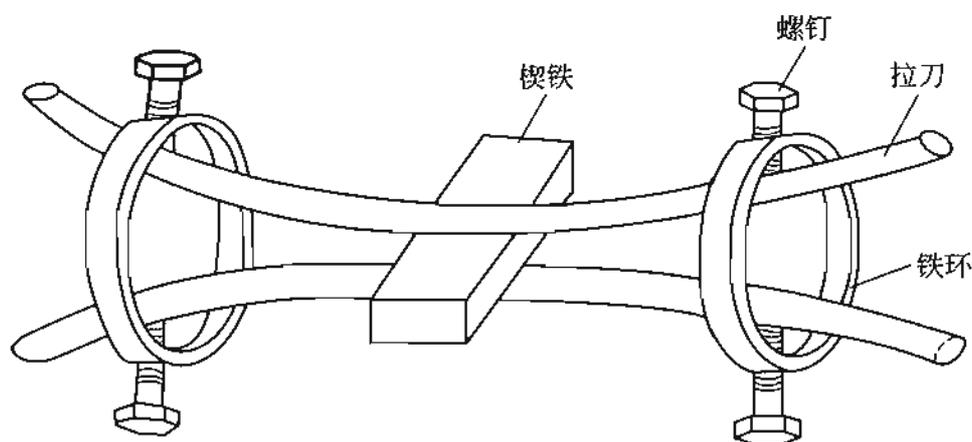


图 3-63 高速钢拉刀的回火校直示意

⑦ 柄部处理。将柄部在 850°C 的盐浴炉中加热到表面颜色与盐浴一致时，挑出后进行油冷或空冷。另外也可借柄部来校直拉刀，将导向部分压弯来满足减少刃部偏摆的要求。对于热处理后仍有弯曲的部位可采用冷击凹处的校直方法，常见的 W18Cr4V 拉刀的热处理工艺曲线见图 3-64。

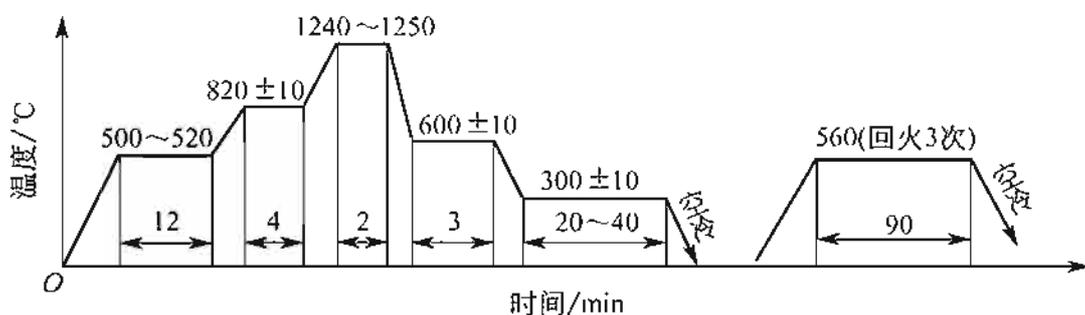


图 3-64 W18Cr4V 拉刀的热处理工艺曲线

应当注意对于高速钢拉刀而言，原材料内部的碳化物较多，带状组织分布比较明显，在淬火过程中会出现沿带状碳化物方向的拉伸塑性变形，因此作为刀具的带状碳化物应符合相关的技术要求，才能够控制拉刀的热处理变形。

拉刀采用了分级等温淬火减弱了马氏体转变时组织应力的作用，同时也减弱了在冷却过程中带状碳化物对周围奥氏体的拉伸应力的作用，从而使淬火的变形量减小，因此也有利于进行拉刀的校直，趁热校直就是利用热塑性的原理，它同时充分利用热塑性和相变超塑性效应的作用，达到控制拉刀变形的目的。

资料 [61] 介绍，对拉刀采用“奥氏体稳定化校直法”或“半贝氏体等温淬火法”，对于控制其变形量具有明显的效果，该方法的工艺流程为：淬火→校直→回火→尾部调质处理→清理（或清洗）→校直→发蓝处理→检验。该方法具有废品率低、操作周期短、便于操作等特点，不仅有利于减小变形，而且一旦出现变形也容易校直，即使在冷态下也不会断裂。

(3) 拉刀热处理工艺的探讨

拉刀在热处理过程中除控制其变形外，还要注意以下问题。

① 检查原材料表面有无纵向（或横向）裂纹，如有则在粗加工时必须车去，否则会在淬火过程中造成裂纹的扩展，或产生淬火裂纹，导致拉刀的整体报废。

② 盐浴炉要认真脱氧，将氧化物的含量控制在（主要指氧化钒）不大于 0.5%，防止拉刀刃口出现表面脱碳或贫碳现象。

③ 为提高拉刀的寿命，拉刀制造企业对拉刀进行 PVD 氮化钛物理气相沉积，可明显提高拉刀的使用寿命（3~5 倍）。

3.7.4 塞规淬火裂纹及其控制

无论是光滑塞规还是螺纹塞规，都是用于测量内孔或内螺纹的专用量具，要求具有高的硬度和良好的耐磨性，需要经过长时间的时效处理，确保基本消除塞规的内应力作用，使塞规在使用

和放置过程中可保持尺寸的稳定，通常选用的材料为 T10~T12 等碳素工具钢，技术要求为工作部分硬度 58~62HRC，塞规的手柄采用滚花以增大粗糙度，有利于操作者对塞规的夹持和操作。

塞规的热处理工艺流程为：加热→冷却→检查→回火→发黑处理。在中温盐浴炉中加热 770~800℃，保温时间为 6~10min，手柄部分直径较细，采用整体水淬油冷淬火方式，如水中停留的时间控制不当，则柄部容易产生淬火裂纹，具体见图 3-18。

塞规柄部表面滚花淬火冷却时，该部位有细小的沟槽，造成冷却速度加快，表面发生组织的转变，热应力和组织应力增大，而内部冷却较慢，造成表面存在拉应力而内部为压应力，故造成手柄滚花处的开裂。

从塞规手柄的裂纹进行分析，塞规要求工作部分的硬度高是正确的，这是对它的基本要求，而柄部则完全可以不淬火处理。因此考虑到采用局部或表面硬化即可满足使用性能的要求，则建议不要采用整体淬火，如改用工作部分进行热处理，即对塞规的工作部分进行淬火，可满足要求，同时也有效避免了淬火裂纹的发生。当然如果更换为合金工具钢或高速工具钢等，完全可以整体淬火处理，则由于其淬透性高，采用油冷或盐浴分级淬火既可保证获得要求的硬度，又不会出现柄部的开裂，因此针对零件出现淬火开裂问题，要根据对零件的技术要求、材料的选择、冷却介质和方式进行综合考虑，必要时可进行金相检验，从影响产品质量的六大因素着手，分析查出产生裂纹的根源。

3.7.5 柴油机摆臂轴淬火剥落裂纹和防止措施

柴油机摆臂轴采用 45 钢制作，热处理技术要求为整体硬度为 50~55HRC，马氏体级别小于 3 级，回火充分。具体热处理工艺为：在 820~850℃ 的中温盐浴中保温 7~8min，冷却介质为温度在 30℃ 以下 10% 的氯化钠水溶液，回火工艺为在 200~240℃ 硝盐溶液中保温 60~90min。热处理后发现，在半径 2.5mm 与圆柱面的

交接处出现开裂而剥落，具体见图 3-65。

出现缺陷的原因应从摆臂轴整个机械加工的流程进行分析，半径 2.5mm 与圆柱面交接处采用车削加工手段，由于原材料在加工后（边缘处）产生严重的加工应力（内应力），而在淬火前又未及时消除，在热处理过程中边角处产生裂纹，因此导致表面的剥落。

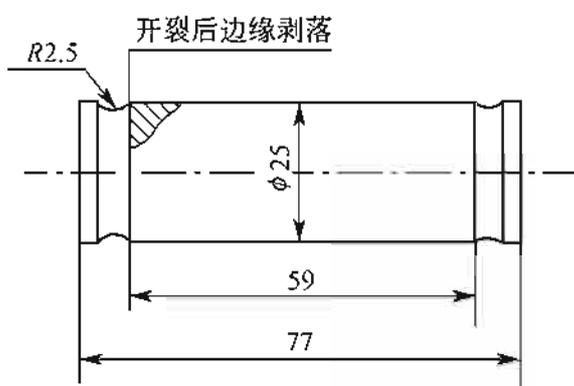


图 3-65 柴油机摆臂轴淬火剥落裂纹

如果摆臂轴在切削后进行 550~600℃ 的去应力退火处理，彻底消除加工造成的残余应力，则完全可以避免棱角、截面变化大的零件淬火裂纹的产生。也可采用表面淬火处理，例如高频淬火，避开容易产生质量缺陷的部位。因此要充分考虑零件的机械加工过程可能对热处理变形和开裂的影响，尤其是对于薄壁、尖角、形状不对称、形状复杂、键槽、中心孔等，既要在零件的设计中尽可能的避免，也要采取一些必要的防范措施（例如预冷、保护等），只有这样才能确保零件热处理后符合技术要求。

零件热处理前的原始组织状态和应力状态对零件的热处理质量有重要影响，一般零件在加工前应进行预备热处理（如退火、正火、调质处理等），为热处理提供合格的组织和为淬火做好准备，从而确保其基体的组织符合零件热处理的技术要求，同时改善零件应力状态，降低产生缺陷的因素。事实证明，对于形状复杂、截面突变、精度要求高、变形要求严格的零件，在热处理前或粗加工和精加工序间增加除应力退火工序是十分必要的。另外合理安排零件的工艺路线，即确定预备热处理、机械加工和热处理等工序的位置，是减少热处理过程中变形和开裂的一个有效的方法和措施。

第 4 章

回火过程中产生的缺陷及其对策

4.1 硬度不足

硬度不足是指零件经过热处理后的硬度没有达到工艺文件或标准的要求，出现该类问题的情况十分复杂，从零件热处理本身的角度出发，除混料外，应从影响产品质量的六大因素入手，对与零件硬度有关的参数逐一分析，找出原因和根源，避免硬度缺陷的发生。一般热处理质量问题应当从以下几个方面进行分析和探讨。零件的热处理分为加热和冷却两个基本过程，在加热阶段加热速度、加热温度和保温时间是重要的工艺参数，而在冷却阶段冷却介质的冷却温度、特性和冷却时间直接影响零件硬度整体的均匀性，因此对上述几个重要的工艺参数要严格控制 and 把关，排除一切影响硬度不足的问题，使零件热处理后的硬度均匀一致，提高零件的使用寿命。

4.1.1 加热温度和保温时间的影响

零件在热处理过程中因选用的淬火加热温度偏低或保温时间短，造成零件的加热不足，奥氏体成分未均匀化，碳化物溶解不良等，都将导致零件淬火后的硬度不足。因此根据零件选用材料的特性、热处理的技术要求、化学成分（尤其是合金元素的含量）、零件的形状、装炉量和装炉方式、热处理炉的加热方式、炉内温度的均匀性以及有无保护涂料等，进行合理选择加热温度和保温时间，必要时采用正交法确定工艺参数。图4-1所

示为手用碳工钢丝锥在加热温度低或保温时间短情况下的显微组织。

从图 4-1 中可以看出，由于加热温度低或保温时间短，使钢中的珠光体转变为奥氏体，而铁素体仍被保留下来，奥氏体淬火后转变为马氏体，此时的铁素体也呈现为蚕食状。当亚共析钢因加热速度快或保温时间短时，将会造成形成的奥氏体的含碳量不均匀，淬火后形成黑白相间的马氏体，具体见图 4-2。其中因为奥氏体含碳量不均匀，原来铁素体网络处含碳量比较低，故淬火后形成的马氏体含碳量低。而低碳马氏体的 M_s 点较高，具有自回火现象，因此其为黑色。含碳量较高的奥氏体淬火形成未被回火或回火程度轻微的片状马氏体，呈现较白的颜色。

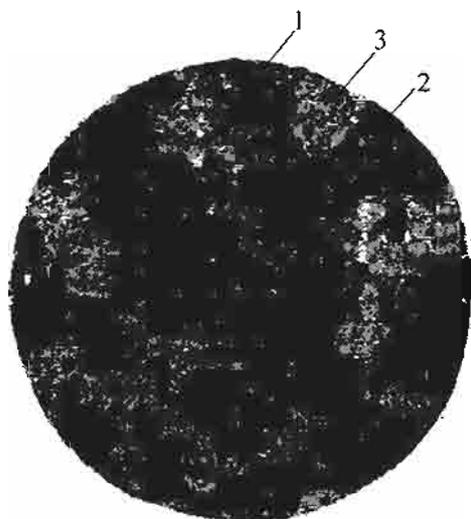


图 4-1 T12A 手用丝锥加热不足显微组织 ($\times 320$)

1—细针状马氏体；2—淬火托氏体；3—珠光体

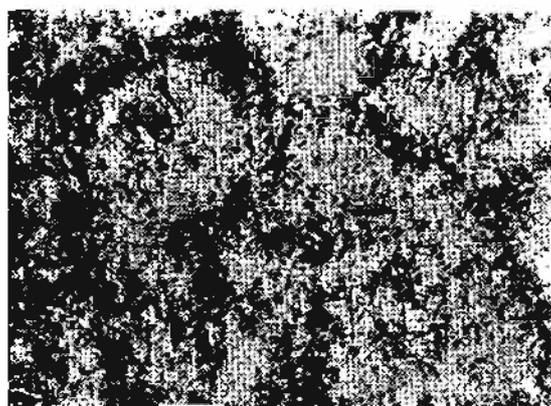


图 4-2 亚共析钢淬火黑白相间的马氏体

4.1.2 回火温度的影响

零件的回火温度高于正常要求的温度，造成马氏体的分解而降低了硬度。对高速钢而言，一般是回火温度低于要求的 $540 \sim 560^{\circ}\text{C}$ 的温度，而在 $300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 进行了回火，无二次硬化现象出现，造成零件的整体硬度低于热处理的要求；如果在 580°C 以上进

行高温回火，也将造成硬度的不足等。因此根据零件的具体硬度和组织的性能要求，并进行具体的实践，才能得出正确的热处理工艺参数。

对高合金钢而言，零件内部合金元素增多，形成了大量的合金碳化物，在冷却过程中其具有高的淬透性，因此可得到较多残余的奥氏体组织。只有通过回火或2~3次的高温回火，才能使未转变的残余奥氏体组织转变为马氏体，提高零件的硬度。

零件回火不足也是硬度不符合要求的一种缺陷，马氏体淬火组织未充分转变为回火马氏体，淬火后残余奥氏体仍存在于基体中，由于残余奥氏体具有较好的塑性和韧性，因此它造成硬度的不足，因此对于该缺陷应进行重新淬火和回火，即可达到零件的热处理硬度要求。资料 [40] 推荐，根据零件的大小、材料和具体的技术要求等确定回火时间的长短，基本原则为使组织完全发生组织转变，减小内应力，确保组织尺寸的稳定。

4.1.3 冷却速度、冷却介质以及化学成分的影响

零件出现硬度不足同冷却不当有直接的关系，零件加热结束后至淬火前的预冷时间长；冷却介质选择不当，冷却介质的温度控制超出工艺要求，介质中混有杂质等，将导致其冷却性能的降低；另外零件在加热过程出现氧化脱碳现象，表面存在氧化皮或黏附盐渣等；零件在冷却介质中时间短，零件提出介质的温度仍然过高，将导致过冷的奥氏体组织在C曲线的珠光体转变区域分解，形成了托氏体和铁素体的混合组织，造成基体硬度不足。

由于零件冷却后仍存在大量的残余奥氏体组织，造成零件淬火后的基体组织硬度降低，除上述的原因之外，还应考虑零件原材料的化学成分，残余奥氏体的数量与奥氏体的化学成分有关，尤其是含碳量的影响十分显著。资料 [33] 介绍，钢中奥氏体的碳含量在0.5%~0.6%，可观察到淬火组织中残余奥氏体，碳含量越高则残

余奥氏体的数量越明显，体积分数为 20% 的残余奥氏体将使淬火后的硬度降低 8.5HRC，可见控制零件淬火后残余奥氏体的数量，是热处理冷却过程中确保硬度合格的关键。因此在实际热处理过程中，应充分考虑到这一点，采用合金钢则提高了材料的淬透性，冷却后残余奥氏体的数量反而减少，不会出现零件硬度不足的现象。

4.1.4 零件表面脱碳

零件使用的原材料本身具有较厚的脱碳层，在机械加工过程中没有去掉；或者在热处理加热过程中或冷却过程中出现了表面氧化脱碳现象，零件表层的碳含量低于内部，在冷却过程中表面形成了低碳马氏体组织，而内部获得了要求的硬度，因此内外组织中碳含量存在差异，造成了淬火后表面硬度的不均。

在第 2 章中，重点介绍了零件产生氧化脱碳的机理和需要采取的保护或防范措施，在实际的热处理过程中要认真对待，表面脱碳后不仅降低了表面的硬度，造成内外变形量不同，而且影响到零件的使用寿命，降低力学性能，造成零件的早期失效，因此要避免此类缺陷的出现。一般挽救的措施一是将脱碳层去掉，二是进行复碳处理，可根据零件的实际工作和加工状态合理选择。

4.2 硬度偏高

零件在热处理后检查硬度超过工艺（图纸）或标准规定的上限硬度值，不符合要求即为硬度偏高。在材料的化学成分确定的前提下，按照编制的热处理工艺进行零件的处理，除了出现硬度不足的情况外，另一种为硬度高于要求的范围。因此认真分析其产生的原因，采取有效的技术措施和控制手段，可以完全避免此类缺陷的产生。

零件回火后出现硬度偏高，应从材料淬火后的硬度加以考虑，

同时结合其具体的硬度要求、工作的特点和服役条件等几个方面，从影响硬度的主要因素入手，围绕着可能起到关键作用的条件，程序化和系统化地进行正确分析和判断硬度高的根源，只有这样热处理工作者才能为零件的热处理质量把好关，为生产出优质的产品提供保障。

一般而言，碳钢和碳素工具钢、低合金钢和低合金工具钢热处理后硬度高，其原因如下。

① 材料的含碳量或合金元素的含量高于标准的上限要求，淬火后硬度明显偏高，按正常的温度回火则出现硬度高。

② 材料的成分正常，而在回火时温度过低或时间过短，淬火马氏体未完全转变为回火马氏体，组织中存在残余奥氏体，造成硬度的偏高。

③ 控温仪表出现故障，指示温度高于实际要求的温度。

对于高合金钢或高速工具钢而言，由于合金元素含量高，因此其与碳结合形成了大量的碳化物，回火后的硬度相对较高，明显提高了零件的耐磨性和红硬性，常用来制作模具和刀具等。该类钢种如高铬合金工具钢（3Cr2W8V、Cr12、Cr12Mo、Cr12MoV等）和高速工具钢（W18Cr4V、W9Mo3Cr4V等）的淬火温度高于1000℃以上，此时溶解了大量的合金碳化物，因此在高温回火过程中，形成了特殊的碳化物而发生“二次硬化”现象，高合金钢或高速工具钢等淬火后残留的奥氏体较多，且十分稳定，其中一部分残余奥氏体在回火后未充分分解，但冷却后转变为马氏体，使零件的硬度升高。因此回火后硬度高于淬火的硬度值。回火后硬度高于要求的原因可归纳为以下情况。

① 同种材料的淬火温度不同，而回火后硬度要求一致，则势必造成高温淬火的零件回火后硬度高。

② 回火温度规定错误，零件在二次硬化区进行回火，势必造成硬度的提高，因此应避开此温度回火，通常高速工具钢在540~560℃回火将达到硬度的最高值，对要求硬度不是很高、韧性较好的零件可采用570~600℃的温度回火。

③ 零件淬火后应进行低温回火处理，而工艺编制错误，实际进行了高温回火，产生了“二次硬化”，造成硬度高于工艺的要求。

笔者处理过一批气门用锻造上模，材质为 3Cr2W8V，要求硬度在 50~55HRC（一般为 46~50HRC），通常采用 1080~1100℃ 加热，静止机械油冷却，采用普通 570~580℃ 回火，则基体硬度在 50HRC 以下，难以获得要求的硬度。根据锻模的工作特点和硬度要求，制定了预热、加热、冷却和回火的热处理工艺：500~550℃ × 90min + 800~850℃ × 25~30min + 1130~1150℃ × 15~20min，油冷至 200℃ 出油空冷（锻模整体冒青烟而不起火）后立即放进 200~300℃ 的炉内进行时效处理，回火工艺为 610~630℃ × 6h 二次回火，热处理后的硬度符合技术要求，同时明显提高了上锻模的使用寿命，其红硬性、耐磨性以及抗咬合性效果显著，不失为一种延长气门锻模寿命的良好措施和工艺方法。

4.3 回火裂纹

回火裂纹是指淬火后的零件在随后的回火过程中，零件上有锐角、棱边、凹槽等，由于热处理工艺参数不当（例如回火介质、回火温度、保温时间、加热速度和冷却速度等），回火后急冷或加热过快，或组织变化而发生的裂纹，通常回火裂纹产生于应力集中处。资料 [42] 介绍，零件淬火后长时间放置、回火温度过快以及回火温度不均匀等，表面体积的收缩和二次淬火是造成零件出现回火裂纹的根源。体积的收缩多体现在高碳钢和高合金钢中，快速加热时零件表层马氏体中的碳逐渐析出，造成体积的收缩，表面产生了拉应力的作用，故加热速度应缓慢；而二次淬火时其出现在回火过程中，残余的奥氏体向马氏体转变，此过程如同淬火一样，因此冷却时速度不要太快。

回火裂纹一般多出现在高速钢和高合金钢中，这类钢具有回火脆性，在回火脆性温度区间内回火，会产生回火脆性，将在随后的

校直和使用过程中开裂。其原因在于零件已经全部转变为马氏体组织，快速加热、快速回火或相变化而发生淬火裂纹。如表面脱碳马氏体中的碳含量大大降低，表层体积收缩，表面受到很大拉应力作用而导致开裂。回火裂纹有两类，即快速回火裂纹和自回火温度快速回火裂纹。

由低温快速加热出现的回火裂纹特征为：回火裂纹与纵向垂直或呈直角时，裂纹浅，形状与磨削裂纹相似。回火后快速冷却的裂纹与淬火裂纹一样，图 4-3 所示为其两种形态。

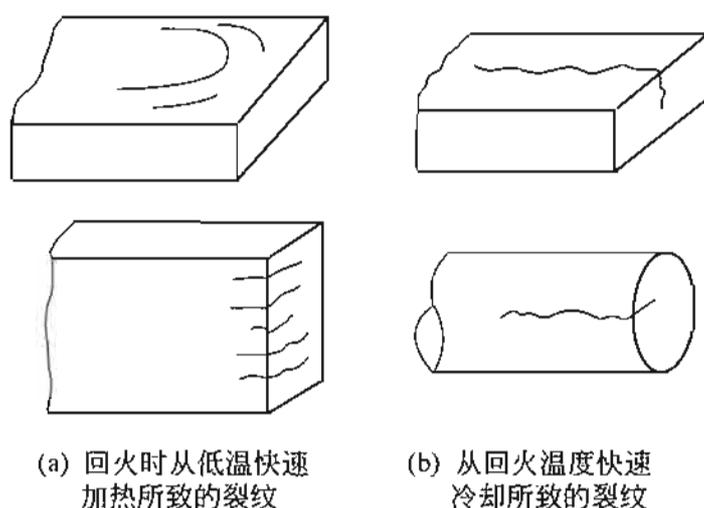


图 4-3 回火裂纹的两种形态

同时需要指出，假如零件表面出现脱碳层，表面形成了低碳马氏体，造成表面的收缩。而内部形成的马氏体膨胀，这样表层产生很大的拉应力作用，出现网状开裂，因此对于出现的脱碳层，应在回火前将其磨削掉。

在回火后的冷却过程中，残余奥氏体仍然向马氏体转变，如果冷却速度过快，则形成的马氏体膨胀，形成表面裂纹。

因此零件在回火过程中，加热速度要尽可能地慢；对于有脱碳层的零件，在热处理前要去掉，要采取可靠的保护措施，避免零件表面氧化和脱碳现象的发生；回火后要缓慢冷却，如有必要可在炉内冷却。因此掌握好回火工艺参数，是确保零件性能合格的重要条件和前提。

4.4 回火脆性

钢在淬火后进行回火的过程中，随着回火温度的提高，钢的基体硬度和强度降低，而塑性和韧性得到提高和改善，但在某一温度范围内回火时，出现韧性随回火温度的升高而存在低谷或降低的现象，这种现象称为回火脆性。一般脆性是由于回火温度偏低或回火时间不足造成的，可采取选择合理的回火温度与充分回火加以预防和补救。图 4-4 所示为结构钢的回火脆性。

在普通镍钢和铬钢中，回火脆性十分明显。钢在回火过程中，可能发生两种类型的脆性：一种脆性通常在 200~400℃ 回火温度范围区内，时间越长则越明显，而与回火后的冷却速度无关，通常在碳钢和合金钢中出现，该类回火脆性即使回火后快冷或重新加热回火均无法避免，称为第一类回火脆性，也称不可逆回火脆性、低温回火脆性或马氏体回火脆性等。另一种脆性发生在某些合金结构钢中，为直接在 450~550℃ 温度区间加热回火或高于 600℃ 回火而在 450~

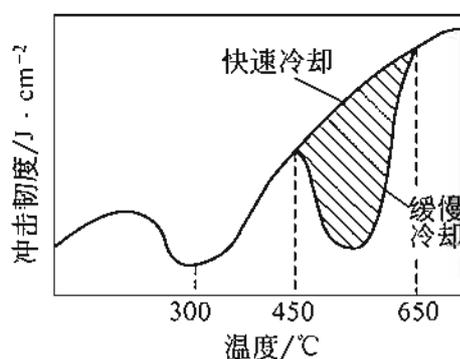


图 4-4 结构钢的回火脆性示意

550℃ 区间内缓慢冷却，与保温时间无关，而与冷却速度有关，对于这类脆性的消除方法是重新加热到 600℃ 以上，迅速冷却可予以消除，这种脆性为第二类回火脆性，又称为可逆回火脆性、高温回火脆性或回火脆性等。

(1) 第一类回火脆性

钢铁零件淬火后的夏比冲击功随着回火温度的变化曲线在第一类回火脆性区出现了低谷，钢的力学性能指标对第一类回火脆性有不同的敏感程度，同时与加载方式有关。应当注意，如零件存在应力集中、承受的冲击或扭转载荷较大，而要求较大的塑性和韧性配合时，则第一类回火脆性的出现将增大零件脆性

开裂的危险性，因此是一种热处理缺陷。该类缺陷补救措施为按热处理工艺规范重新淬火，一般认为是由于马氏体分解出碳化物，从而降低了晶界的断裂强度，避开回火脆性区。适当提高材料中硅的含量可降低低温回火脆性，这一点在材料的选择上要认真考虑。

(2) 第二类回火脆性

第二类回火脆性主要产生于含铬、镍、锰、硅等合金元素的合金结构钢中，由于晶界上富集了铈、磷、锡、砷等杂质元素，故加强了晶界的脆性造成回火脆性。该类钢具有的特点如下。

① 淬火钢在脆性温度范围内（500~650℃）回火或缓慢通过时，即会出现回火脆性，停留或保温时间越长则脆化现象越明显。

② 导致零件在室温下冲击值的明显下降。

③ 回火脆性与回火后的冷却速度有关，迅速冷却可抑制或减弱脆性。

④ 该类回火脆性是可逆的，对于产生脆性的钢重新高温回火后快冷可消除脆性，而对已经消除回火脆性的钢在脆性温度范围内回火，又将出现回火脆性。

⑤ 该类回火脆性将造成钢沿晶界脆断。

第二类回火脆性的抑制和防止措施如下。

① 在钢的冶炼过程中，减少钢水中 P、Sb、Sn、As 等有害杂质的含量，防止其在晶界的偏聚。

② 向钢中添加 0.2%~0.5% Mo 或 0.4%~1.0% W 元素，Mo 用来减缓 P 等杂质的元素向晶界的偏聚和扩散，或选用含 Mo 或 W 的钢种，两种元素通过阻止杂质元素的扩散而削弱它们在晶界中的富集。

③ 高温回火结束后快速冷却，或尽量缩短零件在脆性温度下的停留时间以及回火后快冷。

④ 采用不完全淬火或两相区淬火，可获得细小的晶粒，减轻

和消除回火脆性，另一方面是杂质能够集中于铁素体内，避免了向晶界的偏聚。

⑤ 进行奥氏体晶粒的细化。

⑥ 采用高温形变热处理，可消除钢的回火脆性，从图 4-5 中可以看出作用比较明显。

⑦ 零件进行长时间渗氮处理时，应选用回火脆性敏感程度较低的钼钢。零件的气体渗氮是在 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围内进行的，时间长 ($40\sim 70\text{h}$)，渗层较厚，通常为 $0.3\sim 0.6\text{mm}$ 。氮化用作要求耐磨性好、疲劳强度高的精密零件的热处理工艺，但需要注意的是为了降低零件的表面脆性，在达到要求的渗层后，应进行退氮处理 ($540\sim 560^{\circ}\text{C}\times 2\sim 3\text{h}$ ，氮的分解率在 80% 以上)，这一过程是十分重要的环节，否则将造成零件的早期失效，直接影响到零件的正常使用。

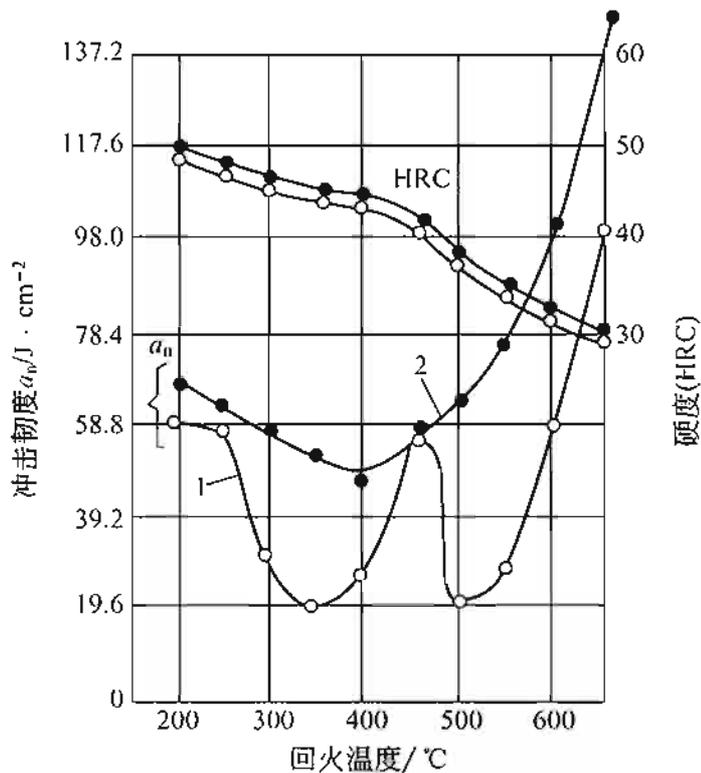


图 4-5 40CrNi4 钢的冲击韧度随回火温度的变化关系

1—一般的淬火工艺；2—高温形变热处理

4.5 实例分析

(1) M56 高速钢丝锥热处理回火硬度不足

该大型机用丝锥材质为 W9Mo3Cr4V，经过淬火和回火后，丝锥方尾和端面的硬度值为 58~60HRC，不符合 63~66HRC 的技术要求，需要进行球化退火后，才能进行重新返工处理。

经过对仪表记录和丝锥实物的检查，发现其淬火的温度低于规定的温度（要求 1210~1230℃，实际上为 1190℃），晶粒度在 10.5~11 级，细于工艺要求的 9.5~10 级，组织中存在部分未溶解的碳化物，表明淬火的温度低，碳化物溶解较差，另外丝锥在进行分级淬火时（50%BaCl₂+30%KCl+20%NaCl）的温度为 640~650℃，高于规定的 560~590℃的分级温度。因此造成碳化物的部分分解，影响了丝锥高温回火后的产品硬度。最后对该批丝锥重新进行球化退火，在脱氧彻底的盐炉中进行，退火后的硬度在 250HB 以下，第二次淬火的温度与第一次淬火温度基本一致。返工丝锥的硬度为 63~65HRC，符合技术要求。

(2) 高速钢滚刀产生的回火裂纹

笔者在对高速钢（W6Mo5Cr4V2）滚刀在冬季进行正常的盐浴淬火后，将整筐滚刀清洗干净转入高温回火炉回火，进行三次高温回火后，冷至室温后检查硬度和晶粒度时发现滚刀的齿根处有裂纹，造成本批滚刀全部报废。

检查滚刀的金相组织和硬度，晶粒度为 9.5~10 级，回火充分，没有粗晶现象，表面温度和加热时间符合工艺要求。对裂纹处进行检查，裂纹两侧晶粒均匀，无氧化脱碳，材料本身无偏析，组织正常。

通过以上分析可以看出，回火裂纹的产生同回火过程中快速冷却有关，调查中发现，为了缩短滚刀二次回火和三次回火的间隔时间，每次回火后均用电风扇强力吹风，滚刀表面快速冷却，而内部仍处于较高的温度，随后表面的残余奥氏体迅速转变为马氏体，二

者之间的比体积有明显的不同，加上内外组织转变的不同时性和不一致性，造成表面体积膨胀，受拉应力的作用，内部为压应力，最后造成滚刀的表面开裂。

另外需要注意的是，如果高速钢、高碳钢零件淬火后出现表面脱碳，则在回火时内层比体积大于表层，在表面形成多向拉应力而造成网状裂纹。同时由于回火时表面加热速度过快，产生表层快速优先回火而形成多向拉应力，也会造成网状裂纹。

第 5 章

表面淬火缺陷及其对策

为了改善钢铁材料的表面耐磨性而进行的表面处理，大致可分为使摩擦面的表面层硬化方法和在摩擦面上形成非金属性表面层两种，显然后者是为了控制和抑制在工作过程中发生金属的直接接触而产生黏着或热胶合现象，根据其机理不同对表面热处理分类如下。

① 在摩擦面上形成马氏体组织硬化层，例如渗碳、碳氮共渗、高频淬火、火焰淬火等。

② 在摩擦面上形成具有非金属性硬化层，例如渗氮、渗硼、碳化物扩散渗透处理、化学气相沉积（CVD 法）、物理气相沉积（PVD 法）等。

③ 在摩擦面上形成具有非金属性表面层，例如软氮化、加氧渗氮、碳氮氧共渗、硫氮碳共渗、渗硫、过热蒸汽氧化处理等。

零件的表面淬火是一种十分重要的热处理工艺方法，在不改变零件表面材料成分的前提下，通过对零件表面的快速加热，在短时间内迅速冷却，表面获得高的硬度，而内部有足够强度和韧性的复合材料。该工艺具有以下特点。

① 快速加热中相变过程中铁、碳原子来不及扩散，相变温度范围扩大，使钢淬火温度提高。

② 加热速度快，保温时间短，使奥氏体晶粒细小而均匀，淬火后获得极细或隐晶马氏体组织，具有较低的脆性和高的疲劳极限。

③ 钢中的奥氏体晶粒明显细化。

④ 节约了能源，降低了热处理成本，改善了劳动作业环境。

⑤ 表面硬度和疲劳强度优于其他的普通热处理工艺，使用寿命成倍提高。

按照零件的表面淬火使用的热源分类，有感应加热淬火、火焰加热淬火、电接触加热表面淬火、电解液淬火等，以及激光加热淬火、电子束加热淬火和等离子加热淬火等工艺，它们具有各自的特点，在零件的热处理中应根据材料的性能、具体的技术要求、零件的使用环境和失效的方式等几个方面，综合考虑并结合使用的加热设备、加热介质以及冷却方法和冷却方式等进行合理地选择，既要确保零件的热处理产品质量，满足其工作要求，同时要求热处理生产效率高、成本低、设备简单、操作方便等，因此通过必要的实践验证，来正确选择切合实际的成熟表面热处理工艺。

5.1 高频淬火缺陷

5.1.1 感应淬火的意义和作用

高频淬火感应表面热处理是利用感应电流对工件的表面进行淬火处理，加热冷却后表面获得硬度高的马氏体组织，而内部组织仍然具有良好的韧性、塑性和较高的强度等，以满足零件在交变载荷作用下具有高的使用寿命。感应加热与热处理炉加热的方式完全不同，工件感应加热的实现不是依靠外部热源（如加热、对流和辐射常用的三种传热方式），而是交变电流通过感应器在工件表面产生交变电流，工件表面上形成了封闭回路，依靠金属对通过电流的阻力实现加热。感应加热所需的热能来源于两部分：涡流热效应，这是主要的热源；磁滞热效应，该热量比涡流热效应小的多。在现代化的汽车生产中，零件表面淬火技术的应用已经十分广泛，中型载重车、轻型车和轿车等有 200~300 种零件需要表面淬火，资料 [11,12] 介绍，感应淬火技术是目前最经济、最有效、最直接的热处理手段，它是一种良好的零件表面强化方法，可明显提高零件的疲劳强度和使用寿命。

零件表面淬火的目的是提高零件的表面硬度，而心部仍具有足够的强度和韧性，满足机械零件耐疲劳工作的需要。采用表面淬火进行零件的硬化，可显著提高耐磨性，如提高零件的含碳量，则耐磨性更好。而渗碳淬火（如 20Cr 渗碳后表面含碳量达到 0.9%~1.2%）比高频淬火（含碳量为 0.45% 的 45 钢）的耐磨性要明显提高，因此二者的使用条件和工作要求不同，一般高频淬火多用于要求综合力学性能好、抗疲劳强度高的结构钢零件，零件的含碳量大多为 0.37%~0.47%，进行该工艺之前要对零件进行调质处理，为最终的热处理做好组织上的准备。高频淬火常出现的缺陷为硬化层深度不合格、表面硬度低、软点与软带、硬化层组织不合格、变形大、开裂、残余应力大、尖角过热等。感应加热的淬火工艺与一般的淬火工艺相比，具有自己的特点，设备的性能、感应器的质量和形状、零件的材质与形状、冷却方法以及加热速度和温度等，都将直接影响到淬火质量，因此在生产过程中要认真控制。

一般对于要求不是整体热处理的工件，应尽可能采用高频感应加热工件，该方法具有效率高、质量稳定、节省能源等优点，这一点是别的工艺所不能替代的。高频感应加热淬火工艺的制定与普通热处理基本一致，应考虑到设备的特点、性能（功率与频率）、感应器的质量、工件的材质和形状、冷却方式、加热温度与加热速度等，这些因素都影响零件淬火质量。而工件的含碳量和原始组织是确定工艺参数的关键和重要依据，必须认真对待，通过实验确定零件的最佳感应淬火热处理工艺参数，达到高频淬火的目的。需要注意的是，高频淬火工件的原始组织应为调质处理后的回火索氏体，该组织晶粒细小，韧性和塑性好，具有较高的综合力学性能。

感应淬火的材料分为两类，即钢和铸铁，其中钢又分为优质碳素结构钢如 35、40、45、50 等，合金结构钢如 30Cr、35Cr、40Cr、45Cr、40MnB、45MnB、30CrMo、35CrMo、40CrMo、35CrNiMo、40CrNiMo、45CrNiMo 等，铸钢 ZG270-500、ZG310-

570 等。钢件淬火后表面硬度与钢中含碳量的关系为： $HRC=20+60(2w_C-1.3w_C^2)$ ，淬火介质为水。应用高频淬火的零件种类很多，如各种齿轮、主轴、曲轴、凸轮轴、汽缸套、活塞销、接合器、履带销、机床导板、蜗轮和蜗杆、气门挺杆、各种工具等，因此其成本低、效率高、变形量小等，得到了十分广泛的推广和应用。

有三类铸铁可以进行感应淬火：常见球墨铸铁如 QT600-3、QT700-2、QT800-2、QT900-2 等，常用作汽车零件曲轴、凸轮轴、刹车蹄片、轴承座等；常见可锻铸铁如 KTH350-10、KTH270-12、KTZ450-6、KTZ550-4 等，用于制作摇臂和刹车蹄片等；常见灰口铸铁如 HT200-40、HT250-47、HT300-54、HT350-61 等，用于制作汽缸套和汽缸盖等。

在零件的实际热处理过程中，各种要处理的材料成分、零件的形状大小、技术要求等有所区别，各专业热处理厂使用的感应处理设备各有特点，常用的高频设备型号有 GP60、GP100-C3、GCT10120、CYP100-C 型等，中频设备型号有 DGF-C52 ~ 252、GC100/2.5 等。

5.1.2 感应加热表面质量的检查

零件的感应加热表面质量的检查，通常是在回火后在以下几个方面进行。

(1) 表面质量和硬度

目测检查外观有无淬火裂纹、局部烧化等，硬度检查比例为 5%~10%，用 HR-150 洛氏硬度计进行，个别可使用便携式硬度计或笔式硬度计，对形状不规则的部位用锉刀检查，产品硬度应在 55HRC 以上。

(2) 淬硬层深度和淬硬区长度

深度采用硬度法和显微组织观察法检查，一般规定是从低温回火状态淬硬层表面的断面至规定的界限硬度位置的距离，具体规定的表面最低硬度 ($\geq 48HRC$) 的界限硬度值见表 5-1。

表 5-1 表面感应淬火最低硬度 ($\geq 48\text{HRC}$) 的界限硬度值

零件的含碳量/%	维式硬度(HV)	洛式硬度(HRC)
0.25~0.33	350	36
0.33~0.43	400	41
0.43~0.53	450	45
0.53 以上	500	49

用显微组织观察法检查淬硬层的深度，是在 100 倍的显微镜下，按照界限金相组织来测定有效硬化层。在实际热处理过程中应用较多。

淬硬区长度的测定，通常有硬度法和显微组织观察法两种，硬度法是检测淬硬区两端至边界点二者之间的距离为淬硬区长度；显微组织观察法是在 100 倍的显微镜下测至淬硬区边缘的半马氏体处，两端半马氏体点的距离为淬硬区长度。

(3) 金相组织

在 400 倍的显微镜下按 JB/T 9204—1999 《钢件感应淬火金相检验》标准进行，钢制零件淬硬层的金相组织分为 10 级，1~2 级为过热组织，3~7 级为合格组织，8~10 级为加热不足的组织。其中 4~5 级细马氏体为感应淬火的正常组织，6 级细微马氏体是最理想的淬火金相组织。而球墨铸铁的感应淬硬层金相组织的评级，可根据 JB/T 9205—1999 《珠光体球墨铸铁零件感应淬火金相检验》进行。

(4) 变形量和裂纹

对轴类零件检查挠曲变形量，用中心架和百分表来测量，齿轮零件查齿向的变形，其余零件按技术要求检查。表面裂纹通常采用磁粉探伤和荧光探伤检查，而感应淬火后零件的磨削裂纹的形态和鉴别与淬火后表面开裂有明显的差异。感应淬火后，零件的表面硬度高，内应力很大，加上磨削参数不当（如磨削速度太快、砂轮硬度太高、密度太大或冷却过于剧烈等），将会出现磨削裂纹。淬火裂纹在光滑表面不会产生龟裂，即使出现单条或多条平行裂纹，它

们都在圆周方向上。而磨削裂纹出现在光滑表面上，其形态呈现龟裂、垂直于磨削方向、组织中有二次回火组织，二次淬火层的金相特征具有白亮层，其内侧是黑灰色的回火层（托氏体），最后为感应淬火层（回火马氏体）。

5.1.3 常见的高频表面淬火缺陷

对零件进行感应加热表面淬火，具有许多优点，如加热时间短、生产效率高、节约电力和能源、易于实现机械化等，更重要的是明显提高零件的疲劳强度和表面硬度，其表面和内部的组织性能不同，满足了许多零件既要求表面耐磨而心部又具有较高的塑性和韧性的要求，而常规的整体热处理是无法实现的，因此充分显示出巨大的优越性。同时感应热处理的零件的产品质量稳定，得到了较为广泛的应用。但任何零件的热处理总是有它的质量缺陷，感应加热淬火同样如此，影响零件热处理质量的因素较多，出现形式多样化，原因是复杂的，因此解决该类质量问题十分困难，探讨感应淬火后出现的质量问题，对于指导实际生产和操作有重要的意义。通常一方面是钢材自身的原因，另一个为热处理工艺是否合理的问题，因此要慎重考虑。

(1) 淬火裂纹（或开裂）

零件进行高频淬火为在其外部加热的表面淬火，由于零件的外表面淬火后产生残余压应力作用，通常不会有淬火裂纹的发生，裂纹一般产生在应力集中等部位处。只有当零件本身存在棱角、键槽、孔穴、厚薄不均或突变等部位出现过热时，才会发生淬火裂纹。一般为避免此类缺陷的发生，在进行零件的机械设计时要进行改正，棱角做成圆弧，键槽、孔穴等处填充铜片以防止裂纹等，因此冷热加工要认真协调，在能够确保零件设计满足要求的前提下，零件本身应截面均匀、具有对称性、避免出现容易造成应力集中的部位等，减小和尽可能消除质量效应，这对于预防淬火开裂具有重要的作用。高频淬火裂纹通常是淬火时造成的组织转变和内应力所致。加热温度不均匀，局部过热，加热层过深，冷却过于剧烈或不

均匀，加热速度快以及电加热的参数选择不当等，都有可能成为淬裂的因素，因此在实际热处理过程中要认真对待该类缺陷，采取必要的技术规范防止出现淬火开裂。

出现开裂的原因同淬火层加热不均匀有关，其组织形成与零件本身的化学成分，尤其是内部的含碳量有关，即在温度梯度条件下沿淬硬层形成不均匀的组织。

高频淬火出现淬火裂纹的原因是比较复杂的，但一般情况下不会造成该类缺陷。如果零件本身形状不对称、厚薄不均、个别部位存在棱角、键槽、孔洞边缘等，零件的夹角效应引起局部的过热或开裂，即感应加热产生的热量容易在这些地方产生过热，此处温度过高，晶粒粗大，在冷却时出现较大的热应力和相变应力的综合作用，造成淬火裂纹的产生。

零件进行高频淬火，产生了热应力和组织应力，两种应力同时作用。零件表层加热而未淬透，表层产生拉（张）应力，如果淬透则表层的相变应力小于热应力，二应力合成的结果使表层产生压应力。图 5-1 表示了上述内应力的作用结果。A 点右侧淬透时不大发生淬火裂纹，如只加热到临界点温度以上，而冷却速度低，或加热到临界点温度以下（B 点左侧），快速冷却，则发生淬火裂纹。因此防止淬火裂纹出现的措施为：改变容易过热的部位，在要求的奥氏体温度下加热和充分冷却，淬火后立即回火，磨加工前进行 $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的回火。

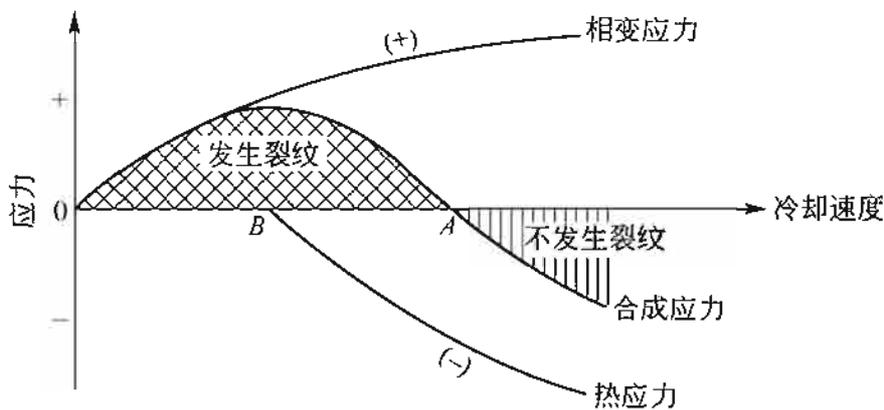


图 5-1 高频加热时发生的裂纹

为便于对高频淬火后出现的热处理质量缺陷进行系统分析，采取必要改进措施和技术规范，确保零件的表面质量，也有利于通过具体的质量问题来反映缺陷产生的根源，以便进行防范和控制，现将一般造成淬火裂纹的原因归纳如下，供热处理工作者参考。

① 零件加热温度不均匀 通常进行高频淬火的为圆柱形、圆盘、套筒、轴类、齿轮、蜗杆和蜗轮等中碳钢零件，其本身在高频淬火前已经进行了预备热处理，如正火、调质处理等，整体得到了均匀一致的索氏体组织，从而确保基体组织的强度和韧性，满足零件的耐磨、具有高的抗疲劳强度的需要。零件加热不均匀将造成表面的耐磨性差，使用寿命降低。一般而言，下列因素影响到加热的不均匀性。

a. 高频感应装置、控制装置选择不当，高频加热的电加热工艺参数选择不当，如功率过低、电流过小等，造成零件的加热不足或加热温度过高，加热温度不均匀（包括设备频率选择不当、感应器的设计不合理、操作程序不合理、预热温度不适宜、预先热处理质量不佳等）。要合理选择加热规范（设备的频率、功率、加热方式和加热顺序等）。

b. 预热温度不适宜、加热温度高或出现过热现象，造成晶粒粗大，要严格执行工艺规定，加强硬度和金相组织的检查。

c. 淬火操作规程不当，出现了人为因素的影响。

d. 零件的预备热处理质量不合格。

e. 感应加热器设计缺陷或制造不良、感应器不对称或与零件间隙不均匀，造成加热不均或局部过热等。

f. 加热时间过长造成硬化层深度过大。

g. 淬火前机械加工应力很大，没有进行预先热处理，加工粗糙表面存在严重的刀痕等，因此应在感应淬火前进行去应力退火处理。

高频淬火时由于过热而造成零件淬裂的现象是经常发生的，其原因在于局部的急冷和急热、组织转变等将会形成很大的内应力，过热不仅使淬火的内应力增加，材料本身变脆，造成淬火裂纹的出

现。在零件的尖角、键槽、圆孔的边缘等处最容易过热，此处应力集中，图 5-2 所示为 45 钢轴在高频连续加热淬火后头部键槽处掉角的情况，因此在高频淬火时应采取相应的措施，避免过热现象，

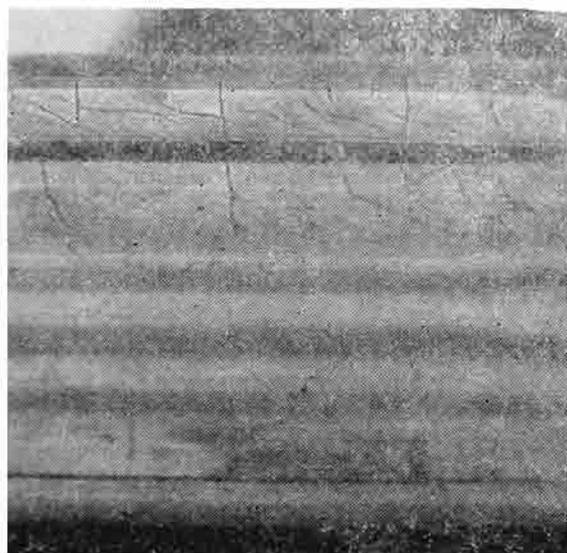


图 5-2 45 钢轴高频淬火后掉角（实物）

才能消除淬火裂纹的出现。

② 零件的原材料质量不良、结构不合理

a. 含碳量高于上限要求或含有较多的锰元素，含碳量在 0.30% 左右的钢很少发生淬火裂纹，而含碳量在 0.50% 左右很容易产生该类缺陷。

b. 有严重的成分偏析和方向性，在加热和淬火过程中出现局部的淬火裂纹。

c. 晶粒粗大、粗细不均，加热冷却时产生不规则的热应力和组织应力，造成淬火开裂。

d. 材料选择不当、内部存在大量的非金属夹杂物，原材料内部存在质量缺陷（组织不均匀、晶粒粗大、成分偏析、有害杂质、大量的非金属夹杂物、内部裂纹等），材料淬硬性能过高，会造成淬火开裂的产生，因此要加强原材料的检验，严格控制钢材的成分。

e. 材料的淬透性过高或冷却速度过快，造成零件在 M_s 温度区间迅速发生组织的转变，而零件的内外存在较大的温差，出现组织转变的不同步性，零件的内应力过大，造成淬火开裂。

f. 表面的脱碳层未加工除掉。

g. 零件本身的结构设计不良，截面突变等，工件形状尺寸不均匀，工件的结构设计不合理或形状复杂，尺寸突变或淬火部位加工粗糙或有凹槽、孔、台阶、端头、尖角、键槽、空洞和油道等结构因素。改进工件的结构形式，淬火前各部位不允许有毛刺、严重的划痕，对孔用铜塞堵住，避免上述不良设计的发生。

③ 零件形状和机械加工不良

a. 表面加工粗糙，存在严重的刀痕，打印标记等，容易产生应力集中。

b. 在硬化区范围内有尖角、销孔、键槽等，淬火零件截面存在急剧变化，造成加热温度存在大的差异，对此应调整淬火加热温度，降低比功率或对部分喷水孔堵塞。

c. 存在盲孔和棱角，尽可能地改变设计，也可堵塞或保护。

d. 零件的几何因素如零件的形状不均匀对称、截面尺寸变化大，容易引起应力的集中。

④ 淬火冷却不当

a. 冷却操作规程不合理、冷却速度快等造成零件冷却不均匀。

b. 冷却介质选择不当，冷却速度过大，冷却介质的成分含量、温度及压力等选择出现问题。

c. 淬火冷却器的喷水孔设计不合理，改进感应器和冷却系统的设计，使喷水孔布置合理，选择合适的冷却介质，控制冷却介质的各项技术要求符合工艺的规定。

d. 喷水孔堵塞或水压过大。

e. 冷却时间长或水温过低。

⑤ 回火不良（足）

a. 淬火后未及时回火，或回火不充分等造成表面应力过大。

b. 硬度不合格，返工没有进行退火或正火而直接重新淬火，或工件的回火不及时，重新淬火时操作不当。高频淬火后及时回火，可采用炉内或自回火方式，正火或退火后再感应淬火。

c. 回火时加热速度过快、保温时间短、冷却过快。

另外重复淬火时没有进行正火或调质处理等，直接进行二次淬火，造成硬化层热应力和组织应力的综合作用，内应力超过材料的破断强度，形成了淬火裂纹。

⑥ 磨削开裂（或裂纹）

零件在淬火状态或低温回火状态下磨削，局部产生磨削热引起第一次和第二次回火收缩等，使周围的金属受拉应力作用，并形成裂纹。如出现表面软点呈回火色，即为磨

削烧伤。其原因在于零件上存在的残余奥氏体在磨削过程中转化为马氏体，因磨削产生的热量过多，因此零件表面上局部出现二次淬火，图 5-3(a) 所示为 GCr15 钢制造的磨床主轴经中频淬火后磨削过程中出现严重的磨削裂纹，从图中可知既有龟裂、也有单条裂纹，在裂纹处垂直取样分析，发现有二次淬火的白亮层和回火托氏体组织，图 5-3(b) 所示是由于磨削用量大，表面温度过高，瞬间达到了淬火温度，经冷却后出现二次淬火现象。

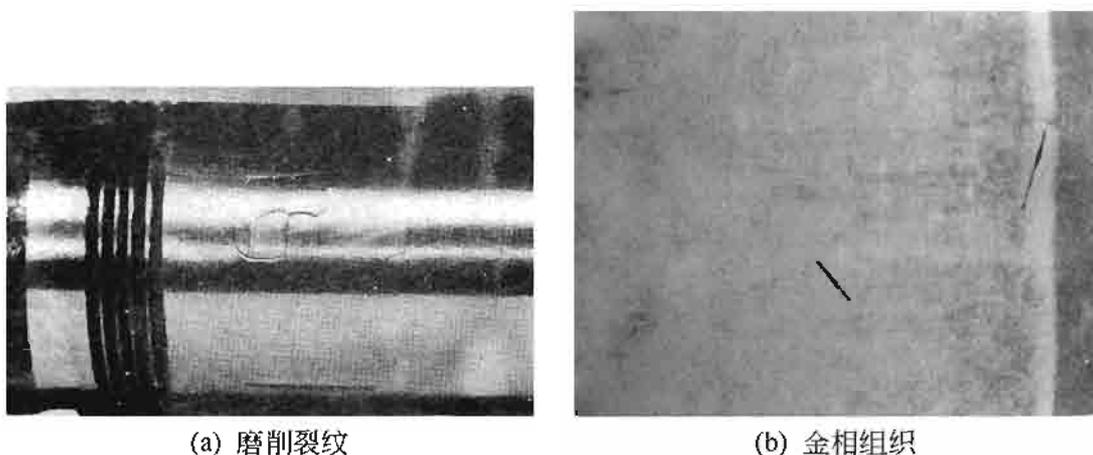


图 5-3 GCr15 钢制造的磨床主轴的磨削裂纹和金相组织 ($\times 100$)

a. 砂轮粒度等选择不当。

b. 磨削规范不当、冷却过于激烈或不足、吃刀量过大、砂轮不锐利等。

c. 零件未充分回火，有残余奥氏体存在。

因此在实际零件的设计过程中，既要考虑零件的具体结构尺寸的作用和热处理要求，又要克服可能产生的热处理缺陷，对高频淬火零件要求形状对称，对某些部位应改进设计，避免产生过热、应力集中等热处理缺陷。

⑦ 二次淬火造成淬火裂纹

零件在一次高频淬火后，因工艺参数调整不当，造成表面淬火硬度低，需要重新进行淬火处理。零件未退火、正火处理而第二次高频淬火，必将产生淬火裂纹。图 5-4 所示为 45 钢花键轴（此轴已经淬硬）二次淬火后的严重开裂情况，由此可见如果进行二次淬



图 5-4 45 钢花键轴二次淬火严重开裂（实物）

火必须进行预备热处理，否则将直接造成零件淬火裂纹的产生。

（2）硬度不足、软点或软带

高频淬火多用于对中碳结构钢和低合金结构钢的热处理，零件的高频淬火有几种形式，一种是整体加热后浸入水中或油中冷却，另一种是边加热边进行喷淋冷却，例如轴、大型齿轮、丝杠等。如果加热温度不均匀、喷淋孔被堵塞和水孔的大小以及分布的数量不当等，将可能造成冷却不均，在零件的表面出现暗紫色带，呈螺旋带状，着色部分淬火不均，此处的硬度低于标准的要求。软点的出现将造成零件的耐磨性下降、疲劳强度降低，零件出现早期的失效等，因此在高频淬火中应当杜绝。采取的补救措施为重新正火或退火后，进行高频淬火处理。

高频淬火零件的软点包括表层局部没有得到硬化的残留软点、硬化层深度不均匀的深度软点两种，钢中碳化物的类型、形态、尺寸以及分布对高频淬火件的质量有很大的影响^[62]，其主要原因如下。

① 原材料质量不佳

a. 原材料的碳含量低（ $\leq 0.3\%$ ）或表面严重脱碳或贫碳造成碳含量低，形成了低碳马氏体组织，或表面不清洁、存在氧化皮和锈迹、油污等，或材料表面局部脱碳、预先热处理过程中脱碳，去掉表面脱碳层或更换钢材、改善预备热处理的炉内气氛，可进行补

碳处理。钢淬火后的硬度决定于含碳量，含碳量越高，则淬火硬度

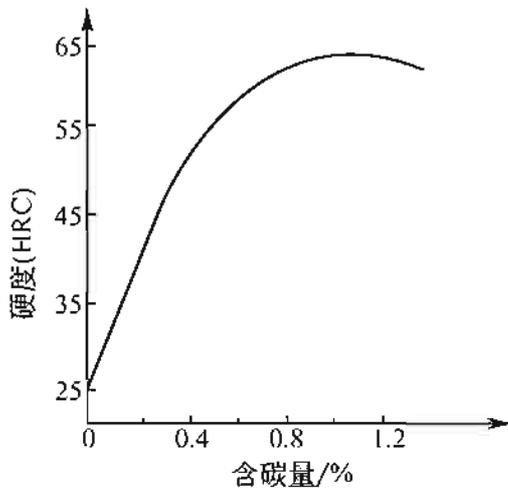


图 5-5 钢的淬火硬度与含碳量的关系

增加，尤其是含碳量在 0.4% 以下时，淬火硬度与含碳量成直线关系，见图 5-5，而感应淬火多为表面淬火，由于加热温度高、冷却激烈和晶粒细化等因素的影响，因此其淬火后硬度要高于图 5-5 中 2~5HRC。

b. 钢材的化学成分不符合技术要求，或原材料的含碳量低于技术要求，材料的含碳量偏差大。

c. 零件的材料选用不当或错误，造成淬透性很差。

d. 钢材的原始组织过于粗大不均、原始组织不良，预备热处理（调质处理或正火）后仍然存在组织不良缺陷，如带状组织、偏析、成分不均匀、碳化物呈网状分布等，直接造成零件淬火后硬度的明显差异等，因此应严格控制原材料的成分和组织，挑选符合要求的材料，或进行正火处理，改善原材料的组织状态。

e. 含有 Cr、Mo、W、V 等合金元素的钢的相变点高，而碳又来不及扩散充分均匀化，产生软点和硬度不均匀。

f. 原始组织有粗大的块状铁素体存在，需要采用正火或调质等预先热处理，获得均匀而细小的组织结构，可避免出现硬度不足。

② 加热温度不足或不均匀

a. 加热比功率小、且加热时间短，淬火工艺控制不当，零件表面加热温度低或加热时间过短，或零件的旋转和移动速度不匹配，容易出现暗紫色条带，呈螺旋状形态，也可能是与喷水孔堵塞、孔的大小、数目选择不当有关。

b. 感应加热器和冷却器设计不合理、存在结构缺陷或制造不良，感应器的内径与工件不一致，造成加热和冷却不均，应根据零

件的具体形状设计或选择符合要求的感应器。合理选择设备的功率和感应圈的尺寸，确保零件表面得到充分加热和冷却。

c. 设备的加热功率选择不当，淬火温度低，造成表面温度的加热不均。

d. 淬火操作规程不当、加热工艺不合理等造成加热温度不均匀，出现了人为因素的影响。

e. 感应器内有存水，加热时水流出后附在工件的表面上，致使该部位淬火温度降低，淬火后形成软点。

加热温度不足的解决办法是采用高的感应器，或提高加热温度和加快零件的移动速度等，严格执行操作要领，确保淬火硬度的均匀一致性。

③ 冷却不良或冷却速度不够

a. 淬火时冷却工艺不合理，如冷却速度过低，由于只是表面加热，所以工件在淬火冷却时加热层同时向内外散热，因此降温较快，如果加热后未及时冷却，发生非马氏体组织转变，补救措施为可退火后重新淬火处理。

b. 淬火液喷射压力过低、淬火液的流量太小或冷却介质条件差，不符合工艺规定。

c. 淬火冷却装置的喷水孔有堵塞或弥死、喷水孔大小和数量不适当，或喷射角度不当，延迟了淬火冷却时间，降低了淬火温度，造成加热后零件表面冷却不均匀。感应器内存有水，附在工件上造成淬火后形成软点，按要求调整冷却介质的压力和流量，并清理喷水孔。

d. 冷却器设计缺陷或制造不良、冷却喷水孔与感应加热区的距离过大，冷却速度减小。

e. 冷却器与感应器的位置布局不合理。

f. 轴类零件的连续加热感应器高度不足，或零件的旋转太慢而移动过快，或速度不稳等往往造成螺旋状软带。

对于冷却不良或冷却速度不够的工件进行金相检验，如果在淬人马氏体晶界周围有托氏体的析出，即形成了马氏体+托氏体组

织，表明为冷却速度不够或冷却不良，假如冷却速度更为缓慢则会形成马氏体+托氏体+铁素体的混合组织，其特征为铁素体的形态较瘦，分布于晶界上，与托氏体相连在一起。因此要采取必要的措施和手段，避免出现该类缺陷。

另外零件高频淬火后的回火温度和加热时间不合理，同样影响到硬化层的深度，因此要加强回火温度的控制和硬度的抽查，采取必要的防范措施，确保产品质量的稳定。从以上几个产生硬度不足、软点或软带的原因来看，在实际的高频淬火过程中严格执行相关的技术要求，并注意检查产生缺陷的原因，就可避免该类质量问题的发生，

因此对于高频淬火出现软点的原因，应从人、机、料、法、环和检测等几个方面进行综合分析，找到真正的根源，采取必要的措施和手段，避免此类缺陷的产生。

(3) 硬化层浅或深

高频淬火后的重要技术要求为硬化层的深度和表面硬度等，作为需淬火的零件，应在调质或正火后首先获得合格的组织和综合的力学性能基础上进行高频淬火，以满足表面具有较高的硬度、良好的耐磨性，具有高的疲劳强度等要求。因此对于硬化层的深度有严格的规定，过深或过浅则表层组织与基体组织的结合强度差，因此应特别注意，产生的原因一般如下。

① 频率的选择不当，如加热温度不足、感应频率过高等，直接影响了加热层的深浅，造成硬化层深度不符合要求。

② 加热的时间短或长，对表面加热的温度和加热深度有较大的作用，决定着硬化的深度。

③ 单位功率过高或过低，加热时间长，影响到表面加热温度和加热速度以及材料的奥氏体化温度，要调整加热的工艺参数。

④ 感应器与零件的间隙过小或过大，造成加热的深度不同，因此硬化层的深度明显不同。

⑤ 材料淬透性过高或过差，冷却介质选择不当，造成表面硬度有较大的差异等，应更换材料或选择合理的冷却介质。

(4) 表面剥落

高频淬火的材料均经过调质处理或正火处理，保证加热温度的一致，淬透性均匀，得到了良好的综合力学性能。经过高频淬火零件的表面具有高的硬度和良好的耐磨性，而内部有足够的强度和韧性，因此其具有很高的疲劳强度，适合于轴类零件的热处理工艺。

在淬火过程中，需要注意零件的原材料组织粗大，存在尖角过热，以及淬硬层断面硬度梯度变化太陡或硬化层过浅，将会造成零件截面硬度急剧变化，内外组织结合处的强度存在很大的悬殊，在工作过程中，零件受到反复的弯曲载荷的作用，将产生表层的剥落。因此淬火层深度应根据零件的具体工作要求来定，同时结合材料的性能，确定合理的硬化层深度，来满足其工作需要。针对上述缺陷，应采取对原材料进行正火或调质处理，尽可能将零件尖角设计成圆角，同时也要对感应器进行合理的改进，以确保零件高频淬火的质量。

造成高频淬火零件硬化层浅的原因如下：材料的淬透性差，截面的变化大；零件的直径与感应圈的间距过大；加热的时间过短，表面的奥氏体化温度过低；冷却速度低或冷却不良。

(5) 组织过热和硬化层过深

零件在高频淬火过程中，出现表面组织的过热和淬硬层过深等，将造成表面脆性的增大和疲劳强度的明显降低，直接影响到使用寿命。因此预防此类缺陷也是热处理工作者的重要任务之一，探讨产生的具体原因，将有助于检查和指导零件的热处理质量。下列几条为原因分析。

- ① 淬火时操作不当。
- ② 电流频率的选择不当。
- ③ 原材料的过热倾向大。
- ④ 加热温度过高。
- ⑤ 加热时间过长。
- ⑥ 尖角过热是感应器的高度过高所致。
- ⑦ 冷却方法不当或加热器的形状不当。

(6) 硬化层不均匀

① 零件在同时加热时位置偏心。

② 感应器的喷水孔不均匀。

③ 淬火机床上下不同心。

④ 原材料内部组织不合格（如网状碳化物、球状碳化物的尺寸等不合格），需进行正火处理或调质处理。

(7) 零件的变形

零件经高频淬火后，淬火表层集中了很大的压应力，它对钢的抗疲劳强度性能产生有利的影响，但在钢的内部存在很大的拉应力，对钢的力学性能产生不利的影 响，因此容易引起变形甚至开裂。零件的变形是热应力和组织应力作用的结果，尤其是轴类零件产生的弯曲、变形、硬化层不均匀造成零件弯向淬硬层较浅的一层或无淬硬层一侧，齿轮变形主要为内孔胀缩和齿形的变化。这同加热和冷却不规范有关，一般采取的减小措施为在满足淬硬层深度要求的前提下，使轴类零件在加热过程中旋转；采用大的比功率和缩短加热时间；选用适当的冷却方式和介质；进行合理的设计和工艺制定，避免截面突变，应形状对称等，必要时采取相应的措施，对于预防零件的变形具有良好的效果。需要注意的是，零件加热的不均匀，淬火前的机械加工应力较大，同样将造成零件的淬火变形，因此要改进感应器的设计和淬火操作方法，采用旋转加热；对形状复杂的零件增加高温回火或去应力退火工序，而对齿轮粗加工后进行一次高频正火可解决淬火齿轮的内孔收缩问题等。

对于模数大于 4 的齿轮淬火，通常采用逐齿加热，其淬火后的变形情况为齿高增加，如果加热温度偏低，不到相变温度即进行喷水冷却，其变形以热应力为主，此时齿顶收缩、节圆胀大、硬度不高等，因此合理控制加热温度，要确保一次淬火合格，严禁重复淬火后造成更大的变形。高频感应淬火加热是零件局部的瞬间加热，组织转变发生在表层，其变形规律与整体热处理有明显的不同，因此在分析和判断零件的变形问题时，要调整思路和正确辨别变形的位 置、长短、变形量的大小等，采取有效措施避免此类缺陷的

发生。

(8) 局部烧熔或烧坑

① 感应器结构不合理，加热时间过长，选择合适的感应器，严格控制加热温度。

② 零件带有尖角、槽和孔等，对易造成缺陷的部位采取屏蔽或保护的措施。

③ 表面有缺陷，消除或报废零件。

④ 高频设备性能与零件的要求不匹配，根据工件的硬度和渗层选用合理的频率、功率以及加热和冷却工艺的配合。

⑤ 感应器未固定好，与零件接触，严格控制感应器与零件的间隙，并加以紧固。

需要注意的是关于淬火开裂的问题，至于孔洞的淬火开裂可采取以下几种方式：在孔洞中打入销塞或用紫铜管插入；在孔洞内塞入湿的软木塞或石棉绳；在有效圈上对零件孔洞嵌入适宜尺寸的硅钢片导磁体。

零件必须满足下列条件才允许进行返工：零件表面硬度低和有大片的软点；淬火层深度和宽度不符合技术要求等。一般返工前要在感应器中加热到 $700\sim 750^{\circ}\text{C}$ ，或将工件放进 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的炉中，加热 $60\sim 90\text{min}$ ，然后在空气中或其他介质中冷却，进行退火或高温回火以确保返工后工件的产品质量合格。

5.1.4 提高高频淬火件性能的措施和要求

在实际零件的高频淬火过程中，为了确保获得要求的性能和技术要求，除了防止出现以上缺陷外，重要的是通盘考虑零件热处理前后的状态、技术要求等，根据设备特点、感应器结构、零件的工作条件等，结合以下几个注意事项，正确设计工艺流程和工艺参数，生产出合格的产品。

① 合理确定硬化层的深度与分布，这影响到零件的应力分布和表面的疲劳强度等。

② 原始组织应为正火或调质状态，能够确保硬化层均匀，降

低加热温度。

③ 合理设计和选用感应器，它是保证加热和冷却均匀的重要手段。

④ 对易淬裂的零件应选择冷却性缓和的淬火介质。

⑤ 对零件上的螺纹孔、销轴孔和油孔等，要进行保护，如用铜料堵塞，避免零件在该处过热和淬火开裂等。

⑥ 为稳定组织，消除内应力，高频淬火后必须马上进行回火。

5.2 电接触加热表面淬火缺陷

为了提高零件如机床导轨的耐磨性，通常采用合金铸铁进行中

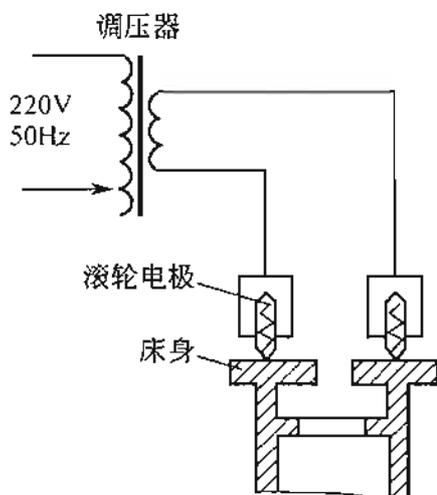


图 5-6 电接触表面淬火原理示意

频淬火，以获得要求的硬度。采用电接触来加热工件的表面，并通过工件本身的热传导（或进行风冷）迅速冷却，达到表面淬火的目的，图 5-6 为电接触表面淬火装置示意。从图中可以看出铜滚轮（或石墨电极）在与工件表面接触时，由于接触面积较小，因此在接触处存在很大的接触电阻，低电压大电流通过时，在局部将产生很高的热量 $Q = 0.24I^2Rt$ ，此时接触点的热量与接

触电阻 R 、输入电流 I 以及加热时间 t 成正比。另外接触电阻取决于滚轮直径和宽度、滚轮表面花纹的形状（波浪形或锯齿形等）、导轨表面的粗糙度等因素。因此通过调节电流的大小、滚轮的移动速度以及接触压力来控制工件的淬火加热温度。通常采用低电压（2~5V）大电流（80~800A）的电源，铜滚轮的直径一般为 $\phi 50 \sim 80\text{mm}$ ，移动速度为 1.5~3.0m/min，加在滚轮上的压力为 40~60N。手工操作用碳棒或纯铜，其硬化层深度为 0.07~0.13mm，机械操作则为 0.2~0.3mm，表面淬火后的硬度为 50~62HRC。

根据电接触加热表面淬火的原理，滚轮与工件的接触面积很小，因此其加热区域窄，靠工件本身的热传导将加热区域迅速冷却而淬火成马氏体组织。该工艺具有处理后的零件变形小、表面硬度高、耐磨性好等优点，同时该装置设备简单，操作方便等，因此在实际的热处理工艺过程中也得到了较为广泛的应用。

电接触加热表面淬火后获得的显微组织为隐针马氏体、残余奥氏体和少量的莱氏体，一般淬硬层的深度为 0.2~0.3mm，表面硬度在 54HRC 以上。需要说明的是，淬硬区的表面实际是不连续的，这与滚轮的花纹形状有直接的关系，剖开淬硬层的横截面呈半圆形，与基体组织之间没有明显的过渡区。资料 [64,65] 介绍，电接触加热表面淬火零件表层的耐磨性与未淬火相比，耐磨性提高 1~3 倍，抗擦伤能力也明显提高。

电接触加热表面淬火具有设备简单、操作灵活、零件的变形小、淬火后不需回火等特点，因此在复杂零件的表面局部淬火中得到了较为广泛的应用，它多用于精加工后机床导轨的表面淬火。

由于加热速度比高频加热速度快，因此要求电接触加热表面淬火前零件的基体组织应为细片状珠光体与均匀分布的小片石墨，铁素体的量应少于 5%，这样可确保零件淬火后获得理想的组织和硬度要求，满足零件的需要。电接触加热表面淬火常用于缸套、曲轴、工模具、机床导轨等零件的表面硬化，在冶金和建材领域使用的 65Mn 冷热切锯片的齿尖采用此淬火工艺，表面硬度达到 64HRC 以上，硬度分布均匀，无氧化和脱碳现象，经对比磨损试验，接触电阻加热淬火锯片的使用寿命比普通锯片提高 30 倍。

根据电接触加热表面淬火的工艺特点，不难发现其存在下列淬火缺陷：硬度不均匀；淬硬层较薄。

这两类热处理缺陷是其自身的淬火特点决定的，因此在实际的热处理过程中应根据零件的工作特点和工作条件，选择适当的淬火方法，尽可能地避开其不足，发挥出最佳的优势，合理利用电接触

淬火方法，为零件的热处理提供服务。

5.3 火焰加热表面淬火缺陷

5.3.1 火焰加热表面淬火的意义和应用

火焰加热表面淬火是指在强烈的火焰中进行零件的加热，使零件表面迅速加热到淬火温度（奥氏体状态），然后快速用水或将冷却介质喷射到表面或浸入冷却介质，获得预期的硬度、硬化层深度的一种热处理工艺。作为一种操作方便、生产成本低、设备简单的工艺方法，零件进行火焰加热表面淬火时，由于材料不同、内部的化学成分的差异、组织状况、火焰加热的工艺参数以及随后的冷却和回火等，会出现一些热处理缺陷，这将直接影响到零件的使用条件和寿命等，因此应正确对待，并制定相应的对策来预防 and 解决。火焰加热淬火具有设备十分简单、使用和操作方便、成本低廉、生产效率高、不受工件体积大小空间的限制、可灵活移动、表面清洁、无氧化脱碳以及变形小等特点，因此在热处理领域占有一席之地，也得到了比较广泛的推广和应用。

用火焰在工件的表面某些部位加热，越来越多地得到了热处理行业的认可。通常是利用氧-乙炔焰或混合气体通过喷嘴使其燃烧，对工件的表面进行加热和冷却的，它是一种局部淬火方法，可获得预期的硬度和淬硬层，深度一般在 1~12mm，一般火焰加热的钢的含碳量为 0.3%~0.7%，铸铁为 2.3%~3.5%。火焰加热的气体除乙炔外，还可使用煤气、液化石油气、天然气、丙烷等，它们具有燃烧热量高、成本低的特点。因此多用于中碳钢（中碳合金结构钢）、工模具钢、渗碳钢、灰口铸铁和球墨铸铁、马氏体不锈钢等材料的表面淬火，含碳量过低则不易淬硬，而含碳量过高会造成零件的变形甚至开裂，因此只有选择符合要求的材料和考虑具体的技术要求，才能进行火焰淬火。

火焰加热的温度比普通的淬火温度要高 50~70℃，加热速度

快，因此零件经火焰淬火后的硬化层不厚，不适合处理十分重要的零件。硬化层的深度主要取决于零件的淬透性、尺寸、加热层深度、冷却条件等因素，实际热处理过程中要控制加热温度和时间，同时要确保喷嘴的移动速度均匀，冷却介质的压力和流量符合要求，一般推荐水压在 0.1~0.2MPa，整体浸入，选用油，另外根据零件的硬度也可采用压缩空气、乳化油等冷却介质，淬火后必须要进行回火，温度为 180~200℃。火焰的加热方法通常有固定位置加热法、工件旋转加热法和连续加热法，在实际的加热过程中，应根据零件的形状和技术要求等合理选择。

5.3.2 火焰加热表面淬火常见缺陷和防止措施

根据火焰加热表面淬火的特点，结合零件在加热过程中的现状，常见的热处理缺陷为硬化层深度不合格、表面硬度低、软点与软带、硬化层组织不合格、变形大、开裂、残余应力大、尖角过热等，下面分别介绍。

(1) 表面剥落

火焰加热零件的表面，出现表面硬度梯度的急剧变化，硬化层过浅（或无中间层），因此表面与内部组织的结合强度差，在工作过程中会出现剥落。

对此类缺陷可根据零件的具体情况采取延迟淬火、对零件进行预热等方法来加以预防。

(2) 表面龟裂

表面龟裂是在对旋转的零件进行淬火时，淬火的终点与起点出现重叠而产生的裂纹，该位置二度淬火，发生组织转变，造成热应力和组织应力的增大。第二种是对淬火后的零件进行表面磨削时，由于磨削热的作用，零件表面的温度升高，造成马氏体的分解，残余奥氏体转变为淬火马氏体，表面体积膨胀，导致零件表面的开裂。最后一类是零件未经过回火处理而直接磨削，造成内应力的增大而出现开裂。

(3) 硬化层深度不合格

火焰表面淬火后硬化层深度过深和过浅或不均匀是其常见缺陷，其主要原因如下。

① 火焰烧嘴和零件的间距不合理，过远则深度浅和硬度低，而过近则硬化层深度过深，常出现表面温度高、过热现象，推荐距离为6~10mm。

② 喷嘴的相对移动速度不合理，容易造成零件的加热不均，移动速度快，表面没有得到充分加热，加热深度过浅，硬化层深度不足，硬度低；反之硬化层过深，一般移动速度为50~300mm/min。

③ 可燃气体选择不合适，淬火温度低。

④ 冷却介质的冷却能力不足，造成硬化层浅。

(4) 淬火开裂

它是火焰淬火常见的缺陷之一，原因之一是过热造成，多出现在含碳量高的零件、零件的尖角、或边缘等处，这些部位处于加热温度高的位置，冷却速度快，发生组织转变时淬火应力过大；另一个原因在于零件未退火或正火又进行了重新淬火，裂纹大多是在环状零件的开始和终结处；另外零件淬火后不及时回火同样会出现开裂现象。

淬火开裂是火焰淬火过程中由于加热温度过高或不均匀造成的，该类致命质量缺陷，在实际的热处理生产过程中是最为忌讳的，因此应避免出现，通常发生淬火裂纹的原因分别讲解如下。

① 火焰加热的温度过高，造成晶粒的粗大，冷却后生成的马氏体针粗大，出现较大的热应力和组织应力的综合作用，表面受拉应力而开裂，因此应力求加热均匀，零件表面光滑无过热现象，正确控制火焰的强度、加热的距离以及喷嘴的移动速度等，严防零件过热。

② 出现局部回火。多出现在零件旋转淬火时，由于起始点和终止点重叠或靠地过近，产生了局部回火带，在终止淬火点15~20mm处容易产生淬火裂纹。开始加热时淬火温度应低，接头区

域的硬度应适当控制，形成 30~35mm 宽的低硬度区，使终止的淬火点处于低硬度区中，此时距离淬硬区 20~25mm，这样即可避免出现局部回火造成淬火开裂，淬火一周将要结束时，喷嘴位置应在接头区内 15~20mm 处熄火，并迅速水冷，避免局部回火区扩大。

③ 喷嘴点火时，在开始加热的 30~35mm 的长度上加热温度过高，造成淬火开裂，在实际加热中必须采用较低的加热温度，随后再逐渐升高到正常的淬火温度，淬火硬度也达到正常的技术要求。

④ 淬火时突然停火或断火、断水等，出现重复淬火，应使起点与收尾留有 5~10mm 的软带。

⑤ 零件的结构不合理，如存在尖角、孔穴、凹槽、截面突变、零件不对称等，另外原始组织不良也会造成淬火裂纹的产生。

⑥ 齿轮使用的材料为合金结构钢，本身淬透性好，使用的冷却介质过于激烈，则容易造成齿轮齿顶出现密集的淬火裂纹，因此要采用合成淬火剂避免此类缺陷的产生。

⑦ 火焰淬火时在零件的边缘或尖角出现淬火开裂，此处加热温度高，淬火应力大而出现裂纹。

(5) 硬度低或不均匀

火焰淬火后硬度不合格，其原因是以下几个方面造成的。

① 硬度不足在于零件材料的含碳量过低、淬透性差，无法达到要求的硬度。

② 火焰加热后冷却介质选择不当或冷却能力差（例如水压低、水量不足、喷水孔堵塞等），表面冷速过慢没有得到全部马氏体组织，造成表面硬度不足。

③ 火焰的加热温度低于奥氏体化温度，或火焰孔有部分堵塞等，造成奥氏体未充分转变和均匀化，内部成分存在很大的差别，冷却后组织转变有非马氏体存在，造成硬度低。

④ 硬度不均匀多是火焰冷却喷嘴堵塞、喷水孔大小不一致、排列不规则所致。

⑤ 烧嘴与工件之间的距离不合理。

⑥ 烧嘴与工件移动速度不合适，移动速度过快，加热深度浅等。

(6) 软点

零件在淬火时由于加热或冷却不均匀，水压小或流量低，造成冷却效果差；与此同时零件的表面存在锈蚀（或氧化皮）、不清洁以及脱碳等缺陷，同样造成冷却不均出现软点。

(7) 过热和过烧（或熔化）

火焰加热淬火的零件在加热过程中，由于火焰焰心的温度高达3000℃左右，如果火焰在零件的某个部位加热时间长，则容易造成该处出现过热甚至过烧缺陷，因此要求操作者具有熟练的操作技术，同时对常见材料的淬火温度有感性的认识和颜色辨别能力，从而避免过热现象的发生。

另外如果火焰的移动速度慢或在某处停留，火焰调节不合适等将造成该处组织熔化，尤其是在零件的尖角、孔的边缘等位置，因此要特别注意，该缺陷将造成零件的整体报废。

(8) 零件表面熔化

表面呈“汗珠状”，是由于火焰喷嘴移动过慢，或在某一位置停留造成的，此外，零件的尖角、内孔的边缘受热温度高也会造成熔化。

(9) 变形（畸变）

火焰淬火极易造成零件的变形，大多同加热和冷却不均匀有关，对于板状零件的淬火能够通过改变加热技术条件来加以调整。通过改进喷嘴形状、尺寸，改进加热和冷却的措施来控制淬火变形，如使工件旋转等可减少零件产生畸变的可能，提高零件淬火后的变形合格率，另外通过改进零件的设计，避免出现截面厚薄悬殊、不对称以及尖角、凹槽、孔等，也可有效防止出现零件的畸变。

火焰表面淬火后的零件，尤其扁平等板状零件单边淬火后有一定的变形，其变形规律与感应加热淬火相似，为了减少淬火后的变

形，可预先将零件加压成反弯曲形状，也可将零件放在循环水中，仅对水面以上的表面进行火焰加热淬火。具体操作和变形情况见图 5-7。另外为了改变加热的条件，要及时调整喷嘴的尺寸等来减小变形，除上述措施外也可对零件的单面夹紧固定后进行长时间的回火来消除变形，资料 [10] 介绍，对火焰淬火产生的变形，采用加热校直可恢复零件的尺寸精度。

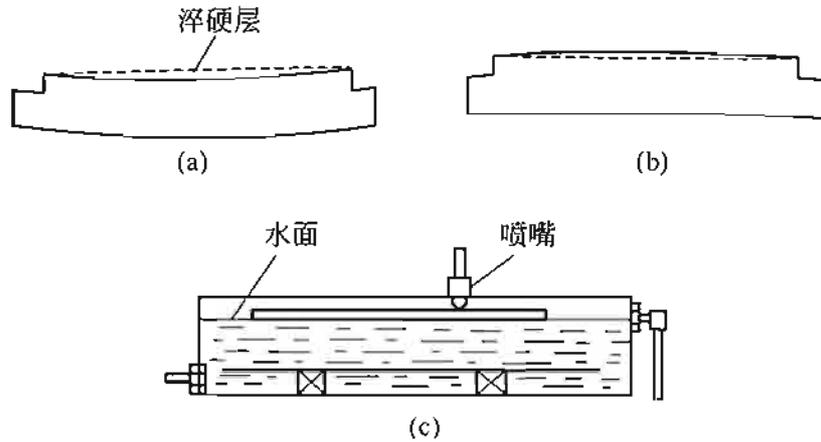


图 5-7 扁平零件火焰淬火的变形和防止方法

5.3.3 影响火焰淬火表面质量的因素

火焰淬火的质量检验应包括零件的外观、表面的硬度、有效硬化层的深度和硬化区的范围以及表面的金相组织等，因此在实际淬火过程中要严格执行有关的技术要求，确保热处理后的表面符合图纸的规定。

零件在进行火焰加热前，需对其进行整体的调质或正火处理，确保淬火后的组织和性能符合技术要求，另外淬火的部位不允许存在氧化皮和脱碳现象，零件在淬火后必须在 $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ 低温回火。

① 火焰的影响。加热温度、淬硬层深度、过渡区域组织和晶粒都与火焰有直接的影响，为保证零件的受热部分温度均匀，应采用多嘴喷式的喷头。

② 喷嘴与零件加热面的理想距离为 $6\sim 15\text{mm}$ 。

③ 喷嘴与零件的移动速度。根据零件的技术要求来确定运动

速度，喷嘴移动速度与淬硬层深度有一定的对应关系，原则为淬硬层深则速度要慢，一般速度为 50~150mm/min。

资料 [15] 推荐中碳钢零件移动速度与淬硬层之间的关系见表 5-2。

表 5-2 中碳钢零件的移动速度和淬硬层的关系

淬硬层深度/mm	2	3	4	5	6	7	8
移动速度/mm·min ⁻¹	166	145	125	110	111	90	80

④ 喷水器与火焰的合适距离。一般保持 15mm 左右，但不大于 20mm。

⑤ 冷却介质的温度。水温在 15~18℃，回火温度在 180~220℃，回火时保温时间应在 1h 以上。

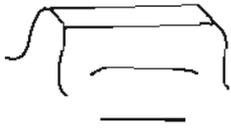
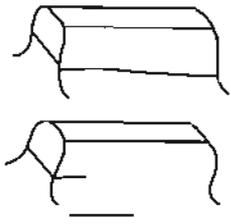
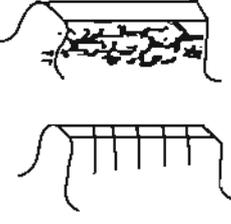
5.4 实例分析

5.4.1 齿轮的表面淬火开裂

齿轮是机床制造、汽车、拖拉机等生产过程中必不可少的重要零件，根据齿轮的工作特点，应选用低碳合金钢或中碳钢等，齿轮经过正火或调质，最后进行渗碳或化学热处理，既保证了齿轮基体组织的综合力学性能，又增加了轮齿的耐磨性、抗咬合性，提高了齿轮的疲劳强度和冲击韧性，延长了齿轮的使用寿命。齿轮工作时，通过齿面的接触来传递动力，其主要承受载荷作用在齿轮牙顶上，汽车齿轮的牙齿根部受到弯曲应力的作用，其大小为 0.7~0.8GPa，其周期性变化的应力使牙齿疲劳断裂或脆性折断，而齿面受到接触应力的作用，接触应力是由于两个齿面的相互接触产生的，此时最高应力达到 2.5~3GPa，因此齿轮的受力状态十分复杂，必须经过热处理才能满足其工作需要。

齿轮齿顶进行高频淬火时，如果操作不当则容易出现密集裂纹，具体见表 5-3。

表 5-3 齿轮淬火裂纹及防止方法

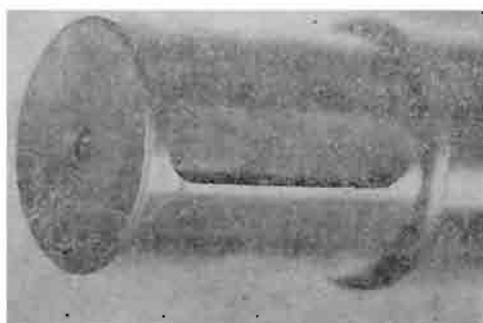
序号	裂纹形式	裂纹成因	防止措施
1		全齿淬火时,齿顶温度过高,冷却过于激烈	改进工艺参数,控制加热温度,采用缓和冷却介质,控制出水或停喷温度,采用自回火或及时回火
2		齿端面过热及急冷	改进工艺参数,控制加热温度,采用缓和冷却介质,控制出水或停喷温度,采用自回火或及时回火,防止端面过热
3		沿齿面同时淬火时,加热温度过高,冷却过急,产生龟裂	改进工艺参数,控制加热温度,采用缓和冷却介质,控制出水或停喷温度,采用自回火或及时回火
4		沿齿面连续淬火时,齿顶温度过高,冷却过急	增大感应器与齿顶间隙,注意齿顶和齿面的温度均匀性,改进工艺参数,控制加热温度,采用缓和冷却介质,控制出水或停喷温度,采用自回火或及时回火

从齿轮淬火开裂的缺陷分析,一是从齿轮选用的材料、设计的具体结构、高频淬火的温度和均匀程度、选用的冷却介质、回火的方式和方法的分析和判断,二是深入生产现场,了解和确定出现淬火裂纹的时间、具体部位以及裂纹的形状和大小、具体的形态等,必要时进行金相分析,采用因果分析图排查可能存在的因素,为避免该类缺陷提高科学的依据,也为今后的实际高频淬火制定出切实可行的热处理规范。

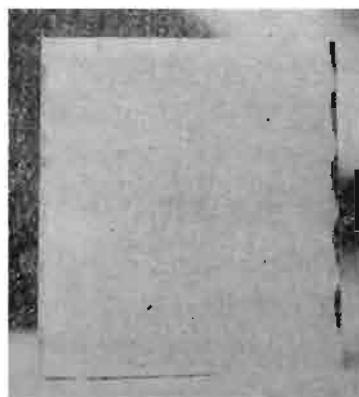
5.4.2 60 钢轴的高频淬火出现螺旋状软带

60 钢轴经调质处理后,要求高频淬火和低温回火后的硬度为 58~64HRC。工艺选用 GP-100 高频机床进行旋转连续加热淬火、喷水冷却,加热温度在 860~880℃ 之间,喷水冷却后轴表面形成了螺旋状软带(黑色带),此处的硬度在 40HRC 左右,不符合技

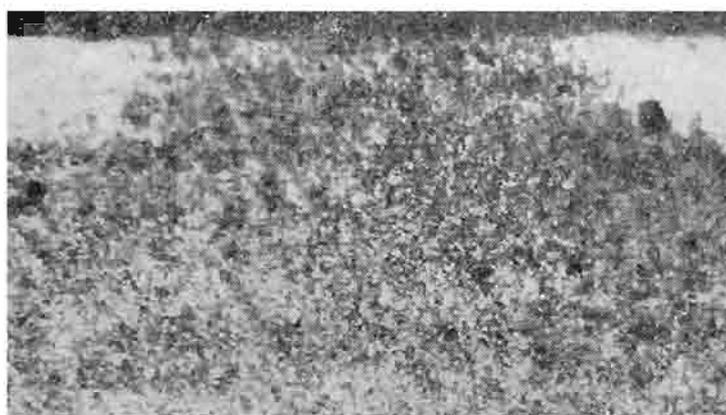
术要求。图 5-8 为 60 钢轴的高频淬火后产生的螺旋状软带情况。图 5-8(a) 为形成软带的形状，可以看到黑白相间的条纹，二者之间存在很大的硬度差。图 5-8(b) 为该轴的纵向剖面，浸蚀后可以看到上下两边有淬硬层和非淬硬层相间存在。图 5-8(c) 为螺旋状软带的显微组织，图中白色的区域为马氏体，黑色部位为非硬化区。



(a) 未浸蚀的实物



(b) 纵向剖面 (4% 硝酸酒精溶液浸蚀)



(c) 横截面的显微组织 ($\times 25$, 4% 硝酸酒精溶液浸蚀)

图 5-8 60 钢轴高频淬火后的螺旋状软带

该轴的化学成分、原始组织等合格，因此产生螺旋状软带的原因只同高频淬火的整个过程有关，结合具体的实际操作流程和感应圈的形状，对产生的原因进行归纳，现总结如下。

① 感应圈的高度太低，造成冷却不足或造成已经淬火的区域发生自回火。

② 感应圈汇流条之间的距离太大，出现工件表面的加热不足，故造成硬度存在差异。

③ 轴一边旋转一边移动，二者之间的速度不协调，一般多是移动速度过快所致，或是轴未加热到奥氏体化温度而进行了冷却的结果。

④ 感应器上的喷水孔出现堵塞，或喷水孔的角度不一致。

⑤ 感应圈本身有变形，呈非圆形状，或是轴在感应器内出现偏心旋转。

5.4.3 感应淬火时孔洞的边缘出现淬火裂纹

工件的圆柱面或平面上如有孔洞，在进行高频淬火时，孔洞的边缘则很容易产生放射状的淬火裂纹。其裂纹的一般形式见图5-9，分析裂纹的原因，是由于存在孔洞，感应淬火时其致使感应电流无法穿过孔洞，而只能在孔洞轴线的两侧绕行通过，因此就造成孔洞周围电流分布的不均匀。根据感应加热的原理可知，孔洞轴线两侧的涡流密度明显比与轴线垂直的两侧的涡流密度大，因此前者形成了高温加热区，后者区域温度较低，具体见图5-10。由此可见，孔洞周围的加热温度有较大的差异，因此淬火组织转变的过程有快慢之分，势必造成硬化层深度的不同，故在孔洞的周围产生了热应力和组织应力等，这是孔洞出现开裂的根源。另外工件上孔洞的大小、结构以及边缘的冷却等因素的影响，将造成该区域冷却速度加剧，也增加了产生裂纹的敏感性，这一点已经得到了证明。



图 5-9 感应淬火时孔洞边缘产生的淬火裂纹

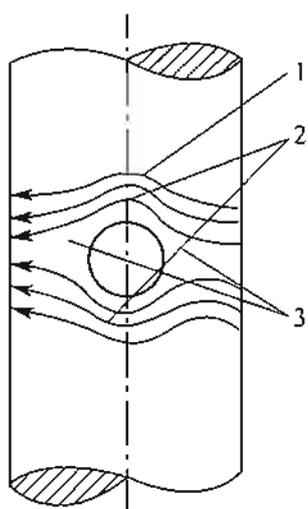


图 5-10 感应淬火时孔洞附近产生涡流以及温度的分布情况
1—涡流线；2—高温区；
3—低温区

对于孔洞在感应淬火后容易出现淬火裂纹的问题，要采取有效的措施和手段，即确保孔洞周围温度的一致，可避免此类缺陷的产生。热处理操作者和技术人员在生产实践中总结出以下方法，其实用性强、操作方便，得到了广泛的应用。

① 在孔洞中塞进低碳钢销子，使销子的顶面与孔洞的表面平齐，这样感应加热时孔洞的周围通过的电流密度均匀一致，因此加热温度相同，从而有效避免了孔洞边缘淬火裂纹的产生。

② 感应圈上对应的喷水孔，即将孔洞对应的喷水孔堵塞，以此来改善孔洞周围的冷却条件，由喷水冷却变为了流水冷却，降低了冷却速度，因此可有效防止淬火裂纹的发生。

③ 孔洞中添入石棉绳或湿的木塞，尽管不能改变孔洞周围加热温度的不均匀性，但可以降低孔洞边缘的淬火冷却速度，因此在一定程度上起到防止孔洞边缘裂纹产生的作用。

第 6 章

化学热处理缺陷及其对策

钢的化学热处理是指将工件在一定温度的活性介质中保温一段时间，使一种或几种金属原子或非金属渗入钢件的表面，以改变其表面成分、组织和性能的一种热处理工艺。化学热处理的目的是强化零件表面、提高其力学性能，保护零件表面，该工艺在工业生产中得到了极为广泛的应用。

根据渗入元素的不同，化学热处理的类型有渗碳、渗氮、碳氮共渗、硫碳氮共渗、渗硼、渗铬、渗铝、渗硅等多种工艺，近年来发展了辉光离子渗氮、高温真空渗碳、物理化学气相沉积、氮化钛镀层等工艺方法，根据需要可进行脱碳处理和脱氢处理等，通常按零件在不同工作条件下的目的和要求不同，将化学热处理分为两类。

① 提高零件表面力学性能的化学热处理。如渗碳、渗氮、氮碳共渗、碳氮共渗、硫氮碳三元共渗等，目的是用于提高工件的疲劳强度、硬度、耐磨性、抗咬合性等，镗杆、机床丝杠、机床主轴、气门等经化学热处理后明显提高了抗拉强度、降低了缺口敏感性和提高了使用寿命。

② 提高零件表面化学稳定性的化学热处理。如渗铬、渗铝、渗硅等，可使工件表面具有抗腐蚀性、抗黏着力和提高化学稳定性。该工艺用于量具、工具及汽车行业零部件的化学热处理。

6.1 渗碳

6.1.1 渗碳的作用

钢的渗碳是指将低碳钢零件放在富碳气氛的介质中进行加热

(温度一般为 880~950℃)，保温一定时间，使活性碳原子渗入零件表面，从而提高表层碳浓度的过程，零件的表面被碳所饱和而获得高碳的渗层组织。

渗碳处理后表面到中心的碳含量分布适当，由表层高碳(0.8%~1.05%)逐渐过渡到基体组织成分，缓冷后的组织为：表层是珠光体与碳化物所组成的过共析组织，次表层是珠光体共析组织，其次是珠光体和铁素体的亚共析组织，最后为基体组织。渗碳后的工件必须进行适当的淬火和回火，才能改善工件的表面及心部组织，表层为回火马氏体，提高表面硬度及耐磨性，增强工件的疲劳强度；心部具有足够的韧性和塑性，以满足工件工作过程的需要。

该工艺增加了钢件表面的含碳量和形成一定的碳浓度梯度，经淬火和回火后获得高的表面硬度和耐磨性，提高了钢的疲劳强度。

从钢的渗碳过程和形式来分析，钢的渗碳过程通常分为三个基本阶段。

① 渗碳介质的分解 指渗碳介质在一定的温度下，发生分解反应析出活性碳原子。

② 钢件对碳原子的吸收 分解出的活性碳原子被吸附在零件的表面并渗入表面。

③ 碳原子的扩散 零件表面吸收活性碳原子，碳浓度大大提高，沿着碳梯度的下降逐渐向内部渗入，完成零件表面碳成分的变化，获得理想的技术要求。

零件的渗碳分为三类：固体渗碳、气体渗碳和盐浴渗碳，根据生产过程中实际的设备条件、技术水平、生产能力、对零件的具体技术要求以及其他的一些条件要求合理选择渗碳工艺。当渗碳零件的表面含碳量达到要求，碳浓度的梯度分布均匀后，进行零件的热处理。目前采用固体渗碳和盐浴渗碳的工艺逐渐减少，取而代之的是离子渗碳、真空渗碳、可控气氛渗碳等，气体渗碳作为已经成熟的渗碳工艺得到了广泛的应用，例如滴注式渗碳等。几种渗碳工艺具体的优缺点比较见表 6-1。

表 6-1 几种渗碳工艺的优缺点

序号	具体项目	气体渗碳	固体渗碳	离子渗碳	真空渗碳	可控气氛渗碳
1	渗碳温度/°C	920~950	910~950	930~960	980~1035	930
2	渗碳速度 /mm·h ⁻¹	<0.2	<0.1	>0.60	>0.60	<0.30
3	表面粗糙度	一般	粗糙	洁净光亮	洁净光亮	一般
4	变形程度	中	大	小	大	中
5	晶粒度	一般	一般	一般	必须经细化处理	一般
6	狭窄小孔渗碳	一般	差	优	良	一般
7	脱碳层	有	有	无	无	有
8	耐磨性	一般	差	良	良	一般
9	防渗方法	遮蔽或涂防渗涂料	遮蔽或涂防渗涂料	遮蔽	遮蔽	涂防渗涂料
10	碳的控制	控制液体和气体的流量	木炭的新旧和数量	放电时间, 气体碳的流量	气压脉冲	控制碳势
11	渗碳气氛的消耗	大	大	低	中	不好
12	节约能源	一般	差	好	中	差
13	劳动条件	差	差	好	好	好
14	公害	有	有	无	无	有

从表 6-1 中可知从质量的区别、渗碳的成本、设备的投入、生产效率、碳势的控制以及作业环境等几个方面来看, 上述几种渗碳方式各有优缺点, 在具体的渗碳工艺、设备的选择上, 应慎重考虑, 力争以最低的投入获得最佳的渗碳效果。

6.1.2 渗碳零件的热处理

渗碳结束后的零件, 进行热处理后才能获得要求的硬度、耐磨性和力学性能。渗碳钢的含碳量一般在 0.25% 以下, 有的含碳量达到 0.35%。渗碳零件大多为比较重要的零件。要求力学性能和可靠性较高, 为了便于操作者选用材料、渗碳工艺以及随后的热处理, 现将其归类, 见表 6-2。

表 6-2 常见结构钢的渗碳、淬火、回火热处理规范及性能

钢号	渗碳温度 /℃	淬火		回火		表面硬度 (HRC)
		温度/℃	介质	温度/℃	介质	
10	920~940	890~780	水			62~65
15	920~940	760~800	水	160~200		—
20	920~940	770~800	水	160~200		—
25	920~940	—	—	—		—
20Mn	910~930	770~880	水	160~200	空气	58~64
20Mn2	910~930	810~890	油	150~180	空气	≥55
15MnV	900~940	降至 820~840	油	180~220	空气	≥55
20Mn2B	910~930	800~830	油	150~200	空气	≥56
25CrTiB	930	降至 830~860	油	180~200	空气	≥58
20Mn2TiB	930~950	降至 830~860	油	180~200	空气	56~62
20SiMnVB	920~940	860~880	油	180~200	空气	56~61
23SiMn2Mo	930	850~880	油	180	空气	≥58
24SiMnMoVA	900~940	840~860	油	160~200	空气	≥58
15SiMn3MoA	930	760~800	油	150~200	空气	≥58
12SiMn2WVA	930	780~800	油	160~180	空气	≥58
15Cr	900~930	780~820	油	170~190	空气	≥56
	900~930	降至 870		180~200		≥54
20Cr	920~940	770~820	油或水	160~200	油或空气	58~64
20CrV	920~940	770~820	油或水	180~200	空气	—
20CrMo	920~940	810~830	油或水	160~200	空气	—
25CrMo	920~940	770~810	—	160~200	—	—
15CrMn	920~940	780~920	—	160~200	—	—
20CrMn	910~930	810~830	—	180~200	—	—
15CrMnMo	900~920	780~800	油	180~200	—	≥53
20CrMnMo	900~930	810~830	油	180~200	空气	58~63
20Cr2Mn2Mo	920~940	870~880	油	620~650	—	—
		810~830		160~180		

续表

钢号	渗碳温度 /°C	淬火		回火		表面硬度 (HRC)
		温度/°C	介质	温度/°C	介质	
20CrMnTi	920~940	降至 820~850	油	180~200	空气	56~63
	920~940	830~870				
20CrNi	900~930	800~820	油	180~200	—	58~63
12CrNi2	900~940	810~840	油	150~200	油或空气	≥56
12CrNi3	900~920	810~830	油	150~200	空气	
12Cr2Ni4	900~930	770~880	油	160~200	空气	≥60
20Cr2Ni4	900~930	780~820	油	160~200	空气	≥58
	900~950	810~830		150~180		
18Cr2Ni4WA	900~940	840~860	油	150~200	空气	≥56
20CrNiMo	920~940	780~820	油	180~200	空气	58~65
20Ni4Mo	930	780~840	油	150~180	空气	≥56
20Cr2Mn2SiMoA	920~950	降至 890	油	600~620	空气	≤269HB
		810~830		150~180		58~60

零件渗碳后进行一次淬火或两次淬火的温度有很大的差别，由于渗碳后的零件是一种复合材料，等于两种钢在同一温度下进行热处理，要求淬火温度应同时满足渗碳层和心部的技术要求等。因此确定使渗碳层获得良好显微组织的淬火温度，以及使非渗碳部分获得良好的显微组织和力学性能的淬火温度，是渗碳零件必须面对的客观问题。通常推荐的一次淬火温度为 840~860℃，此时的力学性能为最佳状态；两次淬火分两步进行，首先在 880℃ 进行淬火，然后在 820~840℃ 进行二次淬火，根据工件的成分、形状和力学性能的要求不同，渗碳后常采用以下几种热处理方法。

① 直接淬火+低温回火。该工艺仅用于本质细晶粒钢。渗碳后晶粒不易长大，渗碳后由渗碳温度降至 860℃ 左右，将零件自渗碳炉中取出直接淬火，然后回火以获得表面所需的硬度。该方法优点是：操作方便，生产效率高，零件的变形和脱碳较小，减少加热和冷却的次数，节约零件重新加热淬火的能源。多用于处理变形小和承受冲击载荷不大的零件，直接淬火在气体渗碳和液体渗碳中应用较多，渗层组织为回火马氏体+残余奥氏体，心部为低碳回火马

氏体，应力较大，需立即回火以减少脆性，降低内应力，提高力学性能。但进行直接淬火的条件有两点：渗碳后奥氏体晶粒度在 5~6 级以上；渗碳层中无明显的网状和块状碳化物。该方法的缺点是：淬火温度较高，晶粒粗大，表层残余奥氏体量增多，降低了表层硬度。20CrMnTi、20MnVB 等钢在气体或液体渗碳后大多采用直接淬火，淬火油温为 80~100℃，工件在油槽中上下移动距离至少要大于一个渗碳罐的高度。

② 预冷直接淬火+低温回火。渗碳后零件先进行预冷到 800~850℃，再进行淬火，预冷的目的是减小淬火变形；使表面的残余奥氏体因碳化物的析出而减少。预冷有两种方法，一是随炉降温，在周期式渗碳炉中将炉温降到规定的预冷温度后出炉淬火，在连续作业炉中，工件被送入预冷区随后淬火；二是在空气中预冷淬火，其缺点为温度不易掌握，操作不便，易造成表面脱碳，故应用极少。预冷直接淬火表面硬度略有提高，但晶粒没有变化，预冷温度应高于钢的 A_{r3} ，防止心部析出铁素体。预冷温度是控制零件质量的关键，温度过低心部出现大块状的铁素体；温度过高影响预冷过程中碳化物的析出，残余奥氏体量增加，同时也使淬火变形增大。该工艺易于操作，零件的氧化脱碳及淬火变形均较小，多用于细晶粒钢制作的零件。

③ 一次加热淬火+低温回火。指将渗碳件快冷至室温后再重新加热进行淬火和低温回火，适用于淬火后对心部有较高强度和较好韧性要求的零件，它是现实生产中广泛采用的方法。淬火温度应略高于钢的 A_{c3} ，对于只要求表层有较高耐磨性而不考虑心部强度的零件，淬火温度一般在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间，通常 820~850℃ 淬火后心部组织为低碳马氏体，使心部与表层组织都有所改善，而对于要求较高的采用 780~810℃ 加热来细化晶粒。淬火温度要根据渗层的组织来选择，假如有网状碳化物且十分严重，就必须采用高的淬火温度来消除网状碳化物。该工艺适用于下列零件。

a. 固体渗碳的碳钢和低合金渗碳钢零件，也用于气体、液体渗碳后的粗晶粒钢及渗碳后不能直接淬火或需机械加工的零件（若

为两相区加热，当下区冷至 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 时即可出炉转入倒有一定量煤油的缓冷坑中，将坑内空气排出)。

b. 容易发生过热的碳钢和只含锰的合金钢。

c. 某些不宜直接淬火的零件及因设备条件限制，不允许直接淬火的零件。

d. 对于形状复杂和变形要求较严的渗碳件也可进行分级淬火处理。

该工艺可细化晶粒，确保心部不会出现游离的铁素体，表层也不会出现网状渗碳体，提高了工件的力学性能。

④ 高温回火+淬火+低温回火。该工艺指渗碳温度为 $850\sim 860^{\circ}\text{C}$ ，经高温回火后残余奥氏体分解，渗层中碳和合金元素以碳化物形式析出，易于机械加工同时残余奥氏体减少。主要用于 Cr-Ni 合金钢零件。

⑤ 两次淬火+低温回火。将渗碳工件冷却至室温后，再进行两次淬火，然后低温回火。这是一种心部与表面都获得高性能的热处理方法。第一次淬火加热心部到 A_{c3} 以上，目的是消除网状碳化物或细化晶粒，碳钢通常为 $880\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，水冷，合金钢为 $850\sim 870^{\circ}\text{C}$ ，油冷；第二次淬火是为改善渗层组织和性能，获得针状马氏体和均匀分布的未溶碳化物颗粒及少量的残余奥氏体，心部是细粒状的铁素体+珠光体（碳钢）或低碳马氏体+少量铁素体（合金钢），二次淬火有利于减少表面残余奥氏体的数量，达到对硬度和耐磨性的要求。该工艺的缺点是工艺周期长，能源消耗大，工艺较复杂，容易造成零件的氧化、脱碳及变形，生产成本较高，主要适用于有过热倾向的碳钢和表面要求具有高耐磨性，心部具有高冲击性的重载荷零件，即对力学性能要求很高的重要渗碳零件的处理。

⑥ 两次淬火+(冷处理+低温回火)（亦称为高合金钢减少表层残余奥氏体量的热处理）。对于 12CrNi3A、20Cr2Ni4A、18Cr2Ni4WA 等高强度渗碳钢，因合金含量较高，采用一般的淬火、回火，其表层组织中会形成大量的残余奥氏体，使零件的表面硬度和疲劳强度降低。为了减少渗碳层残余奥氏体量及改善切削加

工性，一般采用下列工艺。

a. 高温回火。由于高合金钢淬透性好，渗碳空冷也会较硬，零件不易加工，故一次淬火时在淬火前增加一次高温回火；采用两次淬火则在第二次淬火前增加一次高温回火。其目的在于高温回火使残余奥氏体析出合金碳化物降低其稳定性，淬火时转变为马氏体和使渗碳层表面硬度降至 30HRC 左右，同时减小淬火时的变形。回火温度一般为 640~680℃，保温 3~8h。

b. 分级淬火+高温回火。对渗碳件的心部韧性要求较高时，通常采用此方法，经高温回火和机加工后再加热到 850~860℃，在 260℃分级 25min，表层为奥氏体而心部得到了淬火马氏体。然后 560℃回火 2h，表层奥氏体稳定性降低，心部是回火索氏体组织。

c. 冷处理+低温回火。对高强度的渗碳件在分级淬火+高温回火后，需进一步减少表面的残余奥氏体量，通常在低温回火前增加冷处理工序，用于进一步提高表层硬度；对直接淬火的高强度钢经渗碳、淬火后再进行冷处理，同样可达到提高硬度的目的。高于 A_{c1} 或 A_{c3} （心部）温度淬火，淬火后随之降到 -80~-70℃进行冷处理，残余奥氏体减少，促使奥氏体转变充分，从而提高表面硬度和耐磨性，然后进行低温回火以消除内应力。该工艺用于渗碳后不需进行机械加工的高合金钢零件。

⑦ 渗碳后感应淬火+低温回火。对于要求心部强度不高，而表面主要承受接触应力、磨损以及扭矩或弯矩作用，可在渗碳缓冷后进行高频或中频感应加热淬火，细化渗碳层及渗碳层附近区域的组织，因此有较好的韧性，淬火变形小，非硬化部位不必预先做防渗处理（如齿轮的轴孔、键槽等），多用于齿轮和轴类零件。由于生产效率高，操作简便，应用较普遍。

渗碳件的加热可在井式炉、箱式炉和盐浴炉中进行，为防止加热时氧化脱碳，在井式炉、箱式炉中应滴入煤油或通入保护气氛，盐浴炉脱氧充分，根据材料的成分、性能要求等不同，选用合理的淬火介质（油或盐水等），对于形状复杂、有尖角和沟槽、厚度悬

殊较大的工件，为防止开裂和变形，可采用分级淬火。

采用上述方法，使渗碳后工件达到了表面硬度高，心部韧性好的目的，在使用过程中发挥了良好的作用，因此应用比较广泛。

6.1.3 零件渗碳后常见的热处理缺陷和预防措施

低碳钢或低碳合金钢经过渗碳后，表面得到了高的含碳量，即改变了零件表面的含碳量，经过淬火和回火后获得高的硬度和良好的耐磨性，而内部的成分基本没有改变，既保持了原材料的组织性能，内部仍为高的塑性和良好的韧性（具有综合的力学性能），渗碳后的质量检查包括原材料、渗层深度、心部游离的铁素体级别、渗层和心部硬度、变形量的检查等。影响渗碳质量的因素很多，为便于操作者分析渗碳过程中出现质量缺陷的原因，及时处理存在的问题，有利于指导渗碳的工艺技术，现将一般渗碳过程中常见的缺陷归纳为表 6-3，供参考。

表 6-3 零件渗碳过程中的常见缺陷和预防措施

缺陷名称	产生原因	预防措施
渗碳层过深（或过渗碳）、渗碳层浓度梯度太陡	<ul style="list-style-type: none"> ① 渗碳温度过高，保温时间过长 ② 固体渗碳的渗碳剂活性过分强烈或气体渗碳碳势高 ③ 钢中含有铬、钼等强碳化物形成元素 	<ul style="list-style-type: none"> ① 按正常的渗碳工艺执行 ② 固体渗碳采用新渗碳剂时，应放入 60%~70% 的旧渗碳剂 ③ 对碳浓度梯度太陡而渗层厚度不符合要求的零件，在中性介质中加热至正火温度并保温适当时间，在油中或空气中冷却可减少碳浓度梯度
气体渗碳渗入困难，甚至表面脱碳	<ul style="list-style-type: none"> ① 排气不足，炉内气氛未能达到正常的气氛 ② 风扇旋转方向错误 ③ 热短路。挡板装反、风扇叶轮两端的间隙过大，零件与风扇之间距离远，风力不足等造成炉内气氛循环不良 ④ 渗碳前曾进行回火或软氮化处理 ⑤ 马弗罐内或料架不清洁 ⑥ 在扩散期内炉内的碳势过低 ⑦ 出炉温度过高，在空气中引起氧化和脱碳 ⑧ 渗碳后出现多次加热 	<ul style="list-style-type: none"> ① 加大加高排气管，延长排气时间，堵塞炉盖上的其他孔洞间隙，防止空气进入炉内 ② 重新接风扇的导线 ③ 根据实际情况调整

续表

缺陷名称	产生原因	预防措施
渗碳层深度不够, 渗碳层的碳浓度过低	① 渗碳温度太低, 保温时间短 ② 固体渗碳剂的活性差或碳势低 ③ 气体渗碳剂的滴量不足(浓度低)、炉气碳势低或炉子密封不严(漏气) ④ 装炉量过多或渗碳罐、夹具、吊具有变化, 使用了新工装或第一次启炉 ⑤ 炉内气压偏低 ⑥ 表面被炭黑或灰覆盖 ⑦ 零件表面有氧化皮等或碳含量低、心部硬度低 ⑧ 冷却水套漏水 ⑨ 零件表面有氧化皮	① 调整渗碳工艺 ② 在固体渗碳剂中添加 30%~40% 的新渗碳剂, 增大气体渗碳的流量 ③ 可重新进行渗碳处理 ④ 严格控制各种工卡具符合技术要求, 装炉量合适, 对新工装要进行预渗 ⑤ 加大渗碳气氛的流量或重新渗碳处理 ⑥ 对炉内气氛进行稀释或重新清理后渗碳 ⑦ 重新进行渗碳处理 ⑧ 修复水套 ⑨ 渗碳前进行表面清理
渗碳层深度厚薄不均匀	① 炉温不均匀或温度过高 ② 零件表面的氧化皮、锈迹等没有清理干净, 存在油污等 ③ 零件的装炉方法不合理, 工件之间距离太近, 无气流通道, 放置不当、循环不良或搅拌性差, 局部有死角或气体供应渗碳不足 ④ 固体渗碳时渗碳剂拌和不均匀, 或渗碳箱的尺寸太大、温差过大, 或碳势不均 ⑤ 渗碳时炉气恢复太慢, 或炉内气氛循环不良 ⑥ 零件表面沉积炭黑	① 改善炉温的均匀性和控制工艺温度, 改进炉丝的分佈 ② 渗碳前清理干净零件表面, 确保表面清洁, 渗剂滴量恰当 ③ 装料合理, 零件之间应有一定的距离, 确保渗碳的正常进行 ④ 渗碳剂搅拌均匀, 控制渗碳箱的尺寸 ⑤ 加大渗碳气氛的流量, 进行气体的搅拌, 确保碳势稳定 ⑥ 降低碳势, 或重新渗碳
渗碳层表面脱碳(图 6-1)	① 固体渗碳时密封不严 ② 气体渗碳时炉体漏气, 流量小, 炉内压力小或出现负压 ③ 渗碳后期渗剂浓度减小过多造成碳势过低 ④ 固体渗碳后冷却过慢 ⑤ 在冷却坑内及淬火加热时保护不当等产生脱碳	① 提高渗碳箱或气体渗碳炉的密封性, 确保无空气进入 ② 渗碳后零件应以较快的速度冷却或进行直接淬火, 改善冷却条件以及淬火时加热保护 ③ 在正常的渗碳温度下进行短时间的表面补碳(或复碳), 也可进行抛丸处理, 去掉脱碳层

续表

缺陷名称	产生原因	预防措施
渗碳层淬硬后有剥落	①渗碳零件表面碳浓度梯度太陡或急剧变化,硬度不均 ②淬火时冷却介质选择不当	①采用活性较弱的渗碳剂 ②合理确定和掌握渗碳过程中的扩散期 ③采用冷却比较缓慢的冷却介质 ④采用扩散退火处理后再进行淬火
表面淬火硬度偏低或不均匀	①淬火冷却速度慢和冷却不均匀 ②高合金渗碳钢渗碳层的碳浓度太高,渗碳不均匀,淬火温度偏高或过低,保温时间太长,油温过高,造成渗碳层保留大量的残余奥氏体组织或表面形成了托氏体,回火温度高 ③材料使用不当或碳含量低 ④表面出现氧化层、网状物,加热时表面脱碳严重,残余奥氏体量过多形成托氏体组织、晶界氧化 ⑤零件表面不清洁,或被炭黑、氧化皮、污物覆盖等,渗碳不均匀 ⑥表面的碳浓度低(炉温低或渗剂浓度不足)	①选择合适的冷却介质,确保应有的冷却速度 ②控制渗碳层表面的碳浓度,按正常的渗碳工艺操作 ③高合金渗碳钢渗碳后,在680℃左右进行长时间的高温回火,然后低温(780℃左右)淬火,可明显降低残余奥氏体的含量 ④重新进行渗碳处理 ⑤清理干净零件的表面,重新进行渗碳,同时确保均匀加热、气流畅通等,另外注意固体渗碳相的大小、渗碳剂的填充方法等符合相关要求 ⑥对出现过多残余奥氏体的工件进行冰冷处理 ⑦重新补渗
心部硬度高或低	化学成分不稳定,淬火温度变化,加热时间有变化,淬火冷却介质的温度和流动性等	①改变材质 ②严格控制和调整淬火的加热温度 ③改善冷却介质的冷却能力、温度和流动性,合理装卡,加强零件的上下运动
表面有麻点腐蚀和氧化	①渗碳剂中含有0.3%以上的硫或硫酸盐、渗剂不良 ②渗碳后零件表面黏附有残盐 ③渗碳件淬火加热盐浴脱氧不良 ④渗碳件高温出炉或等温 ⑤炉子严重漏气或水套漏水 ⑥滴油管堵塞	①控制渗碳剂中硫酸盐的含量、选用合格的渗剂 ②对工作表面及时清理和清洗 ③确保盐浴炉内氧化物的含量符合工艺规定 ④避免出现高温氧化现象 ⑤确保炉子密封良好,修复水套 ⑥滴油管应垂直、通畅

续表

缺陷名称	产生原因	预防措施
表面出现玻璃状凸瘤	在固体渗碳过程中,渗碳剂混有 2% 以上的二氧化硅(即砂石)	①确保渗碳剂的纯净 ②采用旧的渗碳剂要彻底清除砂石以及封口用耐火黏土
晶界氧化或内氧化(图 6-2)	①含有微量的水和二氧化碳的吸热气体进行渗碳时,因水和二氧化碳与钢反应而在晶界形成氧化物 ②钢中的铬和锰极易氧化,当氧从钢的表面侵入时,晶界或晶粒附近硅、铬和锰比其他元素优先扩散到晶界,与固溶在表面的微量氧结合成氧化物,在钢的表面形成氧化物,金相观察晶界处的氧化物呈网状分布	①严格控制渗碳过程中水和二氧化碳的含量,使渗碳气氛中不存在微量的氧,避免形成晶界氧化物 ②在渗碳能够满足要求的前提下,缩短渗碳时间,或降低渗碳气氛活性碳原子、氮原子的含量
表面有鳞状腐蚀	①渗碳剂中有硫和硫酸盐等低熔点的夹杂物存在,黏附在零件的表面上,阻碍渗碳的进行 ②渗碳零件表面不清洁,有锈斑、残留切削油等;催渗剂的数量和混合状态、渗碳剂中的水分等不符合工艺要求	①采用合格的渗剂或将渗碳剂加热到 900℃ 焙烧 10~30h ②清理干净零件的表面,选用质量合格的渗碳剂,严格控制相关的渗碳因素等
表面存在的残余奥氏体过多(图 6-3)	①渗碳速度过快 ②渗碳或淬火时的温度高,奥氏体中碳及合金元素的含量过高 ③炉内的碳势过高 ④淬火冷却介质的温度过高	①控制渗碳速度 ②严格执行加热的热处理规范或淬火后进行冷处理、回火等,降低渗碳或淬火加热的温度 ③调节炉内扩散期渗剂的滴量和时间 ④降低冷却介质的温度 ⑤高温回火后重新加热淬火
晶粒或马氏体针粗大	①炉内的碳势过高 ②渗碳加热温度高、保温时间长 ③与冶炼方法有关,原始的化学成分不均匀等有关 ④渗碳后的热处理方法不合理	①调整炉内渗碳剂的分解速度 ②合理确定渗碳工艺,加强金相组织的检查 ③选用脱氧完全的合金钢,淬火前进行高温回火或正火处理 ④正确选用淬火方法 ⑤对粗大晶粒采用重新加热淬火处理,细化晶粒
过共析层及共析层深度过大或过小	①强渗阶段碳势过高 ②扩散时间短,而强渗时间长	①严格控制炉内碳势 ②调整渗碳工艺的时间

续表

缺陷名称	产生原因	预防措施
表面碳化物过多,呈大块或网状分布(图 6-4)	①炉内碳势高,扩散时间长,造成表面碳浓度过高 ②采用渗碳直接淬火,预冷时间长,表面温度过低 ③采用一次淬火时,淬火温度太低,预冷形成网状、块状碳化物 ④渗碳后冷却速度过慢	①降低渗碳剂活性,或重新在低的渗碳气氛中扩散一段时间 ②先正火后再进行淬火处理 ③如级别低于 2 级,进行正火处理,否则报废 ④渗碳结束后进行快速冷却
表面出现托氏体网或层,出现非马氏体组织(图 6-5)	渗碳介质中含有少量的氧向钢内扩散,表层下的 Mn、Cr、Si 等被严重地氧化形成氧化物,出现贫 Mn、Cr、Si 区域,淬透性降低,淬火后出现黑色组织(托氏体)	①改善炉气的成分,控制气氛中氧、二氧化碳和水的含量 ②减少渗剂中硫等杂质的含量 ③保持炉内压力的稳定 ④在排气期尽早恢复炉气的碳势 ⑤防止炉子漏气和风扇停止运转 ⑥向渗碳炉内通入氮气 ⑦减少加热次数,选择合理的加热时间 ⑧喷丸处理
心部铁素体过多(图 6-6)	淬火加热温度低或保温时间不足	按正常的工艺重新加热淬火
磨削裂纹	未经 100~200℃ 回火,即进行零件的磨削	应在回火后进行磨削加工
脆断	①材料本身存在缺陷,如疏松、晶粒粗大等 ②有折叠、重皮等锻造缺陷 ③淬火开裂 ④回火不良	①采用合格的钢材 ②改进锻造工艺参数 ③调整淬火工艺参数 ④改善或调整回火工艺参数,确保回火充分
开裂(渗碳缓冷,在冷却过程中产生表面裂纹)	渗碳后缓冷时组织转变不均匀所致,如 20CrMnTi 钢渗碳后空冷,在表层托氏体里面有一层未转变的奥氏体,在随后的冷却中转变为马氏体,渗层完成共析转变;或加快冷却速度使渗层全部为马氏体加残余奥氏体	①采用合理的工艺确保组织均匀转变 ②渗碳后缓冷,确保整个层深获得均匀一致的珠光体 ③渗碳后快冷,得到马氏体+残余奥氏体组织,或快冷到 150~200℃或 450~500℃,将零件及时转入 650℃ 的炉中高温回火,得到珠光体
反常组织	①原材料中含氧量较高 ②固体渗碳时冷却速度过慢,在渗碳层中先共析渗碳体网的周围有网状或大块铁素体,淬火后出现软点	提高淬火加热温度或适当延长淬火加热时间,使奥氏体均匀化,同时进行快速冷却

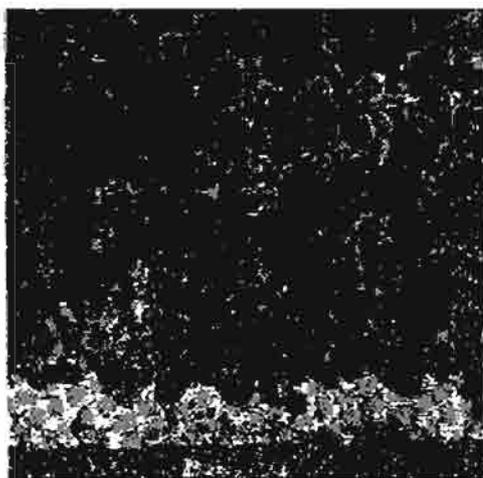


图 6-1 渗碳层脱碳的组织
(20CrMnTi 预冷钢, 920℃
气体渗碳, 降温到 860℃
出炉坑冷, ×400)

需要提到的是零件渗碳后渗层不均的类型见图 6-7, 通常产生的原因如下: 炉内气氛循环不良; 炉气中不饱和的碳氢化合物过多, 形成炭黑或结焦; 零件的装炉方式不当等。

6.1.4 渗碳零件的变形

渗碳零件的变形有渗碳过程中的变形和淬火后的变形两类, 影响变形的因素较多, 变形量超过工艺要求则直接对零件热处理的校直和磨削加工带来困难, 因此根据渗碳零件具有的一般变形的规律性, 在

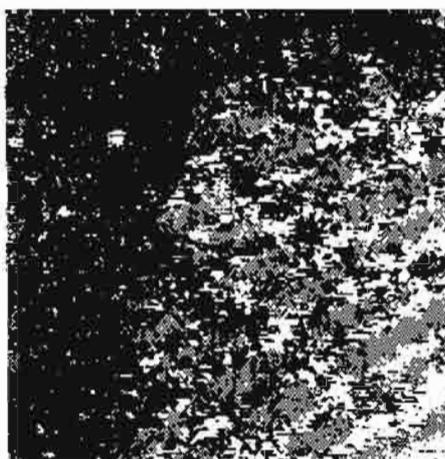
实际热处理过程中正确认识和合理判断对于减小零件的渗碳和热处理变形具有重要的意义, 采取必要的方法和措施是完全可以获得理想的变形要求的。下面分别介绍如下。

(1) 渗碳变形

低碳钢和低合金钢零件渗碳后进行淬火处理, 其目的是为了表层获得高的硬度和高的耐磨性, 而心部保持一定(足够)的韧性和



(a) 抛光状态



(b) 2% 硝酸酒精浸蚀

图 6-2 22CrMnMo 钢渗碳淬火齿轮棱部的晶界氧化

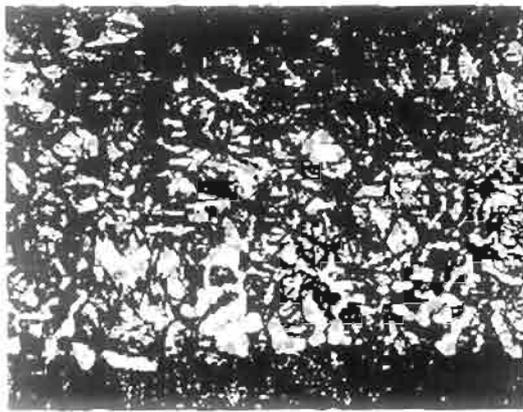


图 6-3 表面存在大量的残余奥氏体
(20CrMnTi 钢 940℃ 液体渗碳, 后直接淬火, 低温回火, ×400)

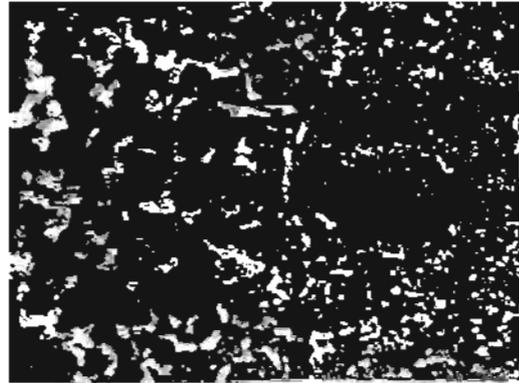


图 6-4 表面粗大块状碳化物
(20CrMnTi 钢 940℃ 液体渗碳, 预冷后直接淬火, 低温回火, ×400)

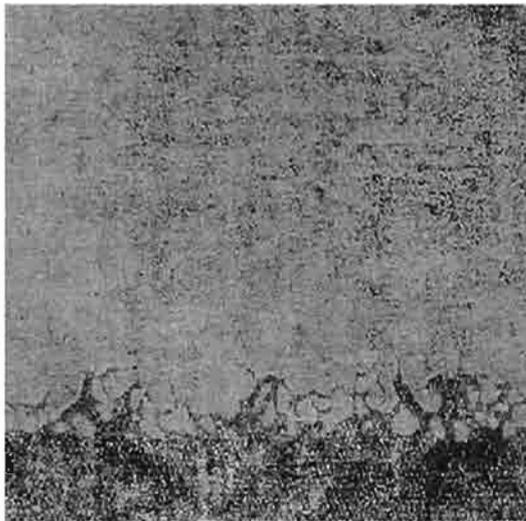


图 6-5 渗碳层中非马氏体组织
(20CrMnTi 钢, 940℃ 液体渗碳, 在 840℃ 中性盐浴中保温 30min 油冷, 抛光, ×400)

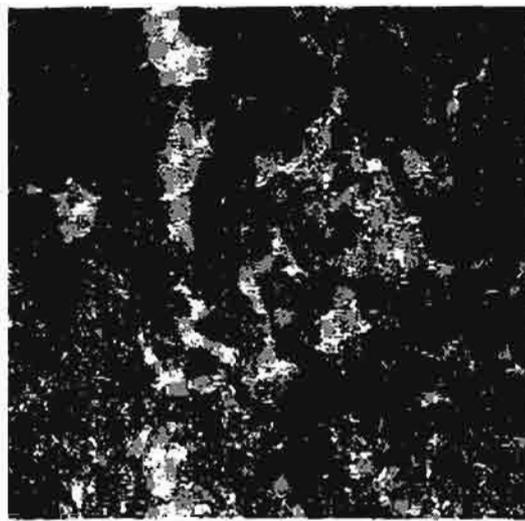
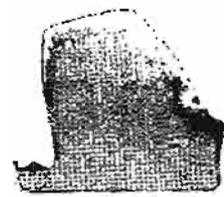
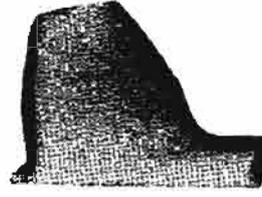


图 6-6 渗碳件心部出现过多的铁素体

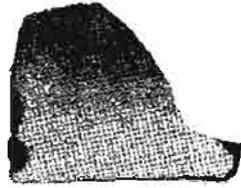
强度, 满足零件的工作需要。在实际生产过程中常采用的渗碳工艺有气体渗碳、固体渗碳和液体渗碳三种形式, 一般考虑到生产效率、质量特点、操作方便等采用气体渗碳工艺。渗碳变形一般表现为两种形式: 一种为有规律的收缩或胀大变形; 另外为不对称零件的规律性弯曲、椭圆等畸形变形, 因此研究这两类零件的渗碳规律,



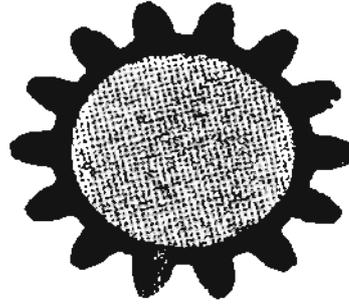
(a) 渗碳层不均匀



(b) 齿顶无碳层

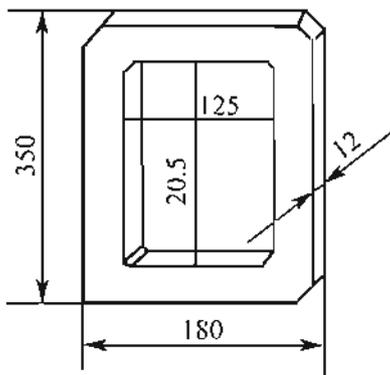


(c) 齿面无碳层

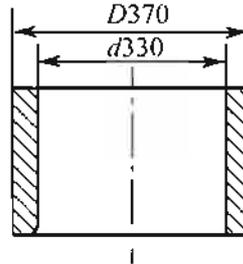


(d) 各齿的渗层厚度不同

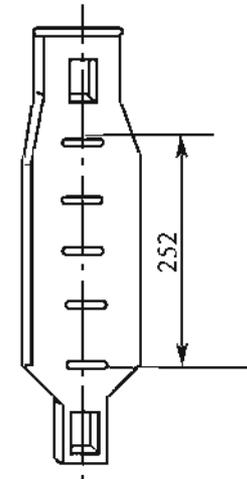
图 6-7 几种常见的齿轮渗碳层不均匀形态



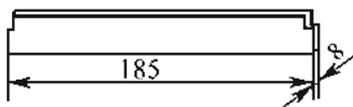
(a) 靠模



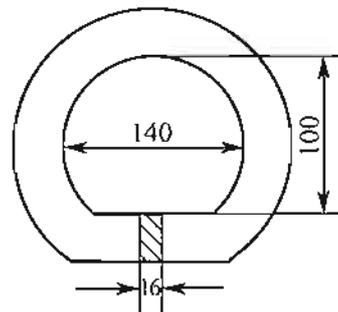
(b) 套筒



(c) 辅具



(d) 量规



(e) 靠模板

图 6-8 几种典型渗碳零件

对于正确认识和解决变形问题具有极其重要的作用。

① 普通零件的收缩或胀大变形 零件的具体类型和形状是决定渗碳后零件变形的根本，从影响渗碳变形的因素可以了解到形状和材料以及具体的条件等，应进行综合分析，才能得出正确的结论。常见典型渗碳零件和材质见图 6-8，渗碳后的变形见表 6-4。

表 6-4 部分零件渗碳后的变形情况

零件	材质	渗碳工艺规范	渗层深度 /mm	变形情况	
				在长度或直径方向	在厚度方向
靠模	15Cr	920~940℃×5~6h 气体渗碳后空冷	0.8~1.2	内腔长度方向和宽度方向分别缩短 0.32mm 和 0.16mm	均有少量胀大
套筒	15	920~940℃×5h 气体渗碳后空冷	1.0~1.1	内孔和外径各收缩 0.35mm、0.40mm	
辅具	20CrMo	920~940℃×6h 固体渗碳后，冷至室温	0.8~1.0	在孔距上的收缩量为 0.12~0.14mm	
量规	20	920~940℃×6h 气体渗碳后空冷	1.0~1.2	长度方向收缩 0.26mm	
靠模板	12CrNi3A	920~940℃×5h 气体渗碳后空冷	0.8~1.0	内径缩小 0.02mm	

从表 6-4 中可以看出，低碳钢和低碳合金钢渗碳后，在沿主应力方向呈现为收缩变形，其变形量的大小与零件的截面尺寸和材料有关，低碳合金钢的收缩较小，另外零件的含碳量增加，则变形的程度增加，通常含碳量在 0.2% 以下的低碳钢比高碳钢的变形要小。

② 不对称零件的渗碳变形 资料 [45] 介绍，渗碳零件本身出现截面突变、厚薄不均、形状不对称等，渗碳后空冷均将产生弯曲变形或畸变，在加热或冷却过程中因热应力和组织应力导致变形，其变形的方向同零件的材质尤其是具体的截面变化有关，因此零件的设计者要在满足其性能要求的条件下，尽可能地避免截面和壁厚的急剧变化，这是减小和控制零件在渗碳过程中不规则变形的重要手段和措施等，另外锻造零件流线的分布要均匀和对称，起到

减小变形的作用。图 6-9 所示为部分形状不规则、渗碳后易于变形的零件，渗碳后的变形见表 6-5。

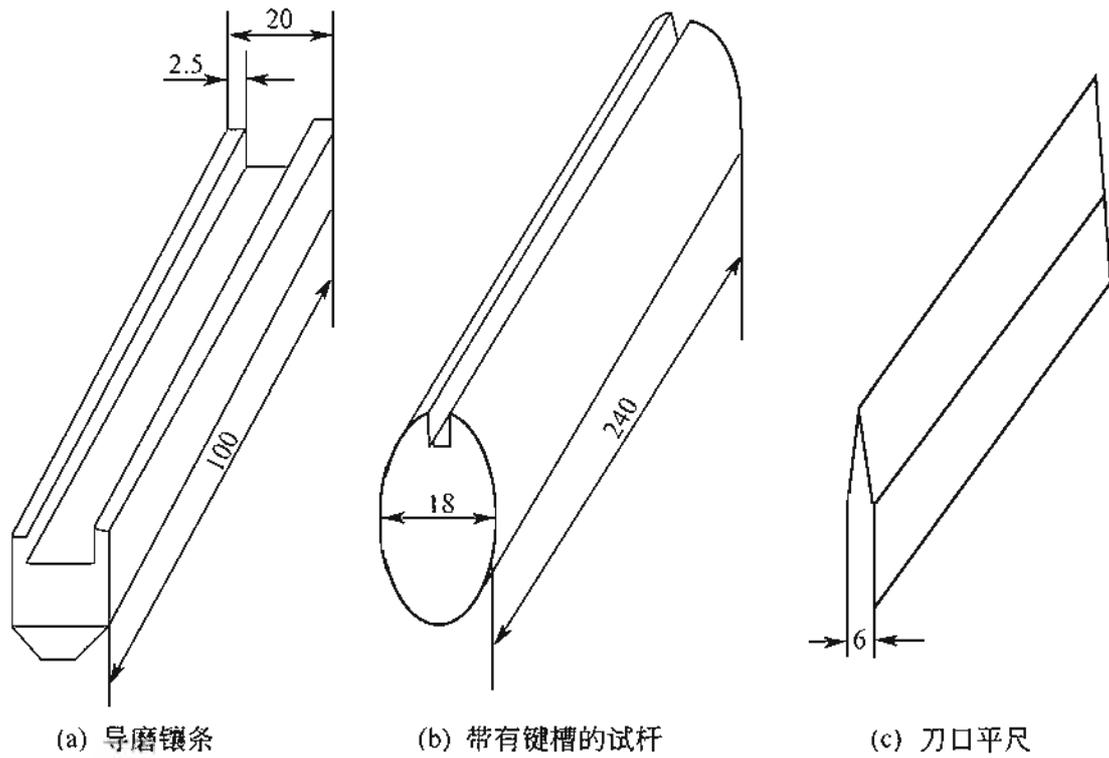


图 6-9 容易产生渗碳后弯曲变形的零件

表 6-5 不对称零件渗碳变形

零件	材质	渗碳工艺规范	弯曲特征
导磨镶条	15Cr、15、 12CrNi3A	920~940℃ ×5~6h 气体 渗碳后空冷	①采用 15Cr、15 钢，两薄筋面呈凹形弯曲 ②采用 12CrNi3A 钢，两薄筋面呈凸形弯曲
带有键槽 的试杆	15Cr		在圆柱面上 4mm×4mm 的键槽，键槽凸起，弯曲量为 0.25~0.36mm
刀口平尺	15		在刀口一面都是弯曲呈凹形

注：对于导磨镶条而言，如果将带筋的一侧扣在一起，则冷却后的变形量明显减小，很少出现弯曲变形；另外零件全部进行垂直吊装渗碳，有助于减小变形。

③ 夹具选择和装炉方式引起的变形 渗碳零件的形状和尺寸不同，所选用的夹具有很大的区别，而零件的装炉方式同样在渗碳过程对变形有一定的作用，这里要考虑到零件的自重对变形的影响。因此零件的吊挂和捆绑方式、摆放状态以及装炉量的大小，夹

具变形等，将对渗碳零件的变形产生重要的影响，合理吊装等是预防渗碳变形的有效措施，需要操作者认真对待，有清醒和正确的思路才能确保零件的变形符合技术要求，也为热处理的校直减少了工作量等。另外零件本身的形状厚薄不均，加热和冷却过程中因热应力和组织应力导致变形。

(2) 热处理后变形

零件渗碳后进行淬火，除了受零件自身形状、截面变化、渗碳层表面含碳量等因素影响之外，还同热处理冷却介质和冷却方法有关，渗碳层的存在对于淬火变形有明显的影响，一般而言将使零件在主导应力方向淬火的收缩变形率增加。

渗碳淬火后变形的实质为低碳钢零件渗碳后表面的碳浓度增高，水冷后表面组织为马氏体，但在高温到 M_s 点区域内，呈现明显的热收缩，表面渗层和心部在冷却过程中其应力处于对立的状态，心部是否淬硬决定了零件沿主应力方向的变形，通常零件在冷却时只能获得塑性较好的铁素体组织，在表面奥氏体热收缩的压应力作用下，使零件在主导应力的方向产生收缩变形。而在表层冷至 M_s 点以下，产生马氏体，转变后体积增大，可弥补部分尺寸的收缩，使零件的厚度方向增大。

渗碳或淬火温度过高，使零件的表面碳浓度过高，加上炉内气体循环不良、炉温不均匀等将造成淬火后的零件变形增大，另外材料的淬透性不稳定等同样会引起淬火后的变形。

应当注意，渗碳零件经过热处理后出现变形是重要的质量缺陷，在第3章中已经进行了部分地介绍，其影响因素较多，需要注意渗碳层不对称分布、形状复杂等因素的影响，淬火后都会出现明显的畸形变形，特征为渗碳层一侧呈凹形弯曲，无渗碳层呈凸形弯曲。其变形的原因为：淬火冷却时有渗碳层的一侧在奥氏体区线长度急剧收缩，无渗碳层部分转变为低碳索氏体、贝氏体或马氏体，组织的比体积增大，使线长度伸长，导致零件两对立面间产生弯曲应力和变形，渗碳层一侧呈凹形弯曲。在零件冷却到低温马氏体相变区，即使表层体积增大，也难于使已存在的塑性变形改变，因此

渗碳层一侧最后呈现凹形弯曲。如果出现因零件不对称而出现的变形是畸形，将难以校直，常见不对称零件见图 6-10。

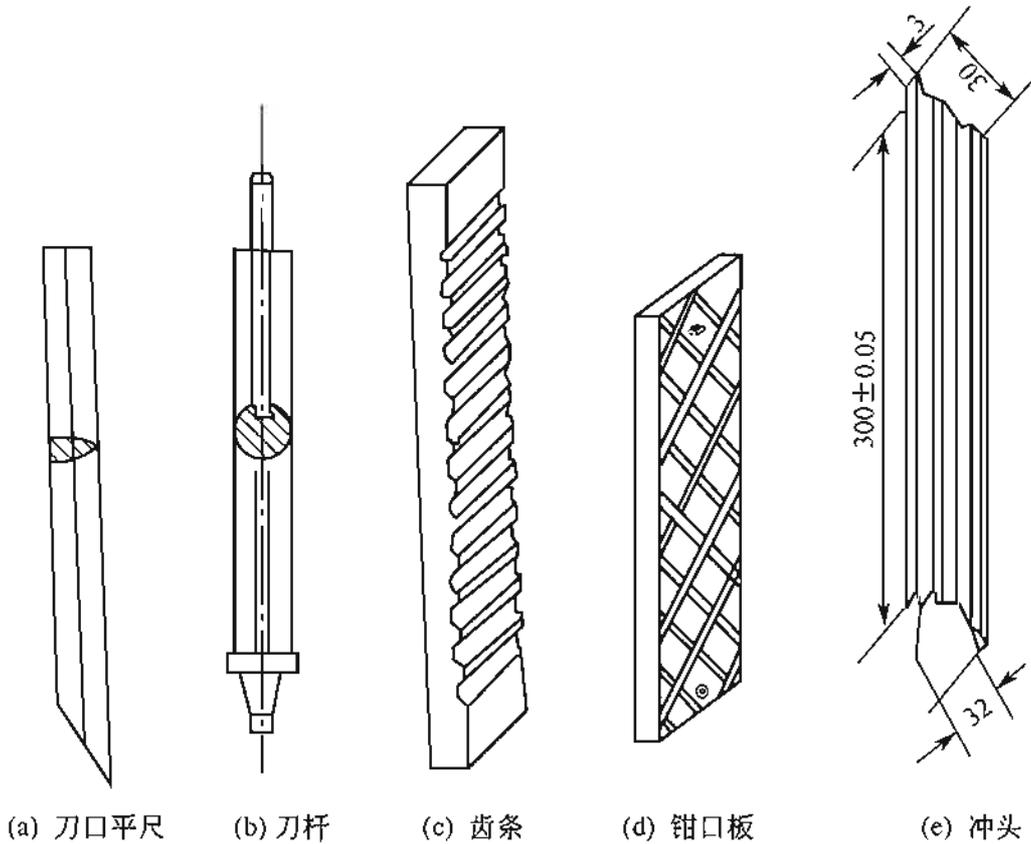


图 6-10 不对称杆状、板状典型零件

(3) 渗碳零件淬火变形的控制

根据影响渗碳零件变形的因素，首先应在零件的具体设计时要避免出现该类致命问题，同时加强对渗碳淬火零件变形的控制。渗碳层的厚度在 $0.8 \sim 1.2\text{mm}$ ，保持高耐磨性的厚度在 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ ，从这个思路出发应首先选择合理的渗碳零件用钢，15Cr、20Cr、15MnV、20MnV、15MnB 等低合金钢制造零件；其次要合理确定零件渗碳前的加工余量，由于渗碳件的磨削余量过大，因此对渗碳零件的热处理变形要求严格，不允许收缩过多和胀大等，对弯曲、椭圆等畸变都有限制，一般单边留磨削量为 $0.3 \sim 0.4\text{mm}$ 是最佳的；再次是淬火的加热温度和冷却方式等，低碳钢在 $780 \sim 800^\circ\text{C}$ 低温加热，较薄截面的零件在 $810 \sim 830^\circ\text{C}$ 下加热，并进行硝

盐冷却，对部分零件采用水淬油冷等均可起到减小渗碳零件变形的作用。对变形零件要尽可能地去挽救，对 15Cr、20Cr 钢可采用控制加热温度、淬火介质的方法，尺寸收缩量过大采用水冷，而对膨胀量大的重新加热进行油冷或硝盐冷却等；对 Q235、15 钢利用热处理工艺方法奏效不大，只能采取锤击法对尺寸缩小的零件用尖角锤击平面，使该尺寸胀大，也可渗碳前淬火，待零件尺寸胀大后再进行渗碳处理。

零件的畸变有两种情况，一是零件的形状结构本身是有规则和对称的，由于热处理时内外因素和选择的热处理工艺方法，以及操作方法的失误或不妥等（例如加热不均匀、残余内应力未消除等），将产生零件的弯曲、椭圆等畸形变形等；另一方面是零件结构本身存在明显的不对称、不规则等形状特征，从而引起零件热处理时产生具有普遍规律的畸变。

影响淬火弯曲变形的因素：截面的形状和不对称程度；加热温度、速度和加热方式；淬火冷却介质和冷却方式；钢的淬透性和 M_s 点温度的影响；基体中碳和合金元素的含量；表面渗碳层的状态等。因此在实际的热处理过程中，要将影响弯曲变形的因素逐一排除，力争做到基本消除该类影响，减小或消除渗碳零件的淬火变形，对于热处理后容易变形的渗碳件采用压床淬火或淬火时趁热校直，是目前处理变形的一种快捷方式。

分析以上产生变形的原因，明确预防的方法和措施，对于渗碳零件的变形控制具有重要作用，预防变形应着眼于以下几个步骤。

① 对零件进行分段加热或缓慢加热，确保零件温度的一致，可避免内外热应力和组织应力对零件的复合作用。

② 对形状不对称的零件或截面突然变化的零件要进行表面覆盖，薄截面处用铁皮保护，也进行局部加热，可起到很好的效果，具体见图 6-11。

③ 采用零件的局部冷却，水冷前对容易变形的凸弯部分进行局部预冷。

④ 控制零件的入水方向和冷却方式，要先冷冷却慢的部位。

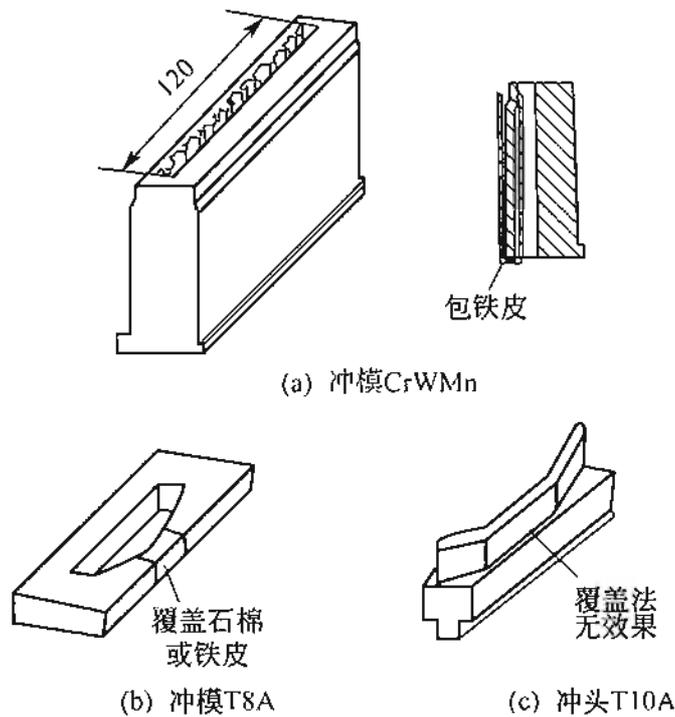


图 6-11 用覆盖保护法预防变形的典型实例

⑤ 采用硝盐或碱浴淬火，硝盐温度为 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，碱浴温度为 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，可实现对零件变形的控制。

⑥ 进行表面高频淬火处理。

⑦ 进行等温淬火，获得贝氏体组织。

需要特别注意的是渗碳后的异常组织，如渗碳体的网眼变粗，渗碳体和珠光体之间无直接的界限，而铁素体具有一定宽度包围渗碳体，珠光体的层状分布粗大而杂乱，层状也不整齐。具体见图 6-12。为防止这种异常组织的出现，应提高淬火加热温度，也可提高冷却速度等，则可避免出现此类缺陷。

6.1.5 渗碳零件裂纹形成原因和采取的措施

渗碳零件热处理后的缺陷除上述外，其裂纹是一个十分重要的质量问题，这是渗碳零件在热处理过程中必须加以避免的，它将导致零件的报废，无法挽救和正常使用，出现人力、物力和财力的浪费。渗碳零件的热处理与其他一般零件的淬火、退火、正火等相比，具有如下特点。

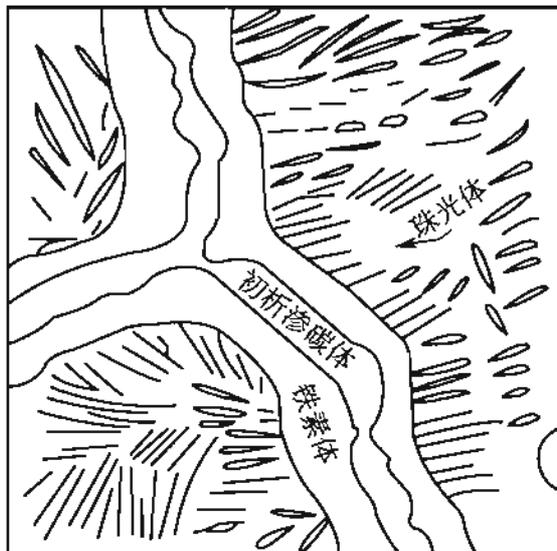


图 6-12 渗碳件的异常组织 (×500)

① 表面与心部碳元素的含量不同，热应力和组织应力的作用复杂。

② 渗碳零件的淬火冷却方式依据原材料和渗碳层的化学成分和渗层深度，同时要综合考虑到具体的硬度和力学性能的要求，因此选择冷却方法比较复杂。

③ 渗碳零件的大小、形状、结构、缺口和尖角等对淬火有直接的影响，这些因素将加剧零件的淬火变形和开裂。

一般而言，低碳钢和低碳合金钢不进行热处理则无开裂的倾向，而一旦渗碳后进行热处理就增大了零件变形和开裂的可能，因此研究其产生的机理和原因，不仅有利于帮助热处理工作者制定合理的热处理工艺，而且可对预防和避免该类缺陷的发生提供必要的措施和保障。

渗碳件的裂纹有四种，即显微裂纹、宏观裂纹、淬火裂纹和磨削裂纹，它们对产品的质量带来致命的影响，下面分别介绍如下。

(1) 显微裂纹

这是一种表面裂纹，随着奥氏体晶粒的长大，出现的概率增高，多出现在高碳的马氏体组织中，其原因在于晶粒冷却后得到粗大马氏体针，此时材料的组织内应力超过了本身的破断强度的结

果。因此要严格控制炉内的淬火加热温度和保温时间等，避免出现此类缺陷，如果有可能，可对该类零件先进行正火处理，起到细化晶粒的作用，然后进行最后的热处理。

(2) 宏观裂纹

渗碳件在 10~15h 冷却到室温，由于长时间的缓慢冷却，导致外层产生托氏体和碳化物，即渗层组织转变不均匀，造成宏观开裂。例如 20CrMnMo 钢渗碳后空冷时在表层先形成极薄的一层托氏体组织，在下面保留一层未转变的奥氏体，在随后的冷却过程中转变为马氏体，使表面产生拉应力的作用，导致了渗碳零件的开裂。只有表面受到压应力的作用，才能阻止裂纹的产生。另外也应注意到表层有薄的脱碳层，也将导致表面的开裂。其防止办法通常为减慢冷速，使渗层全部发生共析转变或快速冷却，使零件的表面得到马氏体和残余奥氏体组织。

引起宏观开裂的另一个原因是材料内部存在“白点”，资料 [57] 介绍，对于 12CrNi3A 钢气体渗碳后，随炉冷至 650℃ 左右进行等温，使氢缓慢的扩散逸出，表层起泡和裂纹消失，可消除该类宏观裂纹的出现。

宏观裂纹多出现在高合金钢中，其表现形式为表面龟裂或剥落等，而在极慢或极快冷却时不会出现此裂纹。从等温转变的曲线来分析，渗碳后表面的含碳量提高，在加热到奥氏体状态后奥氏体十分稳定，只有大于临界冷却速度才能获得马氏体组织，表面冷却到 400~600℃ 奥氏体转变为铁素体+渗碳体，而在 230~400℃ 范围内，奥氏体转变为贝氏体组织，因此马氏体的转变是在较低的温度下进行的（一般 M_s 点在 120℃），在室温下，奥氏体转变进行地并不彻底，保留了较多的残余奥氏体，为宏观裂纹的产生创造了条件。

(3) 淬火裂纹

该类裂纹出现在 20CrMnTi、20CrMo 等低合金钢中，在冷却或回火、冷处理等过程中，因热应力和组织应力的综合作用力超过了零件的破断强度而出现裂纹，下列因素直接影响到淬火裂纹的

产生。

① 渗碳层中的碳浓度和厚薄不均匀或者碳浓度过高，形成了严重的网状碳化物。

② 淬火温度过高或冷却速度太快。

③ 渗碳件的截面厚薄悬殊大，有尖角、凸台、凹槽等。

④ 表面有车削加工的刀痕，并有一定的深度等。

⑤ 对于复杂的零件没有缓慢加热，而直接加热速度快。

⑥ 淬火后未及时回火，内部应力过大。

⑦ 冷处理不当，未进行一次回火而直接冷处理。

⑧ 零件的淬透性过高。

为防止出现淬火裂纹，可采取以下措施：一是渗碳后缓慢冷却，以保证沿整个渗碳层厚度内均得到均匀的珠光体组织；二是采取渗碳后快冷的方法，使渗碳层得到马氏体+残余奥氏体组织；最后为渗碳后快冷到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，或冷却到 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ 后迅速转入 650°C 的炉内进行高温回火。均可有效地防止出现淬火开裂现象。

(4) 磨削裂纹

渗碳零件在热处理后要进行的机械加工多为磨削，一般渗碳零件的加工流程为：锻造→正火→切削加工→渗碳处理→淬火和回火→磨削加工等，磨削成形后可直接装配使用。淬火和回火后的渗碳零件表面仍然存在部分残余奥氏体，在砂轮磨削的过程中，残余奥氏体转变为马氏体，造成表面的体积膨胀，磨削温度达到 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时，组织转变加快，渗碳层的脆性增大，加上冷却不及时等造成磨削裂纹甚至烧伤缺陷的产生，该裂纹的特征为裂纹是沿着网状渗碳体而形成的。

磨削裂纹的形式为波纹状，其中表面有网状碳化物是产生裂纹的主要原因。因此在渗碳零件的磨削过程中应采取以下措施。

① 适当选择磨削用量、砂轮硬度和改善冷却条件，尽可能减少磨削热量的产生。

② 避免出现粗大的网状碳化物，残余奥氏体的含量不宜过高，严格控制渗碳层的碳含量，对合金钢而言，碳含量在 0.7% 左右，

碳钢则控制在 0.9% 左右。

③ 渗碳淬火后要立即进行回火，而且要求回火温度尽可能地低。

资料 [42] 介绍，除采取上述三种措施外，建议渗碳件采取下列热处理工艺方法：一种为零件在 900~920℃ 渗碳后箱中冷却，900℃×0.5h 淬火水冷，220℃×2h 回火后空冷；另一种为 900~920℃ 渗碳后箱中冷却，800℃×1.5h 箱中冷却，780℃×0.5h 淬火水冷，220℃×2h 回火后空冷。这两种工艺处理后的渗碳零件均不会出现磨削裂纹。通过对两种工艺结果比较来看，第一种得到的组织细而均匀，是较好的组织，但弯曲量比第二种大。在热处理生产通常采用第二种工艺。

6.1.6 零件渗碳后的机械加工

经过渗碳和热处理后的零件要进行机械加工，获得要求高的表面硬度和表面粗糙度，提高零件的疲劳强度，来满足零件的工作需要。渗碳后的机械加工一般有以下几种。

(1) 车削和磨削加工

渗碳后零件的表面含碳量高，热处理后表面存在大量的残余奥氏体，在磨削过程中极易形成磨削裂纹，例如烧伤和裂纹，如果存在粗大碳化物、网状碳化物或碳化物膜等也会产生磨削裂纹，因此在机械加工中应结合渗碳零件的技术要求，针对具体的特点等来选择正确的工艺参数是十分重要的，分析和预见可能产生的缺陷则有助于提高零件的质量水平，并能够指导实际的机械加工。

(2) 喷丸处理

将热处理后的渗碳零件在喷丸机或抛丸机中进行喷丸处理，丸粒以 50~70m/s 的高速与零件撞击一定时间后，在表面深度 0.1~0.25mm 范围内，获得了均匀的冷作硬化层，提高了表面硬度。其作用的效果与材料表面的原始组织有直接的关系，如果淬火后表面有多余的残余奥氏体组织，则有明显的硬化效果。一旦出现表面有网状碳化物，将造成表面裂纹的出现，因此对渗碳零件表面的淬火

组织有比较严格的控制和要求。

(3) 滚压或抛光

为提高渗碳零件表面的疲劳寿命，提高表面的强化效果，除了进行喷丸处理外，还可进行滚压或抛光处理，即滚压或滚动摩擦抛光，它是表面冷作硬化强化工艺的一种，具有以下几个特点。

① 提高了表面硬度，改变了残余应力的大小和分布。

② 提高了表面光洁度。

③ 提高了弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。

资料 [57] 介绍，在零件的沟、槽、圆角等部位进行滚压或抛光，与其他部位相比效果更为明显，因此进行滚压或抛光是提高渗碳零件使用寿命的重要举措，部分汽车零件渗碳后进行该类工艺处理取得了良好的效果。

6.2 渗氮

钢的渗氮（或硬氮化）是指在一定温度下使活性氮原子渗入到零件表面的一种化学热处理，即氮原子渗入钢件表面层的过程，它改变了零件表面的组织结构和性能，成为一种复合的材料，与普通的材料相比，零件表面和心部的组织状态和性能发生了很大的变化。渗氮零件在机械工业、石油工业、国防工业等领域应用十分广泛，与渗碳、中温碳氮共渗相比，由于加热温度比较低（通常为 $500\sim 570^{\circ}\text{C}$ ），不需要进行加热后的淬火处理，因此具有零件的变形小，表面有更高的硬度和耐磨性，疲劳强度高，同时又具有高的抗腐蚀性和热硬性等特点，机床主轴和丝杠、镗杆、挤压模具、齿轮、发动机曲轴和连杆等零件经过经过渗氮处理后使用寿命成倍提高。

零件渗氮后具有许多优点。由于渗氮改变了零件表面的组织状态，使钢铁材料在静载荷和交变应力下的强度性能、摩擦性、成形性及抗腐蚀性得到提高。因此可归纳渗氮的目的是提高钢铁零件的表面硬度、耐磨性、疲劳强度和抗腐蚀能力。该工艺普遍应用于各种精密的高速传动齿轮、高精度机床主轴和丝杠、镗杆等重载零

件，在交变负荷下工作要求高疲劳强度的柴油机曲轴、内燃机曲轴、汽缸套、套环、螺杆等，要求变形小并具有一定抗热耐热能力的气阀（气门）、凸轮、成型模具和部分量具等。渗氮和渗碳一样，都是以强化零件表面为主的化学热处理，经渗氮处理后的工件具有以下特点。

① 钢件经渗氮后，其表面硬度很高（如 38CrMoAl 渗氮后表面硬度为 1000~1100HV，相当于 65~72HRC），具有良好的耐磨性，这种性能可保持在 600℃左右而不下降。这对于要求在较高温度下仍要高硬度的零件和特别耐磨的工件，如压铸模、塑料压模、塑料挤出机上的螺杆及磨床砂轮架主轴等是很合适的。

② 具有高的疲劳强度和抗腐蚀性。在自来水、过热蒸汽以及碱性溶液中都有良好的抗腐蚀性，与其他表面处理相比，渗氮后工件表面的残余应力形成更大的压应力，在交变负荷作用下，表现出更高的疲劳强度（提高 15%~35%）和缺口敏感性，工件表面不易咬合，经久耐用。如机床主轴、内燃机曲轴等。

③ 渗氮处理的温度较低（450~600℃），所引起零件的变形极小，渗氮后渗层直接获得高硬度，避免了淬火引起的变形，这对于要求硬度高、变形小、形状复杂的精密零件（如精密齿轮，渗氮后不需磨齿）、汽车发动机气门、镗杆等，适合进行最终热处理。

零件渗氮的不足之处如下。

- ① 生产周期太长，渗速太慢（一般渗氮速度为 0.01mm/h）。
- ② 生产效率低，劳动条件差。
- ③ 渗氮层薄而脆，渗氮件不能承受太大的压力和冲击力。

为了克服渗氮时间长的不足，进一步提高产品质量和生产效率，人们又研究了多种渗氮方法，如离子渗氮、感应加热气体渗氮、镀钛渗氮、催渗渗氮等，在不同程度上提高了效率，降低了生产成本，同时也为渗氮技术的进一步推广和应用提供了保证，目前该项技术正日益发挥出巨大的作用，无论从节约能源还是代替别的热处理技术，具有其明显的优势。

根据零件使用条件和目的不同，渗氮分为两类：抗磨渗氮和抗

蚀渗氮。前一类零件可获得高硬度、高疲劳强度和耐磨性好，后一种主要提高零件的抗腐蚀性，二者各有侧重。

常见的工艺方法有气体渗氮、液体渗氮、固体渗氮、离子渗氮、镀钛渗氮、催渗渗氮等，凡经渗氮的零件需经过调质处理或正火处理，以确保基体的强度和韧性。

6.2.1 对渗氮零件的技术要求

零件进行渗氮的意义和重要作用在前面已经介绍过，在渗氮过程中对零件的技术要求是该工艺得到认真贯彻和实施的真实体现，因此了解和判断这些内容是热处理工作者加强产品质量过程控制的具体思路和根基，同时也便于指导和规范作业中的操作方法，有助于获得要求的技术参数和确保产品质量符合工艺或图纸的要求。

(1) 零件渗氮前的原始组织要求

零件原始组织的好坏对渗氮后的产品质量有重要的影响，一般是零件进行调质处理后获得回火索氏体加少部分游离铁素体，确保基体具有足够的强度和韧性或塑性，为渗氮做好组织上的准备，如组织不合格则无法保证零件的整体力学性能，因此渗氮前的组织级别应控制在3级以下，具体见表6-6。

表 6-6 渗氮前的原始组织要求

组织级别	渗氮前的原始组织级别说明
1	均匀细针状回火索氏体+极少量的游离铁素体
2	均匀细针状回火索氏体+体积分数小于5%的游离铁素体
3	细针状回火索氏体+体积分数小于15%的游离铁素体
4	细针状回火索氏体+体积分数小于25%的游离铁素体
5	索氏体(正火)+体积分数大于25%的游离铁素体

(2) 渗氮或氮碳共渗后的化合物疏松

零件经过渗氮或氮碳共渗后，氮原子和碳原子渗入零件的表面，在渗层的化合物层内出现细小分布的微孔或孔洞等，微孔的大小、数量和分布对零件的性能有重要的影响，《钢铁零件渗氮层深

度测定和金相组织检验》(GB/T 11354—1989) 根据表面化合物层内微孔的形状、数量和密集程度等几个技术指标将其分为 5 个等级, 具体见表 6-7。一般零件经渗氮后表面疏松在 3 级以内, 超过 3 级组织为不合格, 脆性大会出现起皮剥落。因此在实际的渗氮过程中要避免出现超过标准规定的缺陷。

表 6-7 渗氮层疏松级别

疏松级别	渗氮层疏松级别说明
1	化合物层致密, 表面无微孔
2	化合物层致密, 表面有少量的细点状微孔
3	化合物层微孔密集成点状孔隙, 由表及里逐渐减少
4	微孔占化合物层 2/3 以上, 部分微孔聚集分布
5	微孔占化合物层 3/4 以上, 部分呈孔洞密集分布

造成渗氮层疏松级别超差的原因是多方面的, 资料 [33] 介绍, 该类缺陷通常发生在氮碳共渗或长时间高氮势的气体渗氮工艺中, 氮碳共渗工艺有三种, 而经常采用的有气体氮碳共渗和液体氮碳共渗。气体氮碳共渗的化合物疏松是由于亚稳定的高氮相在渗氮过程中分解, 析出了氮分子而留下气孔, 分析其原因与炉气中混合比和渗氮温度有直接的关系, 当炉气中氮的含量超过了某一数值, 出现多孔性的表面; 随着处理温度的提高, 氮的分解率提高, 氮势提高将造成表面疏松的增加。

在气体渗氮过程中, 化合物层出现疏松的原因如下: 一是通入氮气的纯度低, 含有一定的水分; 渗层中的平均氮含量过高等。

(3) 针状组织

针状组织是位于化合物层和过渡层之间的一种针状氮物, 为高氮的 ϵ 相和 γ' 相, 它们沿着原铁素体的晶界成一定的角度长大。该组织的危害是造成化合物层的脆性增大, 因此在使用中易于剥落。出现此类缺陷的原因同渗氮前零件的原始组织状态有关, 如在零件的调质处理过程中, 表面出现严重脱碳、存在游离铁素体等, 将造成气体渗氮时出现针状组织。同时应注意渗氮中确保炉子有良好的

密封性，炉内压力在 60mmH₂O 以上，炉内氨气的分解率控制在要求的范围内，则有助于防止出现针状组织的出现。

(4) 网状和脉状氮化物

网状和脉状氮化物存在于扩散层中，多产生于合金钢的渗氮过程中，因为温度高、氨气的含水量高、调质处理晶粒粗大、零件存在尖角等，出现网状和脉状氮化物，因此要严格执行相关的热处理渗氮工艺和技术要求，确保避免此类缺陷的产生。《钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验》(GB/T 11354—1989) 中根据其形状、数量和分布情况，分为 5 个等级，具体见表 6-8。通常 1~3 级为合格组织。

表 6-8 网状和脉状氮化物的形态

级别	氮化物形态级别说明
1	扩散层中有极少量呈脉状分布的氮化物
2	扩散层中有少量呈脉状分布的氮化物
3	扩散层中有较多脉状分布的氮化物
4	扩散层中有较严重的脉状和少量断续网状分布的氮化物
5	扩散层中有连续网状分布的氮化物

渗氮零件中如出现网状和脉状氮化物，这将严重影响零件的渗氮质量，造成渗氮层脆性增加、耐磨性和疲劳强度下降以及表面剥落缺陷等，根据产生网状和脉状氮化物的原因，在实际的生产过程中要严格控制。一旦出现，可在 500~560℃ 温度进行 10~20h 的扩散退火处理，可明显改善组织状态，降低其不良影响。

白亮层是指长时间的气体渗氮或盐浴渗氮时，在最外层产生白亮层（由氮含量为 11% 以上的 Fe₂N 组成），用酸难以腐蚀。其危害为产生剥落、凹坑等，采取的措施为渗氮后进行高频淬火或磨削掉白亮层，也可采用别的方法去除白亮层。

(5) 渗氮零件的变形

渗氮后零件变形主要是指零件表层膨胀和零件形状的弯曲和翘曲变形，膨胀变形的实质是活性的氮原子被钢的表层所吸收和扩

散，并溶解在金属基体中和合金元素形成氮化物的过程。基体组织一般为索氏体，是由较细的铁素体和渗碳体所组成。当氮原子渗入其表层后，使基体的晶格常数增加，故使零件的表层胀大。零件表层膨胀和零件形状的弯曲和翘曲变形，是由于零件表层吸收了氮原子后，表层金属相的晶格常数增大，当表层在力求增大其体积时，表层和心部连为一个整体，心部起着阻碍表层向径向和轴向胀大的作用，使零件的表层与心部处于受力状态，即表层为拉应力，心部为压应力。其应力的大小取决于渗氮钢的屈服强度和渗氮层含氮浓度以及渗氮的深度。

零件在渗氮过程中出现变形问题的原因应是多方面的，零件在机械加工过程中要进行车削、磨削、研磨、抛光等，要去掉一部分金属层，因此会引起零件残余应力的分布，同时引起表面塑性变形和局部的加热不均，会产生新的残余应力。渗氮前残存在零件中的内应力有两种，一是车削、机械抛光和滚压，使零件表面获得了压应力；二是表面磨削产生了拉应力作用。渗氮过程中，随着温度的变化，发生内应力的松弛和重新分布，若内应力大则变形也大，因此为了确保零件渗氮后的变形量在要求的范围内，其渗氮前的预备热处理是至关重要的。正火消除锻造应力，降低基体硬度，改善不良组织；调质处理是为了获得均匀的索氏体组织，为渗氮做好组织上的准备；而去应力退火在于消除机械加工应力，减小渗氮过程中变形等，零件渗氮过程中还要受到其他因素的影响，如温度的不均匀、氮气的分解率不稳定、各部分渗层深度不均匀、零件之间的挤压、炉内气氛的流动性差等，造成内部应力的分布失去平衡出现弯曲和翘曲。表 6-9 为机床精密榉杆去应力退火与氮化变形的关系，从表中可确切了解到去应力退火的作用。

从表 6-9 中可以看出，加热温度升高和延长退火时间，以及增加退火的次数等，则残余应力消除愈彻底，渗氮后零件的变形也小。零件的机械加工应力同材料的性能、切削速度、进给量以及切削工具、冷却方式等有关。加上零件因变形进行锤击、校直或运输中外力作用，产生零件的残余应力。零件在渗氮过程中，热应力、组织

表 6-9 精密榫杆去应力退火与渗氮变形

序号	去应力规范						渗氮后弯曲变形 (mm/500mm 长度上)			
	次数	设备	加热温度/℃	升温时间/min	保温时间/h	冷却时间/h	头部	中部	尾部	
1	1	盐浴炉	630	40~50	4	3~4	0.045	0.075	0.05	
	2		600							
2	1		620		5		8	0.18	0.06	0.13
3	1									
4	1	渗氮炉	480	10	12~16	0.09	0.06	0.06		

应力和残余应力共同作用，造成零件的体积形状的改变。另外零件自重、搁置不当、零件彼此挤压，对零件的夹持力和冲击力等也有很大的影响。气体渗氮热处理应力是硬化层与心部组织差异而引起的残余应力，由于两种组织的比体积差大，因此渗氮层受的压应力一般较大。

造成渗氮零件变形超差的原因是多方面的，一般可归纳为以下几个方面。

① 渗氮罐内温度不均匀，造成零件的受热不均匀，因此渗氮层的深度有明显差异。

② 加热或冷却的速度过快，内外温差过大，热应力作用下零件的变形量不同。

③ 零件渗氮前的加工内应力未彻底去除，而在渗氮过程中得到了释放。

④ 零件的装炉量不符合要求，过度密集排列、未正确吊挂或摆放等，造成罐内气体流通不畅、零件内外温度不同等。

⑤ 零件的结构和形状设计不合理，造成渗氮过程中零件的变形。关于零件变形的具体原因可参见表 6-10 中“工件变形超差”中的内容。

6.2.2 零件渗氮的缺陷和防止措施

零件的渗氮通常为气体渗氮，这种工艺具有本身成熟、工艺参

数易于控制、设备的投资低、产品质量稳定等特点，因此得到了十分广泛的应用，其缺点为渗氮周期长（40h 以上），生产效率低。该工艺多用于模具、主轴、镗杆等零件的化学热处理，为了便于了解和判断出现缺陷的原因和需采取的具体措施，现进行归纳和整理，具体见表 6-10，供参考。

表 6-10 气体渗氮常见缺陷及防止措施

缺陷类型	产生原因	防止措施
渗氮层硬度低(不足)或硬度不均(软点)	① 渗氮温度偏高 ② 第一阶段温度偏高或氨分解率过高或过低,或渗氮罐通气管久未退氮 ③ 使用了新的渗氮罐,夹具或渗氮罐使用过久 ④ 工件未洗净,表面有油污 ⑤ 工件预先调质的硬度太低 ⑥ 渗氮炉密封不严,炉盖漏气 ⑦ 装炉不当或装炉量过多,吊挂不良,气流循环不良 ⑧ 局部防渗镀锡时发生流锡现象 ⑨ 表面脱碳,晶粒粗大 ⑩ 渗氮温度低或时间短 ⑪ 渗氮件表面出现异物 ⑫ 升温速度太快,罐内温差大 ⑬ 第一阶段一度中断氨气 ⑭ 材料的组织不均匀	① 调整温度,校验仪表 ② 定期校验测温仪表,降低第一阶段的温度,形成弥散细小的氮化物,稳定各个阶段氨的分解率,将氨分解率控制在 15%~25% 范围的下限,对渗氮排气管退氮或更换 ③ 新罐进行预渗,长久使用的夹具和渗氮罐等应进行退氮处理,使分解率平稳控制在上限 ④ 渗氮前应清理干净工件的表面 ⑤ 重新处理使工件基体硬度符合要求 ⑥ 更换石棉、石墨垫,检查炉体,无漏气,确保渗氮炉密封性能 ⑦ 合理装炉,确保气流通畅 ⑧ 喷砂,严格控制镀锡厚度 ⑨ 去掉脱碳层或正火 ⑩ 严格执行渗氮工艺 ⑪ 清理掉异物 ⑫ 升温到 300℃ 后,控制升温速度不大于 50℃/h,或工件在 400~450℃ 透烧 1h ⑬ 认真检查氨气管道和供氨情况 ⑭ 提高渗氮前零件的热处理质量,使组织均匀致密 补救措施:如果不是长时间超温,或分解率过高,或较长时间的中断供氨,允许重新渗氮处理。即到温前将氨的分解率控制在 18% 以下,到温后温度在 500~510℃ 处理 15~20h,分解率为 18%~21%,最后在 540~550℃ 退氮 2~3h,此时分解率为 70% 以上

续表

缺陷类型	产生原因	防止措施
渗氮层浅	① 渗氮第二阶段温度偏低 ② 保温时间太短 ③ 第一阶段氮分解率过高或过低,分解率不稳定 ④ 装炉不当,工件之间距离太近,气流循环不畅 ⑤ 密封不好,漏气 ⑥ 基体未经调质处理 ⑦ 渗氮罐使用过久 ⑧ 新换卡具和渗氮罐	① 适当提高第二阶段的温度,校正仪表和热电偶 ② 按工艺时间进行,或酌情延长时间 ③ 按工艺规范调整分解率,使之符合工艺要求 ④ 合理装炉,调整工件之间的间隙,加强炉内气氛的循环 ⑤ 检查炉盖及盘根的密封情况 ⑥ 渗氮前的零件必须进行调质处理,以获得均匀致密的回火索氏体组织 ⑦ 进行退氮处理,或使用陶瓷罐 ⑧ 预先进行卡具和空罐的渗氮 渗层浅的补救措施为:在正常的扩散温度下再渗氮数小时
工件变形超差	① 机加工残余应力太大,未进行去应力退火或退火不充分 ② 工件细长或形状复杂,吊挂或放置不垂直 ③ 渗氮面不对称或局部渗氮 ④ 渗氮罐内温度过高或不均匀 ⑤ 氨气流通不畅,装炉不当 ⑥ 工件自重的影响 ⑦ 渗氮后氮原子的渗入造成组织比体积的增大 ⑧ 加热或冷却速度太快 ⑨ 原材料晶粒粗大 ⑩ 加工零件的表面粗糙、存在尖角和棱角等	① 粗加工后进行去应力退火处理 ② 缓慢升温,在 300℃ 以上,每升 100℃ 保温 1h 控制加热和冷却速度,保证炉温的均匀 ③ 改进设计,避免不对称,吊挂时注意重心的位置和平稳,降低升温及冷却速度 ④ 尽量采用低的渗氮温度,改进电阻丝及氨气管道的布置,增加控温区段,强化循环,确保炉温的均匀性 ⑤ 合理装炉,避免叠加或挤压,风扇转动应正常 ⑥ 设计专用夹具及工装,热校后再进行消除应力处理 ⑦ 渗氮化前考虑比体积的增大,合理控制渗氮前的加工余量 ⑧ 采用分段升温法,并控制冷却速度,缓冷到 150~200℃ 出炉 ⑨ 进行正火或调质处理 ⑩ 确保零件表面粗糙度符合技术要求,消除尖角 措施:对精度要求不高,需耐磨性好的零件采用低于渗氮温度的热校直,随后在 160~200℃ 低温回火 12h,消除部分应力

续表

缺陷类型	产生原因	防止措施
表面有氧化色	①退氮或降温过程中供氮不足造成炉内压力不高,冷却时造成负压,空气进入造成氧化色 ②设备的密封性不好、漏气,压力不正常 ③干燥剂失效 ④零件的出炉温度过高 ⑤氨中含水量过高,管道中存在积水	①保持炉内正压,退氮或冷却时保持炉压大于 20mmH ₂ O ②经常检查设备的密封性,检查漏气部位并及时压紧或堵塞 ③更换干燥剂 ④炉冷 200℃ 以下出炉 ⑤认真检查管道,及时清理管道内的积水 补救措施:渗氮后工件表面的氧化色对硬度、渗层深度均无影响,对要求质量较高的零件可再进行 500~520℃ 1~2h 的渗氮处理。也可低压喷细砂消除表面氧化色
粗大网状、波纹状、针状或鱼骨状氮化物及厚的白色脆化层	①渗氮温度过高或长时间高温渗氮化 ②液氨中含水量大 ③原始组织晶粒粗大、有大块铁素体、加工表面粗糙、内应力大等 ④工件有尖角、锐边、凹槽等 ⑤未控制好分解率,气氛氮势过高,出现 ε 相 ⑥表面脱碳严重或原始组织中存在游离的铁素体,极易出现鱼骨状、针状氮化物 ⑦炉子的密封性差 ⑧原始组织中的游离铁素体较多,零件表面严重脱碳	①严格执行渗氮工艺,确保温度和时间符合要求 ②及时更换干燥剂或再加一干燥器,严格控制炉气中的含水量 ③正火后重新进行调质处理,使晶粒细小,渗氮前进行稳定回火,消除切削加工引起的内应力,提高零件的表面加工质量,减少非平滑过渡等 ④去除尖角,倒钝锐边或填充 ⑤严格控制氨的分解率,降低温度或加大氨流量 ⑥严格调质工艺,防止脱碳和铁素体过多,确保原材料组织合格,缓慢升温,排净炉内空气等 ⑦严格检查炉罐的密封性,保持炉内为正压 ⑧严格执行调质处理工艺,防止出现脱碳
渗氮面产生亮块或白点,硬度不均	①加热炉内温差太大 ②进气管道局部堵塞,氨气流动不畅通 ③工件表面有油污或锈斑 ④装炉量太多,吊挂不当 ⑤材料组织不均匀、夹杂物超标 ⑥非渗氮部位的镀锡保护层过厚,锡层熔化影响渗氮部分	①测温,确保炉内温度一致 ②及时清理、疏通管道,强化炉气的循环 ③工件要清洗干净,并注意经常清理马弗罐 ④合理装炉 ⑤提高原材料的质量,重视渗氮零件的原材料的检验 ⑥适当控制镀锡层的厚度

续表

缺陷类型	产生原因	防止措施
表面出现光亮花斑	①炉温不均匀,局部温度低于480℃ ②氨分解率太低 ③氨气的流量和分布不均匀 ④马弗罐中有污物、渗氮时吸附	①严格控制炉温 ②严格控制氨气的流量 ③合理改进管道分布,经常清理管道 ④定期清理马弗罐
表面腐蚀	①氯化铵(或四氯化碳)加入量太多 ②氯化铵(或四氯化碳)挥发太快	①按渗氮罐容积严格控制加入的数量 ②用干燥的石英砂压实氯化铵,或均匀混合后使用,降低挥发速度 ③除不锈钢和耐热钢外,尽量不加或少加氯化铵(或四氯化碳)
表面剥落和脆性大	①冶金质量不合格 ②渗氮工艺不当 ③渗氮前磨削量大 ④表面氮浓度过大或退氮时间不足,渗氮层与心部含氮量突然过渡 ⑤调质处理时淬火温度高,出现过热 ⑥表面有脱碳,表面粗糙或锈蚀,液氨的含水量超过1%,造成表面脱碳 ⑦零件的外形有尖角、锐边 ⑧冷却速度过慢	①选用合格的材料 ②改进工艺 ③减小磨削量,分几次磨削 ④严格控制氨分解率和确保退氮彻底(或在570~580℃保温4~5h),减少零件尖角、棱边或粗糙的表面 ⑤正火后重新调质处理,提高预先热处理的质量 ⑥提高渗氮罐的密封性,降低氨中的含水量,去掉脱碳层或锈迹、更换干燥剂 ⑦尽可能避开尖角和特殊的形状 ⑧加速渗氮工件的冷却速度 补救措施:凡不是因为表面脱碳引起的脆性,允许重新退氮处理,对允许表面有氧化色的工件可在空气炉内进行
表面裂纹	①晶粒过于粗大 ②未及时回火 ③含氮量超过允许的范围,脆性过大	①正火处理 ②补充回火 ③渗氮完毕将炉温升高,使零件在封闭的残余氨气中进行退氮处理
渗氮层不致密,耐腐蚀性差	①渗氮表面氮浓度太低,使 ϵ 相太薄或不连续 ②工件表面有锈蚀未除净 ③工件清洗不干净,有油污和锈迹 ④冷却速度太慢,造成氮化物的分解	①分解率不宜太高,进行合理的控制 ②除掉锈蚀痕迹 ③工件表面应清洗或清理干净,除掉锈斑等 ④按要求调整冷却速度 补救措施:将硬度低的工件重新渗氮处理。

金相组织检查渗层组织中常见不合格组织的金相图片见图 6-13~图 6-15。



图 6-13 具有网状氮化物的
不合格渗层 (×450)

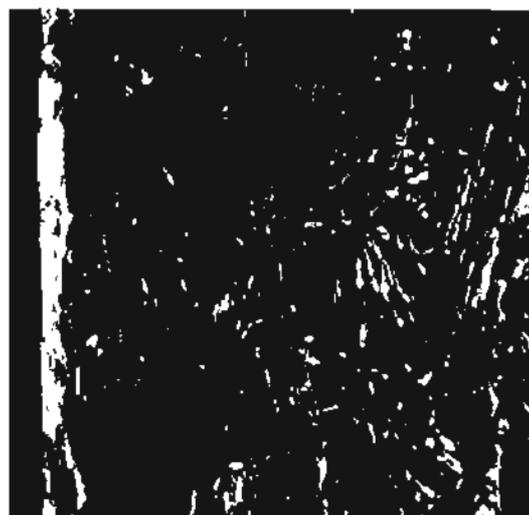


图 6-14 具有波纹状 (脉状)
组织的不合格渗层

需要注意的是，如果对渗氮零件的变形加以控制，应清楚了解变形的基本规律，具体分析和全面了解整个零件的加工流程和具体的

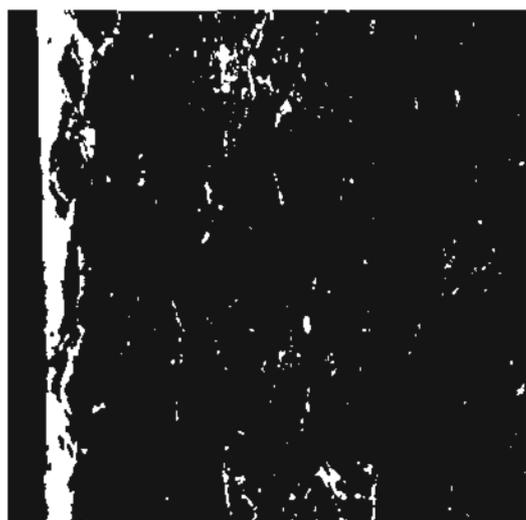


图 6-15 具有鱼骨状氮化物的
不合格渗层

工艺，零件的形状特点、对称性、尺寸大小以及化学成分等，分析各因素对热处理后变形的影响，同时熟悉其热处理工艺等，另外充分利用质量控制的七种工具从零件的设计、钢材的选用、锻造、焊接以及加工工艺等，制定具体的冷热加工工艺，只有这样才能找出渗氮零件的变形规律。

渗氮零件的开裂和剥落等也是一种十分严重的质量缺陷，其

实质是内应力作用下的脆性断裂，影响因素也同零件的设计质量、原材料的质量以及冷热加工的质量有关，因此除上述已经介绍的以

外，更应加强实际操作过程由于人为因素造成零件的变形，从人、机、料、法、环、检等六方面进行正确分析，采取切实可行的方法和措施，防止出现表面开裂和剥落。

6.3 氮碳共渗

钢的氮碳共渗即在一定的温度下同时进行渗氮和渗碳的过程。由于氮在铁中的溶解度比碳在铁中的溶解度大 10 倍，是以渗氮为主、渗碳为辅的化学热处理工艺，活性氮原子与活性碳原子在零件表面形成氮碳化合物。氮碳共渗是在克服硬氮化时间长的基础上发展起来的，其渗层硬度较低，脆性减小，故简称软氮化。目前该工艺在国内外得到了推广和应用，如碳素结构钢、低合金钢、工模具钢等几乎所有的材料均可进行氮碳共渗。

氮碳共渗可以在气体、液体或固体介质中进行，渗层薄故工艺周期较短。氮碳共渗的温度比气体渗氮稍有提高，但低于 Fe-N 状态图中的共析温度（590℃），通常为 540～570℃，根据零件的要求共渗时间为 1～6h，渗层较浅通常共渗层厚度在 0.3mm 以下，在扩散层中的碳被形成的氮化物吸收，称为氮碳化合层。形成了以 Fe (N、C) 为铁的核心，很快可得到铁的氮化物薄层，从而加快了氮化速度，缩短了氮化时间，氮化后采用快冷方式（合金钢油冷、碳钢水冷），以提高氮化工件的抗腐蚀性、提高疲劳强度等。

氮碳共渗后赋予了零件耐磨、耐腐蚀、抗疲劳、抗咬合、抗擦伤性能，而且该工艺具有时间短，加热温度低，零件变形量小，化合物层脆性小等特点，故广泛应用于硬化层薄、负荷较小、不在重载荷条件下工作的零件，而对承受载荷不大、需得到良好综合性能的工件采用氮碳共渗效果甚好。对变形要求严格的耐磨件，如模具、量具、刀具、曲轴、凸轮轴及耐磨工件的处理，经生产验证，其效果十分明显，如对 38CrMoAl 模具软氮化后表面硬度 710～750HV，渗层约 0.3mm，其使用寿命是气体硬氮化的 2～3 倍。一般碳钢氮碳共渗表面硬度 550～600HV；合金结构钢 600～

700HV；工具钢 800~1000HV；高速钢及不锈钢耐热钢可达到 1000~1200HV。高速钢和高铬工具钢的氮化温度比其回火温度低 5~10℃，以防共渗后水冷出现含氮马氏体。

综上所述，钢的氮碳共渗与硬氮化相比则具有以下特点。

① 处理的加热温度低（低于相变点），共渗时间短，因此零件变形小。

② 可提高工件的疲劳强度、耐磨性和耐腐蚀性等，使用寿命提高。

③ 抗擦伤和抗咬合能力强，减小了运动的阻力。

④ 适用于任何材料的处理，不受钢种限制。

⑤ 设备成本低，操作方便易行，质量稳定。

零件经气体氮碳共渗和液体氮碳共渗处理后，有时会产生一些产品质量缺陷，从质量管理的角度来认真分析，无非是六大因素的作用的结果，即人、机、料、法、环和检，故其原因是多方面的，具体而言应为以下几个方面：除原材料自身的原因和表面状态外，还包括工艺流程制定的合理性，整个氮碳共渗操作过程中程序、氮碳共渗的温度和时间、氮的分解率、密封情况、装炉方式、氮气的干燥状况、进排气管道等方面均对零件的氮碳共渗质量有很大的影响，为便于及时处理氮碳共渗过程中出现的缺陷，现进行归纳总结列于表 6-11、表 6-12 中，供参考。

6.3.1 气体氮碳共渗

零件进行气体氮碳共渗的材料大多为中碳合金结构钢和部分低碳钢（简称为渗氮钢），气体氮碳共渗是介于硬氮化和中温碳氮共渗之间的一种化学热处理工艺，使零件的表面获得理想的硬度和耐磨性，同时具有良好的抗咬合性和耐蚀性，而表面脆性较小，因此该工艺广泛应用于模具（锻模）、气门、挺杆、高速钢螺纹刀具等。资料 [9,67,68] 介绍，对高速工具钢和高铬工具钢等采用 (540~560)℃×(1.5~4)h 的气体氮碳共渗处理，渗层在 0.02~0.05mm，表面硬度在 950~1200HV，明显提高工具钢的使用寿命。

气体氮碳共渗是目前化学热处理中十分重要的工艺方法，它赋予了零件具有双重工艺的特点，从渗入的表面元素与基体金属的结合形成的氮化物的厚度、硬度、时间来综合分析，它克服了硬氮化时间长、而中温碳氮共渗温度高的缺点，因此提高了效率、减小了零件的变形量等，是目前提高零件表面硬度、耐磨性以及疲劳强度、耐腐蚀和咬合性等性能的常见化学热处理方法。下面将零件在气体氮碳共渗中的缺陷、原因和具体的防范措施列于表 6-11 中。

表 6-11 气体氮碳共渗常见缺陷原因分析和措施

缺陷分类	原因分析	预防措施
硬度不够，渗层不足	① 炉罐漏气或炉内压力小 ② 零件的表面粗糙度差 ③ 零件表面切削液(或乳化液)清洗不干净黏附在表面上，或表面有锈蚀、表面脱碳 ④ 工件表面的氮势和碳势低，渗层氮含量太低，炉内气体循环不良 ⑤ 气氛中氮势不够 ⑥ 氮碳共渗时间短或温度过低 ⑦ 零件的截面尺寸过大或装炉不合理 ⑧ 氮碳共渗结束后冷却速度低 ⑨ 材料选择不当	① 定期检查设备，确保设备的密封性能 ② 零件的表面粗糙度控制在 $R_a0.5$ 以下 ③ 工件要清洗干净，不得留有铁锈，去除脱碳层 ④ 改善炉子的密封性，加大渗剂的滴入量和流量，提高介质的浓度，增加含量，使表层的含碳量大于 0.7%，炉内零件的摆放要确保气体流动畅通 ⑤ 增加氮的供应量，使表层的含氮量达到 0.2%~0.4% ⑥ 选择正确的温度和时间，重新进行软氮化处理 ⑦ 改变设计，合理装炉，提高炉内气氛的流动性 ⑧ 氮碳共渗后进行水冷或油冷，改善冷却效果或选用理想的冷却介质 ⑨ 选择符合要求的材料，确保氮碳共渗质量符合技术要求 补救措施：按正常的氮碳共渗工艺重新处理
零件呈红色或锈蚀	① 所用的渗剂内水分过多(液氮干燥剂失效) ② 尿素在下落过程中，黏附在零件上 ③ 出炉温度过高，在空气中冷却	① 对渗剂需进行脱水处理，更换新的干燥剂 ② 注意零件在炉内的位置，避开落料口 ③ 冷却到 200℃ 出炉冷却或进行油冷 补救措施：将零件除锈后清洗干净

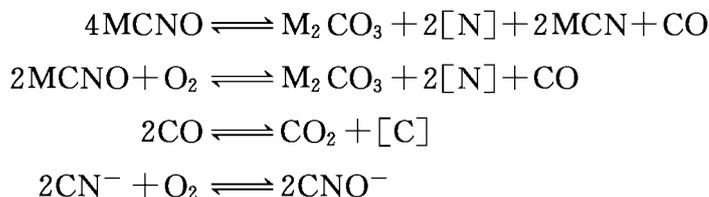
续表

缺陷分类	原因分析	预防措施
表面花斑	<ul style="list-style-type: none"> ①零件氮化前未清洗干净 ②零件彼此之间相互接触或与夹具、工装接触 	<ul style="list-style-type: none"> ①入炉前应将零件清洗干净 ②合理装炉,确保零件之间有一定的间隙
零件变形大	<ul style="list-style-type: none"> ①零件的加热速度过快,复杂零件的内外温差过大,造成热应力增加 ②机械加工(车削或磨削)残余应力太大,氮化前未进行去应力退火或退火不充分 ③工件尺寸大,形状和截面复杂,吊挂或放置不垂直,以及工件自重的影响 ④零件不对称或进行局部处理 ⑤罐内温度均匀性差 ⑥氨气流通不畅,装炉不当 ⑦氮碳共渗处理后的冷却速度太快 	<ul style="list-style-type: none"> ①缓慢升温或阶段加热,在 300℃ 以上,每升 100℃ 保温 1h 控制加热和冷却速度,保证炉温的均匀一致 ②粗加工后进行去应力处理,工艺为(590~620)℃ × (2~3)h,应高于正常的氮碳共渗温度 ③改进设计,吊挂时注意重心的位置,放置平稳、牢固 ④采用捆绑、填塞或其他方法,保持零件的均匀对称,也可在共渗后去掉硬化层 ⑤合理装炉,不允许出现叠压,应有利于炉内气体的流通,风扇运转正常 ⑥改变零件的装炉方式或通气管的位置,确保零件进行均匀的氮碳共渗 ⑦根据要求选择冷却介质或合理控制冷却速度
渗层脆性大	<ul style="list-style-type: none"> 氨的供应量过大,渗层表面的氮浓度过高形成了大量的壳状碳氮化合物 	<ul style="list-style-type: none"> 提高共渗温度,减少氨的供应量
渗层残余奥氏体过多	<ul style="list-style-type: none"> ①共渗温度过高,碳浓度过高 ②共渗温度过低,氮浓度过高 	<ul style="list-style-type: none"> ①调整炉温和气氛的碳势 ②调整炉温和供氨量
表面出现托氏体组织	<ul style="list-style-type: none"> 零件的表层合金元素氧化 	<ul style="list-style-type: none"> ①改善炉子的密封性,加速排气,控制炉气成分的含量,确保渗层的氮浓度 ②加快淬火冷却介质的搅拌或改变介质,采用含有氧化性倾向小的钨钼钢材
表面疏松	<ul style="list-style-type: none"> ①氮的含量过高(主要原因) ②氮碳共渗的温度过高 ③氮碳共渗的时间过长 ④原材料为铝脱氧者,容易产生表面疏松 	<ul style="list-style-type: none"> ①气体氮碳共渗要严格控制通氨量 ②执行正确的工艺参数 ③合理控制氮碳共渗的温度和时间 ④合理选择符合要求的原材料 补救措施:磨去疏松层

6.3.2 液体氮碳共渗

液体氮碳处理是利用盐浴中产生的活性氮、碳原子，渗入零件表面与零件中铁及合金元素形成化合物层及扩散层，以提高零件表面的耐磨性、疲劳强度、耐腐蚀性等性能的热处理工艺。

国产氮碳共渗基盐 TJ-2 是以尿素为主的氮化用盐，该盐在常温下为白色块状固体（或为粉末状），加热熔化（熔点为 450℃）后，借助于 KCNO 的分解所得到的 N、C 活性原子而进行氮碳共渗，常用温度 520~575℃（低于调质回火温度 10~20℃为佳），共渗时间为 0.5~3h 左右。国产软氮化盐（TJ-1、TJ-2）、再生盐（Z-1）的反应过程为：氰酸根的分解和氧化产生 [N]、[C] 原子，[N]、[C] 原子被钢吸收，渗入工件表面，完成工件表面的氮碳共渗。



式中，M 代表 K⁺、Na⁺、Li⁺ 等金属元素离子。

反应方程式表示在氰酸盐分解时盐浴中还有氧化物的出现。在使用一段时间后，盐浴中的 CNO⁻ 浓度消耗，CO₃⁻ 浓度增多，CNO⁻ 低于工艺的下限，熔盐活性差。最佳的 CNO⁻ 含量在 36%~38% 范围，为避免 CNO⁻ 下降太快，氮碳共渗温度必须低于 590℃；温度低于 520℃ 盐浴流动性过低，影响共渗效果，故一般氮碳共渗的工艺温度为 540~575℃。添加再生盐 BREG-1 或 Z-1 可恢复盐浴的活性，再生盐使过多的碳酸盐转变为氰酸盐，因此氮碳共渗盐浴可长期使用。

再生盐 Z-1 是一种 C-H-N 有机物聚合物，它与碳酸盐反应形成活性的氰酸盐，即：



又产生了氰酸盐和一氧化碳，恢复了基盐的活性，产生的气体逸出，添加再生盐后盐浴几乎没有体积变化。液体氮碳共渗的常见缺陷见表 6-12。

表 6-12 常见零件液体氮碳共渗的缺陷、原因及措施

序号	缺陷	产生原因	对策及措施
1	化合物层薄 或无化合物层	①CNO ⁻ 含量低或过高 ②温度低或时间短	①加再生盐还原或换盐 ②调整温度和时间
2	CNO ⁻ 含量 下降太快	①温度高或超温 ②未捞渣或捞渣不彻底 ③通气量大	①加报警装置 ②停炉捞渣或抽出废盐 ③调节流量计符合要求
3	CN ⁻ 含量 太高	①未通气或通气量小 ②氮碳共渗盐浴老化 ③盐浴过热 ④清渣不良	①增大通气量 ②整锅更换新盐 ③严格控制氮碳共渗的温度 ④彻底清渣或定期捞渣
	CN ⁻ 含量 太低	①新氮化盐未陈化处理 ②通气量大	①在 600~620℃空载运行 2~3h ②按要求通气
4	表面疏松严重、起皮或粗糙度高(腐蚀)	①CNO ⁻ 含量超出工艺要求 ②新盐未陈化、CN ⁻ 含量太低 ③氮碳共渗温度超过 575℃ ④氮碳共渗时间长 ⑤漂洗时间长 ⑥沉渣或极细的颗粒浮渣太多	①空载运行使 CNO ⁻ 含量降到不大于 38% ②在 600~620℃运行 2~3h 后,降至工艺温度 ③在工艺温度范围内氮化,控制盐浴配比和浓度 ④按工艺要求执行 ⑤漂洗 1min 即可 ⑥挖渣和滤掉漂浮渣,使盐浴成分符合要求
5	调整成分时有氨臭味	添加再生盐时有 NH ₃ 、CO ₂ 、H ₂ O 的逸出	开启抽风装置
6	炉内有过量废渣	①工夹具未抛丸处理 ②油污或铁屑、金属屑带入炉内	①工夹具每隔三班抛丸一次 ②清洗干净油污、去掉铁屑等
7	有花斑或颜色不一致	①未除净工件上的锈迹或沾有磁粉 ②工件之间有叠压或堆积 ③氮碳共渗盐浴中渣多 ④工件光饰出料时有划伤 ⑤工件表面黏附的切削液或乳化液未洗净 ⑥氧化盐失去作用,反应效果差 ⑦预热温度低或氮化时间短	①用稀盐酸、喷砂或砂纸除去锈迹 ②工件之间要有一定的间隙,采用双层装卡 ③停炉彻底捞渣,添加基盐或更换部分陈盐 ④精心操作,轻拿轻放,严格执行工艺 ⑤清洗剂失效,去污效果差,更换清洗剂或将工件在光饰机内加水运转 5~10min ⑥添加新氧化盐或换盐 ⑦提高预热温度或延长氮化时间,也可提高 CNO ⁻ 的含量
8	表面锈蚀	盐浴氮碳共渗后未及时清洗或清洗不干净,造成锈蚀	要用 80℃ 以上的热水煮沸清洗,时间在 15min 以上,及时进行光饰或抛光处理

6.4 气体碳氮共渗

根据所使用介质的物理状态的不同，钢的碳氮共渗可分为固体、液体和气体碳氮共渗三种，为一类中温碳氮共渗，其工艺温度为 830~860℃，其目的与渗碳相似，是提高结构钢零件的表面硬度，与渗碳相比零件具有更好的耐磨性和抗疲劳性能；与渗氮相比其硬化层的深度大，抗压强度和抗弯强度高。另外在热处理工艺的操作上具有以下优点。

- ① 由于共渗温度较低，碳氮共渗后一般可以直接淬火。
- ② 零件的变形小。
- ③ 共渗速度高于渗碳速度。
- ④ 易于实现机械化操作。

气体碳氮共渗是介于渗碳和软氮化之间的一种化学热处理工艺，是以渗碳为主渗氮为辅的中温化学热处理，经过中温淬火和低温回火后，表面形成了含碳氮的马氏体，因此具有高的硬度和良好的耐磨性，同时表面的脆性减小，而心部具有足够的强度和韧性，满足零件的实际工作需要。

资料 [9,69] 介绍，碳氮共渗后表面含碳量与渗碳相同，碳氮共渗层表面的耐磨性比渗碳层高得多，其原因为氮在共渗层中可形成少量的特殊氮化物 (ϵ 氮碳化合物)，提高了零件表面的硬度和耐腐蚀性，与渗碳相比其温度比渗碳低，奥氏体的晶粒不会明显的长大，确保零件的内部强度的同时也减小了热处理变形。因此碳氮共渗在实际生产中具有重要的作用，多用来处理机床和汽车用各种齿轮、蜗轮、蜗杆和轴（杆）类零件，以及工模具等要求表面硬度高、耐磨性好的零件。

其气体碳氮共渗的质量缺陷与渗碳基本一致，这里不再赘述，仅将气体碳氮共渗后常见的热处理质量缺陷（淬火和回火缺陷）加以汇总，具体内容见表 6-13，供参考。

但气体碳氮共渗除了上述几点缺陷外，碳氮共渗层中出现的

“三黑”组织也成为重要的不合格相，“三黑”是指黑色斑点、黑网和过渡区黑带，为一种常见的热处理质量缺陷。

表 6-13 钢铁零件气体碳氮共渗淬火、回火缺陷以及预防措施

缺陷名称	产生原因	预防与补救措施
表面硬 度不足	<p>①渗层浓度偏低，淬火后马氏体中碳的过饱和度小，甚至很难获得马氏体组织</p> <p>②网状托氏体或黑色组织使其周围基体中碳和合金元素的浓度不足，淬透性降低，淬火后出现托氏体组织，从而造成表面硬度的降低</p> <p>③碳氮共渗后冷却或淬火时，表面发生脱碳现象，淬火后出现非马氏体组织</p> <p>④淬火加热温度过高或过低，冷却介质选择不当或温度太高</p> <p>⑤因表面碳浓度过高或淬火温度过高，造成表面的残余奥氏体数量增多</p>	<p>①合理控制炉气中的碳势和氮势、定期校正炉温，确保正常的共渗温度，随时检查炉内的压力和渗剂的滴量、氮气的通入量，防止炉子漏气。根据装炉量大小调节共渗介质的滴量和流量，保证炉内气体循环流畅，防止出现积炭。对表面硬度不足可采用补渗处理</p> <p>②具体措施见本表的“表面网状托氏体组织”内容</p> <p>③碳氮共渗后冷却时在冷却罐中加入少量的渗碳剂，以防止出现氧化脱碳；淬火加热时要采取保护措施或在盐浴炉中加热</p> <p>④制定正确的碳氮共渗后的热处理工艺，选择理想的冷却介质</p> <p>⑤控制好炉内的碳势，降低淬火的加热温度，可淬火后进行冷处理，或高温回火重新进行淬火处理</p>
表层网 状或粗大 块状、爪 状碳化物	<p>①共渗时碳(氮)势太高，扩散时间短，造成碳氮浓度过高</p> <p>②碳氮共渗后的冷却速度太慢或直接淬火时预冷时间过长，致使碳氮化合物沿奥氏体晶界析出</p>	<p>①控制炉内的碳势，调整好碳氮共渗与扩散时间的比例</p> <p>②零件在罐内缓冷时，采用蛇形管内部通冷却水加速冷却</p> <p>③对直接淬火的零件，要合理控制预冷时间的长短</p>
渗碳层 过深、硬 度不足或 不均匀	<p>①渗层深度控制不当，共渗温度过高，保温时间长，碳势过高</p> <p>②共渗温度过低，保温时间短，碳势低</p> <p>③炉子的密封性差</p> <p>④零件表面不清洁，有锈斑、炭黑等</p> <p>⑤装炉量过多，气体的流动性差，零件之间的间隙太小，炉温不均匀</p>	<p>①合理调整碳氮共渗的工艺参数，加强炉温的校验</p> <p>②减少装炉量，改进和注意装夹方式</p> <p>③定期清理炉膛内的积炭</p> <p>④零件碳氮共渗前应清理和清洗干净</p> <p>⑤渗层不够可以重新进行补渗</p>

缺陷名称	产生原因	预防与补救措施
表面网状托氏体组织	<p>①钢中的铬、锰以及硅合金元素被氧化(内氧化),造成奥氏体中的合金元素贫化,降低了奥氏体的稳定性而出现黑色的奥氏体分解产物(托氏体等)</p> <p>②碳氮共渗温度偏低,炉气内活性原子少,造成表面碳氮含量的不足而出现黑色的奥氏体分解产物(托氏体等)</p> <p>③碳氮共渗后冷却缓慢,淬火加热过程中发生脱碳和脱氧,造成黑色网状组织的产生</p> <p>该类组织经过硝酸酒精浸蚀后,在渗层内化合物周围以及原奥氏体晶界上呈网状或花纹状黑色组织</p>	<p>①控制炉气的成分,降低气氛中氧的含量</p> <p>②改善炉子的密封性,确保炉内处于正压</p> <p>③合理选择要求的钢种,尽可能采用含铬、锰、钛等低材料</p> <p>④将碳氮共渗中氮的浓度控制在0.1%以下</p> <p>⑤考虑到氧化发生在排气阶段,在初期应加大排气速度,氨气应经过干燥处理</p> <p>⑥适当减少共渗前氨的供应量,增加后期的供氨量</p> <p>如黑色组织深度小于0.02mm,可采用磨削的方法或进行喷丸处理去掉黑色组织</p>
黑色斑点状组织	<p>①共渗介质中氨的含量过高</p> <p>②共渗层表面的氮含量大于0.5%</p> <p>③共渗温度低或共渗时间长</p>	<p>①根据要求合理控制氨的通入量</p> <p>②提高碳氮共渗的温度或时间</p>
心部硬度超差	<p>①心部硬度高是淬火温度偏高造成的</p> <p>②心部硬度偏低是钢的淬透性低,淬火时出现游离的铁素体</p> <p>③淬火加热温度太低,造成铁素体未溶入奥氏体中,冷却介质的冷却性能低</p>	<p>①根据硬度的要求适当降低淬火加热温度</p> <p>②选择要求的碳氮共渗钢种,适当提高淬火加热温度</p> <p>③冷却介质能确保获得要求的组织和性能,温度应在要求的范围内</p> <p>④可安排重新加热淬火和回火处理</p>
零件变形与开裂	<p>畸变和开裂在共渗和淬火过程中均有可能发生,操作方面的原因有:</p> <p>①零件的装炉方式、装炉量和夹具选用不当</p> <p>②合金钢共渗后空冷时表层组织为托氏体+碳化物,而次表层出现淬火马氏体组织,表层因拉应力的作用而产生裂纹</p> <p>③渗层碳氮浓度和渗层厚度分布不均匀或出现大块状和网状碳化物,在淬火时易发生畸变或开裂</p> <p>④淬火温度过高或返修次数太多</p> <p>⑤淬火方法和加热方法错误</p> <p>另外因零件形状复杂、厚薄不均、局部共渗,以及渗层与心部成分组织差异将导致畸变或开裂</p>	<p>①改进装炉方式,长轴(杆)零件要垂直吊挂,薄壁零件应平放,所用的夹具平稳和对称</p> <p>②减慢合金钢渗后的冷却速度,使渗层发生共析转变或快冷获得马氏体+残余奥氏体组织,如表层出现网状或大块状碳化物时要采取提高淬火温度的办法</p> <p>③改进零件的结构设计,力求简单和对称</p> <p>④利用零件共渗变形的规律,合理调整机械加工和共渗的工艺参数,避免出现零件的畸变和开裂</p>

(1) 黑色斑点

这是一种黑相，存在于共渗层，是大小不等的空洞，抛光后有的呈孤立块状，有的沿晶界分布，见图 6-16，不排除存在石墨或其他夹杂物存在。产生的原因是炉内碳氮浓度过饱和，尤其是零件表面氮浓度超过 0.5% 时。在黑色斑点分布区域，硬度有所降低。

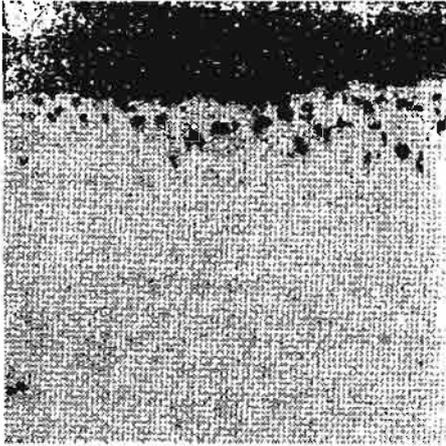


图 6-16 共渗层表面的黑相
(未腐蚀, $\times 100$)

黑色组织的表层为氧化膜，多为 FeCrO_4 、 FeSiO_4 ，也可固溶入锰和铝。内层为粒状的碳氮化合物，形成托氏体和贝氏体等非马氏体组织，网状的托氏体伴随着黑色组织热产生。

黑色组织的产生与氮的供应量、富化气的供给量有关，资料 [2, 11, 19] 介绍，可能是内氧化现象引起的，也可能为石墨的夹杂物析出引起的。如果出现严重的黑网或黑带等，将明显降低表面硬度、抗拉强度、接触疲劳强度、弯曲强度以及使用寿命等，因此在黑色斑点的分布区域，硬度有所下降，不仅使齿面易于磨损，而且也促进疲劳麻点，降低渗层性能及零件的使用寿命等，其本质是合金元素内氧化后，沿晶界析出氧化物以及由于过冷奥氏体的稳定性降低，在淬火时析出托氏体或贝氏体组织的原因，见图 6-17。网状组织和黑色组织的区别见表 6-14。

表 6-14 网状组织和黑色组织的区别

组织名称	组织形态	产生的原因
网状托氏体	存在于化合物周围以及原奥氏体的晶界上，呈网状或花纹形状	为过冷奥氏体的分解产物，其产生是由于碳氮的饱和度不足，以及合金元素内氧化及其他因素引起奥氏体的稳定性降低所致
黑色组织	存在于化合物内，呈斑点形状	为化合物的转变产物，其产生与碳氮过饱和有关

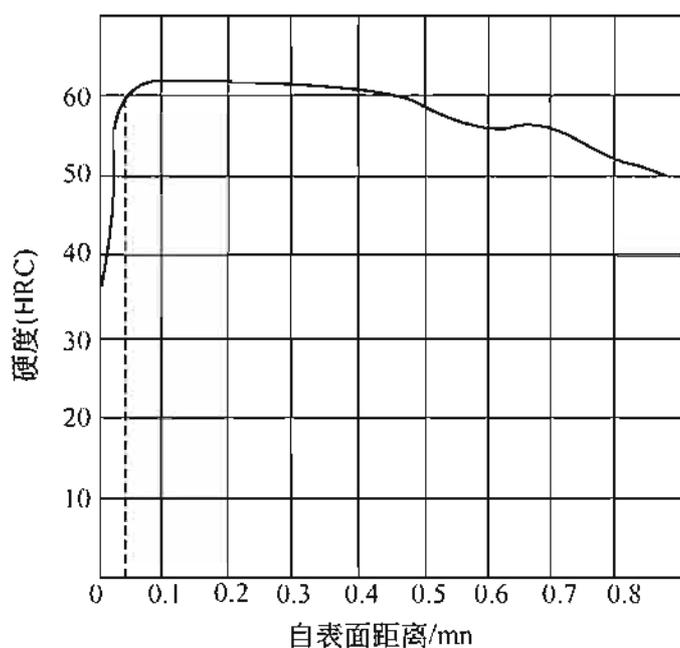


图 6-17 存在黑相的表面硬度

(2) 黑网

网状组织是指齿轮的根部共渗，表面出现黑网，将沿晶界分布，见图 6-18。裂纹深度在几十微米和几百微米。资料 [38] 介绍，网状组织是合金元素的氧化物和托氏体、贝氏体以及细小的粒状碳氮化合物层混合组织。

网状组织是在碳氮共渗过程中形成的，由于炉内气氛中氧原子首先在零件的表面聚集，沿着原奥氏体晶界向内扩散，氧原子在扩散的同时，与周围或附近的合金元素作用生成氧化物，合金元素的内氧化导致奥氏体边界区合金元素贫化，加上碳氮化合物的形成降低了奥氏体中碳、氮的含量，造成奥氏体稳定性的降低；另外形成的碳氮化合物在冷却时自发形核，促使奥氏体析出碳氮混合物，因此分解成网状和花纹状分布。在淬火冷却时，首先析出托氏体、贝氏体等组织，呈网状分布，这同碳氮共渗时碳、氮含量过高或淬火冷却不良等有关。为抑制该类缺陷的出现，应适当提高淬火的加热温度和采用冷却性能强的淬火介质。对于黑色组织深度在 0.02mm 以下的零件，采用喷丸强化来加以挽救是可行的方法。

(3) 过渡区黑带

过渡区黑带是指共渗层和过渡区附近出现的呈散块状的黑色组织，严重时连接成带。见图 6-19，主要是由于过渡区的锰生成碳氮化合物后在奥氏体中的含量减少，淬透性降低，从而出现托氏体。该类组织只有经过腐蚀后，在显微镜下分辨出黑带就是托氏体。锰和铬等元素的内氧化是形成黑色组织的重要原因，控制炉内气氛来减少内氧化，是控制黑色组织形成的重要方法，可在排气时加大排气量，充分干燥氨气，适当控制供氨量。该类缺陷可通过重新加热淬火，是可以得到消除的。

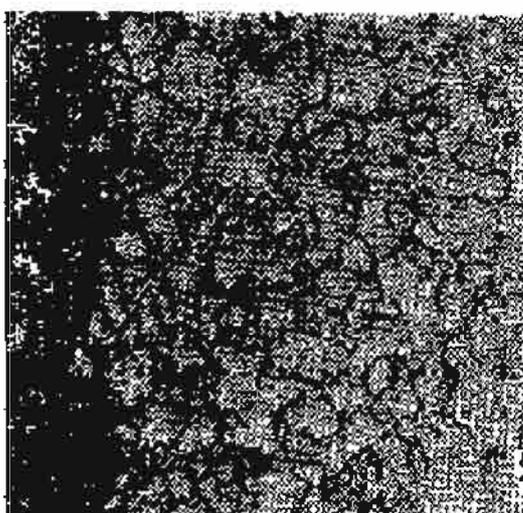


图 6-18 共渗层表面黑网
(轻腐蚀, $\times 100$)

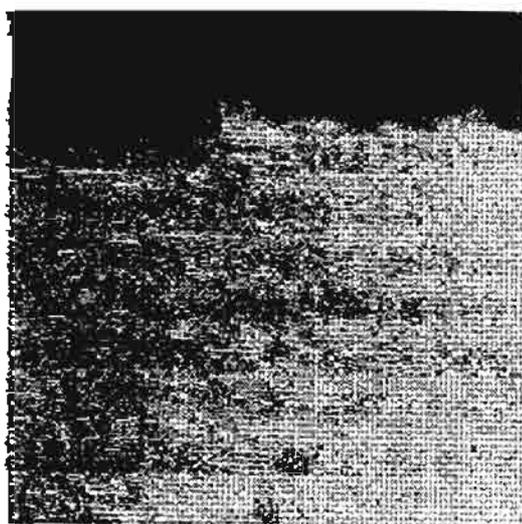


图 6-19 过渡区带状黑色组织

(4) 预防产生黑色组织的措施和方法

黑色组织是十分严重的热处理缺陷，它将严重影响渗层的性能以及降低零件的使用寿命，在实际碳氮共渗过程是不允许出现的，因此必须采取切实可行的方法，从气体碳氮共渗工艺的过程出发，切断产生的根源可有效避免和基本消除黑色组织，可确保产品质量合格。

黑色组织有黑点、黑网和黑带三种形式，根据上面介绍的机理，结合零件在热处理过程中相关的工艺参数，通常消除或预防该类质量缺陷的措施如下。

采用较高的碳氮共渗温度，目的是提高奥氏体的稳定性；加快

零件淬火时的冷却速度；合理控制渗层中碳、氮的浓度（碳、氮浓度过高，形成了大量的碳氮化合物，引起了奥氏体内元素的贫化，降低了零件的淬透性），加强炉子的密封性；控制炉气中氧化性气体的含量，用干净的 NH_3 来减少合金元素的内氧化，如果炉气中 CO_2 多，加上 NH_3 的含水量高，生成的水容易促使内氧化以及形成黑色组织；采用缓冷后重新加热淬火，以及选择含钼的钢种（钼元素具有强烈迟缓珠光体转变的作用）等均可取得良好的效果。

另外在气体碳氮共渗过程中，出现粗大的碳氮化合物多半为：一是表面的含氮量高，以及碳氮共渗的温度较高时，零件的表层出现密集的粗大条块状碳氮化合物；二是共渗的温度低，炉气中的氮势较高，零件表面形成该类碳氮化合物。预防的办法为严格控制碳和氮的含量，在共渗的初期严格控制气氛中氮的供应量，即可避免出现该类质量缺陷。

通常影响气体碳氮共渗的质量因素较多，原材料的淬透性差，在热处理过程中会出现硬化层深度浅和硬度不足的现象等，因此应当综合考虑和分析具体的热处理过程，一般应做好下面的几项工作。

① 气体共渗温度控制在 900°C 以下，可以确保氮的加入效果。

② 淬火温度取下限温度 $780\sim 820^\circ\text{C}$ ，可预防淬火后变形超差，同时注意保温时间对零件内部和外部硬度的影响。

③ 低碳合金钢等多半采用冷却能力好的淬火油作为冷却介质，无特殊要求应避免水冷。

④ 回火温度应高于该钢渗碳的回火温度 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 以上。

⑤ 残余奥氏体的数量不能过多。

6.5 实例分析

6.5.1 齿轮的渗碳畸变

齿轮作为机床、汽车、各种机械主要传递动力的零件，靠轮齿的咬合，担负着传递动力、改变运动速度和运动方向的任务，因此

是十分重要的零件，为了提高齿轮的使用寿命，既要求表面具有较高的硬度，保持高的耐磨性，又要求零件心部有较高的韧性，以确保整个零件获得足够的强度，因此该类零件大多采用低碳钢或低碳合金钢制造。

根据齿轮的工作特点，应选用低碳合金钢或中碳钢等，齿轮经过正火或调质，最后进行渗碳或化学热处理，既保证了齿轮基体组织的综合力学性能，又增加了轮齿的耐磨性、抗咬合性，提高了齿轮的疲劳强度和冲击韧性，延长了齿轮的使用寿命。

齿轮工作时，通过齿面的接触来传递动力，其主要承受载荷作用在齿轮牙顶上，汽车齿轮的牙齿根部受到弯曲应力的作用，其大小在 $70\sim 80\text{kgf/mm}^2$ ，其周期性变化的应力使牙齿疲劳断裂或脆性折断，而齿面受到接触应力的作用，接触应力是由两个齿面的相互接触产生的，此时最高应力达到 $250\sim 300\text{kgf/mm}^2$ ，因此齿轮的受力状态十分复杂，必须经过化学热处理才能满足其工作需要。

渗碳和碳氮共渗用钢主要用于制作耐磨性好、承受载荷作用的齿轮；用于生产满足运行速度高、周期长、安全可靠性能高的齿轮；需要传递功率大、齿轮表面载荷高、耐冲击的齿轮。

常见齿轮渗碳淬火后的畸变形式见表 6-15。

表 6-15 齿轮渗碳淬火后畸变形式的趋势

齿轮种类	齿轮参数变化	热处理后畸变趋势
圆柱齿轮	直径变化	盘状齿轮齿顶圆直径变大，轴齿轮齿顶圆直径通常缩小
	齿顶圆及内孔的不均匀变化	齿轮材料的质量不均匀，几何形状不对称及机械加工不当，经热处理后出现不均匀胀缩，形成椭圆
	平面翘曲及齿圆锥度	盘状齿轮外径较大，端面容易产生翘曲及齿圈形成锥度
	齿轮间尺寸变化	两端面齿厚胀，齿宽中间呈凹形
齿轮轴	轴向变化	多是材料、几何形状及加工工艺等原因造成齿轮弯曲畸变
锥齿轮	齿轮端面及内孔畸变	齿轮端面翘曲，内孔呈椭圆形

续表

齿轮种类	齿轮参数变化	热处理后畸变趋势
斜齿轮	螺旋角变化	螺旋角变小,斜齿盘齿轮角度将变大;斜齿轴齿轮角度改变较小,曲线齿齿圈、锥齿轮、主动轮角度改变增大
带花键齿轮	内孔胀缩	低合金钢齿轮渗碳淬火后,通常内孔缩小;淬透性越高,渗层越厚,则内孔收缩越大,而内孔防渗的齿轮微胀
	内孔锥度	截面较小的位置,内孔收缩较大;截面较厚处内孔收缩较小或微胀

预防措施如下。

① 设计齿轮时应使其结构合理,形状对称、轮辐的强度及键槽的位置合理等。

② 使用化学成分和冶金质量符合要求的钢材,锻坯或粗加工的毛坯应进行预备热处理(锻坯进行退火处理、粗加工后除应力退火等),以此来保证钢材具有要求的金相组织和良好的机械加工性。

③ 渗碳和淬火要选用合理的淬火工夹具,使渗碳件在渗碳过程中内外温度均匀一致、不受外力的作用、渗碳气氛合理流动通畅,淬火时整个零件均匀冷却等,均可有利于减少淬火变形。

④ 尽可能地选用较低的淬火温度或冷却能力较缓的淬火介质,也可采用分级、等温等淬火方法,降低内应力来减小齿轮的变形。

⑤ 为控制齿轮花键孔的精度,建议采用模压淬火,这样可明显减小变形量。

⑥ 根据齿轮的渗碳和热处理变形的规律,经过试验可调整其机械加工尺寸。

齿轮渗碳后经过高频淬火或火焰淬火后,由于热应力和组织应力的双重作用,将会发生齿部部分尺寸的改变,严重的将会报废,直接影响到产品质量,因此为防止出现渗碳和淬火畸变,应当在齿轮的热锻、制造以及热处理等过程中注意以下几个方面,具体内容见表 6-16,这有助于设计者事前综合考虑到影响因素,可确保齿轮的渗碳和淬火后的变形量符合技术要求。

表 6-16 减小齿轮表面淬火畸变的一般方法或措施

措 施	合理的工艺方法
消除毛坯内应力、细化组织	毛坯正火
采用较低的淬火温度	淬火前进行调质处理,获得均匀细小的索氏体组织
短时间内加热	① 淬火前调质② 选择合适的感应加热频率③ 火焰嘴或感应器与齿面间距不宜过大④ 淬火前预热
消除加工应力	表面淬火前经过 600~650℃ 预热
加热均匀	① 芯轴的偏摆小② 烧嘴或感应器的形状均匀对称③ 套筒加热时齿轮旋转
缓和冷却	① 采用合适的淬火介质② 尽可能采用自来水③ 采用聚合物水溶液
增加齿轮本身的强度	① 合理安排加工顺序② 结构设计应合理

齿轮除了进行变形的控制外,齿轮渗碳和碳氮共渗后的热处理缺陷直接影响到其产品质量,因此从齿轮的整体化学热处理过程来看,也必须特别注意到此点,现将其列于表 6-17 中,供参考。

6.5.2 渗碳齿轮的磨削裂纹

20CrMnTi 钢制作的变速箱固定齿座,经过渗碳热处理后进行

表 6-17 渗碳和碳氮共渗齿轮常见热处理缺陷及防止措施

序号	缺陷名称	产生的原因	防止的措施
1	毛坯硬度偏高或偏低	(1) 正火温度低或保温时间短、冷却速度慢 (2) 正火温度过高	重新制定合理的正火工艺,检查仪表,控制冷却速度
2	带状偏析	钢材内合金元素和杂质偏析	更换材料
3	渗层过深或过浅	(1) 炉内碳势过高或过低 (2) 炉内温度偏高或偏低 (3) 强渗时间长或短	(1) 控制炉内气氛 (2) 调整到要求的温度 (3) 合理确定强渗时间
4	渗层不均	(1) 炉内温度不均 (2) 炉内碳量不均 (3) 炉内气氛循环不良 (4) 工件之间有压叠或碰撞 (5) 齿面有脱碳或锈迹	(1) 加导流罩确保温度均匀 (2) 严格控制炉内碳量 (3) 减少装炉量和合理放置,确保气氛的循环 (4) 对齿面除锈或去掉脱碳层

续表

序号	缺陷名称	产生的原因	防止的措施
5	(1) 表面碳浓度过高形成大块碳化物网或氮化物网 (2) 表面碳浓度低	(1) ①炉内碳势高 ②强化时间过长 (2) ①炉内碳势过低 ②扩散时间长 ③炉温偏高	(1) ①降低炉内碳含量 ②缩短强渗时间 ③适当提高淬火温度 ④可补充一次较低碳含量的扩散处理 (2) ①提高炉内碳含量 ②检查炉温要符合要求 ③调整强渗与扩散时间的比例
6	(1) 表面马氏体针粗大 (2) 出现非马氏体组织	(1) 淬火温度高 (2) ①排气不充分 ②炉子密封性差、严重漏气 ③表面氧化 ④冷却速度慢	(1) 降低淬火温度 (2) ①充分排气 ②减少空气的进入 ③在可控气氛炉中加热 ④提高冷却速度
7	表面脱碳	(1) 渗碳后出炉温度高 (2) 炉子密封性差、严重漏气 (3) 淬火过程中产生氧化	(1) 降低出炉温度 (2) 防止漏气, 控制炉内气氛 (3) 盐浴淬火时要充分脱氧 (4) 重新进行渗碳或碳氮共渗
8	心部硬度低	(1) 淬火温度低 (2) 冷却速度慢 (3) 心部游离态铁素体过多 (4) 材料选择不当	(1) 调整加热的温度 (2) 提高冷却速度 (3) 采用两次淬火 (4) 更换材料
9	畸变	(1) 淬火温度偏高 (2) 冷却方法不当 (3) 夹具、挂具设计不合理 (4) 材料选择不当	(1) 调整淬火温度 (2) 选择合理的淬火介质和方法 (3) 设计符合要求的夹具等 (4) 更换材料

端面的磨削时, 产生了放射状和网状裂纹, 具体见图 6-20。对该类零件进行金相分析, 在齿座的表层出现很薄的白亮的马氏体组织; 次表层为黑色的托氏体, 再向里层为马氏体和残余奥氏体, 具体见图 6-21。

通过检查未磨削的零件, 发现表面的显微组织为针状马氏体+较多的残余奥氏体。零件表面残余奥氏体数量的多少, 碳化物分布

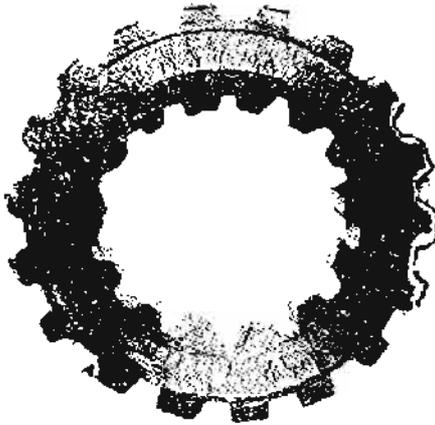


图 6-20 变速箱固定齿座
磨削产生的网状裂纹

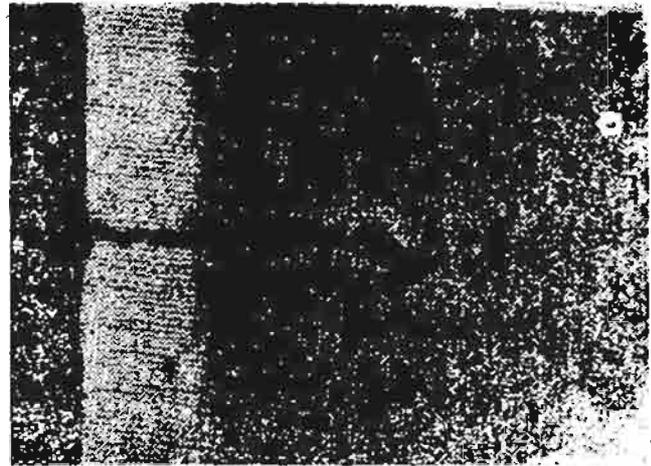


图 6-21 变速箱固定齿座磨削后表面的
淬火层、回火层以及裂纹

形态，是引起磨削裂纹的重要因素。零件经渗碳、磨削后，组织中不可避免地存在一定数量的残余奥氏体。说明该零件在磨削过程中，由于磨削量工艺参数不当、过于剧烈、冷却效果不好等，导致磨削的表面温度升高，超过了组织的相变温度，在冷却过程中发生了二次淬火现象，形成了白亮的马氏体区域，而残余奥氏体在磨削热作用下，转变为淬火马氏体，造成局部体积膨胀等；次表层的马氏体被回火为托氏体，因此形成了黑色的回火区。这样零件的表面体积膨胀、组织应力增大，表面受到拉应力的作用，而内部存在压应力，故引起了表面裂纹。因此磨削工艺不当是造成齿座磨削裂纹的主要原因。

关于磨削裂纹的产生原因已经清楚，为了避免出现该类缺陷应采取以下措施：不进行强烈磨削；防止出现轻型磨削裂纹，应在 $100\sim 120^{\circ}\text{C}$ 回火后进行磨削，防止出现重型磨削裂纹，要在 300°C 以上回火后再进行磨削；磨削后的零件在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 回火处理。

6.5.3 气门液体软氮化后表面腐蚀和粗糙度超差

(1) 气门的工作特点和技术要求

汽车发动机和内燃机的工作靠气门在汽缸内的上下运动，依次带动曲轴和连杆工作，获得需要的机械动力。气门是在内燃机工作

过程中密封燃烧室和控制内燃机气体交换的精密零件，是保证内燃机动力性能、可靠性和耐久性的关键部件，因此进、排气门是其心脏部件。气门在工作过程中阀口锥面与汽缸盖相互接触部分、气阀杆端与摇臂之间发生剧烈的摩擦作用、高温气体冲刷和腐蚀温度高，进气门主要承受反复冲击的机械负荷，其工作温度为 300~400℃，而排气门除承受冲击的机械负荷外，还受到高温氧化性气体的腐蚀以及热应力、锥面热箍应力和燃烧时气体压力等的共同作用，排气门的工作温度为 600~800℃，因此在运动过程中气门要承受冲击作用。资料 [71] 介绍，采用气门旋转运动，可在密封锥面上产生轻微的摩擦力，同时还有消除沉积物自洁作用。发动机速度上升，气门机构的惯性力增大，而超过了气门弹性的张力，从而引起气门的跳动，打乱了气门的调节时间，使充气效率下降，降低了发动机的力学性能。因此分析气门的工作状态可知气门应具有以下特点，才能满足工作需要。

① 在正常工作条件下，有足够的高温强度和合理的韧性，高的硬度和耐磨性。

② 具有良好的抗氧化性和耐燃气腐蚀性能。

③ 在冷热交替作用下，基体组织应稳定，不允许有直径尺寸的变化。

④ 具备良好的机械加工性能、热加工及焊接等工艺性能。

(2) 气门材料的选用原则

根据气门的工作环境和技术要求，所采用的材料必须具备足够的高温强度和耐磨性能，良好的抗氧化性和抗燃气腐蚀性能，较高的热传导率和较低的膨胀系数等，同时具备优良的冷热加工性和焊接性能等。材料的选择应按工作环境、介质和耐久性等方面进行综合考虑，通常要采用含碳量 0.3%~0.6% 的合金钢或耐热钢制造，合金元素有铬、硅、镍、钨、钼等，这些材料具有好的高温性能、在冷热变化的情况下其组织稳定，并有一定的抗氧化性及抗燃气腐蚀性，抗冲击性和抗动应力，热加工易于成形，切削加工性好。氮化气门用材料为马氏体耐热钢和奥氏体耐热钢两种。

① 马氏体耐热钢 (Cr-Si 系列), 如 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo、5Cr8Si2、5Cr8Si3。

② 奥氏体耐热钢有以下几种 (Cr-Mn-Ni 系列、Cr-Ni 系列): 4Cr14Ni14W2Mo、2Cr21Ni12N (21-12N)、5Cr21Mn8Ni2N (21-2N)、3Cr23Ni8Mn3N (23-8N)、5Cr21Mn9Ni4N (21-4N)、5Cr21Mn9Ni4NbW2N (21-4N+WNb)。

马氏体型钢中 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 是气门生产厂家用得较多的两种气阀钢, 数量占气门总量的 70% 左右。钢中的铬和硅提高抗氧化能力和热疲劳性能, 同时提高回火稳定性, 提高使用温度, 常用于 700℃ 以下工作的汽车发动机、柴油机的排气阀。

在 Cr-Si 钢中加入钼, 提高热强性的同时减缓了回火脆性, 4Cr10Si2Mo 可制作工作温度不超过 750℃ 的中、高负荷汽车发动机和柴油机的排气阀。

(3) 气门的液体氮碳共渗工艺

氮碳共渗可提高气门的表面硬度、耐磨性、抗擦伤、抗咬合能力和耐蚀性, 对延长气门的使用寿命具有明显的作用。因此提高气门杆部的硬度在干摩擦条件下具有抗擦伤和抗咬合性能, 具有高的耐磨和抗氧化性正是气门氮碳共渗的目的。氮化气门有整体和焊接气门两种, 材质有马氏体耐热钢和奥氏体耐热钢, 根据渗层的深度和硬度要求确定最佳的氮碳共渗温度和时间, 这需要工艺人员进行一系列的工艺试验和反复地验证, 研究影响不同材质气门的相关工艺参数, 得到理想的氮碳共渗工艺, 用于指导和应用于大批量的生产作业。

气门氮碳共渗后的技术要求如下。

① 氮碳共渗层深度: 0.010~0.030mm。

② 表面硬度: $\geq 600\text{HV}_{0.2}$ 。

③ 脆性小于 2 级, 渗氮层疏松和氮化物级别 1~3 级。

④ 杆部的变形 (或直线度) 量或涨量: $\leq 0.005\text{mm}$ 。

⑤ 杆部、小头端面 (或阀口) 粗糙度在 $R_a0.5$ 以下 (未进行机械抛光处理)。

⑥ 气门外观为均匀一致的黑色，无红色锈蚀和杆部花斑、表面无划伤或磕碰伤、气门盘部和杆端面无白点、表面无腐蚀和掉色以及气门烟槽不呈黄色等，以及不得出现影响产品质量的其他外观缺陷。

目前国内外气门液体氮碳共渗的普通工艺流程为：浸泡→漂洗→喷淋→预热→氮碳共渗→氧化→冷却→清洗→光饰→煮油。其氮碳共渗工艺具体见图 6-22。工艺流程中有三个最为关键的工序：预热、氮碳共渗和氧化处理（简称 QP 技术），这是直接对气门的氮碳共渗质量有决定性影响的阶段，因此要认真编制并执行。

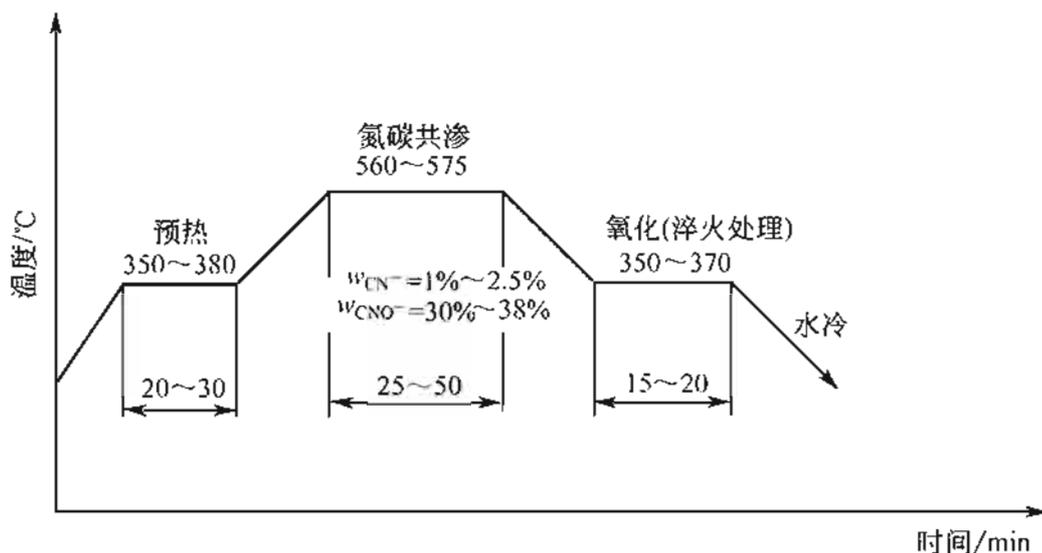


图 6-22 气门液体氮碳共渗工艺曲线

在气门实际液体氮碳共渗过程中，表面疏松严重、起皮或粗糙度高（腐蚀）是氮化气门常见的质量问题，也是致命的缺陷，这不仅造成表面抗蚀性和疲劳强度的降低，更重要的是无法满足发动机厂对氮化气门表面的质量要求，直接影响到气门的使用寿命，根据笔者多年来气门氮化的实践经验，结合具体操作过程和质量检验要求，提出以下产生该类质量缺陷的原因，供热处理工作者参考，与此同时也指出氮化过程中要采取的措施和方法，要结合具体材料、渗层、表面硬度、氮碳共渗温度和时间、冷却方法以及后续加工等各方面，合理确定和编排冷热加工路线，尤其是氮碳共渗和淬火

工序。

(4) 产生表面疏松严重、起皮或粗糙度高(腐蚀)的原因

① 添加的盐浴中 CNO^- 含量超出工艺要求, CN^- 含量低 ($<1.0\%$), 造成氮碳活性原子增多, 盐浴的腐蚀性增强。

② 更换的整锅新盐未进行陈化(熬盐)处理、 CN^- 含量太低 ($<0.5\%$), 氮碳共渗时间长, 造成气门表面的过渗, 表面疏松或起皮(暴皮)等, 表面十分粗糙。

③ 氮碳共渗的温度超过 575°C , 盐浴中氮、碳活性原子消耗过快, 造成氮碳渗层组织不致密, 出现表面疏松。

④ 氮碳共渗的时间过长, 盐浴内部活性原子与气门表面接触的概率的增多, 引起表面粗糙度的增加, 造成超差。

⑤ 漂洗水的温度高和时间长, 尤其是马氏体耐热钢气门易在水中生锈, 造成杆部出现麻点等, 气门经过氮碳共渗后, 出现腐蚀现象。

⑥ 沉渣或极细的颗粒浮渣太多, 翻滚后贴附或黏附在气门的杆部, 造成表面粗糙度不合格。

⑦ 氮化后未及时氧化, 氮化盐附着在气门杆部, 空冷过程中又等于延长了氮化时间, 造成气门杆部的腐蚀。

⑧ 加入再生盐后未通气反应或氮化过程中加入再生盐, 造成盐浴成分严重不稳定, 再生盐与基盐无法充分反应, 没有正常恢复其盐浴的活性, 产生的部分反应产物腐蚀了气门的表面。

⑨ 预热高或时间长, 工件表面会有轻微氧化, 一般预热温度为 $350\sim 400^\circ\text{C}$, 保温时间为 $20\sim 40\text{min}$ 左右, 一旦产生部分氧化, 在氮化过程中该部位容易出现脱落, 造成表面粗糙和颜色不均匀。

⑩ 把再生盐误当作基盐加入炉内, 使炉内 CNO^- 的数值迅速上升, 盐浴的还原反应剧烈, 活性的氮、碳原子明显增多, 加剧了对气门杆部的共渗处理, 造成严重的腐蚀。

(5) 采取或预防的相应措施

针对气门氮碳共渗后表面粗糙度超差的问题。应着重从其盐浴的成分、时间等几个方面进行分析和判断, 从关键的过程出发, 排

除无关的因素，就能找到原因，同时可提出或采取相关的措施和方法，为从根本上解决该类缺陷提供了保证。

① 在 570~575℃ 的温度下，放入通气管空载运行 2~4h，使 CNO^- 的含量降至 30%~38%。

② 对整锅更换的新盐先将坩埚外的炉温定在 520~540℃（盐浴温度在 480~500℃），待盐浴完全溶化后将其搅拌均匀，保温 1h 升温到 600℃（此时盐浴温度在 565~575℃）后放入通气管，保温 1h 继续升温到 650℃（盐浴温度在 600~610℃）运行 2~3h 后，降至工艺温度进行保温 2h 稳定处理后即可正常进行气门的氮碳共渗处理。

③ 在正常的氮碳共渗的温度范围内进行氮化处理，温度过高将造成腐蚀和表面疏松概率的增加，过低则盐浴的流动性和活性原子含量降低。

④ 与温度相比，氮碳共渗时间也是十分重要的工艺参数，时间的长短直接影响到渗层、硬度和表面质量，在温度一定的前提下，时间越长则盐浴对气门的腐蚀越严重，甚至造成气门的报废。

⑤ 对于气门的漂洗原则为 1min 即可，应为干净或流动的水，内部不出现油污、杂物以及其他漂浮的物质。

⑥ 每班工作完毕用专用工具彻底挖渣和滤掉盐浴表面的漂浮渣，添加基盐后进行陈化处理，确保盐浴成分的稳定和成分的均匀，各项指标符合工艺和技术要求。

⑦ 工件经氮化后控净盐，在空气中停留时间应小于 2min，或从氮化炉提出后立即进行氧化处理，减少气门表面被进一步腐蚀的可能。

⑧ 添加再生盐时必须按要求放入通气管后逐渐加入，以恢复盐浴的活性，确保成分的稳定。

⑨ 严格执行工艺要求，通常情况下预热温度为 350℃，保温 20min 即可，预热前擦干净气门表面的水珠等。

⑩ 应将盐浴炉温升高到 600~610℃ 放入通气管熬盐 2h，随后降温到 570℃ 保温 2h 检验 CNO^- 含量，符合技术要求后即可正常

作业，只不过由于盐浴的活性很强，建议首先处理奥氏体耐热钢材料的气门，使用 2~3 个工作日则可投产马氏体耐热钢材料的气门。

(6) 关于提高气门盐浴寿命、减少表面积灰的几点建议

笔者总结十几年的实际气门、挺杆、锻模、曲轴、高速钢刀具等产品的软氮化经验，结合使用的国产氮碳共渗基盐的特点，认为为了延长氮碳共渗基盐的使用寿命，应注意对氮碳盐浴的保养和维护，停炉后捞底部沉淀渣和上方的漂浮渣或起炉时捞渣，才能确保炉内盐浴成分的稳定，同时有助于产品质量的提高和稳定。在气门的氮碳共渗过程中摸索出一套恢复和维护氮化盐的有效方法：启炉时将炉丝的温度设定为 520℃，待盐浴全部熔化保温 1h 后，将烤干后的不锈钢挖渣勺慢慢放入盐浴坩埚的底部，彻底挖出坩埚底部的盐渣（既有氮化盐共渗后反应的产物碳酸盐，也有气门、氮碳共渗工装上的氧化皮和脏物等）。采用此法一是保持了盐浴的活性，另外延长其使用周期，二是降低了生产成本，因此使目前国内外气门氮碳厂家共同存在的困难问题得到了很好的解决。应当加强对氮化工装的表面处理，工作一定时间后要采用喷砂或抛丸的方法，去掉工装上的氮碳共渗后的积灰等，同时加强气门预热前的清洗工作，采用的金属清洗剂应能将气门在车削、磨削加工过程中使用的切削液、磨削液以及乳化油等浸泡干净，一旦失去清洗作用要立即更换，确保气门表面的清洁。

近年来从国外的氮碳共渗气门的样品来看，对于 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 等马氏体耐热钢而言，如果渗层超过 0.175mm 以上，采用液体氮碳共渗是不可取的，其原因在于氮碳共渗的时间长，很容易造成表面腐蚀或粗糙度的降低，达不到技术要求。国外通常采用气体氮碳共渗，则可有效地解决该问题，但随之而来的是工艺时间长、生产效率低、影响氮碳共渗质量的因素多、危险性高等，而国内气门制造厂家均不采用该类工艺。

为了提高软氮化气门的表面清洁度，国内外气门制造厂致力于探讨对气门杆部的机械抛光处理，一类为采用喷砂或抛丸处理，利用高速的砂粒或钢丸喷射到气门的表面上，将氮碳共渗后的积灰除

掉，另一类是采用纸浆轮（或布砂轮）对气门的杆部抛光（磨光），目前这两种工艺已经得到了推广和应用，需要注意的是气门的喷砂或抛丸处理具有生产效率高、成本低、简单易行等特点，但缺点是表面粗糙度难以保障，有时出现麻点和砂坑，另外清洁度也难于合格；杆部抛光（或磨光）的特点与喷砂或抛丸相比，效率低、技术难度大，抛光后的气门杆部粗糙度好，达到 $R_a 0.10 \sim 0.18$ （为喷砂或抛丸粗糙度的 $1/2 \sim 3/4$ ），产品质量高，并且明显提高杆部的尺寸精度和耐磨性、抗蚀性和疲劳强度等，因此其具有广阔的发展前景，必将对提高气门的使用寿命带来一次全新的革命。

参 考 文 献

- [1] 许天己编著. 钢铁热处理使用技术. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 国家机械工业委员会编. 热处理工艺学: 初级. 北京: 科学普及出版社, 1983.
- [3] 刘宗昌编著. 钢件的淬火开裂与防止方法. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [4] 中国机械工程学会热处理分会编. 热处理工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] 裘汲等编著. 小件的热处理. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [6] 热处理手册编委会. 热处理手册: 第一卷. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 许天己, 王忠诚编著. 钢铁零件制造与热处理 100 例. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] 上海工具厂编. 刀具热处理. 上海: 上海人民出版社, 1971.
- [9] 刘永诤主编. 钢的热处理. 北京: 冶金工业出版社, 1981.
- [10] 潘邻主编. 表面改性热处理技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 浙江大学, 上海机械学院, 合肥工业大学合编. 钢铁材料及热处理工艺. 上海: 上海科学技术出版社, 1975.
- [12] 林信智, 杨连第编著. 汽车零部件感应热处理工艺与设备. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [13] 夏立方, 高彩桥编著. 钢的渗氮. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [14] 齐宝森, 陈路宾, 王忠诚等编著. 化学热处理技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] 李泉华编著. 热处理技术 400 问解析. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [16] 潘邻主编. 化学热处理应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [17] [联邦德国] R. 迦太基, 菲合编著. 渗氮和氮碳共渗. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [18] [日] 大和久重雄著. 热处理 150 问. 杨佩璋, 梁国明译. 北京: 北京科学技术出版社, 1986.
- [19] 钟华仁编著. 热处理质量控制. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [20] 李志章主编. 钢的性能与热处理. 杭州: 浙江大学出版社, 1988.
- [21] [前苏联] 约·盖勒著. 工具钢. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [22] [前苏联] 拉赫金 Ю М, 拉赫斯塔德 Аг 主编. 机械加工过程中的热处理手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [23] 方博武编著. 受控喷丸与残余应力理论. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.
- [24] 孙希泰等编著. 材料表面强化技术. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [25] 沈国良编著. 喷丸清理技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [26] 黄守伦主编. 实用化学热处理与表面强化技术. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [27] 热处理手册编委会编. 热处理手册: 第三卷. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [28] 孟凡杰, 黄国靖编著. 热处理设备. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [29] 曾祥模主编. 热处理炉. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
- [30] 熊剑主编. 国外热处理新技术. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [31] 王吉勇等编著. 热处理炉. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [32] 刘仁家编著. 真空热处理与设备. 北京: 宇航出版社, 1984.
- [33] 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, 2002.
- [34] 王国佐, 王万智编著. 钢的化学热处理. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
- [35] 热处理工艺学编写组编. 热处理工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [36] 江西省机械工业局技术情报站等编写. 简明热处理手册. 南昌: 江西人民出版社, 1978.
- [37] [日] 吕戊辰著. 表面加工技术. 张凤翊, 傅文华译. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984.
- [38] 赵德寅, 王大伦编著. 汽车零件金相分析. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [39] 朱荆璞主编. 金属表面强化技术. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [40] 热处理手册编委会编. 热处理手册: 第二卷. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [41] 孙智, 江利, 应鹏展编著. 失效分析——基础与应用. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [42] [日] 日本热处理技术协会编著. 热处理指南: 上. 刘文泉等译. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [43] 宋涛, 顾军主编. 金属热处理工. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [44] 樊东黎, 徐跃明等编著. 热处理工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [45] 姚禄年编著. 钢热处理变形的控制. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [46] 朱培瑜编著. 常见零件热处理变形与控制. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [47] 姚善长编著. 钢件的热处理变形及控制. 兰州: 甘肃人民出版社, 1979.
- [48] 简明热处理手册编写组编. 简明热处理手册. 北京: 北京人民出版社, 1980.
- [49] [日] 大和久重雄编著. 热处理108招秘诀. 杨义雄编译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [50] [日] 大和久重雄著. JIS 热处理技术. 栾淑芳译. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [51] 刘民治, 钟明勋编著. 失效分析的思路与诊断. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [52] 郭丽波主编. 热处理技术操作要领图解. 济南: 山东科学技术出版社, 2005.
- [53] 许大维, 冯志军, 徐慧之, 编著. 细长零件的热处理. 北京: 机械工业出版社, 1990.

- [54] 简明热处理手册编写组编. 简明热处理手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [55] 夏期成编著. 钢件淬火变形的分析和控制方法. 太原: 山西人民出版社, 1984.
- [56] 秦启泰编著. 应用热处理. 北京: 金盾出版社, 1997.
- [57] 王万智, 唐弄娣编著. 钢的渗碳. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [58] 董世柱, 唐殿福主编. 热处理工实际操作手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2006.
- [59] 国家机械工业委员会编. 高级热处理工工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [60] 顾应安, 林约利编著. 简明热处理工手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
- [61] 钢的热处理裂纹和变形编写组编. 钢的热处理裂纹和变形. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [62] 吴元微主编. 热处理工: 中级. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [63] 蔡珣编著. 表面工程技术工艺方法 400 种. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [64] 汪浩, 宁海霞编著. 金属热处理. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [65] 机床零件热处理编写组编. 机床零件热处理. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [66] 钢铁热处理编写组编. 钢铁热处理. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [67] 郭铮匀译. 钢的氮化. 北京: 兵器工业出版社, 1979.
- [68] 郭耕三编著. 高速钢及其热处理. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [69] 孙一唐编著. 工具钢及其热处理. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [70] 史玉芳编著. 热处理工. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [71] 董铁有译. 汽车构造: 发动机. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [72] 徐修炎, 王仁东, 周志光等编著. 钢铁件热加工技术及质量控制. 成都: 四川科学技术出版社, 1986.

欢迎订购冶金与金属类图书

书号	书名	开本	装订	定价/元
00677	石化装置寿命预测与失效分析工程实例	16	平	48
00448	金属热处理 300 问	大 32	平	28
00362	铜合金及其应用	16	平	48
00121	汽车关键零件热处理技术	大 32	平	38
9936	材料成形检测技术	16	平	29
9930	钢铁冶金 600 问	32	平	28
9869	金属材料及其成形性能	16	平	28
9563	粉体材料成形设备与模具设计	16	平	39
9549	耐热镁合金	B5	精	75
9551	块体非晶合金	B5	假精	
9541	铜回收、再生与加工技术	B5	平	48
8929	金属强韧化原理与应用	大 32	平	35
8661	钢铁零件制造与热处理 100 例	大 32	平	28
8577	铝加工生产技术 500 问	大 32	平	45
8437	实用轻金属材料手册	大 32	平	38
8198	一维铜锌铝纳米复合材料	大 32	平	29
9677	铜冶炼工艺	大 32	平	22
8492	铜冶炼技术(引进版)	大 32	平	35
9198	金属材料先进制备技术	16	平	35
7183	固体物理导论(翻译原著第八版)	16	平	58
4183	有色金属——冶金、材料、再生与环保	16	平	70
5465	不锈钢焊接冶金	B5	平	40
6408	钛与钛合金	B5	平	58
7659	镁冶炼与镁合金熔炼技术	16	平	35
6987	变形镁合金	B5	精	50
5483	镁合金	B5	精	66
6499	钢铁热处理实用技术	大 32	平	20
6641	材料表面强化技术	16	平	55
5435	特种粉体	16	平	65
7658	有色金属熔炼与铸锭	B5	平	35
7689	金属爆炸复合与物理冶金	大 32	平	35
	金属表面技术丛书			
7055	水溶液沉积技术	大 32	平	20
6976	表面熔融凝固强化技术——热喷涂与堆焊技术	大 32	平	35
7752	表面淬火技术	大 32	平	22
8274	化学热处理技术	大 32	平	35
8105	金属材料焊接基础	大 32	平	38
9746	钢铁制品表面着色技术	大 32	平	28
8174	高氮钢和不锈钢——生产、性能与应用	大 32	平	32
9126	特殊钢缺陷分析与对策	大 32	平	28

邮购电话：010-64518888

邮购地址：北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社邮购科（100011）

详情及相关图书信息请浏览：<http://www.cip.com.cn>

注：如有写书意愿，欢迎与责编联系：丁尚林 010-64519279 email: dsl@cip.com.cn