

实用焊接技术丛书

# 表面堆焊与热喷涂技术

王娟 等编著

55  
4  
1



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

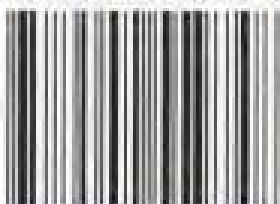
## 实用焊接技术丛书

特种焊接技术及应用	38元
钎焊技术及应用	23元
焊接材料的选用	44元
异种难焊材料的焊接及应用	42元
切割技术及应用	38元
复合材料的焊接	待出版
表面堆焊与热喷涂技术	39元
气体保护焊工艺及应用	待出版

## 其他焊接技术图书

低合金调质高强度钢焊接及工程应用	25元
不锈钢及耐蚀耐热合金焊接100问	17元
电焊条选用指南 第三版	44元
焊丝选用指南	37元
特殊及难焊材料的焊接	48元
低合金钢焊接及工程应用	50元
焊接材料、工艺及设备手册	130元
焊接材料实用基础知识	32元
过程设备焊接	27元

ISBN 7-5025-5974-4



9 787502 559748 >

ISBN 7-5025-5974-4/TG·11 定价: 39.00元

销售分类建议: 机械/焊接技术

实用焊接技术丛书

# 表面堆焊与热喷涂技术

王 娟 等编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

表面堆焊与热喷涂技术/王娟等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2004. 7  
(实用焊接技术丛书)  
ISBN 7-5025-5974-4

I. 表… II. 王… III. ①堆焊②热喷涂  
IV. ①TG455②TG174. 442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 071592 号

---

实用焊接技术丛书  
**表面堆焊与热喷涂技术**  
王娟等编著

责任编辑: 任文斗  
文字编辑: 韩庆利  
责任校对: 顾淑云 战河红  
封面设计: 潘峰

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982530  
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销  
北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 456 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5974-4/TG·11

定 价: 39.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换



# 前 言

随着科学技术的日益进步，各种产品、机械装备正向大型化、高效率、高参数的方向发展，对产品的可靠性和使用性能要求越来越高。材料表面堆焊及热喷涂作为焊接技术的分支，是提高产品和设备性能、延长使用寿命的有效技术手段。堆焊及热喷涂技术目前大量应用于机械制造、冶金、电力、矿山、建筑、石油化工等产业部门。

堆焊合金和热喷涂材料十分广泛，除了金属和合金外，还有陶瓷、塑料、无机非金属及复合材料等。因此，通过堆焊和热喷涂技术可以使零件表面获得耐磨、耐热、耐蚀、耐高温、润滑、绝缘等各种特殊性能。例如汽车发动机的重要零件——曲轴，在工作过程中，当磨损超过允许的极限时，如果采用喷涂法进行修复，不仅可以恢复原来的尺寸，而且其耐磨性远远大于新曲轴。本书对工程中常用的表面堆焊与热喷涂方法、设备、工艺及应用等作了简明阐述，特别是根据工程结构材料表面使用性能的要求，突出了表面堆焊与热喷涂的工艺特点和应用，给出了具体的工艺参数、相关技术数据及针对一些典型工程结构产品的堆焊与热喷涂的应用实例，可以指导实际应用，使表面堆焊和热喷涂技术在我国工农业生产及经济建设中发挥更大的作用。

本书力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。书中内容选用了一些表面堆焊及热喷涂新工艺和成功的经验，书中数据大多选自近几年的技术资料，反映了当前表面堆焊与喷涂技术的最新应用现状。本书主要供从事与焊接技术、表面工程相关的技术人员、管理人员和操作人员使用，也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。

本书由山东大学李亚江教授审阅，而且在编写过程中得到李亚江教授的悉心指导，在此特致谢意。此外，向书中所引用文献的作者致以衷心的感谢。

其他写作人员还有：陈茂爱、孙俊生、刘鹏、张永兰、王芳、刘克俭、刘强、高进强、刘如伟、赵越、沈孝芹、郭国林、马海军、王福学、何卓宁、张燕、黄海啸、杨富涛等。

限于作者水平有限，书中难免出现错误或不当之处，恳请广大读者批评指正。

王 娟

2004年6月20日

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 堆焊分类及应用现状 .....	1
1.1.1 堆焊的分类 .....	1
1.1.2 堆焊的应用现状及前景 .....	2
1.2 热喷涂工艺方法及应用 .....	4
1.2.1 热喷涂工艺方法 .....	4
1.2.2 热喷涂应用现状及前景 .....	6
<b>第 2 章 金属表面磨损与腐蚀</b> .....	9
2.1 金属表面的磨损 .....	9
2.1.1 金属磨损的概念 .....	9
2.1.2 影响表面磨损的因素.....	10
2.1.3 常见的磨损形式.....	11
2.2 金属表面的腐蚀.....	23
2.2.1 金属腐蚀的概念及分类.....	23
2.2.2 金属表面常见的腐蚀.....	24
<b>第 3 章 堆焊合金</b> .....	30
3.1 堆焊的特点及用途.....	30
3.1.1 堆焊的特点.....	30
3.1.2 堆焊的用途.....	30
3.2 堆焊合金的类型及特点.....	31
3.2.1 堆焊合金的类型.....	31
3.2.2 堆焊金属的合金过渡.....	40
3.2.3 堆焊合金的应用特点.....	43
3.3 堆焊方法及工艺特点.....	46
3.3.1 几种常用的堆焊方法.....	46
3.3.2 常用堆焊工艺的比较.....	48
3.3.3 堆焊工艺方法的选择.....	50
3.4 堆焊合金的成分及特性.....	51
3.4.1 堆焊焊条.....	51
3.4.2 堆焊焊丝、焊带.....	53
3.4.3 堆焊焊剂.....	62
3.5 堆焊合金的选用.....	65
3.5.1 堆焊合金的选用原则.....	66
3.5.2 堆焊合金的选择步骤.....	66
3.5.3 堆焊焊条的选用.....	67

3.5.4	堆焊焊丝、焊剂的选用	67
3.5.5	堆焊合金的耐磨性评价	88
<b>第4章</b>	<b>手工电弧堆焊</b>	<b>91</b>
4.1	手工电弧堆焊的特点及应用	91
4.1.1	手工电弧堆焊的特点	91
4.1.2	手工电弧堆焊的应用范围	91
4.2	手工电弧堆焊设备及工艺	92
4.2.1	电弧堆焊设备的组成及技术参数	92
4.2.2	手工电弧堆焊工艺	99
4.2.3	堆焊质量及常见缺陷的预防措施	103
4.3	手工电弧堆焊应用实例	105
4.3.1	汽车、拖拉机零件的电弧堆焊	105
4.3.2	阀门密封面的电弧堆焊	107
4.3.3	热锻模及铸铁冷冲模的电弧堆焊	110
4.3.4	高速钢刀具的电弧堆焊	114
4.3.5	水轮机叶片的堆焊修复	115
4.3.6	工程机械结构件的电弧堆焊	116
<b>第5章</b>	<b>氧-乙炔火焰堆焊</b>	<b>119</b>
5.1	氧-乙炔火焰堆焊特点及装置	119
5.1.1	氧-乙炔火焰堆焊的特点	119
5.1.2	堆焊装置及技术参数	122
5.2	氧-乙炔火焰堆焊工艺	130
5.2.1	堆焊前的准备	130
5.2.2	堆焊工艺参数	131
5.3	氧-乙炔火焰堆焊应用实例	132
5.3.1	钴基合金的氧-乙炔堆焊	132
5.3.2	镍基合金的氧-乙炔堆焊	135
5.3.3	铜合金的氧-乙炔堆焊	137
5.3.4	不锈钢阀座的堆焊	138
5.3.5	氧-乙炔堆焊轴瓦合金	139
<b>第6章</b>	<b>自动化堆焊工艺</b>	<b>140</b>
6.1	自动化堆焊的工艺特点	140
6.1.1	堆焊过程自动化的概念	140
6.1.2	自动化堆焊方法的工艺比较	141
6.2	自动埋弧堆焊	143
6.2.1	埋弧堆焊的分类及特点	143
6.2.2	埋弧堆焊材料	147
6.2.3	埋弧堆焊工艺及参数	147
6.2.4	埋弧堆焊实例	156
6.3	气体保护电弧堆焊	168

6.3.1	钨极氩弧堆焊 .....	168
6.3.2	熔化极气体保护电弧堆焊 .....	170
6.3.3	自保护电弧堆焊 .....	172
6.4	等离子弧堆焊 .....	174
6.4.1	等离子弧堆焊的特点 .....	174
6.4.2	等离子弧堆焊方法及材料 .....	176
6.4.3	等离子弧堆焊设备、附件及工艺参数 .....	178
6.4.4	等离子弧堆焊实例 .....	182
<b>第7章</b>	<b>热喷涂方法及设备</b> .....	<b>187</b>
7.1	热喷涂的特点及分类 .....	187
7.1.1	热喷涂的特点 .....	187
7.1.2	热喷涂方法的分类 .....	188
7.2	热喷涂方法 .....	190
7.2.1	火焰喷涂 .....	190
7.2.2	电弧喷涂 .....	191
7.2.3	等离子弧喷涂 .....	192
7.2.4	特种喷涂 .....	193
7.3	热喷涂设备 .....	195
7.3.1	热喷涂设备的组成 .....	195
7.3.2	热喷涂设备的技术参数 .....	200
<b>第8章</b>	<b>热喷涂材料</b> .....	<b>205</b>
8.1	热喷涂材料的分类及特性 .....	205
8.1.1	分类方法 .....	205
8.1.2	热喷涂用丝材 .....	208
8.1.3	热喷涂用合金粉末 .....	210
8.2	热喷涂材料的选用 .....	218
8.2.1	选用原则 .....	218
8.2.2	常用的热喷涂材料 .....	219
8.2.3	热喷涂用气体 .....	225
<b>第9章</b>	<b>热喷涂工艺</b> .....	<b>228</b>
9.1	工件表面预处理 .....	228
9.1.1	表面净化及预加工 .....	228
9.1.2	粗化处理 .....	230
9.1.3	黏结底层 .....	235
9.1.4	特殊材料的表面预处理 .....	236
9.2	热喷涂工艺参数的选用 .....	236
9.2.1	喷涂工艺的特点及主要参数 .....	236
9.2.2	气体火焰喷涂工艺参数 .....	240
9.2.3	电弧喷涂工艺参数 .....	241
9.2.4	等离子弧喷涂工艺参数 .....	242

9.2.5	氧-乙炔火焰喷焊工艺	244
9.3	涂层后处理及质量检测	249
9.3.1	涂层后处理	249
9.3.2	涂层的机械加工	251
9.3.3	涂层的缺陷及防止措施	253
9.4	热喷涂工艺的应用实例	254
9.4.1	水闸门火焰线材喷涂工艺	254
9.4.2	主轴轴颈及球罐火焰粉末喷涂工艺	254
9.4.3	葡萄酒罐内壁火焰喷涂塑料工艺	256
9.4.4	发动机曲轴电弧喷涂工艺	256
9.4.5	发动机叶片等离子弧喷涂工艺	257
9.4.6	高压平板阀闸喷焊工艺	258
<b>第10章</b>	<b>喷涂层性能及应用</b>	<b>260</b>
10.1	喷涂层的性能检测	260
10.1.1	涂层性能检测的目的	260
10.1.2	涂层的力学性能测定	260
10.1.3	涂层的耐磨、耐蚀性试验	265
10.1.4	涂层的高温性能试验	268
10.1.5	涂层的气孔率和透气性	269
10.1.6	涂层的其他性能测定	271
10.2	热喷涂层的应用	272
10.2.1	耐磨涂层的应用	272
10.2.2	耐腐蚀涂层的应用	275
10.2.3	抗高温涂层的应用	276
10.2.4	其他涂层的应用	276
10.3	热喷涂安全与防护	277
10.3.1	热喷涂安全技术	277
10.3.2	热喷涂防护	280
<b>参考文献</b>		<b>284</b>

# 第 1 章 概 述

机械零件大多数是用金属材料制造的，在使用过程中会发生磨损；由于大气的影响还会产生化学和电化学的作用，导致零部件的金属表面被腐蚀。有时两种现象同时发生，称为磨蚀。随着现代工业的发展，机械零部件经常处于异常复杂和苛刻的条件下工作，大量的机械装备往往因磨损、腐蚀或磨蚀而报废。这就要求在高温高压、承受较大载荷以及氧化、腐蚀等工作条件下的机械装备表面具有良好的耐磨、耐腐蚀、耐高温和抗氧化等性能。而堆焊和热喷涂技术是提高机械零部件表面性能的重要途径之一。

## 1.1 堆焊分类及应用现状

### 1.1.1 堆焊的分类

堆焊是焊接的一个分支，是金属晶内结合的一种熔化焊接方法。但它与一般焊接不同，不是为了连接零件，而是用焊接的方法，在零件的表面堆焊一层或数层具有一定性能材料的工艺过程。其目的在于修复零件或增加零件表面耐磨、耐热、耐蚀等方面的性能。因此，堆焊具有一般焊接方法的特点，但又有其特殊性。堆焊与其他焊接方法的比较见表 1.1。

表 1.1 堆焊与其他焊接方法的比较

焊接方法	应用目的	金属间结合方式	所属范围	熔合比(稀释率)
一般焊接方法	连接不可拆卸的零件	晶内结合	各种焊接	较大
堆焊	增加零件表面的特殊性能	晶内结合	熔焊的一个分支	较小

堆焊既然是熔焊，因此凡是属于熔焊的方法都可用于堆焊。堆焊方法的发展也随着生产发展的需要和科技进步而发展，目前已有很多种堆焊方法。按实现堆焊的条件，常用堆焊方法的分类如图 1.1 所示。

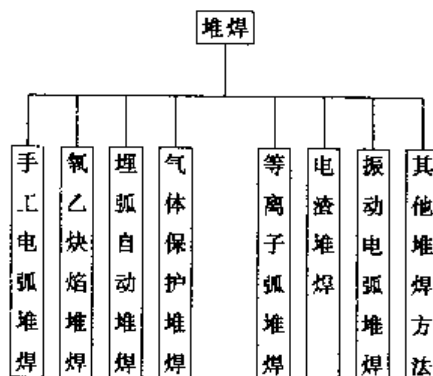


图 1.1 常用堆焊方法的分类

目前应用最为广泛的是手工电弧堆焊和氧-乙炔火焰堆焊。随着焊接材料的发展和工艺方法的改进，手工电弧堆焊应用范围更加广泛。如采用酸性药皮的焊条可以大大改善堆焊的工艺性能，降低粉尘含量，有利于改善焊工的工作条件；应用手工电弧熔化自溶性合金粉末，可获得熔深浅、表面光整、性能优异的堆焊层。

氧-乙炔火焰堆焊火焰温度低，堆焊后可保持复合材料中硬质合金的原有性能，是目前耐磨场合机械零件堆焊常采用的工艺方法。例如，堆焊炼铁工业中高炉料钟零件可使寿命提高5倍。

振动电弧堆焊是采用细焊丝并使其连续振动的焊接方法，能在小电流下保证堆焊过程的稳定性，因此使零件受热较小，热影响区较小，能获得薄而平整的、硬度较高的堆焊合金层，在机械零件修复中得到了广泛应用。特别是在汽车、拖拉机修理中应用比较广泛。但由于生产率低、堆焊层耐磨性一般、修复零件时的抗疲劳性能下降，因此对于重要的机械零件的修复应用受到一定的限制。

高频感应堆焊是靠高频电流加热熔化堆焊材料而形成堆焊层的方法。高频堆焊时，加热温度略高于堆焊材料的熔化温度，略低于基体金属的熔化温度。这样既可使零件的受热小、变形小，又能使堆焊合金与基体金属获得良好的冶金结合。高频感应堆焊层的厚度为0.1~2mm，并且具有操作简便、熔深浅、生产率高等优点，因此在机械零件的耐磨场合得到广泛的应用。

随着科技的发展及精密产品的需求，还发展了等离子弧等高能密度热源的粉末堆焊技术。等离子弧堆焊是利用等离子弧（等离子焰）高温加热的一种熔化堆焊方法，它的实质仍然是一种电弧堆焊。但与一般电弧不同之处在于，它是一种经过压缩而成的等离子弧。等离子弧热量集中，温度极高，弧柱中心温度可达15 000~33 000℃。因此，等离子弧堆焊具有堆焊层性能好、工件熔深浅、堆焊层稀释率低、成形规则、加工余量小等一系列优点，且易于实现机械化和自动化，因而是一种很有发展前途的堆焊工艺。

激光堆焊可以实现热输入的准确控制，涂层厚度大，热畸变小，成分和稀释率可控性好，可以获得组织致密、性能优越的堆焊层，因而成为国内外研究者的研究热点，近十几年来得到了迅速发展。电子束堆焊，其能源利用率很高，可达30%以上。基体的加热不受金属蒸气的影响，熔敷金属冷却速度快，熔敷层的耐磨性大大提高。但激光设备、电子束设备一次性投资昂贵，运行费用高。

### 1.1.2 堆焊的应用现状及前景

在实际的金属堆焊过程中，工件是否能够获得满足要求的堆焊层有着主要的实践性指导意义。几种基体金属的堆焊适用性见表1.2。

堆焊技术作为焊接领域中的一个重要分支，就其应用范围而言，它广泛应用于汽车、拖拉机、冶金机械、矿山机械、煤矿机械、动力机械、石油化工设备、建筑设备、运输设备以及工具模具及金属工件的制造与维修中。堆焊技术的应用领域见表1.3。

表 1.2 几种基体金属的堆焊适用性

基体金属类型	堆焊适用性
碳当量 $C_{eq} \leq 0.4\%$ 的低、中碳钢及低合金钢	易于堆焊，除厚大件外，一般不进行预热和焊后热处理
碳当量 $C_{eq} \geq 0.4\%$ 的中、高碳钢	可以堆焊，但要焊前退火，焊接时需预热、焊后缓冷、回火
纯镍	容易堆焊，但用氩弧堆焊较好
镍铬不锈钢	0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、1Cr18Ni11Nb 等镍铬不锈钢易于堆焊
含钛不锈钢	1Cr8Ni9Ti 等不锈钢宜用氩弧堆焊，不宜用氧-乙炔火焰堆焊
铁素体类不锈钢	不宜采用堆焊工艺。堆焊时易引起裂纹和晶粒长大，需严格控制预热温度和层间温度

续表

基体金属类型	堆焊适用性
马氏体类不锈钢	不宜采用堆焊工艺。堆焊时有淬火倾向,热处理过的零件堆焊前应退火,堆焊中要严格控制预热温度和层间温度,焊后要立即回火
高锰钢	可以堆焊。但应注意堆焊层碳、锰含量以及冷却速度。宜断续焊,堆焊后需做水韧处理
镍基合金	易堆焊。但堆焊前要预热,堆焊后应消除应力退火
工具钢、模具钢	经热处理的工具、模具堆焊前应退火,堆焊时预热,并要特别注意层间温度的控制。堆焊后应立即退火
铸铁	对于小件可用氧乙炔火焰堆焊,焊后缓冷退火,大件堆焊时应预热,尽量避免多层焊

注: 碳当量  $C_{eq}$  一般按公式  $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$  (%) 计算。

表 1.3 堆焊技术的应用领域

领域	零部件	堆焊合金	堆焊层性能
机械制造	阀门密封面	镍基、铁基合金	耐蚀、耐磨
	犁铧	高铬铸铁合金	耐磨
	混砂机刮板	镍基合金	耐磨
	螺旋送粉杆	铁基合金	耐磨
	曲轴修复	铁基合金、高碳钢	耐磨
	剪刀片	铁基合金	耐磨
	离合器推板	镍基合金	耐磨
	齿轮、凸轮	铁基合金	耐磨
	冷拔钢管内模	铁基合金	耐磨
	热切边模具	钴基合金	高温耐磨
水压机工作缸塞柱	铁基合金	耐蚀、耐磨	
石油、煤炭	裂化装置泵	高铬铸铁合金	耐磨
	钻杆接头	高铬铸铁合金	耐磨
	刮板输煤机中部槽板	高铬铸铁合金	耐磨
	固液泵叶轮	高铬铸铁合金	耐磨
交通运输	内燃机排气阀	钴基合金等	耐磨
轻工	玻璃模具	镍基合金	耐磨
纺织	细纱机成形凸轮	镍基合金	耐磨

目前,轧辊堆焊在堆焊领域中已占有很大比重,几乎所有的大、中型钢厂都有轧辊堆焊能力。许多科研单位、焊接材料公司等都在致力于研究生产有关轧辊堆焊的材料、设备和工艺。仅现有的用于轧辊堆焊的材料就有几十种。例如,30CrMnSi、40CrMn 等低合金钢,由于合金含量低,所以具有良好的塑性、韧性和抗裂性,在恢复轧辊尺寸和打底层方面具有重要的作用;3Cr2W8、3Cr5Mn2MoSi 等热作模具钢,具有良好的耐磨性和耐热疲劳性能,已广泛应用于轧机、板带及各种类型轧机的开环轧辊的堆焊;Cr18Ni8Mn6、Cr16Ni8Mn6、Cr20Ni10Mn6 等奥氏体加工硬化不锈钢,由于加工硬化效果显著,在使用过程中硬度大大



增加，加之它的热稳定性和抗氧化性均较高，因此，在深孔轧辊的孔型堆焊中取得了很好的效果。

模具作为机械制造业的重要装备，采用堆焊技术进行模具修复及预保护在国内外取得了显著的经济效益。模具钢具有较高的碳和合金元素含量，堆焊时往往需要先堆焊过渡层。目前常用的过渡层材料有 00Cr24Ni13，该材料适用于 400℃ 以下作业的淬火敏感性钢种。同时，国外开发的具有这种功能的过渡层材料有瑞士的 ToTIG690、英国的 METROD309S92 以及日本的 DW-309L 等。对使用温度高、堆焊难度更大的模具，常采用镍基过渡材料。国内在堆焊基体为 5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8 的锻模时，常采用 10Mn2 和 08Mn2Si 等材料作为过渡层。

随着堆焊技术的进步和堆焊材料的开发应用，采用马氏体钢堆焊丝材、CrNiWMoNb 堆焊合金作为表面工作层，修复压铸模，可以大大提高其耐热疲劳性，使用寿命延长；修复断裂模具，可保证足够的力学性能；在塑料成形模具上进行堆焊，可以获得具有良好耐蚀、耐磨和优异的镜面加工性能。

堆焊不仅可以修复旧的金属零件，而且可以在金属工件表面形成复合层，使其具有特殊的性能，从而达到延长工件使用寿命、降低成本和改进工件设计的效果。据统计，用于修复旧零件的堆焊合金量占堆焊合金总量的 72.2%。例如，堆焊旧轧辊的费用仅是新轧辊的 30% 左右，而使用寿命却比新轧辊高。因此，广泛采用堆焊工艺修复旧零件，对节约材料、节省资金、弥补配件短缺、缩短制造周期等具有重要的意义。

采用堆焊技术制造机械零件时，不仅可发挥零件的综合技术性能和金属材料的工作潜力，还能节约大量的贵重合金。例如，一般热锻模采用 5CrMnMo 或 5CrNiMo 等合金钢整体模制造，而我国有的单位已成功应用 45Mn2 铸钢作为热锻模基体、采用电渣堆焊合金材料来制造，从而大量节约了贵重的 Ni、Mo 等合金元素。又如，我国成功采用了高频堆焊农机犁铧，从而使农机具的生产迈进了一大步。因此，合理地采用并推广堆焊技术具有重大的经济意义。

另外，随着计算机技术的不断发展，为了提高及稳定堆焊质量，国外已开始建立堆焊专家系统，如德国建立的堆焊专家系统，可根据零件磨损程度和磨损形式及母材成分来确定母材是否适宜堆焊、是否需要过渡层，并能够选择堆焊材料和确定堆焊工艺。这有利于指导操作人员制定较佳的堆焊工艺参数，促进堆焊技术的继续发展与堆焊质量的不断提高，进而扩大堆焊工艺的应用范围。

## 1.2 热喷涂工艺方法及应用

### 1.2.1 热喷涂工艺方法

热喷涂工艺是将熔融状态的喷涂材料，通过高速气流，使其雾化，喷射在被净化及粗化的零件表面上，形成喷涂层的一种表面加工方法。热喷涂工艺过程示意图 1.2。

喷涂合金颗粒通过受热加速后，撞击到基体表面形成涂层的过程中，熔融状态的或高塑性状的粉末颗粒，以一定的飞行速度撞击在基体上与基体相互作用，是形成涂层的重要阶段。

当熔融颗粒以一定的速度撞击到基体表面的瞬间，颗粒先发生变形，并从碰撞点沿径向朝四周流动。同时，由于熔融颗粒和基体间的温度梯度极大，颗粒将会迅速冷却（称为“淬冷”）。当第一层颗粒正在被“淬冷”时，第二层颗粒又被喷到新的基体表面（第一层颗粒）

上。这个过程是不平衡的，因为通过基体已经把第一层颗粒的内表面的热量传导走了。第一层颗粒的外表面又被第二层熔融颗粒和焰流或电弧所加热，碰撞在已经黏附于基体表面的第一层颗粒上并变形。随着塑性颗粒大量重叠式连续沉积，逐渐形成具有层状结构的涂层。

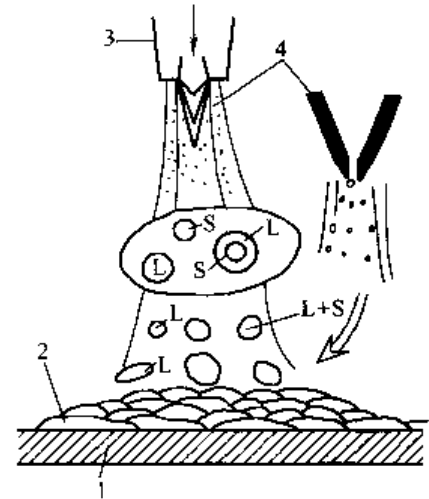


图 1.2 热喷涂工艺过程示意  
1—基体；2—涂层；3—热源；4—热喷涂材料；  
L—熔体；S—固体

涂层与基体的结合、涂层自身颗粒之间的结合，主要是以机械结合为主，同时存在冶金结合。影响涂层结合强度的因素很多，最主要的是工艺方法、喷涂前基体表面预处理的质量、预热温度及热喷涂工艺参数的选择等因素。

根据热喷涂热源及涂层材料的种类和形式，热喷涂工艺方法可分为火焰线材喷涂（包括火焰棒材喷涂）、火焰粉末喷涂、火焰爆炸喷涂（简称爆炸喷涂）、电弧喷涂、等离子喷涂以及脉冲放电线材爆炸喷涂（简称线爆喷涂）等。它们所利用的热能形式有燃烧火焰、爆炸火焰、电弧、低温等离子体焰流和电阻热等。目前还正在从事激光喷涂和电子束喷涂的深入研究。

热喷涂工艺方法的特性见表 1.4。

表 1.4 热喷涂工艺方法的特性

工艺方法	气喷涂、喷熔					电能喷涂			
	燃烧式				爆炸喷涂	电弧喷涂	线爆喷涂	等离子喷涂	
	线材喷涂	棒材喷涂	粉末喷涂	粉末喷熔					
工作气体	氧气和燃气(如乙炔、氢气等)					氧气和乙炔	—	—	氦、氩等
热源	燃烧火焰					爆炸燃烧火焰	电弧	电容放电能量	等离子焰流
喷涂颗粒加速力源	压缩空气等			燃烧火焰		热压力波	压缩空气	放电爆炸液	焰流
材料	形状	线材	棒材	粉末		粉末	线材	线材	粉末
	种类	Al、Zn、Cu、Mo、Ni、Ni-Cr 合金、不锈钢、黄铜、青铜等	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 和 Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等陶瓷材料	Ni 基、Co 基和 Fe 基自熔合金、Cu 基合金、镍包铝、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等	自熔合金或自熔合金中加部分陶瓷材料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 和 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等陶瓷材料、Ni/Cr、Co/WC 等复合材料	Al、Zn、碳素钢、不锈钢、铅青铜合金	Mo、Ti、Ta、W、碳素钢、不锈钢、超硬质合金	Ni、Mo、Ta、W、Al、自熔合金、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等陶瓷材料、Ni/Al、Co/WC 等复合材料
结合强度 /MPa	5~10			80~100		10~20			30~70
涂层孔隙率/%	10~15			1~2		10~15			1~10

### 1.2.2 热喷涂应用现状及前景

机械产品的失效，主要有腐蚀、磨损、断裂三种形式。只这三种形式的失效每年就造成巨大损失。以腐蚀为例，每年损失达数百亿元以上。而失效一般发生在工件表面。因此，研究材料表面强化及防护技术具有重要意义，引起世界各国注意。

在电镀、热喷涂、化学热处理、化学转换膜、气相沉积、有机涂覆层等主要的表面防护及强化方法中，热喷涂技术由于具有工艺方法种类多、涂层功能强以及适用范围广等优点，在工程结构中发挥越来越大的作用，取得显著的经济效益。热喷涂技术的应用领域及主要的涂层类型见表 1.5。

表 1.5 热喷涂技术的应用领域及主要的涂层类型

应用领域	涂层类型	涂层材料
防护	阳极性防护涂层 (抗大气及浸渍腐蚀涂层)	Zn、Al、Zn-Al 合金、Al-Mg 合金
	阴极性防护涂层(抗化学腐蚀涂层)	有色金属及合金、不锈钢、塑料
	抗高温氧化涂层	镍基合金、钴基合金、氧化物陶瓷
强化	耐磨粒磨损及冲蚀磨损涂层	碳化物+金属、自熔性合金
	耐摩擦磨损涂层	Mo、Mo+合金、有色金属及合金、 自熔性合金、氧化物陶瓷
	强腐蚀介质中的耐磨涂层	自熔性合金、高合金钢、陶瓷
特殊功能	热障涂层	氧化物陶瓷
	密封涂层	金属与非金属复合材料
	热辐射涂层	氧化物复合材料
	导电屏蔽及防辐射涂层	金属
	固体润滑涂层	金属与非金属复合材料

热喷涂技术的发展是与科学技术水平以及工业生产的需要息息相关的，特别是在 20 世纪 50 年代以后，由于空间技术、航空、原子能等尖端技术的发展，对材料提出越来越高的要求，传统的工程材料和传统的加工工艺已经远远不能胜任。而热喷涂技术则可以在普通的基体材料表面上，获得具有耐磨、耐腐蚀、抗氧化、耐高温、隔热、导电、绝缘、减摩、润滑、防辐射以及其他特殊的物理、化学性能而处于优势。可以这样说，热喷涂技术正是在解决这些重大的材料科学课题中逐步确立了自己的地位。

现代工业的一个特点就是工业朝着高度自动化和高速化方向发展，这就要求各种机械零部件长期稳定工作。因此，对于新材料的要求已经不再限于那些尖端的工业部门，而且已经涉及许多工业领域。另外，世界各国普遍受到资源、能源短缺的压力，降低材料和能源的消耗已成为各国共同关心的问题。热喷涂作为一门表面强化技术，比整体提高材质的性能无疑要经济得多，而且在许多场合，由于采用了特殊涂层而降低了对部件材质的要求，使总成本有所下降。因此，热喷涂技术既可用于修复因表面损坏而报废的零件，也可用于新产品的制造以提供预防性保护，它已成为一门具有重大技术经济效益的应用技术。

热喷涂技术的应用主要表现在下述方面。

#### (1) 耐磨损

零件表面的耐磨损涂层主要是通过火焰金属线材喷涂、火焰粉末喷涂或喷焊、等离子弧

喷涂来实现。

一方面，通过热喷涂，使已磨损的零件得以修复；另一方面，由于修复后的零件还能远远超过新产品寿命，因此直接将热喷涂技术应用于新产品制造上，比旧零件损坏后的修复更有实际意义。

目前热喷涂工艺在耐磨损方面的主要应用如下。

- ① 高炉热风支管等离子喷涂镍包铝粉，寿命延长 1~3 倍。
- ② 风机主轴氧-乙炔火焰粉末喷涂修复。
- ③ 高炉风口氧-乙炔火焰及等离子弧喷涂碳化钨硬质合金，风口寿命提高 1 倍。
- ④ 汽车曲轴、车轴、机床主袖、机床导轨、模具喷涂修复。
- ⑤ 柴油机缸套等离子弧喷涂修复。
- ⑥ 各种阀门密封面等离子弧喷涂。
- ⑦ 油田钻杆氧-乙炔火焰喷涂。
- ⑧ 农用机械刀片喷焊耐磨合金。

#### (2) 防腐蚀

目前主要是应用火焰金属线材或电弧喷涂铝、锌。一般大气环境和湿度条件下，铝（或锌）涂层的保护作用能够使工程结构件保证在十几年不损坏。若涂层加封闭层，使用寿命可达 30 年，较之一般的油漆涂层寿命长出近十倍。

我国从 20 世纪 50 年代起就开始应用热喷涂工艺，在国民经济生产各行各业的耐腐蚀零部件应用中发挥了非常重要的作用。目前热喷涂工艺在防腐蚀方面的主要应用如下。

- ① 大型水闸钢闸门或其他水工结构防腐。
- ② 造纸机的烘缸喷涂。
- ③ 煤矿井下钢结构防腐。
- ④ 高压输电铁塔、电视台天线、铁路及公路桥梁、风电塔架喷铝（或锌）防腐。
- ⑤ 化工厂储罐、管道喷铝防腐、喷塑料防腐。

#### (3) 特殊功能层

由于航空航天、原子能等尖端技术的发展，对材料的某些特殊性，如耐高温、隔热、导电绝缘、防辐射等提出较高的要求。整体制作这些材料成本极高，或根本不可能，而一般传统的表面处理工艺也难以实现，但采用热喷涂技术，通过选用具有特殊功能的喷涂合金却可满足使用要求。其主要应用如下。

- ① 火焰金属线材喷铝，经扩散渗铝工艺，可获得可耐 900℃ 高温抗氧化涂层。
- ② 等离子弧喷涂或爆炸喷涂制备耐高温及防辐射、导电涂层。
- ③ 喷铝、铜制作电磁屏蔽涂层。
- ④ 非金属表面金属化。

#### (4) 其他应用

近年来，热喷涂应用领域日益扩大。在生物工程、模具制造、喷射成形等方面也开始应用。主要应用举例如下。

- ① 钛合金表面等离子喷涂制造生物相容性良好的人造骨及关节。
- ② 火焰金属线材喷涂制作塑料模具。
- ③ 火焰喷射成形制作复杂零件。

从热喷涂技术的应用角度看，在过去主要用于工艺美术的装饰性涂层或者喷锌和铝为主

的防腐蚀涂层和喷涂钢等来修复一些常用的机械零件。而现在热喷涂技术修复的零件已经有了新的意义，即由于涂层材料优异的性能，而使所修复的旧零件使用寿命在许多情况下已经超过了新产品。这就促使热喷涂技术直接在新产品上的应用，提高预防性保护的比重日益增长。因此，从发展观点看，热喷涂技术必将会改变许多新产品的结构和设计。

今后，随着社会的不断发展，喷涂技术的日益进步，热喷涂技术在包括各个尖端技术部门在内的许多工业领域中应用的深度和广度还会继续发展。

## 第 2 章 金属表面磨损与腐蚀

金属表面的磨损与腐蚀是一种很普遍的现象，凡是使用金属材料的领域都不同程度地存在着磨损和腐蚀问题。金属表面的磨损与腐蚀都是比较复杂的过程，它涉及机械、材料、物理、化学等许多学科。金属表面的磨损与腐蚀形式有多种，影响因素也很多，包括工作条件、润滑状态、环境因素、材料成分与性能、零件表面状态等，其中任何因素的改变都可能使磨损与腐蚀形式发生变化。减小金属表面的磨损与腐蚀应全面考虑零件本身的工作状况，选用合适的堆焊合金与耐磨、耐蚀喷涂合金。

### 2.1 金属表面的磨损

#### 2.1.1 金属磨损的概念

金属磨损是由于接触面间的相互机械作用造成金属表面不断损失或破坏的现象。如果在腐蚀和较为恶劣的工作环境下，将会加剧金属表面的磨损。磨损是一个复杂的微观破坏过程，它是金属材料本身与它相互作用的材料以及工作环境综合作用的结果。因此，磨损实际上反映了一个系统的性能。

金属磨损的评定方法主要有三种：金属材料的磨损量、耐磨性和冲蚀磨损率。

##### (1) 磨损量

金属材料磨损量包括长度磨损量、体积磨损量和质量磨损量。长度磨损量是指磨损过程中，由于磨损面造成的零件表面尺寸的改变量。在实际设备的磨损监测中常常使用长度磨损量。体积磨损量和质量磨损量是指磨损过程中由于磨损而造成的零件体积或质量的改变量。试验研究中，往往首先测量试样的质量磨损量，然后再换算成体积磨损量进行比较和研究。

另外，还有其他一些磨损量的评定指标，如磨损率、磨损速度等。各种磨损量的评定指标和意义见表 2.1。

表 2.1 各种磨损量的评定指标和意义

类别	名称	意义
磨损量	长度磨损量 体积磨损量 质量磨损量	磨损过程中的长度改变量 磨损过程中的体积改变量 磨损过程中的质量改变量
磨损率	长度磨损率 体积磨损率 质量磨损率	单位时间或单位滑动距离的磨损长度 单位时间或单位滑动距离的磨损体积 单位时间或单位滑动距离的磨损质量
磨损速度	长度磨损速度 体积磨损速度 质量磨损速度	单位工作量下的磨损长度 单位工作量下的磨损体积 单位工作量下的磨损质量

##### (2) 耐磨性

金属材料的耐磨性是指在一定工作条件下材料抵抗磨损的能力。材料耐磨性分为材料的相对耐磨性和绝对耐磨性两种。

材料的相对耐磨性是指两种材料 A 与 B 在相同的磨损条件下磨损量的比值，其中材料 A 作为参考试样。

$$\text{相对耐磨性} = \text{参考试样磨损量} / \text{试验材料磨损量}$$

这里的磨损量一般是指体积磨损量。特殊情况下也可使用其他磨损量。相对耐磨性仅表示所试验的材料比参考材料的耐磨性相差多少倍。

绝对耐磨性（或称耐磨性）通常用磨损量或磨损率的倒数表示，使用较多的是体积磨损量或体积磨损率的倒数。

### (3) 冲蚀磨损率

在冲蚀磨损中一般用冲蚀磨损率来度量磨损。

$$\text{冲蚀磨损率} = \text{材料的冲蚀磨损量(质量或体积)} / \text{造成该磨损量所用的磨料量}$$

冲蚀磨损率必须在稳态磨损中测量，因为在其他磨损阶段中所测量的冲蚀磨损率将有较大的差别。

磨损量、材料的耐磨性和冲蚀磨损率都是在一定的试验条件下的相对指标，不同的试验条件下所得到的值是无可比较的。

## 2.1.2 影响表面磨损的因素

### (1) 硬度

金属材料的耐磨性可以由材料的硬度来衡量。这主要是因为材料的硬度反映了材料表面抵抗磨损的性能。因此，导致材料硬度提高的金属组织，一般也能提高材料的耐磨性。但是由于材料的成分和组织有差别，材料可能不适应某一种特定的磨损条件，硬度大小不能成为比较材料耐磨性的充分基础。不同硬度的材料的耐磨性比较见表 2.2。

表 2.2 不同硬度的材料的耐磨性比较

材 料	硬度 HV	相对耐磨性
碳钢和低合金钢	含碳量 0.37%	500 1 <sup>①</sup>
		350 0.87
	含碳量 0.43%	600 1.30
		500 1.02
	含碳量 0.74%	820 1.90
		650 1.30
合金钢	奥氏体锰钢	500 1.15
		200 1.30
	热模具钢	600 1.91
	700 1.74	
表面覆盖耐磨合金	2.5%C, 33%Cr, 13%W, 余为钴	700 3.95

① 参考材料的相对耐磨性为 1。

### (2) 晶体结构和晶体的互溶性

密排六方点阵金属材料，即使摩擦面在非常干净的情况下，其摩擦系数仍为 0.2~0.4，磨损率也较低。钴就属于这种典型的材料，因此钴可以作为硬度高的耐磨合金的重要组成元素。

冶金上互溶性较差的一对金属摩擦副可以获得较低的摩擦系数和磨损率。如与钢形成一对摩擦副的材料在铁中的溶解度很小，或者这种材料是一种金属间化合物，则这对摩擦副表面的耐磨性就较好。

### (3) 温度

温度主要是通过对硬度、晶体结构的转变、互溶性以及增加氧化速率的影响来改变金属材料的耐磨性。

金属的硬度通常随温度的上升而下降，所以温度升高，磨损率增加。有些摩擦零件（如高温轴承）就要求采用热硬性高的材料。材料中应含有钴、铬、钨和钼等合金元素。

摩擦副的互溶性可以看作是温度的函数。如果温度上升，则材料易于互溶，影响材料的磨损率。此外，温度的升高对增加氧化速率起着促进作用，而且对生成氧化物的种类有显著的影响，所以对摩擦和金属的磨损性能也有重要作用。

#### 2.1.3 常见的磨损形式

金属表面常见的磨损形式有黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、冲击磨损和微动磨损等。

##### (1) 黏着磨损

黏着磨损是指金属与金属之间相对移动时，由于两接触面凹凸不平，在摩擦过程中接触面积上产生较高的应力，使得接触面上发生塑性流动，造成接触点间的黏着或焊合，这种黏着或焊合的接触点称为接点。此时，材料就会从一个表面转移到另一个表面上去，有时又会转移回原来的表面，如此继续摩擦下去，一部分转移的材料就会因加工硬化、疲劳、氧化或其他原因而脱离出来，形成游离的磨屑，造成零件表面材料的耗失，形成黏着磨损。

黏着磨损有氧化磨损（轻微磨损）、金属磨损和擦伤三种形式。

黏着磨损较多发生于润滑不良或不进行润滑的滑动摩擦零件中。如轴、轴承、履带轮、制动轮、阀门密封面、切削刀具、模具等零件工作中，常常会出现这种磨损形式。它一般要求堆焊合金有较小的摩擦系数，堆焊合金的硬度和耐磨性应与接触界面相互摩擦的母材相近。

影响黏着磨损的因素主要有以下几方面。

##### 1) 载荷

黏着磨损量在一定范围内与载荷成正比，见图 2.1。但是当载荷超过一定的临界值后，接触界面之间的磨损就会转化为严重磨损。

##### 2) 滑动速度

当压力固定不变时，黏着磨损随着滑动速度的增加而增大，到达某一极大值后，又随着滑动速度的增加而减小。滑动速度增加是造成界面温度升高的一个原因，用黄铜圆销销在钢上的试验表明：在重载荷下，当表面滑动速度从 0.01cm/s 增加到 100cm/s 时，磨损率稳定下降；超过 100cm/s 后，磨损率又逐渐增加。若圆销加以水冷装置，则磨损率随滑动速度的增加而继续下降。若使黄铜圆销绝热，则其磨损率比未绝热的和水冷的都大，如图 2.2 所示。

高速滑动会造成金属过高的加热和熔化，特别是熔点和热传导率较低的金属。例如，在 20N 载荷以下，接触面积  $0.36\text{cm}^2$ 、滑动速度 6 500cm/s 时，铜在钢上或铜在碳化钨上滑动时，

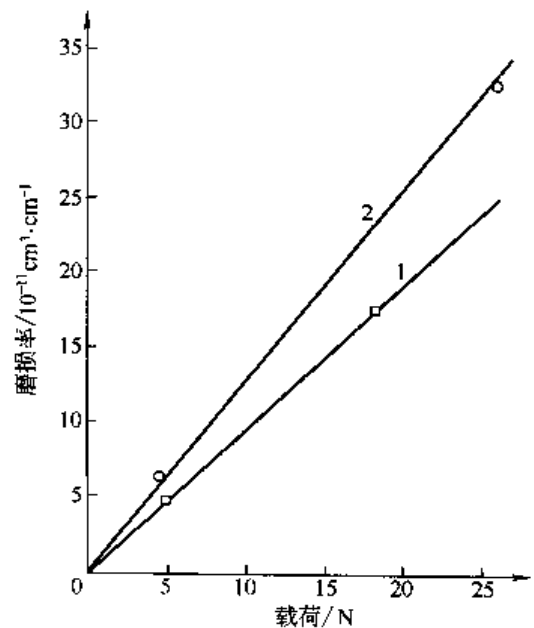


图 2.1 黏着磨损率与载荷之间的关系（钢对钢）  
1—0.079cm 直径圆柱；2—120°圆锥



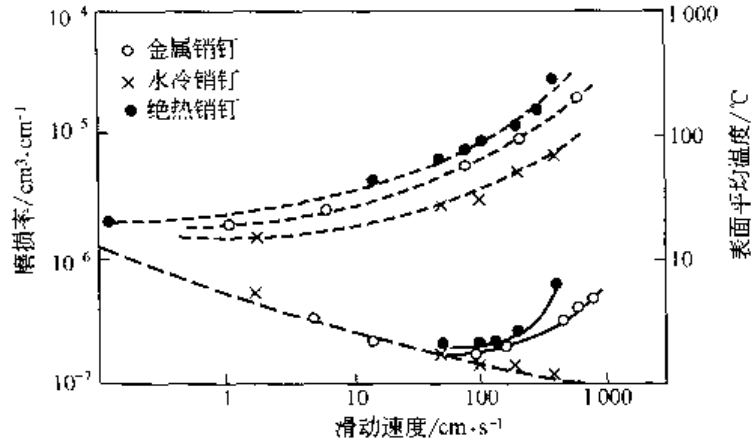


图 2.2 磨损率及表面温度与滑动速度之间的关系  
磨损率—图下部一组曲线；表面温度—图上部一组曲线

其磨损率在高速时都下降；但镍对镍滑动时，结果却相反。

### 3) 环境温度

零件在工作过程中，当摩擦表面温度升到一定高度时，轻者破坏油膜，重者使材料回火软化，甚至退火或熔化。摩擦表面的温度是通过以下三方面对磨损过程产生影响的。

① 金属材料的硬度 金属的硬度通常和温度有关，温度越高，则硬度越低。在无其他影响时，微凸体发生黏着的可能性与磨损率随硬度的降低而增加。

② 表面氧化膜的形成 大多数金属在一般大气中都会在表面覆盖上一层氧化膜。氧化膜的厚度和形式取决于形成时的温度。在低温下，磨损率很高，表面黏着较多；但在高温下，磨损率大大降低，而且表面变得光滑发亮。

③ 润滑剂的性能 如用油润滑的零件，温度升高后，油可能变质、氧化和分解。因此，超过一定的温度极限，油的氧化和分解就会使它的润滑性能发生不可逆的变化，不能起到减轻磨损的作用。

温度还会引起相变、再结晶等，使磨损率发生极大的变化。

### 4) 材料性能

① 配对材料的互溶性 互溶性较大的材料，当微凸体相互作用时，特别是在真空中，容易形成强固的接点，使黏着倾向增大。相同金属或相同晶格类型、晶格间距，电子密度和电化学性能相近的金属，则互溶性较大，容易发生黏着磨损。

② 材料的塑性和脆性 脆性材料比塑性材料的抗黏着能力高。塑性材料的断裂常发生在离表面较深处，磨损下来的颗粒较大；而脆性材料破坏处离表面较浅，磨屑呈细片状。

③ 相结构 多相金属比单相金属黏着的可能性较小，金属化合物相比单相固溶体的黏着可能性较小，金属与非金属材料组成的摩擦副比金属与金属组成的摩擦副黏着的可能性一般较小。

④ 晶体结构 密排六方晶体结构的金属比面心立方的金属抗黏着性能好。

⑤ 硬度 硬度高的金属比硬度低的金属不容易黏着，当接触应力大于金属硬度的  $1/3$  时，很多金属将由轻微磨损转变为严重磨损。

### 5) 接触面状态

一般来说，降低金属的表面粗糙度会提高抗黏着磨损作用，但过分降低表面粗糙度可能使润滑油在表面上的储存能力下降，反而容易造成黏着磨损。在生产中，金属与金属接触的

零件，常采用润滑剂来减少摩擦与磨损。

金属接触表面的表面膜在一定程度上能够防止摩擦副金属的直接接触，减少摩擦。在真空中由于接点的生长没有受到表面膜的阻碍，因此接触的两金属表面容易发生焊合现象，导致摩擦系数增大。

① 氧化膜 大多数金属表面都覆有一层氧化膜，经切削加工后表面洁净的金属，暴露在空气中后会立即覆盖上一单分子层的氧化膜。除非在很小的载荷条件下，氧化膜并不能防止金属的互相接触，特别在切向力的作用下，氧化膜容易发生破裂。但在轻载荷下，氧化膜能减轻摩擦与磨损，如图 2.3 所示。

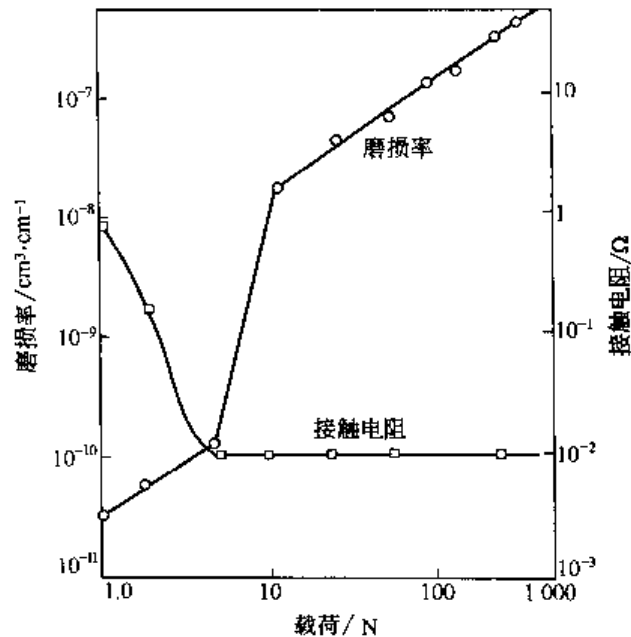


图 2.3 不同载荷下磨损率与接触电阻的变化曲线

较小载荷下，接触电阻高，磨屑很细，且主要由金属氧化物组成，面摩擦表面被磨得很光，即所谓轻微磨损。当载荷增大后，氧化膜的阻碍作用减弱，这时接触电阻低，微凸体间接点增加，焊合面积增大，磨屑中有较粗的金属粒出现，且磨损表面粗糙，造成严重磨损。

氧化膜的性质对金属表面的磨损也有重要的影响。脆而硬的氧化膜不能防止严重磨损，反而造成磨损量的增大；而坚韧并能牢固地黏附在基体上的氧化膜，则有利于减少摩擦和磨损。

② 固体润滑膜 将固体润滑剂（石墨、二硫化钼等）粘在摩擦表面，或将它们制成粉末放在承受轻载的两表面之间，这时，它们能黏附在金属表面上，最后形成一层黏附很牢的覆盖层。固体润滑剂还可以制成粉末渗入液体润滑剂中，从而使摩擦而最后获得固体润滑膜。固体润滑膜能减少金属接触面之间的黏着磨损，特别是在高真空中或高温中效果更加显著。

③ 其他表面膜或表面涂层 在硬金属表面涂上一层软金属，也可减少磨损。如利用堆焊、喷涂、表面热处理、表面化学处理等方法，使表面涂上一层比基体金属耐磨性更好的涂层都能提高耐磨性。

## (2) 磨料磨损

当硬质颗粒或表面粗糙物体（称为磨料，如岩石、矿石、砂子、土壤、硬金属屑、砂

布、砂轮等)在压力的作用下,对金属表面进行显微切削,即产生了磨料磨损。它是一种工件表面损伤中常见的磨损形式。按应力状态不同,磨料磨损分为下列三种形式。

① 凿削式磨料磨损 磨料以很大的冲击力切入金属表面,并切削下大颗粒金属形成严重的沟槽。如挖掘机斗齿、破碎机颚板等。这种带有严重冲击的磨损条件,常采用具有高韧性的耐磨堆焊材料,其中奥氏体高锰钢堆焊合金应用最广,有时也在表面堆焊网格状的高铬合金铸铁或马氏体铸铁堆焊合金,以进一步提高其耐磨性。

② 高应力磨料磨损 高应力磨料磨损是在两个零件表面夹有磨料,并在很大的压应力作用下相互摩擦产生的。由于磨料与金属的接触点上有很高的压应力,磨料被碾碎,同时引起金属表面的显微划伤或使金属表面的硬化相(如粗大碳化物)剥落。如球磨机的磨球和衬板、挖掘机的链条和链轮等属于这类磨料磨损。

③ 低应力磨料磨损 低应力磨料磨损是固态磨料以某种速度,较自由地与所接触的金属表面做相对运动引起的。这类磨损的特点是,作用在磨料上的应力较低,对零件表面的冲击力很小,一般的磨损形态为表面擦伤,材料次表面变形较小。此外,人们把含有磨料的气体或液体流冲击金属表面所引起的磨损,称为气相或液相磨料磨损,它们也属于低应力磨料磨损。如推土机铲刃、农机犁铧、泥浆泵叶轮、粉尘排除设备等。

影响磨料磨损的主要因素如下。

#### 1) 材料类型

① 材料的成分 金属材料的化学成分和热处理状态决定了它们的组织。以铁基材料为例,耐磨性与化学成分、微观组织有关。对一定成分的材料,它的耐磨性和硬度在一定范围内呈线性关系。珠光体钢的耐磨性随着碳含量增加而增加,但碳含量对过共析钢的耐磨性影响较小。相同硬度的马氏体钢的耐磨性随着碳含量增加而增加。形成碳化物的合金元素,一般会使钢的耐磨性有所提高。强化铁素体基体的合金元素,一般对磨料磨损的影响并不显著。

② 材料的微观组织 对于钢来说,基体组织对耐磨性的影响顺序是:铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体逐次递增。在硬度相近的情况下,等温转变的下贝氏体组织耐磨性优于回火马氏体组织。

软金属间化合物质点(共格或很轻微的不共格)在塑变时易被位错剪断,而硬金属间化合物(非共格)在变形时则位错绕过。与过饱和固溶体相比较,软金属间化合物虽然能提高屈服强度,但对耐磨性则无明显影响。

碳化物的硬度对材料耐磨性也有重要影响。磨料条件不变时,若碳化物比磨料软,则材料的耐磨性有随碳化物的硬度提高而提高的趋向;当磨料较碳化物软时,则耐磨性随碳化物的尺寸增加而增加。碳化物体积大以及碳化物与基体之间的界面能低都有利于提高材料的耐磨性。

③ 材料的力学性能 材料的表面硬度对磨损的影响较大,如图 2.4 所示。材料的相对耐磨料磨损性与硬度成正比。但是加工硬化虽然能增加钢的硬度,却不能提高耐磨性。

材料的抗拉强度与耐磨性之间的关系见图 2.5。

#### 2) 载荷

随着载荷的增加,材料的体积磨损量也逐渐增大。对于脆性材料,因存在有一临界压入深度,若超过此深度后,则裂纹容易形成与扩展,使磨损量增大,因此载荷在某些条件下和磨料磨损量并不一定成线性关系。

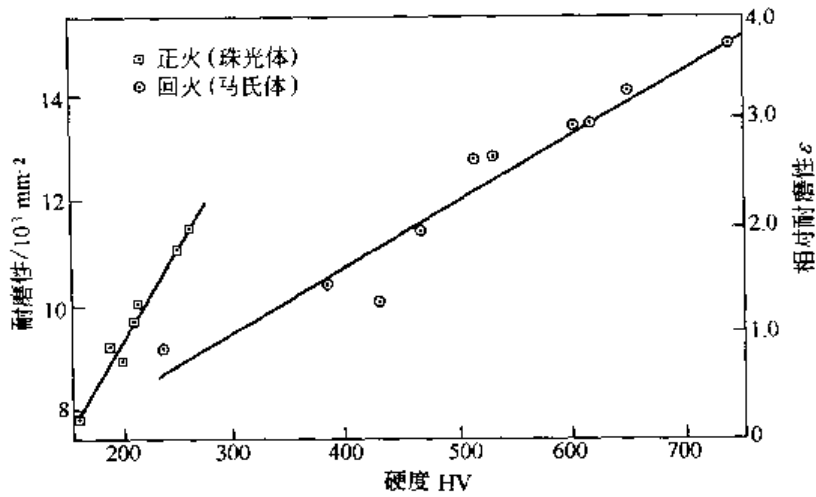


图 2.4 材料耐磨性与硬度的关系

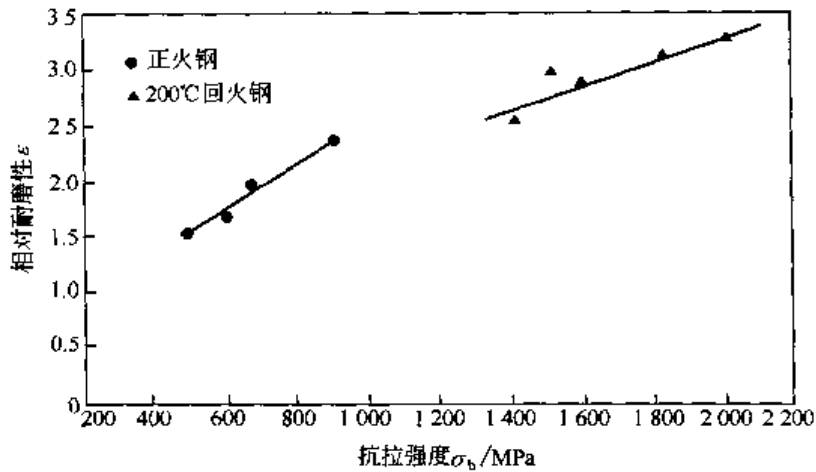


图 2.5 材料耐磨性与抗拉强度的关系

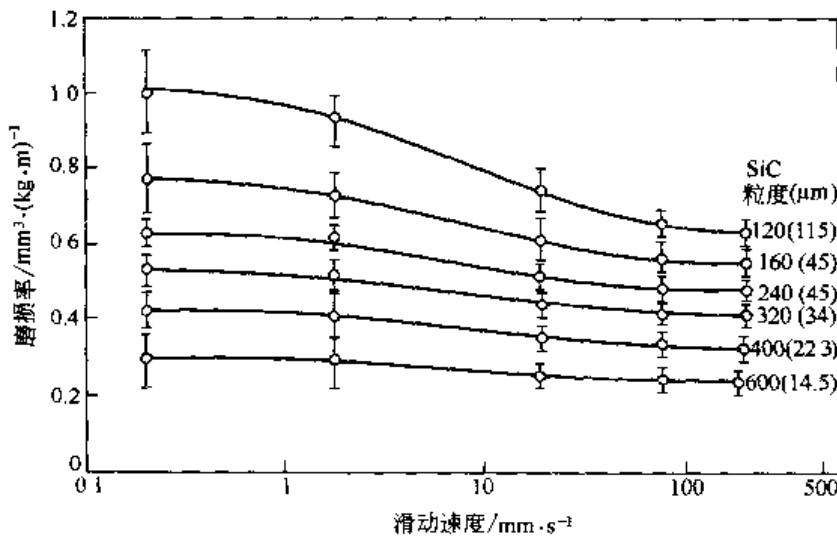


图 2.6 退火钢在不同粒度的 SiC 磨粒上的磨损率与滑动速度之间的关系

### 3) 滑动距离

若磨料在滑动过程中条件不变，如磨料不变钝或碎裂等，则磨损量和滑动距离一般成正比。

### 4) 滑动速度

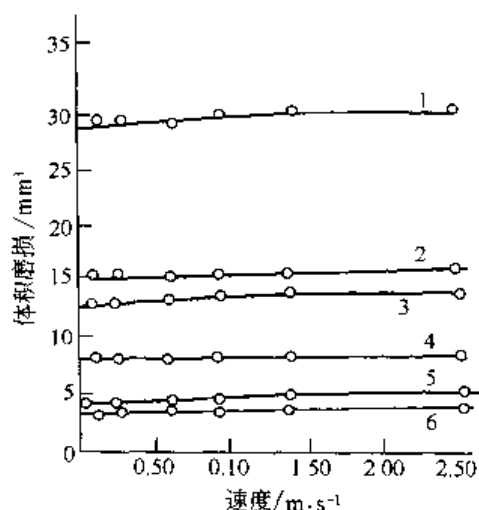


图 2.7 退火钢在不同磨粒上的磨损体积与滑动速度之间的关系

1—铝, 300 $\mu\text{m}$ ; 2—铝, 70 $\mu\text{m}$ ; 3—黄铜, 300 $\mu\text{m}$ ; 4—黄铜, 70 $\mu\text{m}$ ; 5—铁, 300 $\mu\text{m}$ ; 6—铁, 70 $\mu\text{m}$

材料的磨损量一般是随着磨粒直径的增大而增大, 达到某一临界尺寸时就不再增大, 见图 2.8。这种影响对非金属材料来说, 比金属材料更大一些。若载荷增大, 粒径超过临界尺寸后, 磨粒大小对磨损仍有影响, 如图 2.9 所示。

材料的耐磨性不仅决定于材料的硬度  $H_m$ , 且更主要的是决定于材料硬度  $H_m$  和磨料硬度  $H_a$  的比值。当  $H_m/H_a \leq 0.5 \sim 0.8$  时为硬磨料磨损, 增加材料的硬度对耐磨性影响不大。当  $H_m/H_a \geq 0.5 \sim 0.8$  时为软磨料磨损, 增加材料的硬度  $H_m$ , 便会迅速提高其耐磨性。钢经过不同温度回火处理后可以得到不同硬度, 它在硬度为 2 800HV 的碳化硅磨料中的耐磨性如图 2.10 中的曲线 ABC 所示, 但在 1 000HV 的石英砂磨料中磨损时其耐磨性曲线如图 2.10 中的曲线 ABD 所示。即  $H_m/H_a$  达到 0.5 后耐磨性迅速提高。

磨料的其他性能如韧性、压碎强度也影响着磨损率。磨料受压缩力后, 先是边缘尖锐处受力发生少量的塑性流动, 接着就断裂, 塑性变形和断裂都使磨料变质。磨料压碎后形成较小的切削刃面, 能增加磨料磨损性。因此磨粒断裂比边缘尖角处塑性变形后剥落对磨料的磨损性影响较大。由塑性变形而衰退变质的细磨料, 因表面变钝成为弹性接触, 不易形成沟槽。

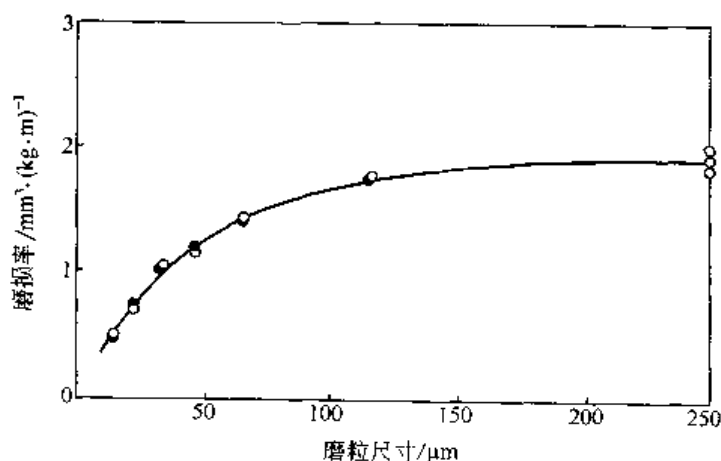


图 2.8 磨料尺寸与磨损率之间的关系

滑动速度对磨料磨损的影响是比较复杂的。在 100mm/s 以下, 随着滑动速度的增加而磨损率有所降低; 滑动速度超过 100mm/s 以上, 对磨料磨损的影响很小, 见图 2.6。但在较高速度范围内, 随着滑动速度的增加, 体积磨损先略有增加, 然后达到一定值。并且粗大的磨粒对磨损的影响较大, 如图 2.7 所示。

### 5) 磨料

磨料是影响磨料磨损的重要因素, 包括磨料的形状、大小、硬度、状态以及强度等。尖锐的磨料容易造成金属表面的微观切削, 增加磨损量。面圆钝的磨料大多数产生犁沟和塑性变形, 且在自由状态时还容易滚动, 产生一次切屑的可能性很小。

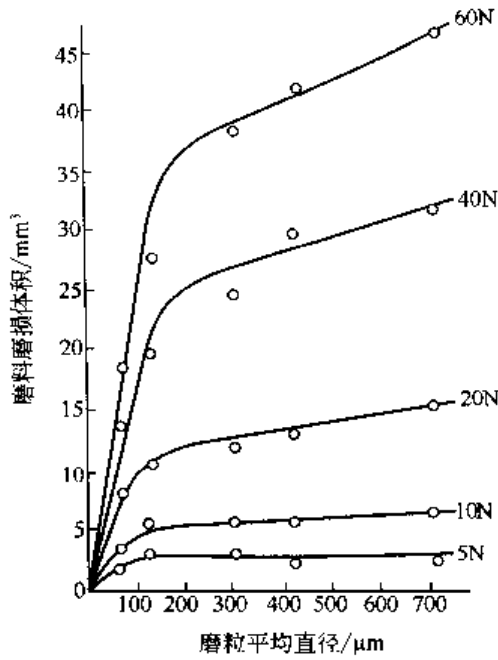


图 2.9 不同载荷下磨粒尺寸和磨损量之间的关系

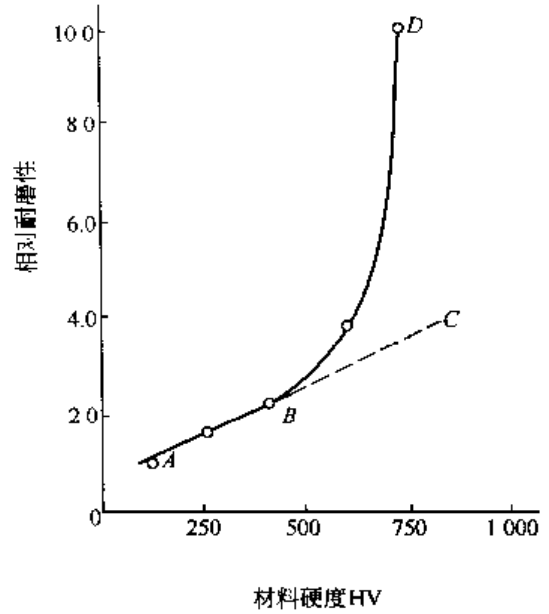


图 2.10 淬火+回火钢在两种不同硬度磨料磨损下的耐磨性比较

ABC—用碳化硅为磨料；ABD—用石英砂为磨料

因此，磨料碎裂和变质后，使表面材料的磨损量增加还是减少，则决定于磨料的性质和磨损条件。

#### 6) 腐蚀环境和水汽的作用

在采矿和选矿等机械中，存在有液体介质的作用，对零件有磨损和腐蚀的双重作用，使磨损量增加。

水汽的存在，也能使磨损速度增加。例如，水汽的存在能使铝表面变形、玻璃的断裂增快、钢的腐蚀加速等。

#### (3) 疲劳磨损

摩擦副表面相对滚动或滑动时，由于承受反复的加热和冷却作用，使金属产生裂纹，从而造成金属表面破坏的现象。如热轧辊、热锻模、热铸模、装料机料斗等热加工设备或工具，工作过程中，表面都会受到一定程度的热疲劳作用。

疲劳磨损虽然存在着应力疲劳和应变疲劳之分，但对于大多数的点蚀和剥落而言，均属于应力疲劳范畴。

影响疲劳磨损的主要因素有材料本身的性质以及在工作过程中所受的残余应力。

##### 1) 材质

钢铁材料的质量，如气体含量、非金属夹杂物类型、大小、形貌和分布状态是影响疲劳磨损的重要因素。如钢中的非金属夹杂物，特别是脆性和带有棱角状的非金属夹杂物破坏了基体的连续性，在交变应力作用下，夹杂物的尖角部位应力集中，容易超过基体材料的弹性极限，并由于塑性变形导致材料加工硬化而引起显微裂纹的形成，这些因素都有加速疲劳磨损的作用。

材料的显微组织对疲劳磨损同样也有重要的影响。例如，滚珠轴承钢的马氏体组织状态及其渗碳体含量、残余碳化物的颗粒大小分布、残余奥氏体含量均对钢的抗疲劳磨损能力有

重要影响。渗碳体的抗表面磨损能力在很大程度上取决于心部硬度及渗碳层厚度。在载荷一定时，心部硬度越高，则产生疲劳裂纹的可能性越小，但不能无限制地提高心部硬度，否则韧性太低，易发生断裂。渗碳层过浅，疲劳裂纹将产生在硬化层与心部的过渡区内，容易使硬化层压碎剥落。

## 2) 硬度

一般情况下，增加硬度则会提高金属表面的抗疲劳能力，特别是齿轮的抗点蚀能力。如模数为8的齿轮，循环次数为 $10^8$ ，接触应力为1335MPa，齿轮用0.47%C的碳钢制成，感应淬火到硬度56HRC，虽在 $4 \times 10^7$ 循环次数时应力基本上无变化，但却发生了相当大的点蚀。同样的齿轮，用低合金渗碳钢制成，并淬火到62HRC，但能在1540MPa下经 $10^6$ 次循环而没有点蚀发生。但如果硬度过高，又会引起抗疲劳磨损能力下降。

## 3) 表面粗糙度

由于表面的粗糙度使接触载荷支承在很小的面积上，造成很大的接触应力。降低表面粗糙度可以有效地提高抗疲劳磨损能力。接触应力的大小不同，对粗糙度的要求也不一样，一般是接触应力较大时，要求表面粗糙度越低。另外表面硬度越高的轴承和齿轮要求表面粗糙度也越低。表面粗糙度与疲劳磨损之间的关系见表2.3。

表 2.3 表面粗糙度与疲劳磨损之间的关系

序号	接触应力/MPa	最终加工方法	平均寿命 / $10^7$ 次
1	5 140	磨削	0.45
2	4 160	磨削	0.78
3	3 700	磨削	1.25
4	5 140	抛光	0.40
5	4 160	抛光	2.02
6	3 700	抛光	5.20
7	4 160	超精研磨	1.63
8	3 700	超精研磨	4.18

## 4) 残余应力

一般情况下，表层在一定深度范围内存在有利的残余应力时，能提高接触疲劳抗力，减少疲劳磨损。表面渗碳、表面淬火、表面喷丸及滚压处理都可以使表面产生残余应力。但是也有试验表明，过高的残余应力反而会降低材料的抗疲劳磨损能力。

## (4) 腐蚀磨损

腐蚀磨损是腐蚀和磨损同时起作用的一种磨损形式。摩擦相互作用表面在液体或气体的工作环境或在润滑剂中发生化学或电化学反应，在表面形成的腐蚀产物常黏附不牢，摩擦过程中被剥落下来，而新的表面又继续和介质发生反应，这种腐蚀和磨损的重复过程，称为腐蚀磨损。

在一定条件下，腐蚀磨损往往是一种极其缓慢的磨损形式。例如，氧化磨损在轻载和低速时，磨损产物主要是细碎的氧化物，使金属磨损表面具有光滑的形貌。此时氧化物具有隔离接点的黏着，可减少摩擦力和磨损，所以通常摩擦副在空气中比在真空中的摩擦系数和磨损系数都小。但钢铁零件在含有少量水汽的空气中工作时，反应产物便由氧化物变成氢氧化物，使腐蚀加速。若空气中含有少量的二氧化硫或二氧化碳，会使腐蚀速度更快。

当腐蚀成为磨损的主要原因时，通常出现几种机制综合的磨损，各种机制之间还存在着

复杂的相互影响。如金属与金属间的摩擦，开始时可能是黏着磨损和腐蚀磨损，但由于腐蚀产物一般都具有磨料的特性，因此，会出现腐蚀磨损和磨料磨损同时存在的过程，使磨损加剧。接触应力较高时，会增加局部的腐蚀作用，形成点蚀。即腐蚀和循环应力共同作用下，比两种作用单独存在时的磨损更严重。

腐蚀磨损可分为氧化磨损与特殊介质腐蚀磨损两种。

### 1) 氧化磨损

在摩擦过程中，金属表面受空气或润滑剂中的氧的作用形成氧化膜，然后氧化物不断地被磨去而使金属表面发生损耗的现象，称为氧化磨损。

除极少数贵金属外，一般洁净金属表面与空气接触后，会立即与空气中的氧反应成为单分子层的氧化膜，以后氧化膜的厚度逐渐增加。在空气中，常温时金属表面的氧化膜是非常薄的，不致影响表面光泽。

在摩擦过程中，由于固体表面和介质间相互作用的活性增加，故形成氧化膜的速度比静态时快得多，因此在摩擦过程中被磨去的氧化膜在下一次摩擦的间歇中会迅速生长，并被继续磨去，这便是氧化磨损过程。若氧化膜相当硬，且与表面连接得很牢固，在滑动过程中不再生长或不被磨去，则可起到保护表面作用。如果氧化膜过厚，容易产生断裂，加剧磨损，因为氧化物磨屑通常以磨料形式参加磨损过程。反之，如果金属因被氧化面产生一层韧面软的易变形覆盖层，则会使磨损降低。

氧化膜的破坏速率取决于它与基体的结合强度和所作用的应力。若氧化物的体积和基体金属差不多，则氧化膜是致密的，完整、并牢固地覆盖在金属表面上。若氧化物体积比基体金属体积小，则氧化膜中出现拉应力，容易使氧化膜破裂或出现多孔疏松现象。若氧化物的体积大于基体金属的体积，则随着氧化膜的生长，氧化膜的体积不断膨胀在其内部形成平行于表面的压应力，以及垂直于表面使氧化膜脱离表面的拉应力。氧化膜越厚则内应力越大。这样就会使表面氧化膜形成裂纹或从表面脱落。另外，如表面温度发生变化，若氧化膜与基体金属膨胀系数不同，也会产生内应力而脱落。

氧化膜硬度  $H_o$  与金属硬度  $H_m$  之间的差别也会影响腐蚀磨损的速度。当  $H_o \gg H_m$  时，因基体太软，无法支承载荷，即使外力很小，氧化膜也很容易破碎。如  $Al_2O_3$  膜的硬度为 1800HV，铝的硬度为 15HV，因此受力时  $Al_2O_3$  很容易破碎，并形成极硬的磨料。

当  $H_o \approx H_m$  时，在轻微载荷作用下发生小变形时，两者同时变形，氧化膜不易脱落。如氧化铜膜硬度为 150HV，铜为 120HV。但当载荷增大，变形增大，氧化膜也易破碎。

当  $H_o$  和  $H_m$  都很高时，在载荷作用下表面变形很小，因此氧化膜不易变形，耐磨性增加。如镀硬铬，铬硬度为 900HV，而三氧化二铬的硬度约为 1000HV 左右，所以氧化膜不易磨掉，镀铬的发动机活塞环寿命就会提高。

脆性氧化膜与基体金属结合能力差容易被磨掉，若氧化膜的硬度又高，结果氧化物嵌入金属内成为磨料，对淬硬的钢都可能发生严重的磨损。反之，如韧性好而致密的氧化膜则与基体结合牢固，不易磨掉。若氧化物较软，则对另一摩擦面磨损就小。

### 2) 特殊介质中的腐蚀磨损

特殊介质中的腐蚀磨损是指工件在除氧以外的其他介质（如酸、碱、盐等）中工作，并和其发生作用形成各种产物，在摩擦中又不断被磨去的过程。腐蚀作用增加，磨损也加剧。但若在某种介质中使金属表面形成一层致密并与基体结合强度高的保护膜，则可使腐蚀磨损降低。

腐蚀磨损的速度随着介质腐蚀性的强弱、腐蚀温度的高低而变化。如柴油发动机的温度和



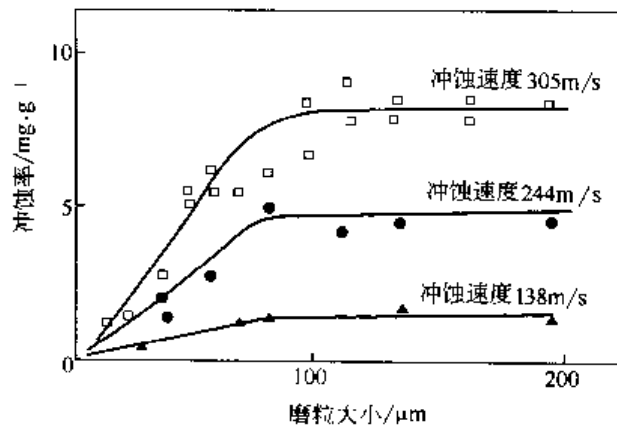
燃料中硫含量对腐蚀磨损有重要的影响。此外，空气中的水汽含量及燃烧产物中的  $\text{CO}_2$  及  $\text{NO}_2$  等对腐蚀磨损都有影响。如轴瓦材料中的铅和锡，容易被润滑油氧化所生成的有机酸所腐蚀，开始在轴瓦表面生成黑点，并逐渐扩展成为海绵状空洞，在摩擦过程中呈小块状剥落。

镍、铬、钛等金属在特殊介质作用下，易形成结合力强、结构致密的钝化膜；钨、钼在  $500^\circ\text{C}$  以上，表面会生成保护膜；因此，钨、钼是高温耐腐蚀磨损的金属，镍、铬是抗腐蚀磨损的金属。此外，由碳化钨、碳化钛等组成的硬质合金，都具有较高的耐腐蚀磨损作用。

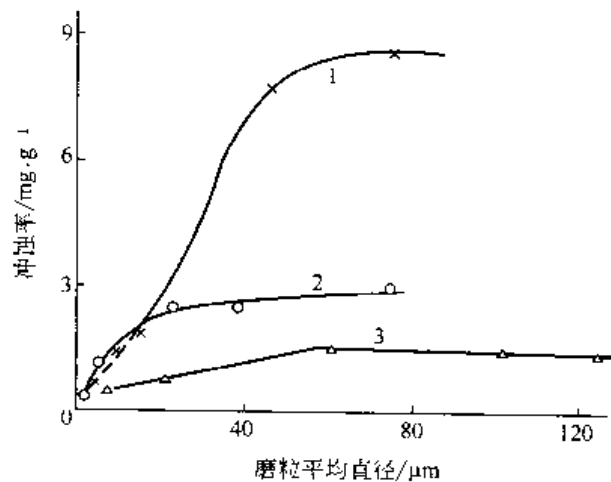
### (5) 冲击磨损

金属表面由于外来物体的连续高速度冲击面引起的磨损称为冲击磨损。其破坏过程取决于外来磨粒的大小、形状、浓度、速度和冲击角等。磨粒的尺寸对金属材料冲蚀率的影响见图 2.11。冲蚀速度对冲蚀率的影响见图 2.12。

冲击角的影响与材料类型、冲击速度等有关。在较小冲击角条件下，冲击磨损是由物体的切削作用产生的，磨损速度取决于工件表面的硬度，采用含有大量硬质相的过共晶合金，能够有效缓解这种冲击磨损；冲击角较大时，外来物体的冲撞使工件表面发生变形，从而导致剥离或凹痕，采用能够吸收较多冲击能而不产生变形或开裂的材料作堆焊合金可以减小冲击磨损。



(a) 工程合金磨粒对11%铬钢冲蚀率的影响



(b) 脆性材料磨粒对金属材料冲蚀率的影响

图 2.11 磨粒的尺寸对金属材料冲蚀率的影响

- 1 石英粒子冲击小型燃气轮机转子；
- 2 石英粒子冲击钢，速度为  $250\text{m/s}$ ，冲击角  $40^\circ$ ；
- 3  $\text{SiC}$  粒子冲击退火铝，速度为  $150\text{m/s}$ ，冲击角  $20^\circ$

### (6) 微动磨损

机械零件配合较紧的部位，在载荷和一定频率振动条件下，使零件表面产生微小滑动而引起的磨损，称为微动磨损，也可认为是疲劳磨损、黏着磨损、磨料磨损与腐蚀磨损兼而有之的综合磨损形式。如紧密配合的轴颈处、航空发动机涡轮叶片的榫头处等。

影响微动磨损的因素极多，主要包括载荷、振幅、循环次数、环境因素、材料性能以及润滑剂等，并且这些因素之间相互影响。载荷 190N 下运行  $10^6$  次时振幅对微动磨损的影响见图 2.13。

微动磨损有临界振幅存在，即在此振幅以下不会发生磨损。但临界振幅随不同材料、载荷及实验装置而不同。在振幅小于  $50\mu\text{m}$  时，低碳钢摩擦副没有任何微动磨损发生，因此可以把这个振幅称为临界振幅。

环境温度对软钢微动磨损的影响见图 2.14。较高的温度有助于减轻微动磨损。这是由于在更高温度时，氧化膜起了保护作用，其微动磨损也明显降低。但是在不同的气体中，温度对微动磨损的影响也有所不同，如图 2.15 所示。

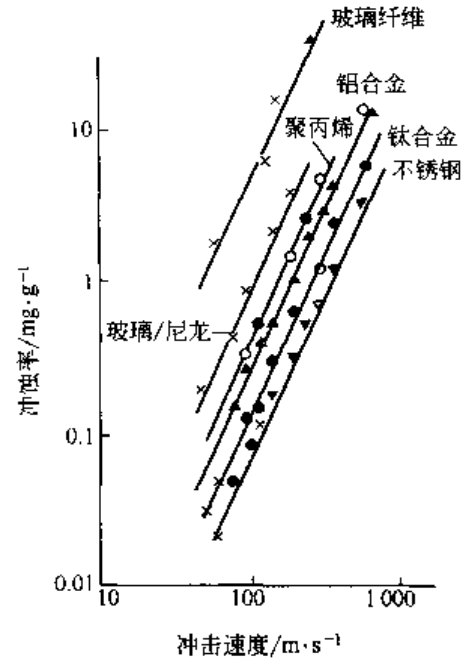


图 2.12 冲蚀速度对冲蚀率的影响  
( $125\sim 150\mu\text{m}$  石英, 冲击角  $90^\circ$ )

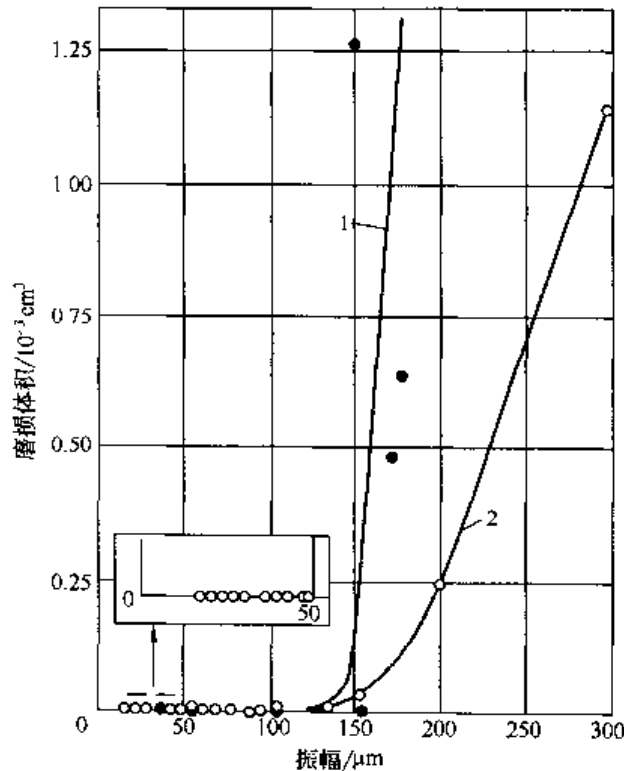


图 2.13 振幅对微动磨损的影响

(在空气中, 载荷 190N, 周期数  $10^6$  次)

1 低碳钢在铝上; 2—低碳钢在低碳钢上

微动磨损常常从黏着磨损开始，凡能抵抗黏着磨损的材料均有利于防止微动磨损。提高硬度和选择适当的配对材料都可以减小微动磨损。另外，在钢中加入 Cr、Mo、V、

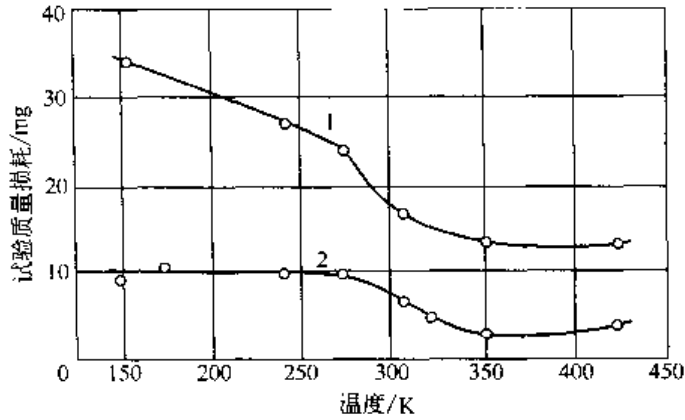


图 2.14 环境温度对软钢微动磨损的影响  
(振幅  $90\mu\text{m}$ , 压力  $36.5\text{MPa}$ , 频率  $90\text{Hz}$ )  
1—457 800 次 (14.1h); 2—67 800 次 (2.1h)

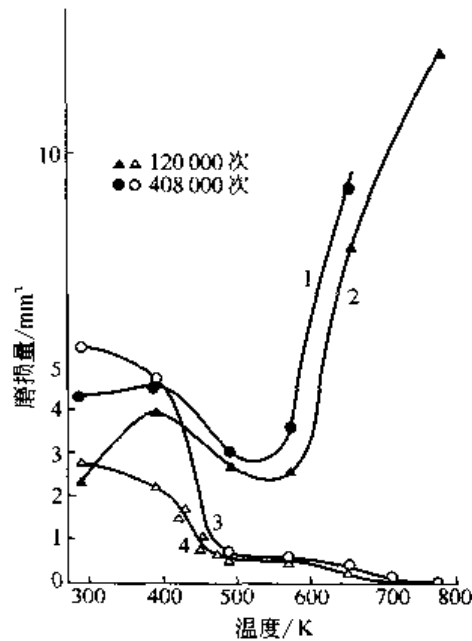


图 2.15 温度对微动磨损的影响  
1,2—在氩气中; 3,4—在空气中

P 和稀土等元素也能够改善抗微动磨损的能力。几种摩擦副的抗微动磨损能力见表 2.4。

表 2.4 几种摩擦副的抗微动磨损能力

好	中	差
塑料层压板对镀金属板	铸铁对铸铁	铝对铸铁
工具钢对工具钢	铜对铸铁	铝对不锈钢
冷轧钢对冷轧钢	黄铜对铸铁	铸铁对镀铬层
铸铁对涂硫化钨铸铁	铸铁对镀银层	塑料层压板对铸铁
铸铁对涂润滑剂铸铁	铸铁对镀铜层	酚醛树脂对不锈钢
铸铁对涂润滑剂不锈钢	铸铁对粗面铸铁	工具钢对不锈钢
铸铁与铸铁间放橡胶垫片	镁对镀铜层	镀铬层对镀铬层
		铸铁对镀锡层

## 2.2 金属表面的腐蚀

### 2.2.1 金属腐蚀的概念及分类

金属腐蚀通常被定义为金属在环境中，由于金属与环境之间所产生的化学、电化学反应或者由于物理溶解作用而引起的损坏或变质。金属腐蚀过程涉及金属学、金属物理、物理化学以及电化学中的诸多反应或相变，因此金属的腐蚀是一个较为复杂的过程。金属表面的腐蚀程度主要与金属工件本身的材料性能以及工作环境有关。金属材料的耐蚀性越差，工作过程中越容易发生腐蚀；工件所处的环境介质以及工况条件越恶劣，工件越容易被腐蚀。

金属腐蚀有多种分类方法，最常见的是按照腐蚀机理、腐蚀的破坏形式以及腐蚀环境三种分类方法。此外还可按腐蚀环境的温度分为常温腐蚀和高温腐蚀；还可把腐蚀分为湿腐蚀和干腐蚀，有液体存在时发生的为湿腐蚀，环境中没有液相或在露点以上时发生的为干腐蚀。

#### (1) 根据腐蚀机理分类

金属腐蚀根据腐蚀机理可分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀。

① 化学腐蚀 化学腐蚀是指金属表面与非电解质直接发生纯化学作用而引起的破坏。其主要特点是非电解质中的氧化剂直接与金属表面的原子相互作用而形成腐蚀产物。原子之间的传递是在金属与氧化剂中直接进行的，因而没有电流产生。金属在干燥的气体介质和不导电的液体介质（如酒精、石油）中发生的腐蚀都属于化学腐蚀。

② 电化学腐蚀 电化学腐蚀是指金属表面与离子导电的介质因发生电化学反应而产生的破坏。主要特点是其反应历程可分为两个相对独立，并且可以同时进行的过程——阴极反应和阳极反应。在腐蚀进行过程中有腐蚀电流产生。大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等都属于电化学腐蚀。

需要指出的是，有时化学腐蚀与电化学腐蚀难以明确地区分开来。例如，铁在水蒸气中一般发生电化学腐蚀，但在高温时却转化为化学腐蚀，而且很难明确找出其间的温度界限。

③ 物理腐蚀 物理腐蚀是指金属由于单纯的物理溶解作用所引起的破坏。其特点是没有化学反应产生，仅仅是物理溶解过程。

#### (2) 根据腐蚀破坏形式分类

根据腐蚀破坏形式可分为全面腐蚀和局部腐蚀。

① 全面腐蚀 全面腐蚀是指腐蚀作用以基本相同的速度在整个金属表面同时进行。当金属发生全面腐蚀时，腐蚀作用均匀地分布在金属表面上。这类腐蚀虽然可以造成损害，但相对来说其危害性没有局部腐蚀那样严重。

② 局部腐蚀 局部腐蚀是指腐蚀作用仅发生在金属的某一局部区域，其他部位基本没有发生腐蚀，或金属某一部位的腐蚀速度比其他部位的腐蚀速度快得多，呈局部破坏状态。这类腐蚀造成的损害可能比全面腐蚀更为严重。

局部腐蚀又有不同的类型，例如缝隙腐蚀、点腐蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀、磨损腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳以及电偶腐蚀等。

#### (3) 根据腐蚀环境分类

根据腐蚀环境可分为大气腐蚀、电解质溶液中的腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀、熔盐腐蚀。

① 大气腐蚀 即金属在大气以及任何潮湿气体中的腐蚀，这是最普遍的腐蚀类型，因

为绝大多数金属结构都是在大气条件下使用的。大气腐蚀是金属处于表面薄层金属电解液下的腐蚀过程。薄层电解液被氧饱和，使大气腐蚀的电化学过程中氧去极化反应易于进行( $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$ )。另外，由于阳极钝化和金属离子的水化过程困难而造成阳极极化。大气腐蚀的速度受到多种因素的影响，但主要与大气的组成、湿度和温度相关。一般工业区大气中的腐蚀速度最快。

② 电解质溶液中的腐蚀 即天然水和大部分水溶液（如酸、碱、盐水溶液）对金属结构的腐蚀。这一类腐蚀也是极为普通的腐蚀类型，例如发生在石油工业和化学工业中的大部分腐蚀，都属电解质溶液中的腐蚀。

③ 海水腐蚀 即舰船和海洋设施在海水中发生的腐蚀。海水含盐量高，且几乎含有地壳中所有自然状态存在的元素，成分极其复杂，属于腐蚀性电解质。

海水中含有较高浓度的氯离子和其他卤素离子，能阻止和破坏金属的钝化，使阳极过程容易进行。海水腐蚀是氧去极化过程，阴极过程控制着腐蚀反应的速度。另外，海水流速、海生物等也常常是影响海水腐蚀的因素。

④ 土壤腐蚀 即埋设在地下的金属结构的腐蚀。影响土壤腐蚀的主要因素是土壤性质（包括孔隙度、含水量、电阻率、酸度及含盐量等）、电流是否存在及其大小、腐蚀微生物的种类等。地下金属管道和地下电缆的腐蚀都属于土壤腐蚀。

⑤ 熔盐腐蚀 即金属与熔融盐类接触时所发生的腐蚀。例如热处理的熔盐加热炉中的盐炉电极和被处理的金属所发生的腐蚀。

### 2.2.2 金属表面常见的腐蚀

#### (1) 电化学腐蚀

金属在电解质中的腐蚀是一个电化学腐蚀过程，具有一般电化学反应的特征，即金属与电解质之间存在着一个带电的界面层。与此界面层结构有关的因素，都会显著地影响腐蚀过程的进行。电解质的化学性质、环境因素（温度、压力、流速等）、金属的特性、表面状态及其组织结构和成分的不均匀性、腐蚀产物的物理化学性质等，都对腐蚀过程有很大的影响。因此，电化学腐蚀现象是相当复杂的。例如，在潮湿的大气中桥梁、钢结构的腐蚀；在海水中海洋采油平台、舰船壳体的腐蚀；土壤中地下输油、输气管线的腐蚀以及在含酸、含盐、含碱的水溶液等工业介质中金属的腐蚀，均属于电化学腐蚀。

电化学腐蚀的实质是浸在电解质溶液中的金属表面上，形成了以金属为阳极的腐蚀电池，这主要是由于金属表面电化学不均匀性造成的。造成金属表面电化学不均匀性的主要因素有以下几方面。

① 金属表面的化学成分不均匀性。例如，铸铁中的石墨、碳钢中的渗碳体、工业纯锌中的杂质等。这些物质的电极电位都高于基体金属，因此，当金属置于电解质溶液中时，在金属表面上就形成了许多微阴极和微阳极，形成微电池，导致局部腐蚀。

② 金属组织的不均匀性。金属及合金的晶粒与界面之间，各种不同的相之间的电极电位是有差异的，因此在电解质溶液中也可能导致形成微电池而产生局部腐蚀。此外，金属及合金凝固时产生的偏析引起组织的不均匀性，也能形成腐蚀微电池。

③ 金属表面的物理状态不均匀性。当金属在机械加工过程中，由于金属各部位发生形变的不均匀性或应力的不均匀性，都可能引起局部微电池而产生腐蚀。变形较大的部分，或受力较大的部分为阳极，易遭受腐蚀。

④ 金属表面覆盖膜不完整，表面镀层有孔隙等缺陷。

## (2) 点蚀

点蚀是局部腐蚀中的一种。局部腐蚀相对全面腐蚀的特点是腐蚀仅局限或集中于金属的某一特定部位。局部腐蚀时阳极和阴极区一般可以截然分开，其位置可用肉眼或微观观察的方法加以区分和辨别。腐蚀电池中的阳极反应和腐蚀剂的还原反应可以在不同地区发生，而次生腐蚀产物又可在第三点形成。在发生点蚀的情况下，通常阳极区面积比阴极区面积要小得多，但阳极区腐蚀非常强烈，虽然金属失重不大，但带来的危害极大，如点蚀能使容器穿孔而报废。

点蚀主要集中于金属表面很小范围内，并深入到金属内部形成的蚀孔状腐蚀形态，一般是直径小而深。蚀孔的最大深度和金属平均腐蚀深度的比值，称为点蚀系数。点蚀系数越大表示点蚀越严重。

点蚀是一种破坏性和隐患较大的腐蚀形态之一，是化工生产及海洋事业中经常遇到大问题。点蚀形貌是多种多样的，随材料与腐蚀介质不同而不同，如图 2.16 所示。

### 1) 点蚀发生的条件

点蚀发生的条件主要有以下几方面。

① 点蚀多发生于表面生成钝化膜的金属材料上或表面有阴极性镀层的金属上（如碳钢表面镀锌、铜、镍等）。当这些钝化膜或阴极性镀层金属上某点发生破坏，破坏区下的金属基体与钝化膜未破坏区形成活化-钝化腐蚀电池，钝化表面为阴极而且面积比活化区大得多，腐蚀就向深处发展而形成小孔。

② 点蚀发生于有特殊离子的介质中，如不锈钢对含有卤素离子特别敏感，如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$  等。这些阴离子在合金表面不均匀吸附导致膜的不均匀破坏。

③ 点蚀发生在某一临界电位以上，该电位称为点蚀电位。

### 2) 点蚀的影响因素

影响点蚀的因素有很多，主要包括环境因素和冶金因素。

① 环境因素 是指材料所处的介质特性，如介质类型、介质浓度、介质温度以及溶液的 pH 值等。

某些材料易发生点蚀的介质是特定的，如不锈钢易在含卤族元素阴离子（ $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ ）中发生，而铜则对  $\text{SO}_4^{2-}$  更敏感。并且材料的腐蚀程度与环境温度以及介质的酸碱度有关。对于不锈钢来说，温度升高，点蚀电位降低，但对 1Cr18Ni9 钢超过 150~200℃，1Cr18Ni9Ti 和 1Cr17Ni12Mo2 钢超过 200~250℃，电位又向正方向移动。这是由于温度升高，活性点增加，参与反应的物质运动速度加快，在蚀孔内难以引起反应物积累，以及氧的溶解度也明显下降等原因造成的。

② 冶金因素 材料的耐点蚀性能主要与合金元素种类有关。在相同浓度的 NaCl 溶液中，对点蚀最不稳定的是铝，最稳定的是铬和钛。

从合金材料的组织结构来看，提高均匀性可增强其抗点蚀能力。如果钢中含硫量增加，硫化物夹杂增多，以及碳含量增多和不适当的热处理，均易产生晶界析出，这都会增加点蚀的起源位置，促进点蚀形核。反之，降低钢中 S、P、C 等杂质元素，则可以减小点蚀敏

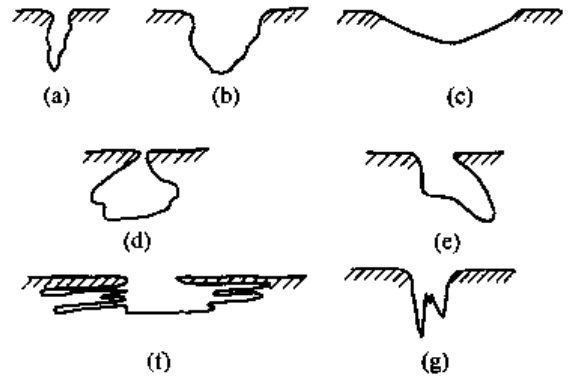


图 2.16 点蚀的各种形貌

感性。

### 3) 点蚀的防止

防止点蚀可以采取以下几种措施。

① 改善介质条件 如降低溶液中的  $\text{Cl}^-$  含量, 减少氧化剂, 降低温度, 提高介质的 pH 值等均可减少点蚀发生。

② 选用耐点蚀的合金材料 在不锈钢中可以通过添加较多的 Cr、Mo、N, 降低含碳量等方法来提高材料的抗点蚀性能。钛和钛合金有最好的抗点蚀性能。

③ 阴极保护 阴极极化使电位低于点蚀电位, 使不锈钢处于稳定钝化区。

④ 钝化处理 对合金表面进行钝化处理, 提高的材料钝态稳定性。

⑤ 使用缓蚀剂 特别在封闭系统中使用缓蚀剂最有效, 用于不锈钢的缓蚀剂有硝酸盐、铬酸盐、硫酸盐和碱, 最有效的是亚硝酸钠。但要注意缓蚀剂用量不足, 反而会加速腐蚀速度。

### (3) 晶间腐蚀

晶间腐蚀是沿着多晶体金属的晶粒边界发生的一种局部腐蚀形式。当腐蚀发生时, 在晶界及其附近产生严重的腐蚀, 而晶粒内部的腐蚀却很小。这种腐蚀的结果会使晶粒间的结合力遭到破坏, 从而使金属的强度和塑性大幅度降低。晶间腐蚀是最危险的腐蚀破坏形式之一, 它常常造成结构或设备过早地发生破坏, 而且往往是突发性的破坏, 造成各种严重损失。

许多合金都会产生晶间腐蚀。例如, 铁基合金特别是各种不锈钢、镍基合金、铝合金以及镁合金, 在一定条件下都会产生比较严重的晶间腐蚀。

#### 1) 产生条件

产生晶间腐蚀的条件大致可归纳为以下几方面。

① 金属或合金中含有少量杂质, 或者有第二相沿着晶界析出。

② 晶粒边界或第二相起着阳极的作用。

③ 要有腐蚀介质存在。

#### 2) 影响因素

影响晶间腐蚀的因素主要是合金成分、加热温度和时间。

① 合金成分 不锈钢中, 除了主要成分 Cr、Ni、C 外, 还含有 Mo、Ti、Nb 等合金元素, 它们对晶间腐蚀的作用如下。

a. 碳 奥氏体不锈钢中碳含量越高, 晶间腐蚀倾向越严重, 不仅产生晶间腐蚀倾向的加热温度和时间范围扩大, 晶间腐蚀程度也加重。而且固溶温度越高, 由于过饱和固溶碳量增多, 晶间腐蚀也越易产生。

b. 铬、镍、钼、硅 Cr、Mo 含量增加, 可降低 C 的活度, 有利于减弱晶间腐蚀倾向; 而 Ni、Si 等不易形成碳化物的元素, 会提高 C 的活度, 降低 C 在奥氏体中的溶解度, 促进了 C 的扩散及碳化物的析出, 加剧晶间腐蚀的产生。当 Cr、Ni 含量较高时, 允许增加钢中含碳量。例如, 当不锈钢中铬的质量分数从 18% 提高到 22% 时, 碳的质量分数允许从 0.02% 增加到 0.06%。

c. 钛、铌 都是强碳化物形成元素。高温时能形成稳定的碳化物  $\text{TiC}$  及  $\text{NbC}$ , 减少了碳在回火时的析出, 从而防止了铬的贫化, 降低产生晶间腐蚀的敏感性。

② 加热温度与时间 图 2.17 所示为 1Cr18Ni9 钢晶界析出  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  与晶间腐蚀倾向的关

系。由图看出，晶间腐蚀倾向与碳化物析出有关，但二者发生的温度与加热范围并不完全一致。温度高于 750℃ 时，不产生晶间腐蚀，而温度在 600~700℃ 时， $Cr_{23}C_6$  连续析出，因此，晶间腐蚀倾向最严重。当温度低于 600℃，铬和碳扩散速度随温度降低而变慢，需长时间才能产生晶间腐蚀倾向，温度低于 450℃ 时基本不产生晶间腐蚀倾向。

晶间腐蚀倾向敏感性与加热温度和时间关系的曲线称为温度-时间-敏化图，简称为 TTS 曲线。TTS 曲线与合金成分有关。图 2.18 所示为四种成分的不锈钢 TTS 曲线。由图看出，钢的最短加热时间和晶间腐蚀敏感性大小（图中画线区）都与其成分有关。

### 3) 防止措施

① 降低含碳量 一般通过重熔方式将钢中碳的质量分数降至 0.03% 以下。这样即使在 700℃ 较长时间回火也不会产生晶间腐蚀。

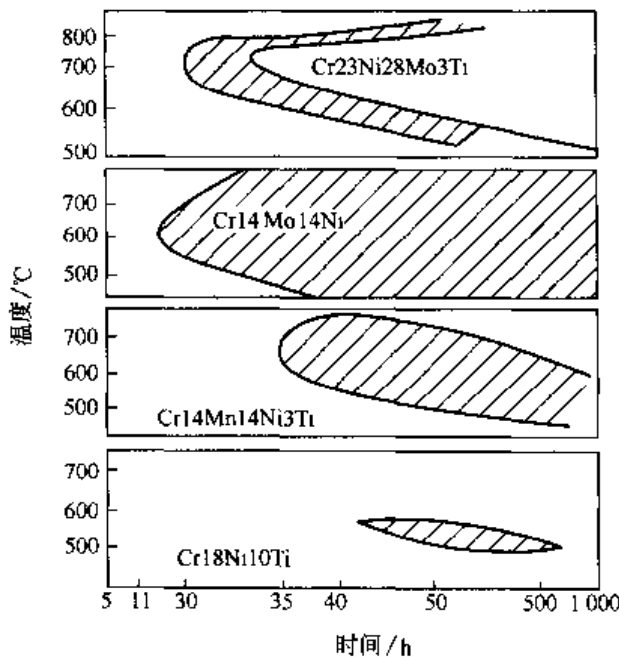


图 2.18 四种不锈钢的 TTS 曲线

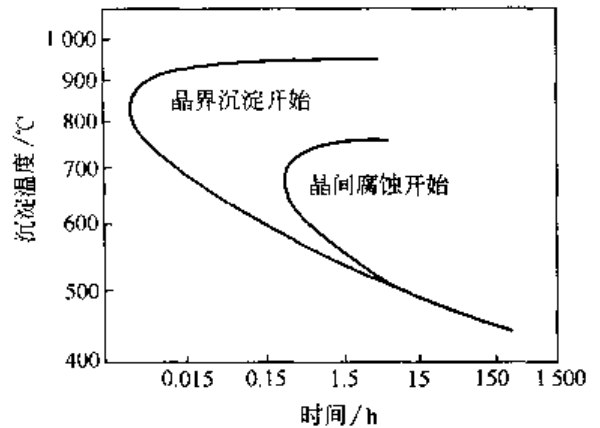


图 2.17 1Cr18Ni9 钢晶界析出  $Cr_{23}C_6$  与晶间腐蚀倾向的关系  
(碳质量分数 0.05%，1250℃ 固溶， $H_2SO_4 + CuSO_4$  溶液)

② 加入形成碳化物的合金元素 加入与碳亲和力大的合金元素，如 Ti、Nb 等，防止晶间腐蚀。对于含 Ti、Nb 元素的 18-8 不锈钢，在高温下使用时，要经过稳定化处理。即在常规的固溶处理后，还要在 850~900℃ 保温 1~4h，然后空冷至室温，以保证有充分时间生成  $TiC$ 、 $NbC$ 。

③ 固溶处理 固溶处理能使碳化物不析出或少析出。但对含 Ti、Nb 的不锈钢还要进行稳定化处理。

④ 采用双相钢 采用铁素体和奥氏体双相钢有利于抗晶间腐蚀。由于铁素体在钢中大多沿奥氏体晶界分布，含铬量又较高，因此，在敏化温度受热时，不产生晶间腐蚀。

### (4) 应力腐蚀

应力与环境共同作用下的腐蚀是局部腐蚀的一大类型。材料除受环境作用外还受各种应力作用，因此会导致较单一因素下更严重的腐蚀破坏形式。由于材料在环境中受应力作用方式不同，其腐蚀形式也不同。在这类腐蚀中受拉应力作用的应力腐蚀 (SCC) 是危害最大的局部腐蚀形式之一，材料会在工作状态下突然断裂。

#### 1) 应力腐蚀发生的条件

一般认为发生应力腐蚀断裂需要具备三个基本条件。

① 敏感材料 合金比纯金属更易发生应力腐蚀开裂。一般认为纯金属不会发生应力腐蚀断裂。如纯度达 99.999% 的铜在含氨介质中没有发生腐蚀断裂，但含有 P、Sb 时，则容



易发生应力腐蚀开裂。

② 特定的腐蚀介质 对于某种合金，能发生应力腐蚀断裂与其所处的特定的腐蚀介质有关。而且介质中能引起应力腐蚀的物质浓度一般都很低，如  $N_2O_4$  中含有少量的  $O_2$  就可使 Ti 合金储罐发生破裂，在核电站高温水介质中仅含质量分数为百万分之几的  $Cl^-$  和  $O_2$  时，奥氏体不锈钢就可发生应力腐蚀开裂。表 2.5 列举了一些易产生应力腐蚀断裂的合金及特定的环境介质。

表 2.5 易产生应力腐蚀断裂的合金及特定的环境介质

合金	腐蚀介质
低碳钢	热硝酸盐溶液、碳酸盐溶液、过氧化氢
碳钢和低合金钢	氢氧化钠、三氯化铁溶液、海水、工业大气
高强度钢	海洋大气、氯化物、硫化氢、硫酸、硝酸
铜合金	氨溶液、含 $SO_2$ 大气、三氯化铁
镍合金	氢氧化钠溶液、高纯水蒸气
铝合金	氧化钠水溶液、海水、水蒸气、工业大气
钛合金	含 $Cl^-$ 、 $Br^-$ 、 $I^-$ 水溶液、有机酸

③ 拉伸应力 拉伸应力有两个来源：一是残余应力（加工、冶炼、装配过程中产生）、温差产生的热应力及相变产生的相变应力；二是材料承受外加载荷造成的应力。一般情况下，产生应力腐蚀时的拉应力都很低，如果没有腐蚀介质的联合作用，零件可在该应力下长期工作而不产生断裂。

#### 2) 防止或减轻应力腐蚀的措施

① 合理选材与开发新材料 尽量避免金属或合金在易发生应力腐蚀的环境介质中使用。如为满足一定的使用要求，在只能使用有敏感性的某类合金的情况下可以发展新型耐应力腐蚀合金。

② 控制应力 在制造和装配金属构件时，应尽量使结构具有最小的应力集中系数，并使与介质接触的部分具有最小的残余应力，因为残余应力往往是引起应力腐蚀的主要原因。减小残余应力可采用热处理、低温应力松弛法、过变形法、喷丸处理等方法。

③ 改变环境 通过除气、脱氧、除去矿物质等方法可除去环境中危害较大的介质组分。还可通过控制温度、pH 值、添加适量的缓蚀剂等，达到改变环境的目的。例如，汽轮机发电机组用水，需要预先处理，降低 NaOH 的含量；核反应设备的不锈钢热交换器中，需将水中  $Cl^-$  及  $O_2$  的含量大大降低，以避免应力腐蚀开裂。

④ 电化学保护 金属（合金）发生应力腐蚀与电位有关，有些体系存在一个临界断裂电位值，因此可以通过控制电位进行阴极或阳极保护防止应力腐蚀。但对于不同的合金体系和介质环境，要采取具体的措施，使金属（合金）远离应力腐蚀敏感区，从而抑制应力腐蚀。

⑤ 涂层 使用性能良好的涂层可使金属表面和环境隔离开，可以减少材料的应力腐蚀敏感性。

#### (5) 大气腐蚀

金属材料或建筑物在大气条件下发生化学或电化学反应引起材料的破损称为大气腐蚀。大气腐蚀是常见的一种腐蚀现象。钢梁、钢轨、各种机械设备、车辆等都是在大环境下使

用，据统计由于大气腐蚀而损失的金属约占总腐蚀量的 50% 以上。

大气的主要成分氮、氧、二氧化碳几乎是不变的，只有其中的水蒸气含量将随地域、季节、时间等条件而变化。主要参与大气腐蚀过程的是氧和水蒸气，其次是二氧化碳。

影响大气腐蚀的因素很多，其中主要的影响因素有湿度和大气成分等。湿度是决定大气腐蚀类型和速度的一个重要因素。每种金属都存在一个腐蚀速度开始急剧增加的湿度范围，人们把腐蚀速度开始剧增时的大气相对湿度值称为临界湿度。对于铁、钢、锌，临界湿度约在 70%~80% 之间。湿度小于临界湿度时，腐蚀速度很慢，几乎不被腐蚀。因此，若能把湿度降至临界湿度以下，可防止金属发生大气腐蚀。

大气组成由于地理环境不同，还含有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NaCl}$  及尘埃等杂质。这些大气污染物不同程度地加速腐蚀。其中特别有害的是  $\text{SO}_2$ ，煤、石油燃烧的废气中都含有大量  $\text{SO}_2$ 。例如铁、锌等金属在  $\text{SO}_2$  大气中生成易溶的硫酸盐化合物，它们的腐蚀速度和大气中  $\text{SO}_2$  含量呈直线关系上升。在海洋大气中含有大量微小的海水滴，所以海洋大气中含有较多的微小的  $\text{NaCl}$  颗粒。若这些  $\text{NaCl}$  颗粒落在金属的表面上，有吸湿作用，且增大了表面液膜层的电导，氯离子本身有很强的侵蚀性，因而使腐蚀变得更严重。

大气中固体颗粒杂质通常称为尘埃。它的组成十分复杂，除海盐粒外，还有碳和碳化物、硅酸盐、氮化物、铵盐等团体颗粒。城市大气中尘埃的含量约  $2\text{mg}/\text{m}^3$ ，而工业大气中的尘埃甚至可达  $1000\text{mg}/\text{m}^3$  以上。尘埃对大气腐蚀的影响有三种方式：一是尘埃本身具有腐蚀性，如铵盐颗粒能溶入金属表面的水膜，提高电导和酸度，促进了腐蚀；二是尘埃本身无腐蚀作用，但能吸附腐蚀物质，如碳能吸附  $\text{SO}_2$  和水汽生成腐蚀性的酸性溶液；三是尘埃沉积在金属表面形成缝隙而凝聚水分，形成氧浓度差引起缝隙腐蚀。

防止大气腐蚀的方法主要有以下几种。

① 提高金属材料的耐蚀性 在碳钢中加入  $\text{Cu}$ 、 $\text{P}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$  及稀土元素可提高其耐大气腐蚀性能。

② 采用有机和无机涂层及金属镀层 对长期暴露在空气中的钢材，应经常使用油漆和金属镀层保护。

③ 采用气相缓蚀剂和暂时性保护层 这些暂时性的保护方法主要用于保护储藏和运输过程中的金属制品。

另外，合理设计构件、防止缝隙中存在水气、去除金属表面上的灰尘等都有利于防止大气腐蚀。尤其要开展环境保护以减少大气污染，这有利于延长金属材料在大气中的使用寿命。

## 第3章 堆焊合金

堆焊是为了增大或恢复零部件尺寸或使焊件表面获得具有特殊性能的合金层而进行的焊接，是一种重要的但又常常不被理解的减少磨损的方法。耐磨堆焊常与修理工作联系在一起，这种方法在原始设计和制造中也是非常经济的。耐磨堆焊可用于要求使用大断面特殊耐磨合金的场合。随着我国大型成套装备制造技术的发展，堆焊技术已广泛应用于矿山机械、冶金、农机、建筑、电力、运载车辆、石油化工、核动力等领域，起着非常重要的作用。

### 3.1 堆焊的特点及用途

#### 3.1.1 堆焊的特点

堆焊是用焊接方法在工件表面堆敷一层具有一定性能材料的工艺过程，目的是增加零件的耐磨、耐热、耐腐蚀等方面的性能。堆焊是焊接技术领域的一个重要的分支，在国民经济的各个部门获得广泛应用。在一些工业发达国家，每年堆焊在零件上的金属多达数万吨。

堆焊的最大优点是能充分发挥材料的性能优势，达到节约用材和延长零部件使用寿命等目的。堆焊过程的物理本质、冶金过程和热过程的基本规律与一般焊接相似。由于堆焊合金层与母材大多属于异种材料，并且还要求充分发挥表面堆焊合金的性能，所以材料堆焊有如下特点。

① 堆焊层的合金成分是决定堆焊效果的主要因素 被堆焊的材料种类繁多，工作环境复杂，基体材料几乎包括了所有类型的金属。针对不同的工作条件和磨损类型，只有采用合适的堆焊合金才能达到预期的使用要求。必须针对具体情况，合理选择堆焊层的合金系统，这样才能使堆焊零件具有较高的使用寿命。

② 尽量降低稀释率是制定堆焊工艺的重要出发点 稀释率是表示堆焊焊缝中，含有母材金属的百分率，例如稀释率10%，表示堆焊合金中含有母材金属10%，含有堆焊合金90%。堆焊层一般含有较多的合金元素，而零件的基体往往采用普通碳钢或低合金钢。因此，为了获得具有理想使用性能的表而堆焊层成分，必须尽量减少母材在堆焊金属中的熔入量，即降低稀释率。

③ 提高堆焊生产率 堆焊零部件往往数量很大（如各类阀门），堆焊层合金所需要的堆敷金属量大，应选用和研制生产率较高的堆焊方法和堆焊工艺。

④ 堆焊合金与基体金属之间的匹配 堆焊层与母材成分往往相差较为悬殊。为防止堆焊时或焊后热处理以及零件使用过程中，堆焊接头产生过大的热应力和组织应力，从而使堆焊层开裂甚至产生剥离现象，往往要求堆焊合金和基体金属最好有相近的线膨胀系数和相变温度等热物理性能。

#### 3.1.2 堆焊的用途

堆焊技术是将堆焊合金熔敷在金属材料或零部件表面，以获得特定的表面层性能和表面尺寸。表面堆焊可用于制造新的部件，也可用于修复表面损坏了的部件，以恢复其使用性能。在材料表面堆焊大多以延长设备或零部件的服役寿命为目的，少数情况下也用于单纯以恢复零件尺寸为目的的场合。

##### (1) 零部件的修复

机器设备零部件，例如轴类、工模具、农机零件、轧辊、采掘机件等，经过一段时间运行后总会发生磨损、腐蚀等，使其工作性能和工作效率下降，甚至失效。利用堆焊方法能很快将这些零部件修复起来继续使用，起到延长设备使用寿命的作用。据统计，用于修复旧零件的堆焊合金量占堆焊合金总量的 72.2%。修复所花费用比制造或购买新机件的费用低得多。由于修复得及时，可以减少设备停机运行的损失。因此，广泛采用堆焊工艺修复旧零件，对节约材料、节省资金、弥补配件短缺等具有重要的意义。

### (2) 制造新零件

通过在金属材料上堆焊异种合金可以制成具有综合性能的双金属机器零件。这种零件的基体和堆焊合金层，由于具有不同的性能，能够满足两者不同的性能要求。这样能充分发挥材质的工作潜力。

例如，水轮机的叶片，基体材料为碳素钢，在可能发生气蚀部位（多在叶片背面下半段）堆焊一层不锈钢，使之成为耐气蚀的双金属叶片；在金属模具的制造中，基体要求强韧，选用价格相对便宜的碳钢、低合金钢制造，而刃模要求硬度高、耐磨，采用耐磨合金堆焊在模具刃模部位，可以节约大量贵重合金的消耗，大幅度提高模具的使用寿命。

堆焊的应用范围十分广泛，例如挖掘机斗齿、装载机铲刀刃、推土机刃板、水泥磨盘、岩石钻机、破碎机、螺旋输送机、搅拌机叶片、铁路道轨、锻锤、传动齿轮的轮缘、各种模具、碎渣机、机床等。

零件的表面堆焊除了可修旧复新外，还可延长零部件的使用寿命。通常可提高寿命 30%~300%，降低成本 25%~75%。但是，要充分发挥堆焊技术的优势必须解决好两方面的问题：一是必须正确选用堆焊合金，其中包括堆焊合金的成分和堆焊材料的形状，而堆焊合金的成分又往往取决于对堆焊合金使用性能的要求；二是选定合适的堆焊方法，制定相应的堆焊工艺。

## 3.2 堆焊合金的类型及特点

### 3.2.1 堆焊合金的类型

#### 3.2.1.1 按堆焊合金的形状分类

按堆焊材料的形状分类，堆焊合金有丝状堆焊合金、铸条状堆焊合金、带状堆焊合金、粉粒状堆焊合金和块状堆焊合金等。

① 丝状和带状堆焊合金 由可轧制和拉拔的堆焊材料制成。它们均可做成实芯和药芯堆焊材料，有利于实现堆焊的机械化和自动化。丝状堆焊合金可用于气焊、埋弧堆焊、气体保护堆焊和电渣堆焊等，带状堆焊合金尺寸较大，主要用于埋弧堆焊和电渣堆焊，熔敷效率高。

② 铸条状堆焊合金 当材料的轧制和拉拔加工性较差，如钴基、镍基合金和合金铸铁等，一般做成铸条状，可以直接供气焊、气体保护堆焊和等离子弧堆焊时用作熔敷金属材料。铸条、光焊丝和药芯焊丝等外涂药皮即可制成堆焊焊条，专供手工电弧堆焊使用，适应性强、灵活方便，可以全位置施焊，应用较为广泛。

③ 粉粒状堆焊合金 将堆焊材料中所需的各种合金制成粉末，按一定配比混合成合金粉末、供等离子弧或氧-乙炔火焰堆焊和喷熔使用。其最大优点是方便了对堆焊层成分的调整，拓宽了堆焊材料的使用范围。

④ 块状堆焊合金 将粉料加黏结剂压制而成，可用于碳弧或其他热源进行熔化堆焊。堆焊层成分调整也比较方便。

### 3.2.1.2 按堆焊合金系分类

堆焊金属主要分为铁基、钴基和镍基三大类。堆焊金属按其合金类别和金相组织的分类见图 3.1。

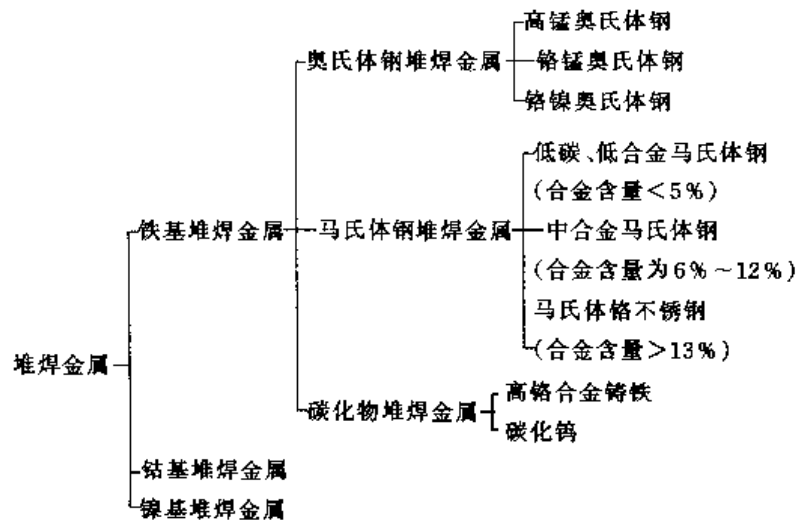


图 3.1 按合金类别和组织对堆焊金属的分类

按堆焊层的化学成分和组织结构可将堆焊合金再细分为铁基堆焊合金、合金铸铁类堆焊合金、碳化钨堆焊合金、镍基堆焊合金、钴基堆焊合金、铜基堆焊合金等。常用堆焊合金的类型、性能特点及主要用途见表 3.1。

#### (1) 铁基堆焊合金

铁基堆焊合金是堆焊材料中应用最广泛的一种。铁基堆焊合金由于合金含量、含碳量和冷却速度的不同，堆焊层的基体组织可以有马氏体、奥氏体、珠光体钢等几种类型。每一种材料对某项具体的磨损因素可能表现出更好的耐磨性或更好的经济性，也可能具有同时抗两种以上的磨损性能。

表 3.1 常用堆焊合金的类型、性能特点及主要用途

序号	堆焊合金类型	成分特点	性能特点	主要用途	相应堆焊材料
1	低碳低合金钢	C < 0.3%，其他元素约 5%	主要组织为珠光体。堆焊后硬度为 200~350HB，冲击韧性好，易于切削加工，价格便宜，有较好的抗裂性。经热处理可提高到 400~500HB 以上	堆焊承受高冲击载荷和金属间摩擦磨损的零件，如车轮、齿轮、拖拉机驱动轮、轴类等	D107(1Mn3Si) D112(2Cr1.5Mn) D127(2Mn4Si)
	中碳低合金钢	C 0.3%~0.6%，其他元素约 5%	主要组织为马氏体，含部分珠光体或残余奥氏体，硬度为 350~550HB，有时可达 60HRC。具有良好的抗压强度，切削加工困难，经退火才能加工	堆焊承受中等冲击的磨损零件，如齿轮、轴、冲模、冷剪刀刃、车轮、推土机刃板、斗铲牙刀等	D172(4Cr2Mo) D132(Cr3Mo) D167(4Mn4Si) D212(5Cr2Mo2)
	高碳低合金钢	C 0.7%~1.5%，其他元素约 5%	组织为马氏体—少量析出碳化物或网状莱氏体共晶碳化物。硬度较高(60HRC)，韧性较差，焊后不能切削加工	堆焊不受冲击或受弱冲击的低应力磨料磨损零件，如推土机刃板、铲斗刃板、泵套、挖泥机斗牙、螺旋送料器刃口、混凝土搅拌机叶片等	D207(7Mn2Cr3Si)

续表

序号	堆焊合金类型	成分特点	性能特点	主要用途	相应堆焊材料
2	高铬马氏体钢	C<0.3%, Cr 13%	热处理后组织为针状铁素体,也可能有一部分马氏体、索氏体。如 1Cr13, 硬度 40~50HRC, 退火后 25HRC, 易于切割加工	堆焊耐磨和磨蚀零件, 如曲轴、水轮机叶片、耐气蚀层、搅拌机螺旋桨及中压阀门等	1Cr13、2Cr13 焊丝 D507(1Cr13) D512(2Cr13) D517(2Cr13)
		C 0.3%~0.6%, Cr 5%~20%	主要组织为马氏体, 硬度为 50HRC	用于堆焊受泥沙磨损和腐蚀破坏的水轮机叶片、挖泥斗以及拖拉机齿轮	D217(4Cr9Mo3V) D527(3Cr13)
3	高速钢及热模具钢	—	组织为网状莱氏体共晶和奥氏体, 与冷却速度有关。淬火后的组织是马氏体-奥氏体-断续网状碳化物-粒状碳化物, 退火后能切削加工。热锻模钢(如 50CrMnMo) 组织为索氏体+铁素体, 硬度 30~40HRC; 3Cr2W8, 硬度 42~48HRC	堆焊切削刀具、剪刀、顶锻模、压铸模、锤锻模	D307(W18Cr4V) D397(50CrMnMo) D337(3Cr2W8) D332、D337 (50Cr5W9Mo2V) 高速钢及热模具钢丝或管状焊丝
4	铬-镍奥氏体钢	C<0.2%, Cr≥18%, Ni≥9%	耐腐蚀性能好、抗氧化性、热强性好, 耐磨粒磨损性不高。堆焊后不需经过热处理, 加工性能良好	堆焊水轮机叶片、轴衬、高压锅炉阀门密封面、开坯轧辊、周期轧管机轧辊、抗高温氧化零件	D532、D537 (1Cr18Ni8Mo3V) D647(1Cr18Ni8Si5) D547MoV D657(1Cr18Ni8Si7) 铬镍奥氏体焊丝及焊带
5	锰奥氏体钢、铬锰奥氏体钢	C 1.0%~1.35%, Mn 13%~14%	塑性和韧性好, 加工硬化性特别高。加工硬化后硬度可提高到 450~500HB。适于在岩石、矿石等磨粒强烈冲击下工作的零件	堆焊铁道道岔、破碎机颧板、挖掘机斗牙、拖拉机履带板、热锻模、热轧辊等	D256(Mn13) D266(Mn13Mo2)
		C 0.3%, Cr 10%~15%, Mn 10%~14%	塑性和韧性好, 具有加工硬化性、较好的耐腐蚀、抗氧化、耐高温性能和优良的耐气蚀性能	堆焊水轮机叶片耐气蚀部位、热轧辊、热锻模、中温高中压阀门等	D276(Mn12Cr13) D277(Mn12Cr13Mo)
6	合金铸铁	—	马氏体合金铸铁具有很好的耐高应力与低应力磨粒磨损能力, 同时有很高的抗压强度。Cr-Mo、Cr-W 马氏体铸铁有较好的耐热性, 到 650℃ 时硬度才急剧下降	堆焊矿石料斗、混凝土搅拌机、高速混砂机、螺旋送料器、犁刀、推土机铲刀、破碎机、水泥磨碎机、高炉料钟、剪刀刃等	丝 101(高铬铸铁堆焊焊丝) D608(C3Cr4Mo4) D462(C3Cr27) D667(C3Cr30Ni4Si4Mn) D678(C2W2B) D698(C2Cr5W13) 铁基堆焊合金或管状焊丝
7	铁铬铝合金	C≤1.5%, Cr 13%~27%, Al 3.5%~6.5%	高温氧化性良好, 0Cr25Al5 合金可耐 1400℃ 高温, 具有一定的耐腐蚀性和良好的加工性, 但高温冷却后有脆性	炉管等炉子元件的表面堆焊	0Cr25Al5 焊丝 铬 406 焊条

续表

序号	堆焊合金类型	成分特点	性能特点	主要用途	相应堆焊材料
8	碳化钨	—	硬度很高,具有良好的耐高应力与低应力磨粒磨损能力,尤其是抗高应力磨粒磨损能力。可在 650℃ 高温下工作,耐冲击力低、脆性较大,堆焊时裂纹倾向大	适用于轻度或中度冲击的强烈磨粒磨损条件下工作,如石油油井钻头、推土机刀刃、加工矿石的设备、螺旋输送机	D707(C2W45MnSi4) 管装粒状硬质合金 粒状铸造碳化钨
9	钴基合金	C 1.0%~5.0%, Cr 30%, W 4%~25%	为奥氏体+碳化物+共晶的混合组织。抗磨粒磨损性能及抗高温氧化性好,含碳、钨低的可用硬质合金刀具加工;含碳高的只能用磨削式电腐蚀加工、易出现裂纹	堆焊内燃机气阀、锅炉阀门、抗硫阀门、其他高温高压阀门、受腐蚀与磨蚀的泵转子、热锻穿孔冲头	D802(钴基Cr30W5) D812(钴基Cr30W8) 丝 111(钴基1号) 丝 112(钴基2号) 钴基堆焊合金粉
10	镍基合金	—	镍基合金组织为奥氏体,硬度低、韧性好,能承受冲击载荷,具有优良的高温抗氧化性能	堆焊高温炉元件、高温高压蒸气阀门、泵柱塞、化工设备零部件等	镍基堆焊用合金粉 镍及镍基合金焊丝、焊带

碳是铁基堆焊合金中最重要的合金元素。Cr、Mo、W、Mn、V、Ni、Ti、B等也能作为合金化元素。合金元素不但影响堆焊层中硬化相的形成,而且对基体组织的性能也有影响。合金元素Cr、Mo、W、V可以使堆焊层有较好的高温强度,并能在480~650℃时发生二次硬化效应。Cr还能使堆焊合金具有较好的抗氧化性能,在1090℃时,含有25%Cr就能提供很好的保护作用。

#### 1) 合金钢类堆焊合金

含碳量较低时,碳对基体组织的硬度有影响。以铁素体为基体的低碳钢,由于硬度太低,不能作为堆焊合金。当含碳量增加到0.8%时,焊后堆焊层组织以珠光体为主,硬度较高、韧性较好,称为珠光体堆焊合金。加入少量合金元素后,堆焊层中的奥氏体在480℃以下转变成马氏体,强度和硬度都很高,耐磨性好,称为马氏体堆焊合金。随着合金元素含量的增加,残余奥氏体在堆焊层中的比例上升,当稳定奥氏体的合金元素含量很大时,奥氏体完全不发生转变,直至室温,称为奥氏体堆焊合金。

① 低碳低合金钢堆焊合金 含碳量一般小于0.3%,合金元素总量在5%以下,以Mn、Cr、Si为主加合金元素,属于珠光体钢类型。在一般冷却速度下,堆焊金属组织以珠光体(索氏体或屈氏体)为主,硬度约200~350HB。合金元素较多或冷却速度较高时,出现马氏体使硬度提高。这类堆焊合金大多在焊态应用,也可进行淬火、回火提高性能。堆焊前一般不预热,当堆焊碳当量较高或刚性较大的零件时,可进行250℃预热。

② 中碳低合金钢堆焊合金 含碳量约0.3%~0.6%,合金元素总量5%左右,堆焊金属属于马氏体钢。主加合金元素是Cr、Mo,也采用Mn、Si,并通过加入较多的碳使合金强化。主合金系为3Cr2Mo、4Cr2Mo、4Mn4Si、5Cr3Mo2等。堆焊金属组织主要是马氏体和残余奥氏体,有时含有少量珠光体,硬度约350~550HB。裂纹倾向比低碳低合金钢堆焊合金大,一般应预热250~350℃。

③ 高碳低合金钢堆焊合金 含碳量0.7%~1.0%,也有的高达1.5%,合金元素总量约5%,堆焊金属属于马氏体钢。主强化元素是Cr,因为含Mn过多使钢脆性增加。堆焊金

属组织为马氏体和残余奥氏体，有时在柱状晶粒边界析出共晶莱氏体。冲击韧性差，堆焊时易产生热裂纹或冷裂纹，一般应预热 350~400℃。若堆焊后需切削加工，应先退火使硬度降低到 20~25HRC，加工后再淬火获得硬度 50~60HRC。

④ Cr-W、Cr-Mo 热稳定钢堆焊合金 具有中碳含量 ( $C < 0.6\%$ ) 和较多的 W、Mo、V 等碳化物形成元素，属于中碳中合金钢，在高温时仍能保持较高的硬度和耐磨性，提高抗热疲劳性。堆焊金属具有很好的红硬性、高温耐磨性和较高的冲击韧性。容易产生堆焊裂纹，一般在 400℃ 左右预热，堆焊后缓冷。

⑤ 高铬马氏体钢堆焊合金 含 Cr 约 13% 左右，含碳量 0.1%~1.5%，属于半马氏体或马氏体高铬不锈钢。2Cr13、3Cr13 堆焊金属主要是马氏体组织，并有碳化物析出，硬度为 50HRC 左右。这类堆焊合金脆性较大，堆焊时容易产生裂纹，一般需预热 300~400℃。含碳量大于 1% 高铬钢堆焊金属（如 Cr12V）属于莱氏体钢，组织为莱氏体+残余奥氏体。由于存在含铬的合金莱氏体，耐磨性更高，但脆性也更大，容易产生裂纹，一般应预热 400~550℃。

⑥ 高锰奥氏体钢堆焊合金 含 Mn 约 13%，含 C 0.7%~1.2%，属于奥氏体高锰钢。堆焊金属组织为奥氏体，硬度仅 200HB 左右。但是，当堆焊合金经受强烈冲击后，即转变为马氏体而使表面层硬化，硬度提高为 450~500HB。而硬化层以下仍为韧性很好的奥氏体组织。因此，这类合金具有良好的抗冲击磨损性能，适用于堆焊承受强烈冲击的凿削式磨料磨损零件。但对于受冲击作用很小的低应力磨料磨损，由于不能产生冲击加工硬化，所以耐磨性不高。高锰钢耐腐蚀、耐热性都不好，不宜用于高温。但耐低温性能好，冷至 -45℃ 还不会发生脆化。

⑦ Cr-Ni 奥氏体钢堆焊合金 以 18-8 奥氏体不锈钢的成分为基础，可加入 Mo、V、Si、Mn、W 等元素提高性能。突出特点是耐腐蚀性强、抗氧化和热强性好，但耐磨料磨损能力不高。主要用在化工、石油、核动力等部门的耐腐蚀、抗氧化零部件的表面堆焊。为了提高抗晶间腐蚀能力，这类合金含碳量较低 ( $C < 0.2\%$ )，堆焊金属硬度不高。但加入 Mn 元素显著提高其冷作硬化效果和力学性能，可用于水轮机叶片抗气蚀层、开坯轧辊等。在合金中加入适量的 Si、W、Mo、V 等可提高其高温硬度，用于高中压阀门密封面的堆焊。

⑧ 高速钢堆焊合金 C 0.7%~1.0%，W 17%~19%，Cr 3.8%~4.5%，V 1.0%~1.5%，堆焊金属属于莱氏体，组织类似铸造高速钢，由网状莱氏体和奥氏体的转变产物组成。堆焊金属易产生裂纹，一般应预热 500℃ 左右。有很高的红硬性和耐磨性，主要用于堆焊各种切削刀具、剪刀等。

## 2) 合金铸铁类堆焊合金

合金铸铁类堆焊合金包括马氏体合金铸铁、奥氏体合金铸铁和高铬合金铸铁三大类。高铬合金铸铁堆焊层的基体组织是奥氏体或马氏体，而大多数马氏体和奥氏体合金铸铁堆焊层的基体组织是莱氏体碳化物。它们都含有大量的合金碳化物，因而耐磨料磨损性能很高。

① 马氏体合金铸铁堆焊合金 普通灰口铸铁由于硬度和强度很低，所以抵抗磨料磨损的能力很差。在一般白口铸铁基础上加入合金元素，使碳化物合金化，成为合金渗碳体或复合碳化物；同时合金元素使合金中的过冷奥氏体稳定性增加，促使产生合金马氏体组织，从而大大提高堆焊合金的硬度和耐磨性。这类合金铸铁堆焊合金得到了广泛应用。

马氏体合金铸铁堆焊合金的含碳量为 2%~4%，加入 W、Cr、Mo、Mn、Ni 等使之合



金化，合金元素总量一般在15%~20%以下。这类合金有很好的抗高应力和低应力磨料磨损能力，并有良好的抗压强度。合金元素的加入也改善了耐热、耐腐蚀和抗氧化性能。该合金比较脆、抗冲击性较差，堆焊时有严重的裂纹倾向，一般应预热300~400℃。

② 高铬合金铸铁堆焊合金 含C 1.5%~4.0%，Cr 22%~32%，适当加入其他合金元素，如Ni、Si、Mn、Mo、B、Co等，是合金铸铁堆焊合金中应用最广泛、效果最好的一种。堆焊组织中含有大量柱状 $Cr_7C_3$ ，常见的基体组织是残余奥氏体+共晶碳化物。由于含有高铬和 $Cr_7C_3$ 高硬度相，所以合金具有很高的抗低应力磨料磨损和耐热、耐蚀性能。但这类合金堆焊合金的裂纹倾向很大，一般要预热到400~500℃。常用于在低应力或高应力磨料磨损条件下工作的犁铧、球磨机衬板、推土机铲刃等零件，也用于高炉料钟料斗、排气机叶片等零件的堆焊上。

### (2) 碳化钨堆焊合金

碳化钨堆焊层是由胎体材料和嵌在其中的碳化钨颗粒组成的。胎体材料可由铁基、镍基、钴基和铜基合金构成。堆焊金属平均成分是含W 45%以上、含C 1.5%~2%。碳化钨由WC和 $W_2C$ 组成（一般含C 3.5%~4.0%，含W 95%~96%），有很高的硬度和熔点。含C 3.8%的碳化钨硬度达2500HV，熔点接近2600℃。

堆焊用的碳化钨有铸造碳化钨和以钴为黏结金属的粉末烧结成的粒状碳化钨两类。碳化钨堆焊合金具有非常好的抗磨料磨损性、很好的耐热性、良好的耐腐蚀性和抗低度冲击性。为了充分发挥碳化钨的耐磨性，应尽量保持碳化钨颗粒的形状，避免其熔化。高频加热和氧-乙炔火焰加热不易使碳化钨熔化，堆焊层耐磨性较好。但是在电弧堆焊时，会使原始碳化钨颗粒大部分熔化，熔敷金属中重新析出硬度仅1200HV左右的含钨复合碳化钨，导致耐磨性下降。这类合金脆性大，容易产生裂纹，对结构复杂的零件应进行预热。

### (3) 钴基堆焊合金

钴基合金又称为“司特立”(Stellite)合金，以Co为基本成分，加入Cr、W、C等元素，主要成分为：C 0.7%~3.0%，Cr 25%~33%，W 3%~25%，其余为Co。钴基合金堆焊层的基体组织是奥氏体+共晶组织。含碳量低时，堆焊层由呈树枝状晶的Co-Cr-W固溶体（奥氏体）初晶和固溶体与Cr-W复合碳化物的共晶体组成。随着含碳量的增加，奥氏体数量减少，共晶体增多。改变碳和钨的含量可改变堆焊合金的硬度和韧性。

含C、W较低的钴基合金，主要用于受冲击、高温腐蚀、磨料磨损的零件堆焊，如高温高压阀门、热锻模等。含C、W较高的钴基合金，硬度高、耐磨性好，但抗冲击性能低，且不易加工。主要用于受冲击较小，但承受强烈的磨料磨损、高温及腐蚀介质下工作的零件。

这类堆焊合金具有良好的耐各类磨损的性能，特别是在高温耐磨条件下的各类磨损。在各类堆焊合金中，钴基合金的综合性能最好，有很高的红硬性，抗磨料磨损、抗腐蚀、抗冲击、抗热疲劳、抗氧化和抗金属间磨损性能都很好。这类合金容易形成冷裂纹或结晶裂纹，在电弧焊和气焊时应进行200~500℃预热，对于含碳较多的合金需选择较高的预热温度。等离子弧堆焊钴基合金时，一般不预热。尽管钴基堆焊合金价格很贵，仍得到广泛应用。

### (4) 镍基堆焊合金

在各类堆焊合金中，镍基合金的抗金属-金属间摩擦磨损性能最好，并且具有很高的耐

热性、抗氧化性、耐腐蚀性。此外，镍基合金易于熔化，有较好的工艺性能，所以尽管比较贵，仍应用广泛。根据其强化相的不同，镍基堆焊合金又分为含硼化物合金、含碳化物合金和含金属间化合物合金三大类。

① Ni-Cr-B-Si 合金，即科尔蒙合金 (Colomony)，在堆焊合金中应用最广。它的成分为： $C \leq 1.0\%$ ，Cr 8%~18%，B 2%~5%，Si 2%~5%，其余为 Ni。这种堆焊合金硬度高 (50~60HRC)，在 600~700℃ 高温下仍能保持较高的硬度；在 950℃ 以下具有良好的抗氧化性和很好的耐腐蚀性。合金熔点低 (约 1000℃)，流动性好，堆焊时容易获得稀释率低、成形美观的堆焊层。耐高温性能比钴基合金差，但在 500~600℃ 以下工作时，它的红硬性优于钴基合金。这种合金比较脆，不能拔制焊丝，一般制成铸造焊条、管状焊丝或药芯焊丝，采用气焊、电弧焊、等离子弧等方法堆焊。合金堆焊层抗裂性差，堆焊前应高温预热，焊后缓冷。

② Ni-Cr-Mo-W 合金，即哈斯特洛伊合金 (Hastelloy)，有很多种。堆焊合金一般采用哈氏 C 型合金，成分为： $C < 0.1\%$ ，Cr 17%，Mo 17%，W 4.5%，Fe 5%，其余为 Ni。堆焊组织主要是奥氏体+金属间化合物。加入 Mo、W、Fe 元素后，合金的热强性和耐腐蚀性明显提高。这种合金有很好的抗热疲劳性能，而且裂纹倾向比较小，但硬度不高，耐磨料磨损性能不好，主要用于耐强腐蚀、耐高温的金属-金属间摩擦磨损零件堆焊。

③ Ni-Cu 堆焊合金，即蒙乃尔合金 (Monel)，一般含 Ni 70%，Cu 30%。硬度较低，有很高的耐腐蚀性能，主要用于耐腐蚀零件堆焊。

镍基堆焊合金可取代某些类型的钴基堆焊金属，这样可以降低堆焊材料成本。镍具有比铁更好的高温基体强度，因此与钴基合金有相似的应用范围，而镍基产品可作为钴基合金在耐高温磨损应用中低价的替代品。

#### (5) 其他类堆焊合金

如铜基堆焊合金，包括纯铜、黄铜、青铜和白铜四类。

这类堆焊合金有良好的耐腐蚀性和低的摩擦系数，适于堆焊轴承等金属-金属间摩擦磨损零件和耐腐蚀零件，一般在钢和铸铁上堆焊制成双金属零件或修复旧件。铜基合金不宜在磨料磨损和温度超过 200℃ 的条件下工作。铜基合金大多可以拔制成丝进行气焊、电弧焊、等离子弧等堆焊。

铝青铜强度高，耐腐蚀、耐金属间摩擦磨损性能良好，常用于堆焊轴承、齿轮、蜗轮及耐海水腐蚀零件，如水泵、阀门、船舶螺旋桨等。锡青铜有一定强度，塑性好，能承受较大的冲击载荷，减摩性优良，常用于堆焊轴承、轴瓦、蜗轮、低压阀门及船舶螺旋桨等。硅青铜力学性能较好，冲击韧性高，耐腐蚀性好，但减摩性不好，适用于化工机械、管道等内衬的堆焊。

堆焊合金的类型及化学成分见表 3.2。

#### 3.2.1.3 按堆焊目的分类

堆焊材料可分别具有耐磨损、耐气蚀、耐腐蚀、耐热和耐冲击等性能。根据堆焊合金层的使用目的划分，常用堆焊合金包括下列类型。

① 耐蚀堆焊 也称为包层堆焊，是为了防止工件在运行过程中发生腐蚀而在其工作表面上熔敷一层一定厚度、具有耐腐蚀性能合金层的堆焊方法。

② 耐磨堆焊 为了防止在工作过程中工件表面被磨损，使工件表面获得具有特殊性能的合金层、延长工件使用寿命的堆焊。

表 3.2 堆焊合金的类型及化学成分

堆焊合金类型	合金系	堆焊层金属化学成分 /%									堆焊层硬度 HRC	焊接材料举例	
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	其他	余量			
低碳低合金钢	1Mn2	≤0.20	≤3.50	—	—	—	—	—	—	—	Fe	≥22	D107
	2Mn3	≤0.20	≤4.20	—	—	—	—	—	—	—		≥28	D126
	2Mn4	≤0.20	≤4.50	—	—	—	—	—	≤2.0	—		≥30	D146
	1Cr1.5Mo	≤0.25	—	—	≤2.0	—	≤1.50	—	≤2.0	—		≥22	D112
中碳中合金钢	5Cr3Mo	≤0.50	—	—	≤3.0	—	≤1.50	—	—	—	Fe	≥30	D132
	5Cr2Mo2	≤0.50	—	—	≤2.5	—	≤2.50	—	—	—		≥40	D172
	4Mn6Si	≤0.45	≤6.50	≤1.00	—	—	—	—	—	—		≥50	D167
	5Cr5Mo4	0.30~0.60	—	—	≤5.0	—	≤4.0	—	—	—		≥50	D212
高碳低合金钢	7Cr3Mn-2Si	0.50~1.0	≤2.50	≤1.00	≤3.5	—	—	—	≤1.0	—	Fe	≥50	D207
铬-钨-铬-钼热稳定钢	5CrMnMo	≤0.60	≤2.50	≤1.00	≤2.0	—	≤1.0	—	≤1.0	—	Fe	≥45	D397
	3Cr2W8	0.25~0.55	—	—	2.0~3.5	—	—	7~10	≤1.0	—		≥48	D337
	5W8Cr5-Mo2V	≤0.50	—	—	≤5.0	V≤1.0	≤2.5	7~10	≤1.0	—		≥55	D327
高铬钢	1Cr13	≤0.15	—	—	10~16	—	—	—	≤2.5	—	Fe	≥40	D507
	1Cr13Ni5Mo2W2	≤0.20	—	—	10~16	≤6.0	≤2.50	≤2.50	≤2.5	—		≥37	D507Mo
	1Cr13Mo-2Nb	≤0.15	—	—	10~16	—	≤2.50	Nb≤0.5	≤2.5	B 1.3~1.8		≥37	D507Mo Nb
	1Cr13BSi	≤0.15	—	0.5~1.5	12.5~14.5	—	0.5~1.5	—	—	—		40~45	F312
	2Cr13	≤0.25	—	—	10~16	—	—	—	≤5.0	—		≥45	D512
	3Cr13	≤0.30	—	—	10~16	—	—	—	—	—		40~49	—
	Cr12	0.91~1.5	—	—	10~16	—	—	—	—	—		≥50	—
奥氏体高锰钢和铬锰钢	Mn13	≤1.1	11~16	—	—	—	—	≤5.0	—	—	Fe	≥170HB	D256
	Mn13Mo2	≤1.1	11~16	—	—	—	≤2.50	—	≤1.0	—		≥170HB	D266
	2Mn12Cr13	≤0.8	11~16	—	13~17	—	—	—	≤1.0	—		≥20	D276
奥氏体铬镍钢	Cr18Ni8Si-5Mn	≤0.18	0.6~2.0	4.8~6.4	15~18	7~9	—	—	V 0.5~1.2	—	Fe	270~320 HB	D547
	Cr20Ni11-Mo4Si-1MnWVNb	0.1~0.18	0.6~2.0	3.5~4.3	18~21	10~12	3.8~5.0	0.8~1.2	—	—		≥37	D547Mo
	Cr18Ni8Si-7Mn2	≤0.20	2.0~3.0	5~7	18~20	7~10	—	—	Nb 0.7~1.2	—		≥40	D557
高速钢	W18Cr4V	0.7~1.0	—	—	3.8~4.5	—	V 1.0~1.5	17~19.5	≤1.5	—	Fe	≥55	D307
马氏体合金铸铁	W9B	1.5~3.5	—	—	—	—	—	8~10	≤1.0	—	Fe	≥50	D678
	Cr4Mo4	2.5~4.5	—	—	3.0~5.0	—	3.5~5.0	—	—	—		≥55	D608
	Cr5W11	≤3.0	—	—	4~6	—	—	8.5~14	—	—		≥60	D698

续表

堆焊合金类型	合金系	堆焊层金属化学成分 / %									堆焊层硬度 HRC	焊接材料举例
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	其他	余量		
高铬合金铸铁	Cr30Ni7	1.5~3.5	1.5~3.0	≤1.5	28~32	5~8	—	—	—	—	≥40	D567
	Cr30	1.5~3.5	<1.0	—	22~32	—	—	—	—	—	≥45	D646
	Cr28Ni4Si4	2.5~5.0	0.5~1.5	1.0~1.8	25~32	3~5	—	—	—	—	≥48	D667
	Cr28Mn	3.0~4.0	1.5~3.5	≤3.0	25~32	0.5~2.5	—	—	—	Fe	≥58	D687
	3Si2B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cr18W	≤3.0	—	—	15~20	—	1.0~2.0	10~20	≤1.0	—	≥58	D618
	15Mo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr28Mo5	3.0~5.0	—	—	20~35	—	4.0~6.0	—	≤1.0	—	≥60	D628	
碳化钨合金	W45MnSi4	1.5~3.0	≤2.0	≤4.0	—	—	—	40~50	—	Fe	≥60	D707
	W60	1.5~4.0	≤3.0	≤4.0	≤3.0	≤3.0	≤7.0	50~70	—	—	≥60	D717
钴基合金	Co基 Cr-30W5	0.7~1.4	≤2.0	≤2.0	25~32	—	Co余量	3~6	Fe≤5.0	—	≥40	D802
	Co基 Cr-30W8	1.0~1.7	≤2.0	≤2.0	25~32	—	Co余量	7~10	Fe≤5.0	—	≥44	D812
	Co基 Cr-30W12	1.75~3.0	≤2.0	≤2.0	25~32	—	Co余量	11~19	Fe≤5.0	—	≥53	D822
	Co基 Cr-30W9	0.20~0.50	≤2.0	≤2.0	25~32	—	Co余量	≤9.5	Fe≤5.0	—	20~38	D842
镍基合金	Ni-Cr-B-Si	0.3~0.7	—	2.5~4.5	8~12	余量	—	—	B 1.8~2.6	Fe≤4	40~50	F101
	Ni-Cr-B-Si	0.6~1.0	—	3.5~5.5	14~18	余量	—	—	B 3.0~4.5	Fe≤5	≥55	F102
	Ni-Cr-B-Si	≤0.15	—	2.5~4.5	8~12	余量	—	—	B 1.3~1.7	Fe≤8	20~30	F103
	Ni-Cr-Mo-W	<0.10	—	—	17	余量	Mo 17	W 4.5	Fe 5	—	175~215HB	—
	Ni-Cu	<0.20	1.2~1.8	—	—	余量	—	Cu 27~29	Fe 2~3	—	125~150HB	—
铜基合金	纯铜	—	<0.5	<0.5	—	—	—	—	—	Cu>99	50HBS	T107
	硅青铜	—	≤0.15	2.4~4.0	—	—	—	—	Sn<1.5	Cu 其余	110~130HV	T207
	磷青铜	—	—	—	—	—	—	P 0.03~0.3	Sn 7.9~9.0	Cu 其余	80~115HV	T227
	锡青铜	—	—	—	—	3.5	—	—	Sn 6	Cu 其余	100HBS	—
	铝青铜	—	≤2.0	≤1.0	—	—	—	Al 7~9	Fe≤1.5	Cu 其余	120~160HB	T237
	锡黄铜	—	—	0.15~0.35	—	—	—	Zn 余量	Sn 0.8~1.2	Cu 59~61	—	HS221
	白铜	—	1.5	—	—	30	—	Ti 0.2	Fe 1.0	Cu 其余	350HBS	T307

③ 隔离层堆焊 焊接异种材料时, 为了防止母材成分对焊缝金属化学成分的不利影响, 以保证接头性能和质量, 而预先在母材表面 (或接头的坡口而上) 熔敷一定成分的金属层 (称隔离层)。熔敷隔离层的工艺过程, 称隔离层堆焊。

各类堆焊合金的主要性能特性见表 3.3。

多层堆焊时往往会产生粗大铸态组织、相变以及再结晶应力等问题, 使接头性能变差。堆焊基体材料和堆焊金属相互溶解度有限、物理化学性能差别很大的合金时, 由于堆焊时基

体材料的溶入会导致堆焊层金属的化学成分和金相组织不均匀或生成金属间化合物，应降低熔合比，尽量采用小电流、高焊速。

表 3.3 各类堆焊合金的主要特性

堆焊合金		硬度 HRC (HB)	主要特征	主要性能						
				耐金属间磨损	耐磨料磨损	耐高温磨损	耐气蚀性	耐腐蚀性	耐热性	耐冲击性
马氏 体型	低合金系	40~60	硬度高,耐磨性好,使用范围广泛	B	B	C	—	D	C	C
	Cr13系	40~60	耐蚀、耐磨性好,适于中温下工作	B	C	B	B	B	B	C
奥氏 体型	Mn13系	(200~500)	韧性好,加工硬化性大	D	B	D	C	D	D	A
	Mn16 Cr16系	(200~400)	高温硬度大,韧性好	B	C	C	B	B	B	B
	高Cr-Ni系	(250~350)	600~650℃下的硬度高,抗蚀性好	B	D	B	B	B	B	A
高铬铸铁合金		50~60	耐磨料磨损性优良,耐蚀、耐热性好	C	A	A	D	B	B	D
碳化钨合金		>50	抗磨料磨损性很好	D	A	D	D	D	D	D
钴基合金		35~58	高温硬度高,耐磨、耐热性良好	B	B	A	A	A	A	C

注: A—优; B—良好; C—中等; D—尚可。

### 3.2.2 堆焊金属的合金过渡

#### (1) 堆焊金属的渗合金方式

堆焊金属合金化过程是指把所需的合金元素通过焊接材料过渡到堆焊金属中去的过程。堆焊金属合金化的目的是获得具有特殊性能的堆焊金属,要求其表面具有耐磨性、耐热性或耐腐蚀性。

堆焊合金渗合金有以下几种基本方式。

##### 1) 用实芯合金焊丝渗合金

采用成分与堆焊合金近似的实芯焊丝渗合金的方法应用很普遍,可以制成焊丝、带极、板极、环状等多种形式。塑性较好的堆焊合金可以拉拔、轧制成形;塑性较差的合金(如高合金、合金铸铁)通过铸造成形,制作成棒状或带状。还可以采用将合金粉末冷压后在保护气氛中烧结成金属陶瓷带状堆焊材料。

这类渗合金方式的合金过渡系数最高、成分比较均匀。由于渗合金的数量基本不受限制,所以低、中、高合金成分都可以采用这种方法。主要缺点是合金制造工艺较复杂、成本较高。

##### 2) 用合金药皮或烧结焊剂渗合金

以低碳钢或其他金属做焊芯,在焊条药皮中加入铁合金、纯金属、化合物等成分向焊缝过渡合金,这是堆焊焊条中应用最广泛的一种渗合金方法。在埋弧堆焊中采用低碳钢焊丝配合含有合金元素的烧结焊剂渗合金。通过焊条药皮和烧结焊剂向堆焊金属中渗合金的方法简便灵活、制造方便、成本低。主要缺点是合金元素的过渡系数较低、堆焊金属成分不够稳定和均匀。由于渗合金的数量受到限制,所以一般适用于过渡各种低或中等合金含量的堆焊合金。

##### 3) 用药芯焊接材料渗合金

以低碳钢或合金钢、镍基、钴基、铜基合金做外皮，内装合金化药芯的堆焊材料，已获得广泛应用。其中药芯焊丝（或管状焊丝）最常用，也有采用粉末焊带的。药芯焊丝可用于气体保护堆焊、埋弧自动或半自动堆焊、明弧自保护堆焊、气体火焰堆焊。粉末焊带则主要用于埋弧自动堆焊和明弧自保护堆焊。

采用药芯焊接材料渗合金的方法合金过渡系数高，可以根据需要灵活地配制药芯成分，有一个较宽的堆焊成分范围。这种方法克服了高碳高合金难于拔制的困难，各类堆焊合金都可以采用这种渗合金方法。主要缺点是制造工艺复杂、价格较贵。

#### 4) 用合金粉末渗合金

合金粉末是用高压气流或高压水流将要求成分的熔化金属雾化成粒状合金。合金铸铁、钴基、镍基合金常制成合金粉末。渗合金时大多直接向堆焊区送入合金粉末，还可将合金粉末用黏结剂（或加上少量熔剂）调制成糊状，预选涂在被堆焊表面，然后以气体火焰、碳弧、高频热源、等离子弧等方法进行熔敷。这种方法容易获得较小的稀释率和层间均匀的堆焊层，成分也比较均匀，合金过渡系数也较高。主要缺点是制粉工艺较复杂。

#### 5) 用气相过渡少量元素

如在氮气介质中进行堆焊，可以向合金过渡氮元素，这对提高铬合金的耐磨性或调整奥氏体相的数量是有效的。

渗合金的方式各有优缺点，可以几种方法配合使用。选用渗合金方式时应注意的问题：

- ① 考虑不同堆焊方法的工艺特点，选用较合适的渗合金方式；
- ② 在保证堆焊层使用效果的前提下尽可能选用经济易行的方式。

#### (2) 稀释率及合金过渡系数

稀释率是指堆焊金属被稀释的程度，用母材金属或先前焊道的焊缝金属在整个堆焊焊缝中所占质量比来确定。通常，堆焊金属的成分同母材成分并不相同，特别是异质金属或合金堆焊时。当堆焊金属的合金成分主要来自填充金属时，局部熔化了了的母材在堆焊层中的效果被认为是稀释率。稀释率有时用熔合比来表示，即被熔化的母材部分在堆焊金属中所占的比例。

堆焊层以及熔合区的成分和性能受到稀释率的重要影响，堆焊金属稀释率的大小与焊接方法、接头形式、焊接层次及材料热物理性能有关。多层堆焊时，每一堆焊层的稀释率都不相同，因此堆焊焊缝金属的化学成分和性能也各不相同。在堆焊方法和设备已选定的情况下，应从堆焊材料成分上补偿稀释率的影响，并从严格工艺参数上来控制稀释率。手工电弧焊和电弧堆焊时各焊层的稀释率见表 3.4。

表 3.4 手工电弧焊和电弧堆焊时各焊层的稀释率/%

焊 层	手工电弧焊			手工电弧堆焊
	坡口角度 15°	坡口角度 60°	坡口角度 90°	
1	48~50	43~45	40~43	30~35
2	40~43	35~40	25~30	15~20
3	36~39	25~30	15~20	8~12
4	35~37	20~25	12~15	4~6
5	33~36	17~22	8~12	2~3
6	32~36	15~20	6~10	<2
7~10	30~35	—	—	—

合金过渡系数是指焊接材料中的合金元素过渡到焊缝金属中的数量与其原始含量的百分比。合金剂在堆焊过程中不是全部都过渡到堆焊金属中，而是有一部分损失。任何合金元素的过渡系数  $\eta$  等于它在熔敷金属中的实际数量与它的原始数量之比，即

$$\eta = \frac{C_d(1+K_b P_1)(1-\psi)}{C_{cw} + K_b C_{co}} \quad (3.1)$$

式中  $C_d$  ——合金元素在熔敷金属中的含量，%；  
 $K_b$  ——焊条药皮或药芯质量系数；  
 $P_1$  ——焊条药皮或焊丝药芯中金属添加剂的含量，%；  
 $C_{cw}$  ——合金元素在焊芯中的含量，%；  
 $C_{co}$  ——合金元素在药皮中的含量，%；  
 $\psi$  ——合金元素的损失系数。

药皮（药芯）质量系数是单位长度焊条（药芯焊丝）上药皮（药芯）的质量与焊芯（外皮）的质量之比。采用烧结焊剂堆焊时，应用焊剂的熔化率  $K$  代替式中的  $K_b$ 。焊剂熔化率等于同样焊接时间内熔化的焊剂质量与熔化的焊丝质量之比。

为了简化计算，实际上常用下式计算合金过渡系数，即

$$\eta = \frac{C_d}{C_{cw} + K_b C_{co}} \quad (3.2)$$

该式没有考虑各种损失和金属添加剂对熔敷金属质量的影响。一般情况下， $P_1 K_b \leq 0.1$  时，上式误差不超过 9%。但是，当  $P_1 K_b$  值比较大时（如通过药皮合金化的堆焊焊条），上式的误差可能是相当大的。

合金元素的过渡系数取决于焊接化学冶金的条件，并可通过试验得到。而差值  $(1-\eta)$  表明在给定焊接过程中元素的损失。若已知  $\eta$  值及有关的数据，可根据公式预先计算出合金元素在熔敷金属中的含量，也可以算出合金元素在堆焊金属中的含量。或者相反，根据对堆焊金属成分的要求，计算出合金元素在焊条或焊剂中应当具有的含量，然后再通过试验加以校正。

一般情况下，通过焊丝合金化时过渡系数比较大，而通过药皮合金化时过渡系数比较小。因为通过药皮合金化时，元素不仅有氧化损失，而且有残留损失。焊接中 Mn 元素的过渡系数见表 3.5。

烧结焊剂中合金剂粒度对过渡系数的影响见表 3.6。烧结焊剂埋弧焊焊剂的熔化率取决

表 3.5 焊接中 Mn 元素的过渡系数

Mn 含量及过渡系数 / %	药皮类型		
	氧化铁型	钛铁矿型	氧化锰型
药皮中的 Mn 含量	0.90	4.8	5.4
焊芯中的 Mn 含量	0.14~1.30	0.14~1.30	0.14~1.30
熔敷金属中的 Mn 含量	0.77~1.20	0.77~1.28	0.55~1.04
总过渡系数	8.4~11.8	15.6~21.6	10~15
由焊丝中的过渡系数	42	45	33
由药皮中的过渡系数	7~8	14~17	9.0~11.5

于工艺参数，但不论焊剂的熔化率如何随着堆焊电流和电弧电压变化，Mn 和 Cr 的过渡系数总是随着焊剂熔化率的增加而减小的。在同样焊剂熔化率的条件下，焊丝直径越小，Mn 的过渡系数也越小。

表 3.6 合金剂粒度对元素过渡系数的影响

合金剂粒度 / $\mu\text{m}$	元素过渡系数 /%			
	Mn	Si	Cr	C
<56	0.37	0.44	0.59	0.49
56~125	0.40	0.51	0.62	0.57
125~200	0.47	0.51	0.64	0.57
200~250	0.53	0.58	0.67	0.61
250~355	0.54	0.64	0.71	0.62
355~500	0.57	0.66	0.82	0.68
500~700	0.71	0.70	—	0.74

不易被氧化的合金剂或在无氧化条件下堆焊时，合金剂粒度对过渡系数实际上几乎没有影响。采用的堆焊方法不同，堆焊区域的氧化还原条件不一样，合金元素的过渡系数也不同。采用不同的焊接方法时合金元素的过渡系数见表 3.7。可以看出，采用同样的焊丝，氩弧焊时的合金过渡系数最大，埋弧焊时次之， $\text{CO}_2$  气体保护焊时再次之。手工电弧焊由于焊条药皮性质不同，合金过渡系数变化很大。

### 3.2.3 堆焊合金的应用特点

从选材角度看，现有的各种堆焊材料的分类极为繁杂，特别是一些很著名的材料不是以多数金属通用的标准化方法来分类，而是常以生产厂家的名字命名。表 3.8 给出美国焊接学会对堆焊合金的分类。这种分类方法从最硬、最耐磨的类型开始，逐渐转到韧性较好、较耐冲击的类型。

表 3.7 采用不同的焊接方法时合金元素过渡系数

焊接方法	焊丝	焊剂或药皮	元素过渡系数 /%								
			C	Si	Mn	Cr	W	V	Nb	Mo	Ni
空气中无 保护焊	H70W10Cr3Mn2V	—	0.54	0.75	0.67	0.99	0.94	0.85	—	—	—
	H18CrMnSiA	—	0.30	0.80	0.67	0.92	—	—	—	—	—
氩弧焊	H70W10Cr3Mn2V	—	0.30	0.79	0.88	0.99	0.99	0.98	—	—	—
埋弧焊	H70W10Cr3Mn2V	HJ251	0.53	2.03	0.59	0.83	0.83	0.78	—	—	—
	H70W10Cr3Mn2V	HJ431	0.33	2.25	1.13	0.70	0.80	0.77	—	—	—
$\text{CO}_2$ 保护焊	H70W10Cr3Mn2V	—	0.29	0.72	0.60	0.94	0.96	0.68	—	—	—
	H18CrMnSiA	—	0.60	0.71	0.69	0.92	—	—	—	—	—
Ar + $\text{O}_2$ 5% 气体保护焊	H18CrMnSiA	—	0.60	0.71	0.69	0.92	—	—	—	—	—
	H10MnSi	—	0.59	0.32	0.41	—	—	—	—	—	—



续表

焊接方法	焊丝	焊剂或药皮	元素过渡系数 / %								
			C	Si	Mn	Cr	W	V	Nb	Mo	Ni
手工电弧焊	H18CrMnSiA	赤铁矿 ( $K_b=0.3$ )	0.22	0.02	0.05	0.25	—	—	—	—	—
	H18CrMnSiA	大理石 ( $K_b=0.3$ )	0.28	0.10	0.14	0.45	—	—	—	—	
	H18CrMnSiA	萤石 ( $K_b=0.3$ )	0.67	0.88	0.38	0.89	—	—	—	—	
	H18CrMnSiA	CaO-BaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (80%)+CaF <sub>2</sub> (20%)	0.57	0.88	0.70	0.95	—	—	—	—	
	H18CrMnSiA	石英砂 ( $K_b=0.3$ )	0.20	0.75	0.18	0.80	—	—	—	—	
	H08A	钛钙型 ( $K_b=0.68$ )	—	0.71	0.38	0.77	Ti 0.23	0.52	0.80	0.60	0.96
	H08A	氧化铁型	—	0.20	0.10	0.64	—	—	—	0.71	—
	H08A	低氢型	—	0.20	0.50	0.77	—	0.62	—	0.84	—

由表 3.8 可见, 几乎所有可供采用的堆焊合金都是以 Fe、Ni、Co 或 Cu 为基的。其中碳是最重要的辅助元素, 碳能与 Cr、Mo、W、Mn、Si 合金化, 与这些合金元素结合形成硬而脆的化合物, 如铬的碳化物、钼的碳化物等。这些碳化物按硬度递减顺序是: 钨、铬、钼及铁的碳化物。

高含量的钨或铬与 2%~4% 的碳可形成比石英还硬的特殊碳化物晶体。熔炼的碳化钨 WC 或 W<sub>2</sub>C 的混合物是耐磨堆焊合金中最耐磨损的组分。高铬合金 (Cr 20%~30%) 中的碳化铬 (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) 比 WC 软且便宜。Fe 的碳化物 Fe<sub>3</sub>C, 即渗碳体, 在许多耐磨堆焊合金中应用, 而且常常以改变 Cr、Mo、W 合金元素的含量来进行调整。

W、Mo、V、Cr 还起着在 482~649℃ 范围内增进堆焊层高温强度的作用。25% 的 Cr 含量可得到高达 1649℃ 的抗氧化性能。选用 Ni 或 Co 作堆焊合金的基本组分可得到良好的高温强度。以 20%~25% 的 Cr 含量作保护元素并以 5%~15% 的 W 作强化元素构成的钴基合金, 在温度高于 649℃ 时具有最高的热硬性。Ni、Co、Cr 具有耐腐蚀性并可提高抗氧化性能。堆焊合金的耐磨性能则取决于碳的含量。

不同的工作条件对堆焊合金类型影响很大, 应根据堆焊工件的工作条件选择相应的堆焊合金。表 3.9 给出一些特殊工作条件下典型工件适用的堆焊合金类型及堆焊材料, 可供在实际应用中参考。

表 3.8 堆焊合金的分类 (美国焊接学会)

按基本类型分类	主要特点	应用实例
碳化钨 颗粒式铸条 粗粒管状焊丝 细粒管状焊丝	耐磨粒磨损性能最好 — 已磨损的表面粗糙 用气焊时性能最好	油井岩石钻头、工具组件 — 各种严重磨粒磨损条件 —
高铬铸铁 多元合金型  马氏体型 奥氏体型	耐腐蚀性能优良 含 W、Mo, 具有在 427~649℃ 的热硬性 可退火并可重新硬化 抗氧化性好	— 受热焦磨损件 — 炼油设备中 538℃ 催化剂的冲刷腐蚀, 用于沙 土的农业设备

续表

按基本类型分类	主要特点	应用实例
马氏体合金铸铁 Cr-W型 Cr-Mo型 Ni-Cr型	耐磨粒磨损性能好 抗压强度高 适用于轻微冲击 —	带轻微冲击的一般磨粒磨损 — 经受重复性金属-金属磨损和冲击的机械零件 —
奥氏体合金铸铁 Cr-Mo型、Ni-Cr型	抗裂性比马氏体铸铁好	带轻微冲击的一般冲刷磨损
Cr-Co-W合金 高碳型(C 2.5%) 中碳型(C 1.4%) 低碳型(C 1.0%)	高温强度及抗蠕变力 脆但耐磨粒磨损  韧性好、抗氧化	— 耐 649℃以上磨粒和热磨损 — 汽油发动机排气阀门、蒸汽轮机阀门
镍基合金 Ni-Cr-B型 Ni-Cr-B-W型 Ni-Cr-Mo型 Ni-Cr型	热硬性及耐冲刷磨损性好 — 耐腐蚀 耐排气的冲刷磨损 抗氧化性好	— 油井泥浆泵 — 卡车、大客车、飞机排气阀 —
铜基合金	耐擦伤、耐摩擦磨损	轴承表面
马氏体钢 高碳型(C 0.65%~1.70%) 中碳型(C 0.30%~0.65%) 低碳型(C <0.30%)	— 耐磨粒磨损性能满意 耐中等冲击 韧性好、抗裂性好	带中等冲击的一般磨粒磨损 — 热锻模 —
半奥氏体钢	韧性好、抗裂性好	一般低价耐磨堆焊
珠光体钢 低合金钢 一般碳素钢	抗裂性好、价廉 用于已磨损区的堆焊 用于耐磨堆焊底层金属	堆焊底层金属、恢复尺寸的堆焊 — —
奥氏体钢 Mn13-Mo1型 Mn13-Ni3型 Mn13-Ni-Cr型 高碳 Ni-Cr 不锈钢 低碳 Ni-Cr 不锈钢	韧性好、抗强烈冲击 耐磨粒和耐冲刷磨损性能好 屈服强度较低 各奥氏体型钢中屈服强度高 耐高温磨损、抗氧化 耐腐蚀、抗氧化	强烈冲击条件下的金属-金属间磨损 — — 红热条件下的摩擦磨损、炉子零件 大型油罐的耐蚀堆焊

表 3.9 一些特殊工作条件下典型工件适用的堆焊合金类型

工作条件		典型工件	堆焊合金类型	堆焊材料合金系
黏着磨损	常温	轴类、车轮 齿轮 冲模剪刀 轴瓦、低压阀密封面	低碳低合金钢(珠光体钢) 中碳低合金钢(马氏体钢) 中碳中合金钢(马氏体钢) 铜基合金	1Mn3Si, 2Mn4Si 4Cr2Mo, 4Cr9Mo3V 5CrW9Mo2V, 1Cr12V Al8Mn2, Sn8P0.3
	中温	阀门密封面	高铬钢	1Cr13
黏着磨损	高温	热锻模 热剪刀热拔伸模 — 热轧辊 阀门密封面 —	中碳低合金钢(马氏体钢) 中碳中合金钢(马氏体钢) 钴基合金 中碳中合金钢 铬镍合金钢(奥氏体钢) 镍基合金、钴基合金	5CrMnMo 3Cr2W8 Co30W5, Co30W8 3Cr2W8 Cr18Ni8Si5Mn, Cr18Ni12Si4Mo4 NiCrFe, Co30W5, Co30W8

续表

工作条件			典型工件	堆焊合金类型	堆焊材料合金系
黏着磨损+磨粒磨损			压路机链轮 排污阀	低碳低合金钢 高碳低合金钢(马氏体钢)	1Mn3Si, 2Cr15Mo 7Mn2Cr3Si, 5Cr2Mo2
磨粒磨损	常温	高应力	推土机板 铲斗齿	中碳中合金钢(马氏体钢) 合金铸钢	5Cr3Mo, 7CrMn2Si Cr4Mo4, Cr28Ni4Si4
		低应力	混凝土搅拌机 螺旋输送机 水轮机叶片	合金铸钢 碳化钨 中碳中合金钢(马氏体钢)	Cr27, W9B W45MnSi4 4Cr9Mo3V
	高温	高炉装料设备	高铬合金铸铁	Cr27, Cr28Ni4Si4	
磨料磨损+冲击磨损			颚式破碎机 挖掘机斗齿	中碳中合金钢(马氏体钢) 高锰钢(奥氏体钢)	7Mn2Cr3Si, 5Cr2Mo2 Mn13, Mn13Mo2
冲击磨损	常温		铁路道岔、履带板	高锰钢(奥氏体钢)	Mn13, Mn13Mo2
	高温		热剪机	高锰钢(奥氏体钢)	Mn13, Mn13Mo2
耐腐蚀	低温	海水	船舶螺旋桨	铜基合金	Al8Mn2, Sn8P0.3
	中温	水腐蚀	锅炉、压力容器	铬镍奥氏体钢	0Cr23Ni13
	高温	耐腐蚀	内燃机排气阀	钴基合金、镍基合金	Cr30W8, Cr30W12
		抗氧化	炉子零件	镍基合金	Cr23Ni13
气蚀	常温	水轮机叶片	铬镍奥氏体钢 钴基合金	Cr18Ni8Si5 Cr30W5	

### 3.3 堆焊方法及工艺特点

堆焊是焊接技术领域的一个重要分支, 又是表面工程中的一个主要技术手段。生产中采用的堆焊方法有很多种, 熔焊、钎焊、热喷涂和喷熔等工艺方法均可用于堆焊。目前常用的主要有氧-乙炔火焰堆焊、手工电弧堆焊、气体保护电弧堆焊和埋弧堆焊等。

#### 3.3.1 几种常用的堆焊方法

##### (1) 氧-乙炔火焰堆焊

采用普通氧-乙炔火焰焊接设备, 包括氧气瓶、乙炔瓶、减压表、焊炬和胶管等。在堆焊耐磨合金之前, 必须预先加工金属表面, 要求无油脂、无铁锈和其他表面污物。如果堆焊要求经受冲击的工件, 如冲头、剪刀或冲模等, 要求有边棱并应加工出一凹槽才能进行耐磨堆焊。

氧-乙炔火焰堆焊一般用于获得具有最小修整加工量的平滑表面。在熔敷无裂纹的碳化钨颗粒堆焊层时, 这一点特别重要。小块的碳化钨颗粒装在碳钢管中, 当钢管被火焰加热并熔化时, 碳化钨颗粒便熔化到碳钢基体的表面上形成耐磨合金层。

##### (2) 手工电弧堆焊

使用焊条定位的手工电弧堆焊的适应性很强, 应用广泛, 最常用于手工电弧短道耐磨堆焊, 也适用于各种合金的堆焊。这种堆焊方法设备简单、操作方便和机动灵活, 适宜于现场堆焊, 适应性强, 不受堆焊位置及工件形状的限制, 可以在任何位置进行堆焊, 小型或形状不规则零件尤为适合。手工电弧堆焊的缺点是生产率低, 稀释率较高, 不易获得薄而均匀的堆焊层, 生产条件差。

手工电弧堆焊时，应尽量减少稀释率和保持电弧稳定，使堆焊合金层质量均匀。常通过限制焊接工艺参数、运条方式、弧长等控制熔深以达到降低稀释率、稳定成分的目的。大面积堆焊时，应合理安排堆焊顺序，以控制焊接变形。由于手工电弧堆焊熔深较大，稀释率较高，容易导致堆焊层硬度和耐磨性下降，所以一般需堆焊2~3层。但堆焊层数多时，易导致开裂和剥离。为此应对工件预热、缓冷，预热温度由被堆焊工件的刚性等因素确定。

### (3) 气体保护电弧堆焊

气体保护电弧堆焊分为钨极气体保护电弧堆焊和熔化极气体保护电弧堆焊两种。

① 钨极气体保护电弧堆焊 采用钨极氩弧焊设备，包括焊接电源、送气装置和钨极焊把等，另填充耐磨堆焊合金焊丝。可以添加辅助焊丝（冷丝），使在熔敷金属的基体上得到要求的各种性能。所谓冷丝，是指它不参与产生电弧能量。在母材为高碳合金时，使用这种辅助焊丝形成的基体有助于减少裂纹。焊道可以用横向摆动或不摆动的方法焊成。

这种方法一般用于在新结构件上堆焊要求无缺陷的熔敷金属，而不是用于对已磨损的表面进行修复堆焊。

② 熔化极气体保护电弧堆焊 采用熔化极气体保护焊设备，包括焊接电源、送丝机构、焊枪、送气装置等。对于耐磨堆焊来说，最初认为这种方法堆焊的熔敷速度慢，后来对工艺作了改进，除了向下通过电弧的焊丝之外，又把一根附加的冷丝自动地送入熔池。添加这根冷丝可使熔敷速度提高0.5~1.5倍，熔敷速度可达9.52~15.87kg/h。这种方法同样可用于熔敷铜或不锈钢的堆焊层。

### (4) 埋弧堆焊

埋弧自动堆焊的电弧在焊剂下形成，由于熔渣的保护，减少了空气中 $N_2$ 、 $H_2$ 、 $O_2$ 对熔池的侵入。堆焊层化学成分均匀、成形美观。对于大批量相似工件的长直堆焊焊道来说，埋弧焊方法是最有实用价值的。采用多丝和摆动技术可以提高这种方法的生产率。采用摆动技术的前进速度可达到76.2~127mm/min。耐磨堆焊埋弧焊焊剂配合低碳钢焊丝一起使用，可使堆焊层金属的硬度达到58HRC。

埋弧堆焊的效率，适于自动化生产，特别适用于容器衬里堆焊等，但采用大线能量埋弧堆焊的主要缺点是硬化了的堆焊层可能产生裂纹。除了采用焊丝，为了提高堆焊熔敷效率，还可以采用带极埋弧堆焊。

### (5) 电渣堆焊

电渣堆焊的熔敷效率最高，板极电渣堆焊的熔敷效率可达150kg/h，而且能一次堆焊很大的厚度，因而稀释率并不高。但是由于电渣堆焊接头严重过热，堆焊后需要进行热处理。电渣堆焊的堆焊层不能太薄（一般应大于14~16mm），否则不能建立稳定的电渣过程。电渣堆焊主要用于需要较厚的堆焊层、堆焊表面形状比较简单的大、中型零件。

电渣堆焊可采用实芯焊丝、药芯焊丝、板

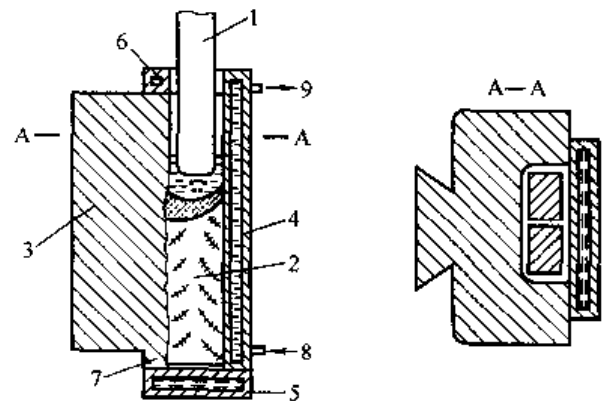


图 3.2 板极电渣堆焊制造双金属热锻模的示意

- 1 板极；2—堆焊金属；3—模体；4—成形水套；
- 5 水冷底板；6—引出板水套；7—引弧余量；
- 8—进水口；9—出水口

极或带极等进行堆焊。图 3.2 所示为板极电渣堆焊制造双金属热锻模的示意。堆焊前在模体工作部位开槽，根据型槽尺寸和电渣焊机功率选择板极尺寸。较宽的型槽应采用多板极堆焊，这样可以改善热量分布。板极与型槽的间隙一般相距 20~25mm。采用焊剂 431，电弧电压 40~50V，渣池深度 40~50mm。

除了堆焊平面外，电渣堆焊还可以用焊丝或管状电极堆焊圆柱面，如图 3.3 所示。也可以用于端部平面的堆焊（见图 3.4）。对于挖掘机斗齿等端面形状不规则的零件，可采用对接电渣堆焊的方法，如图 3.5 所示。这种方法是先将工件端部固定有堆焊合金棒的零件作为电极，在成形槽中进行电渣堆焊。

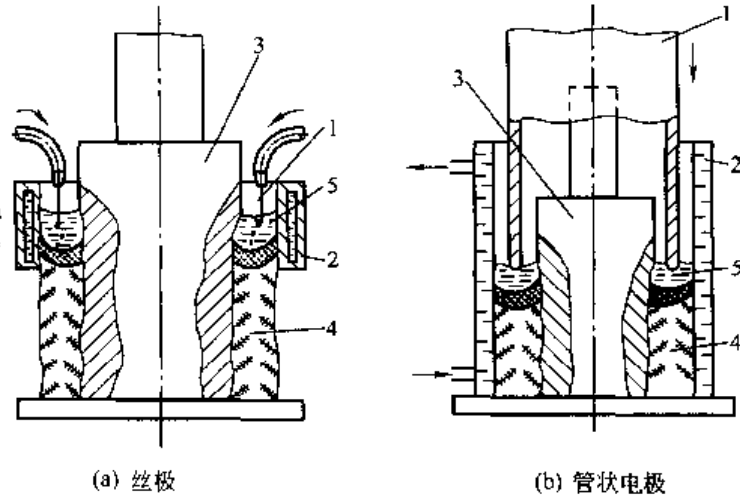


图 3.3 圆柱表面的电渣堆焊示意

1—电极；2—结晶器；3—堆焊零件；4—堆焊层；5—渣池

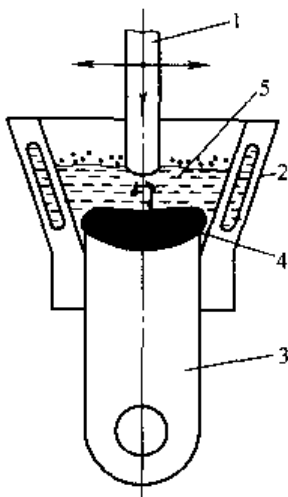


图 3.4 端部平面的电渣堆焊

1—电极；2—结晶器；3—堆焊零件；  
4—堆焊层；5—渣池

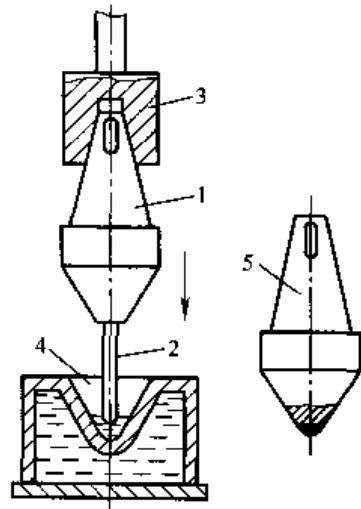


图 3.5 对接电渣堆焊

1—零件；2—合金电极；3—夹具；  
4—铜成形槽；5—堆焊成的零件

### 3.3.2 常用堆焊工艺的比较

堆焊是用焊接方法在零件表面堆敷一层具有一定性能材料的工艺过程，目的是使零件表面获得具有耐磨、耐热、耐蚀等特殊性能的熔敷金属。例如在普通碳素钢工件的磨损面上堆

焊一层耐磨合金，不但可以降低成本而且可以获得优异的综合性能。

有些堆焊方法（如钨极氩弧焊、气焊）依靠钨极产生的电弧或采用气体火焰来熔化焊丝，焊丝仅作为填充材料堆敷在工件表面，如图 3.6 所示。在另一类堆焊方法中（如熔化极气体保护焊、埋弧焊），焊丝作为熔化电极，不仅传导电流，产生电弧，同时也作为填充金属堆敷在工件表面，如图 3.7 所示。这类作为熔化电极的焊丝可以是实芯焊丝，也可以是药芯焊丝或金属带极。

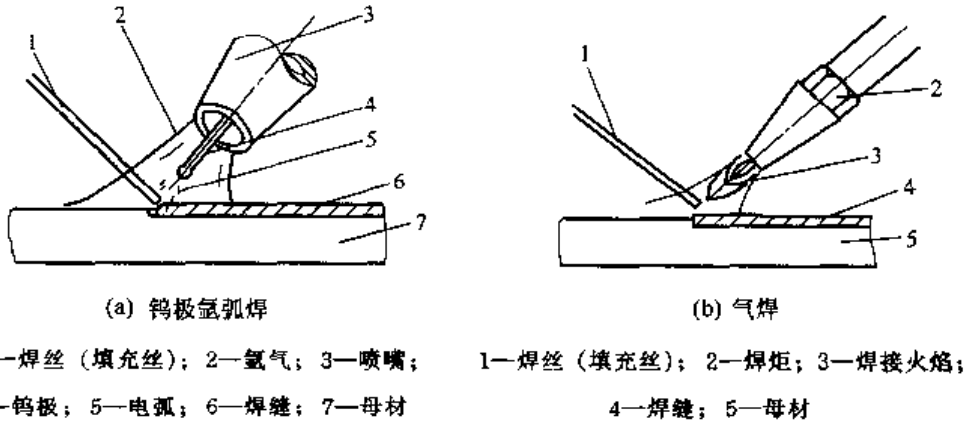


图 3.6 焊丝只作为填充材料的堆焊方法示例

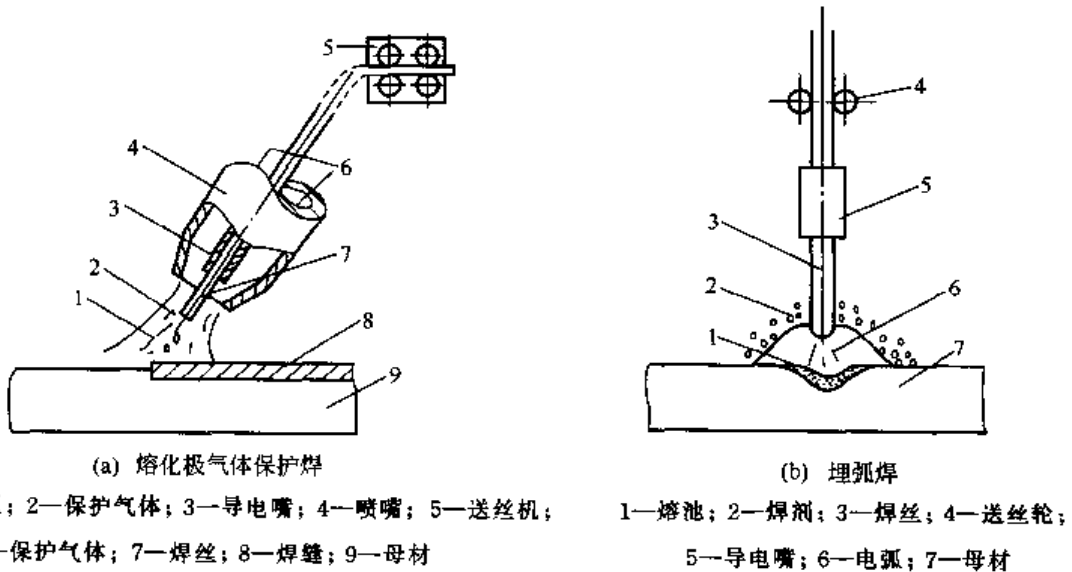


图 3.7 焊丝作为熔化电极的堆焊方法示例

常用堆焊方法所采用的堆焊材料见表 3.10。

表 3.10 常用堆焊方法所采用的堆焊材料

堆 焊 方 法	堆 焊 材 料
氧-乙炔火焰堆焊、气体保护电弧堆焊、埋弧堆焊、等离子弧堆焊、振动堆焊	实芯堆焊焊丝（直径 0.5~5.8mm）药芯堆焊焊丝
埋弧堆焊、电渣堆焊	带状电极（厚 0.4~0.8mm，宽 30~300mm）

续表

堆 焊 方 法	堆 焊 材 料
氧-乙炔火焰堆焊、钨极氩弧堆焊、等离子弧堆焊	铸条状 (直径 2.2~8.0mm)
等离子弧堆焊、氧-乙炔火焰堆焊	粉(粒)状
手工电弧堆焊	堆焊焊条 (钢芯、铸芯、药芯)
气体保护电弧堆焊、自保护电弧堆焊、埋弧堆焊、氧-乙炔火焰堆焊、钨极氩弧堆焊、等离子弧堆焊	药芯焊丝

几种常用堆焊方法的熔敷速度、最小堆焊层厚度和熔敷效率等工艺性特点的比较见表 3.11。

表 3.11 几种常用堆焊方法的特点比较

堆 焊 方 法		稀 释 率 <sup>①</sup> /%	熔 敷 速 度 /kg·h <sup>-1</sup>	最 小 堆 焊 厚 度 /mm	熔 敷 效 率/%
氧-乙炔火焰堆焊	手工送丝	1~10	0.5~1.8	0.8	100
	自动送丝	1~10	0.5~6.8	0.8	100
	粉末堆焊	1~10	0.5~1.8	0.8	85~95
焊条电弧堆焊		10~20	0.5~5.4	3.2	65
钨极氩弧堆焊		10~20	0.5~4.5	2.4	98~100
熔化极气体保护电弧堆焊		10~40	0.9~5.4	3.2	90~95
自保护电弧堆焊		15~40	2.3~11.3	3.2	80~85
埋弧堆焊	单丝	30~60	4.5~11.3	3.2	95
	多丝	15~25	11.3~27.2	4.8	95
	串联电弧	10~25	11.3~15.9	4.8	95
	单带极	10~20	12~36	3.0	95
	多带极	8~15	22~68	4.0	95
等离子弧堆焊	自动送粉	5~15	0.5~6.8	0.8	85~95
	手工送粉	5~15	0.5~3.6	2.4	98~100
	自动送丝	5~15	0.5~3.6	2.4	98~100
	双热丝	5~15	13~27	2.4	98~100
电渣堆焊		10~14	15~75	10~14	95~100

① 指单层堆焊结果。

### 3.3.3 堆焊工艺方法的选择

常用堆焊工艺方法有手工电弧堆焊、药芯焊丝气体(自)保护电弧堆焊及埋弧堆焊。其他堆焊工艺,如氧-乙炔火焰堆焊和钨极氩弧焊等,也可以使用,但因其效率低而未能广泛应用。

选择合适的堆焊方法时,应着重考虑下列因素:

- ① 有低的稀释率,较高的熔敷速度和效率;
- ② 现有焊接设备及工装,焊工技术水平;
- ③ 所需堆焊工件的尺寸、形状复杂程度和是否批量生产;
- ④ 堆焊金属件的堆焊位置,堆焊材料形状是否满足工件堆焊要求;
- ⑤ 有无所需堆焊的材料(焊条、焊丝、带极、焊剂等);
- ⑥ 低的综合成本。

对于小批量生产，最普通、最经济的方法是焊条手工电弧堆焊。对于几何形状不太复杂的大型、重复性工件，最经济的方法一般是自动电弧堆焊，这可以是明弧焊，也可以是埋弧自动焊。

### 3.4 堆焊合金的成分及特性

#### 3.4.1 堆焊焊条

##### (1) 堆焊焊条的型号与牌号

根据 GB/T 984—1985《堆焊焊条》标准规定，堆焊焊条型号按熔敷金属化学成分及药皮类型划分。堆焊焊条型号编制方法为：首字母“E”表示焊条；型号第二位“D”表示堆焊焊条；型号中第三位至倒数第三位表示焊条特点，用拼音字母或化学元素符号表示堆焊焊条的型号分类，见表 3.12。

表 3.12 堆焊焊条的型号分类

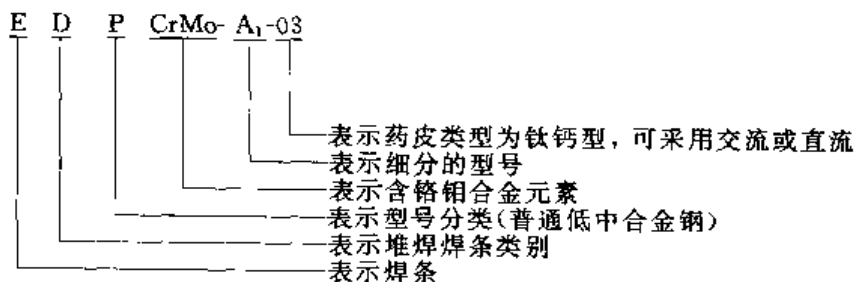
型号分类	熔敷金属类型	型号分类	熔敷金属类型
EDP××-××	普通低中合金钢	EDD××-××	高速刀具钢
EDR××-××	热强合金钢	EDZ××-××	合金铸铁
EDCr××-××	高铬钢	EDZCr××-××	高铬铸铁
EDMn××-××	高锰钢	EDCoCr××-××	钴基合金
EDCrMn××-××	高铬锰钢	EDW××-××	碳化钨
EDCrN××-××	高铬镍钢	EDT××-××	特殊型

焊条型号中最后二位数字表示焊条药皮类型及焊接电源种类，用短划“-”与前面符号分开，见表 3.13。如在同一基本型号内有几个分型时，可用字母 A、B、C 等标志，如再细分可加注下角数字 1, 2, 3, …，如 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 等，此时再用短划“-”与前面符号分开。

表 3.13 堆焊焊条型号中药皮类型的数字表示

焊条型号	药皮类型	药皮主要成分	焊接电源
ED××-00	特殊型	—	AC 或 DC
ED××-03	钛钙型	氧化钛 30%以上，碳酸盐 20%以下	AC 或 DC
ED××-15	低氢钠型	钙、镁的碳酸盐和萤石	DC
ED××-16	低氢钾型	钙、镁的碳酸盐和萤石	AC 或 DC
ED××-08	石墨型	含有多量石墨	AC 或 DC

堆焊焊条型号举例：





焊条牌号 D××× 中的首字母“D”（或汉字“堆”）表示堆焊焊条。牌号第一位数字表示堆焊焊条的用途或熔敷金属的主要成分类型（见表 3.14），第二位数字表示同一用途或熔敷金属主要成分中的不同牌号，对同一药皮类型的堆焊焊条按 0, 1, 2, …, 9 顺序排列；牌号第三位数字表示药皮类型和焊接电源种类（见表 3.15）。对于任一给定的焊条，只要从表中查出字母所表示的含义，就可以掌握这种焊条的主要特征。

堆焊焊条牌号举例：

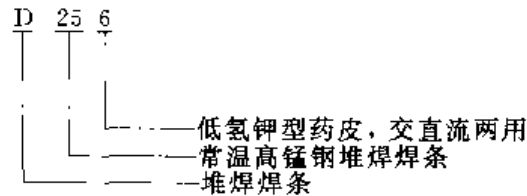


表 3.14 堆焊焊条牌号的前两位数字含义

焊条牌号	主要用途或主要成分类型
D00×-09×	不规定
D10×-24×	不同硬度的常温堆焊焊条
D25×-29×	常温高锰钢堆焊焊条
D30×-49×	刀具工具用堆焊焊条
D50×-59×	阀门堆焊焊条
D60×-69×	合金铸铁堆焊焊条
D70×-79×	碳化钨堆焊焊条
D80×-89×	钴基合金堆焊焊条
D90×-99×	待发展的堆焊焊条

表 3.15 焊条牌号中第三位数字的含义

焊条牌号	药皮类型	焊接电源种类	焊条牌号	药皮类型	焊接电源种类
□××0	未作规定	未作规定	□××5	纤维素型	DC 或 AC
□××1	氧化钛型	DC 或 AC	□××6	低氢钾型	DC 或 AC
□××2	钛钙型	DC 或 AC	□××7	低氢钠型	DC
□××3	钛铁矿型	DC 或 AC	□××8	石墨型	DC 或 AC
□××4	氧化铁型	DC 或 AC	□××9	盐基型	DC

各测定点的硬度值与平均值的偏差不应超出平均值的±15，对于气密性要求较高的阀门堆焊焊条和硬度值小于或等于 30HRC 的堆焊焊条，各测定点的硬度值与平均值的允许偏差为±4。

堆焊焊条的试验母材采用 GB 700 规定的 Q235 钢或化学成分相当的其他牌号低碳钢。堆焊焊条的工艺性能试验可在堆焊硬度试样的过程中进行。观察焊条熔化及堆焊层形成情况，冷却后除去熔渣，检查堆焊表面质量，然后除去表层约 1~2mm，检查堆焊金属内部缺陷。

堆焊层熔敷金属硬度试验应在厚度等于或大于 16mm 钢板上按平焊位置进行堆焊，堆焊至少 4 层，每道焊缝宽度不得大于焊条直径的 4 倍。堆焊过程中，每焊完一道，焊缝应冷却至  $(100 \pm 10)^\circ\text{C}$  再开始堆焊下一道焊缝。对于要求预热或需进行焊后热处理的焊条，按焊条说明书推荐的预热和焊后热处理规范进行。堆焊金属顶面尺寸不得小于  $15\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。

(2) 堆焊焊条的化学成分和用途

手工电弧堆焊用的焊条多以冷拔焊丝作焊芯，也可用铸芯或管芯。堆焊焊条的药皮类型一般有钛钙型、低氢型和石墨型三种。为了使堆焊金属具有良好的抗裂性及减少焊条中合金元素的烧损，大多数情况下采用低氢型药皮的堆焊焊条。

堆焊焊条型号及堆焊层金属的化学成分和硬度平均值应符合表 3.16 规定。国内外堆焊焊条的型号（或牌号）对照表见表 3.17。

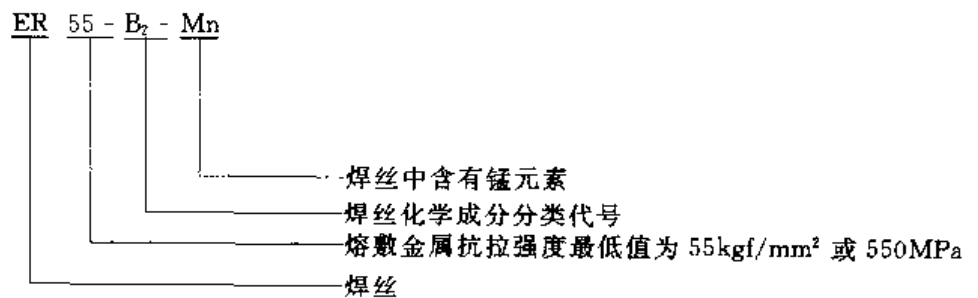
3.4.2 堆焊焊丝、焊带

按制造方法与焊丝的形状，堆焊用焊丝可分为实芯焊丝和药芯焊丝两大类，其中药芯焊丝又可分为气体保护和自保护焊丝两种。按采用的堆焊工艺方法，可分为气体保护焊、埋弧焊、火焰堆焊、等离子弧堆焊焊丝。按其化学成分类别，可分为铁基堆焊用焊丝和非铁基堆焊用焊丝。铁基堆焊焊丝又分为马氏体钢堆焊焊丝、奥氏体钢堆焊焊丝、高铬合金铸铁堆焊焊丝、碳化物类堆焊焊丝等；非铁基堆焊焊丝又分为钴基合金堆焊焊丝、镍基合金堆焊焊丝。

(1) 堆焊用实芯焊丝

气体保护堆焊用低合金钢焊丝型号的表示方法为 ER××-×，字母“ER”表示焊丝，ER 后面的两位数字表示熔敷金属的抗拉强度最低值，短划“-”后面的字母或数字表示焊丝化学成分分类代号。如还附加其他化学元素时，直接用元素符号表示，并以短划“-”与前面数字分开。

实芯焊丝型号举例：



镍及镍合金焊丝型号的表示方法为 ERNi××-×，字母 ER 表示焊丝，ER 后面的化学符号 Ni 表示为镍及镍合金焊丝，焊丝中的其他主要合金元素用化学符号表示，放在符号 Ni 的后面，短划“-”后面的数字表示焊丝化学成分分类代号。

焊丝型号举例：

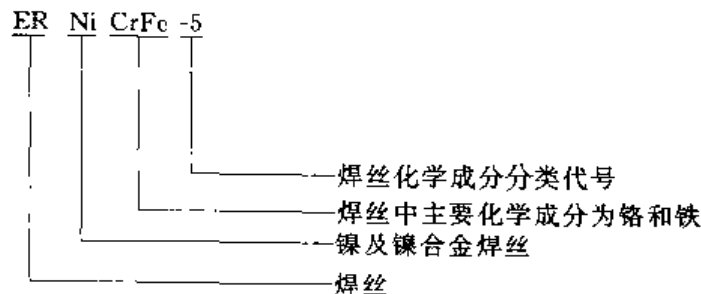


表 3.16 堆焊焊条型号及堆焊层的化学成分和硬度

焊条型号	堆焊层金属化学成分, %											堆焊层 硬度 HRC (HB)				
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Co	B		S	P	其他元素总量	
EDPMn2-X-X		3.50														22
EDPMn3-X-X		4.20														28
EDPMn4-X-X	0.20	4.50												2.00		30
EDPMn5-X-X		5.20														40
EDPMn6-X-X	0.15	6.50	1.00													50
EDPCrMo-A1-X-X	0.25			2.00		1.50								2.00		22
EDPCrMo-A2-X-X				3.00		2.50										30
EDPCrMo-A3-X-X	0.50			2.50		4.00										40
EDPCrMo-A4-X-X	0.30~0.60			5.00												
EDPCrMnSi-X-X	0.50~1.00	2.50	1.00	3.50										1.00		50
EDPCrMoV-A1-X-X	0.30~0.60			8.00~10.0		3.00		0.50~1.00								
EDPCrMoV-A2-X-X	0.45~0.65			4.00~5.00		2.00~3.00		4.00~5.00						4.00		
EDPCrSi-A-X-X	0.35		1.80	6.50~								0.20~0.40				55
EDPCrSi-B-X-X	1.00	0.80	1.50~3.00	8.50								0.03	0.03			45
EDPCrMnMo-X-X	0.60	2.50	1.00	2.00		1.00						0.50~0.90				60
EDPCrW-X-X	0.25~0.55			2.00~3.50										1.00		40,45
EDPCrMoWV-A1-X-X	0.50			5.00		2.50	7.00~	1.00								48
EDPCrMoWV-A2-X-X	0.30~0.50			5.00~6.50		2.00~3.00	10.00	1.00~3.50								55
EDPCrMoWV-A3-X-X	0.70~1.00			3.00~4.00		3.00~5.00	4.50~6.00	1.50~3.00						1.50		50

续表

焊条型号	堆焊层金属化学成分 / %													堆焊层 硬度 HRC (HB)	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Co	B	S	P		其他元素 总量
EDCrMoWC-A-X	0.08~	0.30~	0.80~	2.00~4.20		3.80~6.20	5.00~8.00	0.50~1.10		12.70~					52~58
EDPCrMoWC-B-X	0.12	0.70	1.60	1.80~3.20		7.80~11.20	8.80~12.20	0.40~0.80		16.30					62~66
EDCrAl-X	0.15									19.30		0.03	0.04	2.50	40
EDCrA2-X	0.20			10.0~16.0	6.00	2.50	2.00								37
EDCrB-X	0.25													5.00	45
EDMn-A-X	1.10	11.0~16.0	1.30											1.00	(170)
EDMn-B-X		11.0~8.0	0.30~1.30			2.50									
EDCrMn-A-X	0.25	6.00~8.00	1.00	12.0~14.0											38~48
EDCrMn-B-X	0.80	11.0~16.0	0.80	13.0~17.0										4.00	20
EDCrMn-C-X	1.10	12.0~18.0	2.00	12.0~18.0	6.00	4.00								3.00	28
EDCrMn-D-X	0.50~0.80	24.0~27.0	1.30	9.50~12.50											(210)
EDCrNi-A-X	0.18	0.60~2.00	4.80~6.40	15.0~18.0	7.00~9.00										(270~320)
EDCrNi-B-X		0.60~5.00	3.80~6.50	14.0~21.0	6.50~12.00	3.50~7.00			0.50~						
EDCrNi-C-X	0.20	2.00~3.00	5.00~7.00	18.0~20.0	7.00~10.00				1.20					2.50	37
EDD-A-X	0.70~1.00					4.00~6.00	5.00~7.00	1.00~2.50				0.03			
EDD-B-X	0.50~0.90			3.00~		6.00~9.50		0.80~1.30					0.04	1.00	55
EDD-C-X	0.30~0.05	0.60	0.80	5.00		5.00~	9.00	1.20							
EDD-D-X	0.70~1.00			3.80~			17.00~	1.00~1.50				0.035		150	
				4.50			19.50								

堆焊层金属化学成分 / %

焊条型号	堆焊层													其他元素总量	硬度 HRC (HB)			
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Co	B	S	P					
EDZ-A1-X X	2.50~4.50			3.00~5.00		3.00~5.00												
EDZ-A2-X X	3.00~4.50	1.50	2.50	26.0~34.0		2.00~3.00	—									3.00		60
EDZ-A3-X X	4.80~6.00			35.0~40.0		4.20~5.80										—		
EDZ-B1-X X	1.50~2.20	—	—	—												1.00		50
EDZ-B2-X X	3.00			4.00~6.00												3.00		60
EDZCr-A-X X	1.50~3.50	1.50~3.00	1.50	28.0~32.0	5.00~8.00													40
EDZCr-B-X X	3.50	1.00	—	22.0~32.0	—											7.00		45
EDZCr-C-X X	2.50~5.00	8.00	1.00~4.80	25.0~32.0	3.00~5.00											2.00		48
EDZCr-D-X X	3.00~4.00	1.50~3.50	3.00	22.0~32.0												6.00		58
EDCoCr-A-X X	0.70~1.40																	40
EDCoCr-B-X X	1.00~1.70			25.0~32.0														44
EDCoCr-C-X X	1.75~3.00	2.00	—	25.0~33.0	—											4.00		53
EDCoCr-D-X X	0.20~0.50			23.0~32.0														28~35
EDW-A-X X	1.50~3.00			—														
EDW-B-X X	1.50~4.00	3.00	4.00	3.00	3.00	7.00	50.0~70.0									3.00		60
EDTV-X X	0.25	2.00~3.00	1.00	—	—	2.00~3.00	—	5.00~8.00								—	0.03	(180)

表 3.17 国内外堆焊焊条型号 (或牌号) 对照

GB	中 国		前苏联	美 国	日 本			德 国		瑞 士	比 利 时	瑞 典	
	牌号	台湾省天泰			TOCT	AWS	JIS	神钢	新日铁				DIN
EDMn-A-16	D256	TH-MN	—	EFeMn-A	DF-MA	HF-11	H-13M	E7-UM-200-KP	—	—	CITOMANGAN	SUPER MANGAN B/MANG-AL20	OK Selec trode86.28
EDMn B-16	D266	—	—	EFeMn-B	DF-MA	—	—	E7-250-K-covered	SH Braun	SMA 13	—	—	
EDCrMn-B-16	D276	—	Э-65Х25 Г13Н3	—	DF-ME	—	H-MCr H-16CrM	—	—	—	—	—	
EDCr-Al-03	D502	—	Э-20Х13	—	DF-4A	HF-13	H-11Cr	—	—	—	—	—	
EDZCr-C-15	D667	TH-950HC	Э-300Х28 H4C4	EFeCr-Al	—	—	—	E10-60-r-covered	SH Chr-omahart	—	—	—	
EDCoCr-A-03	D802	SL-A	—	ECoCr-A	DF-CoCrA	HF-6	—	E20-40zct-coated	—	COBAL THERME16	STELAR-TEEND6/COBAL6	OK Selec trode93.06	
EDCoCr-B-03	D812	SL-B	—	ECoCr-B	DF-CoCrB	HF-3	—	E20-50zct-coated	—	—	STELAR-TEND12/COBAL12	—	
EDCoCr-C-03	D822	SL-C	—	ECoCr-C	DF-CoCrC	HF-1	—	E20-55zct-coated	—	—	STELAR-TEND1/COBAL1	—	
EDCoCr-D-03	D842	—	—	—	DF-CoCrD	HF-21	—	—	—	—	—	—	

焊丝牌号可以由生产厂制定，也可由行业组织同意命名，制定全国焊材行业统一牌号，但必须符合国家标准要求。实芯焊丝牌号的首位字母“H”表示焊接用实芯焊丝，后面的一位或二位数字表示含碳量，其他合金元素含量的表示方法与钢材的表示方法大致相同。化学元素符号及其后的数字表示该元素的近似含量；牌号尾部标有“A”或“E”时，A表示硫、磷含量要求低的优质钢焊丝，“E”表示硫、磷含量要求特别低的特优质钢焊丝。

为了增加耐磨性，需要从焊丝中过渡一定量的合金元素。低合金钢实芯焊丝可以通过自身的合金，再配合以合金焊剂来达到所需要的堆焊成分及耐磨性能。一些不锈钢焊丝，可以同时作为堆焊用焊丝，如H00Cr21Ni10、H1Cr24Ni13、H1Cr13等。

表面堆焊用实芯焊丝因含碳或合金元素较多，难于加工制造，主要采用液态连铸拉丝方法进行小批量生产。含碳量或合金含量高的特殊焊丝，可以通过线材水平连铸来提供各种成分的实芯焊丝。但对于硬而脆的材质，难以盘状供货，只能以直条状供货。

为了提高冷作模具的耐磨性，可以在模具表面堆焊钢结硬质合金。目前生产的堆焊用硬质合金焊丝主要有三类：即高铬合金铸铁（索尔玛依特）、钴基（司太立）合金及镍基合金焊丝。

硬质合金堆焊焊丝可采用氧-乙炔、气电焊等方法堆焊，其中氧-乙炔堆焊虽然生产效率低，但设备简单，堆焊时熔深浅，母材熔化量少，堆焊质量高，因此应用较广泛。国内常用硬质合金堆焊焊丝的成分特点及用途见表3.18。伊萨集团美国分公司耐磨堆焊焊丝的成分、特征与用途见表3.19。国内外硬质合金堆焊焊丝的牌号（或型号）对照见表3.20。

表 3.18 常用硬质合金堆焊焊丝的成分特点及用途

牌 号	名 称	化学成分/%	堆焊层常 温硬度 HRC	主要特点及用途
HS101	高铬铸铁 堆焊焊丝	C 2.5 ~ 3.3, Cr 25~31, Ni 3~5, Si 2.8~4.2, Fe 余量	48~54	堆焊层具有优良的抗氧化和耐气蚀性能,硬度高、耐磨性好,但工作温度不宜超过 500℃,否则硬度降低。用于堆焊要求耐磨损、抗氧化或耐气蚀的场合,如铲斗齿、泵套、柴油机气门、排气叶片等的堆焊
HS103	高铬铸铁 堆焊焊丝	C 3~4, Cr 25~32, Co 4~6, B 0.5~ 1.0, Fe 余量	58~64	堆焊层具有优良的抗氧化性,硬度高、耐磨性好,但抗冲击性能差,难以进行切削加工,只能研磨。用于要求强烈耐磨损的场合,如牙轮钻头小轴、煤孔挖掘机、破碎机辊、泵缸筒、混合叶片等的堆焊
HS111	钴基堆焊焊丝 (相当于 AW SRCoCr-A)	C 0.9~1.4, Cr 26~ 32, W 3.5~6.0, Fe ≤ 2.0, Co 余量	40~45	是 Co-Cr-W 合金中 C 和 W 含量最低、韧性最好的一种,能承受冷热条件下的冲击,裂纹倾向小,有良好的耐蚀、耐热和耐磨性。用于要求在高温工作时能保持良好的耐磨性及耐蚀性的场合,如高温高压阀门、热剪切刀刃、热锻模等的堆焊

续表

牌 号	名 称	化学成分/%	堆焊层常 温硬度 HRC	主要特点及用途
HS112	钴基堆焊焊丝 (相当于 AWSR- CoCr-B)	C 1.2~1.7, Cr 26~ 32, W 7~9.5, Fe≤2.0, Co 余量	45~50	在 Co-Cr-W 合金中具有中等硬度,耐磨性比 HS111 好,但塑性稍差,具有良好的耐蚀、耐热及耐磨损性能,在 650℃ 高温下仍能保持这些性能。用于高温高压阀门、内燃机阀、化纤剪刀刃口、高压泵轴套和内衬筒套、热轧辊等的堆焊
HS113	钴基堆焊焊丝	C 2.5~3.3, Cr 27~ 33, W 15~19, Fe≤2.0, Co 余量	55~60	堆焊层硬度高、耐磨性非常好,但抗冲击性较差,堆焊时产生裂纹倾向大,具有良好的耐蚀、耐热及耐磨性能,在 650℃ 高温下仍能保持这些性能。主要用于齿轮钻头轴承、锅炉的旋转叶片、粉碎机刃口、螺旋送料机等磨损部件的堆焊
HS114	钴基堆焊焊丝	C 2.4~3.0, Cr 27~ 33, W 11~14, Fe≤2.0, Co 余量	≥52	高碳 Co-Cr-W 合金堆焊焊丝,耐磨性、耐蚀性好,但抗冲击韧性差。主要用于高温工作的燃气轮机、飞机发动机涡轮叶片、齿轮钻头轴承、锅炉旋转叶片等磨损部件的堆焊
HS115	钴基堆焊焊丝 (相当于 AWSSR- CoCr-E)	C 0.15~0.35, Cr 25.5~29, Mo 5~ 6, Ni 1.75~3.25, Co 余量	≥27	用 Mo 强化的低碳 Cr-Mo 焊丝,耐高温腐蚀、耐冲击性及高温强度高。用于各种阀门、阀座、水轮机叶片、铸模及挤压模的堆焊
HS116	钴基堆焊焊丝 (相当于 AWSRCo Cr-C)	C 0.70~1.20, Cr 30~34, W 12.5~ 15.5, Co 余量	46~50	堆焊层有较高的耐磨性和高温强度,但韧性较差。在硫酸、磷酸、硝酸条件下有较好的耐蚀性。用于铜基及铝基合金的热压模等的堆焊
HS117	钴基堆焊焊丝	C 2.30~2.60, Cr 31~34, W 16~18, Co 余量	≥53	堆焊层有较强的耐磨料磨损及耐腐蚀性,在 800℃ 高温也能保持这些特性。用于泵的套筒和旋转密封环、磨损面板等的堆焊

表 3.19 伊萨集团美国分公司的耐磨堆焊焊丝

牌号	焊接 电源	直径 /mm	特征与用途	熔敷金属化学成分/%					堆焊层硬 度 HRC
				C	Si	Mn	Cr	其他	
Wear-O- Matic 3	直流正接 或直流反接	2.8	自保护焊丝,适于碳钢和低合金钢多层堆焊。推荐用于碳钢和低合金钢表面堆焊的打底层,以及要求表面可机械加工的场合	0.07	2.00	2.00	0.50	Mo (0.50)	36
Wear-O- Matic Ni- Mn	直流正接	2.8	自保护半自动焊丝,抗拉强度和屈服强度较高,用于奥氏体锰钢的焊接和堆焊,焊缝金属塑性好,适于作为连续堆焊层的底层	0.60	0.60	13.50	—	Ni (3.90)	48(加 工硬化)



续表

牌号	焊接电源	直径/mm	特征与用途	熔敷金属化学成分/%					焊层硬度 HRC
				C	Si	Mn	Cr	其他	
Wear-O-Matic BR	直流正接	1.6 2.0 2.4	气体保护焊丝,设计用于机车和货车轮箍的堆焊维修,采用98%Ar+2%O <sub>2</sub> 混合气体保护,熔敷效率可达98%,没有飞溅和焊渣,堆焊层金属硬度35~40HRC,耐磨性好,可机械加工	0.12	0.37	1.60	2.50	Mo (0.55)	35~40
Wear-O-Matic WH	直流正接	2.8	碳钢与锰钢半自动自保护焊的多用途焊丝,可用于受冲击和压缩载荷构件的堆焊。合金含量高,既可作为高强度的填充焊材,又可作为一种良好的加工硬化耐磨堆焊材料,焊缝组织是奥氏体	0.38	0.47	4.23	20.20	Ni (9.65)	41 (加工硬化)
Wear-O-Matic Super WH	直流正接	2.8	自保护堆焊焊丝,熔敷金属韧性好,可加工硬化。用于受冲击兼磨损件的堆焊,多层堆焊时不产生开裂和剥落现象	1.10	0.65	15.00	17.00	Ni (1.40)	47~49 (加工硬化)
Wear-O-Matic 6	直流正接 或直流反接	2.8	自保护焊耐磨合金焊丝,抗冲击能力强,耐磨性好。用于碳钢、低合金钢和锰钢件,推荐用于受冲击和磨损的场合,如装载机铲斗、铲刀刃、电铲、推土机、挖掘机等的堆焊	0.65	0.20	2.60	3.00	Mo (0.50)	48
Wear-O-Matic 12	直流正接	2.8	自保护耐磨堆焊合金焊丝,具有较高的抗压强度和硬度,耐磨性好,适于抗强烈冲击和压应力的场合。推荐用于装载机铲斗、挖掘机和锤头等的堆焊	2.30	1.00	0.30	17.00	Mo (0.80)	50
Wear-O-Matic 40	直流正接	2.8	自保护耐磨堆焊合金焊丝,Cr、C含量高,耐磨性好,适于抗冲击和压应力的场合。即使在538℃时仍具有良好的耐磨性。广泛用于粉碎机、锤头、导轧等的堆焊	4.00	1.50	1.50	27.00	Mo (1.00)	58

表 3.20 国内外硬质合金堆焊焊丝的牌号(或型号)对照

中国	美国		日本			瑞士	德国	
牌号	AWS	J. W. HARRIS	神钢	WEL	Neis	UTP	DIN	THYSSEN
	RCoCr-C	Cobalt Alloy 1	HF-1R	TIG-S11	Hard 97C	UTP Cobalite AF701	MF-20-55-ctz	AKRIT Co 58/G
HS 112	RCoCr-B	Cobalt Alloy 12	HF-3R	TIG-S33	Hard 97A	UTP Cobalite AF 712	MF-20-50-ctz	AKRIT Co 50/G
HS 111	RCoCr-A	Cobalt Alloy 6	HF-6R	TIG-S66	Hard 97A	UTP Cobalite AF706	MF-20-40-ctz	AKRIT Co 40/G

## (2) 堆焊用药芯焊丝

药芯焊丝是将药粉包在薄钢带内卷成不同的截面形状经轧拔加工制成的焊丝，用于气体保护焊、埋弧焊和自保护焊。药芯焊丝粉剂的作用与焊条药皮相似，区别在于焊条的药皮涂敷在焊芯的外层，而药芯焊丝的粉剂被钢带包裹在芯部。

焊丝牌号第一个字母“Y”表示药芯焊丝，第二个字母及第一、第二、第三位数字与焊条编制方法相同；牌号“-”后面的数字表示焊接时的保护方法（见表 3.21）。药芯焊丝有特殊性能和用途时，在牌号后面加注起主要作用的元素或主要用途的字母（一般不超过两个）。

表 3.21 药芯焊丝牌号“-”后面数字的含义

牌 号	焊接时保护方法
YJ ×××-1	气体保护
YJ ×××-2	自保护
YJ ×××-3	气体保护、自保护两用
YJ ×××-4	其他保护形式

为了增加堆焊层的耐磨性或使金属表面获得某些特殊性能，需要从焊丝中过渡较多的合金元素，但是焊丝含碳量和合金元素较多时难于加工制造。随着药芯焊丝生产技术的提高，一些合金元素可以加入在药芯中，且加工制造方便。目前采用药芯焊丝进行埋弧堆焊获得耐磨表面的方法已得到广泛应用。此外，在烧结焊剂中加入一定量的合金元素，堆焊后也能得到相应成分的堆焊层，焊剂与实芯或药芯焊丝相配合，可以满足不同的堆焊要求。

堆焊药芯焊丝通常分为气体保护焊、自保护焊和埋弧焊三种焊丝。

### 1) CO<sub>2</sub> 堆焊药芯焊丝

气体保护堆焊药芯焊丝一般采用 CO<sub>2</sub> 气体，有时考虑到稀释及减少烟尘，也使用含 20% 以上氩气的混合气体。焊丝规格为直径 1.2~3.2mm。活性气体保护焊 (MAG) 堆焊药芯焊丝的渣系一般采用钛型渣系，相对于传统的全位置钛型药芯焊丝，熔渣的黏度较小。

该方法的焊接效率高，堆焊效率为手工电弧焊的 3~4 倍；而且，焊接工艺性能优良，电弧稳定、飞溅小、脱渣容易、堆焊焊道成形美观。这种方法只能通过药芯焊丝过渡合金元素，多用于合金成分不太高的堆焊层。

### 2) 自保护堆焊药芯焊丝

自保护药芯焊丝由于不需要外加气体保护，增加了堆焊的灵活性。自保护堆焊药芯焊丝具有高熔敷效率、低稀释、操作方便等优点，在欧美许多国家常采用高合金的自保护堆焊焊丝。如用于轧辊和阀门堆焊的 Cr13 系列自保护药芯焊丝、用于堆焊磨煤辊、水泥磨辊的 C5Cr25 高铬铸铁堆焊焊丝等。但是，与气体保护药芯焊丝相比，自保护药芯焊丝的工艺性能和力学性能稍差，价格也较高一些。

### 3) 埋弧焊药芯焊丝

埋弧堆焊药芯焊丝主要用于钢铁制造的轧辊和轮子等大型部件的堆焊。采用大直径

( $\phi 3.2\text{mm}$ 、 $\phi 4.0\text{mm}$ ) 的药芯焊丝，焊接电流大，堆焊生产率明显提高。通常硬面埋弧堆焊所用的焊丝成分大多是加工硬化倾向严重的材料，在这种情况下实芯焊丝的生产和供应受到限制。由于药芯焊丝的成分调整很方便，因此自动埋弧堆焊成为药芯焊丝应用的又一个扩展领域。

当采用烧结焊剂时，还可通过焊剂过渡合金元素，合金元素含量可在 14%~20% 之间变化，使堆焊层得到不同性能和使用要求。这种方法主要用于堆焊轧制辊、送进辊、连铸辊等耐磨耐蚀部件。

### 3.4.3 堆焊焊剂

#### (1) 堆焊焊剂的分类

埋弧堆焊所用的焊剂按制造方法分为熔炼焊剂和非熔炼焊剂（烧结焊剂）两大类。

##### 1) 熔炼焊剂

熔炼焊剂是将各种矿物性原料按配方比例混合配成炉料，然后在电炉内加热到 1300℃ 以上熔炼成流动性很好的红色熔渣，然后出炉经过水冷粒化、烘干、筛选而制成的焊剂。熔炼焊剂采用的原料主要有锰矿、硅砂、铝矾土、镁砂、萤石、生石灰、钛铁矿等矿物性原料，另外还加入冰晶石、硼砂等化工产品。由于熔炼焊剂制造中要经高温熔炼原料，所以焊剂中不能加碳酸盐、脱氧剂和合金剂，制造高碱度焊剂也很困难。而且，熔炼焊剂经熔炼后不可能保持原料的原组分不变，所以，熔炼焊剂实质上是各种化合物的组合体。

熔炼焊剂多用于自动埋弧焊接低碳钢、低合金钢。配用合金钢焊丝，也可用于低合金钢、高合金钢埋弧自动焊接或堆焊。熔炼焊剂在埋弧焊接或堆焊过程中对熔化金属只有保护作用，几乎没有过渡合金的作用。

##### 2) 非熔炼焊剂

把各种粉料按配方混合后加入黏结剂，制成一定粒度的小颗粒，经烘焙或烧结后得到的焊剂，称为非熔炼焊剂。

制造非熔炼焊剂所采用的原材料与制造焊条的原材料基本相同，对成分和颗粒大小有严格要求。按照给定配比配料，混合均匀后加入黏结剂（水玻璃）制成湿料，然后把湿料进行造粒，制成一定尺寸的颗粒（一般为 0.5~2mm），造粒之后将颗粒状的焊剂送入干燥炉内固化、烘干、去除水分，加热温度为 150~200℃，最后送入烧结炉内烧结。根据烘焙温度的不同，非熔炼焊剂又分为以下几类。

① 黏结焊剂（亦称陶质焊剂或低温烧结焊剂） 将一定比例的各种粉状配料加入适量黏结剂，经混合搅拌、粒化和低温烘干（350~500℃）而制成的焊剂。通常以水玻璃作为黏结剂，经 350~500℃ 低温烘焙或烧结。这种焊剂可以制成高合金的黏结焊剂，配用 H08A 焊丝，在埋弧堆焊过程中，从熔融焊剂向熔化金属过渡大量合金，进行高合金的自动埋弧堆焊。由于烧结温度低，黏结焊剂具有吸潮倾向大、颗粒强度低等缺点。目前我国作为产品供应量还不多。

② 烧结焊剂 将一定比例的各种粉状配料加入适量的黏结剂，混合搅拌后经高温烧结成块状（通常在 700~1000℃ 烧结），烧结后粉碎成一定尺寸的颗粒，筛选后即可使用。经高温烧结后，焊剂的颗粒强度明显提高，吸潮性大大降低。

与熔炼焊剂相比，烧结焊剂熔点较高，松装比较小，故这类焊剂适于大线能量焊接。烧结焊剂的碱度可以在较大范围内调节而仍能保持良好的工艺性能，可以根据施焊钢种

的需要通过焊剂向焊缝过渡合金元素，特别适用于自动埋弧堆焊；而且，烧结焊剂适用性强、制造简便，故近年来发展很快。表 3.22 列出了熔炼焊剂和烧结焊剂的主要特点比较。

表 3.22 熔炼焊剂与烧结焊剂的特点比较

比较项目		熔炼焊剂	烧结焊剂
一般特点		熔点较低，松装比较大，颗粒不规则，但强度较高。焊剂的生产中耗电量较大，成本较高	熔点较高，松装比较小，颗粒圆滑较规则，但强度低，可连续生产，成本较低
焊接工艺性能	高速焊接性能	焊道均匀，不易产生气孔和夹渣	焊道无光泽，易产生气孔、夹渣
	大规范焊接性能	焊道凸凹显著，易粘渣	焊道均匀，容易脱渣
	吸潮性能	比较小，可不必再烘干	比较大，必须烘干
	抗锈性能	比较敏感	不敏感
焊缝性能	韧性	受焊丝成分和焊剂碱度影响大	比较容易得到高韧性
	成分波动	焊接参数变化时成分波动较小	成分波动较大
	多层焊性能	焊缝金属的成分变动小	焊缝成分变动较大
	脱氧性能	较差	较好
	合金剂的添加	十分困难	可以添加

焊剂的粒度越大，其松装比（单位体积内焊剂的质量）越小，透气性越大，焊缝金属中含氮量越多，保护效果越差。但是，不应当认为焊剂的松装比越大越好，因为当熔池中有大量气体析出时，如果松装比过大，则透气性过小，将阻碍气体外逸，促使焊缝中形成气孔，使焊缝表面出现压坑等缺陷，所以焊剂应具有适当的透气性。埋弧焊时焊缝中的含氮量一般为 0.002%~0.007%，比手工电弧焊的保护效果好。

(2) 伊萨集团的几种常用埋弧堆焊用烧结焊剂

1) OK10.05 碱性烧结焊剂

适用于埋弧带极堆焊复合层。埋弧焊带极可为高 Cr、Cr-Ni 或 Cr-Ni-Mo 型不锈钢。采用这种焊剂施焊不易产生焊瘤，有良好的脱渣性。碱度为 1.1，松装比为 0.7g/cm<sup>3</sup>。配合不同带极施焊后堆焊层金属的化学成分见表 3.23。

表 3.23 堆焊层金属的化学成分 (OK10.05 碱性烧结焊剂)/%

配用焊带	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	其他
OK11.62	0.02	0.7	1.1	19.2	10.3	0.1	Nb 0.35
OK11.63	0.02	0.7	1.1	17.5	13.0	2.8	—
OK11.65	0.02	0.7	1.2	22.0	13.0	0.05	—

2) OK10.10 碱性烧结焊剂

适用于带极电渣堆焊，特别用于高 Cr、Cr-Ni、Cr-Ni-Mo 型不锈钢的带极电渣堆焊。这种焊剂的工艺性能、焊缝成形及脱渣性良好。焊剂碱度 3.5，松装比 1.0g/cm<sup>3</sup>。配合不同带极施焊后堆焊层金属的化学成分见表 3.24。

表 3.24 堆焊层金属的化学成分 (OK10.10 碱性烧结焊剂)/%

配用焊丝	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	其他
OK Band11.71	0.015	0.2	1.8	22	11	—	—
OK Band11.72	0.015	0.2	1.8	21	11	—	Nb 0.6
OK Band11.73	0.015	0.2	1.8	21	13	3	—

### 3) OK10.16 碱性烧结焊剂

专为带极堆焊镍基合金、因康乃尔合金而研制的带极埋弧堆焊用烧结焊剂，属高碱度焊剂，碱度约为 2.4，松装比为 1.2g/cm<sup>3</sup>。施焊时焊剂向焊缝中过渡硅很少，因此抗热裂纹能力提高。焊波细致、成形美观、脱渣容易。

堆焊因康乃尔合金时采用下列工艺参数：焊带尺寸为 60mm×0.5mm，焊接电流 750A，焊接电压 28V，焊接速度 120mm/min。堆焊层金属的化学成分见表 3.25。

表 3.25 堆焊层金属的化学成分 (OK10.16 碱性烧结焊剂)/%

取样部位	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Fe	Ti
带极	0.025	0.22	3.04	19.5	72.2	2.6	0.55	0.30
第一层	0.024	0.32	3.10	17.1	66.3	1.8	10.2	0.05
第二层	0.022	0.41	3.30	18.7	71.2	1.9	2.3	0.05
第三层	0.022	0.43	3.42	19.0	72.2	2.1	2.4	0.05

### 4) OK10.91 碱性烧结焊剂

埋弧堆焊不锈钢合金层用的烧结焊剂，焊剂中含有少量 Cr 以补充焊接过程中 Cr 元素的烧损。为了防止堆焊过程中产生气孔，焊剂受潮后必须进行再烘干（在 350℃保温 4h）。施焊中通常采用直流正极性，施焊时母材受热多、熔深大，多用于要求增加熔深或必须高温堆焊的场合；直流反极性施焊时母材稀释率低，在低碳钢或低合金钢上堆焊耐磨层或衬里层时采用。焊剂碱度为 1.0，松装比为 0.95g/cm<sup>3</sup>。

焊剂熔化量与焊接电压有关，每熔化 1kg 焊丝，焊接电压 30V 时熔化焊剂 0.7kg，35V 时熔化焊剂 1.0kg，40V 时熔化焊剂 1.3kg。配用不同焊丝施焊后堆焊层金属的化学成分见表 3.26。

表 3.26 堆焊层金属的化学成分 (OK10.91 碱性烧结焊剂)/%

配用焊丝	母材类型	C	Cr	Ni	Mo
OK 16.10	奥氏体钢	低	19	10	—
OK 16.30	奥氏体钢	低	18	12	3
OK 15.73	马氏体铬钢	0.3	13	—	—

### 5) OK10.96 碱性烧结焊剂

埋弧堆焊用烧结焊剂，可向焊缝中过渡 Cr，堆焊层硬度达 35~40HRC。由于焊接电压增加时，焊剂中 Cr 的过渡量增加，所以堆焊层的硬度和淬硬性也随焊接电压的增大而增加。焊剂碱度为 0.7，松装比为 1.1g/cm<sup>3</sup>。

OK10.96 焊剂适于交流和直流两种电源。采用直流正极性时母材受热较反极性时多，焊剂熔化量较多，熔敷率则较低。为保证焊缝成分的均匀和稳定，焊接电压应尽可能保持不

变。堆焊层金属的化学成分见表 3.27。

表 3.27 堆焊层金属的化学成分 (OK10.96 碱性烧结焊剂)/%

焊接电压 /V	C	Si	Mn	Cr	备注
30	≤0.1	1.0	1.0	3.0	配用焊丝为 OK12.12
34	≤0.1	1.0	1.0	3.5	
38	≤0.1	1.0	1.0	5.0	

堆焊层性能：采用焊剂 OK10.96 与焊剂 OK12.10 相组合堆焊，焊接电压 34V，堆焊层的硬度为 35~40HRC，在工作温度 450℃ 使用性能稳定。

### (3) 阀门堆焊用烧结焊剂

高合金烧结焊剂的配方设计应考虑堆焊金属具有良好的抗磨损、抗腐蚀、抗冲击等使用性能，并且应使堆焊金属具有良好的工艺性和抗裂性，以适用于大、中、小阀件密封面使用要求。

阀门堆焊用烧结焊剂配方设计一般采用碱性渣系，配方中含有 20% 大理石、5% 钛白粉、10% 氧化铝、5% 萤石、50% 各类铁合金和纯金属、10% 氮化物和硼化物。堆焊后其堆焊金属的化学成分和硬度应控制在有关技术标准之内。

不锈钢阀门堆焊烧结焊剂采用  $\text{CaO-TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  渣系，采用的原材料为大理石、萤石、钛白粉、氧化铝和硅铁。在这些氧化物中以  $\text{CaO-TiO}_2$  为基体，高碱度的玻璃状熔渣可降低熔化金属中的含硫量，减少熔化金属中生成裂纹的倾向，促进堆焊金属组织的改善。不锈钢阀门自动堆焊烧结焊剂的原材料及成分配比见表 3.28。

表 3.28 不锈钢阀门自动堆焊烧结焊剂的原材料及成分配比

成分编号	原材料名称	含量 /%	原材料主要化学成分 /%
1	大理石	65	$\text{CaCO}_3$ 94.36~97.73
2	钛白粉	17	$\text{TiO}_2$ 98.34, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 0.42
3	氧化铝	5.5	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 98.5
4	硅铁	4.5	Si 74.3
5	萤石	8	$\text{CaF}_2$ 92.3~93.7
6	水玻璃	占干料重量的 40%	相对密度 1.45, 钠水玻璃模数 $M=2.0$

焊剂的碱度 3.48

采用上述成分的烧结焊剂，用直径 5mm 的 18-8 不锈钢焊丝，在 ZG-25 铸钢闸板上进行埋弧自动堆焊，在交流电源的情况下，能得到良好的焊道成形。堆焊金属具有良好的抵抗气孔和裂纹的能力，阀门密封面加工后未发现堆焊金属中有任何缺陷，堆焊金属具有良好的抗蚀性能。

## 3.5 堆焊合金的选用

堆焊过程中，只有正确选择堆焊合金才能保证堆焊合金层发挥其最好的工作性能，同时又能最大限度地节省合金元素。在选用堆焊合金时，满足使用条件的性能要求和经济上的合理性是非常重要的，而且工件的材质、批量以及拟采用的堆焊方法及工艺也必须加以考虑。

### 3.5.1 堆焊合金的选用原则

#### (1) 满足零件在工作条件下使用的性能要求

为保证零件能正常使用和提高使用寿命，首先要了解被堆焊零件的工作条件（温度、介质、载荷等），明确在运行过程中损伤的类型，然后选取最适宜抵抗这种损伤类型的堆焊合金。例如，挖掘机的斗齿受剧烈冲撞的凿削式磨料磨损，应选用能抗冲击磨损的堆焊合金；而推土机的铲刀刃板属于低应力磨料磨损，可选用合金铸铁或碳化钨等堆焊合金。

#### (2) 具有良好的焊接性

所选用的堆焊材料在现场条件下应易于堆焊并获得与基体结合良好、无缺陷的堆焊合金层。必须注意堆焊合金与基体的相溶性，尤其是在修复工作中，基体很可能原先就是堆焊层，应对其化学成分、组织状态和性能有所了解，充分估计到基体稀释对堆焊合金层性能的影响。当基体材料碳当量较高时，为了防止堆焊过程中产生裂纹，可考虑预热、保温缓冷的工艺措施。也可考虑采用填加中间过渡层的解决办法。

#### (3) 堆焊的经济性

在选择堆焊合金时要综合考虑其经济性。所选用的堆焊合金不仅在使用性能大致相同的多种堆焊合金中是价格最低的一种，同时也应当是焊接工艺最简便、加工费用最少的一种。此外，还应考虑堆焊零部件投入使用后的经济效益。尤其在重大设备的修复工作中，可能堆焊成本或加工成本高一些，但由于缩短了修复时间，减少了设备停机的经济损失或由于延长了零部件的使用寿命也会带来巨大的经济和社会效益。

### 3.5.2 堆焊合金的选择步骤

一般根据经验与实验相结合的原则选择堆焊合金。因为被堆焊零件工作条件的多样性对堆焊层提出各种不同的使用要求，而堆焊合金虽然品种多，而且性能各异，但与使用要求之间却有一一对应关系，很难一次选择即满足应用要求。实践中选择堆焊合金的一般步骤如下：

- ① 分析工作条件，确定可能产生的破坏类型及对堆焊合金的性能要求；
- ② 根据一般规律列出几种可供选择的堆焊合金，见表 3.29；
- ③ 分析待选堆焊合金与基体的相溶性，初步选定堆焊合金的形状和拟订堆焊工艺；
- ④ 进行样品堆焊，堆焊后的工件在模拟工作条件下作运行实验，并进行试验评定；
- ⑤ 综合考虑使用寿命和成本，最后选定堆焊合金；
- ⑥ 确定堆焊方法和制定堆焊工艺。

表 3.29 堆焊合金选择的一般规律

工作条件	堆焊合金
高应力金属间磨损	亚共晶钴基合金、含金属间化合物钴基合金
低应力金属间磨损	堆焊用低合金钢或铜基合金
金属间磨损+腐蚀或氧化	大多数钴基或镍基合金
低应力磨料磨损、冲击侵蚀、磨料侵蚀	高合金铸铁
低应力严重磨料磨损、切割刃	碳化钨
气蚀侵蚀	钴基合金
严重冲击	高合金锰钢
严重冲击+腐蚀+氧化	亚共晶钴基合金
高温下金属间磨损	亚共晶、含金属间化合物钴基合金
凿削式磨料磨损	奥氏体锰钢
热稳定性、高温蠕变强度(540℃)	钴基合金、含碳化物型镍基合金

应用堆焊技术，必须解决好两个问题：

① 正确选用堆焊合金，为此必须清楚被堆焊零部件的材质、工作条件及对堆焊金属使用性能的要求，同时要熟悉现有的堆焊金属的种类、性能和适用条件；

② 选定合适的堆焊方法及相应的堆焊工艺，为此必须掌握所选堆焊方法的工艺特点及其在堆焊中可能出现的技术问题，尤其要解决好堆焊合金与母材之间异种金属的结合问题。

正确选用相匹配的堆焊合金还需考虑以下几个因素：

① 选用何种堆焊工艺方法才是最佳的技术经济方案？不必盲目追求高效率，要根据工件尺寸、数量、堆焊位置及现场施工条件进行综合考虑。

② 当被堆焊基体的含碳量较高、抗裂性较差时，不仅要考虑采用预热等工艺措施，还要考虑是否选用过渡层堆焊合金。

③ 每一种堆焊合金只有在特定的工作环境下，针对某些特定的磨损条件才表现出较高的耐磨性，它在不同工作条件下表现出不同的耐磨性，必须根据磨损类型及介质环境特点来选用堆焊合金。

④ 对需要进行表面修整的工件，应考虑选用可以机械加工的堆焊合金，或选用可以热处理的合金系统，机械加工后再通过热处理来提高堆焊金属的耐磨性。

### 3.5.3 堆焊焊条的选用

堆焊工艺在我国应用越来越广，堆焊合金达数十种。堆焊焊条已制定了较完整的产品系列，堆焊时必须根据堆焊工件及工作条件的不同要求选用合适的焊条。

堆焊金属类型很多，反映出堆焊金属化学成分、显微组织及性能的很大差异。堆焊工件及工作条件十分复杂，堆焊时必须根据不同要求选用合适的焊条。不同的堆焊工件和堆焊焊条要采用不同的堆焊工艺，才能获得满意的堆焊效果，堆焊中最常碰到的问题是裂纹，防止开裂的方法主要是焊前预热、焊后缓冷，焊接过程中还可采用锤击等消除焊接应力。堆焊金属的硬度和化学成分，一般是指堆焊三层以上的堆焊金属而言。

国内常用堆焊焊条的成分、特性与用途见表 3.30。瑞典伊萨集团总公司耐磨堆焊焊条的成分、特征与用途见表 3.31，伊萨集团美国分公司耐磨堆焊焊条的成分、特征与用途见表 3.32。

### 3.5.4 堆焊焊丝、焊剂的选用

高铬合金铸铁具有良好的抗氧化性和耐气蚀性能，硬度高、耐磨性能好。面钴基合金则在 650℃ 左右的高温下，能保持高的硬度和良好的耐腐蚀性能。其中低碳、低钨的韧性好；高碳、高钨的硬度高，但抗冲击能力差。镍基合金具有与钴基合金相似的性能，但价格便宜。

为了提高热作模具的热稳定性，可以在基体为 45Mn2 的铸钢模体上电渣堆焊 5Cr2MnMo 钢。对于堆焊材料的选择，必须考虑热处理工艺与基体接近，线膨胀系数相当，焊接性良好。为了用堆焊方法修复由于磨损导致的尺寸超差模具，其堆焊材料选用与基体成分相同的钢，但必须考虑到堆焊时碳与合金元素的烧损。

国内气体保护焊或自保护焊用药芯焊丝的成分及用途见表 3.33。瑞典伊萨集团总公司药芯堆焊焊丝的成分、特征与用途见表 3.34。

国内埋弧堆焊用药芯焊丝的成分及用途见表 3.35。

国内常用的埋弧堆焊用烧结焊剂和配用焊丝的特性与用途见表 3.36。



表 3.30 国内常用堆焊焊条的成分、特性与用途

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D102	EDPMn2-03	钛钙型普通低合金锰钢堆焊焊条, 交流两用, 电弧稳定, 脱渣容易; 用于堆焊或修复低碳钢、中碳钢及低合金钢磨损件, 如车轴、齿轮和搅拌机叶片等	≤0.20	—	≤3.50	—	—	≥22	
D106	EDPMn2-16	低氢钾型普通低合金锰钢堆焊焊条, 交流两用(交流时空载电压大于 70V); 用于堆焊或修复低碳钢、中碳钢及低合金钢磨损件, 如车轴、齿轮和搅拌机叶片等	≤0.20	—	≤3.50	—	—	≥??	
D107	EDPMn2-15	低氢钠型普通低合金锰钢堆焊焊条, 采用直流反接; 用于堆焊或修复低碳钢、中碳钢及低合金钢磨损件, 如车轴、齿轮和搅拌机叶片等	≤0.20	—	≤3.50	—	—	≥22	
D112	EDPCrMo- Al-03	钛钙型铬钼钢堆焊焊条, 交流两用, 电弧稳定, 脱渣容易; 用于受磨损的低碳钢、中碳钢及低合金钢, 特别用于矿山机械与农业机械的堆焊与修复	≤0.25	—	≤1.50	≤0.20	≤0.20	≥22	
D126	EDPMn3-16	低氢钾型普通低合金锰钢堆焊焊条, 交流两用(交流时空载电压大于 70V); 用于堆焊受磨损的低、中碳钢及低合金钢, 如车轴、齿轮、搅拌机叶片和行走主动轮等	≤0.20	—	≤4.20	—	—	≥28	
D127	EDPMn3-15	低氢钠型普通低合金锰钢堆焊焊条, 采用直流反接; 用于堆焊受磨损的低、中碳钢及低合金钢, 如车轴、齿轮、搅拌机叶片和行走主动轮等	≤0.20	—	≤4.20	—	—	≥28	
D132	EDPCrMo- A2-03	钛钙型铬钼钢堆焊焊条, 交流两用, 电弧稳定, 脱渣容易; 用于受磨损的低碳钢、中碳钢及低合金钢, 特别用于矿山机械与农业机械的堆焊与修复	≤0.50	—	≤1.50	≤3.00	Mo≤1.50	≥30	
D146	EDPMn4-16	低氢钾型普通低合金锰钢堆焊焊条, 交流两用, 电弧稳定; 用于堆焊各种受磨损的碳钢件及碳钢道岔	≤0.20	—	≤4.50	—	≤2.00	≥30	
D156	—	低氢钾型铬锰钢堆焊焊条, 具有抗高冲击载荷和金属间摩擦磨损性能; 交流两用(交流时空载电压大于 70V), 电弧稳定, 焊接工艺性好, 脱渣容易, 飞溅小, 焊道成形美观; 用于轧钢机零部件堆焊, 如槽轮轧机、铸钢大齿轮、拖拉机驱动轮、支重轮和链轮节等	≈0.10	≈0.50	≈0.70	≈3.20	—	≈31	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D167	EDPMn6 15	低氢钠型普通低合金锰钢堆焊焊条,采用直流反接,用于农业机械、建筑机械等磨损部件的堆焊,如大型推土机、动力铲的滚轮、汽车环链等	≤0.45	≤1.00	≤6.50	-		≥50	
D172	EDPCrMo-A3-03	钛钙型铬铝堆焊焊条,交直流两用,电弧稳定,脱渣容易,用于堆焊齿轮、挖掘机、拖拉机刮板、深耕犁铧,矿山机械等磨损件	≤0.50	-		≤2.50	Mo≤2.50	≥40	
D177SiL	-	渗铝钢系列堆焊焊条中的一种,专用于焊接磨损条件下使用的渗铝或非渗铝钢结构,低氢型药皮,采用直流正接,短弧操作;用于焊接单层或多层各种渗铝钢受磨损件,如电站渗铝锅炉省煤气管等	≤0.50			≤2.50	Mo≤2.50	≥40	
D202A	-	钛钙型铁基堆焊焊条,交直流两用,焊接工艺性能好,堆焊层硬度适中,具有良好的塑性和耐冲击性;用于碳钢和低合金钢轧钢机零件的堆焊,如槽轮轧机、铸钢大齿轮等	≤0.15	0.2~0.4	0.5~0.9	1.8~2.3		26~30	
D202B	-	钛钙型铁基堆焊焊条,交直流两用,焊接工艺性能好,堆焊金属为马氏体组织,有良好的耐金属间磨损、耐冲击、耐磨料磨损和耐冷热疲劳性能;用于单层或多层堆焊各种受磨损的零部件,如齿轮、挖斗、矿山机械等	0.5~0.7	0.3~0.5	0.6~1.0	4.4~5.0	-	51~58	
D207	EDPCrMnSi-15	低氢钠型铬锰硅钢堆焊焊条,采用直流反接;用于堆焊推土机刀刃板,螺旋桨等磨损零件	0.5~1.00	≤1.00	≤2.50	≤3.50	≤1.00	≥50	
D212	EDPCrMo-A4-03	钛钙型铬铝堆焊焊条,交直流两用,电弧稳定,脱渣容易,用于单层或多层堆焊各种受磨损的零部件,如齿轮、挖斗、矿山机械等	0.3~0.60	-		≤5.00	Mn≤4.00	≥50	
D217A	EDPCrMo-A3-15	低氢钠型铬铝堆焊焊条,直流反接;用于堆焊高强度耐磨零部件,如30CrMnSi和35CrMnSi冶金轧辊的堆焊与修复、矿石破碎机部件、矿山用4m <sup>3</sup> 电铲斗齿及其他挖掘机斗齿等	≤5.00	-		≤2.50	Mo≤2.50	≥40	

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分/%						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D227	EDPCrMoV-A2 15	低氢钠型铬铝钒钢堆焊焊条,采用直流反接,堆焊层为马氏体基体加一定数量的高硬度碳化物,抗磨粒磨损性能较高,堆焊金属具有良好的抗裂性,但切削加工比较困难,必要时可经约 860℃ 等温退火软化;用于承受一定冲击载荷的耐磨件表面堆焊,如掘进机盘形滚刀的爱磨表面	0.45~ 0.65		—	4.00~5.00	Mo 2.00~ 3.00 V 4.00~ 5.00	≥55	
D237	EDPCrMoV-A1 15	低氢钠型铬铝钒钢堆焊焊条,采用直流反接;用于堆焊受泥沙磨损和气蚀破坏的水利机械、挖掘斗、矿山机械零部件等	0.30~0.60		—	8.00~ 10.00	Mo ≤3.00 V 0.50~ 1.00	≥50	
D246	EDPCrSi-B	低氢钾型堆焊焊条,交直流两用;用于堆焊常温及非腐蚀条件下,带有磨粒磨损和冲击载荷条件下工作的零部件,如矿山、工程、农业、制砖、水泥、水利等机械的易磨损件	≤1.00	1.50~3.00	≤0.80	8.50~8.50	B 0.50~ 0.90	≥60	
D256	EDMn-A-16	低氢钾型高锰钢堆焊焊条,交直流两用(交流焊时空载电压不低于 70V),堆焊时宜采用小电流,窄道焊,趁红热时立即锤击或水淬,以减小裂纹倾向;堆焊金属为奥氏体高锰钢,具有加工硬化、高韧性和耐磨的特点;用于各种破碎机、高锰钢轨、铲斗、推土机等易磨损部件的堆焊	≤1.10	≤1.30	11.00~ 16.00		≤5.00	≥170HB	
D266	EDMn-B-16	低氢钾型高锰钢堆焊焊条,交直流两用(交流焊时空载电压不低于 70V),与 D256 的区别是焊缝金属中添加了钼,提高了抗裂性及耐磨性;堆焊时宜采用小电流,窄道焊,趁红热时立即锤击或水淬,以减小裂纹倾向;堆焊金属为奥氏体高锰钢,具有加工硬化、高韧性和耐磨的特点;用于各种破碎机、高锰钢轨、铲斗、铁路道岔、推土机等易磨损部件的堆焊	≤1.10	0.30~1.30	11.00~ 18.00		Mo ≤2.50 其他 ≤1.00	≥170HB	
D276 D277	EDCrMn-B-16 EDCrMn-B-15	低氢型高锰钢耐气蚀堆焊焊条,采用直流反接, D276 可交直流两用(交流焊时空载电压不低于 70V),焊缝能加工硬化、韧性好,耐气蚀,具有良好的抗裂性;用于堆焊水轮机受气蚀破坏的零件,如水轮机的导水叶片等,也可用于要求耐磨性及高韧性的高锰钢件的堆焊,如铁路道岔、螺旋输送机、推土机刀刃板、抓斗、破碎刃等	≤0.80	≤0.80	11.00~ 16.00	13.00~ 17.00	≤4.00	≥20	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D287	—	低氢型抗气蚀耐泥沙磨损专用焊条,具有良好的抗气蚀、抗泥沙磨损性能,焊接工艺性好,采用直流反接,可全位置焊接,堆焊金属具有良好的机械加工性;用于水泵、水轮机过流部件的制造及堆焊修复,还可用于同等材质转轮的焊接	$\leq 0.15$	—	—	12.0~16.0	Ni 4.0~6.0	400HV (焊态)	
D307	EDD-D-15	低氢钠型高速刀具钢堆焊焊条,采用直流反接,可在中碳钢(如45、45Mn)制成的刀具毛坯上堆焊刃口以达到代用整体高速钢的目的,也可用于堆焊修复受磨损的刀具及其他工具	0.70~1.00	—	—	3.80~4.50	W 17.0~19.50 V 1.00~1.50 其他 $\leq 1.50$	$\geq 55$ (焊后 经540℃ 二次回火)	
D317	EDRCrMoWV A3-15	低氢钠型铬钨钼钨堆焊焊条,直流反接;可用于冲模堆焊,也可用于一般切削刀具的堆焊	0.70~1.00	—	—	3.00~4.00	W 3.0~5.00 Mo 3.0~5.00 V 1.00~1.50 其他 $\leq 1.50$	$\geq 50$ (焊 后空冷)	
D317A	—	低氢钠型高合金焊芯与药皮过渡合金相结合的铬钨钼钨堆焊焊条,直流反接,具有良好的工艺性、耐磨性、硬度和高温冲击韧性,特别是具有良好的冷焊抗裂性,适合大型工件大面积不预热表面堆焊;用于堆焊耐强烈冲击磨损、耐腐蚀和耐气蚀的场合,如高炉料钟、单齿辊、双齿辊破碎机、螺旋输送机叶片、抽风机叶片和中高压阀门密封面等	0.3~0.8	0.3~0.6	0.5~1.0	3~4	W 6~8 Mo 2.0~3.5 V 1.5~2.5	58~62 (焊后空冷)	
D322	EDRCrMoWV- A1-03	钛钙型铬钨钼钨冷冲模堆焊焊条,交直流两用,电弧稳定,脱渣容易;用于堆焊各种冲模及切削刀具,也可用于修复要求耐磨性较高的机械零部件	$\leq 0.50$	—	—	$\leq 5.00$	W 7.0~10.00 Mo $\leq 2.50$ V $\leq 1.00$	$\geq 55$ (焊 后空冷)	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D327	EDRCrMoWV-A1-15	低氢钠型铬钼钨钽冷冲模堆焊焊条, 直流反接; 用于堆焊各种冲模及切削刃具, 也可用于修复要求耐磨性较高的机械零部件	$\leq 0.50$	—	—	$\leq 5.00$	W 7.0~10.0 Mo $\leq 2.50$ V $\leq 1.00$	$\geq 55$ (焊后空冷)	
D327A	EDRCrMoWV-A2-15	低氢钠型铬钼钨钽冷冲模堆焊焊条, 直流反接; 用于堆焊各种冲模及切削刃具, 也可用于修复要求耐磨性较高的机械零部件	0.30~0.50	—	—	5.00~6.50	W 2.00~3.50 Mo 2.00~3.00 V 1.00~3.00	$\geq 50$ (焊后空冷)	
D337	EDRCrW-15	低氢钠型铬钨热锻模堆焊焊条, 直流反接; 用于铸钢或锻钢堆焊锻模, 也可用于受磨损锻模的修复	0.25~0.55	—	—	2.00~3.50	W 7.00~10.0 其他 $\leq 1.00$	$\geq 48$ (焊后空冷)	
D386		低氢钾型堆焊焊条, 焊接工艺性好, 全位置焊; 用于冷冲模的修复或在低碳钢上堆焊以代替整体模具制造各种模具, 冲头等, 用于热加工模具, 轧辊等	$\leq 0.6$	—	—	$\leq 3.0$	W $\leq 5.0$ 其他 $\leq 3.0$	$\geq 50$	
D392 D397	FDRCrMnMo-03 EDRCrMnMo 15	D392 为钛钙型堆焊焊条, 交直流两用, 堆焊层组织为马氏体和残余奥氏体; D397 为低氢钠型铬钼钨热锻模堆焊焊条, 直流反接; 具有耐金属间摩擦磨损及磨粒磨损的性能; 用于堆焊铸钢或锻钢作坯体的热锻模, 也用于修复 5CrMnMo、5Cr-NiMo、5Cr-NiSiW 钢制旧锻模或堆焊高强度耐磨零部件	$\leq 0.60$	$\leq 1.00$	$\leq 1.00$	$\leq 2.00$	Mo $\leq 1.00$	$\geq 40$ (焊后空冷)	
D406	EDRCrMoWCo-A	低氢型铬钼钨钴热强钢耐磨堆焊焊条, 堆焊金属组织为 $\alpha$ 固溶体 + 奥氏体 + 马氏体 + 共晶组织, 具有较高的红硬性、抗裂性和耐热疲劳性; 用于耐高温刃具、模具, 如热剪切刀刃口的堆焊	$\leq 0.5$	$\leq 2.0$	$\leq 2.0$	$\leq 6$	Mo $\leq 5$ W $\leq 10$ V $\leq 2$ Co $\leq 12$ 其他 $\leq 2.0$	$\approx 50$ (焊后空冷)	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D417	EDD-B-15	低氢钠型高速刀具钢堆焊焊条, 直流反接, 良好的工艺性、耐磨性和抗裂性; 用于堆焊耐强烈冲击磨损、耐腐蚀、气蚀的场合, 如单双齿液破破碎机、叶片、高炉料钟等, 也用于各种冲压模具的堆焊	0.5~0.9	≤0.80	≤0.60	3.0~5.0	Mo 5.0~9.5 W 1.0~2.5 V 0.8~1.3 其他 ≤1.00	≥55(焊后空冷)	
D427	—	低氢型高温耐磨堆焊焊条, 用于高温条件下具有高硬度和耐磨损部件的堆焊, 如轧钢、炼钢装料机吊牙及钢坯剪切用双金属热剪切刃的堆焊	≈0.8	—	≈13	≈11	Ni ≈2 V ≈2	≥40(焊后空冷)	
D437	—	低氢型堆焊焊条, 用于高温条件下具有高硬度和高耐磨性的工件堆焊; 主要用于冶金系统, 如炼钢厂装料机吊牙及轧钢厂及金属热剪切刃的堆焊	≈0.8	—	—	≈15	Ni ≈4 V ≈3	40~42 (焊后空冷)	
D502	EDCr-A1-03	钛钙型高铬钢堆焊焊条, 堆焊金属为 1Cr13 高铬马氏体钢, 堆焊层具有空淬性, 一般不需进行热处理, 硬度均匀, 也可在 750~800℃ 退火软化, 当加热至 900~1000℃ 空冷或油淬后, 可重新硬化, 交直流两用, 焊接工艺性好; 属通用表面堆焊焊条, 用于堆焊工作温度在 450℃ 以下的碳钢或合金钢的轴及阀门等	≤0.15	—	—	10.0~16.0	其他 ≤2.50	≥40(焊后空冷)	
D507	EDCr-A1-15	低氢钠型高铬钢堆焊焊条, 堆焊金属为 1Cr13 高铬马氏体钢, 堆焊层具有空淬性, 一般不需进行热处理, 硬度均匀, 也可在 750~800℃ 退火软化, 当加热至 900~1000℃ 空冷或油淬后, 可重新硬化, 采用直流反接; 属通用表面堆焊焊条, 用于堆焊工作温度在 450℃ 以下的碳钢或合金钢的轴及阀门等	≤0.15	—	—	10.0~16.0	其他 ≤2.50	≥40(焊后空冷)	
D507Mo	EDCr-A2-15	低氢钠型高铬钢阀门堆焊焊条, 堆焊金属为 1Cr13 高铬马氏体钢, 堆焊层具有空淬性, 堆焊金属具有较高的中温硬度, 良好的热稳定性和抗冲蚀性, 与 D577 焊条配合使用能获得很好的抗擦伤性, 焊前不预热, 焊后不热处理, 采用直流反接; 用于堆焊工作温度在 510℃ 以下的中温高压截止阀密封面, 闸阀密封面等, 应与 D577 配合使用	≤0.20	—	—	10.0~16.0	Ni ≤6.00 Mo ≤2.50 W ≤2.00 其他 ≤2.50	(焊后空冷) ≥37 (回软化至 510℃)	

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分/%						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D507MoNb	EDCrAl-15	低氢型 1Cr13 高铬钢阀门堆焊焊条,采用直流反接,药皮中加入适量的铝、钨等强化元素,故堆焊金属具有较好的抗高温氧化和抗裂性;用于工作温度在 450℃ 以下的中低压阀门密封面的堆焊	≤0.15	—	—	10.0~16.0	Nb≤0.50 Mo≤2.50 其他≤2.50	≥37 (焊后空冷)	
D512	EDCrB-03	钛钙型高铬钢堆焊焊条,堆焊金属为 2Cr13 高铬马氏体钢,堆焊层具有空淬性,一般不需进行热处理,硬度均匀,也可在 750~800℃ 退火软化,当加热至 950~1000℃ 空冷或油淬后,可重新硬化,交直流两用,焊接工艺性好;属通用表面堆焊焊条,堆焊层比 D502 更硬、更耐磨,但较难加工,用于碳钢和低合金钢的轴、过热蒸气阀件、搅拌机、螺旋输送机叶片等	≤0.25	—	—	10.0~16.0	其他≤2.50	≥45 (焊后空冷) (耐软化 至 500℃)	
D516M D516MA	— EDCrMn-A-16	低氢钾型高铬锰钢堆焊焊条,具有良好的耐磨、耐热、耐蚀以及抗热裂性,焊前不预热,焊后不热处理,堆焊层可切削加工, D516M 为 H08 焊芯, D516MA 为 1Cr13 焊芯;用于工作温度在 450℃ 以下受水、蒸气、石油介质作用的部件,如 25 号铸钢、高中压阀门密封面等	≤0.25	≤1.00	6.00~8.00	12.0~14.0	—	38~48	
D516F	—	低氢钾型高铬锰钢堆焊焊条,具有良好的耐磨、耐热、耐蚀以及抗热裂性,焊前不预热,焊后不热处理,堆焊层可切削加工;用于工作温度在 450℃ 以下受水、蒸气、石油介质作用的部件,如 25 号铸钢、高中压阀门密封面等	≤0.25	≤1.00	8.00~10.00	12.0~14.0	—	35~45 (堆焊两层, 焊层高不小于 4mm)	
D517	EDCrB-15	低氢钠型高铬钢阀门堆焊焊条,堆焊金属为 2Cr13 高铬马氏体钢,堆焊层具有空淬性,一般不需进行热处理,硬度均匀,可在 750~800℃ 退火软化,加热到 950~1000℃ 空冷或油淬可重新硬化,采用直流反接;属通用的表面堆焊焊条,堆焊层比 D507 更硬、更耐磨,但较难加工,用于堆焊碳钢或低合金钢的轴、过热蒸气阀件、搅拌机、螺旋输送机叶片等	≤0.25	—	—	10.0~16.0	其他≤5.00	≥45 (焊后空冷) (耐软化 至 500℃)	
D547	EDCrNi-A-15	低氢钠型铬镍合金钢阀门堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属依靠硅进行强化,得到具有一定量铁素体的奥氏体组织,具有良好的抗擦伤、耐蚀及抗氧化性;用于堆焊 570℃ 以下工作的电站高压锅炉装置的阀门及其他密封零件	≤0.18	4.80~6.40	0.60~2.00	15.0~18.0	Ni 7.0~9.0	270~320HB	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D547Mo	EDCrNi-B-15	低氢钠型铬镍合金钢阀门堆焊焊条,采用直流反接,具有良好的高温抗擦伤、抗冲蚀等性能,有较高的高温硬度,良好的热稳定性和抗热疲劳性,堆焊金属时效强化效果显著,时效时间增加,硬度和抗擦伤性能进一步提高;用于600℃以下工作的高压阀门密封面堆焊	≤0.18	3.80~ 6.50	0.60~ 5.00	14.0~ 21.0	Ni 6.50~ 12.0 Mo 3.50~ 7.00 Nb 0.50~ 1.20 其他 ≤0.25	≥37	
D557	EDCrNi-C-15	低氢钠型铬镍合金钢阀门堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属依靠氩弧进行强化,得到铁素体加奥氏体组织,时效时间增加,硬度和抗擦伤性能进一步提高,具有良好的抗侵蚀、耐蚀及抗氧化性;用于600℃以下工作的高压阀门密封面堆焊	≤0.20	5.00~ 7.00	2.00~ 3.00	18.0~ 20.0	Ni 7.0~ 10.0	≥37	
D567	EDCrMn-D-15	低氢钠型高铬锰球墨铸铁阀门堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属为高铬锰型奥氏体,冷作硬化效果明显,优良的抗擦伤性,堆焊层有一定的硬度,可机械加工,抗裂性较好,焊接工艺性好,不需预热和缓冷;用于350℃以下中温中压球墨铸铁阀门密封面	0.50~0.80	≤1.30	24.0~ 27.00	9.50~ 12.50	—	≥210HB	
D577	EDCrMn-C-15	低氢钠型高铬锰钢阀门堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属为高铬锰型奥氏体,冷作硬化效果明显,良好的抗擦伤性,有一定的中温硬度,较好的热稳定性,与D507Mo配合使用可获得很好的抗擦伤性,抗裂性好,焊前不预热,焊后不热处理,良好的机械加工性;用于510℃以下中温高压阀门密封面,在闸阀中与D507Mo配合使用耐磨性能更好	≤1.10	≤2.00	12.0~ 18.00	12.0~ 18.0	Ni ≤6.0 Mo ≤1.0 其他 ≤3.0	≥28	
D582		钛钙型高效阀门密封面不锈钢堆焊焊条,效率高达120%,焊接工艺性好,耐大电流(比普通不锈钢焊条高15%~20%),无药皮发红开裂现象,良好的抗晶间腐蚀性,交直流两用,适于平焊、平角焊;用于阀门密封面堆焊	≤0.10	≤1.00	≤2.50	≥18.0	Ni ≥8.0	约170HB	



牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分, %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D603	EDZ-A1-08	石墨型铸铁堆焊焊条, 交直流两用, 采用直流电源更为适宜。由于堆焊金属为铸铁组织+铁、锰的碳化物, 具有较高的硬度和耐磨性, 对泥沙及矿石的磨耗有良好的抵抗能力; 用于农业机械、矿山设备等承受砂粒磨损与轻微冲击的零部件	2.50~ 4.50			3.0~5.0	Mo 3.0~ 5.0	≥55	
D618	—	石墨型抗磨粒磨损铸铁堆焊焊条, 堆焊层为高碳高铬铸铁型基体+弥散碳化物相, 堆焊层硬度高, 但较脆, 承受压力和冲击载荷的能力较低, 为了不影响抗磨粒磨损性能, 应尽可能采用较小电流, 以利于堆焊层硬质相结晶; 用于堆焊承受较轻冲击载荷, 但要求具有良好的抗磨粒磨损的耐磨件, 如锤击式磨煤机锤头等	≤3.00			15.0~ 20.0	Mo 1.0~ 2.0 V ≤ 1.00 W 10.0~ 20.00	≥58	
D628	—	石墨型抗磨粒磨损铸铁堆焊焊条, 堆焊层为高碳高铬铸铁型基体+弥散碳化物相, 堆焊层硬度较高, 耐热强度高, 但堆焊层硬而脆, 承受压力和冲击载荷的能力较低, 为了不影晌抗磨粒磨损性能, 应尽可能采用较小电流, 以利于堆焊层硬质相结晶; 用于堆焊承受较轻冲击载荷, 但要求具有良好的抗磨粒磨损的耐磨件, 如锤击式磨煤机锤头、风扇式磨煤机冲击板等	3.00~ 5.00	—		20.0~ 35.0	Mo 4.0~ 6.0 V ≤ 1.0	≥60	
D632A	—	钛钙型高铬铸铁堆焊焊条, 交直流两用, 堆焊层具有良好的耐腐蚀性、耐磨粒磨损性及高温耐磨性; 用于堆焊要求具有良好抗磨粒磨损性或常温、高温耐磨耐腐的零部件, 如喷粉机、挖掘机、破碎机、碾路机等	2.50~ 5.00	—	—	25.0~ 40.0	—	≥56	
D638	—	石墨型高铬铸铁堆焊焊条, 堆焊层具有抗磨粒磨损性, 交直流两用, 电弧稳定, 飞溅小, 基本无渣, 较高的熔敷效率; 用于堆焊要求具有良好抗磨粒磨损性能及耐磨性的零部件, 如装载机铲斗、铲刀刃、泥泵泵、粉碎机、锤头等	3.00~ 6.50	—	—	25.0~ 40.0	—	≥56	
D638Nb	—	石墨型高铬铸铁堆焊焊条, 具有良好的抗磨粒磨损性; 主要用于受磨粒磨损严重部位及高温磨损部件的修复	3.00~ 6.50	—	—	20.0~ 35.0	Nb 4.0~ 8.5	≥60	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D642	EDZCr-B-03	钛钙型高铬铸铁堆焊焊条, 交直流两用, 堆焊层具有良好的抗气蚀能力; 用于常温和高温耐磨耐腐蚀工作条件的零部件, 如水轮机叶片、高压泵零件、高炉料钟等	1.50~ 3.50		≤1.00	22.0~ 32.0	其他 ≤7.0	≥45	
D646	EDCr-B-16	低氢钾型高铬铸铁堆焊焊条, 交直流两用(交流流时空载电压不低于70V), 堆焊层具有良好的抗气蚀能力; 用于常温和高温耐磨耐腐蚀工作条件的零部件, 如水轮机叶片、高压泵零件、高炉料钟等	1.50~ 3.50		1.00	22.0~ 32.0	其他 ≤7.0	≥45	
D656	EDZ A2-16	低氢钾型铸铁堆焊焊条, 堆焊层硬度高, 耐强磨粒磨损, 具有良好的抗冲击、抗氧化及耐气蚀性, 交直流两用, 焊前需经(300~350℃)×1h烘焙; 用于中等冲击情况下主要受磨粒磨损的耐磨件, 如混凝土搅拌机、高速混砂机、螺旋送料器以及工作温度不超过500℃的高炉料钟、矿石破碎机、煤孔挖掘机等	3.00~4.00	≤2.50	≤1.50	25.0~ 34.0	Mo 2.00~ 3.00 其他 ≤3.00	≥60	
D658	—	石墨型高铬铸铁堆焊焊条, 具有优良耐磨粒磨损性, 工作温度可达650℃, 交直流两用, 电弧稳定, 基本无渣, 用于磨损严重的零部件及高温磨损部件	3.00~ 6.50		—	20.0~ 35.0	Mo 4.00~ 9.50 Nb 4.00~ 8.50 V 0.50~ 2.50 W 2.50~ 7.50	≥60	
D667	EDZCr-C 15	低氢钠型索尔马依特高铬铸铁堆焊焊条, 采用直流反接, 堆焊层在500℃以下具有耐磨损、耐腐蚀和耐气蚀能力, 超过此温度则堆焊层硬度明显下降; 用于堆焊要求耐强烈磨损、耐腐蚀和耐气蚀的场合, 如石油工业中离心泵、裂化泵轴套、矿山破碎机零件及柴油机引擎上的气门盖等	2.50~ 5.00	1.00~ 4.80	≤8.00	25.0~ 32.0	Ni 3.00~ 5.00 其他 ≤2.00	≥48	
D678	EDZ-131-08	石墨型含钨铸铁堆焊焊条, 交直流两用; 用于矿山机械和破碎机零件等受磨粒磨损部件的堆焊	1.50~2.20	—	—	—	W 8.00~ 10.00 其他 ≤1.00	≥50	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %					堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他	
D680 D687	EDCr-D15	低氢钠型含硼高铬铸铁堆焊焊条,采用直流反接,电弧较稳定,飞溅一般,渣少,脱渣容易,堆焊层即使用硬质合金刀具也难以进行切削加工,只能研磨,金相组织为马氏体+粗大复合碳化物,用于强烈磨损的场合,如牙轮钻头小轴、煤孔挖掘机、提升厚斗、破碎机辊、泵框筒、混合器叶片等	3.00~4.00	≤3.00	1.50~3.50	22.0~32.0	B 0.50~2.50 其他≤6.00	≥58
D707	EDW A15	低氢钠型碳钢焊条的碳化钨堆焊焊条,依靠药皮中碳化钨过渡合金,堆焊金属含钨量40%~50%,由于药皮较厚,因而套筒较长,在焊条发红后药皮易小块脱落,采用直流反接,较小电流;用于堆焊耐岩石强烈磨损的机械零部件,如混凝土搅拌机叶片、推土机、挖掘机叶片、高速混砂箱等	1.50~3.00	≤4.00	≤2.00		W 10.0~50.0	≥60
D707Ni		低氢型纯镍堆焊焊条,依靠药皮中碳化钨过渡合金,堆焊金属具有较好的抗裂性及抗氧化性,采用直流反接,用于抗高温氧化、耐磨粒磨损焊件的堆焊,如高炉钟斗、烧结肥齿等		—	—	—	WC≈55 其他 5.00~10.0 余量为Ni	≥45
D717 D717A	EDW-B15	低氢型碳化钨堆焊焊条,采用H08A钢带轧制成“O”形,直径为3.2mm,内装粒度为60~80目、含量为焊芯重量60%以上的铸造碳化钨,外涂碱性低氢型涂料,依靠焊芯中过渡碳化钨,焊接工艺性好,脱渣容易,电弧稳定,采用直流施焊,较小电流,D717A为无缝管状焊条;用于堆焊耐岩石强烈磨损的机械零部件,如三牙轮钻头的牙爪背部、鼓风机叶片、强力采煤滚筒、轧糖机乳棍、混凝土搅拌机叶片等	1.50~4.00	≤4.00	≤3.00	≤3.00	W 50.0~70.00 Mo≤7.00 Ni≤3.00 其他≤3.00	≥60
D802	EDCoCr-A-03	钛钙型钴铬钨合金焊芯的钴基堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属在650℃仍能保持良好的耐磨性和耐蚀性;用于要求在650℃左右工作仍能保持良好的耐磨性和耐蚀性的场合,或承受冲击和冷热交替的部位,如堆焊高温高压阀门及热剪切刀刃等	0.70~1.40	≤2.00	≤2.00	25.0~32.0	Fe≤4.50 W 3.0~6.00 其他≤4.00 余量为Co	≥40

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D812	EDCoCr-B-03	钛钙型钴钨合金焊芯的钴基堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属在650℃仍能保持良好的耐磨性和耐腐蚀性;用于高温高压阀门、高压泵的轴套筒和内衬套筒以及化纤设备的斩刀刃口等	1.00~1.70	≤2.00	≤2.00	25.0~32.0	Fe≤5.00 W 7.0~10.0 其他≤4.0 余量为Co	≥44	
D822	EDCoCr-C-03	钛钙型高碳钴钨合金焊芯的钴基堆焊焊条,采用直流反接,渣覆盖性好,成形美观,具有优良的耐磨、耐热和耐腐蚀性,在650℃高温也能保持这些特性;用于牙轮钻头轴承、锅炉的旋转叶轮、粉碎机刃口、螺旋送料机等磨损部件的堆焊	1.75~3.00	≤2.00	≤2.00	25.0~33.0	Fe≤5.00 W 11.0~19.00 其他≤4.00 余量为Co	≥53	
D842	EDCoCr-D-03	钛钙型钴基4号低碳钴钨合金焊芯的堆焊焊条,采用直流反接,堆焊金属在800℃仍能保持良好的抗热疲劳性和耐腐蚀性;用于高温条件下承受冲击和冷热交替的工件堆焊,如热锻模、阀门密封面等,具有良好的性能	0.20~0.50	≤2.00	≤2.00	23.0~32.0	Fe≤5.00 W≤9.50 其他≤7.0 余量为Co	28~35	
D915	---	含碳化硼的耐磨粒磨损堆焊焊条,交直流两用,具有良好的抗磨粒磨损性;用于受剧烈磨粒磨损部件的堆焊修复,如排风机叶轮、泥泵泵、煤矿溜槽等	2.00~3.00	—	—	≤5.00	B 1.50~2.50 其他≤5.0	≥64	
D007	EDTV-15	低氢型铸铁模具用堆焊焊条,电弧稳定,焊接工艺性优良,堆焊金属为铁素体基体+弥散分布的碳化钨,具有优良的抗裂性,焊前不预热;用于灰口铸铁、球墨铸铁和合金铸铁件的堆焊及焊补,如大型铸铁压延模、铸铁成型模及铸铁模具等	≤0.25	≤1.00	2.00~3.00	—	Mo 2.0~3.00 V 5.00~8.00 B≤0.15	≥180HB	

续表

牌号	型号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
			C	Si	Mn	Cr	其他		
D017	—	低氢钠型铸铁刃口模堆焊焊条, 焊接工艺性好, 电弧稳定, 飞溅较小, 易脱渣, 成形光洁, 焊缝金属为马氏体 + 弥散分布的碳化物, 具有良好的抗裂性, 焊前不预热; 用于铸铁和合金铸铁切边模具刃口的堆焊及焊补	0.28~ 0.35	1.00~ 2.00	0.60~ 1.50	5.30~ 7.50	—	—	≥53
D022	—	钛钙型钨钴钨钨合金的高硬度耐磨堆焊焊条, 交流两用, 焊接工艺性好, 工件焊前不预热, 焊后无需缓冷; 用于建筑行业的碱泵、磨损件和制糖、矿山、制砖、水泥、公路等机械中要求耐磨的零部件堆焊	≤1.00	—	—	≤5.00	W 12.00~ 16.00 Mo+V≤ 4.00 其他≤ 1.00	≥58(焊 后空冷)	
D027	—	低氢钠型冲裁模刃口堆焊焊条, 焊接工艺性好, 一般焊接条件下不易产生裂纹、气孔、夹渣, 焊前工件不预热, 焊后不需热处理, 表面硬度 HRC58; 用于各种大中型冲裁修边模的剪切刃口的模具堆焊和修复	≈0.15	≈2.80	—	≈5.50	Mo≈0.50 V≈0.50	≥55	
D036	—	低氢钾型冲裁模刃口堆焊焊条, 交流两用, 焊接工艺性好, 堆焊层组织及硬度稳定性好, 焊前不预热, 焊后不热处理; 用于堆焊制造和修复冲模(在碳钢基体上堆焊形成刃口), 也可用于修复要求耐磨性较高的机械零部件	0.50~ 0.70	0.60~ 0.80	0.60~ 0.90	5.00~ 6.00	Mo 1.50~ 2.00 V≈0.50	≥55(焊 后空冷)	
D047	—	低氢钠型硬面堆焊焊条, 采用直流反接, 焊接工艺性好, 抗裂性优良, 冷焊不开裂, 具有良好的抗挤压能力和抗磨粒磨损性; 用于液压机挤压辊的堆焊制造及不拆卸修复, 也可用于其他耐挤压磨损的机械零部件	≤1.70	≤3.00	—	4.00~ 7.00	Mo 1.50~ 3.00 其他≤ 10.00	≥55	

表 3.31 瑞典伊萨集团总公司的耐磨堆焊焊条

牌号	型号 DIN(AWS)	相当于 中国牌号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊硬 度 HRC
				C	Si	Mn	Cr	Mo	其他	
OK Selectrode 83.28	E1-350	D156	含铬碱性堆焊焊条,适于堆焊轨道、轴类、轧辊,也可用于焊接 $\sigma_b$ 为 800~900MPa 淬硬钢	0.1	0.7	0.7	3.2	—	—	30~38
OK Selectrode 83.29	E1-350	D156G	含铬、钴碱性高效堆焊焊条,焊接效率是 OK Selectrode 83.28 的两倍,用途与其相同	0.1	0.5	0.7	3.2	—	—	28~35
OK Selectrode 83.50	E6-55	—	金红石型通用堆焊焊条,空载电压 40V 时即可施焊,易操作,抗裂性好,适于堆焊装运、农用设备耐磨件	0.4	0.6	1.0	6	0.6	—	50~60
OK Selectrode 83.65	E6-60	—	碱性堆焊焊条,价格便宜,堆焊层空冷后为马氏体,适于堆焊抗高温氧化、耐泥沙磨损件	0.75	0.4	0.6	2	—	—	58~63
OK Selectrode 84.42	E5-45 R	D502	金红石型堆焊焊条,堆焊金属为铁素体+马氏体,耐腐蚀,适于堆焊铁路道岔、齿轮等耐磨件	0.12	0.5	0.5	13	—	—	39~45
OK Selectrode 84.52	E6-55-R	D512	金红石型,堆焊金属为 Cr13 型马氏体组织,耐腐蚀,适于堆焊齿轮、轴类、加料斗等耐磨件	0.25	0.5	0.5	13	—	—	49~55
OK Selectrode 84.58	F6-55r	—	碱性堆焊焊条,耐腐蚀,适于堆焊高磨损工件,如搅拌机 etc	0.7	0.6	0.7	10	—	—	53~58
OK Selectrode 84.78	E10-60Z	D642	高碳高铬堆焊焊条,抗泥石、矿物强烈磨损,耐腐蚀抗高温,适于堆焊选矿、粉碎机械等	4.5	0.8	1.6	33	—	—	59~63
OK Selectrode 84.79	E10-60Z	—	含 Nb 高碳高铬堆焊焊条,抗矿石高磨损,耐蚀抗高温氧化,适于堆焊细矿石高磨损件	3.5	—	—	22	—	Nb 10	55~57
OK Selectrode 85.38	E3-55t	—	工模具堆焊焊条,堆焊层韧性好,耐磨损,能承受冷热工况,用于制造和修复锻模等工具模	0.7	1	1.5	1	—	W 2.5	53~60
OK Selectrode 85.58	E3-50-T	D337	碱性堆焊焊条,堆焊层有良好的红硬性,冲击韧性和高温耐磨性,适于堆焊热加工工具和模具	0.35	1	1	1.75	—	Mo 8, Nb 0.8, Co 2	12~50
OK Selectrode 85.65	E4-60s	—	碱性高速钢焊条,焊后硬度为 60HRC,经两次回火后可达 65HRC,550℃ 以下不产生软化,适于堆焊含 Mo 高速钢	0.85	1.5	1.3	4.5	7.5	W 1.75, V 1.5	59~61
OK Selectrode 86.08	E7-200K	D256	碱性高锰钢焊条,焊后可加工硬化,适于堆焊受强烈冲击高磨损工件	1.1	0.8	13	—	—	—	180~200HB(焊态) 44~48HRC(冷作硬化)
OK Selectrode 86.28	E7-200K (EFeMr-A)	—	钴基性高锰钢焊条,比 OK86.08 熔敷效率高 50%,焊缝韧性好,止裂性能好,适于修复高锰钢耐磨件	0.8	0.3	14	—	—	Ni 3.5	160~180HB(焊态) 42~46HRC(冷作硬化)
OK Selectrode 92.35	E23-250CKT (ENiCrMo-5)	—	镍基焊条,焊缝为司太立 C 型合金,可加工硬化,高温强度高,耐强腐蚀性,适于堆焊热锻模、耐磨耐蚀件、焊接高合金	0.06	0.7	0.7	15.5	16.5	W 3.8, Ni 5.7, Fe $\geq$ 5.5	240~260HB(焊态) 40~45HRC(冷作硬化)
OK Selectrode 93.06	E20-40ctz (ECoCr-A)	D802	钴铬钨焊条,焊缝为司太立 6 型,在高温和强酸中耐磨性好,抗裂性、韧性高,适于堆焊热锻模、热轧机等	1	0.9	1.0	28	—	Fe 3.1, W 4.5, Co 60	42

表 3.32 伊萨集团美国分公司的耐磨堆焊焊条

牌号	型号	相当于中国牌号	特征与用途	熔敷金属化学成分 / %						堆焊层硬度 HRC
				C	Si	Mn	Cr	其他		
Wear-Arc 31P	—	D202A	焊缝金属具有优异的耐磨性,适于抗冲击和承受压应力的场合,最适于作为表面耐磨堆焊层,用于最后一层堆焊,堆焊层具有加工性,塑性和压缩强度高,足许多耐磨场合,如磨轮、凸轮、轴承、轧辊、耐磨刀具、锻模以及所有表面硬化前需要堆焊的碳钢件	0.20	0.70	0.90	2.30	Mo 1.10	29	
Wear-Arc Ni Mn	EFe Mn A	D256	焊缝金属抗裂性好,在锰钢表面形成塑性好的熔合区,焊缝金属的奥氏体组织具有优异的耐磨性,适于抗冲击和承受压应力的场合,连续冲击时熔敷金属表面硬度增高,耐磨性增强	0.60	0.55	14.00		Ni 4.00	48	
Wear-arc 41P	—	D172	全位置铁粉低氢型耐磨堆焊条,用于碳钢、低合金钢和耐锈钢。低氢药皮提高了堆焊合金的熔合性,不出现焊道下裂纹。堆焊金属硬度高,抗变形能力强、不开裂、耐磨性好,适于抗冲击和承受压应力的场合。主要应用包括铲斗链轴、推土机法兰盘和转臂、滚压机、磨锤、拖拉机磨擦件等	0.45	1.30	0.90	2.20	Mo 1.00	54~56	
Wear-Arc WH	—	—	焊缝金属合金含量高,抗变形能力强,耐磨性是加工硬化奥氏体高锰钢的2-4倍。合金含量约34%,具有加工硬化作用,既可作为耐磨堆焊合金,又可作为高强焊接合金。焊缝金属的奥氏体组织韧性好,抗裂性强。在锰钢表面形成可靠的熔合区,用于锰钢结构件的堆焊和维修,性能比308、309、310、312不锈钢优越。堆焊层受到冲击和压应力作用产生表面硬化,48~50HRC,加工硬化表面保持高韧性和抗变形能力	0.45	0.8	4.25	19.75	Ni 10.0	48.5	
Wear-Arc 61P	—	D608	铁粉低氢型焊条,用于锰钢和碳钢,推荐用于磨粒磨损和轻度冲击时易损件的堆焊,适于全位置工件的现场施焊。主要应用包括铲斗齿、捣碎机、搅拌机、脱粒机等	3.00	1.80	0.80	6.50		56~59	
Wear-Arc 12IP	—	D618	抗冲击性强,耐磨性好,合金含量高,抗腐蚀能力强,推荐用于磨粒磨损和易受冲击磨损构件,以延长工作寿命。主要应用于挖土机、运输机法兰盘、滚压机、磨锤、受锤击件等	3.50	1.80	2.70	13.00	Mo 1.10	54~56	
Wear-Arc 40	—	D632A	特殊成分的涂料焊条,药皮中合金含量适中,在含Fe、Cr基体中形成耐磨的碳化铬质点。电弧稳定,焊接电流高,熔敷金属耐磨性强,润滑性好,工作温度高达538℃时仍保持高硬度和耐磨性能,适于周期性高温工作的场合。设计用于螺杆、送进导轨、丝杠、链条和农机具,也可用于严重磨损的滚压、挖掘设备	4.50	1.80	0.30	30.00		57	

表 3.33 国内气体保护焊或自保护焊用药芯焊丝的成分及用途

牌 号	保护气体	堆焊层主要成分 / %										堆焊层硬度 HRC	用 途
		C	Mn	Si	Cr	Mo	其他						
YD176Mn-2	无	0.12~0.18	1.7~2.1	0.9~1.2	0.55~0.85	0.3~0.5	—	—	—	—	—	32~36	用于堆焊齿轮、矿山车论及轴、链轮等
YD212-1	CO <sub>2</sub>	0.3~0.6	—	—	≤5.0	≤4.0	—	—	—	—	—	≥50	用于堆焊受磨料磨损和黏着磨损的零部件,如齿 轮、挖掘机挖斗、矿山机械等
YD247-1	CO <sub>2</sub>	≤0.7	—	2~3	7~9	—	—	—	—	—	—	55~60	用于堆焊受泥砂磨损和汽蚀破坏的水利机械
YD256Ni-2	无	0.5~0.8	15.0~17.0	0.3~0.6	2.7~3.3	—	Ni 1.5~1.9	—	—	—	—	≥170HB	用于各种破碎机、高锰钢轨、铁路道岔、推土机刃板 等受冲击载荷的磨损件
YD337-1	CO <sub>2</sub>	0.25~0.55	—	—	2.0~3.5	—	W 7.0~1.0	—	—	—	—	≥18	用于堆焊各种热锻模,包括制造和修复
YD386-2	无	0.06~0.14	1.2~1.6	0.15~0.45	2.0~2.6	≤0.5	—	—	—	—	—	42~46	用于堆焊承受金属间磨损的零部件,如挖掘机链 子、链轮等
YD397-1	CO <sub>2</sub>	≤0.6	1.5~2.5	≤1.0	5~7	≤1.0	—	—	—	—	—	55~60	用于堆焊各种冷锻模、冷轧辊等高硬度零部件
YD502-2	无	≤0.15	—	—	10.0~16.0	—	—	—	—	—	—	≥40	用于堆焊工作温度低于450℃的碳钢合金钢阀门及 轴等
YD517-2	无	≤0.25	—	—	10.0~16.0	—	—	—	—	—	—	≥45	2Cr13 型阀门堆焊焊丝,用于堆焊轴,过热蒸汽用 阀件、输送机叶片等
YD616-2	无	3.0~3.5	0.9~1.2	0.7~1.0	13.5~15.5	0.3~0.6	—	—	—	—	—	46~53	堆焊肥路机的肥齿、破碎机锤头和挖掘机的铲齿等
YD616Mo-2	无	2.9~3.4	0.6~1.0	0.5~1.9	23.0~26.0	2.5~3.1	—	—	—	—	—	54~60	堆焊筑路机和采石设备零部件、搅拌机叶片等
SQD276	CO <sub>2</sub> 或 Ar+CO <sub>2</sub>	≤0.8	11.0~16.0	≤0.8	13.0~17.0	—	—	—	—	—	—	≥20	用于堆焊水轮机叶片等受汽蚀破坏的零件,也适用 于高锰钢工件的堆焊
SQD608	Ar+CO <sub>2</sub>	2.50~4.50	—	—	3.0~5.0	—	—	—	—	—	—	≥55	用于农业及矿山机械等承受磨料磨损的零部件
SQD698	Ar+CO <sub>2</sub>	≤3.0	—	—	4.0~5.0	—	W 8.5~14.0	—	—	—	—	≥60	用于矿山机械和泥泵泵的堆焊
SZD55	无	0.86	1.23	0.5	6.0	—	—	—	—	—	—	≥50	用于挖掘机铲齿、粉碎机锤、料斗等零部件的堆焊

注:堆焊层硬度为堆焊三层的平均硬度(焊态),牌号中“SQ”和“SZ”为天津三英公司牌号标记。



表 3.34 瑞典伊萨集团总公司的药芯堆焊焊丝

牌号	型号 AWS	直径 /mm	特征与用途	焊丝化学成分 /%							堆焊层硬度 HRC
				C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	其他	
OK14.70	—	1.6 2.4	耐磨堆焊用自保护药芯焊丝,抗磨粒磨损性能优良,高温下仍有好的耐腐性	3.5	0.4	0.8	21	—	3.5	V 0.4	50~60
OK15.38	—	1.6 2.4	表面堆焊用药芯焊丝,适于CO <sub>2</sub> 保护半自动焊接	0.13	0.5	0.8	0.8	—	0.4	—	22
OK15.40	—	1.6~4.0	Cr-Mn系表面堆焊用药芯焊丝,直径φ1.5~2.4mm,适于气保护焊,直径φ3~4mm,适于埋弧焊	0.2	1.0	1.4	1.4	—	—	—	32~40
OK15.41	—	1.6 2.4	Cr-Mn系表面堆焊用药芯焊丝,适于气保护半自动焊	0.12	0.5	1.5	3.5	—	—	Al 1.4	28~36
OK15.42	—	1.6~4.0	Cr-Mn-Ni-Mo系表面堆焊用药芯焊丝,粗丝用于埋弧焊,焊剂为OK10.70	0.15	0.5	1.5	4.5	0.5	0.5	—	35~45
OK15.52	—	1.6~4.0	Cr-Mn-Mo系堆焊用药芯焊丝,细丝适于气保护焊	0.2	0.8	2.6	9	—	1	—	50~55
OK15.60	—	1.6 2.4	表面堆焊13%Mn钢用药芯焊丝,适于CO <sub>2</sub> 保护半自动焊接	0.9	0.4	13	—	3.0	—	—	50
OK15.65	—	—	自保护或CO <sub>2</sub> 气保护堆焊用药芯焊丝,MA组织,用于低碳低合金及13Mn钢的焊接,焊缝金属耐冲击性好	0.3	0.5	13.5	16.0	1.75	0.8	V 0.65	200~250 HV
OK15.70	ER410	3.0 4.0	埋弧焊接或堆焊用不锈钢药芯焊丝,配用焊剂为OK10.91、OK10.92	0.05	0.4	0.2	13	—	—	—	30~35
OK15.73	ER420	2.0~4.0	堆焊用药芯焊丝,马氏体组织,耐腐性和耐蚀性好,粗丝用于埋弧焊	0.25	—	—	13	2.5	1.5	Nb 0.25 V 0.25	50~55
OK15.80	—	1.6	自保护堆焊用药芯焊丝,焊缝为马氏体组织,含铁量高,耐磨及冲击韧性好	1.6	0.5	1.5	6.5	—	1.5	Ti 5.0	50~60

表 3.35 国内埋弧堆焊用药芯焊丝的成分及用途

牌 号	焊 剂	堆焊层主要成分 / %										堆焊层硬度 HRC	用 途
		C	Mn	Si	Cr	Mo	W 或 V	其他					
HYD047	HJ107	≤1.7	1.5~3.0	—	4.0~7.0	1.5~3.0	—	Ni≤3.0	—	—	—	≥55	用于液压机的挤压机表面堆焊
HYD057	HJ260	0.2~0.5	—	—	4.0~6.0	0.5~1.5	V≤1.0	—	—	—	—	44~46	用于热轧辊、开坯辊、支持辊的制造和修复
HYD117Mn	HJ431	≥0.1	1.2~1.6	—	(Cr + Mo)	1.5~2.5	—	—	—	—	—	≈30	用于 HYD616Nb 焊丝堆焊时的打底焊
HYD616Nb	HJ151	1.0~2.0	0.3~0.5	—	10~15	—	—	(Si + Nb) 5.5~7.0	—	—	—	≥55	用于特制严重磨料磨损和轻冲击载荷工况下的水泥磨辊、电厂磨煤机磨辊的堆焊
HYD707	HJ260	2~3	≈2	≈1	—	—	—	W 40~50	—	—	—	≈60	碳化钨药芯焊丝,用于矿山设备、推土机零部件的堆焊
SMD281	SJ107	≤1.1	12.0~18.0	≤2.0	12.0~18.0	≤4.0	—	Ni ≤6.0	—	—	—	≥28	Cr-Mn 型阀门堆焊焊丝,适于堆焊工作温度低于 510℃ 的中温高压阀门密封面
SMD331	HJ260	0.16	≤2.5	≤1.5	<1.5	≤1.0	—	Ni≤2.0	—	—	—	≥33	用于堆焊挖掘机部件、泥浆泵、齿轮、传动轴等
SMD451	SJ107	≤0.25	—	—	10.0~16.0	—	—	Ni≤5.0	—	—	—	≥45	2Cr13 型阀门堆焊焊丝,用于堆焊碳钢或低合金钢轴、过热蒸汽阀门件、螺旋输送机叶片等
SMD481	SJ107	0.25~0.55	—	—	2.0~3.5	—	W 7.0~10.0	Ni≤3.0	—	—	—	≥48	3Cr2W8 型热锻模堆焊焊丝
SMD501	SJ107 或 HJ260	≤0.5	1.0	0.55	10.0~16.0	≤2.0	—	Ni≤3.0	—	—	—	≥50	高 Cr 型连铸辊堆焊焊丝
SMD503	SJ107 或 HJ260	≤0.6	1.2	≤3.0	≤8.0	1.0~3.0	V≤1.0	Ni≤3.0	—	—	—	≥50	用于型钢轧辊或其他热轧辊的修复
SMD551	SJ107	2.5~4.5	—	—	3.0~5.0	3.0~5.0	—	Ni≤5.0	—	—	—	≥55	Cr-Mo 合金铸铁堆焊焊丝,用于磨粒磨损件修复,如矿山机械等
SMD581	SJ107	2.5~5.0	≤2.0	—	22~32	—	—	Ni≤8.0	—	—	—	58~63	高 Cr 铸铁堆焊焊丝,用于受强烈磨损件的制造与修复,如磨煤机磨辊、水轮机叶片等
SMD582	SJ107	2.5~5.0	—	≤2.0	15~25	≤5.0	—	Ni≤4.0	—	—	—	58~63	高 Cr 铸铁堆焊焊丝,用于受强烈磨损件,如磨煤机磨辊、水泥磨辊等的修复
SMD583	SJ107	≤4.0	—	—	4.0~6.0	—	W 8.0~14.0	Ni≤3.0	—	—	—	58~63	Cr-W 铸铁堆焊焊丝,用于堆焊受磨料磨损的矿山机械
SMD601	SJ107 或 HJ260	4.0~6.0	—	—	18.0~26.0	4~9	V≤1.0	Nb 7.0~10.0	—	—	—	≥60	用于中、高温下强磨粒磨损工作部件的表面堆焊,如高炉料钟、布料溜槽等

注:堆焊层硬度为堆焊三层的平均硬度(焊态),牌号中“SMD”为天津三英公司牌号标记。

表 3.36 国内堆焊用烧结焊剂和配用焊丝的特性与用途

焊剂型号	配用焊丝及堆焊层性能		焊剂粒度 /mm	特性与用途	烘干条件
	配用焊丝	堆焊层硬度 HRC			
SJ105	WM-210 药芯 耐磨合金焊丝	≥45	2.0~0.28	氟碱型焊剂,碱度约为 2.2,焊剂呈棕色圆形颗粒。直流焊接时焊丝接负极,电弧燃烧稳定,脱渣容易,焊缝成形美观。焊剂的抗吸潮性良好,颗粒强度高,松装比小;焊缝金属具有良好的抗裂性能。配合适当焊丝可用于轧辊的表面堆焊	300~400℃ 1h
SJ202	H3Cr2W8 H3Cr2W8V H30CrMnSi	—	2.0~0.28	高铝型焊剂,灰色颗粒,焊接工艺性能优良,脱渣容易,焊缝成形美观;堆焊金属具有较高的耐冷热疲劳,抗高温氧化和耐磨性能。配合适当焊丝,适用于工作温度低于 600℃ 的各种耐磨、耐冲击工作面的堆焊,如高炉料钟、轧辊等。焊接时应预热,焊后进行消除应力热处理	300~350℃ 1~2h
SJ203	H1Cr13 焊带	—	2.0~0.28	堆焊用高铝型焊剂,碱度约为 1.3,红褐色或灰褐色圆形颗粒,焊接工艺性能优良,配合相应的焊带进行堆焊,堆焊层具有较好的综合性能,热处理后硬度约为 32HRC。用于堆焊连铸辊等耐磨件	250℃ 2h
SJ303	H00Cr25Ni12 H00Cr21Ni10 等焊带 (宽度 ≤75mm)	—	2.0~0.28	硅钙型带极埋弧堆焊用焊剂,碱度为 1.0,焊带接正极,电弧燃烧稳定,易脱渣,焊道平整光滑。该焊剂的特点是 Cr 烧损少 ( $\Delta Cr \leq 1.2\%$ ),增碳少 ( $\Delta C \leq 0.008\%$ ),特别适用于堆焊超低碳不锈钢,常用于堆焊耐腐蚀的奥氏体不锈钢	300~350℃ 2h
SJ521	3Cr2W8 等	50~62	—	丝极埋弧堆焊用的陶质型焊剂,电弧稳定,脱渣性好,堆焊金属成形美观,即使在刚性较大的工件上堆焊,也可获得硬度 50~62HRC 的无裂纹的堆焊层。用于工作温度低于 600℃ 的各种要求耐磨、耐冲击工作面的堆焊,如高炉料钟、轧辊等	—
SJ522	H08A 3Cr2W8V 等	—	—	中性偏碱低温陶质型焊剂,呈灰黑色粉粒状,电弧稳定,脱渣良好,在 250~300℃ 条件下堆焊,渣壳可以自动脱落,并具有优良的抗热裂纹性能。焊缝成形美观,适于丝极埋弧自动堆焊,由于焊剂具有增碳和渗合金能力,容易获得从 30~62HRC 的碳化物弥散分布的堆焊层。配合 H08Mn 焊丝可获得 30~45HRC 的堆焊层,例如 45 号大直径轧辊;配合 3Cr2W8V 焊丝可获得 50~62HRC 的堆焊层,适于肋卷轧辊(敏、铸钢件)或高炉料钟堆焊,在高温 500~600℃ 工作时,堆焊层硬度可达 400HV。焊接时应预热,焊后应去应力处理	300~350℃ 2h

续表

焊剂型号	配用焊丝及堆焊层性能		适用电源种类	焊剂粒度/mm	特性与用途	烘干条件
	配用焊丝	堆焊层硬度HRC				
SJ524	H00Cr20Ni10 焊带		直流		用于超低碳不锈钢带极埋弧堆焊的陶瓷型焊剂,配合 H00Cr20Ni10 焊带,进行过覆层和不锈钢层的堆焊,电弧稳定,渣壳可自动脱落,焊缝成形美观,当焊带含碳量为 0.02%~0.025%时,堆焊金属可达到基本不增碳,因此堆焊金属具有优良的抗晶间腐蚀性能和抗脆化性能,用于石油化工容器、反应堆压力容器等内壁要求耐腐蚀的衬里带极堆焊。采用直流反接,层间温度控制在 150℃ 以下	350~400℃ 1~2h
SJ602	H00Cr24Ni12 H00Cr20Ni10Nb H00Cr19Ni12Mo2	—	直流		带极电渣堆焊用焊剂,为细粉状颗粒,采用平特性直流电源堆焊,电渣过程稳定,快速脱渣,焊缝成形美观,焊缝间搭接处熔合良好,具有不增碳、Cr 烧损少的特点。适用于宽度 30~75mm 的焊带进行电渣堆焊,可用于核容器、加氢反应器及压力容器等耐腐蚀不锈钢的堆焊	300~350℃ 2h
SJ603	3Cr2W8 30CrMnSi	—	—	1.6~0.25	丝板埋弧堆焊用焊剂,呈灰白色颗粒,脱渣性好,堆焊金属成形美观。可获得硬度为 50~60HRC 的无裂纹堆焊层,适用于工作温度低于 600℃ 的各种要求耐磨、耐冲击的工作表面堆焊,如高炉炉钟、轧辊等	—
SJ606	308L、309L 焊带	—	直流	1.6~0.25	用于超低碳不锈钢带极埋弧堆焊的焊剂,呈灰白色颗粒,电弧稳定,渣壳可自动脱落,焊缝成形美观,堆焊金属具有优良的抗晶间腐蚀性能和抗脆化性能。用于石油化工容器,300MW 和 600MW 核电机组高压加热器 20MnMo 管板锻件上堆焊,也可用于核电蒸发器、稳压器、压力壳内壁要求耐腐蚀的衬里带极堆焊。采用直流电源反接,层间温度控制在 150℃ 以下	350~400℃ 2h
SJ607	适当焊丝	≥65	交、直流	2.0~0.28	碱性焊剂,灰黄色圆形颗粒,直流焊接时焊丝接正极,具有良好的工艺性能。配合适当的药芯焊带可堆焊各种水泥破碎机等耐磨产品	300~350℃ 2h

### 3.5.5 堆焊合金的耐磨性评价

堆焊工件在使用过程中由于堆焊层表面被固体、液体或气体的机械或化学作用引起的材料脱离或转移而造成表面发生磨损。堆焊表面磨损形式有黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、冲击磨损和微动磨损等多种类型。

#### (1) 硬度评定

硬度是金属材料的一种重要的性能指标。硬度试验是堆焊表面层耐磨性试验中最基本的试验项目。堆焊表层应具有一定的硬度，而且在工作温度下，其硬度值不应发生大的变化。堆焊层表面硬度应均匀，不应该存在软化区。

硬度的试验方法有很多种，大体上可分为压入法和刻划法两大类。在压入法中，根据加载速度不同分为静载压入法和动载压入法。静载压入法又根据载荷、压头类型和表示方法的不同，分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微硬度等多种。用不同试验方法所测定的硬度之间，并没有简单准确的相互关系作为换算的基础。现有的一些换算公式和对照表，大多是根据对同类金属材料在相同条件下和一定硬度范围内进行比较试验，积累大量试验数据之后，经过分析比较而归纳出来的。这些数据有一定的实用价值，但在要求准确的硬度数据时不宜采用。

各种材料适用的硬度试验方法见表 3.37。

表 3.37 各种材料适用的硬度试验方法

材 料	硬度试验方法		
	布氏硬度 HB	洛氏硬度 HRC	维氏硬度 HV
碳钢、低合金钢	√		√
奥氏体不锈钢	√		√
高铬不锈钢		√	√
镍基合金		√	√
钴基合金		√	√
铜基合金	√		√
铝及铝合金	√		√
硬质合金		√	√
金属间化合物		√	√
金属陶瓷		√	√

注：√表示适用。

在同一磨损类型下，堆焊金属层硬度高时，耐磨性好；硬度低时，耐磨性差，但抗冲击性能好。材料表面磨损是一个复杂的动态过程，硬度是一个静态参量，不能全面、正确地反映磨损这一动态过程。堆焊金属的耐磨性取决于其中硬质相的总量、各硬质相的性能和它们的分布形态、基体的硬度和韧性等。

硬度高有时并不意味着更好的耐磨性及更长的使用寿命。许多优质的堆焊材料其高耐磨性能取决于弥散分布在基体中的碳化物，这些碳化物的硬度大于基体硬度，但韧性小于基体韧性。不同的堆焊金属即使有相同的整体硬度，也不能仅以此评判其具有相同的耐磨性。

耐磨性，尤其是抗低、高应力磨料磨损性，取决于金属硬度及其金属显微组织。而显微组织结构又取决于基体中的碳含量、合金元素以及碳化物的比例及类型。碳化物硬度最高的、分布均匀的、含量又多的堆焊合金具有优异的抗高、低应力磨料磨损性。

(2) 相对耐磨性

由于工件之间相对摩擦的结果，引起摩擦表面分离出微小颗粒，使金属接触表面不断发生尺寸变化，工件发生质量损失，这一现象称为磨损。摩擦和磨损是物体相互接触并有相对运动时伴生的两种现象，摩擦是磨损的原因，磨损则是摩擦的必然结果。

金属表面的磨损现象很复杂，对同一种工作条件往往存在几种磨损形式。比如，轧辊、热锻模等不仅受热疲劳作用，而且还承受磨料磨损、氧化磨损等；高、中压阀门密封面，在不同条件下可能承受磨料磨损、黏着磨损、腐蚀磨损等多种磨损形式。所以，必须具体情况具体分析，并找出起支配作用的磨损类型，作为选取堆焊合金的基础。

几种堆焊合金耐磨料磨损和耐冲击磨损的能力比较见表 3.38。

表 3.38 几种堆焊合金耐磨料磨损和耐冲击磨损的能力比较

堆焊合金	磨料磨损量 <sup>①</sup>		冲击韧性
	在湿石英砂中	在干石英砂中	
粒状碳化钨(气焊)	0.20	0.60	低 ↓ 高
高铬合金铸铁(气焊)	—	0.03	
铬钨马氏体合金铸铁(气焊)	0.35~0.40	0.02	
铬镍或铬钼马氏体合金铸铁(气焊)	0.35~0.40	0.04	
马氏体低合金钢(弧焊)	0.65~0.70	—	
铬钼或 5% 铬马氏体钢(弧焊)	—	0.40	
珠光体钢(气焊)	0.80	0.06	
高锰奥氏体钢(弧焊)	0.75~0.80	—	

① 以 20 钢磨损量为 1 计算。

抗磨性是堆焊合金抵抗磨损的一个性能指标，可用磨损量表示。磨损量越小，抗磨损性能越高。磨损量既可用堆焊合金表层的磨损厚度表示，也可用堆焊合金体积或质量减少来表示。耐磨性有时也用单位摩擦距离的磨损量表示，称为线磨损量；或用单位摩擦距离、单位载荷下的磨损量表示，称为比磨损量。有时还经常使用相对耐磨性概念，相对耐磨性  $\epsilon$  可表示为

$$\epsilon = \text{标准试件的绝对磨损量} / \text{堆焊试样的绝对磨损量}$$

相对耐磨性  $\epsilon$  值越大，表示堆焊合金越耐磨。

为了评定堆焊合金的耐磨性能，一般需要进行堆焊金属小试样耐磨试验、模拟实际工作条件的耐磨试验和实际零件堆焊后的使用运转磨损试验。由于磨损形式很多，不可能制定统一的试验方法，常常是针对每一种磨损类型进行试验，而对某一种磨损类型也还有许多评价方法。如磨料磨损试验，可以采用 X4-B 磨损试验机、干砂侵蚀试验机等方法。

X4 B 磨损试验 [见图 3.8 (a)]，是在旋转圆盘上固定砂布 1，以力  $P$  将试件 2 压紧在砂布上。试件可进行径向移动，使圆盘旋转后形成螺旋形的磨损轨迹。试样尺寸为直径 2mm、长度 15~20mm 的圆棒。在预先规定的砂布类型、砂布粒度、旋转速度、压紧力、磨损行程等条件下试验。试验时，将堆焊合金与标准材料进行对比。

干砂侵蚀试验机 [见图 3.8 (b)]，是以一定的压力将试件压在旋转的橡皮轮上。干砂

通过漏斗连续送入摩擦表面对试样进行磨损。在规定的干砂类型、试样压力、橡皮轮转速、摩擦行程（橡皮轮转数）等条件下，与标准试样进行对比试验。堆焊合金的耐磨性，以试样磨损的绝对值，即试样表面磨损凹坑的深度评定；或者用相对耐磨性 $\epsilon$ 评定。

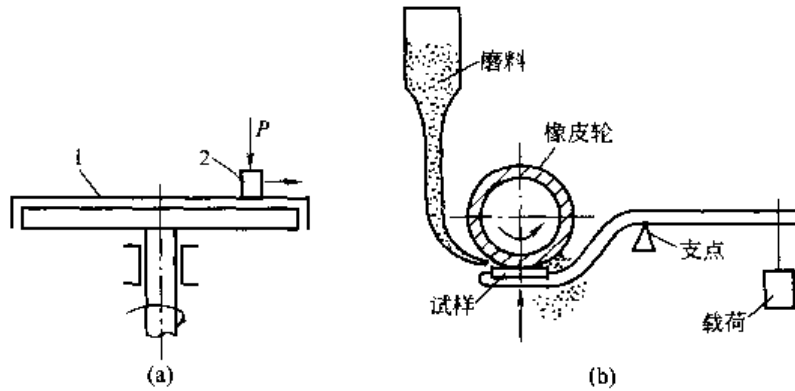


图 3.8 堆焊合金抗磨料磨损试验机

影响堆焊合金耐磨性的因素很多，不仅取决于堆焊合金的性能，而且还取决于金属摩擦表面的外界条件。应针对不同的应用条件，采取不同的磨损实验方法。所采用的试验条件与实际工况运行条件越接近，试验结果的可靠性越大。但这种试验所需时间长，外界因素影响大，难于实际运行。实验室试验时间短、成本低，试验数据易于掌握，但试验结果往往不能直接反映实际情况，只能对比出不同材料之间抗磨损性能的差别。

除了实际测定的相对耐磨性之外，有时还可以综合采用化学分析和金相分析方法进行相互引证，才能得出内在的规律性。

## 第4章 手工电弧堆焊

手工电弧堆焊是目前应用广泛的堆焊方法。它使用的设备简单，成本低，对形状不规则的工件表面及狭窄部位进行堆焊的适应性好，方便灵活。手工电弧堆焊技术在我国的应用有一定的基础，我国生产的堆焊焊条有较完整的产品系列，仅标准定型产品就有近百个品种，还有很多专用及非标准的堆焊焊条产品。手工电弧堆焊在冶金机械、矿山机械、石油化工、交通运输、模具及金属构件的制造和维修中得到了广泛应用。

### 4.1 手工电弧堆焊的特点及应用

#### 4.1.1 手工电弧堆焊的特点

手工电弧堆焊与一般手工电弧焊的特点基本相同，设备简单、使用可靠、操作方便灵活、成本低、适宜于现场堆焊，可以在任何位置焊接，特别是能通过堆焊焊条获得满意的堆焊合金。因此，手工电弧堆焊是目前主要的堆焊方法之一。

手工电弧堆焊的缺点是生产效率低、劳动条件差、稀释率高。当工艺参数不稳定时，易造成堆焊层合金的化学成分和性能发生波动，同时不易获得薄而均匀的堆焊层。手工电弧堆焊主要用于堆焊形状不规则或机械化堆焊可达性差的工件。

手工电弧堆焊用焊条的药皮主要有钛钙型、低氢型和石墨型三种。焊芯多以冷拔焊丝为主，也可用铸芯或管芯。为了减少合金元素的烧损和提高堆焊合金的抗裂性能，一般多采用低氢型药皮的堆焊焊条。手工电弧堆焊时，一般通过调节焊接电流、焊接电压、焊接速度、运条方式以及弧长等工艺参数控制熔深以达到降低稀释率、保持电弧稳定、使堆焊层质量均匀的目的。

低氢型药皮焊条堆焊时推荐采用直流反接。因合金元素易烧损，弧长不能太大。大面积堆焊时，应注意调整堆焊顺序，以控制焊接变形。由于手工电弧堆焊熔深较大，稀释率较高，堆焊层硬度和耐磨性下降，所以一般需堆焊2~3层。但堆焊层数较多时，易导致开裂和剥离，为此常对工件采取预热和缓冷措施，预热温度由堆焊部位的刚性等因素确定。

#### 4.1.2 手工电弧堆焊的应用范围

由于手工电弧堆焊成本低、灵活性强，就其堆焊基体的材料种类而言，手工电弧堆焊既可以在碳素钢工件上进行，又可以在低合金钢、不锈钢、铸铁、镍及镍合金、铜及铜合金等工件上进行。

就其应用范围而言，手工电弧堆焊的应用遍及各种机械工程和制造部门，广泛应用于车辆、工程机械、矿山机械、动力机械、石油化工设备、电力、建筑、运输设备以及模具的制造与修复中。例如，载重汽车发动机曲轴、推土机刃板、压路机链轮、水轮机叶片、船舶螺旋桨、冷（热）轧辊、内燃机排气阀、阀门密封面、矿山料车、铲斗齿、混凝土搅拌机叶片、石油牙轮钻头、钻杆接头、挖掘机斗齿、铁道道岔、履带板、锅炉压力容器、高炉料钟、铸铁炉底盘、泥浆泵、热锻模、热拉伸模、热冲头、热剪刀及高速钢刀具的制造和修复，都可使用手工电弧堆焊技术。



## 4.2 手工电弧堆焊设备及工艺

### 4.2.1 电弧堆焊设备的组成及技术参数

手工电弧堆焊设备是由焊接电源装置和焊钳组成的电焊机，此外还包括一些不同形状工件堆焊时需要的辅助装置。

#### 4.2.1.1 弧焊电源

手工电弧堆焊电源设备，一般包括交流弧焊电源、直流弧焊电源和逆变弧焊电源三大类。电弧能否稳定燃烧是保证获得优质堆焊质量的主要因素之一。为了使电弧稳定燃烧，对弧焊电源有以下基本要求。

① 陡降的外特性 为了达到焊接电弧由引弧到稳定燃烧这一目的，要求焊接电源按照一定规律来供给电压和电流。即在引弧时供给电弧较高的电压和较小的电流；当电弧稳定燃烧时，电流增大，而电压急剧降低；当焊条与工件短路时，短路电流不应太大，而限制在一定数值。能满足这种要求的电源称为具有陡降外特性的电源。

具有陡降外特性的电源不但保证电弧稳定燃烧，而且能保证短路时不会产生过大的电流而将电源设备损坏。一般焊机的短路电流为焊接电流的 125%~180%，最大不超过 200%。

② 适当的空载电压 空载电压对引弧和电弧的稳定燃烧都有重要的作用。如果单从这方面考虑，则空载电压越高越有利，但从焊工操作安全的角度考虑，则要求空载电压越低越好。为统一这一矛盾，目前我国规定的直流焊机空载电压在 40~90V 之间，交流焊机的空载电压在 60~85V 之间。

③ 可以灵活地调整电流 一般情况下，电焊机能调节的最大电流不小于最小电流的 4~5 倍，即可满足使用要求。

④ 良好的动特性 即要求焊机具有良好的动态品质，具有迅速恢复原始工作状态的特性。动特性良好的电焊机，起弧容易，焊接过程中电弧突然拉长也不容易熄弧，电弧突然缩短也不易短路，且飞溅也较小。一般在设计与制造焊机时，都要保证其良好的动特性。

#### (1) 交流弧焊电源

手工电弧堆焊中的交流弧焊电源按其输出电流波形可分为弧焊变压器和矩形波交流弧焊电源。

弧焊变压器输出正弦交流电。它由初、次级线圈相隔离的主变压器以及所需的调节和指示装置组成，将电网的交流电变成适合于焊接的低压交流电。这种变压器一般为单相供电。电源下降外特性的获得靠在变压器次级回路中串联交流电抗器或增加变压器自身的漏磁实现。

矩形波交流弧焊电源利用半导体技术来获得矩形波交流电流，由于电流从正变为负或从负变成正时速率快，从而电弧稳定性好；其次，电流波形为矩形波，它的可调参数多，功率因数高。

手工电弧堆焊使用的交流弧焊电源主要是弧焊变压器。弧焊变压器的基本原理与一般电力变压器相同，但为了满足电弧焊工艺的要求，在次级回路中通过增加阻抗而获得下降外特性。

#### 1) 动铁心式弧焊变压器

动铁心式弧焊变压器的特点是：动铁心振动较小，引起的电流波动小，电弧较稳定。但

由于活动铁心的存在，磁路内有空气隙，所以杂散磁通引起的损耗比较大。这类变压器由于内部漏抗足够大，不必用电抗器，从而节省了原材料的消耗。

动铁心式弧焊变压器的型号是 BX1，它靠在初级绕组  $W_1$ 、次级绕组  $W_2$  间增加一个活动铁心作为磁分路来增加漏磁，加大电抗，从而获得陡降外特性，其结构如图 4.1 所示。在变压器窗口中移动铁心，可改变漏抗，调节焊接规范。

动铁心式弧焊变压器主要性能参数见表 4.1。

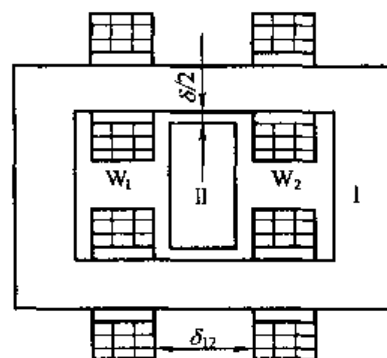


图 4.1 动铁心式弧焊变压器结构

表 4.1 动铁心式弧焊变压器的主要性能参数

型号	BX1-120	BX1-125	BX1-160	BX1-200	BX1-300	BX3-315	BX1-500
额定焊接电流 $I_e/A$	120	125	160	200	300	315	500
电网电压 $U_1/V$	220	220/380	220/380	380	380	380	380
次级空载电压 $U_0/V$	50	58	52	75	76	80	80
额定工作电压 $U_w/V$	25	25	26	28	32	32.6	40
额定初级电流 $I_1/A$	—	35/21	—	40	63	—	110
焊接电流范围/A	50~120	50~125	50~160	40~240	55~300	63A/22.5V 380A/35.2V	80~590
额定负载持续率 $FS_c/\%$	20	20	20	35	35	60	60
相数	1	1	1	1	1	1	1
频率 $f/Hz$	50	50	50	50	50	50	50
额定输入容量 $S_c/kW$	6	7.8	8.3	8.3	24	25.2	42
不同负载持续率时的容量/kW	100%	—	—	—	—	19.3	32.5
	额定负载持续率	—	—	—	—	25.2	42
不同负载持续率时焊接电流/A	100%	—	56	—	—	—	388
	额定负载持续率	120	125	160	200	—	315
使用焊条直径/mm	$\phi 1.6 \sim 3.2$	$\phi 2 \sim 3.2$	$\phi 2 \sim 4$	$\phi 2 \sim 5$	$\phi 2.5 \sim 6$	$\phi 2.5 \sim 6$	$\phi 2.5 \sim 8$
效率/%	—	—	—	>78	>82	>82	>87
质量/kg	<29	≤30	31	92	110	150	300
外形尺寸/mm	长	365	300	390	490	550	740
	宽	257	260	265	355	410	520
	高	263	270	365	615	680	860

## 2) 动圈式弧焊变压器

动圈式弧焊变压器型号是 BX3。它的结构示意图如图 4.2 所示。其结构特点是铁心形状高而窄，两侧心柱上都套有初级绕组和次级绕组。初级绕组和次级绕组各自分开缠绕。初级绕组在下方固定不动，次级绕组在上方是活动的，摇动手柄可使其沿铁心柱上下移动，以改变其与初级绕组间的距离。由于铁心窗口较高，绕组间距可调范围较大，使得初级绕组和次级

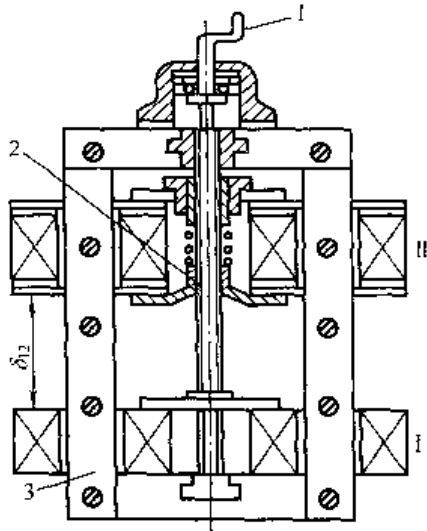


图 4.2 动圈式弧焊变压器结构

I—初级绕组（固定）；II—次级绕组（可动）；  
1—手柄；2—调节螺杆；3—铁心

绕组之间磁的耦合不紧密而有很强的漏磁，由此所产生的漏抗就足以得到下降外特性，而不必附加电抗器。

动圈式弧焊变压器突出的优点是没有活动铁心，避免了由于铁心振动所引起的小电流时电弧不稳等一系列弊端。虽然初次级绕组之间也作用有电磁力，但却小得多，几乎不引起危害。且当调至小电流时，绕组间距最大，电磁力更小，故电弧稳定。但是电流调节下限受到铁心高度的限制，因而电流调节范围较窄，常用改变绕组匝数来扩大电流调节范围。与动铁心式弧焊变压器相比，调节电流不方便，消耗电工材料较多，经济性较差，一般作为中等容量电源。

### 3) 抽头式弧焊变压器

抽头式弧焊变压器的型号是 BX6，主要性能参数见表 4.2。

表 4.2 抽头式弧焊变压器产品的主要性能参数

型号	BX6 120	BX6-125	BX6-160	BX6-200	BX6-250	BX6-300	
额定焊接电流 $I_e/A$	120	125	160	200	250	300	
初级电压 $U_1/V$	220/380	220/380	380	380	220/380	220/380	
次级空载电压 $U_0/V$	52	55	65	48~70	70~55	50~60	
额定工作电压 $U_w/V$	22~26	25	22~28	22~28	22~30	22~35	
额定初级电流 $I_{1e}/A$	28/16	31.18	32	40	—	60.5	
焊接电流调节范围/A	50~160	50~140	55~195	66~220	50~100 或 120~250	40~150 或 150~380	
额定负载持续率 $FS_e/\%$	20	20	60	20	35	60	
相数	1	1	1	1	1	1	
频率 $f/Hz$	50	50	50	50	50	50	
额定输入容量 $S_e/kW$	6.21	6.9	12	15	15	23	
不同负载持续率时的容量/kW	100%	—	—	—	—	18	
	额定负载持续率	6.24	6.9	12	15	23	
不同负载持续率时焊接电流/A	120	125	160	200	250	300	
使用焊条直径/mm	—	—	—	$\leq 4$	—	—	
效率 $\eta/\%$	—	—	$>77$	—	$>80$	—	
功率因数	—	—	—	—	—	—	
质量/kg	22	$\leq 30$	55	$\leq 10$	80	140	
外形尺寸/mm	长	345	345	420	480	495	645
	宽	246	260	290	282	345	450
	高	188	460	570	398	416	805

这种弧焊变压器结构简单，易于制造，无活动部分，避免了电磁力引起振动带来的小电流时电流不稳定的弊病，因而电弧稳定，无噪声，使用可靠，成本低廉。由于其空载电压变化大，材料有效利用率低，故适宜做成低负载持续率的中、小型电源。

### (2) 直流弧焊电源

手工电弧堆焊中使用的直流弧焊电源按结构形式和获得直流输出的原理不同可分为直流弧焊发电机、磁放大器式弧焊整流器、硅二极管式弧焊整流器、晶体闸管式弧焊整流器。其中直流弧焊发电机和磁放大器式弧焊整流器的磁惯性大，所以对它们的动特性有要求。直流弧焊电源动特性的主要指标见表 4.3。

表 4.3 直流弧焊电源动特性的主要指标

	电流/A	额定电流		25%额定电流	
	电压 $U_t$ /V	$20+0.04I_t$	20	$20+0.04I_t$	20
弧焊发电机	$I_{sd}/I_{wd}$	$\leq 2.5$	—	$\leq 3$	—
	$I_{td}/I_t$	—	$\leq 2.5$	—	$\leq 3$
	$U_{min}$	$\geq 30$	—	$\geq 30$	—
	$I_{sd}/I_t$	$\leq 3$	—	$\leq 5.5$	—
弧焊整流器	$I'_{sd}/I_{wd}$	$\leq 1.5$	—	$\leq 1.5$	—
	$I_{td}/I_t$	$\leq 2.5$	—	$\leq 3$	—

注： $I_{sd}$ 为从空载到短路时的瞬时短路电流峰值； $I'_{sd}$ 为短路 0.05s 后的瞬时电流值； $I_{td}$ 为从负载到短路时的瞬时短路电流峰值； $I_{wd}$ 为稳态短路电流峰值； $I_t$ 为短路前负载电流值； $U_{min}$ 为恢复电压最低值。

### 1) 动铁心式弧焊整流器

动铁心式弧焊整流器主变压器一般采用单相增强漏磁式形式。通常为交直流两用焊机。它具有动铁心式弧焊变压器的优点。它的型号为 ZXE1 系列。焊机的型号和技术参数见表 4.4。

表 4.4 动铁心式弧焊整流器的主要性能参数

型号	ZXE1-160	ZXE1-200	ZXE1-300	ZXE1-400	ZXE1-500	ZXE1-6×500	ZXE1-5×160
额定焊接电流 $I_e$ /A	160	200	300	400	500	—	160
额定负载持续率 $FS_e$ /%	35	35	35	35	60	60	20
电流调节范围/A	交流 8~180 直流 7~160	40~200	50~300	60~400	交流 100~500 直流 90~450	交流 80~550 直流 70~400	40~180
额定空载电压 $U_0$ /V	80	60~70	60~70	60~70	80	交流 75 直流 72	54
工作电压 $U_w$ /V	27	28	32	36	交流 24~40 直流 24~38	—	23~30
电源电压 $U_t$ /V	380	380	360	360	380	380	380
相数	1	1	1	1	1	3	1
频率 $f$ /Hz	50	50	50	50	50	50	50
额定输入电流 $I_e$ /A	40	39	59	79	—	381	—
额定输入容量 $S_e$ /kW	15.2	14.8	22.4	30	41	381	11.8
质量/kg	150	130	200	250	250	1500	—

续表

型号		ZXE1-160	ZXE1-200	ZXE1-300	ZXE1-400	ZXE1-500	ZXE1-6×500	ZXE1-5×160
外形尺寸/mm	长	654	—	—	—	840	1 440	—
	宽	366	—	—	—	450	1 140	—
	高	722	—	—	—	910	2 000	—

## 2) 动圈式弧焊整流器

动圈式弧焊整流器主要由三相动圈式变压器、三相全桥整流电路、浪涌装置组成。三相动圈式变压器的铁心形式为对称 Y 形，三个铁心柱布置在等边三角形三个顶点处，这种铁心形式有利于三相磁路平衡，从而保证三相电流平衡。它的次级绕组固定，初级绕组位于外圈，可以上下移动。它可凭借变压器漏感获得下降外特性，依靠改变初、次级绕组的距离，改变变压器的漏感，实现焊接参数的调节。

三相全桥整流电路将三相交流电整流为直流电。

### (3) 逆变弧焊电源

逆变弧焊电源是近二十年来随着电子技术的发展而发展起来的新型电源。它是将电网输送来的交流电通过整流电路整流成直流，再通过由电子开关元件组成的逆变电路将直流电变成高频交流电。然后再通过高频变压器将电压降压到适合焊接所需的电压。最后直接输出交流方波电压或通过整流变成直流再输出。在逆变电源中，流过变压器是高频电信号，由于其频率高，从而使变压器铁心的尺寸减小，整个逆变电源体积变小，质量减轻，因此，特别适宜用作流动工作场合的电源。

大功率逆变电源都采用三相交流电源供电，380V 交流电经三相桥式全波整流后变成高压脉动直流电，经滤波变成高压直流电，再经逆变器变成几千赫兹到几十或几百千赫兹的中频高压交流电。通过中频变压器降压、全波整流后变成适合焊接的低压直流电。

根据逆变器采用的电子功率开关器件不同，目前生产的逆变电源可分为晶闸管型、晶体管型、场效应管型和绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 型四类。

#### 1) 晶闸管式弧焊逆变器

晶闸管式弧焊逆变器采用大功率开关器件是半控型器件晶闸管，调节工艺参数和进行外特性的控制方法通常采用“定脉宽调频率”的方式，它实际上是通过改变晶闸管的开关频率来进行的。但为了保证逆变电路能正常工作，电流休止时间必须大于一临界值，而晶闸管频率越高，电流休止时间越短，所以逆变器的频率不能太高。这类逆变焊机的逆变频率较低，焊机较重。

#### 2) 晶体管式弧焊逆变器

晶体管式弧焊逆变器采用大功率晶体管作为逆变电路的开关器件，工作在开关状态。晶体管是全控型元件，具有自关断能力，开关时间短，饱和压降低和安全工作区宽等优点。另外，由于晶体管实现了高频化、模块化、廉价化，因此在国内外的逆变焊机中仍有一定的竞争力。

#### 3) 场效应管式弧焊逆变器

场效应管又称为单极型晶体管，它只有一种多数载流子的运动。大功率场效应管具有控制功率小、可靠工作范围宽、能承受较大脉冲电流、热击穿可能性较小、关断时间极短、可实现多管并联工作等优点。场效应管式逆变焊机逆变频率最高，目前已有 100kHz 产品，质

量最小，但单只场效应管功率小，允许电流小且耐压低，往往需要多管并联工作，这样就给每只管子电流的平衡带来困难，给制造和调试带来了不便。国内作为手工电弧焊电源目前仅用于 ZX7-130、ZX7-160 这样的小功率焊机。

#### 4) 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 式弧焊逆变器

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 式弧焊逆变器最高频率可达 50kHz，是目前国内生产较多的逆变焊机，已有各种容量。这类焊机以绝缘栅双极晶体管作为功率开关元件，这种元件是将大功率场效应管 MOSFET 和大功率晶体管 GTR 集成在一个芯片上的复合器件。功率 MOSFET 是单极型电压驱动器件。它具有工作速度快、输入阻抗高、热稳定性好及驱动电路简单等特点，但它导通电阻较大，电流容量也较低，而 GTR 是双极型电流驱动器件，其阻断电压高，载流能力强，但工作速度较慢，驱动电流大，控制电路较复杂。这两类器件的缺点限制了它们的发展。而 IGBT 这种复合器件则集中了两者的优点，具有载流容量大、开通损耗小、饱和电压低的优点。

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 式弧焊逆变器控制功率小、动态响应快、电流稳定，是目前最有竞争力的焊接电源。表 4.5 列出了国内生产的 ZX7 系列 IGBT 逆变式弧焊整流器主要性能参数。

表 4.5 ZX7 系列 IGBT 逆变式弧焊整流器主要性能参数

型号		ZX7-160S	ZX7-200S	ZX7-250S	ZX7-315S	ZX7-400S	ZX7-500S
额定焊接电流 $I_e/A$		160	200	250	315	400	500
焊接电流调节范围/A		5~160	5~200	25~250	15~315	15~400	15~500
空载电压 $U_0/V$		70~80	70~80	70~80	70~80	70~80	72~81
额定负载持续率 $FS_e/\%$		60	50	50	60	60	60
不同负载持续率时焊接电流/A	100%	—	—	5.6	—	10.3	14.4
	额定负载持续率	160	200	250	315	400	500
额定输出功率/kW		—	5.6	—	10.3	14.4	20
电源电压 $U_1/V$		380	220	380	380	380	380
电源相数		3	1	3	3	3	3
频率 $f/Hz$		50	50	50	50	50	50
初级额定电流 $I_{1e}/A$		8	23	11	—	22	31
额定容量 $S_e/kW$		5.3	7.24	12	9.6	16	25
功率因数 $\cos\phi$		—	—	0.85	—	0.95	
焊机效率 $\eta/\%$		83	83	85	83	83	83
使用焊条直径/mm		1.5~4.0	1.5~5.0	—	1.5~6.0	1.5~6.0	1.5~6.0
质量/kg		14	14	38	30	30	32
外形尺寸/mm	长	465	465	600	580	580	580
	宽	165	165	550	260	260	260
	高	270	270	300	360	360	360
特点与用途		采用 IGBT 功率器件设计直流输出，电流从小到大，连续无级调节，动态响应快，起弧容易，飞溅小，体积小，质量轻，便于移动，适用所有场合的焊接					

注：型号中 S 表示手工电弧焊。

#### 4.2.1.2 焊钳及其他

##### (1) 焊钳

焊钳只是一种夹持装置，以使焊工能夹住焊条和控制焊条。焊钳也起着从焊接电缆向焊条传导焊接电流的作用。焊钳上的绝缘手柄将焊工的手与焊接电路隔绝。电流通过焊钳的夹片输送给焊条。为了保证达到最小的接触电阻并避免焊钳过热，夹片必须保持良好的状态。焊钳的过热不仅使焊工使用起来感到不舒适，而且也可能引起焊接电路的电压过大。这都可能对焊工的操作有不良影响，并且还会降低堆焊质量。

焊钳必须夹紧焊条，并将其保持在良好的电接触状态中。装卡焊条必须迅速而容易。要求焊钳的质量轻且易于掌握，但必须坚固耐用。大多数焊钳的夹片周围都涂有绝缘材料，以防止夹片与工件通电。

焊钳有各种规格，以适应各种标准的焊条直径。每种规格的焊钳是以所要夹持的最大直径焊条需用的电流设计的。采用不致过热的最小规格焊钳，对于焊接作业最为合适。小规格焊钳质量较轻，操作方便。

##### (2) 接地夹钳

接地夹钳是将焊接导线或接地电缆接到工件上的一种器具。接地夹钳必须能形成牢固的连接，又能快速且容易地夹到工件上。对于低负载持续率来说，弹簧夹钳可能是合适的。但在使用大电流时，可能需要螺丝夹钳，以使夹钳不过热并形成良好的连接。

##### (3) 焊接电缆

利用焊接电缆将焊钳和接地夹钳接到电源上。焊接电缆是焊接回路的一部分。焊接电缆应具有最大的挠度，以便能够容易操作，特别是焊钳的操纵。电缆也必须耐磨和耐擦伤。

焊接电缆由许多股绞合在一起的细铜丝或铝丝组成，并且包在软的绝缘包皮内。包皮是用合成橡胶或采用韧性好、电阻高和耐热性好的塑料制成。在绞合导线和包皮之间缠绕有保护层，以使导线和包皮之间有一些活动余地而获得最大的柔软性。

焊接电缆可制成各种规格。每一特定用途所要求的电缆规格取决于焊接所用的最大电流、焊接电路长度（焊接电缆和接地电缆的总和）以及焊机的负载持续率。如使用铝电缆，它应比该种用途的铜电缆大两个规格。电缆直径随着焊接电流增加而增大，以使电缆中的电压降和附带的电能损耗保持在允许的水平上。

如果需要长电缆，可用相配的电缆接头将短电缆连接起来。接头必须保证低电阻的良好接触，其绝缘必须相当于电缆的绝缘。利用每根电缆端头的接线片将电缆接到电源上。电缆和接头或接线片之间的连接必须牢固，而且电阻要小。可采用钎焊接头和机械接头。铝电缆要求良好的机械接头，以避免过热。铝的氧化显著地提高了接头的电阻。当然，这可导致过热、过大的电能损耗甚至烧坏电缆。

必须注意防止损坏电缆的包皮，特别是接焊条的电缆。与热金属和尖锐边缘接触可能会烧坏和割破包皮和接地电缆。

##### (4) 面罩

面罩的用途是保护焊工的眼睛、面部、前额、颈部和耳朵不受电弧的直接辐射与飞出的火星和飞溅物的伤害。某些面罩装有附加的“反弹盖”，使黑色滤光片向面罩开口上方反弹。这样焊工从焊缝上清除熔渣时就可以看得清楚，并挡住飞来的焊渣，保护了焊工的而部和眼睛。如果熔渣碰到人，特别是当它红热时，会造成严重的伤害。

面罩通常用暗色的压缩纤维或玻璃纤维绝缘材料制成。面罩应该质量轻而且应设计成使

焊工尽可能感到舒适。

焊接面罩上有一放置滤光片的“窗口”，其标准尺寸为 51mm×130mm。也可用大一些的开口。滤光片应能吸收由电弧发射的红外线、紫外线以及大多数可见光线。目前使用的滤光片可吸收由电弧发射的 99% 以上的红外线和紫外线。

在使用直径 4mm 焊条时，滤光片的黑度建议采用第 10 号。使用直径 4.6~6.4mm 焊条时，应使用黑度第 12 号的滤光片。使用直径大于 6.4mm 焊条时，应使用黑度第 14 号的滤光片。

滤光片需加保护，以防止被熔滴飞溅玷污和破碎。这可在滤光片的每一侧放置一块透明的玻璃片或其他适当材料。对于焊工或在电弧附近工作的人员，不采取适当的防护措施可能会导致烧伤眼睛。一般说来，这不会永久地损害眼睛，但却令人很不舒服。受电弧照射的未加保护的皮肤也会被烧伤。受电弧烧伤严重时，不管被烧伤的是皮肤还是眼睛，应请医生治疗。

如果在通风不好的封闭区域进行焊接，应为焊工补给空气。这通过面罩上的附件来实现，但附件必须不妨碍焊工使用面罩和焊工的视野，以免造成施焊困难。

#### (5) 防护服

在焊接过程中，电弧中会飞出火花或熔滴，特别是在非平焊位置或采用非常大的焊接电流焊接时，这个问题更为突出。为保证在这些条件下防止烧伤，焊工应戴防护手套、穿防护裙和工作服。也要求防护焊工的踝关节和脚不受熔渣和飞溅物的烧伤。建议穿平脚裤或带护脚套。

### 4.2.2 手工电弧堆焊工艺

手工电弧堆焊工艺主要包括堆焊前焊件表面是否需要清理及清理程度；焊条在堆焊前的烘干及清理要求；堆焊工艺参数的选择及必要的预热、保温和层间温度的控制等。

#### (1) 焊前准备

堆焊前工件表面进行粗车加工，并根据图纸要求预留加工余量，以保证堆焊层加工后有 3mm 以上的高度。严格清除表面的铁锈、油污等，堆焊工件表面不得有气孔、夹渣、包砂、裂纹等缺陷，如有上述缺陷须经焊补清除，再粗车后方可堆焊。

焊条使用前必须烘干，加热温度 350~400℃，保温 2h。

#### (2) 焊条的选用

根据对构件的技术要求，如工作温度、压力等级、工作介质以及对堆焊层的使用要求，选择合适的堆焊焊条。

手工堆焊焊条可按表 3.1 进行选择。按堆焊焊条分类用于某一产品零件的焊条，有时也可用于其他产品零件。例如 D507 为马氏体高铬钢堆焊焊条，又称阀门密封面焊条，除了用于中温高压阀门密封面的堆焊外，还可用于堆焊工作温度在 450℃ 以下的碳钢或合金钢轴类零件。

有些焊条虽不属于堆焊焊条，但有时也可用于堆焊，如碳钢焊条、低合金钢焊条、不锈钢焊条和钢合金焊条等。

#### (3) 电源种类和极性

目前，手工电弧堆焊所使用的电源与手弧焊电源相同。在焊条牌号确定之后，根据焊条药皮的类型选择电源种类和极性。如果堆焊一般结构钢工件，对堆焊层性能要求不高，并采用酸性堆焊焊条 (D502、D512) 时，应选用弧焊变压器 (如 BX1-330、BX3-300、BX-500



等)；当堆焊零件要求比较高，又要求采用碱性低氢型堆焊焊条 (D517、D547) 时，必须选用弧焊整流器或直流弧焊发电机 (如 ZXG1-300、ZXG7-300、AX-320、AX1-500 等)，且采用反极性接法，即焊条接正极、工件接负极。在条件允许的情况下，应尽量选用直流电源。因为直流电源的电弧稳定，且反极性接法熔深浅。

对于较小的企业来说，若需要堆焊的零件比较多，可选用交、直流两用弧焊电源 (ZXG9-150、ZXG3-300 等)，以节省资金。

在无电源的工地进行堆焊，可选用汽油或柴油机拖动的直流弧焊发电机。另外，选用焊机时还应根据所需堆焊电流的大小选择合适的电焊机容量。

#### (4) 焊条直径及焊接电流

为提高劳动生产率，希望采用较大直径的焊条和较大的焊接电流。但是由于堆焊面的宽度及堆焊质量的限制，必须把焊条直径和焊接电流控制在一定范围内。

焊条直径的选择主要取决于构件的尺寸和堆焊面的宽度。

增大焊接电流能提高生产率。但电流过大，稀释率增大，易造成堆焊合金成分偏析和堆焊过程中液态金属流失等焊接缺陷。而电流过小，易造成夹渣、未焊透等缺陷，且降低生产率。所以应适当选择焊接电流。一般来说，在保证堆焊合金成分合格的条件下，尽量选择大电流；但不应在焊接过程中由于电流过大而使焊条发红、药皮开裂、脱落。

#### (5) 堆焊层数

堆焊层数是以保证堆焊层高度满足设计要求为前提。对于较大构件时需要堆焊多层。堆焊第一层时，为减小基体熔深，一般采用小电流；或者堆焊电流不变，提高堆焊速度，同样可以达到减小熔深的目的。堆焊最后一层时，要注意焊道的成形和平整度，以满足堆焊后机械加工的尺寸要求。

手工电弧堆焊焊条的工艺参数见表 4.6。铸铁、铜及铜合金焊条的焊接工艺参数见表 4.7。

表 4.6 手工电弧堆焊焊条的工艺参数

焊条	极性	焊接电流/A			焊前预热	焊条烘干	其他
		φ3.2mm	φ4.0mm	φ5.0mm			
D102	JZ	90~110	140~180	180~220	大件预热至 200℃	250℃, 1h	清除工件表面的铁锈和油污
D106	JZ	90~110	140~180	180~220		300~350℃, 1h	
D107	ZF					150℃, 1h	
D112	JZ	90~120	150~180	190~230		300~350℃, 1h	
D126	ZF	90~110	140~180	180~220	大件预热至 300℃	150℃, 1h	
D127						300~350℃, 1h	
D132	JZ	90~120	150~180	190~230	-	150℃, 1h	
D146	JZ	70~90	100~140	150~180	-	300~350℃, 1h	
D156	JZ	110~140	150~190	200~240	-	250~300℃, 1h	
D212	JZ	90~120	150~180	190~230	大件预热至 300℃	150℃, 1h	
D217A	ZF	90~110	140~180	180~220		350~400℃, 1h	
D227	ZF	90~130	120~160	-		300~350℃, 1h	
D237	ZF	90~110	140~180	180~220			

续表

焊条	极性	焊接电流/A			焊前预热	焊条烘干	其他
		φ3.2mm	φ4.0mm	φ5.0mm			
D256	JZ	70~90	100~140	150~180	—	300~350℃, 1h	修复高锰钢工件前应铲除疲劳层或水韧处理或用铬锰钢打底
D266							—
D276	ZF	90~130	130~170	170~220	—	—	—
D277	ZF	100~130	130~160	170~220	小件预热至 300℃, 大件预热至 600℃	—	刀具焊后热处理工艺同 W18Cr4V 热处理工艺
D317	ZF	90~120	160~190	190~230	预热至 300℃ 以上	300~350℃, 1h	—
D322	JZ	90~120	160~190	190~230		250℃, 1h	
D327	ZF	90~120	160~190	190~230		—	
D327A	ZF	90~120	160~190	190~230		—	
D337	ZF	90~110	150~180	180~210		300~350℃, 1h	
D397	ZF	100~120	140~190	190~210	预热至 250℃ 以上	—	焊后缓冷
D502	JZ	80~120	120~160	160~200	预热至 300℃ 以上	150℃, 1h	焊后不同热处理可调节硬度
D507	ZF	80~120	120~160	160~200		—	
D507Mo	ZF	80~120	120~160	160~200	—	300~350℃, 1h	加工后堆焊层高度须大于 5mm
D507MoNb	ZF	80~120	120~160	160~190	—	—	—
D512	JZ	80~120	120~160	170~210	预热至 300℃ 以上	150℃, 1h	焊后不同热处理可调节硬度
D516	JZ	80~120	120~160	180~190	—	—	—
D516MA	JZ	70~110	120~150	180~190	—	—	清除焊后表面油污及杂质
D517	ZF	80~120	120~160	170~210	预热至 300℃ 以上	300~350℃, 1h	焊后不同热处理可调节硬度
D547	ZF	—	120~160	160~200	碳钢的中小件不预热, 大件及其他工件适当预热		堆焊 3~4 层为宜
D547Mo	ZF	80~120	120~160	160~200	大件适当预热	300℃, 1h	适当焊后缓冷, 需不间断地堆焊 3~4 层, 加工后堆焊层高度应大于 5mm, 但不宜过高
D557	ZF	80~120	120~160	160~200	适当预热, 一般预热 300~450℃	300~350℃, 1h	适当焊后缓冷, 尽量用短弧、小电流
D567	ZF	60~80	80~100	100~120	—		一定要采用小电流、连续堆焊三层的工艺
D577	ZF	80~120	120~160	160~200	—	300~350℃, 1h	加工后堆焊层高度应大于 5mm
D608	JZ	90~120	130~160	170~210	400~500℃ 预热或用 J507 焊条打底趁热焊	250℃, 1h	焊后缓冷
D618	JZ	90~140	130~180	—	400~600℃ 预热	200℃, 1h	清除工件的铁锈和油污, 每次焊道不超过 50~70mm, 焊后 600~700℃ 回火 1h 后再缓冷或把工件放入热砂缸或草灰中缓冷
D628	JZ	90~140	130~180	—			

续表

焊条	极性	焊接电流/A			焊前预热	焊条烘干	其他
		φ3.2mm	φ4.0mm	φ5.0mm			
D642	JZ	90~130	130~180	180~230	适当预热	250℃, 1h	焊后缓冷
D646	JZ	90~130	130~180	180~230		350℃, 1h	
D667	ZF	90~130	120~160	140~190	500~600℃ 预热	300~350℃, 1h	清除工件的铁锈和油污, 每次焊道不超过 50~70mm, 焊后 600~700℃回火 1h 后再缓冷或把工件放入热砂缸或草灰中缓冷
D678	JZ	140~200	200~240	230~280	适当预热	—	焊后缓冷
D687	ZF	120~160	140~190	150~210	400~600℃ 预热	300~350℃, 1h	清除工件的铁锈和油污, 每次焊道不超过 50~70mm, 焊后 600~700℃回火 1h 后再缓冷或把工件放入热砂缸或草灰中缓冷
D698	JZ	140~200	200~240	230~280	适当预热	—	焊后缓冷
D707	ZF	70~120	140~180	180~220	预热至 300~650℃	300~350℃, 1h	低合金钢和不锈钢焊后须经 700℃退火
717	ZF	90~110	140~180	180~220	结构复杂或 大件须预热		
D802	ZF	—	—	140~190	300~600℃ 预热	150℃, 1h	用小电流短弧焊接, 焊后 600~700℃回火 1h 后再缓冷或把工件放入热砂缸或草灰中缓冷
D812	ZF	—	—	140~190			
822	ZF	—	120~160	150~180			
D842	ZF	—	120~160	140~190	200~400℃ 预热	150℃, 1h	用小电流短弧焊接, 每次焊道不超过 50~70mm, 焊后将工件放入热砂缸或草灰中缓冷
D007	ZF	100~130	—	—	—	300~350℃, 1h	清除工件表面的铁锈等杂质
D017	ZF	100~130	—	—	—		尽量采用短弧、小电流
D027	ZF	80~110	120~160	—	—		铸铁上焊刃口时, 可用 J506 焊条打底, 并保证 D036 焊条焊接时不与铸铁接触, 不用连续多层焊, 避免摆动太宽, 引弧、收弧应注意避免裂纹
D036	JZ	90~100	130~150	—	堆焊层温度控制在 200℃ 以下		

注: JZ 为交直流两用; ZF 为直流反接。

表 4.7 铸铁、铜及铜合金焊条的焊接工艺参数

焊条	极性	焊接电流/A			焊前预热	焊条烘干	其他
		φ3.2mm	φ4.0mm	φ5.0mm			
Z100	JZ	80~120	140~170	170~200	预热至 400℃ 以上	150℃, 1h	用小电流、缓冷
Z116	JZ	80~110	120~140	—	可不预热	300℃, 1h	尽量用直流反接, 小电流、多层焊
Z117	ZF	80~110	120~140	—			

续表

焊条	极性	焊接电流/A			焊前预热	焊条烘干	其他
		φ3.2mm	φ4.0mm	φ5.0mm			
Z122Fe	JZ	100~110	120~130	—	冷焊	150℃, 1h	用冷焊法
Z208	JZ	90~120	150~180	190~220	400℃预热		
Z238	JZ	90~120	150~180	190~220	500℃预热	250℃, 1h	焊后保温缓冷
Z238ZnCu	JZ	130~150	150~200	180~240	适当预热		
Z248	JZ	—	130~160	180~250	冷焊或预热焊	200℃, 1h	大电流连续施焊, 焊后保温缓冷
Z268	JZ	—	160~200	220~260	刚度大的工件 则局部预热	250~300℃, 1h	
308	JZ	90~110	120~150	—	—	150℃, 1h	锤击焊缝, 消除应力
408	JZ	90~110	120~150	160~190	—		
Z408A	JZ	80~100	110~140	150~180	—	150℃, 1h	—
Z438	JZ	90~110	120~150	160~190	—	—	—
Z508	JZ	90~110	120~150	160~190	—	250℃, 1h	一次焊缝长度小于5mm, 锤击焊缝
Z607	JZ	90~130	120~170	170~200	室温或300℃预热	120℃, 1h	锤击焊缝
Z612	JZ	100~130	120~160	—	—	150℃, 1h	
T107	ZF	120~140	150~170	180~200	400~500℃预热	200℃, 1h	焊长焊缝用逐步退焊法, 焊速尽量快, 锤击焊缝
T207	ZF	90~130	110~160	150~200	紫铜预热450℃, 黄铜预热300℃	350℃, 1h	锤击焊缝
T227	ZF	90~120	110~160	150~200	磷青铜150~250℃, 纯铜预热450℃	200℃, 1h	
T237	ZF	90~130	110~160	150~200	厚件预热200℃		

注: JZ为交直流两用, ZF为直流反接。

### 4.2.3 堆焊质量及常见缺陷的预防措施

#### (1) 堆焊质量

手工堆焊工艺与手工电弧焊工艺基本相同, 主要的差别是工艺参数有所不同。堆焊时要求熔深越浅越好。因此应尽量采用小电流、低电压、慢焊速, 使稀释率与合金元素的烧损率降低到最小限度。堆焊操作时还应注意以下事项。

##### 1) 防止堆焊层金属开裂

一般堆焊层金属的硬度高、塑性低, 特别是母材与堆焊层金属成分相差较大时, 金属的线膨胀系数差别较大, 从而引起相当大的内应力, 易使堆焊层金属在堆焊后的冷却过程中产生开裂。防止开裂的主要方法是设法减小堆焊时的焊接应力, 这可通过下述方法达到。

① 对工件进行整体预热或合理的局部预热, 能减小堆焊层的拉应力, 是避免裂纹和剥离的主要工艺措施。如锻模和较大的阀门堆焊时, 常采用整体预热的办法防止裂纹; 对于不锈钢、高锰钢等塑性好的堆焊材料, 一般不必预热, 堆焊层硬度不太高或硬度虽高但堆焊面积不大, 以及堆焊过程本身产生的热可以将整个零件加热的情况下, 也可以采用不预热堆焊。

② 堆焊过渡层法 (又叫打底焊法), 即先用塑性好、强度不高的普通焊条或不锈钢焊条

进行打底焊，这样也可以减少内应力，防止开裂。对堆焊层金属硬度很高，并预热有困难的工件，采用此法相当有效。

③ 避免连续多层堆焊，防止堆焊部位过热的办法，有些情况下可以减小应力，防止堆焊层裂纹或剥离。

④ 对于堆焊零件热影响区裂纹的防止则采用焊前预热的措施。堆层开裂倾向的大小与工件及堆焊层金属的含碳量和合金元素的多少有关，所以预热温度往往依据所用焊接材料的碳当量以及堆焊部件刚度大小等情况可选择 100~350℃。碳当量与预热温度之间的关系见表 4.8。

表 4.8 根据碳当量选择预热温度

碳当量/%	预热温度/℃	碳当量/%	预热温度/℃
0.4	100 以上	0.7	250 以上
0.5	150 以上	0.8	300 以上
0.6	200 以上	—	—

## 2) 防止堆焊层金属的硬度不符合要求

堆焊层硬度主要取决于堆焊焊条的合金成分和焊后热处理。为此堆焊过程中要尽量降低稀释率和减少合金元素的烧损，常采用小电流，短弧堆焊。

## 3) 防止堆焊件变形

对细长轴及直径大而壁厚不大的圆筒形零件表面堆焊时，要注意防止焊后变形。一般可采用夹具或焊上临时支撑铁，以增大零件刚度；采用预先反变形法、对称法或跳焊法，也可以防止或减小堆焊件变形；对于要求较高的，可以在堆焊过程中设法测量变形，通过改变焊接顺序随时调整变形方向及变形量。

## 4) 提高堆焊效率

在保证堆焊质量的前提下，应设法提高手工电弧堆焊的效率。

① 将堆焊表面放在倾斜或立焊位置，进行横焊，每焊一道后先不打渣就连续堆焊并排的另一道，直到把表面堆焊完一层再打渣。这种方法效率高，堆焊层表面光洁，且母材熔化较少。操作熟练时，平焊位置也可以不打渣连续堆焊。

② 采用模具使堆焊层按模具的形状强迫成形，可以提高堆焊的尺寸精度和堆焊效率，节约焊条并减少堆焊后的加工量。例如堆焊切边模具、刀具及排气阀等工件时，常采用石墨或紫铜模，强迫堆焊熔敷金属成形。

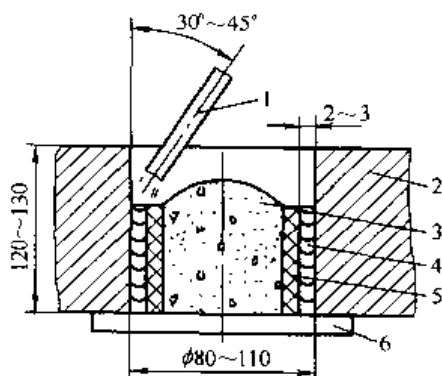


图 4.3 内孔填砂堆焊

1—焊条；2—工件；3—砂；4—堆焊层；5—渣壳；6—垫板

③ 堆焊内孔壁时，往内孔填砂进行堆焊（见图 4.3），可提高生产效率。

此外，采用多条焊、填丝焊等也可提高堆焊效率。

## (2) 常见缺陷及预防措施

手工电弧堆焊常见的缺陷有气孔、裂纹、夹渣等。这些缺陷产生的原因及预防方法如下。

### 1) 气孔

气孔的种类很多，有表面气孔、焊层内部气孔；有时以单个分布，有时以密集分布等。堆焊时产生的气孔，一

般影响因素与预防措施如下。

① 基体的影响 如果堆焊前基体表面有包砂、缩松、夹皮等缺陷，或堆焊面上有氧化皮、铁锈、水、油污等，都会导致堆焊层气孔的产生。其原因是：在电弧冶金化学反应中，这些缺陷含有水或水蒸气，而且不能全部逸出，残留在焊层中形成气孔。

预防措施是：一定要清除堆焊基体表面的缺陷。对包砂、缩松等缺陷，可局部用砂轮磨除，或手工电弧刨除，然后用与基体材料相同的焊条补焊；补焊后磨平，或经机加工达到堆焊前要求。对氧化皮、铁锈可用砂轮打磨或喷砂清除，有时可用有机溶剂清洗。

② 焊条的影响 焊条的影响主要指焊条在使用前未经烘干，或烘干的时间、温度没有达到要求，因而在焊条药皮中含有一定的水分，使堆焊过程产生水蒸气。如果不能全部逸出，就会残留在焊层中形成气孔。

预防措施是：焊条在使用前应严格按照说明书中的烘干温度和时间进行烘干处理。烘干后不得放置时间过长，最好放在保温筒内，随用随取。

③ 工艺参数的影响 工艺参数主要包括焊接电流、电压、焊接速度等。一般来说，电流小，熔池存在时间短，不利于气体逸出；而电流过大，焊芯的电阻热增大，会使焊条药皮中的某些组成物（如碳酸盐）提前分解，因而增加气孔倾向。堆焊时，电弧电压过高（电弧拉长）或操作技术不当，会使空气中的氮侵入熔池，而出现氮气孔。操作时，局部堆焊时间过长，基体或堆焊金属自身的碳与合金氧化物发生氧化还原反应生成 CO 气孔。

预防措施是：堆焊时，工艺要保持稳定，对于低氢型焊条要尽量采用短弧焊；并注意观察熔池，合理调整运条基本动作，以利于气体逸出和防止外部气体侵入。

## 2) 裂纹

手工电弧堆焊的裂纹缺陷有焊层的横向、纵向裂纹，热影响区裂纹，弧坑处裂纹等。裂纹产生的原因很复杂，主要包括基体材料处理和工艺参数的影响。同气孔产生的原因一样，基体上如有包砂、缩松等缺陷，也会使焊层在缺陷处的拉应力集中，在焊后冷却过程中，由收缩力而引起的应变超过焊层材料本身的抗拉强度而产生裂纹。

工艺参数的影响是指堆焊前的预热、缓冷措施不当，或返修方法不当以及操作技术不当所造成。主要是应该根据严格执行工艺评定后得出的预热、缓冷工艺进行操作。堆焊时在熄弧处要逐渐填满弧坑，慢慢拉断电弧，必要时将熄弧处移出焊道。

## 3) 夹渣和未焊透

夹渣和未焊透缺陷主要是由工艺参数不稳定和操作不当所引起。在堆焊过程中如发现电弧不稳定，电流忽大忽小，则可能是由于电焊机出现故障或网路电压波动所致。此时应及时停止操作，查找原因，排除故障后再进行堆焊。对熔渣较厚的焊条堆焊时，应注意操作手法，以利熔渣的浮出，从而防止夹渣和未焊透。

## 4) 焊道成形不良

焊道成形不良是指堆焊后，焊道宽窄不均、高低不平，以致机械加工时达不到尺寸要求。这类缺陷主要是操作不当所致。堆焊操作时，应注意控制熔池形状，防止流淌，特别是堆焊最后一层要注意焊道的平整度。

# 4.3 手工电弧堆焊应用实例

## 4.3.1 汽车、拖拉机零件的电弧堆焊

### (1) 齿轮的堆焊修复

一般齿轮基体材料为 20CrNi 或 18CrMnTi。堆焊修复齿轮所用的焊条有两种：一种是采用碱性低氢型结构钢焊条（如 J506、J507、J607、J707 等），堆焊后进行表面渗碳、淬火来提高表面硬度；另一种是采用耐磨堆焊焊条，堆焊层不经热处理即可得到较高的硬度。采用耐磨堆焊焊条堆焊修复周期短、工艺简单，但所用的焊条有时不易得到。堆焊层的机械加工性也较差，有时焊后需要用角向砂轮机或磨齿机修整齿形。这种方法适用于对于齿轮局部掉角、掉齿和表面剥落等损伤的修复。齿轮的堆焊修复分以下两种情况。

#### 1) 齿轮全面磨损进行全齿修复

堆焊修复工艺要点如下。

① 焊前表面去除油污和铁锈等，并将齿尖打磨光滑，使齿面露出金属光泽，同时检查齿面不能有裂纹、尖角或凹坑。

② 焊前进行 780~840℃退火，保温 2h，然后随炉冷却。其作用是消除齿面附近的疲劳应力，并改善齿轮母材的塑性。

③ 选用直径 3.2mm 的 J506 或 J707、J857 低合金高强度钢焊条，焊前应烘干焊条，采用直流反接，电流为 90~120A。

④ 从齿根起沿齿宽方向堆焊数道直至齿顶。每个齿堆焊 5 道左右，其中齿面 4 道，齿顶 1 道。为减小变形，在齿轮上的所有齿均堆焊完第 1 道后再堆焊第 2 道，每道堆焊层应重叠 1/2 左右。除最后 1 道堆焊齿顶时可不采用对称顺序跳焊外，其余各道堆焊时应采用对称跳焊的顺序，以防止变形。每道的焊接方向与前一道应相反。

⑤ 退火消除应力，以便机械加工。

⑥ 机械加工。

⑦ 进行渗碳淬火，以提高表面硬度。渗碳温度为 800~860℃，渗碳保温 25h，然后出炉除垢、淬油冷却。淬火温度为 750℃，油温为 35~40℃，冷却液为柴油加少量机油。

⑧ 最后进行低温回火消除内应力。回火温度为 180~220℃，保温 1.5h。

#### 2) 局部掉齿修复工艺

堆焊修复工艺要点如下。

① 焊前表面处理，用砂轮除去损坏的磨损层及油污和铁锈等，使表面露出金属光泽。

② 用直径 3.2mm 的碳钢焊条 J507 (E5015) 或 J506 (E5016) 堆焊底层，堆焊至齿高的 2/3。堆焊第 1 层时，电流应尽量小些，焊速应尽量慢并作横向摆动，这样可使近缝区的塑性得以改善。

③ 选用堆焊焊条 D217A 或 D172 堆焊表层。堆焊时注意用样板定形，并留出适当加工余量。

④ 在刨床上进行齿形机械加工。

#### (2) 拖拉机支重轮的堆焊修复

对于磨损较轻的拖拉机支重轮，可以采用 D112 焊条进行堆焊；当轮径磨损较严重时，可采用补焊钢圈的方法修复。

##### 1) 热压钢圈法

热压钢圈法应用较多，主要工艺要点如下。

① 车削支重轮外圆。

② 用报废的汽车弹簧钢锻成圆圈，并将对口用 J506 焊条焊好。

③ 车削钢圈内孔，使其与轮缘外径有 1.2~1.5mm 的过盈。

- ④ 加热钢圈到 500~600℃ 后，热装到轮缘上。
- ⑤ 沿径向钻 6 个直径为 20mm、深 12mm 的孔。
- ⑥ 焊边缘及对直径 20mm 的孔进行塞焊。
- ⑦ 车削轮的边缘。
- ⑧ 进行防锈处理。修复一个支重轮，一般能使用 2 000h 以上。

#### 2) 焊铸钢圈法

在专用夹具上气割旧轮缘，使留下的轮辐外径为  $\phi 315_{-0.2}^0$ mm。将轮辐与铸造钢圈（45 号铸钢圈，外径为  $\phi 350_{+0.2}^0$ mm，内径为  $\phi 315_{+0.2}^0$ mm）安装在焊接夹具上，保证钢圈的外圆与轮孔同心，然后用 J506 或 J507 焊条焊接搭边处。焊后进行轮缘淬火，要求硬度达到 388~477HBS。

### 4.3.2 阀门密封面的电弧堆焊

阀门经常处于高温高压条件下工作，基体一般为 ZG25B、ZG35B、20CrMo 和 15CrMoV 等材料。密封面是阀门的关键部位，工作条件差，极易损坏。阀门密封面手工电弧堆焊主要采用的焊条有：马氏体高铬钢堆焊焊条（如 D502、D507、D512、D517）、铬锰钢堆焊焊条（如 516M）、高铬镍钢堆焊焊条（如 D547Mo）和钴基合金堆焊焊条（如 D802、D812）等。

#### (1) 马氏体高铬钢焊条堆焊工艺

##### 1) 焊前准备

① 焊前工件表面进行粗车或喷砂清除氧化皮。工件表面不允许有任何缺陷（裂纹、气孔、砂眼、疏松）及油污、铁锈等。

② 焊条使用前必须烘干。D502、D512 等钛钙型药皮焊条，需经 150~200℃ 预热，保温 1h 烘焙；D507、D517 等低氢型药皮焊条，需经 300~350℃，保温 1h 烘焙。

③ 用 D502、D507 等 1Cr13 型焊条，焊前一般不需将工件预热。而用 D512、D517 等 2Cr13 型焊条时，堆焊前对工件一般要预热 300℃ 左右。

④ 采用 D507、D517 焊条需要采用直流弧焊机或硅整流弧焊机，并采用反极性接法，使用 D502、D512 焊条可采用交流或直流弧焊机。

##### 2) 操作要点

① 堆焊应尽量采用小电流、短弧焊，以减少熔深和合金元素的烧损。堆焊工件应保持在水平位置，尽量做到堆焊过程不中断，连续堆焊 3~5 层。

② 根据工件的材质、大小和不同的要求尽可能采用油冷、空冷或缓冷来获得不同的硬度。焊后一般都需要进行 680~750℃ 高温回火或 750~800℃ 退火处理，以使淬火组织得到改善、降低热影响区硬度。

③ 工件堆焊后如发现焊层有气孔、裂纹等缺陷或堆焊层高度不够加工，而此时工件已冷却到室温，在这种情况下不能进行局部补焊。因为马氏体高铬钢是空淬倾向较强的金属，局部补焊后会发生堆焊层硬度不均匀的现象，不能满足技术条件要求，而应采用重新堆焊的方法进行返修。

典型的马氏体高铬钢（1Cr13）焊条手工电弧堆焊的工艺参数见表 4.9。

#### (2) 铬锰钢阀门焊条堆焊工艺

铬锰钢堆焊焊条主要有 D516M 焊条等，其焊芯为 H08 丝或 H1Cr13 丝。铬锰钢堆焊焊条的显著特点是堆焊金属的抗裂性能好，堆焊大口径阀门也不需要焊前预热、焊后缓冷等工艺措施，可以简化生产工艺、降低制造成本，提高生产效率。



表 4.9 马氏体高铬钢焊条手工电弧堆焊的工艺参数

产品型号	部件名称	基体材料	焊条牌号	焊条直径/mm	电源种类	焊层高/mm	堆焊层数	焊接电流/A	焊前、焊后处理
Z41H25 DN100	阀体	25 钢	D507	5	直流反接	6	3~4	140~160	焊后空冷
Z41H25 DN100	阀板	25 钢	D512	5	交流	6	3~4	160~180	焊前预热 300℃ 焊后 950℃油冷
J41H40 DN80	阀体	25 钢	D507	4	直流反接	5	3~4	120~140	焊后空冷
J41H40 DN80	阀瓣	25 钢	D517	5	直流反接	5	3~4	140~160	焊后空冷

1) 焊前准备

① 堆焊工件表面需进行粗车加工，并根据图纸要求预留加工余量，以保证焊层经加工后有 3mm 以上的高度。

② 堆焊工件表面不得有气孔、夹渣、包砂、裂纹等缺陷，如有上述缺陷需经焊补清除、再粗车后方可堆焊。

③ 焊条使用前必须烘干，加热到 350~400℃，保温 2h。

④ 铬锰钢堆焊焊条属于碱性低氢型药皮的焊条，应使用直流弧焊机或硅整流焊机，并采用反极性接法。

2) 操作要点

① 堆焊工件表面须处于水平位置，对于有斜度的堆焊工件，要靠辅助装置使堆焊表面处于水平位置。

② 堆焊时，焊条须垂直于工件表面，并使焊条略向右倾斜与工件表面夹角 80°左右，且尽量采用短弧焊。

③ 堆焊时，可根据堆焊层宽度要求适当摆动运条，并借助于凝固在焊道两侧的熔渣拖住铁水，使焊层宽度均匀，成形美观。

④ 堆焊采用多层焊，一般堆焊 4~5 层，各层焊道之间无需清渣处理，整个堆焊过程不宜中断，最好一次完成。如遇特殊情况中断堆焊，重新起弧时，应将已凝固的熔渣彻底清除，防止堆焊时夹渣。熔渣清除后，堆焊操作难度增加，因熔渣除去，易发现铁水流淌现象，因此要注意控制好熔池形状。

⑤ 堆焊后焊层表面如有气孔、裂纹或局部未焊透等缺陷，可采用局部补焊法进行堆焊修补。

典型铬锰钢堆焊焊条阀门手工电弧堆焊的工艺参数见表 4.10。

表 4.10 铬锰钢堆焊焊条阀门手工电弧堆焊的工艺参数

产品型号	部件名称	基体材料	焊条牌号	焊条直径/mm	电源种类	焊层高/mm	堆焊层数	焊接电流/A
Z942H25 DN500	阀体	25 钢	85 号	5	直流反接	5	4	260~280
Z14H40 DN200	阀体	25 钢	85 号	5	直流反接	5	4	240~260
H44H40 DN200	阀瓣	25 钢	85 号	5	直流反接	5	4	260~280
Y43H25 DN80	阀板	25 钢	137 号	4	直流反接	4	3	140~160

### (3) 高温高压阀门焊条堆焊工艺

高温高压阀门密封面堆焊焊条以 D547 和 D547Mo 为代表, 这类焊条适用于堆焊工作温度低于 570℃ 的电站高温高压阀门密封面的堆焊。

#### 1) 焊前准备

① 堆焊工件表面需进行粗车加工, 不得有气孔、夹渣、包砂、裂纹等缺陷, 如有上述缺陷需经焊补清除、再粗车后方可堆焊。

② 焊条使用前必须烘干处理, 加热到 300℃ 保温 2h。

③ 堆焊前, 对于大于 DN500mm 的阀门工件应按表 4.11 所规定的预热温度进行预热处理。

④ D547、D547Mo 焊条堆焊时, 应使用直流弧焊电源, 并采用反极性接法。

表 4.11 阀门工件堆焊前预热温度及焊后热处理工艺

基体材料	预热温度/℃	焊后回火温度/℃	基体材料	预热温度/℃	焊后回火温度/℃
低碳钢	350~400	620~650	奥氏体不锈钢	300~400	860~880
45 钢	350~400	620~650	马氏体不锈钢	300~350	700~750
低合金耐热钢	500~600	680~720			

#### 2) 工艺要点

① 堆焊采取多层焊, 一般为 3~4 层。第一层用直径 3.2mm 焊条, 采用小电流、窄道焊、短弧操作。

② 要求整个堆焊过程连续进行, 尽量缩短间断时间, 以保证层间温度, 使整个堆焊过程始终保持焊前预热的温度。

③ 堆焊高度应控制在 5mm 以下, 经加工后不得小于 3mm, 以免因堆焊层高度不够造成化学成分不稳定, 硬度不均匀, 从而影响其使用性能。

④ 堆焊后按表 4.11 所示的焊后回火热处理温度进行回火处理。切记要在堆焊后立即入炉, 否则易引起不良后果。

⑤ 如焊层局部有未焊透缺陷, 可以局部焊补, 但必须按堆焊工艺 (包括焊前预热、焊后回火等) 进行焊补。

典型电站阀门电弧堆焊的工艺参数见表 4.12。

表 4.12 电站阀门电弧堆焊的工艺参数

产品型号	部件名称	基体材料	焊条牌号	焊条直径/mm	电源种类	焊层高/mm	堆焊层数	焊接电流/A	焊前、焊后处理
J61H-P <sub>54</sub> 140 DN50	阀座	12CrMoVA	D547Mo	3.2	直流反接	5	3	80~100	不预热, 焊后缓冷
	阀瓣	12CrMoVA	D547Mo	4	直流反接	5	3	100~120	
Z941YH-200 DN175	阀座	20CrMo	D547Mo	4	直流反接	5	4	110~130	预热 450℃, 焊后炉冷
	闸板	20CrMo	D547Mo	5	直流反接	5	4	140~160	

### (4) 钴基合金焊条堆焊工艺

钴基合金用于阀门密封面堆焊的焊条有 D802、D812 等。钴基合金堆焊焊条常用于堆焊临界或超临界蒸气阀门以及使用条件比较恶劣、抗磨损、抗腐蚀性能要求较高的阀门密封面。钴基合金堆焊焊条焊接性能较差, 堆焊工艺较为复杂。因此为保证堆焊质量, 需认真执

行经过工艺评定后的堆焊工艺。

#### 1) 焊前准备

① 堆焊工件表面粗糙度  $R_a$  应在  $12.5\mu\text{m}$  以下，并严格清除表面的铁锈和油污等，不得有气孔、包砂、裂纹等缺陷，棱角处应倒圆角。

② 堆焊前，应视基体材料不同，按表 4.13 所规定的预热温度进行预热。

③ 当基体材料为珠光体耐热钢或马氏体不锈钢等焊接性较差的材料时，需在基体表面堆焊奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9 或 Cr25Ni20 过渡层，加工平整后再堆焊钴基合金，以改善抗裂性，避免产生裂纹。

④ D802、D812 焊条堆焊时，采用交、直流电源均可；建议采用直流电源反极性接法。

#### 2) 操作要点

① 工件表面处于水平位置，焊条与工件间保持  $70^\circ\sim 80^\circ$  倾角，短弧焊。

② 焊条摆动幅度不宜过大，一般不超过焊条直径的 3 倍。

③ 为减小基体熔深，堆焊时尽量采用小电流。

④ 堆焊层高度 3mm 即可满足性能要求，需堆焊两层以上。各层间需用砂轮或钢丝刷进行清渣处理，并控制层间温度稍高于预热温度。

⑤ 堆焊结束时，不能使电弧急速离开堆焊金属表面，以免在熄弧处熔池金属急冷而产生裂纹。

典型的钴基合金焊条阀门堆焊的工艺参数见表 4.13。

表 4.13 钴基合金焊条阀门堆焊的工艺参数

产品型号	部件名称	基体材料	焊条牌号	焊条直径/mm	电源种类	焊层高/mm	堆焊层数	焊接电流/A	焊前、焊后处理
Z41W-16PDN150	闸板	1Cr18Ni9Ti	D812	5	交流或直流	4	3	120~140	预热 300℃，焊后缓冷
Z41Y-16RDN100	阀座	Cr18Ni12Mo2Ti	D802	4		3	2	100~120	预热 350℃，焊后缓冷
Z41Y-16RDN100	闸板	Cr18Ni12Mo2Ti	D812	5		4	3	110~130	预热 300℃，焊后缓冷
J41W-40DN80	阀瓣	1Cr18Ni9Ti	D812	4		3	2	90~110	预热 300℃，焊后缓冷

### 4.3.3 热锻模及铸铁冷冲模的电弧堆焊

#### (1) 热锻模的电弧堆焊

热锻模、热切边模一般采用 5CrNiMo 或 5CrMnMo 合金工具钢制造，为了节约贵重合金钢，也可用 45Mn2 铸钢（或 ZG40）制造。手工电弧焊则适用于堆焊制造热锻模以及热切边模等。

堆焊热锻模目前应用最广的堆焊焊条是 D397，它可用于堆焊铸钢或锻钢作为坯体的热锻模，也可用于修复 5CrMnMo、5CrNiMo 和 5CrNiSiW 钢制锻模。D397 焊条属于低氢型药皮焊条，采用直流反接。焊条使用前必须在  $300\sim 350^\circ\text{C}$  烘干 1~1.5h。

对某些红硬性更高的热锻模可以采用 D337 焊条堆焊。但 D337 焊条的堆焊工艺性能和堆焊后的机械加工性较差，因此在某些形状复杂、尺寸较大的热锻模上进行堆焊时，需要采用比较复杂的堆焊工艺。

### 1) 热锻模制造工艺

① 加工型槽 坯料锻造并进行热处理后按规定形状尺寸加工型槽，加工时应注意将堆焊部位所有尖角都铣成圆角（尺寸不小于2~3mm）。深而窄的型槽应适当加大，并将垂直立面改为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 斜度，以便堆焊操作，避免产生夹渣、未焊透等缺陷。

② 焊前预热 45Mn2 钢模体堆焊前应预热至 $450^{\circ}\text{C}$ ，并在整个堆焊过程保持模体温度不低于 $300^{\circ}\text{C}$ ，否则需再次加热。加热可以在煤炉中进行，然后取出放在石棉保温箱中堆焊，也可以自行制造专用的加热保温电炉，在炉中预热并堆焊。

③ 堆焊过程 用D397 焊条采用分区分层堆焊法由最深处开始堆焊并逐层向上，各层间的堆焊焊缝可以交错成一定角度，以便堆焊层厚度均匀并减少夹渣。操作中焊条应稍作横向摆动，还应注意避免在夹角和狭窄处引弧和熄弧。

采用45Mn2 钢制造模坯，有效堆焊厚度应为5~10mm，此外，还应留3~5mm的加工余量。

④ 焊后热处理 堆焊后最好立即放入炉中退火，或在 $250^{\circ}\text{C}$ 以上保温存放直到送入热处理炉中进行退火处理。退火温度为 $(850\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，保温时间按每毫米厚度保温1.5~2min计算，然后将炉温降到 $680^{\circ}\text{C}$ 进行等温退火，以后随炉冷到 $400^{\circ}\text{C}$ 以下出炉。

⑤ 机械加工 进行机械加工并检查堆焊表面的缺陷。对于直径不大于0.5~1mm的个别气孔和夹渣可不处理；对于直径超过0.5~1mm但不超过4mm的气孔和夹渣，可以在淬火+回火处理以后用镍铬不锈钢焊条进行不预热补焊。对于非工作面（倾斜槽及分槽面）的气孔和夹渣，当直径小于2.5mm时可不处理。对于模槽内的裂纹，如果其长度不大于6~8mm且比较分散时也可不进行处理。

⑥ 淬火+回火处理 淬火温度 $820\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，油中冷却到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，然后立即放入炉温不大于 $300^{\circ}\text{C}$ 的回火炉中加热，进行 $520\sim 550^{\circ}\text{C}$ 回火。处理后堆焊层硬度应在38~46HRC。最后再一次检查模槽表面是否存在焊接缺陷。

### 2) 锻模修复工艺

对于5CrMnMo和5CrNiMo等热锻模使用后产生的型槽塌边、尺寸胀大、裂纹等缺陷，可以区别情况按以下两种方法选用D397 焊条堆焊修复。

① 先用高温回火（ $650\sim 690^{\circ}\text{C}$ ）或退火处理以降低模体硬度，然后将型槽损坏部分用机械加工的方法去除，使待焊部位呈斜坡口或带圆角的沟槽。然后进行堆焊和焊后热处理，其具体工艺与热锻模制造工艺相同。

② 不用高温回火和退火，直接用手砂轮清理缺陷和待堆焊修复处，经 $250\sim 400^{\circ}\text{C}$ 预热或局部预热后进行堆焊，焊后缓冷，然后进行回火（不淬火）处理。最后用手砂轮打磨出所需外形后，即可投入使用。此法适用于修复堆焊量不大的旧锻模。

### 3) 切边模的焊条堆焊

用焊条堆焊制造或修复切边模的工艺过程与堆焊制造或修复锻模基本相同。焊条一般也选用D397。在堆焊工艺上，为了使刃口棱角容易堆高，可在待堆焊的棱角侧面先点焊一根直径为6~7mm的铁丝，堆焊后再在机械加工时去除。也可以采用先在刃口部位堆焊一层窄面高的焊道的办法以保证堆焊的成形。对于开圆形或半圆形的切边模采用分段焊，以使受热比较均匀。堆焊层的有效厚度和宽度（即堆焊毛坯上预留的半U型槽的深度及宽度）约10mm左右。

热锻模手工电弧堆焊中常见缺陷、产生原因及防止措施见表4.14。

表 4.14 热锻模手工电弧堆焊中常见缺陷、产生原因及防止措施

常见缺陷	产生原因	防止措施
气孔	(1)焊条烘干不良或停放时间过长 (2)焊接时电弧过长 (3)电流过小或预热温度过低 (4)电源极性接法不对 (5)堆焊部位有油污、铁锈等	(1)严格控制烘干温度 300~350℃,保温 1~1.5h,烘后放在焊条保温筒中,随用随取 (2)堆焊时尽可能压短弧长,焊条稍作横向摆动 (3)适当增加焊接电流,提高预热温度。但电流过大也不利于防止气孔 (4)采用直流反接 (5)加强除锈、防止油污
裂纹	(1)预热温度及堆焊过程中保持的温度过低 (2)电流过大,出现火口裂纹 (3)旧模体上的裂纹没清除干净 (4)焊后冷却到较低温度且没有及时进行退火	(1)严格控制预热温度,加强焊接过程中的测温,温度不够时及时再将毛坯加热 (2)适当减小电流 (3)将模体仔细检查,并将原有裂纹除净 (4)堆焊后及时进行退火处理,或在 250℃ 以上保温等待热处理
夹渣	(1)模槽底部不圆 (2)每层焊后渣壳没清理干净 (3)电流过小 (4)操作技术不熟练	(1)坯料上横槽尖处改圆角 (2)焊完每边焊缝后,仔细清理熔渣 (3)适当增大焊接电流 (4)熟悉焊条操作要点,提高技术水平

## (2) 铸铁冷冲模的电弧堆焊

### 1) 汽车边梁复合落料模堆焊工艺

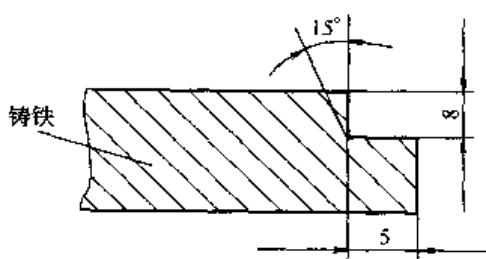


图 4.4 冷冲模堆焊坡口示意

① 选用灰铸铁做基体,但一般抗拉强度和抗弯强度太低的灰铸铁不宜做堆焊基体。刃口开成如图 4.4 所示形状的坡口。

② 选用 J427 或 J506 焊条堆焊过渡层,选用 D322 或 D327 焊条堆焊工作层。焊前 J427、J506 或 D327 焊条在 350~400℃ 烘干 2h, D322 焊条在 250℃ 烘干 2h。

③ 先用直径 3.2mm 的 J427 或 J506 焊条焊一层过渡层,采用直流反接。

④ 用 D322 或 D327 焊条堆焊工作层时,尽量采用小电流,以降低熔合比、减少熔深,这有利于提高焊缝的抗裂性及防止熔合区出现剥离。堆焊时也采用直流反接,每次焊接长度以 50mm 为宜,每焊完一段后待冷至 200℃ 左右时再施焊下一段,再次引弧时要压过上次停弧处 20~30mm,每次熄弧应填满弧坑。每焊完一段要立即锤击焊缝,堆焊层之间的焊渣一定要清理干净。堆焊层厚度高出基体少许即可。

⑤ 堆焊后将工件放在空气流通的地方,以加快空冷速度。待工件冷至室温后,便可进行 200℃ 保温 1h 的回火处理。

⑥ 堆焊后的工件进行机械加工即可使用。

采用铸铁堆焊工艺制造的 BJ212 汽车边梁复合落料模使用寿命长,并且使用过程中无崩口现象出现。

### 2) 汽车覆盖件切边模刃口堆焊工艺

采用铸铁基体堆焊刃口工艺制造汽车覆盖件切边模,成本低、使用效果好。其堆焊工艺要点如下。

① 选用灰铸铁做模具的基体。在堆焊刃口的位置上铸造时预留或用机械加工的方法获得一个  $8\text{mm} \times 8\text{mm}$  的坡口，如图 4.5 所示。如坡口是铸造出的，则在堆焊前用砂轮打磨干净型砂，再去除表面层约  $2\text{mm}$  作为堆焊面。用氧乙炔火焰将堆焊处油污、水分等杂质清理干净。

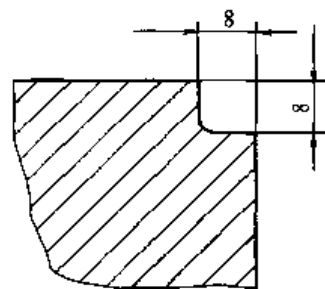


图 4.5 切边模堆焊坡口示意

② 选用 D017 焊条堆焊，焊前经  $250^\circ\text{C}$ 、 $1\text{h}$  烘干。

③ 可用直径  $3.2\text{mm}$  的 D017 焊条直接堆焊，焊前不需预热，采用直流反接，堆焊时以小电流为宜，每焊一层应将熔渣清理干净。堆焊时应保持冷焊的特点，层间温度控制在  $60^\circ\text{C}$  以下。堆焊高度控制在能磨出刃口即可，堆焊太高易产生大的应力且浪费焊条和刃口磨削时间。如发现裂纹应彻底清理干净重新堆焊。在堆焊过程中要特别注意防止裂纹的产生。

④ 焊后空冷，刃口磨削后即投入使用。

### 3) 汽车零件冷冲模堆焊工艺

铸铁基体冷冲模刃口采用堆焊工艺可以成功地代替用传统的镶块拼装工艺生产的冷冲模，可以简化生产工艺，大大节约生产成本。

① 基体选用 HT350 灰铸铁，堆焊前将堆焊处表面加工掉  $5\sim 10\text{mm}$ 。铸件退火后加工成需要的凹凸模形状，然后沿刃口加工出  $8\text{mm} \times 8\text{mm}$  或  $8\text{mm} \times 10\text{mm}$  的坡口，如图 4.6 所示。用氧乙炔火焰将基体上的水分、油污清除干净，但预热温度不宜过高，一般不能高于  $250\sim 300^\circ\text{C}$ 。油污燃尽后用钢丝刷刷净堆焊处，使之露出金属光泽。

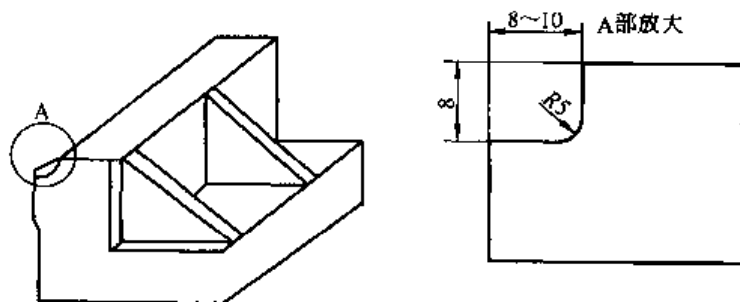


图 4.6 冷冲模堆焊坡口示意

② 坡口清理干净后，立即进行堆焊。打底焊用 Z408 焊条，盖面焊用 D517 焊条或 D322 焊条。焊条直径选用  $3.2\text{mm}$  为宜。焊前要将焊条进行烘干。

③ 尽量采用预热焊，小工件可进炉预热，预热温度为  $250\sim 300^\circ\text{C}$ ，层间温度控制在  $200\sim 300^\circ\text{C}$  之间；大工件不能预热时，就应保持冷焊的特点，层间温度控制在  $50\sim 60^\circ\text{C}$  以下，尽量缩短工件冷裂纹敏感区 ( $170\sim 180^\circ\text{C}$ ) 的停留时间。

④ 打底焊和盖面焊过程中，应采用短弧、短段（每段长度不超过  $40\text{mm}$ ）、对称退焊（或跳焊）法。焊条可作轻微摆动，接头应错开，收弧时应注意填满弧坑。每焊完一段焊道后，趁红热状态应立即轻击焊道，并用钢丝刷刷净。

⑤ 小铸件堆焊刃口后空冷，待完全冷却后进炉低温回火，回火温度为  $150\sim 200^\circ\text{C}$  保温  $1\text{h}$ 。大铸件堆焊后用石棉灰覆盖缓冷。

⑥ 焊后磨削加工即能使用，注意应保证冷却充足、砂轮锋利，进刀量要小，以防磨裂。

#### 4.3.4 高速钢刀具的电弧堆焊

形状较简单的高速钢刀具，例如车刀、刨刀、铣刀等可以采用手工电弧堆焊的方法制造。特别是利用废高速钢作堆焊材料，制造一些焊后基本不需要热处理、经磨削后便可使用的刀具。

##### (1) 高速钢刀具的焊接工艺

###### 1) 堆焊前准备

根据刀具外形尺寸要求做好堆焊毛坯的准备，堆焊槽不宜太深，边角处应有圆角。清除堆焊槽处的油、锈、水分等污物。为减少堆焊后的加工量，刀具刃部的几何形状应尽量依靠紫铜或石墨成形模具来保证。典型的堆焊毛坯示意图 4.7 和图 4.8。

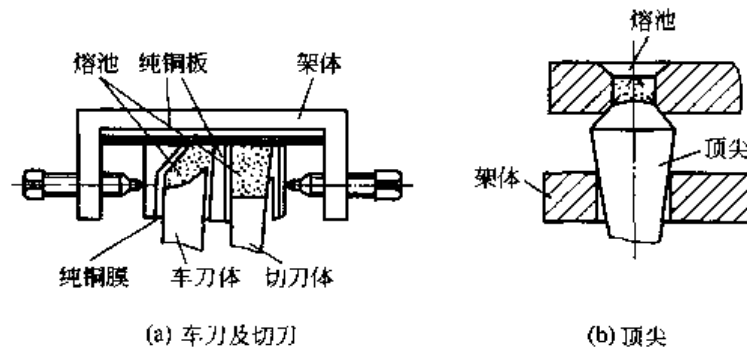


图 4.7 成形模中堆焊

###### 2) 堆焊工艺

较大毛坯堆焊前要预热至  $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，对较小的毛坯件（如车刀等）也可不预热堆焊。堆焊焊条选用 D307，采用直流电源，焊条接正极。堆焊过程中采用较小电流多层堆焊，每焊完一层要将熔渣清理干净，焊后将毛坯放入石棉灰中或炉中缓冷，以防止产生裂纹。

对于较小的堆焊件，焊后在空气中冷却也不会产生裂纹。同时在空气中冷却后高速钢堆焊层已经被淬火，得到淬火组织，硬度可达  $57\sim$

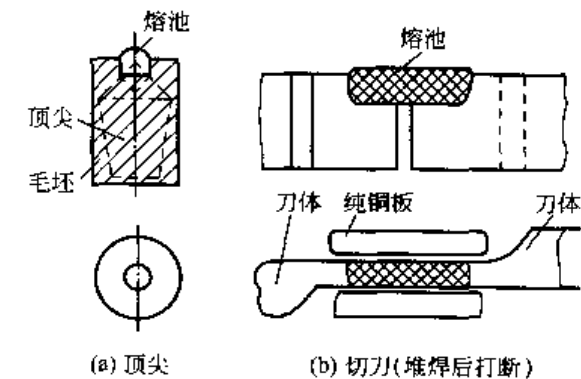


图 4.8 毛坯形槽中堆焊

61HRC。因此焊后只要进行  $2\sim 3$  次  $560\sim 580^{\circ}\text{C}$  回火（每次保温 1h），即可得到较高的硬度。回火最好在堆焊后 24h 以内进行，回火后的刀具用砂轮初磨后即可使用。

对于需要机械加工的堆焊刀具，应在堆焊后先进行退火，机械加工后再淬火并回火，热处理可以采用锻造高速钢的热处理工艺。

某些堆焊高速钢后的刀具毛坯，可以进行锻造。其作用是改善堆焊层的金相组织，以提高切削性能和改变堆焊层外形尺寸以减少加工量。

###### (2) 高速钢刃部和 45 钢柄部的焊接

高速钢刃部和 45 钢柄部对接焊的主要问题是容易在焊后和淬火处理后发生裂纹。为了防止焊后裂纹，在工艺上应做到焊前预热  $450^{\circ}\text{C}$  以上，焊接过程中保证毛坯焊接接头部位温度不低于  $350^{\circ}\text{C}$ ，并且焊后立即将毛坯放入  $650\sim 700^{\circ}\text{C}$  的炉中均匀受热并保温 2h，随后在空气中冷却。

① 刀具毛坯的制备 圆柄刀具开 U 形  $30^{\circ}$  坡口（见图 4.9），R 随刀具大小而定，一般

为 4~6mm;  $\phi$  也随刀具大小而定, 一般为 4~10mm。在 45 钢一头加工成芯子, 而在高速钢一头加工成芯孔以起装配定位作用。

② 焊前预热 为了预热和焊后保温使用同一个炉子, 而焊后保温所要求的温度较高, 所以预热时的炉温为 700~720℃。

③ 焊条选择 采用 D337 焊条, 直径为 4mm, 焊接电流为 120~140A, 用直流反接。

④ 焊接工艺 焊圆柄刀具时, 毛坯预热后出炉, 并将毛坯夹在小型手摇转胎上, 一边焊接、一边转动, 直至焊层高出坯料表面 1~2mm 为止。

焊接过程中, 坯料温度不得低于 350℃。焊后立即送入 700~720℃ 的炉中保温, 或者焊后立即入炉退火, 以防止裂纹。

⑤ 焊后退火 为了保证毛坯的机械加工性能, 需要在焊后进行 880~900℃ 保温 3~4h 和 720~740℃ 保温 3~4h 的退火处理, 当炉温降到 500℃ 时, 出炉空冷。

⑥ 机械加工及淬火处理 退火处理后的焊接毛坯最后进行机械加工、淬火+回火以及磨削加工等工序, 其工艺与高速钢刀具的加工工艺基本相同。

#### 4.3.5 水轮机叶片的堆焊修复

水电站水轮机过流部位的部件(如转轮、导水叶、座环等)运行时, 在含泥沙量多的河流中以磨损破坏为主, 而在清水、含泥沙量少的河流或水库容量很大的电站中, 这些部件则以汽蚀破坏为主。某些情况下汽蚀及磨损两种破坏形式同时存在。

水轮机检修时需对叶片汽蚀和磨损部位进行修复, 叶片的材质多为普通低合金钢, 一般都采用手工电弧堆焊的方法修复叶片, 以恢复发电机组的发电能力。

##### (1) 焊前准备

① 可用磁性探伤法检查水轮机转子是否有裂纹。如有裂纹, 则在裂纹最宽处钻  $\phi 7 \sim 10$ mm 的孔以检查裂纹深度。再在裂纹端部钻  $\phi 3 \sim 5$ mm 的孔, 孔的深度应比裂纹深度深 2mm, 以防止裂纹扩展。然后用碳弧气刨将裂纹处开成 65° 坡口。

② 拉线检查有无凹凸点(指汽蚀附近), 如有则画圈标明。对于凹凸点, 在处理裂纹后, 用碳弧气刨去除或手持砂轮磨平, 达到要求高度。

③ 堆焊应在保温棚内进行, 棚内温度应在 30℃ 以上。在无裂纹的情况下棚内温度 15~20℃ 即可, 但必须防止冷空气对流。若焊接裂纹没有或少而小时, 焊前可不预热, 若有较严重裂纹, 则需局部预热到 90℃ 或 90℃ 以上。

④ 堆焊前应根据汽蚀和磨损的不同情况进行清理。当汽蚀和磨损面积较大, 而且深浅不规则时, 首先用碳弧气刨进行粗略清理, 然后再用砂轮仔细清理。应特别注意将边角处打磨成圆角, 以免堆焊时产生焊接缺陷。有的水电站对汽蚀区做了上述处理后还沿汽蚀区边缘开出一条半径为 5~10mm 的半圆形沟槽。在堆焊时先焊满沟槽再焊其他部分。也有的水电站对汽蚀区不做任何清理, 就用 J427 或 J507 焊条打底堆焊。在一定条件下, 这样做也可以取得较好的效果。

⑤ 沿下环圆周轴向和径向各装 3 个千分表, 上环径向装 4 个千分表, 在法兰盘轴向内装 4 个千分表。测量上、下环的圆度情况, 作为堆焊过程中测量、调整和控制变形的依据。在叶片与叶片之间分 4 点测量叶片的开口度。

##### (2) 焊条的选择

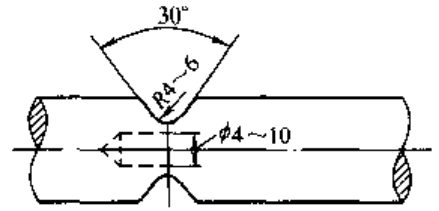


图 4.9 刀具毛坯 U 形坡口尺寸



汽蚀或磨损深处打底焊可选用 J426、J427、J507、J506 焊条；耐汽蚀表层堆焊可选用 D276、D277、D237、D642、A102、A132 焊条；耐泥沙磨损表层堆焊可选用 D642、D237 焊条；耐蚀同时要求耐磨的表层堆焊选用 D237、D642 焊条。

J427、J507、D276、D277、D237 焊条焊前应在 300~400℃ 烘干 2h。D642、A102、A132 焊条焊前应在 100~150℃ 烘干 1~2h。

### (3) 堆焊过程

汽蚀和磨损区深度在 15mm 以内者，应先打底焊，深度在 4mm 以内者可直接进行表面堆焊。为保证堆焊层的性能，耐汽蚀或耐磨的堆焊层最好焊 2~3 层以上。

堆焊过程中应特别注意防止变形。最好连班堆焊，一次焊完，每班 2 或 4 名焊工，对称交错进行堆焊。每块叶片堆焊时温度不宜过高，一般在背面可以手模为准。每次在一块叶片上焊 3 根焊条就得更换堆焊另一块叶片。对于较大面积的堆焊区，采用分块交错的顺序堆焊，如图 4.10 所示。

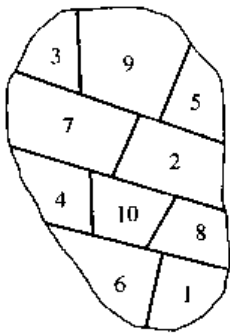


图 4.10 叶片大面积堆焊区分块交错堆焊顺序

每一块堆焊面积以 70mm×100mm 左右为宜。对于个别深而又长的堆焊区，应采用镶板焊接。对裂纹采用由内向外分段焊法，每段长 100~150mm。一般先焊汽蚀和磨损严重区，再焊其他区域。

多层堆焊时相邻堆焊层的焊道方向最好交错成一定角度。外表层的焊道方向应尽量为顺水流方向。操作中注意应用直线运条，尽量采用小电流、短弧堆焊。焊道应重叠 1/2~1/3 宽度。为获得平整的堆焊表面，堆焊完一层后可不进行清渣，为便于操作，最好将工件放在立焊或爬坡的位置。平焊位置进行堆焊时也可以不清渣，但电流要大些，而且操作难度较大。堆焊时，应随时检查千分表并通过堆焊顺序控制变形。一般轴径向变形要求在 0.2mm 以内，叶片开口度偏差应在 2mm 以内。堆焊层应留 1~2mm 高度余量，最后磨光。

### 4.3.6 工程机械结构件的电弧堆焊

#### (1) 汽车式起重机伸缩臂液压缸柱塞的冷焊修复

汽车式起重机的伸缩臂液压缸柱塞，由于长时间使用，表面磨损极为严重，拉伤痕迹长达 6m，深度达 4mm，而且拉伤痕迹是纵向多道的。这些缺陷甚至使汽车起重机无法使用，为了不影响生产，可以采用电弧冷焊法修复柱塞。

液压缸柱塞材质为 45 钢，总长度 7m，修复长度 6.45m，柱塞直径及壁厚为  $\phi 90\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。焊补工艺要点如下。

① 焊前对柱塞进行超声波探伤，检查是否有裂纹等缺陷。对损伤部位用角向磨光机打磨光滑，并用汽油、丙酮清洗表面油污。

② 选用直径 2.5mm 的 A302 焊条进行焊补，焊前焊条经 150℃ 焙烘 2h，焊接时采用直流正接。

③ 施焊部位两侧用石棉布覆盖保护，避免飞溅物损伤柱塞表面。6.45m 长的焊补区分为 6~8 段进行焊补，焊条不做任何摆动，直线运条，每次只焊 5~6 根焊条，每焊完一根焊条，即用手锤轻轻锤击。严格控制焊缝区温度，避免焊道过宽，使热影响区温度增高而引起柱塞变形，各段焊道采用短弧分段退焊法进行焊接。

④ 焊补完毕后，先用磨光机对焊缝进行粗磨，然后用锉刀精锉，最后用油石研磨。

⑤ 柱塞研磨后，宏观检查有无缺陷，再用着色法检验。如未发现缺陷，则证明修复后的柱塞效果很好。

### (2) 高锰钢铸件的电弧堆焊

含锰量 10%~14% 的高锰钢为单相奥氏体组织，抗拉强度很高，韧性较好。它的硬度虽不高，但在受到冲击或表面挤压力的作用时，表面发生加工硬化，即表面硬度提高，耐磨性很好。高锰钢常用于制造碎矿机颚板、铁道道岔、拖拉机履带板等零件。

高锰钢堆焊时的主要困难是堆焊金属容易产生裂纹。为避免裂纹，堆焊时常采用如下工艺措施。

① 焊条的选用 常用的高锰钢堆焊焊条有 D256 和 D266，它们可以直接用于破碎机、高锰钢轨、铁道道岔、拖拉机履带板等零件的堆焊。对于特别重要的高锰钢件应先用奥氏体不锈钢焊条堆焊过渡层，然后再用 D256 和 D266 堆焊焊条进行堆焊。

② 选用细焊条、小电流 堆焊时采用细焊条、小电流，并以足够快的速度冷却。必要时，可用流动冷水来加强冷却或将高锰钢件放在水中只留出待焊部位进行堆焊。

③ 焊后热处理 如果条件允许，堆焊后的高锰钢铸件最好进行淬火回火处理。

### (3) 挖掘机低合金钢部件的堆焊修复

#### 1) 挖掘机驱动轮的堆焊

驱动轮也称行走主动轮。3~4m<sup>3</sup> 挖掘机驱动轮材质一般是 35CrMo 钢。驱动轮的爪子经调质处理后，硬度为 320HB。其端部磨损 25~30mm 即为超限。

挖掘机驱动轮堆焊时采用 D127 焊条，焊前用氧乙炔火焰清理堆焊表面的油污并用钢丝刷刷去铁锈；用 J506 或 J422 焊条堆焊过渡层，一般堆焊两层；用 D127 焊条堆焊耐磨层，耐磨层厚度为 7~10mm。堆焊后不加工即可使用，堆焊层硬度 360HB。

#### 2) 挖掘机大减速齿轮的堆焊

3~4m<sup>3</sup> 挖掘机大减速齿轮表面的工作条件比较繁重，如用 D127 焊条对齿轮的牙齿进行堆焊，堆焊层硬度可达 35HRC 左右，耐磨性尚好，但使用中易发生表面剥落现象。而采用 D172 焊条堆焊，堆焊层硬度 40HRC 左右，耐磨性较好，也不发生剥落现象。如果齿轮发生断齿，应先用 J422 焊条打底，表面用 D172 焊条堆焊。

#### 3) 挖掘机推压齿轮的堆焊

这种齿轮、齿条的材质为 35CrMo 钢。磨损后的推压齿轮如果采用 J422 焊条堆焊修复，修复后的齿轮工作寿命只有新品的 50% 左右。而如果用 D172 焊条修复，可取得较好效果，其耐磨性和使用寿命可大大得到提高。

#### 4) 1m<sup>3</sup> 挖掘机履带板的堆焊

1m<sup>3</sup> 挖掘机履带板的材质为 ZG35Mn。可采用 D132 焊条堆焊修复这种中碳低合金钢履带板磨损处，焊后不需要进行加工即可使用，效果良好。

### (4) 高铬铸铁泥浆泵衬板电弧堆焊

高铬铸铁泥浆泵衬板，重 1.5t，直径 2300mm，因铸件清理不当，而在图 4.11 所示部位发生损坏。其堆焊修补工艺如下。

#### 1) 焊前准备

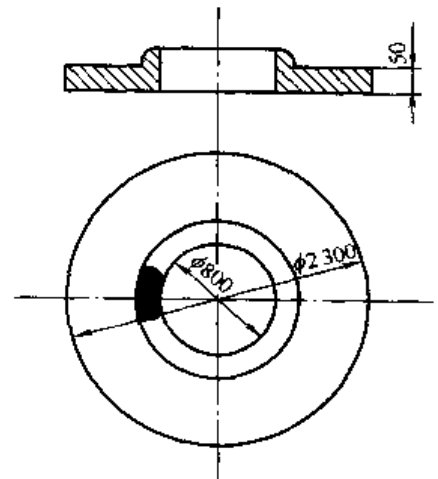


图 4.11 泥浆泵衬板堆焊部位

① 退火消除铸态应力。

② 清除缺口处油、锈等污物至露出金属光泽。

③ 选用 D667 堆焊焊条，用 Z308、J506 (E5016) 分别作为打底层和过渡层焊条。

## 2) 堆焊工艺

① 堆焊分为七层，用 Z308 焊条打底堆焊三层，用 J506 焊条堆焊一层过渡层，最后三层用 D667 焊条堆焊。

② 打底焊时，用 Z308 焊条先在缺口四周堆焊一周，随后向中间逐步填满。

③ 堆焊过渡层时，用 J506 焊条堆焊过渡层，焊接速度应适当加快，并注意避免过热而引起焊道裂纹。

④ 采用 D667 焊条堆焊，预热铸件时堆焊处预热温度不低于 400℃，采用较长的长柄焊钳施焊，每次堆焊长度不超过 70mm，焊后锤击焊缝。

⑤ 堆焊后立即进行热处理，热处理加热温度 1000℃，保温 2h，然后空冷，最后磨光补焊处待用。

## 第5章 氧-乙炔火焰堆焊

氧-乙炔火焰是一种多用途的堆焊热源，火焰温度较低（3 050~3 100℃），而且可调整火焰能率，能获得非常小的稀释率（1%~10%）。堆焊时熔深浅、母材熔化量少。获得的堆焊层薄，表面平滑美观、质量良好。氧-乙炔火焰堆焊所用的设备简单，可随时移动，操作工艺简便、灵活、成本低，所以得到较为广泛的应用，尤其是堆焊需要较少热容量的中、小零件时，具有明显的优越性。

### 5.1 氧-乙炔火焰堆焊特点及装置

#### 5.1.1 氧-乙炔火焰堆焊的特点

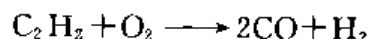
##### (1) 氧-乙炔火焰的分类和性质

氧-乙炔火焰是乙炔和氧经焊炬混合，由喷嘴喷出后混合燃烧、并发生一系列化学反应所形成的火焰。根据氧和乙炔混合比的不同，氧-乙炔火焰可分为中性焰、碳化焰（也称还原焰）和氧化焰三种，其构造和形状如图 5.1 所示。

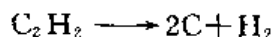
##### 1) 中性焰

在焊炬的混合室内，氧与乙炔的体积比（ $O_2 : C_2H_2$ ）为 1 : (1~1.1) 时，被完全燃烧，无过剩的游离碳或氧，这种火焰称为中性焰。中性焰由焰心、内焰（微微可见）和外焰三部分组成 [见图 5.1 (a)]。焰心呈尖锥形，白色而明亮，轮廓清楚。其长度与混合气的流出速度有关，流速快，焰心就长，反之就短。在焰心中发生以下两种化学反应。

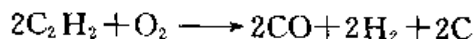
一部分乙炔与氧气化合生成一氧化碳和氢：



一部分乙炔受热分解成碳和氢：



而总的反应式为：



焰心的光亮就是由炽热的碳微粒发出的。亮度虽然高，但温度并不很高，约有 950℃。火焰紧靠焰心末端，呈杏核形，蓝白色，并带深蓝色线条，微微闪动。焰心中分解出的碳就在这一区域内与氧化合而剧烈燃烧，并生成一氧化碳，因此温度很高，其中离开焰心末端 3mm 左右处温度最高，约 3 100℃。焊接时主要是利用火焰的这一部分。这部分气氛中 2/3 是一氧化碳，1/3 是氢，所以具有一定的还原氧化物的作用。

外焰与内焰并无明显界限，一般是从颜色上区别。外焰的颜色从内向外由蓝白色变为淡紫色和橙黄色。在外焰中，主要是一氧化碳、氢气与空气中的氧化合而充分燃烧，生成二氧

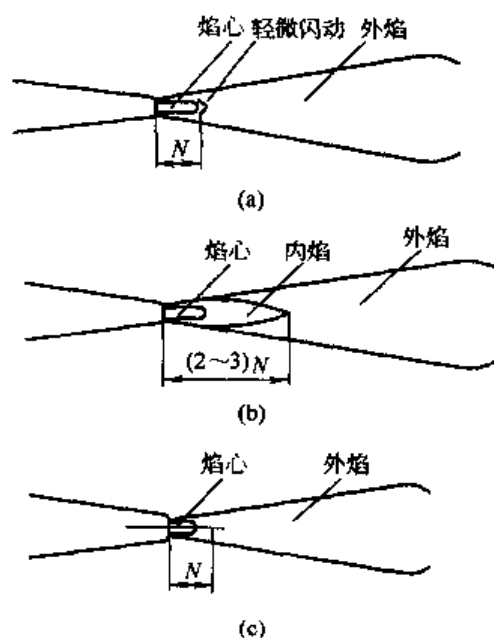


图 5.1 氧-乙炔火焰的构造

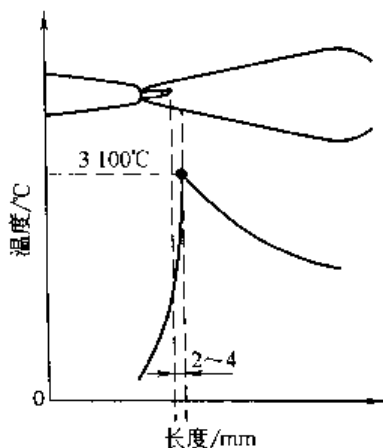
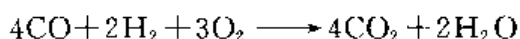


图 5.2 中性焰的温度分布

化碳和水蒸气。其化学反应式为



外焰的温度比焰心高，约为  $1\,200\sim 2\,500^\circ\text{C}$ ，具有氧化性，二氧化碳对熔池具有保护作用。中性焰由于内焰温度高，且具有还原性，能改善焊缝的力学性能，是焊接中经常使用的火焰。一般低碳钢、低合金钢和有色金属材料的焊接基本上都采用中性焰。

中性焰的温度沿火焰的轴线而变化，见图 5.2。内焰区沿火焰轴线的最高温度是在距焰心  $2\sim 4\text{mm}$  的范围内，火焰温度为  $3\,050\sim 3\,100^\circ\text{C}$ 。离此处越远，火焰温度越低。图示温度为焊嘴孔径  $1.9\text{mm}$  时的实测值。

### 2) 碳化焰

氧与乙炔的混合比 ( $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2$ ) 小于 1 (一般在  $0.85\sim 0.95$  之间) 时，混合气中的乙炔未完全燃烧，这种火焰称为碳化焰。碳化焰的焰心、内焰和外焰三部分均很明显 [见图 5.1 (b)]。整个火焰长而软。焰心呈灰白色，也发生乙炔的氧化和分解反应；内焰呈淡白色，由一氧化碳、氢和碳微粒组成；外焰呈橙黄色，除燃烧产物二氧化碳和水蒸气外，还有未燃烧的碳和氢。

碳化焰的最高温度低于  $3\,000^\circ\text{C}$ 。由于存在过剩的碳微粒和氢，碳会渗入堆焊金属中，使堆焊金属的含碳量增高。游离的氢也会进入堆焊金属，产生气孔和裂纹。因此，碳化焰不能用于焊接低碳钢和合金钢，而只适用于高碳钢、铸铁的焊接或补焊以及硬质合金的堆焊。

### 3) 氧化焰

氧与乙炔的混合比 ( $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2$ ) 大于 1.1 (一般在  $1.2\sim 1.7$  之间) 时，混合气燃烧过程加剧，并出现氧过剩，这种火焰称为氧化焰。氧化焰中整个火焰和焰心的长度都明显缩短，只能看见焰心和外焰部分 [见图 5.1 (c)]。焰心呈蓝白色，外焰呈蓝紫色。火焰挺直，带有“嘶嘶”的声音。氧的比例越大，火焰则越短，响声也越大。

氧化焰的最高温度高于中性焰。由于存在过剩的游离氧，故具有氧化性。若用来焊接钢，焊缝将产生大量的氧化物和气孔。同时熔池会发生剧烈沸腾，使焊缝金属变脆，因此不适于焊接钢件，一般只用于黄铜的焊接。

### (2) 各种火焰的获得及适用范围

改变氧与乙炔的混合比值，可获得不同温度和性能的火焰。为获得理想的堆焊质量，必须根据不同的材料来正确地调节和选用火焰。

打开焊炬的乙炔阀门点火后，慢慢地开放氧气阀增加氧气，火焰即由橙黄色逐渐变为蓝白色，直到焰心、内焰和外焰地轮廓清晰地呈现出来，这时的火焰即为碳化焰。根据内焰长度 (从焊嘴末端开始计量) 为焰心长度  $N$  的几倍，而把碳化焰称为几倍碳化焰 [见图 5.1 (b)]。碳化焰的渗碳和保护作用随着这一倍数的增大而增强。

在碳化焰的基础上继续增加氧气，当内焰基本上看不清时，得到的便是中性焰。如发现调节好的中性焰的能率过大需调小时，先减少氧气量，然后将乙炔量调小，直至获得所需要的火焰为止。另外，在焊件过程中由于各种原因，火焰的状态有时会发生变化，要及时注意调整，使之始终保持中性焰。

在中性焰的基础上再增加氧气量，焰心变得尖而短，外焰也同时缩短，并伴有“嘶嘶”

声，即为氧化焰。氧化焰的氧化度，以其焰心长度比中性焰的焰心长度  $N$  [见图 5.1 (c)] 的缩短率来表示，如焰心长度比中性焰的缩短  $1/10$ ，则称为  $1/10$  或  $10\%$  氧化焰。

点火和火焰堆焊中发生的火焰异常现象、产生原因及消除措施见表 5.1。

表 5.1 火焰异常现象、产生原因及消除措施

现象	产生原因	措施
火焰熄灭或火焰强度不够	(1)乙炔管道内有水 (2)回火防止器性能不良 (3)压力调节器性能不良	(1)清理乙炔胶管 (2)把回火防止器的水位调整好 (3)更换压力调节器
点火时有爆炸声	(1)混合气体未完全排除 (2)乙炔压力过低 (3)气体流量不足 (4)焊嘴孔径扩大,变形 (5)焊嘴堵塞	(1)排除焊炬内的空气 (2)检查乙炔发生器 (3)排除胶管中的水 (4)更换焊嘴 (5)清理焊嘴及射吸管
脱火	乙炔压力过高	调整乙炔压力
焊接中有爆声	(1)焊嘴过热,黏附脏物 (2)气体压力未调节好 (3)焊嘴碰触焊缝	(1)熄火后仅开氧气进行水冷,清理焊嘴 (2)检查乙炔和氧气的压力是否恰当 (3)使焊嘴与焊缝保持适当的距离
氧气倒流	(1)焊嘴被堵塞 (2)焊炬损坏无射吸力	(1)清理焊嘴 (2)更换或修理焊炬
回火(焊炬把手发烫)	(1)焊嘴孔道污物堵塞 (2)焊嘴孔道变大,变形 (3)焊嘴过热 (4)乙炔供应不足 (5)射吸力降低 (6)焊嘴离工件太近	(1)关闭氧气 (2)关闭乙炔 (3)水冷焊炬 (4)检查乙炔系统 (5)检查焊炬 (6)使焊嘴与焊接熔池保持适当的距离

### (3) 氧气和乙炔

#### 1) 氧气

氧气在常温常压下是一种无色、无臭、无味、无毒的气体。在  $0^{\circ}\text{C}$  和 1 个大气压<sup>①</sup>下氧气密度为  $1.43\text{kg}/\text{m}^3$ ，比空气大。氧的液化温度为  $-182.96^{\circ}\text{C}$ ，液态氧呈浅蓝色。常温时，氧则以化合物和游离态大量存在于空气和水中。

氧气本身并不能燃烧，但它是一种化学性质极为活泼的助燃气体，能与很多元素化合，生成氧化物。氧-乙炔堆焊就是利用氧和乙炔燃烧所放出的热量作为热源的。

氧气的制取方法很多，如化学法、电解水法及液化空气法等。但在工业上大量制取氧气时，都采用液化空气法。就是将空气压缩，并且冷却到  $-196^{\circ}\text{C}$  以下，使空气变成液体，然后再升高温度，当液体空气的温度上升到  $-196^{\circ}\text{C}$  时，空气中的氮则蒸发变成气体，但温度继续升高到  $-183^{\circ}\text{C}$  时，氧开始气化。再用压缩机将气体氧压缩到  $120\sim 150$  个大气压，装入专用的氧气瓶中，以便使用和储存。

由于工业用氧气通常都是采用液化空气法制取的，所以在氧气中常含有氮，焊接和切割时有氮气的存在，不但使火焰温度降低，影响生产效率，而且氮气还会与熔化的铁水化合，使之变成氮化铁，降低焊缝的强度，因此堆焊的氧气纯度越高越好。工业用氧一般分为两

① 1 个大气压 =  $101\ 325\text{Pa}$ ，下同。

级，一级纯度不低于 99.5%，二级纯度不低于 99.2%。

## 2) 乙炔

乙炔是未饱和的碳氢化合物 ( $C_2H_2$ )，在常温和 1 大气压下是无色气体。一般情况下焊接用乙炔，因含有  $H_2S$  及  $PH_3$  等杂质而有一种特殊的气味。

乙炔在纯氧中燃烧的火焰，温度可达 3 150℃ 左右，热量比较集中，是目前在焊接和切割中应用最为广泛的一种可燃性气体。

乙炔密度为  $1.17kg/m^3$ 。乙炔的沸点为  $-82.4^\circ C$ ，温度在  $-83.6^\circ C$  时成为液体，温度低于  $-85^\circ C$  时成为固体。气体乙炔可溶于水、丙酮等液体中。在  $15^\circ C$  和 1 个大气压下，1L 丙酮中能溶解 23L 乙炔，压力增大时，乙炔在丙酮中的溶解度越大。当压力增加到 1.42MPa 时，1L 丙酮中能溶解约 400L 乙炔。

乙炔属于易爆炸气体，其爆炸特性如下。

① 纯乙炔当压力达 0.15MPa，温度达  $580\sim 600^\circ C$  时，遇火就会发生爆炸，发生器和管路中乙炔的压力不得大于 0.13MPa。

② 乙炔与空气或氧气混合时，爆炸性会大大增加。乙炔与空气混合，按体积计算，乙炔占 2.2%~81% 时；乙炔与氧气混合，按体积计算，乙炔占 2.8%~93% 时，混合气体达到自燃温度（乙炔和空气混合气体的自燃温度为  $305^\circ C$ ，乙炔与氧气混合气体的自燃温度为  $300^\circ C$ ）或遇到火星时，在常压下也会发生爆炸。乙炔与氯气、次氯酸盐等化合，受日光照射或受热就会发生爆炸。乙炔与氮、一氧化碳、水蒸气混合会降低爆炸的危险性。

③ 乙炔如与铜、银等长期接触也能生成乙炔铜和乙炔银等爆炸物质。

④ 乙炔溶解在液体中，会大大降低爆炸性。

⑤ 乙炔的爆炸性与储存乙炔的容器形状和大小有关。容器直径越小，越不容易发生爆炸。乙炔储存在有毛细管状物质的容器中，即使压力增加到 2.65MPa 时也不会发生爆炸。

由于乙炔受压时容易引起爆炸，因此不能用加压直接装瓶来储存。工业上通常利用其在丙酮中溶解度大的特性，将乙炔灌装在盛有丙酮或多孔物质的容器中，通常称为溶解乙炔或瓶装乙炔。

乙炔瓶体通常被漆成白色，并漆有“乙炔”红色字样。瓶内装有浸满丙酮的多孔性填料，可使乙炔以 1.5MPa 的压力安全地储存在瓶内。使用时，必须使用乙炔减压器将乙炔压力降低到低于 0.103MPa 方可使用。多孔性填料通常用质轻而多孔的活性炭、木屑、浮石和硅藻土等合制而成。

焊接时，一般要求乙炔的纯度大于 98%，规定的灌装条件是：温度  $15^\circ C$  时，充装压力不得大于 1.55MPa。瓶装乙炔由于具有安全、方便、经济等优点，是目前大力推广应用的—种乙炔供给方法。

### 5.1.2 堆焊装置及技术参数

#### (1) 氧气及乙炔气瓶

氧气瓶是储有气体氧的一种高压容器。从制氧设备中取得的氧气，在 15MPa 的压力下压入氧气瓶内，以便运输和保存。氧气瓶外部应涂上天蓝色油漆，用黑色油漆写上“氧气”两字以作标志。氧气瓶应在使用过程中每隔 3~5 年应在充气工厂进行检验，即检查气瓶的容积、质量，查看气瓶的腐蚀和破裂程度。常用氧气瓶的尺寸和装气量见表 5.2。

由于氧气是一种助燃气体，性质极为活泼，在使用过程中，如不谨慎就有发生爆炸的危

表 5.2 常用氧气瓶的尺寸和装气量

外形尺寸/mm		内容积/L	瓶重/kg	瓶阀型号	装气量/m <sup>3</sup> (20℃, 14.7MPa 条件下)
外 径	高 度				
219	1 150±20	33	47	QF-2 铜阀	5
	1 250±20	36	53		5.5
	1 370±20	40	57		6
	1 480±20	44	60		6.5
	1 570±20	47	63		7

险，因此，在使用和运输氧气过程中，应特别注意以下几点。

① 防油。禁止戴着沾有油渍的手套去接触氧气瓶及其附属设备；运输时，绝对不能和易燃物和油类放在一起。

② 防振动。氧气瓶必须牢固放置，防止受到振动，引起氧气瓶爆炸。竖立时，应用铁箍或链条固定好；卧放时，应用垫木支撑防止滚动，瓶体上最好套上两个胶皮减振圈。运输时，应用专车进行运送。

③ 防高温。氧气瓶无论放置还是运输时，都应离开火源不少于 10m。离开热源不少于 1m。夏天，在室外阳光下工作，必须用帆布等遮盖好，以防爆炸。

④ 防冻。冬季使用氧气瓶时，如果氧气瓶开关冻结了，应用热水浸蚀的抹布盖上使其解冻。绝对禁止用火去加热解冻，以免造成爆炸事故。

⑤ 开启氧气瓶开关前，检查压紧螺帽是否拧紧。旋转手轮时，必须平稳，不能用力过猛，人应站在出氧口一侧。使用氧气时，不能把瓶内的氧气全部用完，至少剩留 1~3 个大气压的氧气。

⑥ 氧气瓶不使用时，必须将保护罩罩在瓶口上，以防损坏开关。

⑦ 修理氧气瓶开关时，应特别注意安全，防止氧气瓶爆炸。

乙炔瓶是用来存储和运输乙炔用的焊接钢瓶。乙炔瓶内的最高乙炔压力是 1.5MPa。由于乙炔是易燃、易爆的危险气体，所以在使用时必须慎重，除了遵守氧气瓶的使用要求外，还应严格遵守以下几点。

① 乙炔瓶不应遭受剧烈的振荡或撞击，以免瓶内的多孔性填料下沉而形成空洞，影响乙炔的存储。

② 乙炔瓶在工作时应直立放置，因卧放时会使丙酮流出，甚至会通过减压器而流入乙炔橡皮管和焊炬内，引起燃烧和爆炸。

③ 乙炔瓶体的表面温度不应超过 30~40℃，因为乙炔温度过高会降低丙酮对乙炔的溶解度，而使瓶内的乙炔压力急剧增高。

④ 乙炔减压器与乙炔瓶的瓶阀连接必须可靠，严禁在漏气的情况下使用，否则会形成乙炔与空气的混合气体，一旦触及明火就会造成爆炸事故。

⑤ 使用乙炔瓶时，瓶内的乙炔气严禁全部用完，根据气温必须保持一定的剩余压力，并将气瓶阀关紧防止漏气。-5~0℃时不低于 0.05MPa，0~15℃时不低于 0.098MPa，15~25℃时不低于 0.196MPa，25~35℃时不低于 0.294MPa。

## (2) 乙炔发生器

工业用乙炔主要采用乙炔发生器由水分解工业用电石得到的。制取乙炔常用的乙炔发生



器种类很多,按压力可以分为中压乙炔发生器(产生表压力为0.0069~0.0127MPa乙炔气体的乙炔发生器)和低压乙炔发生器(产生表压力低于0.0069MPa乙炔气体的乙炔发生器);按照电石与水接触方式的不同,可分为排水式、电石入水和排水联合式;按位置形式有移动式 and 固定式。中压乙炔发生器的种类及技术性能见表5.3。

表 5.3 中压乙炔发生器的种类及技术性能

型号	Q3-0.5	Q3-1	Q3-3	Q3-5	Q3-10
正常生产率/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.5	1	3	5	10
乙炔工作压力/MPa	0.045~0.1	0.045~0.1	0.045~0.1	0.1~0.12	0.045~0.1
安全阀漏气压力/MPa	0.115	0.115	0.115	0.15	0.15
防爆膜爆破压力/MPa	0.18~0.28	0.18~0.28	0.18~0.28	0.18~0.28	0.18~0.28
发气室乙炔最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	90	90	90	90	90
电石一次装入量/kg	2.4	5.0	13.0	12.5	25.5
电石允许颗粒度/mm	25×50	25×50	25×50	15×25	15×25
	50×80	50×80	50×80		25×50
发生器水容量/L	30	65	330	338	818
结构形式	排水式	排水式	排水式	联合式	联合式
安装形式	移动式	移动式	固定式	固定式	固定式
外形尺寸/mm	长	515	1 210	1 050	1 700
	宽	505	675	770	1 800
	高	930	1 150	1 755	2 180
净重(不含水和电石)/kg	45	115	260	750	980

对于质量要求高的堆焊,应采用经过净化和干燥处理的乙炔。工业用电石是由生石灰和焦炭在电炉中熔炼而成的。乙炔制备所用的电石质量等级与性能应符合表5.4中规定的要求。

表 5.4 乙炔制备用的电石质量等级与性能

指标名称			指 标			
			一级品	二级品	三级品	四级品
电石粒度/mm	80~200	发气量/ $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	305	285	265	235
	50~80		305	285	255	235
	50~80		300	280	250	230
乙炔中 $\text{PH}_3$ 含量(体积分数)/%			0.08	0.08	0.08	0.08
乙炔中 $\text{H}_2\text{S}$ 含量(体积分数)/%			0.15	0.15	0.15	0.15

目前常用的乙炔发生器主要是Q3-1型排水式中压乙炔发生器,它是由开盖手柄、发气室、发生器外壳、回火防止器和储气罐等主要部件组成,如图5.3所示。

电石装在发气室电石篮内,电石与水接触后即可产生乙炔气体。当乙炔压力增加时,发气室内的水被排挤到隔层中,使发气室内的电石与水脱离接触,并停止产生乙炔。乙炔压力降低时,隔层内的水自动回到发气室,使水与电石重新接触产生乙炔。

Q3-1型排水式中压乙炔发生器结构简单,使用方便,但是电石一次不能装入太多,装

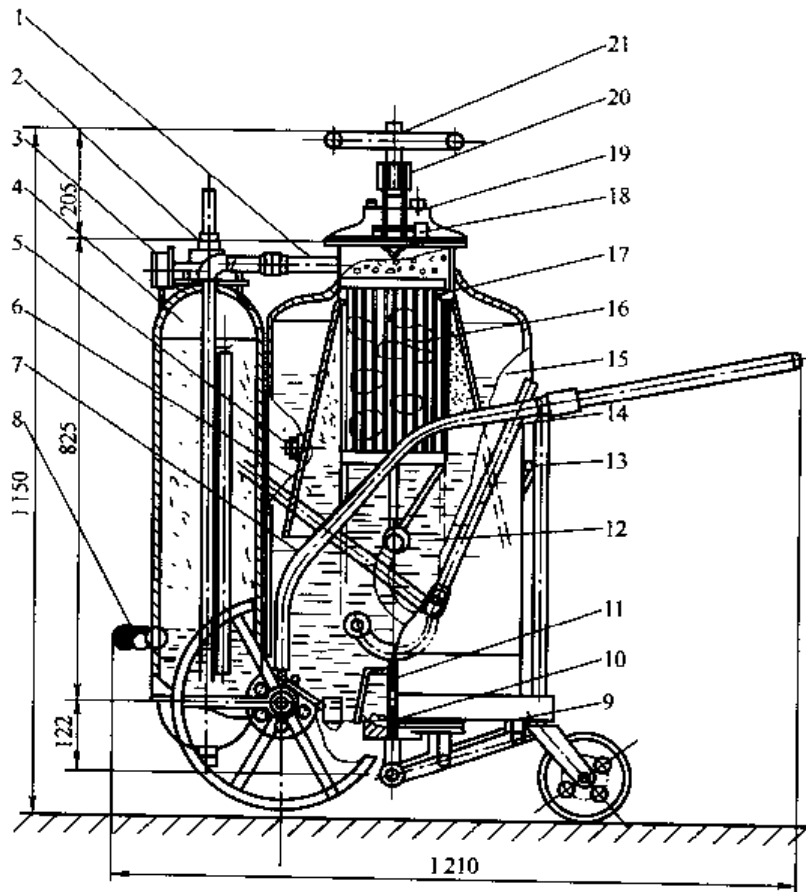


图 5.3 Q3-1 型排水式中压乙炔发生器结构

- 1—乙炔输出管；2—回火防止器；3—乙炔压力表；4—储气罐；5—溢水阀；6—定位框；7—小车；8—水位阀；  
9—出渣口；10—橡皮塞；11—出渣口轴；12—升降滑轮；13—放电石渣开关杆；14—电石篮升降调节杆；  
15—发生器外壳；16—电石篮；17—发气室；18—安全膜；19—压紧螺栓；20—压板环；21—开盖手柄

电石时需要中断生产。

### (3) 回火防止器

回火防止器是防止焊炬回火时逆燃火焰进入乙炔源（乙炔发生器、乙炔瓶或乙炔管道）引起爆炸事故的一种安全装置。

回火防止器按使用压力可分为低压（乙炔压力小于 0.01MPa）和中压（乙炔压力 0.01~0.15MPa）两种；根据阻火介质分为干式和湿式（常称水封式）两种。目前国内常用的水封式回火防止器，有低压开式和中压闭式两种类型；常用的干式回火防止器主要有中压防爆膜式和中压冶金片式等类型。

图 5.4 所示为闭式中压水封回火防止器的一种。常与中压乙炔发生器配合使用，封闭介质为水。其工作原理是，正常工作时，乙炔由进气管 1 进入回火防止器，靠乙炔压力顶开止回阀 2，乙炔气体通过水封和滤清器后从出口阀 11 导至乙

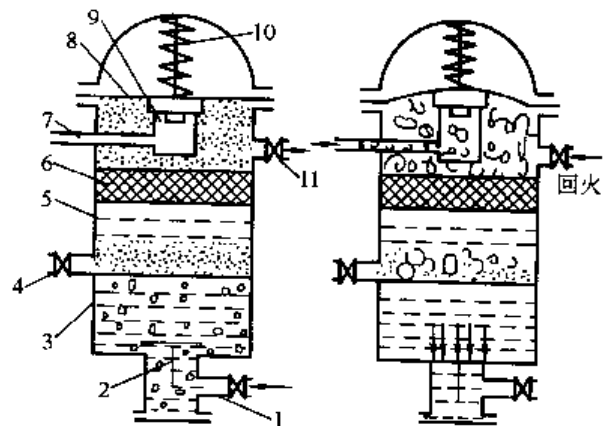


图 5.4 中压水封式回火防止器

- 1—进气管；2—止回阀；3—桶体；4—水位阀；  
5—分配盘；6—滤清器；7—排气口；8—弹簧片；9—排气活门；10—弹簧；11—出口阀

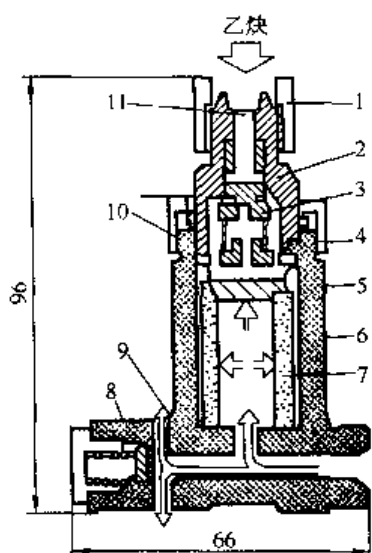


图 5.5 HF-1 型干式回火防止器结构  
1—连接螺母；2—回火防止器体；3—止回  
阀；4—螺母；5—压圈；6—本体；7—止  
火管；8 安全阀；9—安全阀泄气孔；  
10—O 形圈；11—过滤网

炔胶管进入焊炬。当发生回火时，燃烧气体使回火防止器内压力增加，关闭止回阀 2，同时顶开弹簧片 8，燃烧气体经排气活门 9 由排气口 7 排出，防止燃烧气体回流。

水封式回火防止器应垂直安放；每天检查，更换清水，确保水位准确；冬天使用时应加入少量食盐防冻，若发现水冻结，允许用热水或蒸汽解冻，严禁用明火加温解冻。

HF-1 型干式回火防止器结构见图 5.5。正常工作时，乙炔由气瓶流出进入回火防止器。乙炔气通过过滤网 11、止回阀 3、多微孔止火管 7 流入回火防止器内，然后排出体外进入焊枪。

当发生回火爆炸时，爆炸冲击波顶开回火止回阀 3，使燃烧的乙炔不能倒流，而使安全阀 8 动作，气流从泄气口 9 排出，火焰在止火管内熄灭。火焰熄灭后，由于乙炔瓶有压力，保证了乙炔继续供气，而不必人工启动回火防止器。过滤网 11 可防止污物、异物进入回火防止器内。

干式回火防止器的主要技术参数见表 5.5。

表 5.5 干式回火防止器的主要技术参数

型 号	进气压力/kPa	输出压力/kPa	通气流量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	外形尺寸/mm	质 量/kg	
HF 系列	HF-W1	—	10~150	0.3~4.5	φ22×116	0.11
	HF-P1	10~150	9.8~147	0.4~6.0	φ31.2×93	0.25
	HF-P2	10~150	9.8~147	0.4~6.0	φ25.2×73	0.15
	HF-G1	10~150	<147	0.95~4.7	φ42×98	0.43
XZ 系列	I	120	—	5	—	—
	II			3		
	III			6		
	IV			20		
	V			8		
	VI			80		
ZH-4 型	5	—	—	1	φ38×112	0.5
	10	—	—	1.2		
	20	—	—	2		
	30	—	—	2.5		
	40	30	—	1.4		
	50	30	—	2.5		
	60	30	—	4		
	80	40	—	5		
	100	55	—	6		
	120	70	—	7		
150	85	—	9			

#### (4) 减压器

减压器可将气体从高压降到工作需要的压力，并可以表示瓶内气体及减压后气体的压力。减压器的种类很多，氧-乙炔火焰堆焊常用减压器的技术参数见表 5.6。减压器常见故障及防止措施见表 5.7。

表 5.6 氧-乙炔火焰堆焊常用减压器的技术参数

减压器型号		QD1	QD-2A	QD-2A	DJ-6	SJ7-10	QD-20
名称		单级氧气减压器				双级氧气减压器	单级乙炔减压器
压力表规格/MPa	高压表	0~24.5	0~24.5	0~24.5	0~24.5	0~24.5	0~24.5
	低压表	0~3.92	0~1.568	0~0.392	0~3.92	0~3.92	0~0.245
最高工作压力/MPa	进气侧	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	1.96
	工作侧	2.45	0.98	0.196	1.96	1.96	0.147
工作压力调节范围/MPa		0.1~2.45	0.1~0.98	0.01~0.2	0.1~2.0	0.1~1.96	0.01~0.05
最大供气能力/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>		80	40	12	180	—	9
出气口径/mm		6	5	3	—	5	4
安全阀泄气压力/MPa		2.8~3.8	1.1~1.6		2.16	2.16	0.2~0.3
质量/kg		4	2	2	2	3	2
外形尺寸/mm		200×200×210	165×170×160	165×170×160	170×200×142	200×170×220	170×185×315

表 5.7 减压器常见故障及防止措施

常见故障	故障部位及原因	防止措施及修理
减压器漏气	减压器连接部分漏气，螺纹配合松动或垫圈损坏	拧紧螺钉；更新垫圈或加石棉绳
	安全阀漏气，活门垫料损坏或弹簧变形	调整弹簧；更换新活门垫料（青钢纸和石棉绳）
	减压器上盖薄膜损坏或拧不紧，造成漏气	更换橡胶薄膜或拧紧螺钉
减压表针爬高（自流），调节螺钉松开后，气体流出（低压表针继续上升）	活门或门座上有污物，活门密封垫或活门座不平；回动弹簧损坏，压紧力不足	将活门污物去净，将活门不平处用细纱布磨平，如有裂纹，更换新的，调整弹簧长度
氧气瓶阀打开时，高压表表针指示有氧，但低压表不动作或动作不灵敏	调节螺钉已拧到底，但工作压力不升或升得很少，其原因是主弹簧损坏或传动杆弯曲	拆开减压器盖，更换主弹簧和传动杆
	工作时氧气压力下降，或表针有剧烈跳动，原因为减压器内部冻结	用热水加热解冻后，把水分吹干
	低压表已指示工作压力，但使用时突然下降，原因是氧气瓶阀门没有完全打开	进一步打开氧气阀门

#### (5) 焊炬

焊炬用来使可燃气体与氧气混合，产生适合火焰堆焊要求的、燃烧稳定的火焰。目前我国应用最广的是射吸式焊炬和等压式焊炬。射吸式焊炬的结构如图 5.6 所示，其规格和性能见表 5.8。

射吸式焊炬主要靠喷射器（即喷嘴和射吸管）的射吸作用来调节氧气化和乙炔的流量，保证乙炔与氧的混合气体具有固定的成分，使火焰稳定燃烧。在这种焊炬中，不论使用低压乙炔或中压乙炔，都能保证焊炬的正常工作。

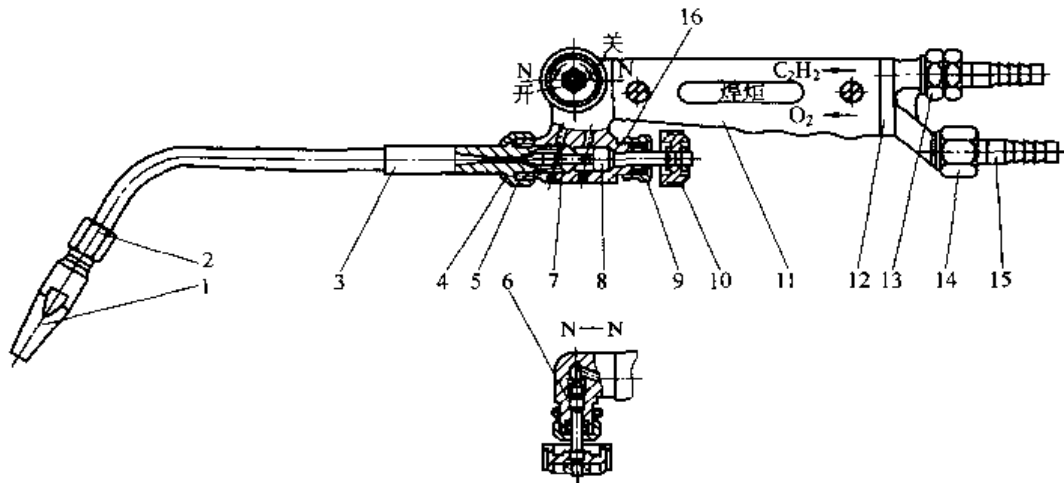


图 5.6 射吸式焊炬的结构

1—焊嘴；2—焊嘴接头；3—射吸管；4—射吸管螺母；5—中部主体；6—乙炔阀杆；  
7—喷嘴；8—氧气阀杆；9—密封螺母；10—氧气乙炔手枪；11—手柄；12—后部  
接件；13—乙炔螺母；14—氧气螺母；15—氧气乙炔接头；16—防松螺母

表 5.8 射吸式焊炬规格和性能

型 号	焊接低碳钢厚 度/mm	氧气压力 /MPa	乙炔压力 /MPa	可换焊 嘴个数	焊嘴孔径范 围/mm	气体消耗量	
						氧/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	乙炔/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
H01-2	0.5~2	0.1~0.25	0.001~0.12	5	0.5~0.9	0.033~0.15	40~170
H01-6	2~6	0.2~0.4			0.9~1.3	0.15~0.37	170~430
H01-12	6~12	0.4~0.7			1.4~2.2	0.37~1.1	430~1 210
H01-20	12~20	0.6~0.8			2.4~3.2	1.25~2.25	1 500~2 600

等压式焊炬中，乙炔与氧气的压力相等或接近相等。乙炔依靠自己的压力便能与氧混合，产生稳定的火焰。

等压式焊炬结构简单，只要进入焊炬的气体压力不变，混合气体的成分也将不变，更好的保证了火焰的稳定。由于乙炔压力高，回火的可能性比射吸式焊炬小。图 5.7 所示为等压式焊炬的结构简图。其规格和性能见表 5.9，等压式焊炬必须使用中压或高压乙炔。

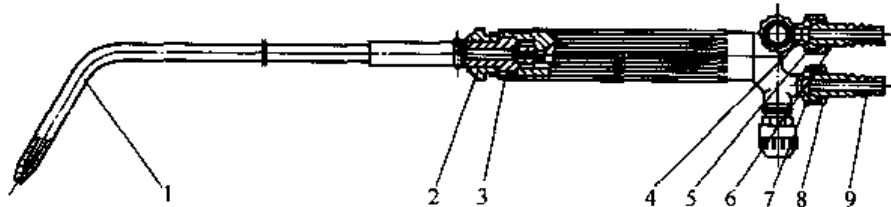


图 5.7 等压式焊炬的结构

1—焊嘴；2—混合管螺母；3—混合管接头；4—氧气接头螺母；5—氧气螺母；  
6—氧气软管接头；7—乙炔接头螺母；8—乙炔螺母；9—乙炔软管接头

焊炬在使用过程中，经常出现的故障是漏气以及焊嘴和气路被堵塞。当出现漏气和堵塞时，会使焊炬射吸能力降低，火焰不能正常调节甚至熄灭或接头处冒小火苗，严重时“叭叭”响。造成漏气的原因，主要是连接螺母松动、气阀密封垫损坏、阀杆与阀座配合不平等。螺母松动主要出现于焊炬与焊嘴接头、射吸管与主体、气阀的密封螺母以及橡皮管接头

表 5.9 等压式焊炬的规格和性能

焊炬型号	焊嘴号码	焊嘴孔径/mm	氧气工作压力 /MPa	乙炔工作压力 /MPa	焰心长度(不小于)/mm	焊炬总长度 /mm
H02-12	1	0.6	0.2	0.02	4	500
	2	1.0	0.25	0.03	11	
	3	1.4	0.3	0.04	13	
	4	1.8	0.35	0.05	17	
	5	2.2	0.4	0.06	20	
HS02-20	1	0.6	0.2	0.02	4	600
	2	1.0	0.25	0.03	11	
	3	1.4	0.3	0.04	13	
	4	1.8	0.35	0.05	17	
	5	2.2	0.4	0.06	20	
	6	2.6	0.5	0.07	21	
	7	3.0	0.6	0.08	21	

等处。对此，只需将螺母拧紧即可。

(6) 橡胶管及快速接头

氧气瓶和乙炔发生器中的气体必须采用橡胶管输送到焊炬中。根据焊接与切割安全标准(GB 9448—1999)的规定，氧气管为黑色，乙炔管为红色。但目前较普遍采用的仍是原化工部标准关于棉线纺织胶管的规定，氧气管为红色，乙炔管为黑色。通常氧气胶管用内径8mm，乙炔胶管用内径10mm。输送氧、乙炔用橡胶管的规格见表5.10。

表 5.10 输送氧、乙炔用橡胶管的规格

名称	内 径/mm		胶层厚度(小于)/mm		工作压力 /MPa	长度及允许公差
	公称尺寸	容许公差	内胶层	外胶层		
氧气胶管	6	±0.3	1.5	1.2	1.5	用户提出，经供方同意后确定长度允许公差为全长的±1%
	8	±0.5				
	10	±0.5				
	13	±0.8				
乙炔胶管	6	±0.3	1.3	1.2	1.3	
	8	±0.5				
	10	±0.5				

胶管快速接头以接插方式接上、卸下氧气和乙炔胶管，可以节省以往用螺母拧紧的时间。JYJ型氧气胶管快速接头的结构简图见图5.8。JRJ型乙炔胶管快速接头的结构简图见图5.9。

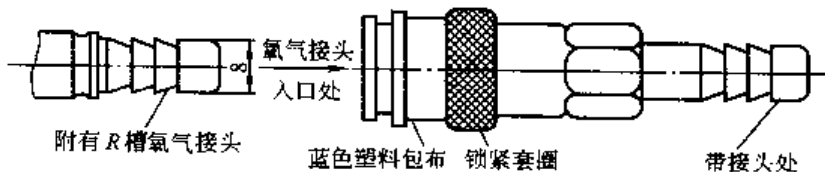


图 5.8 JYJ型氧气胶管快速接头的结构简图

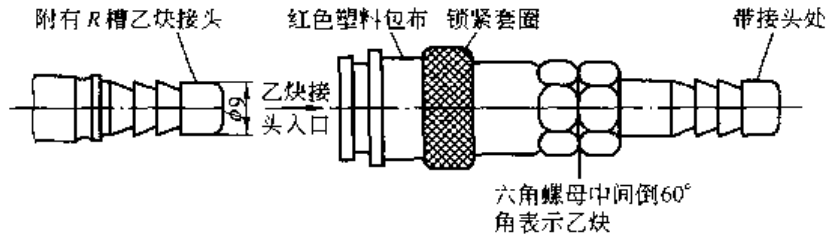


图 5.9 JRJ 型乙炔胶管快速接头的结构简图

氧气胶管快速接头外表锁紧套圈处绕有天蓝色塑料包布，或者六角螺母中间不开槽，与焊炬氧气进口处螺母一致。乙炔胶管快速接头外表锁紧套圈处绕有红色塑料包布，或者六角螺母中间开有  $60^\circ$  倒角的凹槽，与焊炬乙炔进口处的连接螺母一致。

## 5.2 氧-乙炔火焰堆焊工艺

氧-乙炔火焰堆焊工艺包括焊前零件表面的清理、焊前预热、焊后缓冷、操作方法、焊接工艺参数的选择、焊接缺陷及变形的防止等。

### 5.2.1 堆焊前的准备

#### (1) 堆焊用材料

氧-乙炔火焰堆焊一般采用实芯焊丝，如硬质合金堆焊焊丝可按表 3.18 进行选择；铜及铜合金焊丝按表 5.11 进行选择。

表 5.11 铜及铜合金焊丝

牌 号	名 称	主要化学成分/%	熔点/ $^\circ\text{C}$
HS201	特制紫铜焊丝	Sn 1.1, Si 0.4, Mn 0.4, 余为 Cu	1 050
HS202	低磷铜焊丝	P 0.3, 余为 Cu	1 660
HS220	锡黄铜焊丝	Cu 59, Sn 1, 余为 Zn	886
HS222	铁黄铜焊丝	Cu 58, Sn 0.9, Si 0.1, Fe 0.8, 余为 Zn	860
HS224	硅黄铜焊丝	Cu 62, Si 0.5, 余为 Zn	905

堆焊熔剂是用氧-乙炔火焰进行堆焊时的助熔剂，目的在于去除堆焊过程形成的氧化物，改善润湿性能，促使焊件表面获得致密的堆焊层组织。堆焊熔剂的选择见表 5.12。

表 5.12 堆焊熔剂的选择

牌 号	名 称	用 途
CJ101	不锈钢及耐热钢堆焊熔剂	不锈钢及耐热钢堆焊
CJ201	铸铁堆焊熔剂	铸铁件的堆焊
CJ301	铜堆焊熔剂	铜及铜合金的堆焊

#### (2) 焊前工件准备

为保证焊缝质量，堆焊前应把焊丝及焊件表面的氧化物、铁锈、油污等脏物去除干净，以免堆焊层产生夹渣、气孔等缺陷。

如需要堆焊表面出现磨损或腐蚀沟槽时，应采用机加工法进行消除。机械加工切除的厚度超过堆焊层厚度时，要先用与基体金属相同的材料堆焊打底层。

为防止堆焊合金或基体金属堆焊时产生裂纹和减小变形，工件焊前需要进行预热，具体

的预热温度根据被焊基体的材料及工件的大小而定。

### 5.2.2 堆焊工艺参数

氧-乙炔堆焊工艺参数主要包括：火焰的性质、焊丝直径的选择、火焰能率、焊接速度以及焊嘴与工件间的倾斜角度的选择等。合理选择氧-乙炔堆焊工艺参数是保证堆焊质量的重要条件。

选择堆焊工艺时，首先依据的是被焊材料的种类以及厚度。对于被焊材料的种类，应考虑该种材料的性质，例如熔点、导热性氧化物性质等。对某些熔点较高、导热性较好的材料，在选择堆焊工艺参数时，应考虑到各种工艺参数的确定应尽可能保证焊件表面具有较高的热量。

堆焊工艺的选择还应考虑到操作人员的熟练程度。对技术水平较高的操作者来说，在选择工艺参数时，可以使焊件表面受热量大一些，这样能加快焊接速度，提高生产率；而对于技术水平较低的操作者来说，应选择较小热量的工艺参数，以便操作者掌握，从而保证得到较满意的焊接质量。

#### (1) 焊丝直径

氧-乙炔堆焊时，焊丝直径的选择主要依据焊件的厚度以及堆焊面积选择。如果焊丝过细，则焊丝熔化太快，熔滴滴到焊缝上，容易造成熔合不良和表面焊层高低不平，降低焊缝质量；如果焊丝过粗，焊丝的加热时间就会增加而使热影响区增大，容易造成过热组织，降低堆焊层的质量。焊丝过粗还可能使焊缝产生未焊透现象。

#### (2) 火焰能率

火焰能率是以每小时混合气体的消耗量来表示的，单位是升/小时。火焰能率的大小主要是根据被堆焊件的厚度、金属材料的性质（如熔点、导热性能等）以及焊件的空间位置来选择。

堆焊较厚的焊件时，火焰能率应选择大一些。相反，在堆焊薄件时，为了避免焊件被烧穿以及堆焊层组织过热，火焰能率应选小一些。堆焊熔点较高且导热性好的金属材料（如紫铜等）时，要选用较大的火焰能率；堆焊熔点较低且导热性较差的金属（如铅等），则要选用较小的火焰能率。

火焰能率是由焊炬型号和焊嘴号码的大小来决定的。焊嘴孔径越大，火焰能率也越大；相反，焊嘴孔径越小，火焰能率也越小。

在堆焊过程中，焊件所需要的热量实际上是随时变化的。如刚开始堆焊时，整个焊件是冷的，需要热量大一些。堆焊过程中，焊件本身的温度升高，需要的热量也就相应地减少，此时可采用调小火焰的办法或其他办法（如调整焊嘴和焊件的倾斜角度以及焊嘴和焊件的距离等）来达到调整热量的目的。

#### (3) 堆焊速度

堆焊速度直接影响到生产率的高低和产品质量的好坏。因此，必须根据不同的产品来正确选择堆焊速度。通常情况下，对厚度大、熔点较高的焊件，堆焊速度要慢些，以免产生未熔合等缺陷；对厚度较薄、熔点低的焊件，堆焊速度要快一些，以免焊件产生烧穿、过热等缺陷，降低产品质量。

除了考虑到上述因素以外，还要根据操作者的技术水平、堆焊层的位置以及其他具体条件来选择。在保证堆焊质量的前提下，应尽量加快堆焊速度，来提高堆焊生产率，缩小热影响区，避免过热、过烧、产生大的变形。



#### (4) 焊嘴的倾斜角度

焊嘴的倾斜角度是指焊嘴与焊件间的夹角，如图 5.10 所示。

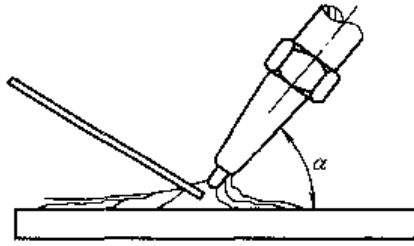


图 5.10 焊嘴的倾斜角度示意

焊嘴倾角的大小，要根据焊件的厚度、焊嘴大小和金属材料的熔点和导热性、空间位置等因素来决定。焊嘴倾斜角度大，则火焰集中，热量损失较小，焊件得到的热量多，升温就快。焊嘴倾斜角小，火焰分散，热量损失较大，焊件得到的热量升温就慢。

堆焊厚度较大、熔点较高、导热性较好的焊件时，倾斜角度应大一些，如堆焊导热性较好的紫铜时，焊嘴倾斜角为  $60^\circ$  或  $80^\circ$ ；堆焊厚度较小、熔点较低、导热性较差的焊件时，倾斜角度要相应地减小。实际焊接过程中，焊嘴倾斜角度并非是不变的，而是应根据情况随时调整。

### 5.3 氧-乙炔火焰堆焊应用实例

#### 5.3.1 钴基合金的氧-乙炔堆焊

钴基硬质合金堆焊可采用氧-乙炔火焰、气电焊等方法。其中氧-乙炔火焰堆焊比电弧堆焊更适于硬质合金，它的熔深浅，母材熔化量少，而且堆焊合金的硬度稳定，因此应用较广泛。

##### (1) 堆焊材料

氧-乙炔堆焊用的钴基硬质合金是铸造成直径为  $4\sim 7\text{mm}$ 、长  $350\sim 400\text{mm}$  的圆形棒条，也有长为  $700\sim 800\text{mm}$  的加长焊丝。钴基硬质合金堆焊焊丝有 HS111、HS112 等，其化学成分见表 3.18。

##### (2) 焊炬

焊炬采用普通射吸式氧-乙炔焊炬。焊嘴号码可根据堆焊零件的大小和堆焊层的尺寸要求来选择。不同板厚焊炬的选择见表 5.13。

表 5.13 不同板厚焊炬的选择

焊件厚度/mm	焊炬型号	焊嘴孔径/mm	氧气压力/MPa	乙炔压力/MPa
5~10	H01-12	1.4~2.2	0.4~0.7	0~0.12
10~20	H01-20	2.2~3.0	0.6~0.8	0~0.12

堆焊用的乙炔发生器（中压乙炔发生器）应单独使用，以保持火焰的稳定。为保持乙炔干燥，可配置乙炔干燥器或采用瓶装乙炔。

##### (3) 火焰的调整

堆焊时应该采用“3倍乙炔过剩焰”，如图 5.11 所示。这种“3倍乙炔过剩焰”属于碳化焰，其温度较低，对堆焊金属和工件加热较缓和，火焰保护气氛良好，所以堆焊合金中的碳及其他合金元素的烧损最少。

对不锈钢零件的堆焊，宜采用“2~2.5倍乙炔过剩焰”，其目的是防止不锈钢基体因火焰渗碳而引

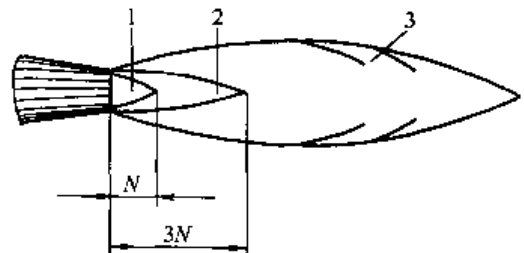


图 5.11 “3倍乙炔过剩焰”示意

1—焰心；2—内焰；3—外焰

起抗腐蚀性能降低。若为提高堆焊层硬度，可用“3.5~4倍乙炔过剩焰”堆焊。但是乙炔过剩焰中含碳量越多，堆焊合金硬度的不均匀性和焊层的不平整性都将增大。

堆焊过程中的反射热和零件的辐射热会使焊嘴变热，溅到焊嘴上的熔融金属飞溅以及焊嘴过于接近堆焊金属，都会增加火焰燃烧的外部阻力，使火焰燃烧不稳定，从而引起堆焊质量不稳定。为此，堆焊过程中必须随时注意调整火焰比例，必要时可把焊嘴浸入水中进行冷却。

#### (4) 焊前工件的准备

工件表面的铁、油污、毛刺等都应仔细清除。工件表面不得有裂纹、砂眼等缺陷。

如果是修复密封件表面时，应把磨损的沟槽全部用机械加工消除。机械加工切除的厚度超过堆焊层厚度时，要先用与基体金属相同的材料堆焊打底层。

堆焊前，为防止堆焊合金或基体金属产生裂纹和减小变形，零件需要进行预热。堆焊过程中要尽量使工件保持均一的温度，并且焊后要采取缓冷措施。对不同材料焊前预热和焊后缓冷的条件下可参考表 5.14。

表 5.14 不同材料焊前预热和焊后缓冷条件

基体材料	预热温度/℃	焊后热处理
普通低碳钢小件	不预热	空冷
普通低碳钢大件、低合金钢小件	350~450	置于干砂或石棉灰中冷却
低碳钢大件	500~600	焊后在 600℃ 炉中保温 30min 后炉冷
Cr18Ni9 类不锈钢	350~450	焊后 860℃ 炉中保温 4h，以 40℃/h 的速度冷却到 700℃ 后，再以 20℃/h 的速度炉冷或在石棉灰中缓冷
Cr13 类不锈钢	600~650	焊后放于 800~850℃ 炉中，每 25mm 厚保温 1h 后，以 40℃/h 的速度炉冷

#### (5) 堆焊过程

钴基硬质合金氧-乙炔堆焊时，堆焊基体金属表而不应完全熔化成熔池，而只需加热到基体金属呈现“出汗”状态便立即进行堆焊。为此应注意将火焰调为碳化焰，且火焰焰心尖端与堆焊面的距离保持在约 3mm，直至堆焊表面出现润湿，也就是熔化极薄的一层（厚度在 0.1mm 以下）。这样才能使母材金属混入堆焊合金中的比例最少，保证堆焊层的性能不致下降。

钴基硬质合金氧-乙炔堆焊一般采用左焊法。堆焊过程及注意事项如下。

① 当工件表面加热至略呈“出汗”状态的瞬间，将焊嘴微微抬高，使焰心与堆焊面的距离稍微拉开，此时将处在内焰外围的合金棒端部接近焰心尖部（合金棒与堆焊表面成 25° 左右的夹角，棒端与焰心尖端的距离为 2mm），并使熔融的合金熔滴滴到已呈现“出汗”状态的堆焊表面上，同时使之均匀扩展开。如果这时熔滴不扩展开，说明堆焊表面加热不足，应重新加热至呈“出汗”状态；反之，若加热过度使堆焊表面成为熔融状态，则基体金属与堆焊合金将互相混合，从而削弱堆焊合金的性能。

堆焊开始后须用火焰使最初的一滴熔滴滴在“出汗”状态面上展开，而且保持火焰的焰心尖端距离基体平而为 1.5~2.5mm。勿使焊嘴前后晃动，而应与熔池保持相对固定的位置。熔池中堆焊金属的轻微翻滚可使杂质上浮。

当合金熔滴完全分布到“出汗”状态的表面时，将火焰向前移动一定距离，其目的是将

内焰的一部分对着熔池，仍保持其熔化状态，而将内焰的另一部分移到与熔池相邻的新的堆焊表面上加热，使其呈现“出汗”状态。与此同时，合金棒上应形成熔融的合金熔滴，在新的堆焊表面变成“出汗”状态之初离开合金棒，并覆盖在紧接着的新的“出汗”表面上。此时火焰稍向后移动一个距离，待熔滴完全扩展开后，再将火焰向前移动一段距离。然后按以上堆焊顺序周期地重复全部操作，如图 5.12 所示。

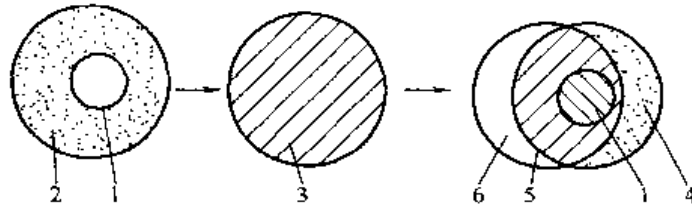


图 5.12 堆焊顺序示意

1—熔滴；2—基体“出汗”状态面；3—扩展到整个“出汗”状态面的熔滴；  
4—新的“出汗”状态面；5—熔化状态的合金；6—堆焊金属

堆焊过程中，焊炬除了按上述作阶梯式的向前移动外，还需缓慢地沿堆焊面作横向摆动，使液态合金均匀铺展，保证焊道平整光滑。每层焊道需保证获得 2~3mm 的堆焊层，要求一次连续堆焊好。如果希望得到更厚的堆焊层时，可以连续堆焊 2~3 层。堆焊完成后，根据需要可以重熔堆焊层，以保证焊层质量，减少堆焊层中的缺陷。

② 堆焊过程中，合金焊丝的熔化端头和熔池以及准备滴入熔滴的工件表面，必须经常处于还原焰的保护中，使这些表面与空气隔绝，不得将火焰急速地从熔池表面移去。若误将合金棒放入火焰焰心中熔化，或使火焰焰心与熔池接触，都会导致堆焊合金过多地渗碳。

③ 堆焊结束时，应使接头重叠 15~20mm，重叠处可少加或不加堆焊材料。结束时需将焊炬继续前移 40~50mm，然后焊嘴逐渐抬起，火焰逐渐离开熔池，使熔池逐渐缩小。这样，接头处的冷却速度就较缓慢，不致发生接头疏松、缩孔、龟裂等缺陷。

④ 堆焊较厚大工件时，可用特大号焊炬补充加热，以保持工件温度的均匀性，减少温差。而堆焊较小零件时，为避免薄壁基体过热和边缘熔化，可把零件放在紫铜导热垫板上进行堆焊。

⑤ 对于熔点较低、流动性较好的钴基硬质合金，堆焊时需把零件堆焊表面水平放置，否则合金就会向下坡处流动，使堆焊层厚度不均。

⑥ 堆焊后的工件应放入炉内进行缓冷，较小件可空冷或在石棉灰中保温冷却，其具体冷却条件见表 5.14。

#### (6) 堆焊缺陷及防止措施

##### 1) 翻泡和气孔

基体金属过热，堆焊表面局部温度过高，堆焊层混入过多的基体金属，火焰比例变动，火焰晃动，保护气氛不良及基体表面准备工作不完善等因素都会引起翻泡和气孔。堆焊过程中应随时调整火焰注意保持“3 倍乙炔过剩焰”，并正确掌握火焰对堆焊表面的加热程度。

钴基硬质合金棒中的氧、氮、氢等气体含量过高，也是形成堆焊层翻泡和气孔的原因。所以必须保证合金棒的质量。在堆焊前，对合金棒进行 800℃ 保温 2h 的脱氢处理，可以有效保证合金棒的质量。基体金属含钛时，堆焊层中也极易出现翻泡现象。采取的措施一般是先堆焊过渡层（采用堆焊性能较好的合金作为过渡层材料），然后再在过渡层上堆焊钴基硬

质合金。

如果堆焊层中出现翻泡和气孔，可待全部堆焊完后，用“3倍乙炔过剩焰”将翻泡处堆焊金属熔化后并用焊丝将其去除，再用同样的火焰把熔化去除处重熔一次并焊补完整。

#### 2) 夹渣

夹渣主要来源于基体金属与合金焊丝发生冶金反应的产物以及合金焊丝中的夹杂物。堆焊时要注意火焰对熔池的浮渣操作。堆焊第二层时，第一层表面的焊渣必须去除干净，或使其全部浮起，否则容易造成夹渣。此外，待焊工件表面焊前也应严格地进行清理。

#### 3) 疏松

疏松是由于火焰离开熔池太快，使熔池金属急剧冷却凝固造成的。为此，特别是接头处应认真地按工艺规程收口，同时再更换合金焊丝时应使火焰始终对准熔池，以保持熔池温度并免受外界空气的侵袭。

如堆焊层出现疏松，则会使堆焊金属的抗腐蚀性能显著下降，影响工件表面的使用性能与寿命。

#### 4) 裂纹

堆焊前预热温度低，堆焊过程温度控制不良（温度下降过快）和堆焊后急速冷却，都易使堆焊层出现裂纹。若接头处收口过急，或火焰突然从堆焊熔池表面离开，往往会产生龟裂。因此，焊前预热与焊后缓冷是钴基硬质合金氧-乙炔火焰堆焊的一个重要特点。此外，在未经退火的淬火零件上堆焊也容易产生裂纹。

避免堆焊层出现裂纹的措施是：堆焊必须不间断地进行，如果在不得已的情况下需要中断堆焊时，应将焊件放在炉中保温，重新堆焊时，要用火焰把堆焊层末尾处熔化15~20mm后再开始堆焊；若需要较长时间的中断，则需要将焊件按焊后缓冷处理，重新堆焊前要重新预热工件。任何情况下，中断堆焊时都不能将火焰很快地从熔池表面离开，而应当将火焰缓慢地、按螺旋式地向上移动。

如果堆焊层的裂纹已经扩展到基体金属中，需要用砂轮将裂纹彻底清除（或用其他机械加工方法去除），再按规定工艺预热、焊补和缓冷。若裂纹未扩展到基体金属，则可将零件重新预热并沿堆焊层的整个厚度（直到基体金属表面）用火焰仔细地将其重新熔透以消除裂纹。

#### 5) 硬度不均匀

堆焊时，当使用大直径的合金焊丝、采用不适当的焊嘴或操作不当时，由于堆焊层厚度不均匀可能引起硬度的不均匀。堆焊层过硬的区域通常是由于渗碳，也就是操作者将氧-乙炔焰的焰心侵入熔化的堆焊层或者是内焰与焰心的长度比大于3:1所造成的。堆焊层硬度较低的区域通常是由于基体金属混入堆焊层的结果。

避免堆焊层硬度不均的措施是：堆焊时火焰比例要保持稳定，最好单独使用乙炔发生器或采用瓶装乙炔，而且操作者的技术要熟练，才能得到组织和硬度均匀的堆焊层。

### 5.3.2 镍基合金的氧-乙炔堆焊

#### (1) 对焊丝和基体的要求

焊丝制成直径4~6mm、长300~350mm的铸棒，外表磨光。焊丝应存放在洁净处，不准有脏物、杂质等。

采用镍基合金焊丝堆焊的基材料有25、35、45等碳素钢，12CrMo、15CrMo、12Cr1MoV、15Cr1MoV等低合金结构钢，1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、

Cr18Ni12Mo2Ti、Cr17Ni2 等不锈钢。

(2) 焊前准备

1) 基体及焊丝的焊前准备

碳素钢基体应进行正火或退火处理。奥氏体不锈钢基体应进行固溶处理。铬钼钢和马氏体不锈钢应进行调质处理。所有淬火的工件应先退火后才能进行堆焊。

工件表面的锈迹、油污、毛刺等应仔细清除。堆焊前应用丙酮或酒精将坡口及附近工件表面清洗干净。

如果是修复堆焊层，应把镀层或磨损的沟槽、痕迹及材料疲劳层全部用机械加工法去除。

2) 坡口形状

待焊工件表面应用机械切削方法加工坡口。根据不同的构件要求开有不同形状的坡口。对于阀门密封面，坡口可以是凹槽，凹角，也可以是凸台，但是过渡处应为圆角平缓过渡，坡口加工粗糙度  $R_a$  为  $12.5\mu\text{m}$ 。

3) 焊炬及火焰

根据堆焊工件的大小和堆焊层厚度要求，选择合适的焊炬型号和焊嘴号码。与钴基硬质合金堆焊不同，镍基硬质合金堆焊时应采用能率较大的火焰（使用较大的焊嘴）进行快速堆焊，以减少堆焊金属在高温时的停留时间。

堆焊镍基硬质合金宜采用轻微碳化焰，即“小于2倍乙炔过剩焰”（内焰长度不超过焰心长度的2倍）。轻微的碳化焰能使堆焊工件表面在火焰加热过程中渗碳，从而降低了熔点，工件表面易出现“出汗”状态（工件表面极薄的一层被熔化），使堆焊合金在工件表面能自由摊开而不发生凝聚现象。然而过量碳化的火焰温度较低，过剩的乙炔分解为碳和氢，其中氢进入熔池将导致气孔缺陷，不适于镍基硬质合金堆焊。

4) 焊前预热

与钴基合金堆焊相同，为防止裂纹，减少应力与变形，提高堆焊效率，堆焊镍基合金需要适当预热。预热温度根据基体化学成分而定，常用材料的预热温度见表 5.15。预热时间根据工件大小及形状而定，结构刚性大的工件预热温度取上限。

表 5.15 基体材料预热及焊后处理温度

基 体		预热温度/℃	焊后热处理温度/℃
低碳钢	25 号钢	400~450 小零件可不预热	600~650 小零件在石棉中冷却 或砂冷
	35 号钢		
	45 号钢		
铬钼钢	12CrMo, 15CrMo	450~500	680~720
	12Cr1MoV	450~550	720~760
	15Cr1Mo1V		720
马氏体不锈钢	1Cr13, 2Cr13	450~550	700~750
奥氏体不锈钢	1Cr18Ni9, 1Cr18Ni9Ti	300~350	850~880

预热可以使用气焊火焰、电炉或其他电加热设备进行。用火焰加热时，火焰不要直接对准待焊表面，而应保持 10mm 左右距离，或者从侧面加热。小件批量堆焊时用电炉预热较好。预热保温时间不得过长，尽量减少表面氧化。

堆焊过程中必须保持预热温度，若工件温度低于预热温度下限时，应采用辅助加热措施或层间再次进炉加热。

### (3) 堆焊过程

氧-乙炔堆焊镍基合金的方法与钴基合金堆焊基本相同，所不同的是镍基合金对气孔更为敏感。

镍基合金的导热性差，容易过热，所以堆焊时高温停留时间不得过长。为此，堆焊速度不能太慢，火焰能率不能太小，焊炬在某一位置加热停留的时间要短，否则堆焊金属过热，熔融金属出现翻泡，堆焊层晶粒粗大，出现气孔等焊接缺陷。如果必须加热熔融金属时，应使焊炬内焰逐渐接近和离开熔池，使熔池冷却，但外焰仍要对熔池起保护作用。

### (4) 焊后热处理

堆焊后的零件应立即转入炉中按表 5.15 规定温度进行热处理。零件进炉时的炉温应与焊后温度相当，一般高于 300℃，升温速度和冷却速度应按式 (5.1) 计算，即

$$v=5\ 000/\delta \quad (5.1)$$

式中  $v$ ——冷却速度，℃/h；

$\delta$ ——基体厚度，mm。

保温时间  $t$  按式 (5.2) 计算，即

$$t=\delta/25 \quad (5.2)$$

式中  $\delta$ ——基体厚度，mm；

$t$ ——保温时间，h。

低碳钢小件堆焊时，焊前可不预热；堆焊后放入黄砂或石棉灰中冷却即可。

### (5) 缺陷及其补焊

镍基合金堆焊产生的缺陷主要使气孔、翻泡、裂纹、疏松、缩孔等。产生这些缺陷的原因和防止措施与钴基合金堆焊基本相同，但在补焊时应特别注意以下几点。

① 去除缺陷时不得对堆焊部位施加任何冲击力。去除缺陷较好的办法是使用砂轮磨削。应用着色探伤方法确认缺陷已经完全去除后方可进行补焊。

② 补焊时的预热温度应比表 5.15 中规定的稍高些，而火焰能率可相应地减少，而且不得对补焊处急剧加热，以防止应力变形和裂纹。

③ 对于气孔、接头疏松和缩孔缺陷，只需磨去缺陷即可，而对于裂纹缺陷，必须沿堆焊层的厚度磨到基体金属为止。

④ 同一处的缺陷补焊次数不得超过 2 次。

## 5.3.3 铜合金的氧-乙炔堆焊

### (1) 堆焊材料

铜合金的氧-乙炔堆焊主要采用 HS220、HS221、HS222 和 HS224 焊丝，母材不熔化，只是铜焊丝熔化。其中 HS222 的含硅量较高，可抑制锌的蒸发，且熔点低，堆焊时烟雾较小，堆焊操作方便。这种焊丝堆焊时，液态合金流动性较差，焊后容易在焊层中发现微小气孔，但是如果适当降低焊丝中的硅含量 (Si 0.04%)，可以获得较好的堆焊效果。

### (2) 在铸铁基体上堆焊黄铜

在铸铁基体上堆焊黄铜的工艺要点如下。

① 基体表面应加工到  $R_a 25\mu\text{m}$ ，并去除油垢和铁锈，铲掉裂纹、凹坑和尖角等。

② 堆焊前对基体预热，一般预热温度为  $400\sim 600^\circ\text{C}$ 。工件自炉中取出后，用氧化焰继续对堆焊表面加热，当加热到暗红色即  $850^\circ\text{C}$  左右时即可施焊。也可按经验判断，向堆焊部位滴一滴熔融铜钎料，观察其润湿情况，以判断是否可以堆焊。

采用氧化焰加热有利于烧掉表面游离的石墨，以提高铸铁表面的润湿性。

③ 采用略带氧化性的中性焰或中性焰进行堆焊。在充分预热后，将火焰继续在起始堆焊处加热，同时熔化焊条进行均匀堆焊。接头处必须注意熔合良好。堆焊前可在焊件表面、焊丝端头使用堆焊熔剂（CJ301、脱水硼砂等）。

④ 焊后要使工件缓慢均匀冷却。有时为减少焊后冷却所引起的应力，可在堆焊后的表面用小锤轻轻锤击，然后用石灰覆盖缓冷。

### (3) 在铸钢基体上堆焊黄铜

在铸钢基体上堆焊黄铜的工艺要点如下。

① 铸钢的堆焊表面应加工到  $R_a 12.5\mu\text{m}$ 。如果在槽内堆焊，槽的拐角处加工成圆角，槽的宽度和深度的比例应以焊炬和焊丝能自由运动和保证槽内的表面受热均匀为准。

② 焊丝表面应用砂纸打磨光，并有汽油除去油脂。采用硼砂做焊粉。硼砂应经  $650^\circ\text{C}$ 、 $10\sim 15\text{min}$  脱水处理。为保证堆焊过程连续进行，防止产生气孔，焊粉应放在长筒内。焊前用火焰将黄铜丝加热，整根浸涂上焊粉，然后放在工件旁边以备用。目前已经生产出涂有焊剂的焊丝，使用较为方便。

③ 采用能率较大的焊炬将铸钢表面用中性焰加热到  $700\sim 900^\circ\text{C}$ ，即呈樱红色时，在工件表面涂一层焊粉，然后即可开始进行堆焊。如果工件过大，可先预热至  $200\sim 300^\circ\text{C}$ ，也可用两把焊炬同时加热。

④ 在窄槽内堆焊时，未堆焊满沟槽之前，一定不要采用氧化焰而应采用中性焰。在平面上堆焊第一层时，也应当采用中性焰。否则易产生渗透裂纹。

当堆焊到靠近表面的各层时，为了防止产生气孔，应采用氧化焰。通常是调到正常焰以后再调节乙炔阀，逐渐减少乙炔量直到焰心长度缩短  $1/3$  左右即可。

⑤ 采用左焊法进行堆焊操作，堆焊过程可采用分段退焊法。火焰喷嘴与工件的夹角为  $30^\circ\sim 60^\circ$ 。焊丝在火焰内沿金属表面横向摆动。焰心距熔池表面为  $30\sim 50\text{mm}$ 。堆焊第一层用中性焰，如在平面上堆焊以后各层用氧化焰。每层堆焊之前再薄涂一层焊粉。每层的每段焊后，在红热状态（ $600\sim 800^\circ\text{C}$ ）用  $2\sim 2.5\text{kg}$  的手锤均匀迅速地锤击堆焊层。

⑥ 如果用不含硅的黄铜焊丝堆焊底层，然后用含硅的 HS222 或 HS221 堆焊其余各层，则堆焊工艺比较容易掌握且堆焊质量容易保证。这是因为不含硅的黄铜与钢基体的结合性能较好，在铜与钢的界面不易产生脱层。而采用含硅黄铜焊丝堆焊表面层，不易出现气孔，可获得致密的堆焊层。

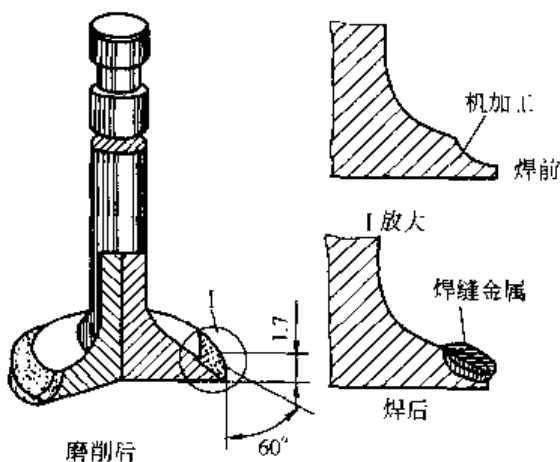


图 5.13 不锈钢阀座堆焊

### 5.3.4 不锈钢阀座的堆焊

由  $0\text{Cr}18\text{Ni}12\text{Mo}2\text{Ti}$  及  $0\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$  铬镍奥氏体不锈钢制成的阀座，是发动机上重要的零件

之一，其工作条件十分复杂苛刻。为此，要求制成阀座的材料在常温和高温下都具有足够的硬度、耐磨性和耐蚀性能。采用单一材料制成的所谓整体阀座，不可能满足上述各项性能要求。因此，在设计和维修中均规定需在阀座面（见图 5.13）上进行氧乙炔火焰堆焊。

阀座面氧-乙炔火焰堆焊工艺方法的操作要点如下。

① 堆焊焊丝选用钴基合金焊丝 HS111 或 HS112。

② 堆焊前，彻底消除母材表面的污物及焊丝表面的脏物，然后在车床上加工出需要堆焊的阀座表面，如图 5.13 所示。

③ 采用焊炬将阀座表面预热至  $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，然后在表面撒覆上一层 CJ101 堆焊熔剂。

④ 必要时先用 1Cr19Ni9Nb 焊丝堆焊过渡层。堆焊时焊丝作上下运动，一边划破熔池，一边填充焊丝，并使焊丝端头和焊接熔池均置于碳化焰的保护之中（见图 5.14）。焊接速度要快些，以使过渡层应尽量薄。过渡层堆好后，用火焰重熔一遍，若发现存在气孔，可适当加大氧气流量重熔，待气孔消除后，再调回碳化焰施焊。

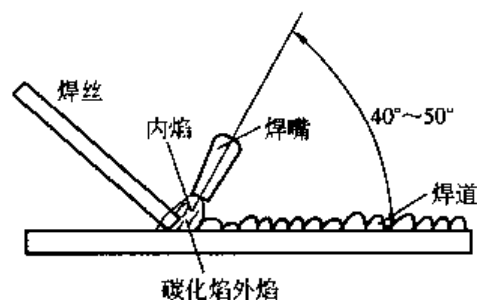


图 5.14 堆焊操作示意

⑤ 堆焊 HS111 钴铬钨合金焊丝时，采用 2~2.5 倍的乙炔过剩焰施焊，操作方法同钴基硬质合金焊丝的堆焊。

### 5.3.5 氧-乙炔堆焊轴瓦合金

#### (1) 焊前准备

① 清理合金层 用汽油及丙酮洗去轴瓦表面的油污，并用砂布轻擦表面，使之露出金属光泽。

② 焊丝的制作 将合金锭熔铸成三角形金属细条，厚度以 5mm 为宜。

③ 火焰的选择 采用三号焊炬和焊嘴，氧气压力为  $0.05\sim 0.15\text{MPa}$ ，乙炔压力  $0.03\sim 0.05\text{MPa}$ 。

由于轴瓦合金大多是锡基和铅基的低熔点合金，所以必须严格控制火焰能率的强弱。外焰不可过大，不可使用过剩的碳化焰，以免大面积地增加砂眼。

#### (2) 堆焊工艺

① 水平位置堆焊，才能获得外观整齐的焊波和质量良好的堆焊层。

② 为避免原合金层过热与轴瓦体脱离，宜将轴瓦背放在水中，露出合金层进行堆焊。

③ 焊炬焰心以距底层合金面  $5\sim 6\text{mm}$  为宜，焊炬角度与水平面为  $30^{\circ}$ ，焊丝与水平面成  $45^{\circ}$  左右；采用左焊法为好，堆焊速度应稍快。

④ 从焊件始端向里 3mm 处开始施焊，合金表面若发现起皱、发亮即可熔化焊丝。堆焊过程中，如发现熔池表面产生气泡，必须立即处理。

焊至终端时要调转焊炬方向往回施焊，以防金属溢流，若能采用金属靠模更好。要不断翻转轴瓦，使每道焊波都压住前一道焊波的  $1/2$ ，以求整个焊波平整一致。



## 第6章 自动化堆焊工艺

堆焊作为材料表面改性的一种经济而快速的工艺方法，越来越广泛地在各个工业部门得到应用。随着各种堆焊方法日益广泛地被应用，手工电弧堆焊和氧-乙炔火焰堆焊方法已不能满足使用要求。对于堆焊方法来说，总是希望堆焊效率尽可能高，而且随着堆焊件尺寸的增大，更迫切要求高效率的堆焊方法。为此发展了各种自动化堆焊方法，近年来开发的堆焊材料和堆焊方法很多是围绕着“优质、高效、低稀释率”这一总体目标进行的，为堆焊工艺自动化奠定了基础。

### 6.1 自动化堆焊的工艺特点

#### 6.1.1 堆焊过程自动化的概念

堆焊过程自动化，是指整个堆焊过程从起弧到堆焊结束全部机械化或自动化完成，堆焊生产率高、质量稳定。人们十分注意堆焊过程自动控制问题，实现堆焊过程自动控制是不断改进生产技术的过程。堆焊过程自动化的含义很广泛，可以是堆焊工艺过程中某一局部的自动控制，也可以是整个堆焊工艺过程的自动控制。除了焊接设备的问题，还涉及焊接工装、自动检测、定位和电器控制的问题。

自动化堆焊的具体含义至少应包括如下几点。

① 为了保证焊丝输送适合操作要求，焊丝应能自动送进到电弧燃烧处，要求焊丝的输送速度均匀、不间断，同时要求焊丝的熔化速度随着堆焊电流的变化而改变。也就是说，焊丝的熔化速度应随着堆焊电流的大小而变化。

② 当焊丝与堆焊工件之间产生电弧时，电弧在堆焊过程中必须保持一定的长度，能够正常而稳定的燃烧，使堆焊工作不致因瞬间短路或断弧现象而中途停顿。

③ 堆焊电弧能自动沿着预定的堆焊方向稳定进行，焊剂（或保护气体）能随着堆焊电弧的移动而自动地覆盖于电弧燃烧处。

④ 当堆焊终止时，应首先停止堆焊电弧的移动，在原地稍作停顿，待弧坑填满后再切断电弧。

埋弧堆焊（或气体保护堆焊）过程的自动化，是通过焊丝的升降机构和运行机构自动实现的。对于这两部分的机构也提出了一些要求，其中对机头行走机构的要求比较简单，只需要满足以下两点：

- ① 机头的行走机构能够进行等速的直线运动；
- ② 等速直线运动的方向和速度可以任意调节。

对于焊丝升降机构的要求较复杂，堆焊过程自动化要在焊丝升降机构的自动协调中得到保证。为了使堆焊过程自动的正常进行，还必须把上述两个机构用电气线路联系起来。上述两个机构均由独立的电动机带动，并可以通过仪表旋钮和刻度盘进行任意调节。为了实现堆焊过程自动化和提高堆焊层的质量，除了通过设计可靠的行走系统和减小稀释率外，还需通过使用优质的堆焊材料和采用特定的堆焊工艺来实现。

随着计算机技术的不断发展，为了提高及稳定堆焊质量，国内外已经开始建立堆焊专家

系统。根据零件磨损程度和磨损形式及母材成分来确定是否适合堆焊、是否需要过渡层，选择填充材料和确定堆焊工艺，包括是否需要堆焊前预热处理、采取什么措施来限制热量输入和控制稀释率等。所有这些都是通过计算机完成的。利用专家系统制定出零件的最佳堆焊工艺，使堆焊技术向“优质、高效、低稀释率”的自动化目标又迈进了一步。

### 6.1.2 自动化堆焊方法的工艺比较

自动化的堆焊方法主要有自动埋弧堆焊、气体保护堆焊、等离子弧堆焊和电渣堆焊等。整个堆焊过程是在上述焊接方法基础上，配合相应的工装和控制系统实现的。采用自动化的堆焊方法比传统手工电弧堆焊或氧-乙炔火焰堆焊的效率更高、堆焊层质量更稳定，应用日趋广泛并引起人们的重视。

相同电流条件下的氩气保护电弧和等离子弧温度分布的比较如图 6.1 所示。图中左半部是钨极氩弧的温度分布，右半部是等离子弧的温度分布。钨极氩弧堆焊的工艺参数是：电弧电压 14.5V，电流 200A。等离子弧堆焊的工艺参数是：电弧电压 29V，电流 200A，压缩孔内径 4.8mm。

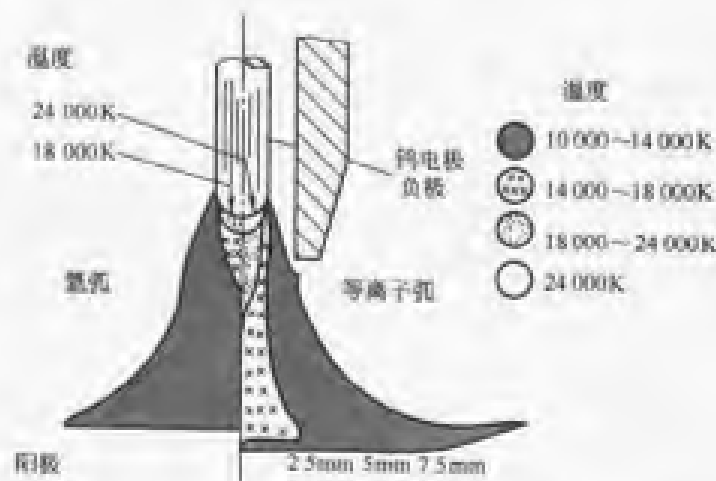


图 6.1 氩气保护电弧和等离子弧温度分布的比较

图 6.1 中的两个电弧都是以钨极为阴极，工件为阳极。钨极氩弧 14 000~18 000K 的温度区是窄而陡峭的，等离子弧在这个温度区则沿弧柱的长度伸展，在底部呈宽阔状。因此，钨极氩弧与一般电弧的特点是易于获得深而窄的熔深，这正是结构焊接所希望的。但是在堆焊时要求熔深浅、稀释率最小，而等离子弧正是具有这一特性。等离子压缩电弧的高温弧柱区较长，允许将堆焊粉末送入弧柱区并受到均匀的加热，从而有效地利用了能源并获得高质量的堆焊层。所以，等离子弧应用于堆焊方面具有独特的技术优势。

在一般等离子弧堆焊时，焊枪喷嘴与工件的距离不宜过大。如果要使焊枪与工件之间的距离加大，必须采用大功率电源。脉冲等离子弧堆焊可在不增加电源功率的条件下，利用脉冲电流、电压的影响使电弧拉长，以增加合金粉末的熔数量，从而提高了堆焊效率。

粗粒合金粉末的等离子弧堆焊如图 6.2 所示。这种方法可获得质量较好的堆焊金属，生产效率高，堆焊过程稳定可靠。粗粒合金粉末可以采用常规粉碎方法制备，某些以前只能采用手工堆焊的合金材料也实现了机械化等离子弧自动堆焊。

自动埋弧堆焊是一种堆焊效率较高的工艺方法，比手工电弧堆焊提高效率 3~6 倍，特别是较大工件的堆焊更能显示其优越性。自动埋弧堆焊的应用已由原来的单丝埋弧堆焊发展

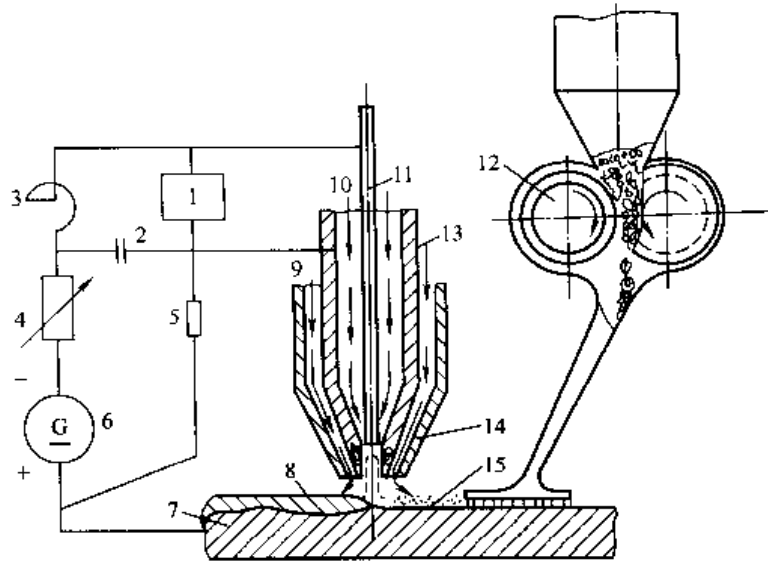


图 6.2 粗粒合金粉末的等离子弧堆焊

- 1—振荡器；2—电容器；3—电抗器；4 可变电阻器；5—限流电阻；6—电弧电源；  
7—工件；8—堆焊金属；9—保护气；10—离子气；11—钨极；12—粗  
粒送粉器；13—喷嘴；14—保护喷嘴；15 粗粒粉

为多丝埋弧堆焊、带极埋弧堆焊、药芯焊丝埋弧堆焊等，大大提高了堆焊效率和应用范围。

电弧堆焊可以用交流电，也可以用直流电。一般堆焊过程希望堆焊工件熔透得浅一些，所以多采用直流反接法。采用直流电源电弧堆焊时的极性连接如图 6.3 所示。

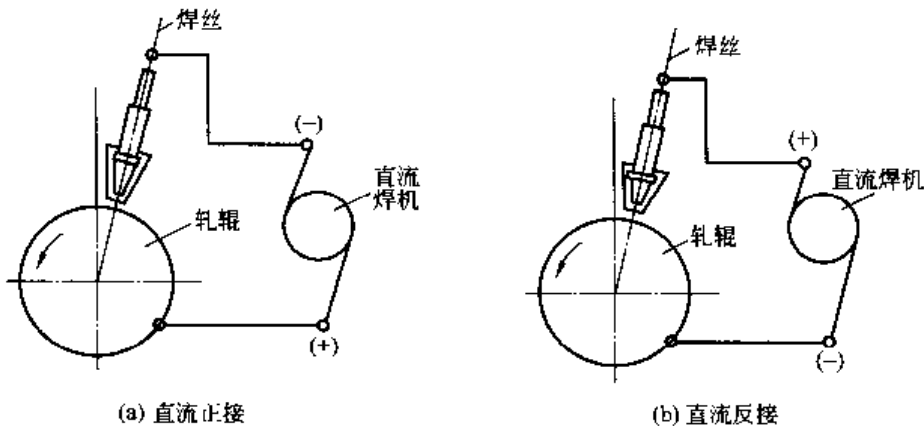


图 6.3 采用直流电源电弧堆焊时的极性连接

电渣堆焊熔敷效率高，一次堆焊厚度很大，可以采用实芯焊丝、药芯焊丝和板（带）极、丝极，丝极可以多丝同时送进，板（带）极最宽可达 300mm。因此，堆焊层比埋弧堆焊更宽。电渣堆焊熔深均匀，稀释率不高，熔敷效率（极板）可高达 150kg/h。

电渣堆焊焊剂消耗量比埋弧堆焊少。除电极外，还可把合金粉末预先涂敷到电极上或直接加入到熔池中进行合金渗透，因而易于调整堆焊层的合金成分。选用的电渣堆焊焊剂必须能够使熔渣有合适的黏度和电导率，以保证渣池稳定。一般采用含氟化物高的焊剂，其氧化性小，可避免合金元素的烧损。典型熔炼焊剂成分为  $\text{CaF}_2$  49%、 $\text{CaO}$  21%、 $\text{SiO}_2$  21% 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  9%。

垂直位置电渣堆焊时，需使用水冷滑块强迫堆焊层成形，堆焊层厚度范围约为 15~

90mm。带极电渣堆焊可以在水平面上作大面积堆焊，其堆焊形式与带极埋弧堆焊相似，但堆焊过程有本质区别，见图 6.4。施焊时，要求工件有  $0.5^\circ$  左右的倾斜度，焊剂厚度依带极宽度、焊接电流和焊剂类型而定，一般在  $15\sim 30\text{mm}$  之间。带极越宽，堆焊电流越大，焊剂厚度应越厚。烧结焊剂的厚度比熔炼焊剂大  $5\text{mm}$  左右。对于不锈钢带极（厚度  $0.4\text{mm}$ ，宽度  $150\text{mm}$ ），堆焊电流  $2400\text{A}$ （直流反接），电弧电压  $26\text{V}$ 。

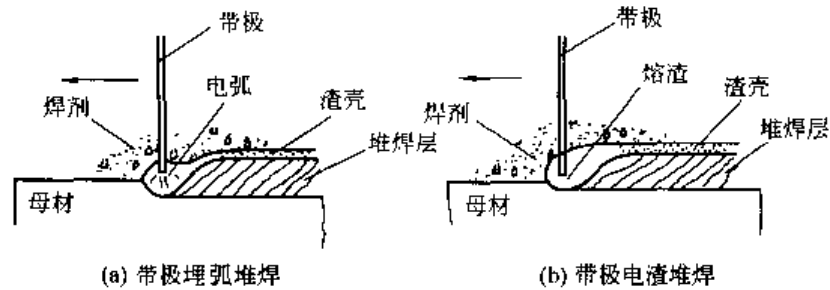


图 6.4 埋弧焊与电渣焊的带极堆焊示意

由于通常的埋弧堆焊焊接速度较低，热量输入较大，堆焊后冷却速度较慢，使堆敷金属和母材热影响区晶粒粗大，容易造成在高温高压腐蚀介质中使用的压力容器出现裂纹现象。为了提高容器堆焊层的性能，国内外发展了高速带极堆焊工艺，既可以提高堆焊层性能，同时也提高了堆焊效率。

在目前各类自动化堆焊方法中，等离子弧堆焊属于稀释率最低的，但常规等离子弧的堆焊效率也几乎是最低的。为了保证其低稀释率的优点，又克服低效率的弱点，发展了高能等离子弧堆焊技术。在等离子弧堆焊研究方面，我国已初步实现了高效、低稀释率的目标，目前正在继续深入研究中。

## 6.2 自动埋弧堆焊

自动埋弧堆焊是利用埋弧焊的方法在零件表面堆敷一层有特殊性能的金属材料的工艺过程。其目的是为了增强材料表面的耐磨、耐腐蚀等性能。埋弧堆焊的实质与一般埋弧焊接没有本质区别，自动埋弧堆焊与一般的自动埋弧焊大致相同，所采用的设备完全是自动埋弧焊的设备。但为了增加熔敷率，降低母材稀释率，二者之间也存在着差别，即自动埋弧堆焊希望在不降低生产率的前提下获得最小的熔深。

### 6.2.1 埋弧堆焊的分类及特点

#### (1) 埋弧堆焊的分类

为了降低稀释率、提高熔敷速度，埋弧堆焊有多种形式，如单丝埋弧堆焊、多丝埋弧堆焊、带极埋弧堆焊、串联埋弧堆焊、粉末埋弧堆焊等，如图 6.5 所示。

##### 1) 单丝埋弧堆焊

目前单丝自动埋弧堆焊的应用比较普遍，主要是用合金焊丝、药芯焊丝或普通低碳钢丝作电极，与烧结焊剂配合，靠焊丝或焊剂过渡合金。单丝埋弧堆焊的缺点是熔深大、稀释率高达  $30\%\sim 60\%$ ，需堆焊  $2\sim 3$  层以上才能满足对表面层性能的要求。为了提高堆焊效率和降低稀释率，在单丝埋弧焊基础上发展了添加冷丝、振动堆焊和撒放合金剂等方法。

为了降低稀释率，可采用下坡埋弧堆焊工艺、增大焊丝伸出长度（即增加焊接电压）、降低焊接电流、减小焊接速度、电弧向前吹和增大焊丝直径等措施。还可以摆动焊丝使焊道

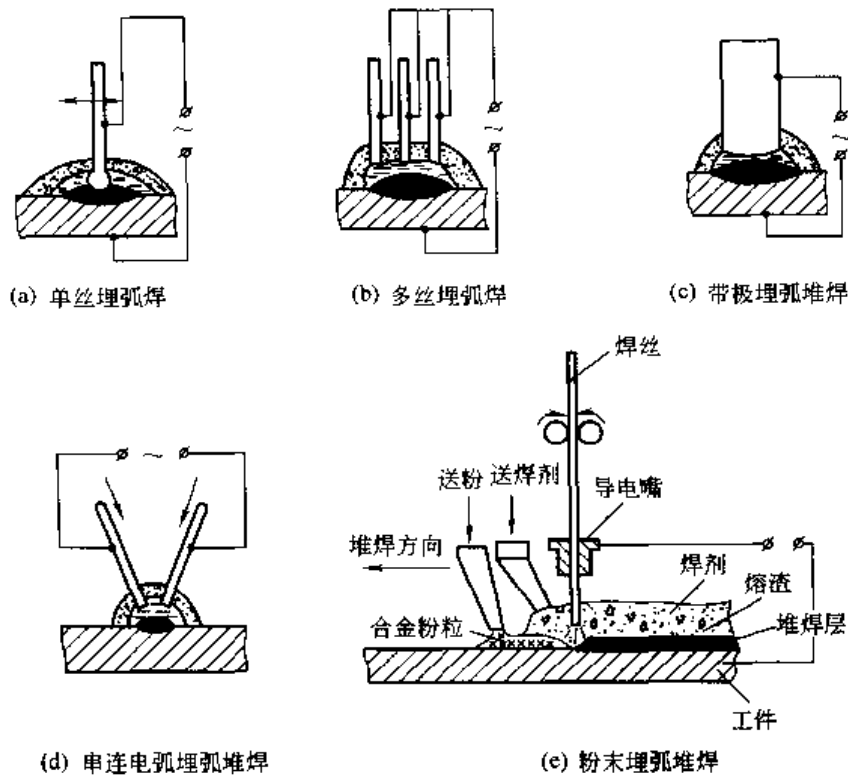


图 6.5 各种埋弧堆焊工艺示意

加宽，从而稀释率下降，并可改善与相邻焊道的熔合。

单丝埋弧堆焊的焊丝直径为 1.6~4.8mm，焊接电流为 160~500A，交、直流电源均可，采用直流电源时用反接法（焊丝接负极）。

### 2) 多丝埋弧堆焊

在单丝埋弧焊基础上发展了多丝埋弧堆焊，其中又有振动堆焊、多丝摆动堆焊等提高效率和降低稀释率的方法。这些方法在大面积耐腐蚀堆焊中都有应用。采用两根或两根以上的焊丝并列地接在焊接电源的一个极上，同时向焊接区送进。电弧周期性地从一根焊丝转移到另一根焊丝。这样，每一次起弧的焊丝都有很高的电流密度，可获得较大的熔敷效率。使双丝埋弧堆焊的电弧位置不断变动，也可以获得较浅的熔深和较宽的堆焊焊道。多丝堆焊可以采用很大的电流，而稀释率却很小。

还可采用双丝双弧埋弧堆焊法，即两根焊丝沿堆焊方向前后排列。这两根焊丝可用一个电源或两个焊接电源分别供电。前一个电弧用较小的焊接电流以熔化少量母材，后一个电弧用较大的焊接电流，起到堆焊作用，以提高熔敷效率。我国目前有专用于堆焊的多丝埋弧焊机。

也可以采用串联电弧堆焊，这种方法的电弧是在自动送进的两根焊丝间燃烧，两根焊丝大多成 45°角，焊丝垂直于堆焊方向，分别连接交流电源两极，空载电压 100V 左右。由于电弧间接加热母材，大部分热量用于熔化焊丝，所以稀释率低，熔敷量大。

### 3) 带极埋弧堆焊

用合金带极、药芯带极或普通低碳钢带极代替焊丝作电极，配合烧结焊剂层下进行堆焊。堆焊时，电弧在带极端部局部引燃，并沿带极端部迅速移动，类似于不断摆动的焊丝，

因此熔深很浅。由于电弧燃烧处有很高的电流密度而使熔敷效率很高。

带极埋弧堆焊的熔敷效率高、熔深浅而均匀、稀释率低、堆焊焊道宽而平整。一般带极厚度约 0.4~0.8mm，宽度约 60mm。若采用外加磁场来控制电弧，则带极宽度可达 180mm。带极堆焊所用的设备可以用一般埋弧自动焊机改装，也可以采用专用设备。例如，国产 MU1-1000-1 型自动带极堆焊机，机头行走机构为小车式，使用带极厚度 0.4~0.6mm、宽度 30~80mm，堆焊电流 400~1000A，堆焊速度 7.5~35m/h；MU2-1000 型悬臂式带极自动埋弧焊机的技术性能也大体相似，主要用于埋弧堆焊内径大于 1.5m 的管道、化工容器、油罐、锅炉压力容器等大型专用设备。

为了获得更高的生产率，可增加带极宽度。如用厚度 0.5mm、宽度 180mm 的带极，堆焊电流为 1800A，每小时熔敷面积可提高到 0.9m<sup>2</sup>，而稀释率仅 3%~9%。

高速带极埋弧堆焊时，由于焊接速度的提高（带宽为 75mm 时，焊接速度可达 4.2~4.7 cm/s），堆焊过程由电渣过程变成电渣、电弧的联合过程，但仍然以电渣过程为主，因此基本保留了电渣堆焊的高效、低稀释率的优点。

高速带极埋弧堆焊速度较高，对母材热量输入小，热影响区晶粒细小。用于堆焊在氢介质中工作的工件时，可以大大提高抗氢致裂纹的能力，而且工件变形小，主要用于堆焊较薄的工件。高速带极埋弧堆焊需要较大的焊接电流，磁收缩现象严重，因此对磁控装置的要求较高。一般需要堆焊 2~3 层才能满足堆焊层合金成分的要求。

随着堆焊技术的发展，还可采用双带极、多带极或加入冷带等埋弧堆焊工艺，可大大提高熔敷效率。除了实芯带极外，粉末带极也有应用。图 6.6 所示为粉末带极的几种形式。

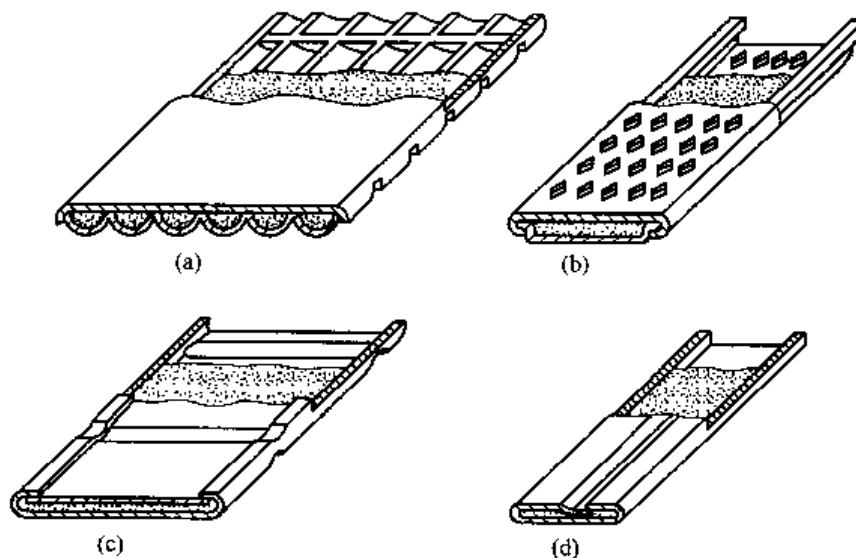


图 6.6 粉末带极的几种形式

在石油、化工、原子能等工业的大面积耐腐蚀堆焊中，应用最普遍的是堆焊效率比丝极埋弧堆焊高、而稀释率比丝极低的带极埋弧自动堆焊。随着焊机容量的增大，熔敷效率要求的日益提高，带极宽度已从 30mm 增大至 60mm 或 75mm 等。

#### 4) 串联电弧埋弧堆焊

串联埋弧堆焊的电弧在自动送进的两焊丝端部之间燃烧，电弧热量主要用于熔化焊丝，对母材基体是间接加热，热量输入很少，因而熔深更浅。串联的两根焊丝是一边熔化一边送进，为了使两根焊丝均匀熔化，应采用交流焊接电源，空载电压约为 100V。两根焊丝所在

平面垂直于堆焊方向，焊丝之间的夹角大多成  $45^\circ$ 。由于电弧间接加热母材，大部分热量用于熔化焊丝，因此串联电弧埋弧堆焊的稀释率较低，熔敷效率高。

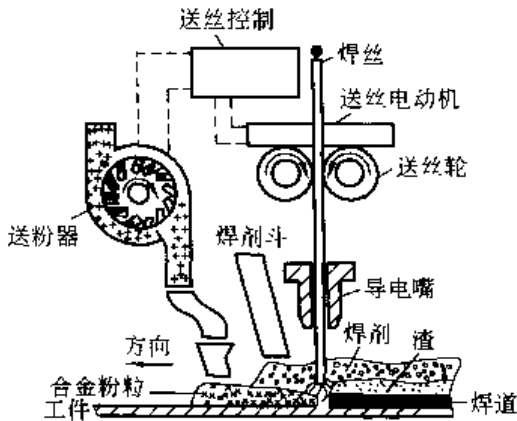


图 6.7 合金粉粒填充金属埋弧堆焊示意

### 5) 合金粉粒埋弧堆焊

合金粉粒填充金属埋弧堆焊示意图见图 6.7。先将合金粉粒堆铺在工件上，填加合金粉粒埋弧堆焊时，电弧在左右摆动的焊丝与工件之间燃烧，电弧热将焊丝和电弧区附近的合金粉粒、工件和焊剂熔化，熔池凝固后形成堆焊层。对于不能加工成丝极或带极的堆焊合金，可采用这种方法堆焊。

由于相当一部分电弧热是消耗在熔化合合金粉粒上，所以大大降低了稀释率和提高了熔敷速度。送粉与送丝的质量比由 1.0 增加至 2.3 时，稀释率从 40% 下降至接近 0，一般取粉/丝比值为 1.0~2.0。所填加合金粉粒的质量约为熔化焊丝质量的 1.5~3 倍。

合金粉末埋弧堆焊绝大多数采用的是低碳钢焊丝（如 H08A）。在不增加焊接电流的条件下，其熔敷效率约为单丝埋弧焊的 4 倍，一般都大于  $45\text{kg/h}$ ，且熔深浅、稀释率低。但必须严格控制堆焊过程，尤其是粉末颗粒堆放量要均匀、工艺参数要稳定。目前，国内外采用这种堆焊工艺制造大面积耐磨合金复合钢板，堆焊合金常采用高铬合金铸铁。

### (2) 埋弧堆焊的特点

在自动埋弧堆焊过程中，堆焊工件和焊丝在堆焊电弧的高温作用下被局部和全部熔化。为了保护熔融金属免受周围气体影响、保存堆焊电弧的热量和防止金属飞溅，一般采用细颗粒状焊剂覆盖在堆焊区上。堆焊电弧使颗粒状焊剂部分熔化，维持堆焊电弧在熔融焊剂所形成的弹性外壳的空间中燃烧。这个弹性外壳可靠地将堆焊熔池隔绝于空气。自动埋弧堆焊方法见图 6.8。

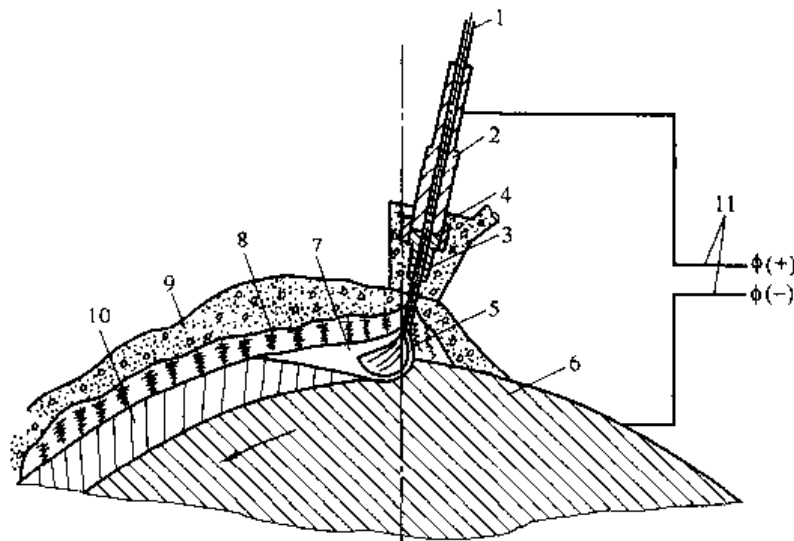


图 6.8 自动埋弧堆焊方法示意

- 1—金属焊丝；2—导电杆；3—导电嘴；4—焊剂杯；5—堆焊电弧；6—钢轧辊（堆焊工件）；  
7—堆焊熔池；8—焊渣壳；9—未熔化的焊剂；10—堆焊金属层；11—堆焊电源

金属焊丝 1 以一定的速度连续、均匀地供给堆焊电弧 5，并在堆焊电弧的高温作用下均匀熔化。金属熔滴通过堆焊电弧与被堆焊工件 6 的熔融金属相混合，形成堆焊熔池 7。在熔敷金属冷却后得到渣壳 8 和未熔化焊剂 9 的覆盖而成为堆焊金属层 10。堆焊过程中，未熔化的焊剂落入回收箱，以便回收再用。

金属焊丝成圈地放置在附设的焊丝盘中，通过自动埋弧焊机的送丝机构，连续、均匀地送入堆焊电弧。应控制自动埋弧堆焊机头的行走速度，以保证堆焊焊道逐渐形成螺旋形轨迹。

自动埋弧堆焊的生产率是以单位时间内消耗的焊丝量测定的。当焊丝直径为 3.2mm 时，一般单丝自动埋弧堆焊的生产率约为 4~6kg/h。为了提高生产率，可采用几台单丝埋弧焊机同时堆焊的办法；也可改制成为双丝或多丝自动埋弧焊，达到高效率堆焊。

由于埋弧堆焊过程是连续进行的，采用大直径焊丝时可以使用较大的堆焊电流，因此自动埋弧堆焊的生产率比手工电弧堆焊高得多。自动埋弧堆焊能比手工电弧堆焊能更有效地保护熔融金属不受空气影响，提高堆焊金属的质量。

自动埋弧堆焊的电弧在焊剂层下进行，无飞溅和电弧辐射，劳动条件好，焊丝熔化形成的堆焊层平整光滑，易于实现机械化和自动化，生产率高，堆焊层成分稳定。但埋弧堆焊的热量输入较大，堆焊熔池大，稀释率比其他电弧堆焊方法高。埋弧堆焊需焊剂覆盖，只能在水平位置堆焊，适用于形状规则且堆焊面积大的焊接件。例如，在轧辊、车轮轮缘、曲轴、水轮机转轮叶片、化工容器和核反应压力容器衬里等大、中型零部件批量堆焊中得到应用。

### 6.2.2 埋弧堆焊材料

埋弧堆焊时，需要使用焊剂和兼作电极的填充焊丝或带极。焊剂有熔炼焊剂和烧结焊剂两种，埋弧堆焊一般采用烧结焊剂。填充金属有丝状和带状两种，而且均可制作成实芯和药芯的。

埋弧堆焊层合金过渡的方式如下。

① 通过合金焊丝或焊带向堆焊层过渡（渗入）合金元素，这种方式获得的堆焊层成分均匀、稳定可靠，合金元素损失少，能满足堆焊层性能要求。但这种合金化方式只适用于能轧制和拉拔成丝状或带状的堆焊合金。

② 通过药芯向堆焊层过渡合金元素，这种方式一般采用烧结（或黏结）焊剂。这种方法克服了某些高合金焊丝难于制造或根本不能制造的困难，利用低碳、低合金钢做外皮，中间添加堆焊层所需的合金成分。

③ 也可以将堆焊层所需的合金元素以铁合金粉末形式加入到烧结焊剂内，配合低碳钢或低合金钢焊丝，得到不同成分的堆焊层。但是这种合金化方式得到堆焊层成分稳定性较差。

④ 堆焊前在焊剂层下先铺设一层合金粉末（也可黏结在钢板表面），堆焊时熔入熔池形成堆焊合金层。这种方式的堆焊层成分的稳定性受粉末量和堆焊工艺参数的影响而波动很大，对堆焊工艺条件要求严格。

### 6.2.3 埋弧堆焊工艺及参数

#### (1) 主要工艺参数的选择

埋弧堆焊的工艺参数主要是指堆焊电流、电弧电压、堆焊速度、焊丝直径及焊丝送给速



度等，在实际堆焊工作中，这些工艺参数对堆焊焊道形状和尺寸有很大的影响。此外，电源极性、焊剂牌号及颗粒度、工件倾斜角等对堆焊质量也有影响。

### 1) 堆焊电流的影响

随着堆焊电流的增大，堆焊电弧发出的热量增加，传到工件的热量也增多。当堆焊电流增大时，放射电子更为激烈，电弧的压力也随之增大。电弧下面的堆焊熔池的液体金属被挤出很多，电弧可以进一步潜入未熔化的基体金属，使基体金属的熔透深度显著增加。堆焊电流对熔深深度的影响可用下式表示，即

$$h = KI$$

式中  $h$  —— 熔深，mm；

$K$  —— 比例系数，mm/A；

$I$  —— 堆焊电流，A。

比例系数  $K$  表示当堆焊电流每增加 1A 时熔深  $h$  的增加量。 $K$  值的大小与堆焊电流种类、极性、焊剂种类和焊丝直径有关，通常  $K = 0.01 \sim 0.02$ ；对于自动焊接的船形位置焊和开坡口对接焊，取  $K = 0.015 \sim 0.02$ ；对于不开坡口的对接焊，取  $K = 0.010 \sim 0.0115$ ；对于自动堆焊，常取  $K = 0.01$ 。

当堆焊电流增大时，由于堆焊电弧潜入基体金属，电弧的活动能力降低，堆焊焊缝的宽度增加不大。由于堆焊电流增大，焊丝的熔化速度加快。但是在这种情况下，堆焊焊缝的宽度增加不多，堆焊焊缝的堆高部分变化——使堆焊焊缝的堆高部分与基体金属之间缺乏圆滑的过渡，从而引起堆焊焊缝应力集中。

另外，当堆焊电流增大时，由于堆焊焊缝的宽度增加不多，焊剂的熔化量也受到影响。

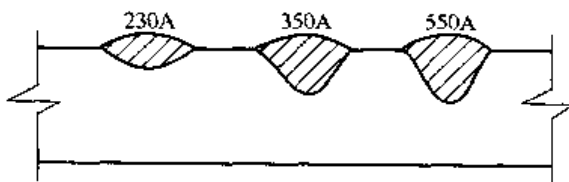


图 6.9 3 种不同的堆焊电流对焊缝形状尺寸的影响

这对堆焊焊缝的形状尺寸和堆焊层金属合金成分的填补不利。因此，在实际生产中当增大堆焊电流时，就必须相应地提高电弧电压，以达到同时增加堆焊焊缝宽度的目的。

使用 3 种不同的堆焊电流所得到的焊缝形状如图 6.9 所示。使用 8 种不同的堆焊电流所得到的堆焊焊缝形状见图 6.10。增大堆焊电流

对堆焊焊缝深度、宽度高度及基体金属成分在堆焊焊缝中所占的比例  $\gamma$  值的影响如图 6.11 所示。

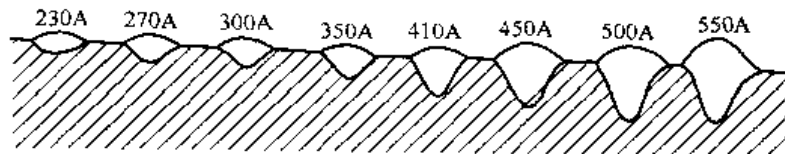


图 6.10 8 种不同堆焊电流对堆焊焊缝形状的影响  
(焊丝直径 2mm，材料为低碳钢)

试验结果表明，当堆焊电流增大时，焊缝的深度和高度都显著地增加。而焊缝宽度在电流不超过 900A 时稍有增加，但不显著；当电流超过 900A 时，焊缝宽度增加很少，而熔深却直线上升。

### 2) 电弧电压的影响

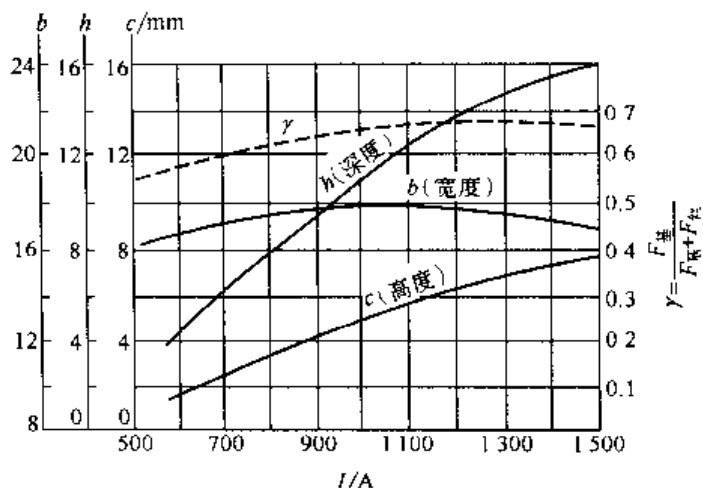


图 6.11 堆焊电流与堆焊焊缝形状尺寸的关系  
(焊丝直径 5mm, 堆焊电压 36~38V, 焊速 40m/h)

埋弧焊电弧电压随着电弧长度的变化而变化。当电弧长度增大时, 电弧电压升高, 则电弧作用于工件的面积增大 (见图 6.12); 反之, 当电弧长度减小时, 电弧电压降低, 电弧的活动性减小, 作用于工件的面积也减小。因此, 当电弧电压增大时, 堆焊焊缝的宽度增大; 当电弧电压减小时, 堆焊焊缝的宽度也减小。

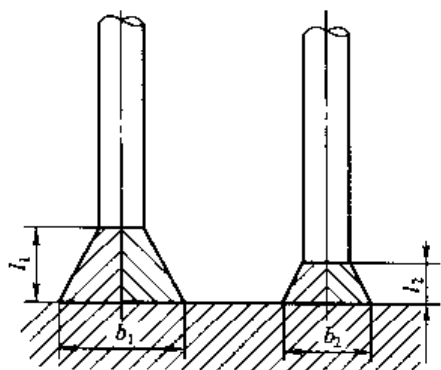


图 6.12 电弧长度 (电弧电压) 对堆焊焊缝宽度的影响  
 $l_1, l_2$ —电弧长度;  $b_1, b_2$ —堆焊焊缝宽度  
(当  $l_1 > l_2$  时,  $b_1 > b_2$ )

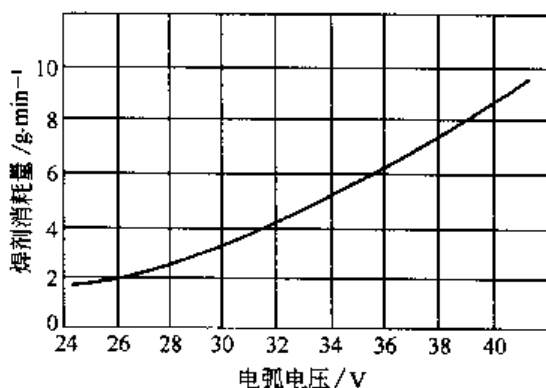


图 6.13 埋弧堆焊电弧电压与焊剂消耗量的关系

单丝焊时, 调整不同的电弧电压可得到不同宽度的堆焊焊道。这也正是单丝堆焊不同宽度的密封面, 一遍焊成的技术特点。

当电弧长度伸长时 (即电弧电压增加), 电弧吹向熔池的液态金属的力量减弱, 电弧热传递至工件的距离增加。因此, 当增加电弧电压时, 工件的熔透深度略有减小。此外, 随着电弧电压的增大, 除了堆焊焊缝的宽度增加外, 焊剂的消耗量也有所增加。埋弧堆焊电弧电压与焊剂消耗量的关系如图 6.13 所示。

使用 3 种不同电弧电压埋弧堆焊所得到的堆焊焊缝形状尺寸如图 6.14 所示。埋弧堆焊电弧电压与焊缝形状的关系见图 6.15。

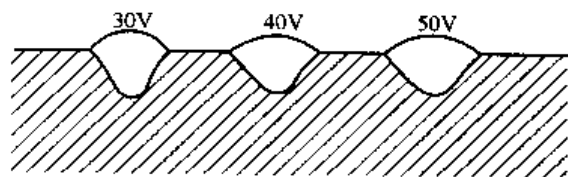


图 6.14 电弧电压对埋弧堆焊焊缝形状尺寸的影响  
(堆焊电流 1000A, 焊速 20m/h, 焊丝 H08A, 直径 4mm)

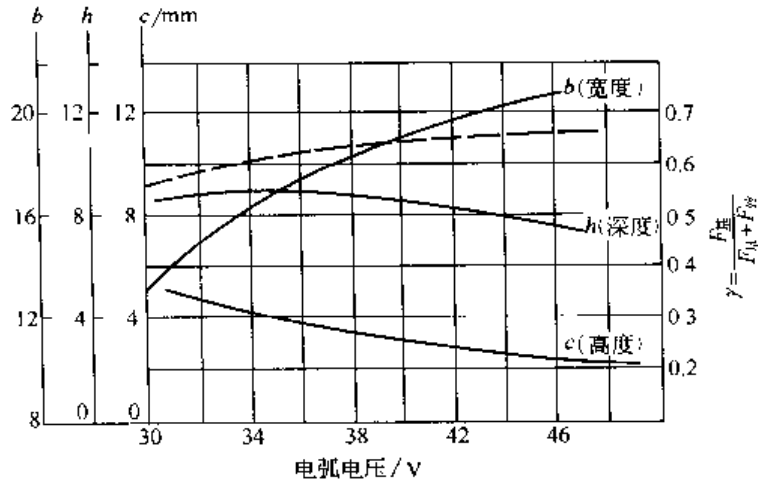


图 6.15 埋弧堆焊电弧电压与堆焊焊缝形状尺寸的关系  
(焊丝直径 5mm, 堆焊电流 800A, 焊速 40m/h)

如果单纯增加堆焊电流或电弧电压, 将不会得到满意的堆焊焊缝成形。在实际生产中, 当需要增加堆焊电流时, 必然同时相应地增加电弧电压, 以得到比较满意的堆焊焊缝形状。埋弧堆焊电流与电弧电压的配合关系见表 6.1。

表 6.1 埋弧堆焊电流与电弧电压的配合关系

堆焊电流/A	电弧电压/V	
	焊丝直径 2mm	焊丝直径 5mm
180~300	26~30	—
300~400	30~34	—
500~600	34~38	—
600~700	—	38~40
700~850	—	40~42
850~1 000	—	40~43
1 000~12 000	—	40~44

当电弧电压过高时, 焊剂熔化量太多, 以致使液体熔渣从熔池中向外流失, 还会带走堆焊熔池中的液体金属, 造成焊瘤。在堆焊工件的边缘出现这种情况是不允许的。应指出, 随着电弧电压的升高, 在普通供电电源情况下, 当电压超过 50V 时, 会破坏电弧燃烧的稳定性。

### 3) 堆焊速度

保持其他工艺参数不变的情况下, 当显著增加堆焊速度时, 单位堆焊焊缝长度受到的电弧热减少, 因此堆焊焊缝的熔透深度减少。同时, 由于单位时间内的焊丝熔数量减少, 堆焊焊缝的截面积也随之减小。具体表现在堆焊焊缝的宽度明显减小, 堆焊焊缝就变得窄而浅了。因此, 当堆焊速度增加到一定限度时 (如 100m/h 左右), 工件与堆焊焊缝金属相接处就会产生咬边。

图 6.16 所示为使用 7 种不同堆焊速度时得到的堆焊焊缝形状尺寸。可以看出, 当堆焊

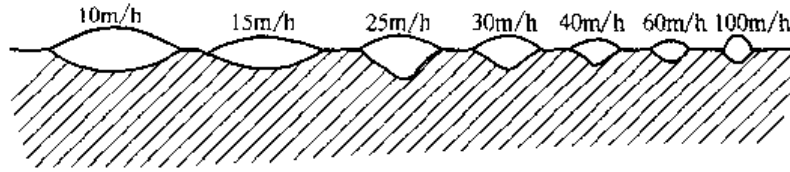


图 6.16 使用 7 种不同的堆焊速度时得到的焊缝形状

速度为 100m/h 时，由于堆焊焊缝两侧不能于基体金属很好地熔合，导致产生了未熔合区域。

图 6.17 所示为埋弧堆焊速度与堆焊焊缝形状的关系。当增加堆焊速度时，熔透深度及熔宽都显著地减小，但堆焊焊缝的堆高量减小很少。应指出，在堆焊速度很小的情况下，由于电弧处于垂直位置，熔池中的液体金属排出量并不显著，电弧不易潜入基体金属，影响了堆焊焊缝的熔透深度。随着堆焊速度的增加，电弧逐渐变成倾斜位置，加强了对液体金属的排出能力。当堆焊速度增加时，在一定范围内，堆焊焊缝的熔透深度也相应地增加。

此外，当堆焊速度增加时，焊丝金属在整个堆焊焊缝中的百分比含量也会降低，即基体金属的成分在堆焊焊缝中所占的比例  $\gamma$  也增加，如图 6.18 所示。

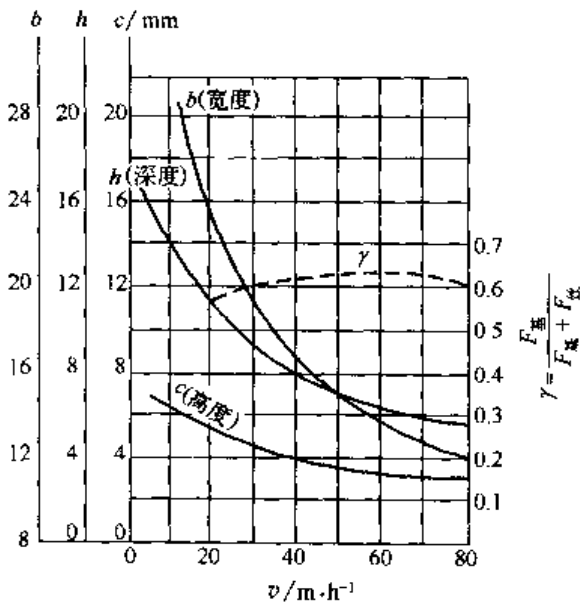


图 6.17 堆焊速度  $v$  与堆焊焊缝形状的关系  
(焊丝直径 5mm, 堆焊电流 800A, 电弧电压 36~38V)

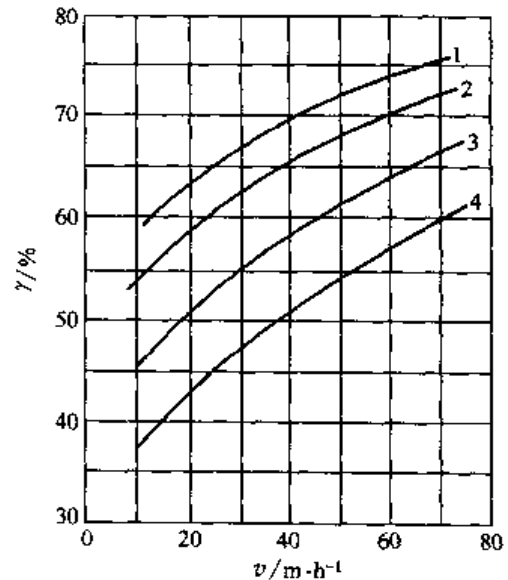


图 6.18 堆焊速度  $v$  与基体金属成分在堆焊焊缝中所占比例  $\gamma$  的关系  
1—更小的线能量；2—小的线能量；  
3—中等线能量；4—大的线能量

随着堆焊速度的增加，焊剂的消耗量相应地减少。堆焊速度对堆焊焊缝形状尺寸有重要的影响。当堆焊电流和电弧电压不变时，改变堆焊电弧移动速度，将使焊缝上的堆敷金属量以及电弧热的作用发生变化。

堆焊速度对焊缝形状尺寸的影响如下。

① 小的堆焊速度 ( $v < 20\text{m/h}$ ) 堆焊电弧以较慢的速度移动时，会在堆焊焊缝的单位长度上堆敷很多的堆焊金属，此时熔池水平面的提高也使电弧弧坑的水平面提高，减小基体金属的熔透深度，加大堆焊焊缝的宽度。所以，当堆焊速度极小时 ( $v < 1\text{m/h}$ )，基体金属得不到熔透，堆焊层金属会从堆焊工件的表面剥落下来，如图 6.19 所示。当堆焊速度降低



图 6.19 堆焊速度极小可能引起基体金属未熔化

时，还会减小基体金属在堆焊焊缝组成中所占的比例。

② 中等的堆焊速度 ( $v=20\sim40\text{m/h}$ ) 中等堆焊速度范围内，加大堆焊速度会导致堆焊焊缝熔透深度的增加。在这个范围内，当堆焊速度增加时，在堆焊焊缝单位长度上受到的电弧热减少，迫使堆焊焊缝的熔透深度减小。所以，在中等堆焊速度范围内改变堆焊速度时，堆焊焊缝的熔透深度实际上是不变化的，而堆焊焊缝的宽度却随着堆焊速度的增加而减小。

③ 大的堆焊速度 ( $v>50\text{m/h}$ ) 在较大的堆焊速度范围内，当堆焊速度增加时，电弧在基体金属单位长度上的作用时间减少，作用在堆焊焊缝上的电弧热也减少，所以堆焊焊缝的熔透深度和宽度都相应地减少。当堆焊速度  $v=80\sim100\text{m/h}$  时，即发生基体金属未熔化的区域。

4) 焊丝直径

其他工艺参数保持稳定，若焊丝直径增大，堆焊电弧的弧柱直径增加，熔池范围扩大，使堆焊焊缝的宽度增加，熔池深度及堆高量则减小。反之，焊丝直径减小时，电流密度增加，加强了电弧吹透力，大大提高了堆焊焊缝的熔透深度，但熔宽和堆高量减小。

焊丝直径对堆焊焊缝熔透深度的影响如图 6.20 所示。当堆焊电流 600A 时，用直径 6mm 焊丝堆焊时，熔透深度为 4mm；而用直径 2mm 焊丝堆焊时，熔透深度达 10mm，较粗焊丝时增加了一倍多。

随着焊丝直径的减小，电弧深深潜入基体金属，因此电弧波动很小，得到的堆焊焊缝窄而深。图 6.21 所示为焊丝直径对熔宽的影响。当堆焊电流 600A 时，采用直径 2mm 及 6mm 焊丝堆焊时，所得到的堆焊焊缝的熔宽相差 4.5mm。

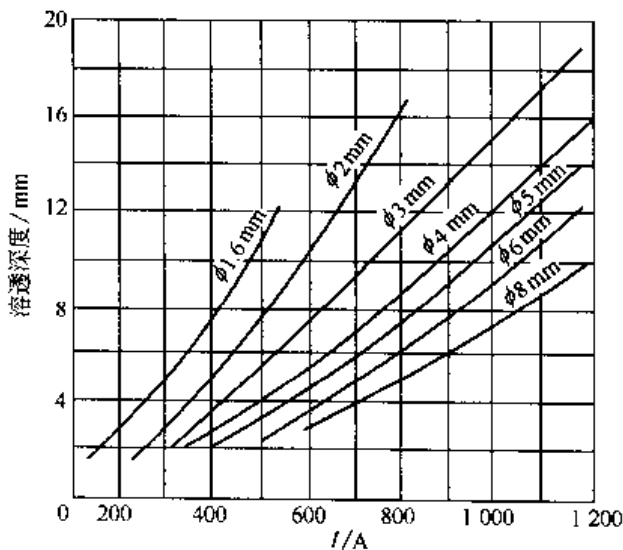


图 6.20 焊丝直径对熔透深度的影响

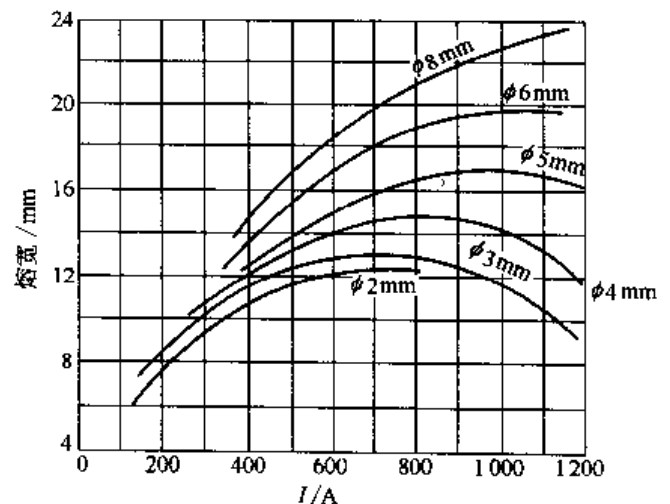


图 6.21 焊丝直径对熔宽的影响

因此，为了得到较好的埋弧堆焊焊缝形状，在改变焊丝直径的同时，必须相应地改变堆焊电流和电弧电压，才能得到合适的堆焊焊缝宽度。

#### (2) 其他因素对堆焊焊缝的影响

其他因素是指焊剂颗粒大小、电源种类和极性、焊丝伸出长度、焊丝倾斜角、工件倾斜

等。这些因素在不同程度上都影响堆焊焊缝的形状尺寸。

### 1) 焊剂颗粒大小

同一类型的焊剂，由于颗粒大小不同，对堆焊焊缝的熔透深度影响不同。因为焊剂的颗粒大小能改变焊剂在堆焊区域的堆积质量，造成堆焊区域受到的压力大小不同，堆焊焊缝的熔透深度也随之变化。

焊剂颗粒大小对堆焊焊缝形状尺寸的影响如图 6.22 所示。这几种堆焊焊缝截面是用同一种堆焊工艺参数焊成的，不相同的仅仅是焊剂的颗粒大小不同。当采用细颗粒焊剂堆焊时，得到的堆焊焊缝熔透深度较粗颗粒的焊剂要深一些。



图 6.22 焊剂颗粒大小对堆焊焊缝形状尺寸的影响  
(堆焊电流 420~440A; 电弧电压 34~36V, 焊速 36~38m/h)

### 2) 堆焊电流种类及极性

在自动埋弧堆焊中，用来作为堆焊电流的电源有交、直流两种，在合金钢的自动埋弧堆焊中多采用直流电源。直流电源极性对堆焊焊缝形状尺寸的影响，主要表现在堆焊焊缝的熔透深度和堆高量这两个方面。

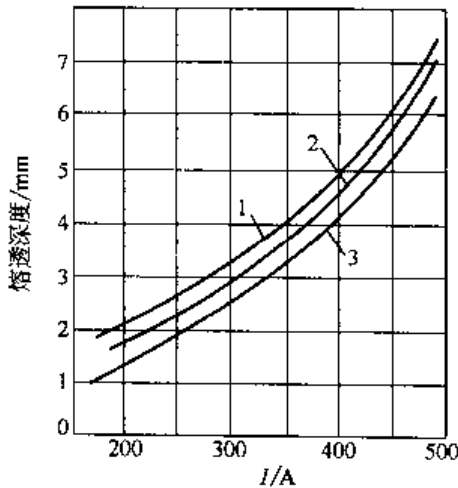


图 6.23 堆焊电流种类及极性对堆焊焊缝熔透深度的影响

1—直流反接；2—交流；3 直流正接

图 6.23 所示为堆焊电流种类及极性对堆焊焊缝熔透深度的影响，堆焊工艺参数为：焊丝直径 2mm，堆焊速度 30m/h。采用直流电源反接堆焊时，得到的堆焊焊缝熔透深度最大；反之，采用直流正接时，得到的堆焊焊缝熔透深度最小。当采用交流电源堆焊时，得到的堆焊焊缝熔透深度几乎是直流电源的正接和反接的平均值。

图 6.24 所示为电流极性对堆焊焊缝形状尺寸的影响。直流反接的堆焊焊缝熔透深度比正接时约大一倍，堆焊焊缝的熔宽几乎不变，但堆焊焊缝的堆高量却比正接时低。

采用直流电源手工电弧焊时，为了得到较大的熔透深度，通常使用直流正接（即工件接正极）。但在自动埋弧堆焊中，因为自动焊剂中含有较多的氟化钙，它们在高温电弧作用下， $\text{CaF}_2$  分解出的氟，在阴极夺取电子形成负离子，这是一个放热反应。当采用含有  $\text{CaF}_2$  的焊剂堆焊时，得到的堆焊焊缝的熔透深度变浅。

### 3) 焊丝伸出长度

焊丝在堆焊过程中受到的电阻热作用与焊丝的伸出长度成正比，即焊丝伸出长度增加，伸出部分的电阻热增大，焊丝熔化加快，因此积聚在堆焊电弧下面的熔融金属量增多。这就阻碍了电弧进一步向基体金属潜入，减少堆焊焊缝的熔透深度，增加堆焊焊缝的堆高量。图 6.25 所示为焊丝伸出长度对堆焊焊缝形状尺寸的影响。

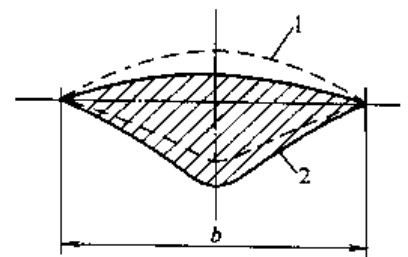


图 6.24 电流极性对堆焊焊缝形状尺寸的影响

1—直流正接；2—直流反接

其他条件相同时，若焊丝伸出长度增加，单位时间内被熔化的焊丝金属数量增多（见图 6.26），加上焊丝伸出长度增加时堆焊焊缝熔透深度减少，最终导致基体金属在堆焊焊缝中所占的比例减少。

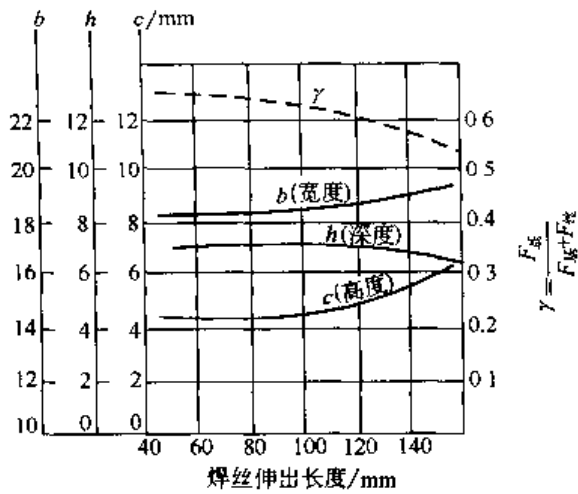


图 6.25 焊丝伸出长度对堆焊焊缝形状尺寸的影响  
(焊丝直径 5mm, 堆焊电流 800A, 电弧电压 36~38V, 焊速 40m/h)

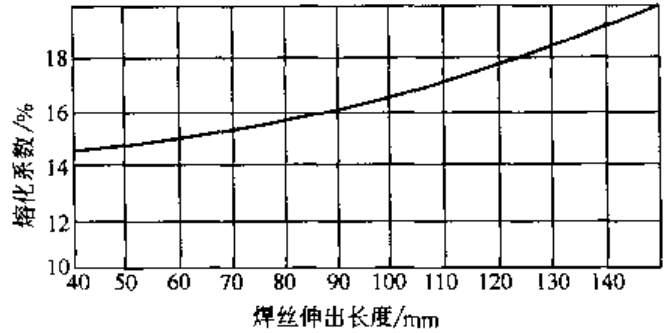


图 6.26 焊丝伸出长度对熔化系数的影响  
(焊丝直径 5mm, 堆焊电流 800A, 电弧电压 36~38V, 焊速 20m/h)

焊丝伸出长度通常为 20~60mm。当采用直径 4~6mm 焊丝堆焊时，由于焊丝伸出长度变化不大，对堆焊焊缝形状尺寸的影响可以不考虑；采用直径 3mm 焊丝时，焊丝伸出长度不得超出规定偏差士(5~10) mm，否则堆焊焊缝形状尺寸将产生较大的变化。

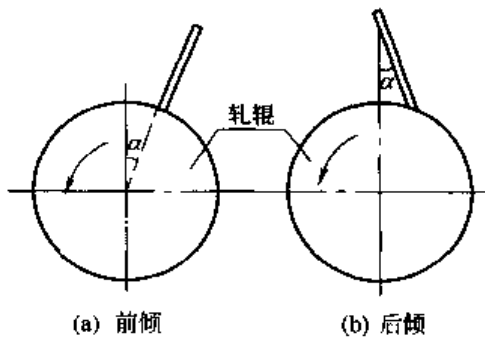


图 6.27 焊丝倾斜位置的示意

#### 4) 焊丝倾斜角度

焊丝倾斜角度是指焊丝沿堆焊方向所倾斜的角度，如图 6.27 所示，分为前倾和后倾两种情况。当焊丝在后倾位置堆焊时，由于堆焊电弧弧柱倾斜角的关系，堆焊熔池中的液体金属被挤出得更多。与焊丝垂直工件堆焊相比，采用焊丝后倾的堆焊方法得到的堆焊焊缝熔透深度增加，而堆焊焊缝的宽度稍有减小。这在正常的自动埋弧堆焊中是不希望的。

当焊丝在前倾位置堆焊时，堆焊电弧弧柱大部分位于基体金属上，这就增加了堆焊电弧的活动性，电弧不能进一步潜入基体金属。因此，堆焊熔池中被挤出的液态金属减少，堆焊焊缝的熔透深度减少，而堆焊焊缝的熔宽则有所增加。在一般钢件（如钢轧辊）的自动埋弧堆焊中，常采用焊丝前倾的堆焊法，焊丝的前倾角度约为 6°~8°。

#### 5) 堆焊工件倾斜位置

按圆形工件（如容器筒体、钢轧辊等）的倾斜位置，埋弧堆焊分为上坡堆焊和下坡堆焊两种，如图 6.28 所示。上坡堆焊和下坡堆焊对堆焊焊缝形状尺寸都有一定程度的影响。

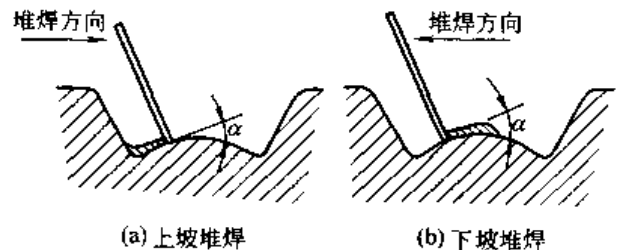


图 6.28 工件倾斜堆焊时的示意

当进行上坡堆焊时，除了堆焊电弧的吹力作用外，由于弧坑中液态金属本身的重力作

用,使液态金属向下流动,电弧进一步潜入基体金属,因此增加堆焊焊缝的熔透深度。由于电弧的活动性降低,堆焊焊缝金属的熔宽减小,从而增加堆焊焊缝的堆高量。

堆焊工艺参数相同时,工件倾斜角度对堆焊焊缝熔透深度的影响如图 6.29 所示。

当进行下坡堆焊时,由于熔池中液态金属下淌并积聚在电弧的前方,阻碍了电弧向基体金属的潜入,结果造成堆焊焊缝的熔透深度变浅,熔宽增加。当采用下坡堆焊时,若工件的倾斜角度为  $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ ,则堆焊焊缝的熔透深度减小;若工件的倾斜角度继续增加,在堆焊焊缝的边缘会出现与基体金属未熔合的现象。

当采用上坡堆焊时,若工件的倾斜角度  $\geq 8^{\circ}$ ,那么堆焊焊缝的熔宽减小,堆焊焊缝的堆高量增加,这样将导致整个堆焊焊缝的形状恶化。

自动埋弧堆焊的堆焊电弧以它的底部潜入基体金属中,直到在堆焊电弧底部与其后面堆焊熔池中的液态金属形成一定的水平差  $H$ 。这一水平差  $H$  是由电弧的吹透力决定的,而电弧的吹透力又决定于堆焊过程中的电流和其他工艺参数。

当沿倾斜面自上而下的堆焊时,堆焊焊缝金属的熔透深度比水平面上堆焊时小,而自下而上堆焊时的熔透深度较大。因此,保持堆焊熔池与电弧弧坑中液态金属不变的水平面差,是堆焊过程正常进行的必要条件。因为这时液态金属(包括熔融焊剂)的流体静压力与电弧的吹力均衡。自动埋弧堆焊圆形工件(如容器筒体、钢轧辊等)时,希望借助于堆焊机床转动角度和送丝机构的转动角度达到目的。

### (3) 埋弧堆焊的缺陷及防止

埋弧堆焊过程中,由于材料、设备、工艺及操作等方面的原因,堆焊焊道有时会出现裂纹、气孔、未焊透等缺陷。堆焊工艺参数一般是在大量的工艺性试验后得出的,改变工艺参数会导致合金元素过渡量的变化、引起组织性能变化,使其抗裂性降低,产生裂纹或其他缺陷。因此埋弧堆焊过程中应严格遵守工艺操作规程,堆焊前清除工件表面的油、锈等,在堆焊过程中严禁设备上的润滑油与工件、堆焊材料接触,随时注意工艺参数(特别是堆焊电流、电弧电压等)的变化并及时调整。

自动埋弧堆焊中的缺陷、产生原因及防止措施见表 6.2。

表 6.2 自动埋弧堆焊的缺陷、产生原因及防止措施

缺陷特征	产生原因	防止措施
送进焊丝电动机工作正常,但在堆焊过程中发现焊丝送给不均匀,电弧经常熄灭	(1)焊丝送给轮压力不够 (2)送给轮磨损 (3)导电不良 (4)焊丝被焊丝盘或其他地方卡住	(1)调整送给轮压力 (2)调换送给轮 (3)调换导电嘴 (4)检查并消除卡住的原因

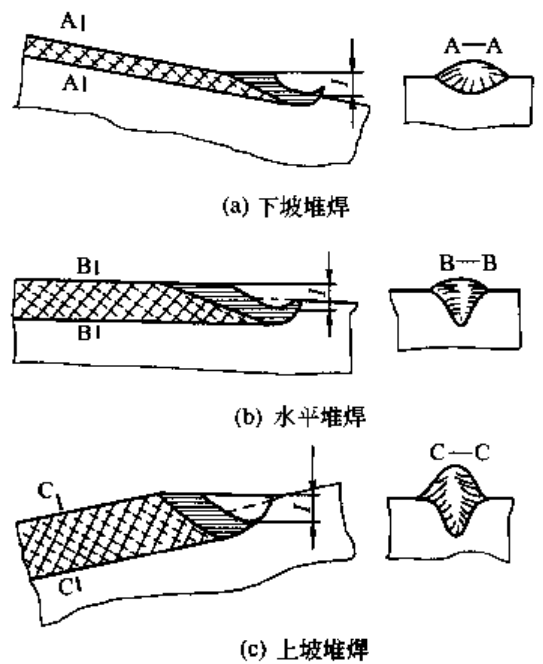


图 6.29 工件倾斜角度对堆焊焊缝熔透深度的影响



续表

缺陷特征	产生原因	防止措施
在堆焊过程中,焊机机头或导电器有横向位移	(1)调整器内有活动间隙 (2)自行台车离合器未刹住	(1)消除调整器内的活动间隙 (2)刹住自行台车的离合器
堆焊时焊丝滑出送给轮外面	送给轮沟槽不够深	更换送给轮
焊剂桶闸门打开,但无焊剂	(1)焊剂桶被焊渣或杂物堵塞 (2)焊剂用完	(1)疏通焊剂桶和焊剂输送软管 (2)添加焊剂
按启动按钮后,强力接触器工作,但焊丝送给电机不转动	触头接触不良,或控制线路上有损坏	检查触头及控制线,检查控制线时要 用万用表
按启动按钮,强力接触器不动	(1)保险丝损坏 (2)操纵电路中断 (3)接触器线圈损坏 (4)启动按钮有故障	(1)更换保险丝 (2)检查并消除 (3)消除或更换线圈 (4)检查并消除按钮故障
在按启动按钮后,电弧引燃,但立即熄灭,而电动机仍旧转动,但焊丝上升	常开触点接触不良	检查并消除常开触点的接触不良部分
在堆焊过程中,没有机械故障,但发现焊丝经常与工件有粘住现象	网路电压突然降低	增加堆焊电流
堆焊过程中导电嘴和焊丝末端一起熔化	(1)采用大电流,长电弧堆焊,以及焊丝送给速度太慢 (2)焊机自行台车停止行走,焊丝送给中断,但电弧仍燃烧 (3)导电嘴离工件太近	(1)增大焊丝送给速度,减小堆焊电流 (2)检查并消除焊机自行台车与焊丝送给电机的工作中断原因 (3)适当调整距离
焊丝还未与工件接触,电源却已与工件接上	焊机自行台车四个轮子的绝缘损坏	检查绝缘情况并消除故障
在堆焊过程中焊机自行台车行走中断	(1)焊机自行台车专用离合器未拧紧 (2)自行台车轮子被导线或其他东西卡住 (3)减速器蜗轮轴孔上的销子脱落 (4)自行台车行走电动机故障	(1)将离合器拧紧 (2)拉开导线,拿走其他东西 (3)用销子将蜗轮和传动轴联结住 (4)检查电机并消除故障
当按下启动按钮时,中间继电器动作,但强力接触器没有接通	连接启动按钮的中间继电器常开触头接触不良	检查并调整中间继电器常开触头的接触不良部分
在正常堆焊时,突然工作电压降低,堆焊焊缝成形变窄,焊丝送给速度减慢,控制箱中带动发电机的电动机转速减慢	控制箱的供电电源由三相变成了二相 (1)熔丝损坏 (2)电源接头脱落	(1)调换熔丝 (2)检查并消除接头脱落
在堆焊过程中,未发现其他机械故障,但电弧突然熄灭,各种指示仪表都降至“0”位,焊机全部动作停止	(1)网路停电 (2)强力接触器触头损坏	(1)待电路正常后再堆焊 (2)检查并消除强力接触器的触头损坏部分

## 6.2.4 埋弧堆焊实例

### 6.2.4.1 合金钢件自动埋弧堆焊

自动埋弧堆焊可以用来制造复合金属零部件(代替整体的贵重合金件),也可以用来修

复磨损的合金钢零部件，提高机器设备的使用寿命和生产效率，节约大量的贵重合金和钢材。

根据堆焊合金类型，采用自动埋弧堆焊修复合合金钢磨损零部件，一般分为耐腐蚀工件表面堆焊、耐磨损件表面堆焊、耐高温工件表面堆焊等。这几种类型工件的埋弧堆焊工艺基本上相同，但由于选用的堆焊材料不同，在具体堆焊工艺上有其各自的特点。

#### (1) 耐磨、耐腐蚀工件的表面堆焊

这一类型的工件，具有代表性的是水压机工作缸塞柱、橡胶工业的外胎水压硫化缸塞柱、轧钢设备中行星轧机的支撑辊和初轧机轧辊等。这些零部件在一定温度的水、水蒸气、空气介质中使用，要求具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀的特点。

以 1000t 水压机工作缸塞柱为例，简明阐述其堆焊材料的选择、埋弧堆焊工艺要点。

水压机工作缸塞柱材料为 45 钢，零件外形和尺寸如图 6.30 所示。埋弧堆焊部分为整个工作缸塞柱的外表面。

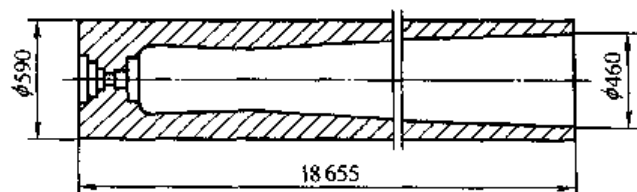


图 6.30 1000t 水压机工作缸塞柱外形及尺寸

根据这类工件工作面的耐磨损、耐腐蚀性要求，可选用马氏体不锈钢（2Cr13、3Cr13）焊丝作为表面堆焊用的堆焊材料。马氏体不锈钢 2Cr13、3Cr13 的主要特点是除了

含有较高的 Cr 含量外，还含有较高的碳含量。随着碳含量的增加，虽然钢的耐腐蚀性能有所下降，但在空气、水、水蒸气介质中的耐腐蚀性能比 45 号钢要好得多。钢中 Cr 含量的增加，使工件在氧化性介质中（如大气、硝酸等）能很快生成一层 Cr 的氧化膜，保护内部不受腐蚀。

Cr、C 含量同时增加时，堆焊层金属得到良好的综合性能，工件表面能达到耐磨、耐腐蚀性的要求。实践证明，采用马氏体不锈钢表面堆焊后的水压机工作缸塞柱，使用寿命比原来的 45 号钢提高了 3~5 倍。

值得注意的是，马氏体不锈钢有淬硬倾向，并且含碳量越高，淬硬倾向越大，导致产生冷裂纹。马氏体不锈钢的焊接冶金性能主要与 Cr、C 含量有关。马氏体不锈钢一般经调质热处理，显微组织为马氏体。焊接接头区域表现出明显的淬硬倾向，焊缝及热影响区焊后的组织通常为硬而脆的马氏体组织。

防止马氏体不锈钢焊接冷裂纹的措施如下。

① 焊前预热。预热是防止焊缝硬脆和产生冷裂纹的一个很有效的措施。预热温度可根据工件的厚度和刚性大小来决定，一般为 200~400℃，含碳量越高，预热温度也越高。

② 采用较大的焊接电流，减缓冷却速度，以提高焊接线能量。

③ 焊后热处理。焊后缓冷到 150~200℃，并进行焊后热处理以消除焊接残余应力，去除接头中扩散氢，同时也可以改善接头的组织和性能。

为了解决 2Cr13、3Cr13 马氏体不锈钢焊接性不良的问题，在堆焊过程中，焊前对工件除了进行表面除锈、去油清理外，还需进行较高温度的预热，并在堆焊过程中始终保持一定的预热温度。实际堆焊过程中，工件的预热温度一般控制在 300℃ 左右。

在堆焊工艺参数的控制方面，采取“小电流、低电压、薄层多次”的堆焊工艺方案。1000t 水压机工作缸塞柱的堆焊工艺参数见表 6.3。

表 6.3 1000t 水压机工作缸塞柱的堆焊工艺参数

焊丝及直径/mm	焊剂	电源极性	堆焊电流/A	电弧电压/V	送丝速度/ $m \cdot min^{-1}$	堆焊速度/ $mm \cdot min^{-1}$	堆焊层厚度/mm
2Cr13( $\phi 3.2$ ) 3Cr13( $\phi 3.2$ )	HJ260	直流反接	280~300	28~30	1.3~1.5	550~650	2.0~2.5

2Cr13、3Cr13 马氏体不锈钢的导热性差，焊后容易产生较大的内应力。这就要求在堆焊工艺上特别注意堆焊后工件的缓冷，最好是在热砂或预热炉中缓慢冷却。

1000t 水压机工作缸塞柱堆焊工作层的化学成分分析结果见表 6.4。

表 6.4 1000t 水压机工作缸塞柱堆焊工作层的化学成分

材 料		化学成分/%							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	W	S	P
2Cr13 焊丝		0.16~0.24	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$	12.0~14.0	$\leq 0.60$	—	0.030	0.035
堆焊层	第一层	0.35	0.83	—	6.50	—	—	—	—
	第二层	0.25	0.71	—	8.70	—	—	—	—
	第三层	0.14	0.60	—	11.10	—	—	—	—
3Cr13 焊丝		0.25~0.34	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$	12.0~13.0	$\leq 0.60$	—	0.030	0.035
堆焊层	第一层	0.42	0.92	—	6.35	—	—	—	—
	第二层	0.30	0.67	—	8.70	—	—	—	—
	第三层	0.23	0.51	—	11.66	—	—	—	—

注：堆焊焊剂为 HJ260。

由于合金元素烧损及基体金属的稀释，堆焊金属第一层的合金元素损失最大，第二层次之，第三层损失较少。采用自动埋弧堆焊方法时，随着堆焊层层数的增加，合金元素含量越来越接近焊丝中该合金元素的含量。为了得到要求的堆焊层金属的成分，选用合金焊丝时应考虑元素在堆焊过程中的损耗。埋弧堆焊时若要使堆焊层达到预定的使用性能要求，应使其工作表面处于堆焊层的第三层以上。

### (2) 易磨损件的表面堆焊

这类工件主要是指各种轴类、矫直机辊轮、行走车轮等。这类工件工作时的主要特点是在常温或温度不高的工作条件下，金属与金属之间的摩擦运动造成的磨损，有的仅是工作面上的磨损，如图 6.31 所示。有的工件是在轴承支撑的地方磨损，如图 6.32 所示。还有些零件是由于局部磨损而影响正常生产。

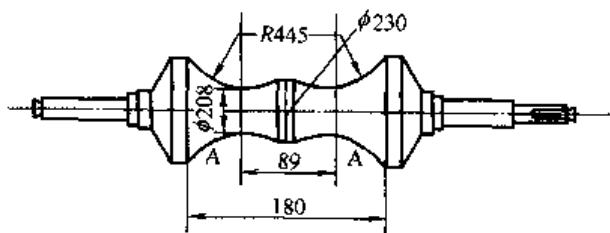


图 6.31 推钢机压辊的堆焊工作面  
(材料 ZG45, A 为需堆焊的工作面)

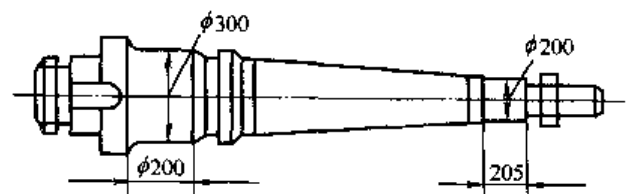


图 6.32 直径 1000mm 圆盘剪切机剪刀轴  
(轴颈部分堆焊, 材料 42CrMo4)

如果在这类工件容易磨损的部位采用堆焊方法堆焊上一层合金层，增强其耐磨性能，即能节省大量的合金元素，又简化制造加工过程，提高工件使用寿命。

这类工件的表面堆焊材料，可以采用马氏体不锈钢 2Cr13，但采用合金结构钢中的 30CrMnSiA 效果更好。因为 30CrMnSiA 最大特点是具有较高的强度、韧性，可以根据使用要求，焊后进行低温或高温回火，获得所需要的综合力学性能。30CrMnSiA 中的 Cr 含量不高，不含有贵金属元素 Ni、Mo，但其性能并不亚于 Cr-Mo 钢和 Cr-Ni 钢。因此 30CrMnSiA 在常温工作条件下是一种常用的高强度耐磨材料。

某厂推钢机压辊工作面埋弧堆焊的工艺参数见表 6.5。

表 6.5 推钢机压辊工作面埋弧堆焊的工艺参数

焊丝直径/mm	焊剂	电源极性	堆焊电流/A	电弧电压/V	送丝速度/ $m \cdot \min^{-1}$	堆焊速度/ $mm \cdot \min^{-1}$	堆焊层厚度/mm
3.2	HJ430	直流反接	300~350	32~34	1.4~1.8	500~550	2.0~2.5

用 30CrMnSiA 焊丝常温下进行埋弧堆焊时，在堆焊第一层焊缝时最易形成热裂纹。因为堆焊层的第一层冷却速度最大，从工件中熔合过来的碳含量最高。为了防止在碳含量大于 0.25% 的堆焊层金属中形成热裂纹，可对被堆焊的工件先进行预热。堆焊焊缝中的碳含量越高，预热温度也应越高。用 30CrMnSiA 作为焊丝时，为了避免焊接热裂纹的产生，被堆焊的工件应预热到 200~250℃ 左右。

推钢机压辊采用 30CrMnSiA 焊丝配合焊剂 431 堆焊层的化学成分见表 6.6。

表 6.6 推钢机压辊堆焊工作层的化学成分

材 料	化学成分 /%					
	C	Si	Mn	Cr	S	P
30CrMnSiA 焊丝	0.31	0.87	0.99	0.89	0.019	0.020
堆焊层第三层	0.112	1.22	1.75	0.60	0.016	0.030

注：压辊材料 ZG45，焊剂采用 HJ431。

### (3) 高温耐磨合金的表面堆焊

这类工件主要是指热轧辊、热锻模、锻铁墩等。热轧辊堆焊材料的选择以轧辊在热轧工作状态下的使用条件为依据。一般轧制时轧辊与轧件的表面温度约为 600~700℃。轧辊表面与轧件接触产生磨损。另外在热轧辊工作时，表面上的各点一会儿与高温的轧件相接触，一会儿又被冷却水所冷却。这样，加热和冷却的反复交替，不可避免地要引起轧辊工作表面的开裂。裂纹的网孔越大，深度越深，轧辊工作时热透层的厚度越大。所以对热轧辊堆焊材料的选择，必须考虑应具有较好的红硬性和耐冷热疲劳的性能。热轧辊形状和尺寸如图 6.33 所示。

通过对热轧辊工作状态的分析，选用 3Cr2W8V 焊丝作为堆焊材料。3Cr2W8V 焊丝中含有较多的易形成碳化物的 Cr、W 元素，在高温下有较高的强度和硬度，即使在 600℃ 的工作条件下，表面硬度能达到 33HRC。为了得到较细密的内部组织，应采用较低的预热温度。但预热温度不能过低，如果预热温度过低不可避免地会产生裂纹。

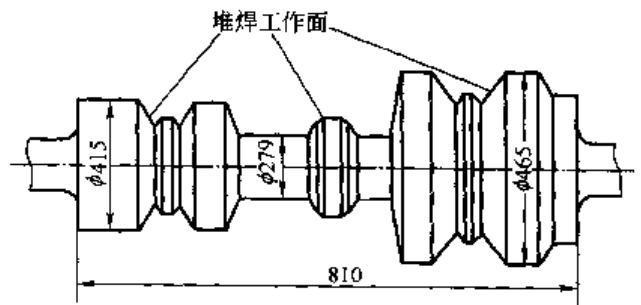


图 6.33 热轧辊形状和尺寸  
(材料 70Mn)

试验表明,不预热堆焊时,在冷轧辊上的堆焊层金属中形成了许多横向裂纹;工件预热到250~300℃时,堆焊过程中的结晶裂纹消除了,但在冷却过程中却产生了纵向的微裂纹;预热温度提高到400~450℃时,堆焊层硬度明显降低,耐磨性能不良。最终确定在轧辊上堆焊3Cr2W8V熔敷材料的预热温度为300~350℃。

为了避免冷却过程中产生裂纹,采用热导率介于3Cr2W8V和轧辊基体材料70Mn之间的Cr-Ni奥氏体钢作为过渡层。这样的工艺措施对采用3Cr2W8V作为工作层的热轧辊堆焊来说,是行之有效的。为了使轧辊堆焊层的残余应力最小,埋弧堆焊后应立即对轧辊进行回火处理。这样,可得到硬度42~44HRC的堆焊层金属,满足使用要求。

采用3Cr2W8V焊丝堆焊热轧辊的工艺参数见表6.7。热轧辊表面采用3Cr2W8V焊丝配合HJ260堆焊工作层的化学成分分析结果见表6.8。

表 6.7 采用3Cr2W8V焊丝堆焊热轧辊的工艺参数

焊丝直径/mm	焊剂	电源极性	堆焊电流/A	电弧电压/V	送丝速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	堆焊速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	堆焊层厚度/mm
3.2	HJ260	直流反接	280~320	30~32	1.3~1.6	550~650	2.0~2.5

表 6.8 热轧辊表面堆焊工作层的化学成分

材 料		化学成分/%							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	W	S	P
3Cr2W8V 焊丝		0.30~0.40	0.20~0.40	$\leq 0.35$	2.20~2.70	—	7.5~9.9		
堆焊层	第一层	0.41	0.76	—	1.20	—	3.70	—	—
	第二层	0.25	0.42	—	1.80	—	6.85	—	—
	第三层	0.19	0.28	—	2.34	—	7.85	—	—

#### 6.2.4.2 钢轧辊的自动埋弧堆焊

轧辊堆焊在堆焊领域中占有很大比重,几乎所有的大、中型钢厂都有轧辊堆焊能力,还有许多研究单位、焊接材料公司等研制和生产有关轧辊堆焊的材料、设备和工艺。被堆焊的轧辊大多是已经磨损而不能使用的废旧轧辊,轧槽表面除了有铁锈、油污外,往往有轧制时造成裂缝和龟裂。采用堆焊技术修复这些废旧轧辊具有重大的经济效益。

钢轧辊的自动埋弧堆焊工艺过程包括:

- ① 钢轧辊堆焊前必须进行表面清理;
- ② 经过表面清理的轧辊放入轧辊预热炉中经过一定时间的预热;
- ③ 在轧辊达到一定的温度后进行钢轧辊的自动埋弧堆焊;
- ④ 对堆焊完成的轧辊进行堆焊层的外观质量检验;
- ⑤ 对轧辊进行缓冷;
- ⑥ 轧辊在使用前进行车削加工。

##### (1) 轧辊堆焊前的车削加工

为了保证轧辊堆焊层质量,提高轧辊堆焊效率,在堆焊前必须做好轧辊的表面清理工作。堆焊前钢轧辊要进行适当的车削,目的是将轧槽工作表面上的裂缝、龟裂全部车除。对于无裂纹处,要除去工作表面的铁锈和油污等。在车削中如发现个别的深孔砂眼,需要用电钻或砂轮将砂眼钻深及扩大,并用手工电弧焊补焊。轧辊堆焊前车削加工的原则是消除轧辊表面的任何缺陷。

轧辊堆焊前车削加工的车削量，新轧辊应根据图纸尺寸将轧辊直径车小8~12mm，以保证堆焊后的轧辊工作表面处于堆焊层的第三层以上。

由于堆焊能使轧辊工作直径始终处于某一个定值，这就改变了过去那种轧辊工作直径从最大直径、经过几次车削到最小直径的惯例。对轧辊工作直径的选定应根据轧钢机调整的方便，与轧辊孔型设计人员协商制定。

轧辊的轧槽在堆焊前车削加工中应考虑在堆焊过程中防止夹渣的问题。加工部分要求没有小于90°的锐角，以防液态金属和熔剂的流失。也不允许车削后的轧槽有较薄的部分，防止轧槽在堆焊过程中出现局部过热。

### (2) 轧辊堆焊前的预热

采用合金钢焊丝对轧辊进行堆焊时，堆焊前的预热是防止堆焊金属产生裂缝的最有效的措施。焊前预热能减小堆焊层金属的冷却速度，减少堆焊层金属的结晶偏析，减小热应力的产生。轧辊堆焊前预热可使基体金属在马氏体相变临界温度以上进行比较充分的分解，能避免堆焊层金属的淬硬倾向，防止堆焊焊缝及热影响区产生裂缝。

轧辊堆焊的预热温度可根据焊丝的含碳量确定，如图6.34所示。

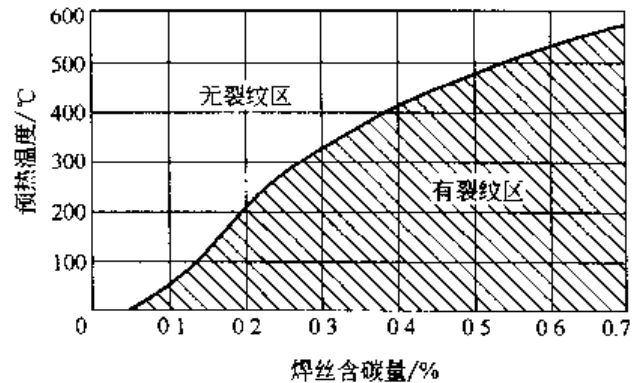


图 6.34 轧辊堆焊的预热温度

目前轧辊堆焊采用的焊丝一般为2Cr13、

3Cr13、30CrMnSiA、3Cr2W8V、3Cr5MoSi、3Cr2W4Mn等合金焊丝。在堆焊过程中，当堆焊层金属与轧辊的基体金属相变临界温度有较大的温差时，会产生较大的应力。在热状态或冷却时，如果应力总和大于堆焊层金属的内在结构力时，堆焊层金属就会产生裂缝。轧辊堆焊前预热和焊后缓慢冷却，造成堆焊层金属与基体金属平衡膨胀和收缩，可防止产生裂缝。

### (3) 轧辊堆焊的工艺参数及操作要点

合理确定轧辊堆焊工艺参数的基本要求是：电弧燃烧稳定、堆焊焊缝成形良好、电能消耗最少、生产效率较高。钢轧辊埋弧堆焊的典型工艺参数见表6.9。

表 6.9 钢轧辊埋弧堆焊的典型工艺参数

焊丝	焊剂	预热温度 /°C	电源极性	堆焊电流 /A	电弧电压 /V	焊丝送进速度 /m·min <sup>-1</sup>	堆焊速度 /m·min <sup>-1</sup>	单层堆焊层厚度/mm
30CrMnSiA	HJ430	250~300	直流正接	300~350	32~35	1.4~1.6	500~550	4~6
2Cr13 3Cr13	HJ150	250~300	直流正接	280~300	28~30	1.5~1.8	600~650	4~6
3Cr2W8V	HJ260	300~350	直流正接	280~320	30~32	1.5~1.8	600~650	4~6

注：焊丝直径3mm。

表中所列的数据是在小电流、低电压、薄层多次堆焊情况下得到的。由于采用小电流和较快的堆焊速度，焊丝中的合金元素在电弧的高温作用下烧损较少，堆焊焊缝的熔透深度较浅。又因采用薄层多次的堆焊方法，保证了轧辊轧槽表面的堆焊层金属具有需要的化学成

分、硬度及金相组织。

采用“小电流、低电压、薄层多次”堆焊方法时，电弧电压不能太低或太高。如果电弧电压高了，虽然对引弧有利，但是在整个堆焊过程中将出现成形高低不平、脱渣困难，影响堆焊层质量。如果电弧电压太低，又会造成引弧困难，在堆焊过程中容易熄弧。堆焊层金属和轧辊基体金属不能很好地焊合，造成堆焊层剥落。所以电弧电压应控制在适当的范围内。

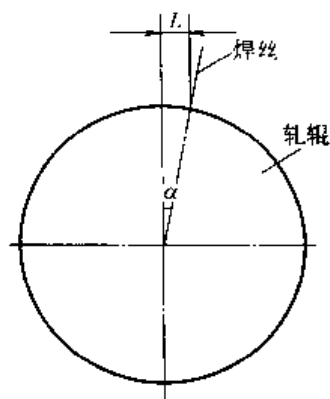


图 6.35 焊丝与轧辊中心顶点距离及焊丝倾斜角度

轧辊自动埋弧堆焊的操作要点如下。

① 轧辊中心、焊丝位置及焊丝倾斜角 钢轧辊埋弧堆焊过程中，应把焊丝从轧辊顶点位置移向与回转方向相反的一边，与轧辊纵轴的交角  $\alpha$  约  $5^\circ$  (见图 6.35)。这样可以避免堆焊熔池中的液体金属和熔渣的流失破坏堆焊焊缝成形。为了确定焊丝从轧辊中心顶点向回转方向相反的一边移开的距离  $L$ ，应知道堆焊熔池的长度，以使用熔池长度控制移开的距离。焊丝移开轧辊中心顶点的距离，可用经验方法求得，即  $L=5\%D$ ，其中  $D$  为轧辊直径 (mm)。

② 堆焊焊缝的节距及堆焊行走速度 堆焊焊缝的节距是指相邻两条螺旋焊缝的重叠间隙。埋弧堆焊焊缝节距大小，除了影响堆焊层表面平整外，还影响堆焊层金属化学成分的均匀性和熔合比。在轧辊自动堆焊中，常采用的方法是减少堆焊金属节距  $m$ ，降低基体金属在堆焊层中的比例，如图 6.36 所示。

当  $m < 0.5b$  时，轧辊基体金属在堆焊层中所占的比例显著减小 [见图 6.36 (b)]。用这种方法进行轧辊自动埋弧堆焊时，轧辊堆焊层第一层的第三、第四螺旋堆焊焊缝上的熔合比  $\gamma = 20\% \sim 30\%$ 。第二层或第三层焊缝的化学成分接近焊丝的成分，满足轧辊堆焊的要求。实际施焊中，堆焊焊缝节距大小的调节，主要通过埋弧焊小车的行走速度控制。

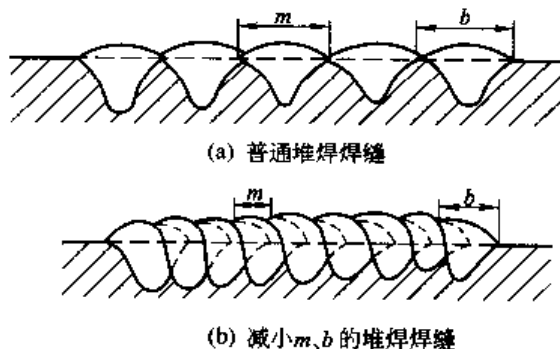


图 6.36 堆焊焊缝节距  $m$  及焊缝宽度  $b$  对熔合比的影响

#### (4) 各类轧辊的堆焊技术

##### 1) 平面轧辊的堆焊

平面轧辊一般按螺旋线堆焊三层以上，达到堆焊尺寸要求就可以了。堆焊尺寸要求除了实际需要的堆焊量外，还包括加工余量、焊缝热胀冷缩的余量 (这部分余量一般约为 4mm)。埋弧堆焊时，如第一层从左向右堆焊，第二层应从右向左堆焊，第三层同第一层方向相同，以后各层依次类推。但是，堆焊到轧辊边缘处时，可能发生熔渣及液态金属流失，造成堆焊层淌瘤。实际生产中可采用下述三种方法防止。

① 在距轧辊边缘 20~50mm 的地方开始堆焊，如图 6.37 (a) 所示，堆焊前轧辊的车削加工按图中规定的尺寸进行。焊丝在 A 处引弧，这时埋弧焊小车不走动；当堆焊第一圈的焊缝达圆周 3/4 时，开动埋弧焊小车，并把小车行走速度调整至堆焊焊缝节距  $m=6 \sim 8\text{mm}$ ，然后以稳定的工艺参数沿轧辊长度方向往复进行多层螺旋形焊缝的堆焊，直至堆焊层尺寸达到要求。这种方法在距轧辊边缘有一段距离不使用的情况下采用。

平面轧辊埋弧堆焊时，堆焊焊缝节距不能过大，节距过大造成堆焊层表面不平整，堆焊层金属化学成分不均匀，堆焊焊缝中的含碳量增加；但堆焊焊缝节距过小容易造成叠积或未熔透。

② 安装引出环，如图 6.37 (b) 所示。选用厚度 8~10mm、宽度 50~80mm 的低碳钢带卷成引出环，该引出环用手工电弧焊预先焊在轧辊辊身的端面上（也可用固定螺丝紧固在辊颈上）。在距离引出环边缘 25mm 处开始引弧，电弧引燃后即开动埋弧焊小车，并把小车的行走速度调节到堆焊焊缝节距  $m=6\sim 8\text{mm}$ ，以稳定的工艺参数沿轧辊长度方向堆焊。当堆焊至轧辊另一端时，要堆焊过引出环边缘 25mm，然后再堆焊第二层。

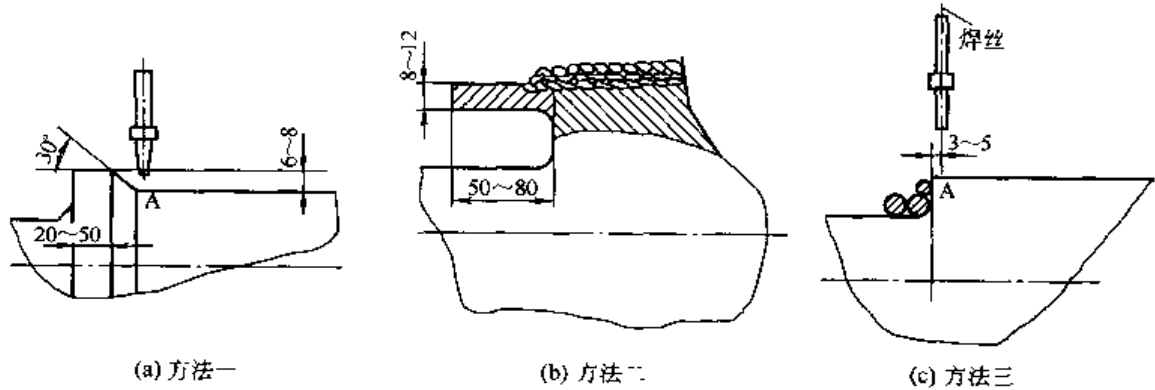


图 6.37 平面轧辊边缘堆焊的几种方法

这种方法在平面轧辊的辊身要求全部堆焊、辊身直径与轧辊颈直径相差较大的情况下采用。

③ 加金属软管法，如图 6.37 (c) 所示。采用几根直径大小不同的金属软管，在辊颈处重叠起来，托住熔融焊剂和液态金属，这种方法使用方便、操作灵活，适用于不同轧辊直径的需要。这种方法在平面轧辊的辊身要求全部堆焊、辊身直径与轧辊颈直径相差较大的情况下采用。应用这种方法时还必须注意两点：

a. 金属软管的重叠高度不能超过轧辊辊面，一般低于轧辊辊面 3~5mm，堆焊端面时应时刻注意不能使金属软管滑动；

b. 注意引弧的位置，一般为距离轧辊端部 3~5mm 处 [图 6.37 (c) 中的 A 处] 引弧。这时堆焊焊缝正好包住轧辊的边缘。

## 2) 带箱形孔和其他异形孔轧辊的堆焊

堆焊带有轧槽的轧辊比堆焊平面轧辊更困难。埋弧堆焊这种带轧槽的轧辊时在操作上应注意以下几点。

① 带有箱形孔、菱形孔、椭圆孔及其他异形孔的堆焊操作顺序。

a. 箱形孔的埋弧堆焊顺序有两种，见图 6.38 中的 (a) 和 (b)。一是先把机头倾斜一定角度，堆焊箱形孔的槽底圆弧，使其达到要求的尺寸；接着把机头调整到垂直于轧辊平面，堆焊箱形孔槽底；然后焊机机头以相反方向倾斜一定角度堆焊箱形孔

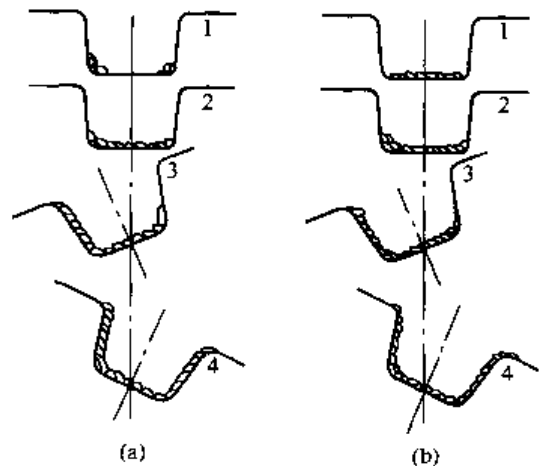


图 6.38 箱形孔堆焊顺序



的两个侧壁。二是机头在垂直于辊身平面的位置堆焊箱形孔的槽底平面，留出槽底的两端圆弧，然后机头倾斜一定角度堆焊箱形孔两端槽底圆弧；最后轧辊倾斜一定角度，机头也以相反方向倾斜一定角度堆焊箱形孔两边的侧壁。

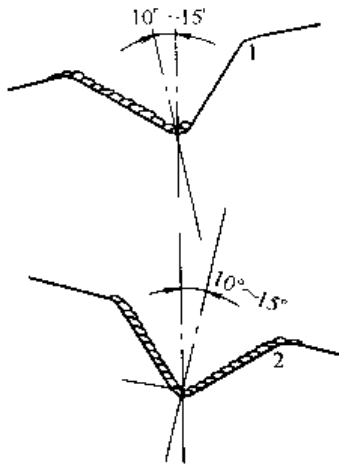


图 6.39 菱形孔堆焊顺序

b. 菱形孔的埋弧堆焊顺序，如图 6.39 所示。堆焊菱形孔或椭圆孔时，上装和机头倾斜一定的角度，从菱形孔的顶角圆弧处开始堆焊，逐渐向菱形孔开口处堆上去，这样反复多次，直至达到要求的堆焊层尺寸。

c. 堆焊槽钢异形孔时，先将轧辊工装向右（或左）倾斜  $10^\circ$  左右，焊机机头倾斜  $5^\circ$  左右。从槽孔左半边（或右半边）的槽底圆弧处堆起，逐渐向槽底凸起中心堆去。然后以同样的方法堆焊另一半槽底，直至达到规定的堆焊尺寸。最后再放大一些堆焊机头的转动角度，进行槽钢异形孔两个侧壁的堆焊。

② 埋弧堆焊槽孔侧壁时，除了堆焊工装和埋弧焊机头需倾斜一定的角度外，还应适当降低堆焊电流和电弧电压。一般降低值为平面堆焊时电流、电压的  $10\%$  左右。因为在堆焊箱形孔、菱形孔及其他异形孔时，侧壁温度不易向外发散，堆焊层熔融金属冷却缓慢，容易造成流淌。

③ 堆焊箱形孔、菱形孔及其他异形孔时，需用金属软管托住熔融金属和焊剂，不使其流失，如图 6.40 所示。这样埋弧焊剂可以形成一定厚度，防止流淌或堆焊层金属产生气孔。

④ 堆焊异形孔时，当切槽深度小于  $100\text{mm}$ 、槽孔宽度大于  $30\text{mm}$  时，可正常进行堆焊。当切槽过深、槽宽窄小时，应在轧辊粗车削时预先把槽宽车大。堆焊时待堆焊深度达到尺寸要求，再堆焊槽孔宽度。

(5) 轧辊堆焊后的缓冷、车削

轧辊堆焊后的冷却应当是缓慢又均匀的冷却，以使由于堆焊层金属收缩和加热不均匀引起的内应力最小。堆焊后轧辊的缓冷有以下几种方法。

① 装入缓冷坑。简易的缓冷坑是在地面下用水泥砌一个坑，上面有绝热材料制成的盖。坑内一般可放入干燥的黄砂、石灰、稻草灰等。简易的缓冷坑如图 6.41 所示。

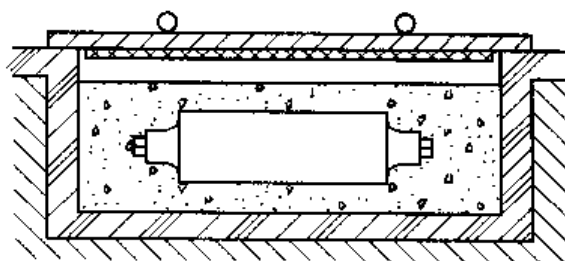


图 6.41 简易缓冷坑示意

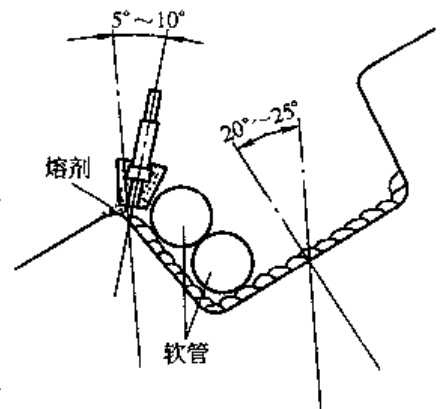


图 6.40 堆焊带有槽孔轧辊时用金属软管托住熔剂

② 装入保温炉。有轧辊预热、保温炉的地方，利用轧辊加热后的炉子预热，并将堆焊完毕的轧辊装入炉内，随炉冷却。

堆焊后的轧辊应立即进行缓冷，冷却至  $100^\circ\text{C}$  左右出炉（或出坑），然后进行机械加工。至于缓冷时间，主要是以轧辊的体积为依据。对于质量小于  $1.5\text{t}$  的轧辊，缓冷时间应在  $12\text{h}$  以上；对于质量在  $3\text{t}$  以上的大轧辊，要求缓冷时间在  $40\text{h}$  以上。

轧辊堆焊中由于采用  $2\text{Cr}13$ 、 $3\text{Cr}13$ 、

3Cr2W8V 等合金焊丝，堆焊后的切削加工时刀具极易磨损和受到破坏。因此，堆焊轧辊粗加工时，采用硬质合金刀具，磨刀时取负角约  $5^\circ$ 。机床转速约  $10\text{r}/\text{min}$ ，吃刀量适当减少。堆焊轧辊的精加工一般没有问题，因为轧辊表面已经过粗加工。对于合金钢堆焊层金属的车削，虽然有一些困难，但还是比较容易克服的。

#### 6.2.4.3 阀门密封面的埋弧堆焊

阀门是管路中必不可少的重要装置。各工业部门都需要大量的各类阀门，如化肥厂需要耐腐蚀的不锈钢阀门，炼油厂、发电厂、电站需要耐高温高压的阀门，矿业部门需要耐磨损的阀门，军工部门需要特殊的阀门。由于阀门质量事故造成的损失是无法估计的，如美国联合碳化物公司在印度的毒气泄露事故就是因阀门质量问题引起的。

提高阀门的质量要从提高密封面的抗腐蚀、抗磨损性能着手，并根据阀门使用情况选用耐高温、耐腐蚀或耐磨损的堆焊材料。在密封面上进行不同的堆焊工艺，以提高阀门密封面承受恶劣工况的能力。

##### (1) 阀门待堆焊面的加工

首先对阀门待堆焊面应按图纸和加工工艺要求进行粗加工，去掉铸、锻时堆焊部位的氧化皮，以免引起焊接缺陷。待堆焊表面不允许铸造夹杂物、裂纹、砂眼、气孔等缺陷。如果发现上述缺陷，应将其清除，焊补后再进行堆焊。

在阀门待堆焊的表面粗加工后用车刀轻划密封面中心线，直径偏差不大于  $\pm 0.5\text{mm}$ ，以便焊丝对中，堆焊位置不产生偏差。堆焊前阀门毛坯面的加工应保证堆焊材料的工作面高度，一般堆焊密封面高度设计为  $3\sim 5\text{mm}$ 。为了保证闸板或阀体的总体尺寸，待堆焊表面应加工成平面。

##### (2) 堆焊工艺参数及操作要点

应先在产品上试堆焊，初步确定堆焊电流、电弧电压、转速后再开始堆焊。堆焊后取样化验堆焊层成分和检验密封面硬度，调整合格后，按确定下来的工艺参数进行正式生产。每种规格阀门的工艺参数确定后，填写在工艺卡上，以后的生产可不必重复试验。但当堆焊原材料变更时，如焊丝、焊剂重新投料，埋弧焊机经过更换或改装，需重新进行工艺性试验，调整工艺参数。堆焊工艺参数的确定应以堆焊层合金成分为主要依据。

合理确定阀门埋弧堆焊工艺参数的要求是：堆焊层金属化学成分合格、堆焊焊道成形良好、脱渣容易，堆焊焊道尺寸符合要求，且有较高的堆焊生产效率。单丝自动埋弧堆焊不同规格闸板、阀体的工艺参数见表 6.10 和表 6.11。

表 6.10 自动埋弧堆焊阀门闸板的工艺参数

阀门型号	堆焊电流 /A	电弧电压 /V	转速 / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	焊丝直径 /mm	密封面宽度 /mm	密封面中心线 直径/mm
Z41H-64 DN 300	700~800	32~36	0.20~0.25	5	24	324
Z41H-64 DN 350	750~850	34~38	0.13~0.20	5	26	376
Z41H-64 DN 400	800~900	35~39	0.08~0.09	5	30	425
Z41H-64 DN 500	850~950	36~40	0.08~0.09	5	35	525
Z41H-64 DN 700	900~1 000	38~44	0.05~0.06	5	35	725

表 6.11 自动埋弧堆焊阀体的工艺参数

阀门型号	堆焊电流 /A	电弧电压 /V	转速 /r·min <sup>-1</sup>	焊丝直径 /mm	密封面宽度 /mm	密封面中心线 直径/mm
Z42H 25 DN 400	400~500	36~40	0.046~0.049	4	16	420
Z42H-25 DN 500	450~550	38~42	0.037~0.040	5	16	524
Z42H-25 DN 600	500~600	40~44	0.031~0.033	5	18	626
Z42H 25 DN 700	550~650	42~46	0.027~0.028	5	20	728

堆焊前将焊丝对准堆焊面中线位置, 保证接触良好。先堆积焊剂, 焊剂的堆积高度为 50~70mm, 以在堆焊过程中堆焊处上面的焊剂不露弧光为宜, 避免破坏堆焊处的保护。按预先调整的堆焊工艺参数堆焊, 随时注意堆焊电流、电弧电压随网路电压的变化, 及时调整。堆焊好一圈后, 应注意始焊位置和熄弧处应搭接 25~30mm, 并使焊道搭接处平缓。堆焊完一批产品, 应随时注意抽检化验堆焊层化学成分和检测硬度。

用自动埋弧堆焊技术对阀门密封面进行堆焊, 采用烧结焊剂, 埋弧堆焊一层, 一般不进行多层焊。如果堆焊层的合金成分不合格, 可车削掉重新堆焊。

### (3) 补焊及焊后热处理

堆焊后如发现少量缺陷, 如气孔、缺肉等, 可采用与堆焊层合金成分相同的焊条补焊。补焊以埋弧堆焊后趁热立即补焊为宜。如发现缺陷较大可车削掉, 重新堆焊。

阀门堆焊后热处理的目的是消除热应力, 避免加工后密封面变形影响密封, 避免焊道延迟裂纹, 调整堆焊层硬度。各种阀门堆焊件原则上埋弧堆焊密封面后都应进行回火处理。确定回火温度应综合考虑堆焊层和基体两方面的因素。当堆焊层材料要求必须进行热处理以达到技术要求的硬度值, 如 Cr13 堆焊层, 应按堆焊层材料本身的要求热处理。消除应力热处理不应改变堆焊层的性能, 一般碳钢基体回火温度选择在 650℃ 左右。

#### 6.2.4.4 药芯焊丝埋弧堆焊实例

##### (1) 在电力工业中的应用

药芯焊丝气体保护焊可用于堆焊电力工业中的耐磨、耐腐蚀部件, 如电厂的磨煤辊、高压阀门密封面、过热蒸汽管及水轮机叶片等。磨煤辊是用于研磨煤粉的耐磨部件, 由于煤中含石英等坚硬杂质, 故磨辊表面需经受强磨料磨损, 要求堆焊金属不仅要具有高硬度, 还需含有大量碳化物 (30%~50%) 才能满足磨损要求。由于受冲击力不大, 允许工作面存在细微裂纹。针对这种情况, 国内外通用的耐磨材料为高铬铸铁合金, 堆焊金属成分为: C 3%~5%, Cr 20%~32%, 其他成分小于 5%。通常做成药芯焊丝, 规格一般为直径 3.2mm 或 4mm。

国产药芯焊丝已成功用于埋弧堆焊中速磨煤机磨辊, 取得了良好的经济效益。采用药芯焊丝埋弧堆焊磨煤辊时, 配与烧结焊剂 SJ107, 可以获得优良的脱渣性和焊道成形。堆焊设备采用 MZ-1000 型埋弧焊机, 配合自动行走小车及焊接操作机架。堆焊过程不需预热和缓冷, 空冷即可。堆焊电流 300~500A, 电弧电压 26~28V。

(2) 在冶金工业中的应用

冶金工业中多数耐磨零部件在高温和交变载荷条件下工作，工况条件十分恶劣，要求耐磨表面需具有良好的高温强度、耐热疲劳性能及耐磨性能。目前，药芯焊丝已用于热轧辊、型钢轧辊、支承辊及输送辊的堆焊制造与修复。为了满足高温耐磨性的要求，这类药芯焊丝中加入多种碳化物形成元素，如 Cr、Mo、W、V 等。堆焊时应预热、缓冷，并需要进行焊后热处理，以达到易于加工和提高使用性能的目的。

采用药芯焊丝埋弧堆焊技术，对型钢轧辊表面堆焊修复的工艺流程为：

轧辊粗加工→超声波探伤→预热→埋弧堆焊→焊后热处理→轧辊表面精加工→堆焊金属硬度检验→超声波探伤→装机使用。

埋弧堆焊药芯焊丝及焊剂：药芯焊丝 SMD502，直径 3.2mm；烧结焊剂 SJ107 或 SJ108。

埋弧堆焊设备：MZ-1000 埋弧焊机、200kW 箱式加热炉、堆焊机床、650 型车床。

堆焊工艺及参数：

- ① 预热温度 350℃，层间温度 350℃；
- ② 堆焊电流 350~450A，电弧电压 28~35V，焊丝伸出长度 30~40mm；
- ③ 焊后退火处理，加热温度 560℃，保温 6h，随炉缓冷。

采用上述埋弧堆焊工艺修复的型钢轧辊，修复费用约为制造新轧辊的 60%，而使用寿命为新轧辊的 150%。

英国焊接合金公司推荐轧辊埋弧堆焊用药芯焊丝的成分及典型应用见表 6.12。

表 6.12 轧辊埋弧堆焊用药芯焊丝的成分及典型应用

焊丝牌号	合金类型	堆焊层典型化学成分/%						堆焊层硬度 /HRC	应用
		C	Mn	Si	Cr	Mo	其他		
R35-S	Cr-Mo 钢	0.12	1.5	1.0	1.2	0.7	—	35~40	滚道辊、传动轴、辊颈表面
R50-S		0.25	2.0	0.9	4.1	1.1	—	47~52	板坯和方坯辊、矫直辊和工作辊、折卷机辊和粗轧机座
CRD S	Cr-Mo-V-W 工具钢	0.30	1.2	0.5	3.0	—	W 9.0 V 0.1	50~55	热带轧机辊、型钢轧机辊、扒鳞皮机辊和打卷机辊、输送辊和轧边机辊、粗轧机辊和支承辊
W-S		0.45	2.5	0.6	6.0	1.6	W 1.3	54~57	
420-S	Cr13 马氏体不锈钢	0.25	2.1	0.8	12.0	—	—	47~50	连铸机辊和扒鳞皮机辊、热带轧机辊和棒材轧机辊、炉子耳轴
1341NM-S		0.12	0.6	0.8	13.0	0.8	Ni 4.0	40~45	
D-S		0.30	1.0	0.4	12.5	1.5	W 1.0 V 2.1 其他 3.0	48~52	
N45LC S	缓冲材料 和其他特殊材料	0.05	4.0	0.5	—	Ni 42	其他 2.0	—	用于铸铁辊的缓冲材料
510Nb-S		0.05	1.0	0.5	5.5	1.0	Nb 1.5	—	用于高碳钢辊后的缓冲材料
168Nb-S		1.10	1.2	0.9	6.5	—	Ni 0.8 Nb 9.0	58~62	折卷机辊和工作辊

注：焊丝需配用相应的焊剂。

## 6.3 气体保护电弧堆焊

### 6.3.1 钨极氩弧堆焊

#### 6.3.1.1 钨极氩弧堆焊的工艺特点

钨极氩弧焊 (TIG) 采用惰性气体保护, 焊接过程中基体金属与填充金属中的合金元素不易氧化烧损。氩气不溶于金属, 避免了堆焊层中出现气孔等缺陷。非熔化极 (钨极) 惰性气体保护氩弧堆焊的特点是保护效果好、可见度好、电弧稳定、飞溅少。氩弧焊除了被广泛用于一些有色金属、特殊合金钢的焊接外, 还被应用于一些特殊材料的堆焊。由于是惰性气体保护, 堆焊层质量优良, 适用于不锈钢和有色金属的堆焊。

氩弧堆焊分为手工钨极氩弧堆焊和自动钨极氩弧堆焊两种。按其使用电源的不同, 分为钨极交流氩弧堆焊和钨极直流氩弧堆焊。实际工作中根据堆焊材料和基体材料的不同适当选择。钨极氩弧堆焊的应用范围见表 6.13。

表 6.13 钨极氩弧堆焊的应用范围

堆焊材料	基体材料	氩气纯度/%	电源种类
HS111 焊丝及其他钴基材料	碳素钢、低合金钢、不锈钢等	99.7	直流正接
镍及镍合金焊丝	碳素钢、低合金钢、不锈钢等	99.7	直流正接
铝锰青铜等铜合金	碳素钢、不锈钢等	99.8	交流
1Cr18Ni9Ti 等不锈钢	碳素钢、低合金钢等	99.7	直流正接

手工钨极氩弧堆焊时, 工件吸热少、熔深浅、堆焊层形状易控制, 可进行全位置堆焊, 变形小, 常用来代替氧-乙炔火焰堆焊, 稀释率比氧-乙炔火焰堆焊大, 但比其他电弧堆焊小。钨极氩弧堆焊的合金元素过渡系数高, 但缺点是熔敷效率低、保护气体贵, 不适于大批量生产; 宜堆焊小而质量要求高, 且形状较复杂的零件堆焊, 如汽轮机叶片上堆焊很薄的钴基合金等。

手工钨极氩弧堆焊的工艺参数包括: 堆焊电流、电弧电压、氩气流量、喷嘴直径、钨极直径及伸出长度、填充焊丝直径等。堆焊工艺参数应根据基体和堆焊材料、堆焊层的几何尺寸等合理地选择。

自动钨极氩弧堆焊因能控制焊接工艺参数, 可获得性能稳定、质量高的堆焊层。堆焊材料有实芯、药芯或铸条等, 也可用粉粒状堆焊合金, 堆焊时将堆焊材料输送到电弧区内。适用于形状规则, 堆焊面积较大的零件。

氩弧堆焊的填充焊丝要均匀地加入熔池中, 不能扰乱氩气流。焊丝端部应始终处于氩气保护区内, 以免氧化。堆焊即将结束时多填充焊丝, 然后慢慢拉开电弧, 直至熄弧, 以防止产生过深的弧坑。堆焊完毕和切断电弧后, 不应立刻将焊炬抬起, 必须在 3~5s 内继续送氩气, 直到钨极及熔池区稍冷却后再停止输送氩气, 并抬起焊炬。若气阀关闭过早, 会引起炽热的钨极及堆焊层表面氧化。

#### 6.3.1.2 钨极氩弧堆焊实例

##### (1) 铝青铜阀门密封面的堆焊

某厂生产的海军船舶用阀门, 基体材料为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢, 密封面为铝青铜材料, 采用钨极交流氩弧堆焊工艺。堆焊设备为带高频振荡器引弧和稳弧装置的 HAS-300 型交流氩弧焊机, 焊炬为 Q-7 型水冷式。堆焊材料使用氩弧焊用铝青铜焊丝, 牌号为

QA19-2。

1) 焊前准备

- ① 待堆焊表面需经车削加工，表面不得有气孔、裂纹、夹渣、包砂等缺陷。
- ② 根据密封面要求的宽度，车削时划出两条基准线供堆焊时参考。
- ③ 选用直径 4mm 钨钨极，选用内径 14mm 的陶瓷喷嘴。

2) 堆焊操作及工艺参数

① 引弧 利用高频引弧器引弧，钨极不得与工件接触。为防止冷的钨极引弧时产生钨飞溅，先在引弧板上引燃后再转入堆焊道。

② 堆焊 喷嘴与工件表面保持 75° 夹角，尽量采用短弧堆焊，以增加保护效果。填充焊丝倾角约 15°，倾角太大干扰电弧及气流稳定性。焊炬、填充焊丝和工件之间的相对位置见图 6.42。填充焊丝不要进入弧柱区，应送入弧柱周围使其熔化，焊丝送入前始终处在电弧周围的氩气保护气氛中预热。根据车削时划出的基准线，焊炬横向移动使堆焊层达到所需宽度。堆焊第一层时注意控制熔深；堆焊第二层及以上各层时，先用钢丝刷将已堆焊好的焊层表面清除干净，露出青铜金属光泽方可继续堆焊。堆焊铝青铜密封面的工艺参数见表 6.14。

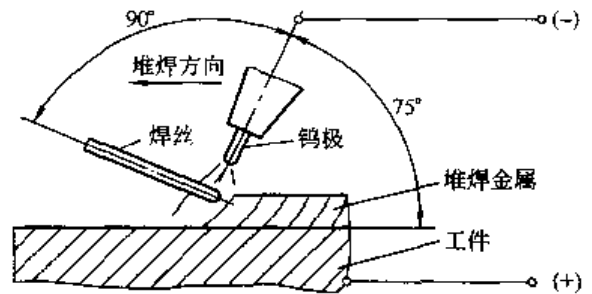


图 6.42 钨极氩弧焊堆焊示意

堆焊第一层时注意控制熔深；堆焊第二层及以上各层时，先用钢丝刷将已堆焊好的焊层表面清除干净，露出青铜金属光泽方可继续堆焊。堆焊铝青铜密封面的工艺参数见表 6.14。

表 6.14 堆焊铝青铜密封面的工艺参数

基体材料	焊丝		电源极性	堆焊电流 /A	氩气流量 /L · h <sup>-1</sup>	堆焊速度 /mm · min <sup>-1</sup>	电弧长 /mm	喷嘴内径 /mm	钨极直径 /mm	焊后热处理
	牌号	直径 /mm								
1Cr18Ni9Ti	QA19-2	4	交流	160	600	50	12	14	4	不预热焊后空冷
Cr5Mo	HS111	4	直流正接	140	550	65	12	14	4	预热 400℃ 焊后缓冷
Cr5Mo	HS111	4	直流正接	120	500	70	10	14	4	预热 400℃ 焊后缓冷
低碳钢	HSCuAl	3	直流正接	110	500	100	10	12	2	不预热焊后空冷

③ 熄弧 熄弧时为了防止弧坑疏松、缩孔和裂纹缺陷，堆焊至接头处应加快堆焊速度及焊丝填加频率。待弧坑填满后，缓慢地将电弧拉长而熄弧。熄弧后焊炬喷嘴依然对着焊道，利用滞后关闭的氩气保护待冷却的熔池及钨极不受氧化。

3) 缺陷的焊补

- ① 对于接头气孔、疏松缺陷先用砂轮磨去，缺陷去除后采用氩弧焊方法补焊。
- ② 对于裂纹缺陷要用砂轮将裂纹打磨掉，为防止补焊时再次产生裂纹，裂纹底部应打磨至基体金属，凹槽底宽大于 10mm，过渡处均为圆角，方可补焊。
- ③ 去除缺陷时，不得对堆焊部位施加任何冲击力。用着色探伤方法确认缺陷已完全清除后方可补焊。
- ④ 缺陷面积较大时，应将堆焊层全部车除掉，然后重新堆焊。同一处缺陷补焊次数不得超过两次。

## (2) 钴基合金堆焊

### 1) 堆焊操作要点

① 堆焊前对工件按规定预热温度进行预热；

② 堆焊时，钨极端部与工件表面保持约为填充焊丝直径 1.5 倍的距离，钨极与工件表面夹角约为  $75^\circ$ ；

③ 电弧引燃后，待基体表面堆焊起始点形成熔池后，电弧作适当大小的圆弧形摆动；

④ 当熔池扩大后，将焊丝端部加入钨极与电弧之间使其熔化，并使熔滴滴入熔池；

⑤ 退出焊丝，将电弧在熔池前缘作弧形摆动，使熔池向堆焊进行方向扩展；

⑥ 按以上要点重复进行，操作与氧-乙炔火焰堆焊相似。

### 2) 堆焊注意事项

① 堆焊前检查高频振荡器、氩气控制回路、冷却水流量及焊接电源电压是否正常；

② 堆焊过程中，弧长应保持不变；

③ 当工件较小时，由于堆焊工件急速升温，会使堆焊表面氧化，造成堆焊困难，应适当降低预热温度或不预热，特别是当基体为奥氏体不锈钢时更应注意；

④ 一般堆焊两层，当堆焊高度要求 3mm 以下时，可堆焊一层。

## 6.3.2 熔化极气体保护电弧堆焊

熔化极气体保护电弧堆焊用的气体有  $\text{CO}_2$ 、Ar 及混合气体，和一般熔化极气体保护焊工艺没有实质区别。 $\text{CO}_2$  气体保护电弧堆焊成本低，但堆焊质量较差，只适合堆焊性能要求不高的零件。自保护电弧堆焊采用专用药芯焊丝，堆焊时，不需外加保护气体。设备简单、操作方便，并可以获得多种成分的堆焊合金。

### (1) 实芯焊丝堆焊

实芯焊丝气体保护堆焊采用  $\text{CO}_2$  气体或  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$  混合气体，具有较高的熔敷速度，但稀释率也较高（约 15%~25%）。由于高合金成分焊丝的拉拔受到限制，实心焊丝气体保护堆焊主要用于合金元素含量较低、金属与金属摩擦磨损类型的零件进行堆焊。对于合金元素

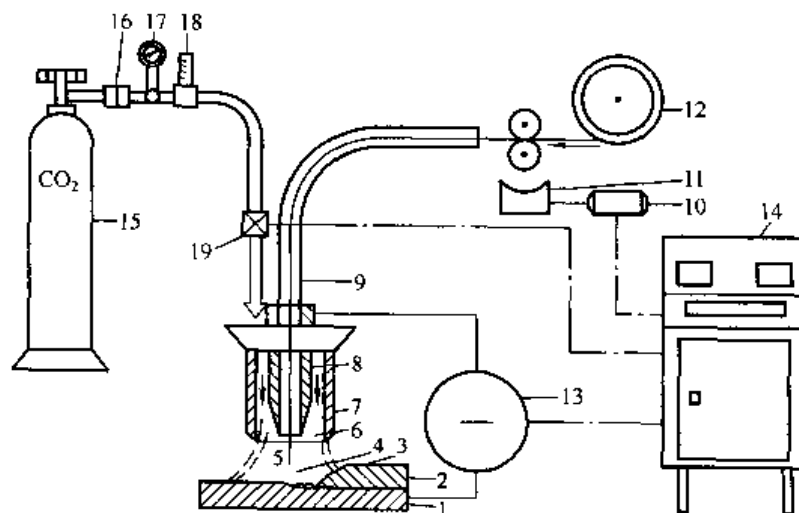


图 6.43  $\text{CO}_2$  气体保护堆焊示意

- 1—工件；2—堆焊层；3—熔池；4—电弧；5—焊丝；6— $\text{CO}_2$  保护气体；7—喷嘴；8—导电嘴；  
9—软管；10—送丝电机；11—送丝机构；12—焊丝盘；13—焊接电源；14—控制箱；  
15— $\text{CO}_2$  气瓶；16—干燥预热器；17—压力表；18—流量计；19—电磁阀

含量较高的堆焊合金，可采用药芯焊丝气体保护堆焊工艺。

CO<sub>2</sub> 气体保护堆焊（如图 6.43 所示）是采用 CO<sub>2</sub> 气体作为保护介质的一种堆焊工艺。CO<sub>2</sub> 气体以一定的速度从喷嘴中吹向电弧区形成了一个可靠的保护区，把熔池与空气隔开，防止 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等侵入熔池，从而提高了堆焊层的质量。

目前采用低碳低合金钢焊丝（如 H08Mn2SiA、H10MnSi、H04Mn2SiTiA、H08MnSiCrMo 等）的 CO<sub>2</sub> 气体保护电弧堆焊应用广泛。我国还采用 CO<sub>2</sub> 气体保护堆焊，在自动送进 H08Mn2SiA 焊丝的同时，向熔池送入 YG8（WC 92%，Co 8%）合金粉末，得到了 WC+α 固溶体的堆焊层，如图 6.44 所示。

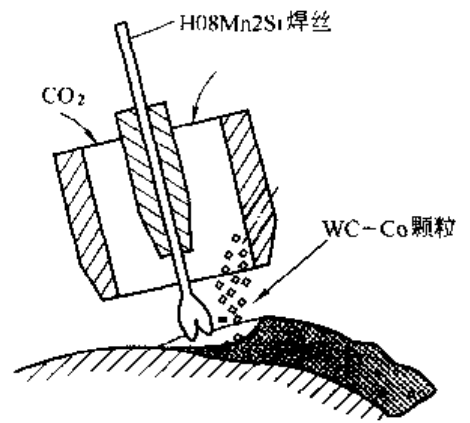


图 6.44 外送颗粒合金的 CO<sub>2</sub> 气体保护堆焊

CO<sub>2</sub> 气体保护堆焊的主要优点是：堆焊时对工件表面的油锈不敏感，堆焊层质量稳定，堆焊层硬度高，生产效率高且成本低，不需要清渣，CO<sub>2</sub> 气体容易供应等。缺点是：堆焊时飞溅大、合金元素烧损严重。

实芯焊丝振动电弧堆焊是将工件夹持在专用机床上，以一定的速度旋转，堆焊机头沿工件轴向移动。焊丝一方面自动送进，同时以一定的频率和振幅振动。堆焊时不断向堆焊区加 4%~6% 碳酸钠水冷却液。实芯焊丝振动电弧堆焊示意图 6.45。

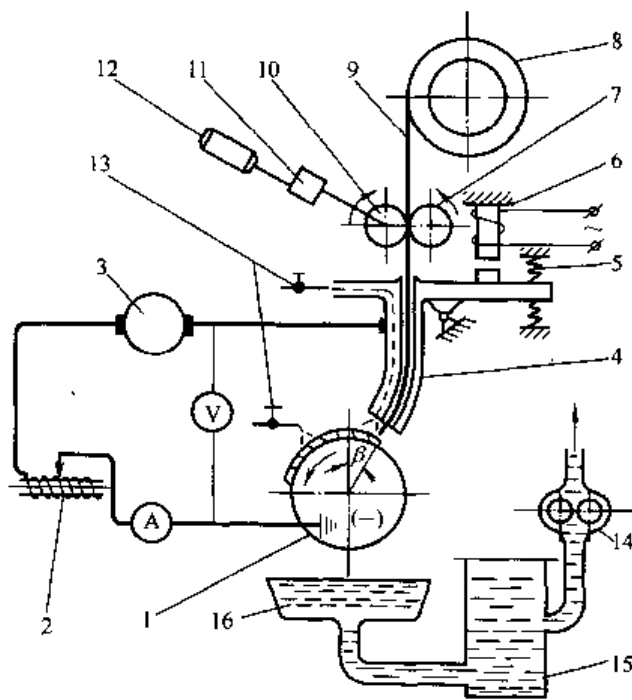


图 6.45 实芯焊丝振动电弧堆焊示意

- 1—堆焊工件；2—电感调节器；3—直流电源；4—焊嘴；  
5—弹簧；6—电磁振动器；7—压紧滚轮；8—焊丝盘；  
9—焊丝；10—送丝滚轮；11—减速器；12—送丝电动机；13—调节阀；14—水泵；  
15—沉淀箱；16—冷却液接盘

焊丝一方面自动送进，同时以一定的频率和振幅振动。堆焊时不断向堆焊区加 4%~6% 碳酸钠水冷却液。实芯焊丝振动电弧堆焊示意图 6.45。

振动电弧堆焊实际是等速送进焊丝自动电弧焊的一种特殊形式，焊丝端部相对于工件表面进行有规律的振动。堆焊过程很稳定、飞溅小，堆焊层厚度可控制在 0.5~3.0mm。实芯焊丝振动电弧堆焊的主要特点如下。

① 采用细焊丝（直径 1.0~2.0mm）、低电压（14~18V）、脉冲引弧和有规律的小熔滴短路过渡，能得到薄而均匀的堆焊层。

② 电弧功率小，使工件变形小、熔深浅，堆焊热影响区小。

③ 在堆焊区加冷却液可以减小变形、硬化表面层和增加耐磨性、减小热影响区宽度和降低稀释率。

④ 堆焊过程自动化，生产效率高，劳动条件好。

这种方法适合于直径较小、要求变形小的旋转体零件（如轴类、轮类），目前已在我国农机、拖拉机、汽车、工程机械等修复工作中普遍应用。高铬不锈钢实芯焊丝气体保护堆焊



的工艺参数见表 6.15。

表 6.15 高铬不锈钢实芯焊丝气体保护堆焊的工艺参数

焊丝直径/mm	0.8	1.0	1.2	1.6	备 注
堆焊电流/A	80~180	120~200	180~250	250~330	直流缓降特性电源， 采用直流正接
电弧电压/V	18~19	18~32	18~32	18~32	

采用中碳或高碳钢焊丝，在冷却液下堆焊时，堆焊层中容易产生裂纹，这将大大降低零件的疲劳强度。为了改善堆焊层质量、防止裂纹、提高零件的疲劳强度，又发展了加入 CO<sub>2</sub> 气体、水蒸气、惰性气体、熔剂层等保护介质的振动电弧堆焊。

堆焊实例如下。

① 堆焊汽车曲轴 采用水蒸气保护堆焊工艺，焊丝直径 1.6mm，电弧电压 16V，振幅 2mm，送丝速度 1.6m/min，工件转速 2.9r/min，曲轴堆焊前预热 150~200℃，堆焊层硬度 35HRC。

② 拖拉机车轴的堆焊修复 采用振动堆焊工艺，焊丝直径 1.6mm，电弧电压 17.5V，送丝速度 1.5m/min，堆焊电流 160A，振幅 2mm，工件转速 2r/min，堆焊层厚度 2mm。

## (2) 药芯焊丝堆焊

药芯焊丝气体保护堆焊是一种气体-焊剂联合保护的堆焊方法，堆焊时焊丝的药芯受热熔化，在堆焊层表面覆盖一层薄薄的熔渣。药芯焊丝堆焊可以采用自保护焊、气体保护焊或表面喷焊完成堆焊。药芯焊丝堆焊材料的品种十分丰富。药芯焊丝填充率可在 10%~60% 的范围内进行调整，只要通过调整药芯焊丝填充率和药芯合金成分，便可选择适合于各种场合的堆焊药芯焊丝。

用药芯焊丝堆焊，生产效率为手工电弧堆焊的 3~7 倍，同时由于其高效率、低能耗、低劳动力成本、高的材料利用率及质量好等，比手工电弧焊条堆焊具有明显低的综合成本。而实芯焊丝堆焊材料需通过冶炼、轧制及拉拔等工序，它仅适于大批量且合金含量低的品种。对于合金含量高而批量少的堆焊焊丝，造价较高，无法与药芯焊丝相比拟。因此，表面堆焊药芯焊丝几乎可以替代绝大部分堆焊焊条及实芯焊丝来完成堆焊。

药芯焊丝堆焊多采用直流平特性电源，小面积堆焊时可采用单丝堆焊设备，大面积堆焊或是为了改善热循环可选用多丝焊，用 CO<sub>2</sub> 气体保护时采用直流正接。目前采用药芯焊丝、自保护焊丝的自动或半自动堆焊的应用已日趋广泛，主要应用在冶金设备、汽车、拖拉机易磨损件的制造等。

### 6.3.3 自保护电弧堆焊

不加保护气体的自保护药芯焊丝明弧堆焊，在国外应用很广，我国也有采用。其中半自动明弧堆焊用得较多。这种方法的突出优点是设备简单、方便灵活，并可堆焊多种成分的合金。这是一种值得推广的堆焊方法。

#### (1) 半自动自保护管状焊丝堆焊

连续送丝堆焊工艺除了要有特殊的管状焊丝外，还应有相应的堆焊设备才能实现半自动堆焊工艺。这种堆焊方法采用的电源是一种用电动风扇冷却的、具有下降特性的普通硅整流电弧焊电源，负载率为 100% 时，焊接电流可达 400A。对于连续焊接电流能达 400A 的下降特性直流电源（不管是旋转式的还是整流式的）都可采用。

半自动送丝机是自保护管状焊丝电弧堆焊的主要设备，其中还包括大功率空气冷却的焊枪。焊枪与送丝焊机之间的用长度 5m 的导电软管相连。另外还附有远距离控制线路，以便于现场灵活操作。

送丝电机的励磁电流是以电弧电压作为调节信号的。操作中电弧长度的改变（即电弧电压的变化）直接控制了送丝电机的转速，从而自动地补偿电弧长度的变化，使电弧燃烧得以恢复正常状态。另外，在送丝系统中，还装有一个动力制动器。当电弧熄灭后，能马上刹住送丝电机的旋转，以保持焊丝一定的伸出长度。

管状焊丝盘装在焊机机壳内，这样能防止积灰，保证送丝系统清洁和导电良好。不锈钢自保护管状焊丝堆焊的工艺参数见表 6.16。

表 6.16 不锈钢自保护管状焊丝堆焊的工艺参数

焊丝数 (直径 2.4mm)	平特性电源 (额定电流)/A	堆焊电流 ·A	电弧电压 /V	堆焊速度 /cm·min <sup>-1</sup>	熔敷速度 /kg·h <sup>-1</sup>	稀释率 /%	摆动频率 /次·min <sup>-1</sup>
1	400	300	27	51	5.4	20	0
2	800	600	27	11	13.6	12	20
3	1 200	900	27	10	20.4	12	20
6	2×1 200	1 800	27	9	38.6	12	20

注：负载持续率 100%。

## (2) 工艺及注意事项

### 1) 操作工艺

首先应了解堆焊部件的工作条件及磨损情况，分析磨损原因，根据部件的服役要求，选择合适的管状焊丝。具体操作时，先把工件磨损表面已毁坏和疲劳的金属层用开槽焊条除去。必要时开出合适的槽口，然后装上所需要堆焊的焊丝。直径 2.8mm 的管状焊丝，一般适用的电流为 250~400A。大电流适用于大件和要求熔敷速度高的地方，小电流适用于不希望有变形和稀释的小件。

在引弧前，调整好焊丝伸出长度。引弧靠焊丝擦划堆焊表面来实现。焊丝与工件表面呈 70° 夹角，堆焊时以圆形运条方式比较合适。焊丝的伸出长度（焊枪导电嘴端部到焊丝端部的距离）直接影响堆焊的熔敷速度和堆焊层的稀释率。同等电流情况下，焊丝伸出长度大，堆焊的熔敷速度就大，而堆焊层的稀释率就越小。管状焊丝堆焊的焊接电流参数见表 6.17。

表 6.17 几种管状焊丝适用的堆焊焊接电流

焊丝牌号	工 艺 参 数			
	直径/mm	极 性	焊接电流(大规范)/mm	焊接电流(小规范)/mm
3110	2.8	直流正接	350~375	250
3205	2.8	直流正接	350~375	250
4415	2.8	直流正接	350~375	250
4601	2.8	直流正接	350~375	250
4625	2.8	直流正接	350~375	250
3220	2.8	直流正接	350~375	250
4923	2.8	直流正接	320~400	250~300

## 2) 影响送丝稳定性的因素

① 焊丝 焊丝端部是否锉圆、倒角，焊丝有无弯曲，焊丝表面是否有阻轧处（如接头等）。

② 电缆导管 主要是焊丝电缆导管内有无堵塞，缆线是否过于弯曲。

③ 导电嘴 导电嘴是否被焊渣或金属熔滴堵塞，导电嘴内径是否与焊丝直径相匹配。

④ 送丝机构 检查送丝滚轮是否压丝过紧，送丝轮槽口宽度是否与焊丝直径相匹配，电缆导管进口是否与送丝轮槽口在同一水平线上。

⑤ 焊丝盘 检查绕在焊丝盘上的焊丝是否搞乱轧住。

## 3) 影响堆焊层质量的因素

① 焊丝存放是否妥当，不能受潮、生锈；

② 堆焊时送丝量是否正常；

③ 焊枪与工件的距离是否正常，一般应为 50mm；

④ 焊接参数是否符合规定的要求；

⑤ 焊件表面是否有氧化、油污、受潮、气泡、杂质等；

⑥ 焊枪与焊件平面是否保持  $70^\circ$  夹角，不能太小。

## 6.4 等离子弧堆焊

等离子弧堆焊和喷涂是两种相似的加工方法，堆焊是指在一种金属表面堆上另一种金属，堆焊层厚度一般都比较大（毫米至厘米数量级）；喷涂则是指在一种金属或非金属表面涂上另一种金属或非金属，涂层厚度一般较薄（微米级）。目的都是为了使材料或零件获得耐磨、耐腐蚀、耐热、耐氧化、导电、绝缘等特殊使用性能。

等离子弧堆焊的主要优点是生产效率和质量高，尤其是涂层的结合强度和致密性均高于火焰喷涂和一般电弧喷涂。采用非转移弧的等离子弧喷涂时，工件不必接电源，因此特别适合喷涂不导电的非金属材料，这是等离子弧喷涂获得广泛应用的一个重要原因。

### 6.4.1 等离子弧堆焊的特点

等离子弧是由特殊结构的等离子体发生器产生的，用于堆焊的等离子弧是由特制的等离子枪体产生的。等离子弧与一般电弧的最大区别是，等离子弧在喷嘴内受到“压缩”，而一般电弧是自由电弧。等离子弧具有热压缩效应、机械压缩效应和电磁压缩效应的特点。这三种压缩效应对电弧的作用，使电弧受到强制压缩而产生等离子弧。不同应用条件下对等离子弧的性能有不同的要求，可以通过喷嘴结构、离子气种类和流量的选择以及电能的输入条件加以控制。

等离子弧的温度分布存在很大的温度梯度。因为气体离开电源后吸收热量减少，同时受到周围大气影响，使气体电离度急剧减少。等离子弧射流的温度分布见图 6.46。等离子弧轴心温度下降的现象对非转移弧尤为突出。但是在转移弧情况下，气体一直处于弧柱加热状态下，温度下降较为缓慢（见图 6.47）。

等离子弧堆焊有如下几个方面的优点。

#### (1) 等离子弧温度高、热量集中

等离子弧具有压缩作用，中心温度可达  $16\,000\sim 32\,000\text{K}$ 。熔化极氩弧焊为  $10\,000\sim 14\,000\text{K}$ ，钨极氩弧焊为  $9\,000\sim 10\,000\text{K}$ 。由于等离子弧温度高、热量集中，被加工材料不受其熔点高低的限制。

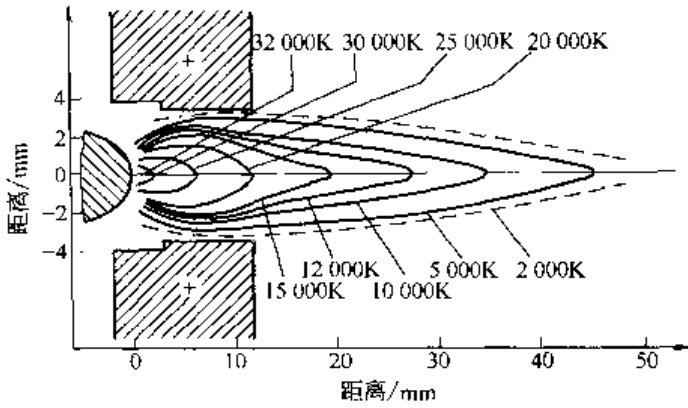


图 6.46 等离子弧射流的温度分布

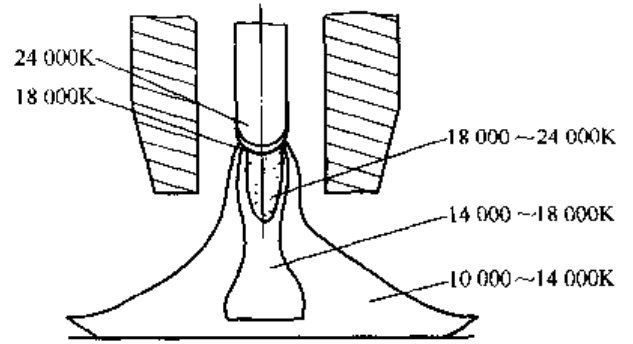


图 6.47 等离子弧温度缓慢下降（转移弧）

(2) 等离子弧热稳定性好

等离子弧中的气体是充分电离的，所以电弧更稳定。等离子弧堆焊电流和电弧电压相对于弧长在一定范围内的变化不敏感，即使在弧柱较长时仍能保持稳定燃烧，没有自由电弧易飘动的缺点。

(3) 等离子弧具有可控性

① 可以在很大范围内调节热效应，除了改变输入功率外，还可以通过改变气体的种类、流量以及喷嘴结构尺寸来调节等离子弧的热能和温度。

② 等离子弧气氛可以调整，通过选择不同的工作气体可获得惰性气氛、还原性气氛、氧化性气氛。

③ 等离子弧射流的刚柔度，即电弧的刚柔度，可以通过改变电弧电流、气体流量和喷嘴压缩比等来调节。

等离子弧堆焊温度高，热量集中，可以堆焊难熔材料并提高堆焊速度。由于堆焊材料的送进和等离子弧的工艺参数是分别独立控制的，所以熔深和表面形状容易控制。改变电流、送丝（粉）速度、堆焊速度、等离子弧摆动幅度等就可以使稀释率、堆焊层尺寸在较大范围内变化。稀释率最低可达 5%，堆焊层厚度在 0.8~6.4mm，宽度为 4.8~38mm。

等离子弧堆焊按堆焊材料形状分主要有填丝和粉末两种堆焊形式。双热丝填丝和粉末等

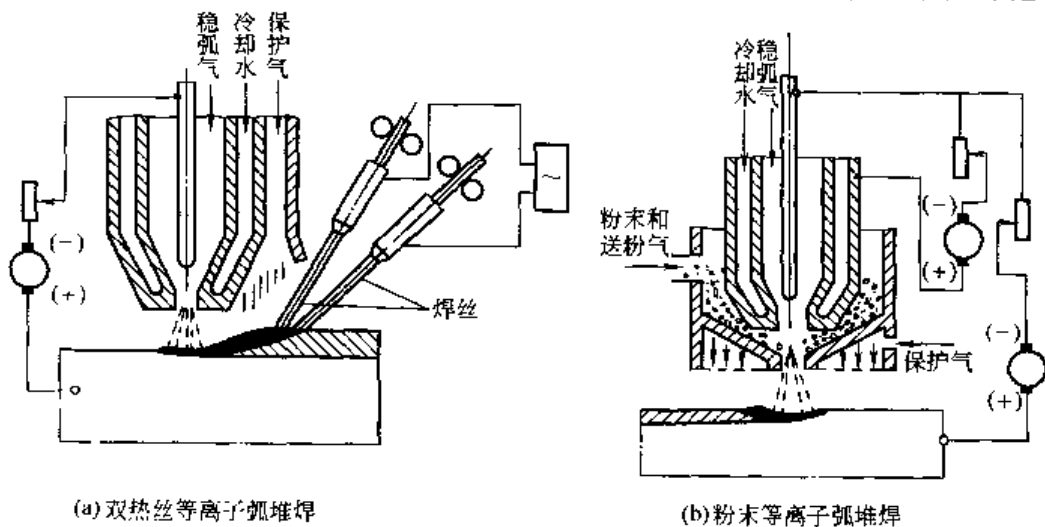


图 6.48 等离子弧堆焊示意

离子弧堆焊的示意如图 6.48 所示。其中粉末等离子弧堆焊发展较快，应用更广泛。

产生等离子弧的工作气体（离子气）常用的有氮气（ $N_2$ ）、氢气（ $H_2$ ）、氩气（Ar）、氦气（He）。选用哪种气体或混合气体，要根据具体的材料和工艺要求。等离子弧堆焊时，选用 Ar 作工作气体是比较理想的。Ar 比空气密度大，是良好的惰性保护气体。Ar 不与金属发生化学反应，不溶解于金属中。等离子弧堆焊一般采用工业纯度的 Ar，其纯度要求见表 6.18。

表 6.18 等离子弧堆焊对氩气纯度的要求

Ar/%	$N_2$ /%	$O_2$ /%	$H_2$ /%	$CO_2$ /%	CnHn/%	$H_2O/mg \cdot m^{-3}$
>99.99	<0.001	<0.0015	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<30

### 6.4.2 等离子弧堆焊方法及材料

等离子堆焊是一种较新的堆焊工艺，具有熔深浅、熔敷率高、稀释率低等优点。根据堆焊时所使用的填充材料，等离子弧堆焊大致可分为：填丝等离子弧堆焊、熔化极等离子弧堆焊和粉末等离子弧堆焊。几种等离子弧堆焊方法的熔敷效率、稀释率比较见表 6.19。

表 6.19 几种等离子弧堆焊方法的熔敷效率、稀释率比较

方 法	熔敷速度/ $kg \cdot h^{-1}$	稀释率/%
冷丝等离子弧堆焊	0.5~3.6	5~10
热丝等离子弧堆焊	0.5~6.5	5~15
熔化极等离子弧堆焊	0.8~6.5	5~15
粉末等离子弧堆焊	0.5~6.8	5~15

#### (1) 填丝等离子弧堆焊

填丝等离子弧堆焊又分为冷丝、热丝、单丝、双丝等离子弧堆焊。

##### 1) 冷丝等离子弧堆焊

冷丝堆焊与填充焊丝的熔入型等离子弧焊接相同，其设备也与填充焊丝的强流等离子焊设备相似。由于这种方法的效率很低，目前已很少使用。

等离子弧堆焊冷焊丝，既可手工送进，也可自动送进，可以单根送进，也可以数根并排送进，在等离子弧摆动过程中熔敷成堆焊层。焊丝可以是实芯或药芯的。还可把堆焊合金制成环状或其他形状，预置在被焊表面，然后用等离子弧熔化进行堆焊。如柴油机排气阀等零件常采用填丝等离子弧堆焊方法。

常采用填丝等离子弧堆焊方法。

##### 2) 热丝等离子弧堆焊

采用热丝填充可以提高熔敷效率，用独立交流电源预热填充焊丝，并连续将其熔敷在等离子弧前面，随后等离子弧将它与工件熔合在一起。热丝等离子弧堆焊送进焊接区的焊丝是热的，且必须自动送进。用热丝的目的是提高熔敷速度和降低稀释率，热丝表面进行去氢处理，堆焊层气孔较少。

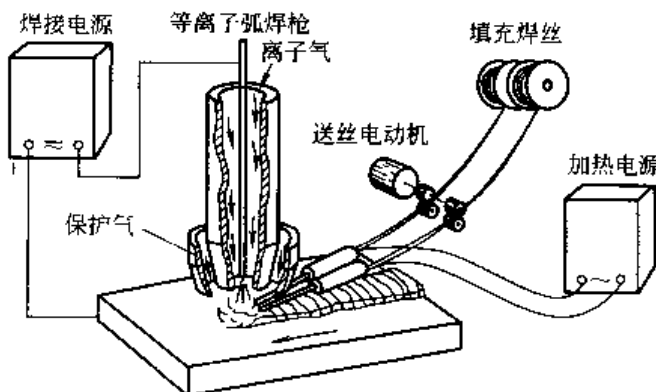


图 6.49 热丝等离子弧堆焊示意

热丝等离子弧堆焊示意见图 6.49。热

丝等离子堆焊综合了热丝钨极氩弧焊 (TIG) 及等离子焊的特点。焊机由一台直流电源、一台交流电源、送丝机、控制箱、焊枪以及机架等组成。直流电源用作焊接电源, 用于产生等离子电弧, 加热并熔化母材和填充焊丝。交流电源作为预热电源, 在自动送入的焊丝中通以一定的加热电流, 以产生电阻热, 从而提高熔敷效率并降低对熔敷金属的稀释程度。

对于单丝堆焊焊机, 预热电源的两极分别接焊丝和工件; 对于双丝堆焊焊机, 电源的两个电极分别接两根焊丝, 堆焊时应选择合适的预热电流, 使焊丝在恰好送进到熔池时被电阻热所熔化, 同时两根焊丝间又不产生电弧。这样可减小焊接电流, 从而降低熔敷金属的稀释率。此外, 热丝堆焊还有利于消除堆焊层中的气孔。

热丝等离子堆焊主要用于在表面积较大的工件上堆焊不锈钢、镍基合金、铜及铜合金等。双热丝等离子弧堆焊的工艺参数见表 6.20。

表 6.20 双热丝等离子弧堆焊的工艺参数

焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	气体流量 /L · min <sup>-1</sup>	堆焊速度 /cm · min <sup>-1</sup>	熔敷速度 /kg · h <sup>-1</sup>	稀释率 /%	预热电流 /A
1.6	400	38	23.4	20	18~23	8~12	160
1.6	480	38	23.4	23	23~27	8~12	180
1.6	500	39	23.4	23	27~32	8~15	200
2.4	500	39	23.6	25	27~32	8~15	240

### (2) 熔化极等离子弧堆焊

熔化极等离子弧堆焊机是通过一种特殊的等离子弧焊枪将等离子弧焊和熔化极气体保护焊组合起来。焊接过程中产生两个电弧, 一个为等离子弧, 另一个为熔化极电弧。根据等离子弧的产生方法, 可分为水冷铜喷嘴式及钨极式两种。前者的等离子弧产生在水冷铜喷嘴与工件之间, 如图 6.50 (a) 所示; 后者的等离子弧产生在钨极与工件之间, 如图 6.50 (b) 所示。

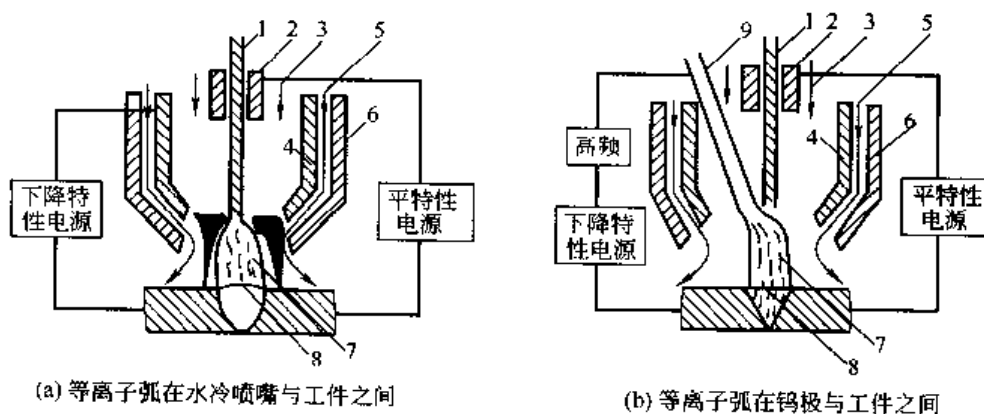


图 6.50 熔化极等离子弧堆焊示意

- 1- 焊丝; 2 导电嘴; 3- 等离子气; 4- 铜喷嘴; 5- 保护气体;  
6- 保护罩; 7- 等离子气; 8- 过渡金属; 9- 钨极

熔化极电弧产生在焊丝与工件之间, 并在等离子弧中间燃烧。整个焊机需要两台电源。其中, 一台为陡降特性的电源, 其负极接钨极或水冷铜喷嘴, 正极接工件; 另一台为平特性电源, 其正极接焊丝, 负极接工件。

熔化极堆焊机既可用于焊接，也可用于堆焊。焊接时，选用较小的焊接电流，此时熔滴过渡为大滴过渡；堆焊时，选用较大的焊接电流，熔滴过渡为旋转射流过渡。

与一般等离子弧堆焊及熔化极气体保护堆焊相比，熔化极等离子弧堆焊具有下列优点：

- ① 焊丝受到等离子弧的预热，熔化功率大；
- ② 由于等离子弧流力的作用，在进行大滴过渡及旋转射流过渡时，均不会产生飞溅；
- ③ 熔化功率和工件上的热输入可单独调节；
- ④ 堆焊速度快。

### (3) 粉末等离子弧堆焊

粉末等离子弧堆焊是将合金粉末自动送入等离子弧区实现堆焊的方法。各种成分的堆焊合金粉末制造比较方便，堆焊时合金成分的要求易于满足。堆焊工作易于实现自动化，能获得稀释率低的薄堆焊层，且平滑整齐，不加工或稍加工即可使用，因而可以降低贵重材料的消耗。适于在低熔点材质的工件上进行堆焊，特别是大批量和高效率的堆焊新零件更为方便。

粉末等离子弧堆焊机与一般等离子弧焊机大体相同，只不过利用粉末堆焊焊枪代替等离子焊机中的焊枪。粉末堆焊焊枪一般采用直接水冷并带有送粉通道，所用喷嘴的压缩孔道比一般不超过1。等离子堆焊时，一般采用转移弧或联合型弧。除了等离子气及保护气外，还需要送粉气。送粉气一般采用氩气。

粉末堆焊具有生产率高、堆焊层稀释率低、质量高、便于自动化等特点，是目前应用最广泛的一种等离子堆焊方法。特别适合于在轴承、轴颈、阀门板和座、涡轮叶片等零部件的堆焊。

国产粉末等离子弧堆焊机有几种型号，例如LUF4-250型粉末等离子弧堆焊机可以用来堆焊各种圆形焊件的外圆或端面，也可进行直接堆焊。最大焊件直径达500mm，直线长度达800mm。一次堆焊的最大宽度为50mm。可用于各种阀门密封面的堆焊，高温排气阀门堆焊，以及对轧辊、轴磨损后的修复等。

根据堆焊合金的成分，等离子弧堆焊用的合金粉末有镍基、钴基和铁基三类。

镍基合金粉末主要是镍铬硼硅合金，熔点低，流动性好，具有良好的耐磨、耐蚀、耐热和抗氧化等综合性能，主要用于堆焊阀门、泵柱塞、转子、密封环、刮板等耐高温、耐磨零件。

钴基合金粉末耐磨，耐腐蚀，比镍基合金粉末具有更好的红硬性、耐热性和抗氧化性，但价格昂贵，主要用于高温高压阀门锻模、热剪切刀具、轧钢机导轨等堆焊。铁基合金粉末成本较低、耐磨性好，并有一定的耐蚀、耐热性能。堆焊受强烈磨损的零件，如破碎机辊、挖掘机铲齿、泵套、排气叶片、高温中压阀门等。

### 6.4.3 等离子弧堆焊设备、附件及工艺参数

等离子弧堆焊设备主要由等离子弧焊枪、支持焊枪及使其相对于工件移动的机械装置、产生等离子弧的电源、控制装置、气路系统和冷却水路系统组成。常用等离子弧堆焊机型及用途见表6.21。

#### (1) 等离子弧堆焊设备及附件

##### 1) 堆焊焊枪

用于等离子弧堆焊的焊枪有多种形式，但无论是通用焊枪，还是专用焊枪，其基本结构都是由上枪体、下枪体、电极、喷嘴及绝缘套等部件组成。喷嘴是等离子弧堆焊焊枪的关键

表 6.21 常用等离子弧堆焊机型号及用途

类型	型号	主要用途
粉末等离子弧堆焊机	LU-150	堆焊直径小于 320mm 的圆形工件,如阀门的端面、斜面和轴的外面
	LU-500	堆焊圆形平面、矩形平面,配靠模还可以堆焊椭圆形平面
	LUP 300 LUP 500	与辅助机械配合,可以堆焊各种形状的几何表面
空气等离子弧堆焊机	KI.Z-400	在运煤机零件上堆焊自熔性耐磨合金,已取得优良效果
双热丝等离子弧堆焊机	LS-500-2	用于丝极材料的等离子弧堆焊

元件,整个焊枪的结构都是为喷嘴配套的。喷嘴材料选用紫铜棒料加工而成。紫铜具有良好的导热性、导电性,加工容易,在水冷条件下制作阳极可满足工作要求。

喷嘴的结构形式很多,主要体现在压缩比、送粉通道的位置、冷却及密封方式的不同。喷嘴中电弧通道的长度与直径之比,称为压缩比。粉末等离子弧堆焊喷嘴的压缩比一般为 1.0~1.4;排丝等离子弧堆焊为了得到较小的熔深,压缩比一般为 0.8 左右。

等离子弧堆焊焊枪在使用时最重要的是保证水冷系统的密封要求。一般采用橡胶 O 形密封圈,可保证良好的密封性。

### 2) 机械装置

等离子弧堆焊设备的机械装置主要有枪体摆动机构、送粉器、零件旋转机构以及枪体悬挂机构和防护罩等,如图 6.51 所示。

摆动方式有偏心轮式及凸轮式两种。偏心轮式摆动机构的枪体相对于焊道堆焊轨迹呈正弦式运动,目前市场销售的等离子弧堆焊设备大多采用这种结构。

送粉器有多种形式,如自重式、滚轮式、电磁振动式、刮板式等,目前以刮板式应用较普遍。刮板式送粉器的特点是送粉量可无级调节,可调范围宽,送粉量稳定,受工艺因素影响小。

### 3) 电器控制系统

等离子弧堆焊主电路指焊接电流从电源流出,经过焊枪、工件而后回到电源的电回路。主电路可分为单电源电路和双电源电路。双电源电路与单电源电路相比,增加了一个电源,虽然增加了设备的成本,但控制较方便。

### 4) 水路系统

等离子弧堆焊设备的水冷系统主要用于冷却焊枪,其次用于冷却电缆。为了保证焊枪在

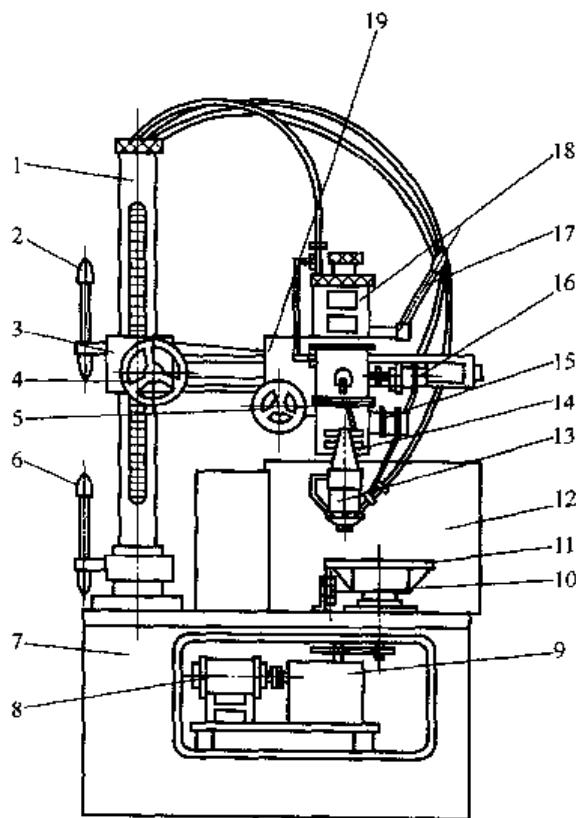


图 6.51 DP-300 型等离子弧堆焊设备的机械结构示意图

- 1—立柱; 2—转动手柄; 3—升降支底座; 4—升降转动手柄;
- 5—横向转动手柄; 6—手把; 7—机座; 8—减速箱电机;
- 9—减速箱; 10—行程开关; 11—转盘; 12—护罩;
- 13—焊枪; 14—摆动机构; 15—摆动电机;
- 16—送粉电机; 17—横向止动手柄;
- 18—送粉器; 19—横向进给部分



工作时不致因未给水而烧毁，通常在电源的控制回路内加设水流开关；即有水流动时，电源

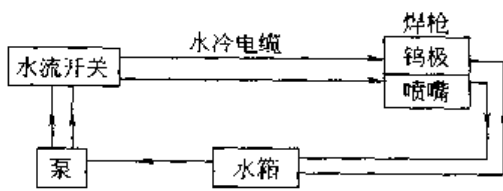


图 6.52 等离子弧堆焊设备的水冷系统

接通；有水但不流动或无水时，电源开关不接通，从而保证了喷嘴的安全。有的等离子弧焊接设备在电路设计时，把水泵电源与焊接电源设计成连动开关，不致因未给水而烧毁，以保证喷嘴的正常使用。

等离子弧堆焊设备的水冷系统如图 6.52 所示。冷却水最好使用水箱储存的水，因其水温与环境温度相差不大，但要控制水箱内温度升高小于  $50^{\circ}\text{C}$ 。使用一般自来水时，由于水温较低，在空气湿度较大时，常在喷嘴中结露，使离子气和送粉气中湿度过大，而在堆焊层中产生气孔缺陷。

### 5) 气路系统

等离子弧堆焊设备的气路系统如图 6.53 所示，一般用氩气作为离子气及送粉气。氩气一般采用瓶装氩气，经减压器、控制气路通断的电磁气阀及流量计，送至焊枪，从而实现产生等离子电弧及保护熔池的作用。

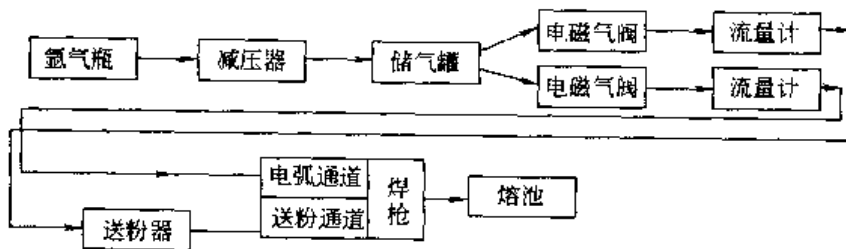


图 6.53 等离子弧堆焊设备的气路系统

### (2) 等离子弧堆焊的主要工艺指标

① 熔敷率 指单位时间内熔焊在工件上的合金粉末质量，熔敷率的计量单位是  $\text{kg/h}$  或  $\text{g/min}$ 。熔敷率越高则生产效率越高。目前等离子弧粉末堆焊的熔敷率一般在  $1.2\sim 9\text{kg/h}$ 。

② 粉末利用率 指单位时间内从焊枪送出的合金粉末量和熔敷金属质量之比，用百分数表示。等离子弧堆焊时，不可能使焊枪送出的合金粉末全部熔敷在工件上，部分粉末由于飞散而未落入熔池，或以熔珠的形式流失，有少量粉末在堆焊过程中氧化，所以合金粉末的利用率很难达到  $100\%$ 。焊枪的设计和工艺参数的选定，应使粉末利用率越高越好，一般应在  $90\%$  以上。这样不仅减少合金粉末损耗，而且有利于提高堆焊层质量。

③ 稀释率 指工件（基体金属）熔化后混入堆焊层，对堆焊层合金的冲淡程度，即

$$\text{稀释率 } \gamma = \frac{\text{堆焊层中基体金属总量}}{\text{堆焊层金属总量}}$$

由于堆焊层成形平整，熔深基本一致，稀释率  $\gamma$  还可用下式计算，即

$$\gamma = \frac{h_c}{H} \quad (6.1)$$

式中  $h_c$  —— 工件熔深， $\text{mm}$ ；

$H$  —— 堆焊层厚度， $\text{mm}$ 。

稀释率大，基体金属混入堆焊层中的量多，改变了堆焊合金的化学成分，将直接影响堆

焊层的性能,如硬度、耐腐蚀性、耐磨性、耐热性等。

④ 堆焊层质量 包括外观质量和内部质量。外观质量指成形好坏,宏观上有无明显弧坑、缩孔、裂纹、缺肉等;内部质量指堆焊层有无气孔、夹渣、裂纹、未熔合等。堆焊层质量主要受堆焊工艺参数的影响。

### (3) 等离子弧堆焊的工艺参数

等离子弧堆焊工艺参数包括:转移弧电压和电流、非转移弧电流、送粉量、离子气和送粉气流量、焊枪摆动频率和幅度、喷嘴与工件之间的距离等。

#### 1) 转移弧电压和电流

转移弧是等离子弧堆焊的主要热源,堆焊电流和电弧电压是影响工艺指标最重要的参数。在堆焊过程中,转移弧电压随堆焊电流的增加近似呈线性上升。在焊枪和其他参数确定的情况下,堆焊电流在较大范围内变动时,电弧电压的变化却不大。虽然堆焊过程中电弧电压变化较小,但电弧电压的基数值却是很重要的,它影响电弧功率的大小。电弧电压的基数值主要取决于喷嘴结构和喷嘴与工件之间的距离。

在等离子弧堆焊过程中,转移弧电流变化主要影响到以下几方面。

① 工件熔深和堆焊层稀释率 随着堆焊电流的增加,过渡到工件堆焊面的热功率增加,熔池温度升高,热量增加,使工件熔深和稀释率增大。

② 熔敷率和粉末利用率 送粉量确定之后,要使粉末充分熔化,需要足够的热量,因此等离子弧堆焊的转移弧电流不能低于一定的数值。转移弧电流对粉末熔化状况的影响见表 6.22。该实验结果表明,转移弧电流小于一定数值时,未熔化的合金粉末飞散多,粉末利用率很低。

表 6.22 转移弧电流对粉末熔化状况的影响

转移弧电流/A	粉末熔化及成形情况
<120	合金粉末严重飞散,焊道成形很差
120~140	合金粉末有飞散,焊道成形不好
160~210	合金粉末充分熔化,焊道成形良好
>210	熔深过大,熔池翻泡,焊道成形不好

注:母材为 25 号钢,堆焊材料为 F326,送粉量为 75g/min。

③ 堆焊层质量 转移弧电流过小时,熔池热量不够,工件表面不能很好熔合,粉末熔化不充分,造成未熔透、气孔、夹渣等缺陷,同时焊道宽厚比小、成形差;电流过大时,稀释率过大使堆焊层合金成分变化,堆焊层性能显著降低。

#### 2) 非转移弧电流

非转移弧首先起过渡引燃转移弧的作用。在等离子弧堆焊中,一种情况是保留非转移弧,采用联合弧工作;另一种情况是当转移弧引燃后,将非转移弧衰减并去除。采用联合弧工作时,保留非转移弧的目的是使非转移弧作为辅助热源,同时有利于转移弧的稳定。非转移弧的存在不利于喷嘴的冷却。非转移弧一般为 60~100A,而作为联合弧中的非转移弧电流应更小些,须根据转移弧电流大小适当选择。

#### 3) 堆焊速度

堆焊速度是表示堆焊过程进行快慢的参数。堆焊速度和熔敷率是直接联系在一起的。在保持堆焊层宽度和厚度一定的条件下,堆焊速度快,熔敷效率就高。提高堆焊速度使堆焊层减薄、变窄,工件熔深减小,堆焊层稀释率降低;当堆焊速度增加到一定程度时,成形恶

化, 易出现未焊透、气孔等缺陷。一般根据堆焊工件的大小、电弧功率、送粉量等合理选择堆焊速度。

#### 4) 送粉量

送粉量是指单位时间内从焊枪送出的合金粉末量, 一般用  $g/min$  表示。在等离子弧堆焊过程中, 其他参数不变的情况下, 改变堆焊速度和送粉量, 熔池的热状态发生变化, 从而影响堆焊层质量。增加送粉量, 工件熔深减小, 当送粉量增加到一定程度时, 粉末熔化不好, 飞溅严重, 易出现未焊透。

在保证堆焊层成形尺寸一致的前提下, 增加送粉量要相应提高堆焊速度。为了使合金粉末熔化良好, 保证堆焊质量, 要相应加大堆焊电流, 使熔池的热状态维持不变, 以便提高熔敷率。

堆焊速度和送粉量的大小反映堆焊生产率, 从提高生产率角度出发, 希望采用高速度、大送粉量、大电流堆焊。但堆焊速度和送粉量受到焊枪性能、电源输出功率等因素的制约。因此对具体工件, 要合理选择堆焊速度和送粉量。

#### 5) 离子气和送粉气流量

① 离子气流量 离子气是形成等离子弧的工作气体, 对电弧起压缩作用, 并对熔池起保护作用。气流量大小直接影响电弧稳定性和压缩效果。气流量过小, 对电弧压缩弱, 造成电弧不稳定; 气流量过大, 对电弧压缩过弱, 增加电弧刚度, 致使熔深加大。离子气的流量要根据喷嘴孔径大小、非转移弧和转移弧的工作电流大小来选择。喷嘴孔径大, 工作电流大, 气流量要偏大; 离子气流量一般以  $300\sim 500L/h$  为宜。

② 送粉气流量 送粉气主要起输送合金粉末作用, 同时也对熔池起保护作用。合金粉末借助于送粉气的吹力, 能顺利地通过管道和焊枪被送入电弧。气流量过小, 粉末易堵塞; 气流量过大, 对电弧有干扰。送粉气流量主要根据送粉量的大小和合金粉末的粒度、松装比来选择。送粉量大、粒度大、松装比大时, 气流量应偏大。送粉气流量一般在  $300\sim 700L/h$  范围内调节。

#### 6) 焊枪摆动频率和幅度

焊枪摆动是为了一次堆焊获得较宽的堆焊层, 摆动幅度一般依据堆焊层宽度的要求而定。单位时间内焊枪摆动次数称为焊枪摆动频率 (次/min)。摆动频率应保证电弧对堆焊面的均匀加热, 避免焊道边缘出现“锯齿”状。摆动频率和摆幅要配合好, 一般摆幅宽, 摆频要适当减慢; 摆幅窄摆频可适当加快, 以保证基体受热均匀, 避免未焊透的现象。

#### 7) 喷嘴与工件之间的距离

喷嘴与工件之间的距离反映转移弧的电压。距离过高, 电弧电压偏高, 电弧拉长, 使电弧在这段距离内未经受喷嘴的压缩, 而弧柱直径扩张, 受周围空气影响使得电弧稳定性和熔池保护变差。距离过低, 粉末在弧柱中停留时间短, 不利于粉末在弧柱中预先加热, 熔粒飞溅粘接在喷嘴端面现象较严重。喷嘴与工件之间的距离根据堆焊层厚薄及堆焊电流大小, 在  $10\sim 20mm$  范围内调整。

### 6.4.4 等离子弧堆焊实例

#### (1) 钴基合金粉末等离子弧堆焊

钴基合金具有良好的抗高温、耐腐蚀、抗磨损等综合工艺性能和显著的热硬性特点, 被广泛应用于耐高温、耐磨损的场合, 例如高温高压电站阀门和其他技术性能要求较高的阀门密封面上。

阀门密封面等离子弧堆焊钴基合金的注意事项如下。

① 根据堆焊工件的结构刚性和材质，合理选择预热温度和焊后保温措施。阀门等离子弧堆焊常用材料的预热温度和焊后热处理温度见表 6.23。

表 6.23 阀门常用材料焊前预热和焊后热处理温度

基体材料		堆焊前预热温度/℃	焊后热处理温度/℃
低碳钢	25	300~350 小零件不预热	600~650 小零件在石棉中冷却或砂冷
	35		
	45		
Cr-Mo 珠光体钢	12CrMo	400~450	680~720
	15CrMo		
	12CrMoV	450~500	720~760
	15CrMoV		
马氏体不锈钢	1Cr13	450~500	700~750
	2Cr13		
奥氏体不锈钢	1Cr18Ni9Ti	250~300	860~880
	Cr18Ni12Mo2Ti		

② 钴基合金粉末的熔点稍高，应合理选择堆焊电流、工件转速、焊枪摆动频率和幅度，以保证熔合及表面成形。

③ 钴基合金粉末密度较大，使用自重力送粉器时，应根据粉末粒度（目数）合理调整送粉气体流量，以得到适宜的送粉量，保证堆焊质量。

④ 钴基合金粉末堆焊时，易在熄弧处出现火口裂纹。应选择适宜的电弧衰减斜率和时间，待衰减到电流较小时（小于 20A）再切断电弧。

阀门等离子弧粉末堆焊钴基合金的工艺参数见表 6.24。堆焊设备为 DP-500 型粉末等离子弧堆焊机，采用 LFH 型等离子弧焊枪。

表 6.24 等离子弧粉末堆焊钴基合金的工艺参数

项 目	阀门型号	Z941Y-200	Z941Y-200	Z941Y-200	Z941Y-200
		DN 225	DN 225	DN 225	DN 225
	堆焊部位	闸板	阀座	阀瓣	闸板
	基体材料	20CrMo	20CrMo	2Cr13	1Cr18Ni9Ti
合金粉末	牌号	F221	F221	F221	F221
	粒度/目	60~200	60~200	60~140	60~140
非转移弧	电弧电压/V	24	24	24	24
	堆焊电流/A	90~100	90~100	90~100	90~100
转移弧	电弧电压/V	36	36	34	36
	堆焊电流/A	180~200	160~180	140~160	160~180
	衰减时间/s	15	13	10	13
氩气流量	离子气/L·h <sup>-1</sup>	400	400	350	400
	送粉气/L·h <sup>-1</sup>	600	600	500	600
摆 动	频率/次·min <sup>-1</sup>	40	50	60	50
	幅度/mm	18	14	8	14
转台每转所需时间		4'30"	3'30"	1'10"	3'40"
送粉量/g·min <sup>-1</sup>		42	40	25	40
喷嘴与工件距离/mm		12	12	10	12
焊 层	高/mm	5	4	4	5
	宽/mm	20	18	10	18
工艺措施	预热/℃	400~450	400~450	300	250~300
	焊后	炉内缓冷	炉内缓冷	全退火	炉内缓冷

### (2) 镍基合金粉末等离子弧堆焊

阀门密封面堆焊用镍基合金粉末的化学成分是以镍为基，含有一定量的 Cr、B、Si 元素，即 Ni-Cr-B Si 系自熔性合金粉末。

镍基合金具有良好的抗腐蚀、抗磨损和抗氧化性，综合性能良好。镍基合金还具有良好的抗擦伤性能，特别是高温下的抗蚀性，常代替钴基合金应用在电站蒸气阀门和内燃机进排气阀或受到强腐蚀介质的腐蚀磨损工况比较恶劣的阀门密封面制造上。

镍基合金粉末等离子弧堆焊的工艺性能良好，与钴基合金相比熔点低，液态金属流动性好。堆焊时要根据其特点合理选择工艺参数。为了防止裂纹，减小应力和变形，应采取相应的焊前预热、焊后保温措施（见表 6.23）。阀门等离子弧粉末堆焊镍基合金的工艺参数见表 6.25。

表 6.25 阀门等离子弧粉末堆焊镍基合金的工艺参数

项 目	阀门型号	A41H-16 DN 40	A47H-25 DN 50	J41W-16P DN 100	J41W-40 DN 150
	堆焊部位	阀座	阀座	阀瓣	阀瓣
	基体材料	25 碳钢	25 碳钢	1Cr18Ni9Ti	1Cr18Ni9Ti
合金粉末	牌号	NDG-2	NDG-2	F101	F101
	粒度/目	60~200	60~200	140~200	140~200
非转移弧	电弧电压/V	22	22	20~22	20~22
	堆焊电流/A	90	90	90~100	90~100
转移弧	电弧电压/V	40	40	40	40
	堆焊电流/A	140	150	160~180	180~200
	衰减时间/s	15	13	10	13
氩气流量	离子气/L·h <sup>-1</sup>	500	500	500	500
	送粉气/L·h <sup>-1</sup>	700	700	700	700
摆 动	频率/次·min <sup>-1</sup>	60	60	45	40
	幅度/mm	7	7	10	12
转台每转所需时间		45"	50"	2'10"	2'30"
送粉量/g·min <sup>-1</sup>		35	35	40	40
喷嘴与工件距离/mm		12	12	13	13
焊 层	高/mm	4.5	5	5	5
	宽/mm	9	9	12	14
工艺措施	预热/℃		—	200	200
	焊后	缓冷	缓冷	炉内缓冷	炉内缓冷

### (3) 铁基合金粉末等离子弧堆焊

铁基合金粉末以价格低、主要性能良好等特点被广泛应用在使用温度低于 450℃、工作介质主要是水、汽、油等弱腐蚀介质的中温中压阀门密封面制造上。

阀门堆焊用铁基合金粉末主要有两大类型：一类是 Cr-Ni 铁基合金；另一类是 Cr-Mn 铁基合金。这两类铁基合金粉末的综合工艺性能良好。堆焊时可与基体低碳钢材料形成良好的冶金结合层，工艺参数可调范围较大。大批量堆焊小于 DN100mm 阀门密封面时，焊前

不预热，焊后空冷均不会产生裂纹。

这两类铁基合金粉末各有工艺特点，Cr-Mn 铁基合金粉末与 Cr-Ni 铁基合金粉末相比，熔点稍低，液态金属流动性好。几种阀门等离子弧粉末堆焊铁基合金的工艺参数见表 6.26，使用设备为 DP-300 型粉末等离子弧堆焊机。

表 6.26 等离子弧粉末堆焊铁基合金的工艺参数

项 目	阀门型号	AZ41H-25 DN 150	AZ41H-25 DN 150	Z42W 25 DN 150	Z44H-40 DN 150	Z41H-25 DN 250	Z42H-25 DN 300
	堆焊部位	闸板	阀座	闸板	阀瓣	闸板	闸板
合金粉末	基材材料	25 碳钢	25 碳钢	25 碳钢	25 碳钢	25 碳钢	25 碳钢
	牌号	F326	F326	F311	F311	F312	F312
非转移弧	粒度/目	40~200	40~200	140~200	60~140	60~200	60~200
	电弧电压/V	24	24	24	24	24	24
转移弧	堆焊电流/A	100~120	100~120	100~120	100~120	120~150	120~150
	电弧电压/V	40	40	40	42	42	43
氩气流量	堆焊电流/A	180~200	150~180	150~180	190~210	230~240	240~260
	离子气/L·h <sup>-1</sup>	400	400	400	400	450	450~500
摆 动	送粉气/L·h <sup>-1</sup>	500	450	450	450	550	550~600
	频率/次·min <sup>-1</sup>	40	50	60	55	40	40
转台每转所需时间	幅度/mm	10	7	10	16	18	28
		3'40"	2'20"	2'30"	3'30"	6'	6'10"
送粉量/g·min <sup>-1</sup>		50	17	45	75	75	90
喷嘴与工件距离/mm		12	10	12	14	16	18
焊 层	高/mm	4	4	4	5	5	5
	宽/mm	14	10	14	20	22	32

#### (4) 排丝等离子弧堆焊工艺

##### 1) 工艺特点

利用等离子弧作为热源，将并列成排状的焊丝熔焊在基体上的一种工艺方法。排丝等离子弧堆焊与粉末等离子弧堆焊的不同之处在于，它是将堆焊合金制成焊丝，根据堆焊面的宽度，选择不同直径和根数的焊丝并列成排状，铺在焊道上，用等离子弧使其熔焊在基体上。排丝等离子弧堆焊工艺具有如下特点。

- ① 熔深浅、堆焊金属稀释率低，焊道成形好。
- ② 使用设备简单，操作方便。在粉末等离子弧堆焊设备基础上，免去了送粉机构和装置，特别是不用结构复杂的送粉式焊枪，而采用结构简单的堆焊枪，从而简化了堆焊工艺。
- ③ 排丝等离子弧堆焊的熔敷效率高达 98%，是一般堆焊工艺方法不能比拟的，从而降低了材料成本。
- ④ 排丝等离子弧堆焊使基体受热均匀，堆焊金属的抗裂性好。焊前不预热、焊后不进行热处理时，堆焊层金属也不产生裂纹。
- ⑤ 需要手工适当调整铺在焊道上的排状焊丝，属于半机械化操作。与粉末等离子弧堆焊相比，自动化程度不高，批量生产时工人劳动强度较大。

影响排丝等离子弧堆焊质量的工艺参数有：转移弧电流和电压、离子气和保护气的流

量、喷嘴距焊丝表面的距离、堆焊速度、电流衰减速率等。

2) 阀门堆焊实例

① 将经过粗车的待堆焊表面用工业酒精或丙酮除去油污。

② 根据阀门密封面设计宽度和厚度的要求，选择适当的焊丝直径和根数，用氩弧焊或气焊点焊成排状。

③ 采用排丝等离子弧堆焊钴基合金的工艺参数见表 6.27。

表 6.27 采用排丝等离子弧堆焊钴基合金的工艺参数

项 目	阀门型号	Z41W-16R DN 300	Z41Y-40P DN 500	Z41Y-40P DN 500	Z41Y-64 DN 400
	堆焊部位	阀板	阀座	阀板	阀板
	基体材料	Cr18Ni12Mo2Ti	1Cr18Ni9Ti	1Cr18Ni9Ti	Cr5Mo
焊 丝	牌号	HS111	HS111	HS111	HS111
	直径/mm	4.7	4.7	4.7	4.7
	并列根数	6	5	7	7
转移弧	电弧电压/V	20~22	20~22	22~24	22~24
	堆焊电流/A	210~230	200~220	260~270	250~260
氩气流量	离子气/L·h <sup>-1</sup>	400	400	450	400
	送粉气/L·h <sup>-1</sup>	800	750	850	850
摆 动	频率/次·min <sup>-1</sup>	40	50	35	35
	幅度/mm	30	25	35	35
转台每转所需时间		6"	5'30"	8'	7'
喷嘴距焊丝距离/mm		4	3	4	4
焊 层	高/mm	1	4	4	4
	宽/mm	32	28	38	38

④ 根据排状焊丝的宽度确定摆幅，根据堆焊速度调整适宜的摆动频率。

⑤ 堆焊工件在堆焊前和堆焊后不必进行预热、保温、缓冷等工艺措施。

## 第7章 热喷涂方法及设备

随着工农业生产及高新技术的飞速发展,对提高传统金属材料的性能及延长机械零部件使用寿命的要求越来越强烈,同时又面临制备高性能或多功能结构材料和表面材料的问题。为解决这些问题,近年来表面工程发展很快,尤其是促进了热喷涂技术的高速发展。热喷涂技术是使基体表面强化和表面防护的一门技术,由早期制备一般防护性的涂层发展到制备各种功能涂层领域,被广泛应用于各种机械设备、仪器仪表和金属构件的耐蚀、耐磨和耐高温等方面,以及使用条件苛刻和要求严格的宇航工业。

### 7.1 热喷涂的特点及分类

#### 7.1.1 热喷涂的特点

热喷涂是利用一种热源将喷涂材料加热至熔融状态,并通过气流吹动使其雾化高速喷射到零件表面,以形成喷涂层的表面加工技术。与其他表面工程技术相比,热喷涂在实用性方面有以下主要优点。

##### (1) 热喷涂种类多

热喷涂可细分有几十种,根据工件的要求,在应用时有较大地选择余地。各种热喷涂技术的优势相互补充,扩大了热喷涂的应用范围,在技术发展中各种热喷涂技术之间相互借鉴,增加了热喷涂功能的重叠性。

##### (2) 涂层功能多

适用于热喷涂的材料有金属及其合金、陶瓷、塑料及复合材料。应用热喷涂技术可以在工件表面制备出耐磨损、耐腐蚀、耐高温、抗氧化、隔热、导电、绝缘、密封、润滑等多种功能的单一材料涂层或多种材料的复合涂层。

热喷涂涂层中含有一定的孔隙,但对于防腐涂层来说应该是避免的,如果能正确选择喷涂方法、喷涂材料及工艺,可使孔隙率降到1%以下,也可以采用喷涂后进行封孔处理来解决。但在许多工程应用条件下希望喷涂层有一定的孔隙,甚至要求气孔能相通,满足润滑、散热、钎焊、催化反应、电极反应等要求。制备有一定气孔形态、一定孔隙率的可控孔隙涂层技术已成为当前热喷涂发展中的一个重要的研究方向。

##### (3) 适用热喷涂的零件范围广

热喷涂的基本特征决定了在实施热喷涂时,零件受热小,基材不发生组织变化,因此喷涂基材可选用金属、陶瓷、玻璃等无机材料,也可以是塑料、木材、纸等有机材料。而且将热喷涂用于薄壁零件、细长杆结构时,在防止变形方面有很大的优越性。喷涂基材的结构可以大到舰船船体、钢结构桥梁,小到传感器一类的元器件。

由于热喷涂涂层与基体之间主要是机械结合,因而热喷涂不适用于重载交变负荷的工件表面,但可以适用于各种摩擦表面、防腐表面、装饰表面、特殊功能表面。

##### (4) 设备简单、生产效率高

常用的火焰喷涂、电弧喷涂以及等离子喷涂设备都可以运到现场施工。热喷涂的涂层沉积率仅次于电弧堆焊。



(5) 操作环境较差,需加以保护

在实施喷砂处理工序时,以及喷涂规程中伴有噪声和粉尘时,需采取劳动防护及环境保护措施。

几种常用热喷涂技术的特点见表 7.1。热喷涂与其他常用表面技术的比较见表 7.2。

表 7.1 常用热喷涂技术的特点

分 类	等离子喷涂	火焰喷涂	电弧喷涂	气体燃爆式喷涂
熔粒速度/ $m \cdot s^{-1}$	400	150	200	1500
温度/ $^{\circ}C$	11727	2727	4727	3727
涂层孔隙率/%	1~10	10~15	10~15	1~2
结合强度/MPa	30~70	5~10	10~20	80~100
优点	孔隙率低、结合性好、用途多、基材温度低、污染低	设备简单、工艺灵活	成本低、效率高、污染低、基材温度低	孔隙率非常低、结合性好、基材温度低
缺点	成本较高	孔隙率高、结合性差、工件要预热	只适用于导电喷涂材料、通常孔隙率较高	成本高、效率低

表 7.2 热喷涂与其他常用表面技术的比较

工 艺 参 数	热喷涂	堆 焊	电 镀
零件尺寸	几乎不受限制	易变形件除外	受电镀槽尺寸限制
零件几何形状	一般适用于简单尺寸	对小孔有困难	范围广
零件的材料	几乎不受限制	金属	导电材料或经过导电化处理的材料
表面材料	几乎不受限制	金属	金属、简单合金
涂层厚度/mm	1~25	<25	<1
涂层孔隙率/%	1~15	无	无
涂层结合强度	一般	高	良好
热输入	低	很高	无
预处理	喷砂	机械清洁	化学清洁
后处理	不需要	消除应力	不需要
公差	好	差	良好
表面粗糙度	较小	较粗	极细
沉积速率/ $kg \cdot h^{-1}$	1~30	1~70	0.25~0.5

### 7.1.2 热喷涂方法的分类

目前还没有统一认可的热喷涂分类方法,常用的分类方法主要是根据所用热源的不同来分类,可分为燃气法、气体放电法、电热法和激光热源法等。热喷涂方法的分类如图 7.1 所示。



图 7.1 热喷涂方法分类

### (1) 火焰线材喷涂

火焰线材喷涂是最早出现的喷涂方法，其喷涂原理是以合适的速度将线材送入燃烧的火中，受热的线材端部熔化，并由压缩空气对熔流喷射雾化、加速，然后喷射到基材表面形成涂层。该喷涂方法由于熔融微粒所携带的热量不足，致使涂层与基材表面以机械结合为主，结合强度偏低；另外，线材的熔断、喷射不均匀会造成涂层的性质不均，使得喷涂层的组织疏松、多孔，内应力较大。

### (2) 火焰粉末喷涂

火焰粉末喷涂尤其是氧乙炔火焰粉末喷涂是目前应用面较广、数量较多的一种喷涂方法，是通过采用粉末火焰喷枪来实现的。粉末随送粉气流从喷嘴中心喷出进入火焰，被加热熔化或软化，焰流推动熔流以一定速度喷射到基材表面形成涂层。进入火焰的粉末及随后被喷射的飞行过程中，由于处在火焰中的位置不同，被加热的程度也不同，易出现部分粉末未熔融，部分粉末仅被软化或存在少数完全未熔颗粒的现象，因此造成涂层的结合强度和致密性不及线材火焰喷涂。

### (3) 电弧喷涂

电弧喷涂是将两根被喷涂的金属丝作为自耗性电极，输送直流或交流电，利用丝材端部产生的电弧作热源来熔化金属，用压缩气流雾化熔滴并喷射到基材表面形成涂层。电弧喷涂只能喷涂导电材料，在线材的熔断处产生积垢，使喷涂颗粒大小悬殊，涂层质地不均；另外，由于电弧热源温度高，造成元素的烧损量比采用火焰喷涂大，易导致涂层硬度降低。但由于熔粒温度高，粒子变形量大，使涂层的结合强度高于火焰喷涂层强度。

### (4) 等离子弧喷涂

等离子弧喷涂是以电弧放电产生的等离子体作为高温热源，以喷涂粉末材料为主，将喷涂粉末加热至熔化或熔融状态，在等离子射流加速下获得很高速度，喷射到基材表面形成涂层。等离子弧温度高，可熔化目前已知的任何固体材料；喷射出的微粒温度高、速度快，形成的喷射涂层结合强度高、质量好。

### (5) 气体燃爆式喷涂

气体燃爆式喷涂也被称为爆炸喷涂，是以突然爆发的热能加热熔化的喷涂材料并使熔粒加速的喷涂方法。气体燃爆式喷涂又可分为燃气重复爆炸喷涂和线爆炸喷涂。燃气重复爆炸

喷涂是将一定比例的氧气和乙炔气混合通过火花点火引爆，造成气体的急剧膨胀而产生爆炸，释放出的热能使喷枪筒内温度突然上升到  $3\ 300^{\circ}\text{C}$  以上，并形成冲击波。热能将喷涂粉末熔融，冲击波使熔粒加速到 2 倍音速，然后喷射到基材的表面形成涂层。最后将氮气引入枪筒内置换，直到下一个爆炸过程开始。线爆炸喷涂是使金属丝突然通过强大的电流，利用电热能量使金属丝爆炸成微粒黏附在基材表面形成涂层。

#### (6) 高频喷涂

高频喷涂时，喷涂的金属丝由送进机构送入磁场集中的电极头部位，受高频磁场的感应作用，在金属丝端部产生涡流使其熔化，压缩气体将熔融金属雾化并形成束流，喷射到基材表面形成涂层。高频喷涂是较早使用的一种喷涂方法，由于采用间接加热方式，喷涂效率较低，喷涂设备庞大，而且只能喷涂导磁的金属材料，所以现在很少使用。

#### (7) 激光喷涂和喷焊

采用激光作为热源进行喷涂、喷焊，以及对涂层重熔是近年来颇受人们关注的一项新技术。激光喷涂是将激光器发出的激光束聚焦到喷枪的喷嘴附近，喷涂粉末由压缩气体从喷嘴喷出，由激光束加热熔化，然后压缩气体将熔粒雾化、加速，喷射到基材表面形成涂层。激光喷焊则是将激光束聚焦在基材表面，通过喷枪将粉末射在激光焦点部位，激光束将粉末和基材表面同时熔融，形成喷焊层。

## 7.2 热喷涂方法

### 7.2.1 火焰喷涂

火焰喷涂的历史最为悠久，是利用气体燃烧放出的热来实现热喷涂的一种方法，目前广泛采用的火焰喷涂方法包括氧乙炔火焰线材喷涂和粉末火焰喷涂。一般情况下，在  $2\ 760^{\circ}\text{C}$  以下温度区内升华、能熔化的任何基材物质均可采用火焰喷涂获得良好的涂层，而在实际生产中，熔点超过  $2\ 500^{\circ}\text{C}$  的材料很难用采用火焰喷涂。

#### (1) 线材火焰喷涂

线材火焰喷涂的基本原理如图 7.2 所示。喷枪通过气阀引入乙炔、氧气和压缩空气，乙炔和氧气混合后在喷嘴出口处产生燃烧火焰。喷枪内的驱动机构连续的将线材通过喷嘴送入火焰，在火焰中线材端部被加热熔化，压缩空气使熔化的线材端部脱离并雾化成微细颗粒，在火焰及气流的推动下，微细颗粒喷射到预先处理的基材表面形成喷涂。

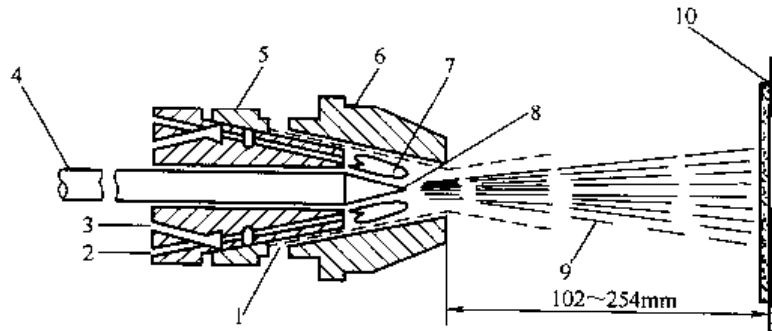


图 7.2 线材火焰喷涂喷枪的剖面图

1—雾化器；2 燃料器；3—氧气；4—线材；5—气体喷嘴；6—空气帽；  
7—燃烧气体；8—熔融材料；9—喷涂束流；10 基体

## (2) 粉末火焰喷涂

粉末火焰喷涂的基本原理如图 7.3 所示。喷枪通过气阀引入乙炔和氧气，乙炔和氧气混合后在环形或梅花形喷嘴出口处产生燃烧火焰。喷枪上设有粉斗或进粉管，利用送粉气流产生的负压抽吸粉末，使粉末随气流进入火焰，粉末被加热熔化或软化，气流及焰流将熔粒喷射到基材表面形成涂层。

粉粒在被加热过程中，从表面向内部逐渐熔化，熔融的表层在表面张力作用下趋于球状，因此粉末喷涂过程中不存在线材喷涂的破碎和雾化过程，粉末粒度决定了涂层中颗粒的大小和涂层表面的粗糙度。

同时进入火焰及随后飞行中的粉末，由于处在火焰中的位置不同，被加热的程度存在很大的差异，导致部分粉末未熔融、部分粉末仅被软化，还有少数粉末未熔融，从而造成涂层的结合强度与致密性与线材火焰喷涂较差。

### 7.2.2 电弧喷涂

电弧喷涂是将两根被喷涂的金属丝作自耗性电极，利用其端部产生的电弧作热源来熔化金属丝料，用压缩空气流进行雾化的热喷涂方法，在能满足涂层性能要求的情况下，应尽量采用电弧喷涂。

#### (1) 电弧喷涂的原理

电弧喷涂的原理示意如图 7.4 所示，喷嘴端部成一定角度（ $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）的连续送进的两根金属丝分别与直流电源的正负极相连接。

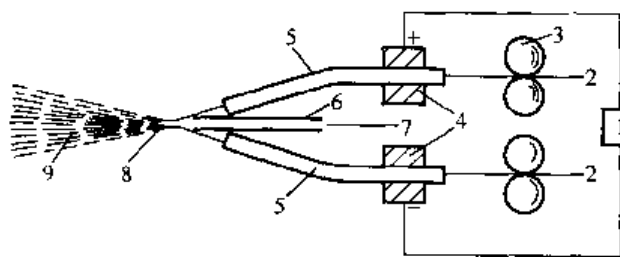


图 7.4 电弧喷涂原理示意

1- 直流电源；2- 金属丝；3- 送丝滚轮；4- 导电块；  
5- 导电嘴；6- 空气喷嘴；7- 空气；8- 电弧；9- 喷涂射流

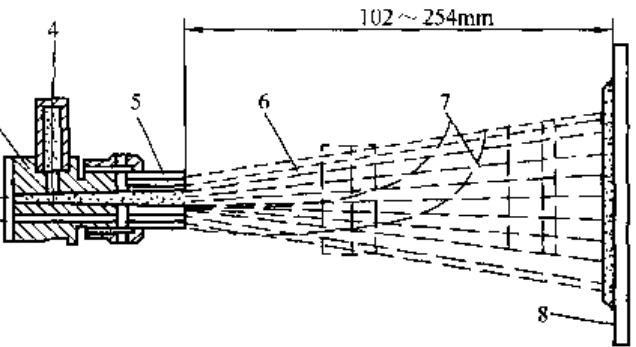


图 7.3 粉末火焰喷涂喷枪的剖面图

1- 氧气；2- 燃料器；3- 喷枪；4- 粉末；5- 喷嘴；  
6- 火焰；7- 喷涂束流；8- 基体

在金属丝端部短接的瞬间，由于高电流密度，使两根金属丝间产生电弧，将两根金属丝端部同时熔化，在电源的作用下，维持电弧稳定燃烧；在电弧发射点的背后由喷嘴喷射出的高压空气使熔化的金属脱离金属丝并雾化成微粒，在高速气流作用下喷射到基材表面而形成涂层。

电弧喷涂时，金属丝的短路仅发生在开始的瞬间，而喷涂过程中发生的是在电弧作用下金属丝端部频繁地产生熔化—脱离—雾化的过程。这一过程中，随着电极间距离不断变化，电弧电流也随之发生波动，自动维持金属丝的熔化速度，即利用电流的调节特性，电弧电压也随着送丝速度的增加而增加。

电弧喷涂与线材火焰喷涂相比较具有以下特点。

#### (2) 电弧喷涂的特点

电弧喷涂与线材火焰喷涂相比较具有以下特点。

① 热能效率高。火焰喷涂时，燃烧的火焰产生热量大部分散失到大气和冷却系统中，热能利用率只有  $5\%\sim 15\%$ 。电弧喷涂是将电能直接转化为热能来熔化金属，热能利用率可高达  $60\%\sim 70\%$ 。

② 生产率高。电弧喷涂时两根金属丝同时给进，使得喷涂效率较高，对于喷涂同样的金属丝材，电弧喷涂的喷涂速度可达火焰喷涂的3倍以上。

③ 喷涂成本低。火焰喷涂所消耗燃气的价格是电弧喷涂消耗电价格的几十倍。电弧喷涂的施工成本比火焰喷涂要降低30%以上。

④ 涂层结合强度高。在不用贵金属打底的情况下，喷涂层的结合强度比采用火焰丝材喷涂时高。

⑤ 可方便地制备合金涂层。电弧喷涂只需要利用两根成分不同的金属丝便可制备出合金涂层，以获得特殊性能，如铜-钢合金涂层具有良好的耐磨、减摩和导热性能。

### 7.2.3 等离子弧喷涂

根据电离的不同，等离子喷涂可以分为气稳等离子弧喷涂与水稳等离子弧喷涂。气稳等离子弧喷涂是利用气体产生等离子体并稳定等离子弧的等离子喷涂；而水稳等离子弧喷涂是用水作电离离子，产生并稳定等离子弧。工业生产中气稳等离子弧喷涂的应用更为广泛。

在等离子喷枪中，阴极和阳极喷嘴之间气体介质，出现持续而强烈的电离并产生直流电弧，该电弧把导入的工作气体加热电离成高温等离子体，在喷嘴水冷壁的机械压缩效应、密度很低的冷却气膜的热压缩效应，以及电弧电流产生的指向弧柱中心的磁场力的自弧压缩效应的作用下，电弧被压缩并电离（电离气体可达1%以上），从而形成温度达几万摄氏度的非转移型等离子弧，等离子喷涂原理示意如图7.5所示。

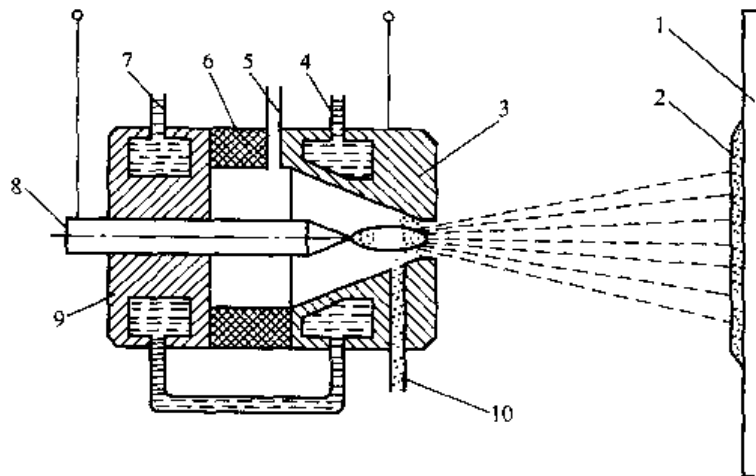


图 7.5 等离子喷涂原理示意

1-工件；2-喷涂层；3-前枪体；4-冷却水出口；5-等离子气进口；  
6-绝缘套；7-冷却水进口；8-钨电极；9-后枪体；10-送粉口

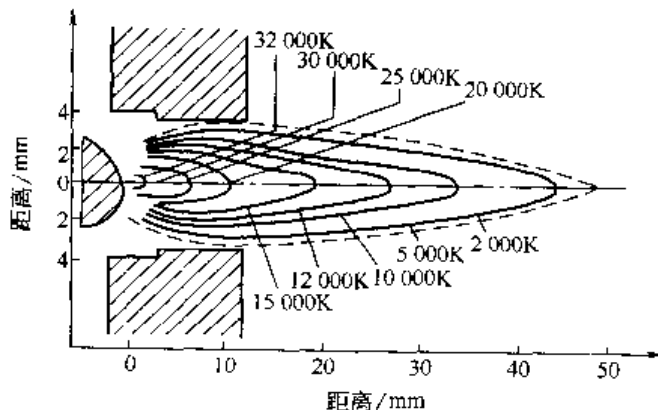


图 7.6 等离子焰流的温度分布

送粉气体将喷涂粉末送入等离子火焰中熔化、加速并喷射到基材表面形成涂层。工作气体可用氩气、氦气等。等离子弧温度高，可喷涂几乎所有高熔点和高硬度材料，焰心温度可达 $2727^{\circ}\text{C}$ ，喷嘴出口的温度也高达 $14727\sim 19727^{\circ}\text{C}$ ，其轴向温度梯度很大，等离子焰流的温度分布见图7.6。等离子弧速度很高，在喷嘴出口处达 $1000\sim 2000\text{m/s}$ ，但衰竭迅速。另外，等离子弧能量集中，喷涂时基材的热影响区

小，并且等离子弧的稳定性好、可控性好。

等离子喷涂可喷涂几乎所有难熔的金属和非金属粉末，具有喷涂效率高、涂层致密、结合强度高、耐磨、耐蚀及耐热等优点，且基材表面的热影响区很小。因此近十几年来等离子喷涂技术在工业生产中被广泛采用。

#### 7.2.4 特种喷涂

##### (1) 超音速喷涂

超音速喷涂是20世纪60年代由美国Browning Engineering公司研究并于1983年获美国专利的一种新型热喷涂方法，目前较成熟。应用较广的有超音速粉末火焰喷涂和超音速等离子喷涂。

##### 1) 超音速火焰喷涂

Jet-Kote型超音速粉末火焰喷枪的结构原理示意图如图7.7。喷涂时将燃料气体（丙烷、丙烯或氢气）和助燃剂（氧气）以一定的比例输入燃烧室，燃气和氧气在燃烧室爆炸或燃烧，产生高速热气流，同时由载气（Ar或N<sub>2</sub>）沿喷管中心套管将喷涂粉末送入高温射流，粉末加热熔化并加速。整个喷枪由循环水冷却，射流通过喷管时受到水冷壁的压缩，离开喷嘴后燃烧气体迅速膨胀，产生达2倍以上音速的超音速火焰，并将熔融微粒喷射到基材表面形成涂层。

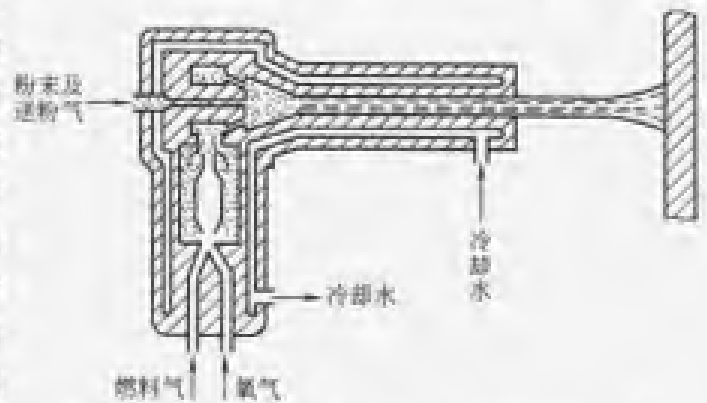


图 7.7 Jet-Kote 型超音速粉末火焰喷枪原理示意

超音速粉末火焰喷涂在获得高质量的金属和碳化物涂层上显示出突出的优越性，但难以喷涂高熔点的陶瓷材料，因此其应用受到一定的限制。

##### 2) 超音速等离子喷涂

高压电低电流方式产生超音速等离子射流的原理如图7.8所示。大量等离子气体（主要是N<sub>2</sub>）从负极周围送入，在连接正负极的长筒形喷嘴管道内产生旋流，在喷嘴和电极间很高的空载电压（DV600V）下，通过高频引弧装置引燃电弧，电弧在强烈的旋流作用下向中心压缩，被引出喷嘴，电弧的阴极区落在喷嘴出口上，由于这样的作用，弧柱被拉长到100mm以上，电弧电压高达400V，在电弧电流为500A情况下，电弧功率达200kW。这样长的电弧使等离子气体充分加热，当高温度的等离子气体离开喷嘴后产生超音速等离子射流。

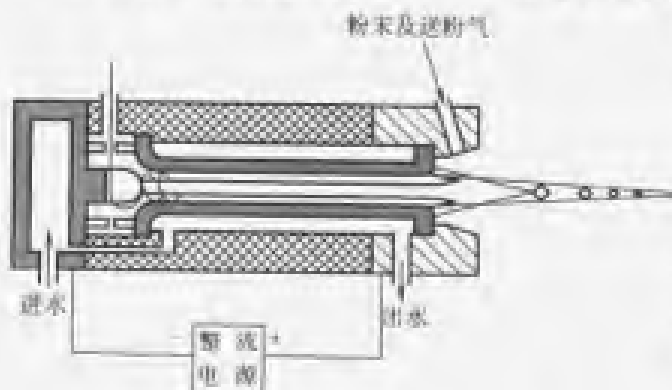


图 7.8 超音速等离子喷涂原理示意

超音速喷涂的主要特点为：涂层致密，孔隙率很小，结合强度高，涂层表面光滑，焰流温度高、速度大，可喷涂高熔点材料，熔粒与周围大气接触时间短，喷涂材料不受损害，涂层硬度高。

##### (2) 激光喷涂

近年来为了获得高功能性涂层，开发

了以激光为热源的涂层技术。激光喷涂是采用激光为热源进行喷涂的方法，激光喷涂时，从激光发生器射出的激光束，经透镜聚焦，焦点落在喷枪出口的喷嘴旁，要喷涂的粉末或线材向焦点位置输送，被激光束熔融。压缩气体从环状喷嘴喷出，将熔融的材料雾华，喷射到基材上形成涂层。喷枪中的透镜通过保护气体保护。

图 7.9 所示为激光喷涂的喷枪结构示意图。该装置由激光发生器、喷涂材料供给装置、高压气体供给装置等组成。利用激光束将喷涂材料加热至高温状态，用辅助气体加速熔融微粒形成涂层。

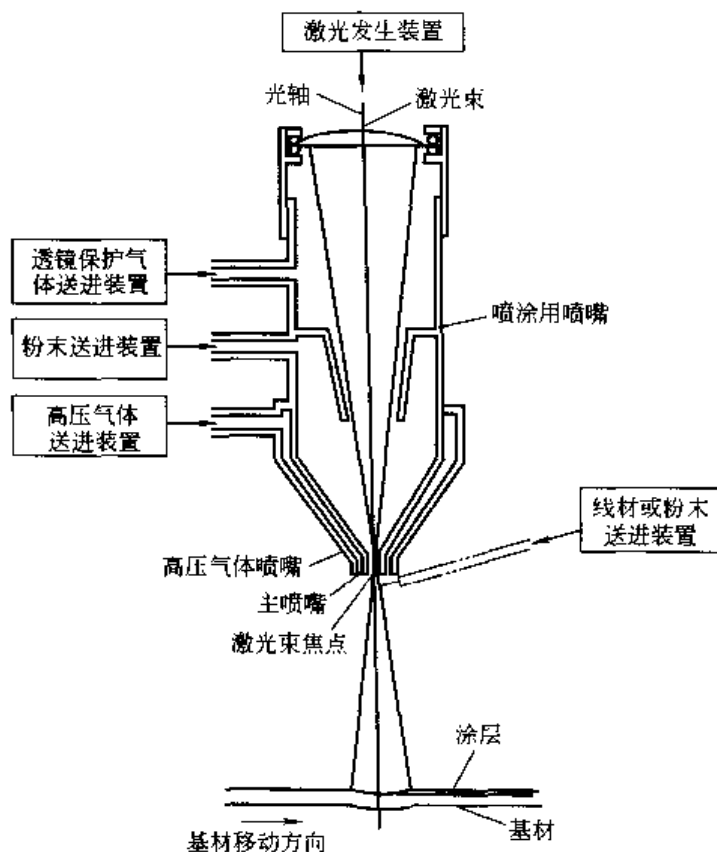


图 7.9 激光喷涂用喷枪结构示意图

### (3) 气体燃爆式喷涂

气体燃爆式喷涂原理示意如图 7.10 所示。喷涂时先将一定比例的氧气和乙炔气送入到喷枪内，然后再由另人口用氮气与喷涂粉末混合送入。将喷枪内充有一定量的混合气体和粉末后，由电火花塞点火，使氧-乙炔混合气发生爆炸，产生热量和压力波。喷涂粉末在获得加速的同时被加热，由枪口喷出，撞击在工件表面，形成致密的涂层，然后通入氮气清洗枪管，以此反复连续进行。

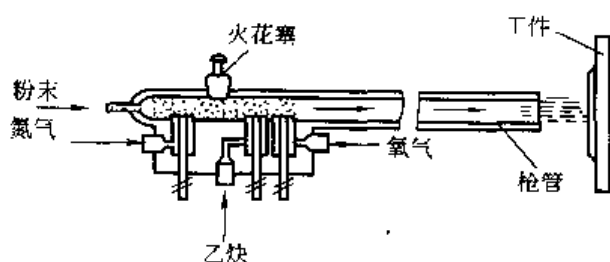


图 7.10 气体燃爆式喷涂原理示意

燃爆式喷涂时，由于喷涂粒子的飞行速度高，因此涂层质量高于同条件下的等离子喷涂层，当喷涂角度在  $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$  的范围内变化时，燃爆式喷涂层的质量几乎不受影响。

### (4) 特种等离子弧喷涂

等离子弧喷涂一般都是在大气中进行的，喷涂时等离子焰流要从周围环境中吸收大量空

气。喷涂距离越大，吸入的空气量越多，焰流中吸收的空气使喷涂颗粒发生氧化并降低射流的能量，使喷涂颗粒的速度降低、加热不足。低压等离子弧喷涂和水中等离子弧喷涂可以克服这些缺陷。

### 1) 低压等离子弧喷涂

低压等离子弧喷涂是在一个密封的气室内，用惰性气体（氩气或氮气）排出室内的空气，然后抽真空至 0.005MPa，在这种保护气氛下的低真空环境里进行等离子喷涂。

低压等离子弧喷涂设备比较复杂，要求有良好的真空系统，因此设备的价格很高。目前主要用于尖端技术部门，喷涂一些难熔金属、活性金属和碳化物等材料。

### 2) 水下等离子弧喷涂

近年来，以海底石油开采为中心的海洋技术的迅速发展，同时为利用海洋能源、开发海洋牧场、建造海上机场等海洋结构的研究的蓬勃发展，对海洋建筑物，如石油挖掘台、防护堤、栈桥等提出了长寿命的要求。因此，大型海洋建筑物表面喷涂技术随之得到了发展。

水下喷涂产生于 1980 年，水下喷涂与水下焊接相同，有湿式和干式两种。局部干式法是将喷涂部位与水隔离，图 7.11 所示为局部干式水下喷涂法设备的双层空洞保护筒结构示意图，保护筒采用钢制作。

水泵将密封水压至保护筒外隔层，外筒端部开槽，保护筒内径 70mm，喷嘴至端面距离 100mm。等离子弧喷涂距离与等离子弧输出功率、喷涂材料有关，一般为 100mm 左右。喷涂面积约为直径 20~30mm 的圆。密封水流速 9.6m/s，气体流量 40L/min。气体流量对空洞的形成影响最大，密封水流量、密封水喷出角度、保护筒端面和水槽底面间隙、槽宽等参数对空洞均有影响。

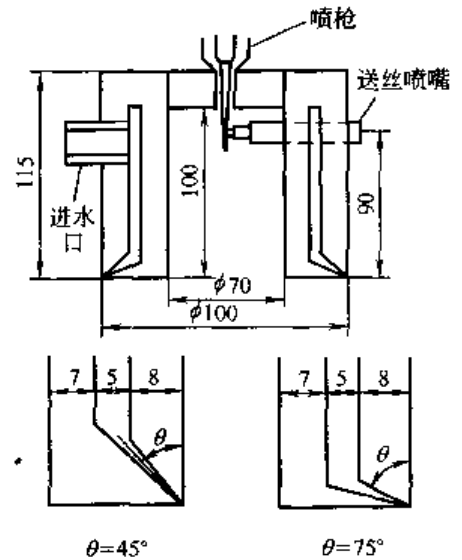


图 7.11 水下等离子喷涂  
双层空洞保护筒

## 7.3 热喷涂设备

### 7.3.1 热喷涂设备的组成

#### (1) 塑料粉末火焰喷涂

各种塑料粉末火焰喷涂设备一般由塑料火焰喷枪、送粉器、控制部分组成，塑料粉末喷涂设备组成示意图见图 7.12。火焰喷枪以中心送粉式为主，利用燃气（乙炔、氢气、煤气等）与助燃气（氧气、空气）燃烧产生的热量将塑料粉末加热至熔融状态及半熔融状态，在运载气体（常用压缩空气）的作用下喷向工件表面形成涂层。

塑料粉末送给罐有两种：一种是塑料粉末专用的大容量流动式粉末压力送给罐；另一种是金属、陶瓷、塑料粉末通用的小容量吸引式送粉罐（带振动器）。用压力送给罐送粉平稳、调节性好，可以大容量送粉。控制部分是调整和控制喷涂用各种气体的专用装置，以便获得最佳的工艺参数，一般装有流量计、减压器和压力计、运载气体开关，还有保证安全而设置的气动阀门机构等。

#### (2) 电弧喷涂

电弧喷涂设备由电弧喷涂枪、整流电源、控制装置、送丝装置和压缩空气供给系统组成。图 7.13 所示为电弧喷涂的设备系统简图，图 7.14 所示为国产 CMD-AS 型电弧喷涂设备简图。



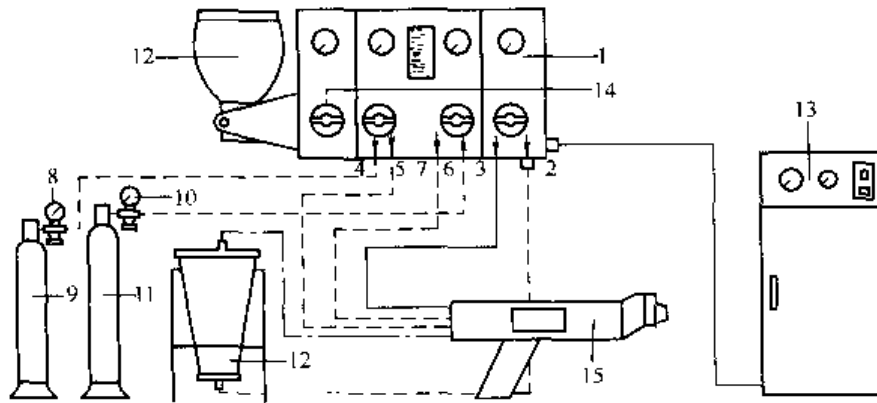


图 7.12 塑料粉末喷涂设备组成示意

- 1- 控制板；2- 粉末罐用空气出口；3- 喷枪用侧空气出口；4- 氧气出口；5- 喷枪用氧气出口；6- 燃气入口；7- 喷枪用燃气出口；8- 氧气表；9- 氧气瓶；10- 燃气表；11- 燃气瓶；12- 粉末罐；13- 压缩空气机；14- 输送气体开关；15- 喷涂枪

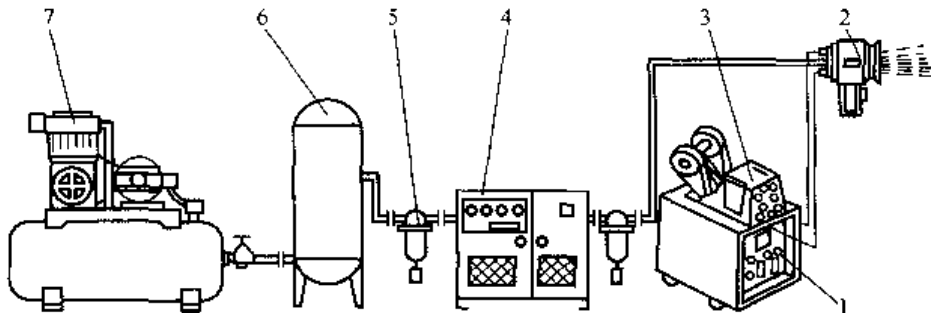


图 7.13 电弧喷涂设备系统简图

- 1- 送丝机构；2- 电弧喷涂枪；3- 油水分离器；4- 冷却装置；5- 储气罐；6- 空气压缩机；7- 电弧喷涂电源

### 1) 电源

电弧喷涂虽然可以采用一般的弧焊整流电源，但现已被外特性和动特性上更适合的专用电源代替。在电弧喷涂过程中，由于金属丝熔化-雾化过程的特殊性，弧长以很高的频率波动，送丝速度也不断发生变化。为了保持电弧稳定，要求电弧电流能够根据弧长的微小变化迅速的增减，当弧长变大时，电流能迅速减少，减少金属熔化量而恢复弧长；当电弧变小时，电流能迅速上升到足够大，加速金属丝的熔化而恢复弧长。为满足这样的要求，电源外特性选用平特性或略带上升的外特性，动特性应有足够大电流上升速度。

为了适应喷涂不同金属材料 and 工艺上的选择要求，电源输出电压应能在一定范

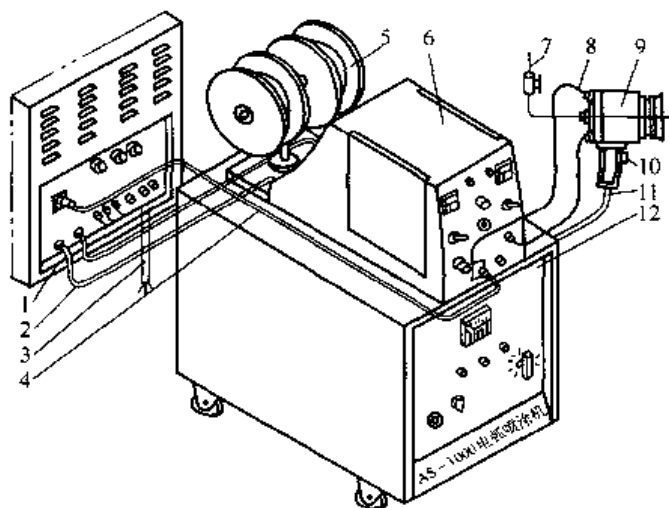


图 7.14 CMD-AS 型电弧喷涂设备简图

- 1 电源控制箱后板；2- 电缆线 50mm<sup>2</sup> (两根)；3- 三相绝缘导线；4- 遥控导线；5- 丝盘；6- 送丝机构；7- 高压胶管；8- 送丝软管 (2~3mm)；9- 电弧喷枪；10- 手柄开关；11- 开关导线；12- 电源控制箱

围内调节，图 7.15 为电弧喷涂电源的电路原理图，输出电压调节有改变变压器原边或副边线圈匝数两种方式。

### 2) 喷枪

电弧喷枪结构原理示意图 7.16。引入喷枪的两根金属丝在送丝轮的带动下，通过导丝管和导电嘴成一定角度交汇于一点。金属丝与导电嘴接触形成两个电极。引入的压缩空气通过空气喷嘴形成高速气流，雾化已熔化的金属。由导电嘴、空气喷嘴、绝缘块和弧光罩等组成的雾化头是喷枪的关键部分。

通常采用的雾化头结构示意图 7.17，雾化头是通过加装空气帽，将电弧区适当封闭，并分成两路雾化气流，通过辅助的二次雾化气流，对电弧适当压缩，相应提高了电弧温度和空气流的喷射速度，对熔化金属的雾化效果增强，使喷出的颗粒更加细微。

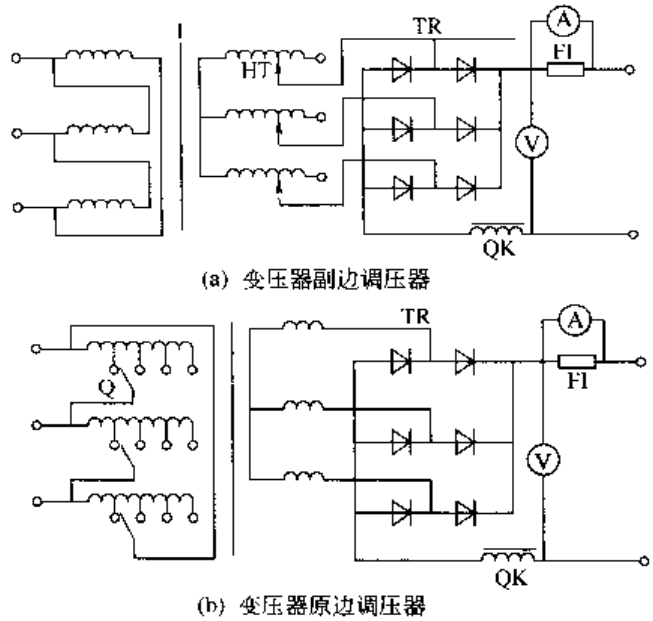


图 7.15 电弧喷涂电源原理

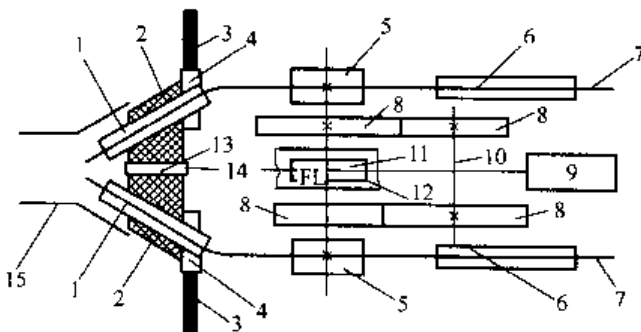


图 7.16 电弧喷枪结构原理示意

- 1 导电嘴；2 绝缘块；3—电缆；4—接电块；5 送丝滚轮；6—导丝管；7—金属丝；8—齿轮；9—电动机；10 减速齿轮轴；11 蜗杆；12—蜗轮；13—空气喷嘴；14—压缩空气；15—弧光罩

### 3) 送丝装置

根据驱动金属丝动力源的不同，送丝装置分为电动式、气动式，气动式又分为空气马达式和气动涡轮式。根据推动金属丝的方式的不同，送丝装置又可分为推式、拉式和推拉式。电动式适于固定喷枪，空气马达式适于手持式喷枪。推式是由喷枪外的动力装置送丝，它可减轻喷枪的质量，但推丝距离受到一定限制；拉式是由喷枪上的动力带动金属丝。

### (3) 等离子喷涂

等离子喷涂设备主要包括电源、喷枪、送粉器、引弧装置、供气系统、水冷系统以及电气控制系统，等离子喷涂设备示意图 7.18 所示。

### 1) 整流电源

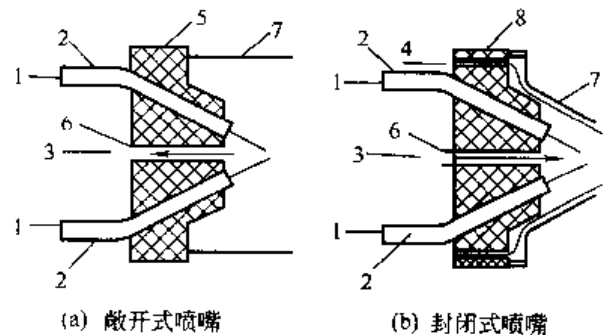


图 7.17 电弧喷枪雾化头结构示意

- 1—金属丝；2—导电嘴；3—压缩空气；4—二次雾化器；5—绝缘块；6—雾化喷嘴；7 弧光罩；8 空气帽

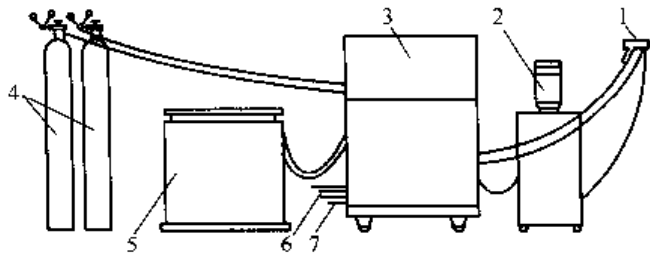


图 7.18 等离子喷涂设备示意

1—喷枪；2 送粉器；3 控制箱；4—等离子气和送粉气瓶；5 直流电源；6 冷却水进口；7—冷却水出口

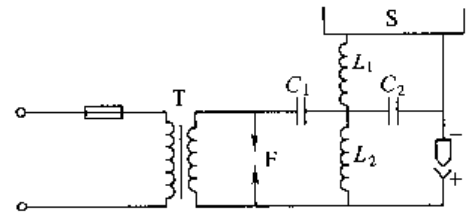


图 7.19 引弧装置原理

S—主电源；F—火花放电器

等离子喷涂均采用直流电源，其外特性、动特性及供电参数都应满足喷枪产生等离子弧的要求。目前采用的整流电源主要为饱和电抗器式或硅整流电源、晶闸管型电源，其中晶闸管型电源的陡降外特性是靠电流负反馈调节来实现的，具有起弧平稳、输出电流稳定、耗电少等特点。

### 2) 引弧装置

引弧装置的作用是在起弧时在两极间产生高频电压，击穿极间气体介质，产生电火花并引燃电弧，其工作原理如图 7.19 所示。

### 3) 喷枪

喷枪是等离子弧发生器，通过喷枪产生高温、高速等离子火焰，将喷涂粉末送入焰流中和将粉末熔化、加速，最终喷射到基材表面，喷枪是形成涂层的关键设备。喷枪结构是由阴极、喷嘴（阳极）、进气道与气室、送粉道、水冷密封、绝缘体以及枪体构成。图 7.20 所示为典型等离子弧喷涂枪的结构示意。

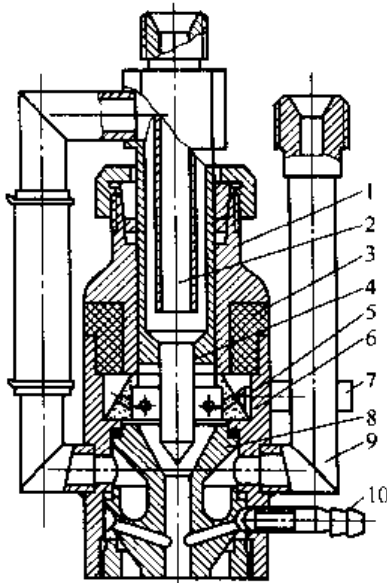


图 7.20 等离子弧喷枪结构示意图

1 后枪体；2—钨极夹头；3 绝缘套；4—钨极；5—隔热均气环；6—前枪体；7—排气管；8 喷嘴；9—进水管；10—送粉管

阴极是电子发射源，应选用熔点高且电子发射能力强的材料（一般采用钨）制成。喷嘴是喷枪的关键、易耗损部件，它是用导热性好的紫铜制成，工作气体通过水冷喷嘴才能对电弧进行压缩，产生等离子弧，等离子弧的性质在很大程度上取决于喷嘴的几何尺寸和压缩孔道参数，喷嘴的设计重点是提高喷嘴功率、解决喷嘴烧损问题和提高强制冷却效果。

喷嘴孔道的几何形状如图 7.21 所示，孔道直径一般为 5.5~6.5mm，减少孔道直径，可以使等离子弧的压缩作用增加，有利于获得高温、高速等离子焰流，但孔道直径过小则会降低等离子弧的最大工作电流和喷枪功率。

孔道是气体电离和电弧压缩区域，为使等离子弧充分压缩，要求孔道适当长一些，一般为 20~30mm。压缩角  $\alpha$  的大小会影响等离子弧的稳定性，压缩角过大会降低等离子弧的压缩性能，但若压缩角过小将会增加孔道长度， $\alpha$  一般在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内。对于等离子喷涂来说，为了加强对等离子

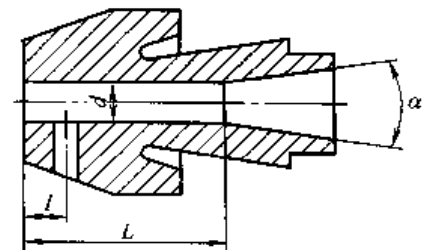


图 7.21 喷嘴孔道的几何尺寸  
d—孔道直径； $\alpha$  压缩角；L—孔道长度；l—送粉口至端面尺寸

弧的压缩，同时获得电弧阴极斑点沿孔道壁面旋转的效果，大都采用切向旋流进气方式，因此采取了加装陶瓷导流环，环上有切向分布的导气孔。

#### 4) 送粉器

送粉器是储存喷涂粉末和按工艺要求降喷枪送粉末的装置，评价送粉器性能好坏的主要指标是送粉率的稳定性、送粉量的调节范围和灵敏度等。送粉器的种类很多，包括自重式送粉器、射吸式送粉器、刮板式送粉器及电磁振动式送粉器等。

#### 5) 供气系统

供气系统包括工作气和送粉器的供气系统，主要由气瓶、减压阀、储气筒、流量计等组成。

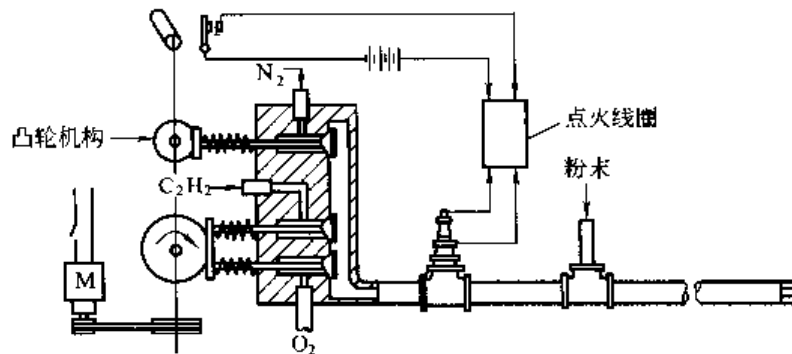


图 7.22 多凸轮、多阀门系气体燃爆式喷涂设备示意

#### 6) 水冷系统

水冷系统是向喷枪供给一定压力和足够流量冷却水的装置，它包括增压水泵和热交换器。有条件的最好采用蒸馏水循环（使用水冷），这样不仅可以防止水垢产生和提高冷却强度，而且可延长喷嘴的使用寿命。

#### 7) 电气控制系统

电气控制系统用于对水路、气路、电路、高频发生器、送粉器等进行控制，它可对喷涂过程的动作程序和工艺参数进行调节和控制。

#### (4) 气体燃爆式喷涂

气体燃爆式喷涂设备主要分为多凸轮、多阀门系和活塞/步进缸式两种喷涂设备。多凸轮、多阀门系喷涂设备通过凸轮控制阀门的开启和关闭，从而实现对填充-气垫保护-燃爆-清扫喷涂过程的时序控制。多凸轮、多阀门系气体燃爆式喷涂设备结构示意见图 7.22。

活塞/步进式气体燃爆式喷涂设备示意见图 7.23。当调速电机带动传动机构工作时，凸轮带动活塞往复运动， $N_2$  通过缸体的顶部气腔、导气管及缓冲器进入燃爆室，清除室内的燃爆物，从而完成燃爆过程中的“清扫过程”。当传动机构继续传动时，缸体下部的  $N_2$  气进口关闭，开通  $O_2$  进口和燃料进口，在缸体内将两种气体混合经由导

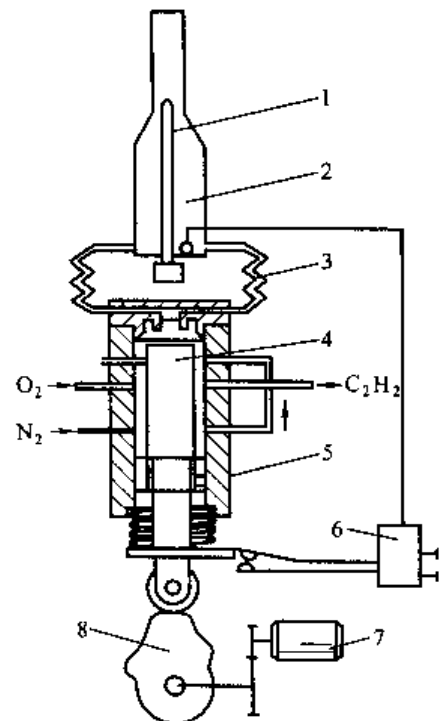


图 7.23 活塞/步进式气体燃爆式喷涂设备示意

1—送粉管；2—燃爆室；3—缓冲器；  
4—活塞；5—缸体；6—电源；  
7—调速电机；8—凸轮

气管、缓冲器进入喷枪的燃爆式完成“填充过程”。

缸体内的混合气体通过电火花放电使之在燃爆室内燃烧并爆炸，完成“燃爆过程”。然后接通送粉开关，粉末经  $N_2$  雾化后，通过送粉管到达喷枪枪膛内，燃爆产物对其进行加热加速，高温高速的粉末颗粒冲出枪膛后，撞击到工件表面形成坚固的优质喷涂层。

### 7.3.2 热喷涂设备的技术参数

#### (1) 电弧喷涂设备

CMD-AS 型电弧喷涂设备是由北京新迪表面技术工程有限公司生产，其主要技术参数见表 7.3。CMD-AS 型电弧喷涂设备主要特点包括：喷涂效率高，比火焰丝材喷涂高 2~5 倍；节能，能源利用率为 57%；成本低，使用成本仅为火焰喷涂的 20% 以下，设备投资为等离子喷涂的 30% 以下；性能稳定，安全可靠、无易燃易爆危险。

表 7.3 CMD-AS 型电弧喷涂设备的技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
输入电压/V	380	丝材直径/mm	2.5, 3.2
输出电压/V	27~40	喷涂材料	铝、锌、碳钢、铝青铜等
最大工作电流/A	300	喷涂效率/kg·h <sup>-1</sup>	10~20
压缩空气压力/MPa	0.5~0.7		

ZPG-400A 型高速电弧喷涂设备集气、电控制为一体，结构紧凑，操作更简便。功率大，电源输出距离长（大于 100m）。直流电压使用安全更可靠。表 7.4 是上海新业喷涂机械有限公司生产的 ZPG-400A 型高速电弧喷涂设备的主要技术参数。

表 7.4 ZPG-400A 型高速电弧喷涂设备的主要技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
空气压力/MPa	大于 0.5	输出空载压力/V	18~44
输入电源	380V, 三相交流	电源质量/kg	179
额定频率/Hz	50	调整电压/V	0~24
输出功率/kW	16		

与 ZPG-400A 型高速电弧喷涂设备配套的 QD III-250 型高速电弧喷涂枪是一种高效率、低能耗的高新技术产品。高速电弧喷涂设备的主要特点包括：采用一体式电控气、电开关，操作更方便，可实现长距离登高作业。该设备的粒子飞行速度可达 420m/s 以上，轴向气流速度达 600m/s，涂层沉积率大于 75%。表 7.5 是 QD III 250 型高速电弧喷涂枪的主要技术参数。

表 7.5 QD III-250 型高速电弧喷涂枪的主要技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
空气压力/MPa	大于 0.5	调速范围	无级调速
空气消耗量/m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	>1.85	喷枪质量/kg	2.65
输入电压/V	0~24 (直流)	送丝引力/kg	>8

上海新业喷涂机械有限公司研制开发的 ZPG-400B 型内孔电弧喷涂设备由 ZPG-400B 型电弧喷涂机、SB10-H 型送丝机、XNK-I 型内孔喷枪组成。该设备适合于管径 80mm 以上的管道内壁喷涂。ZPG-400B 型内孔电弧喷涂设备的主要技术参数见表 7.6。

表 7.6 ZPG-400B 型内孔电弧喷涂设备的主要技术参数

技术参数	数 据	技术参数	数 据
规格/mm	690×500×700	调整电压/V	2~24
空气压力/MPa	>0.5	喷涂效率/kg·h <sup>-1</sup>	3mm 锌丝 30; 3mm 铝丝 10
输入电源	380V(三相),50Hz	线材直径/mm	3.0
输出功率/kW	16	电源质量/kg	179
输出空载电压/V	18~44	内孔喷枪质量/kg	1.5

ZPG-400B 型推、拉式两用电弧喷涂设备是上海新业喷涂机械有限公司研制开发的集后推式和前拉式二种送丝方式为一体的两用高效率、低能耗的新一代系列产品。该设备可一机多用,适用范围广,操作方便;主机与喷枪的距离可达 100m 以上,并可遥控操作;喷涂效率高,涂层沉积率大于 75%;送丝稳定可靠,不断弧,可 24h 连续作业,多种配置,可实现后推式、前拉式及内孔喷涂操作。ZPG-400B 型推、拉式两用电弧喷涂设备的主要技术参数见表 7.7。

表 7.7 ZPG-400B 型推、拉式两用电弧喷涂设备的主要技术参数

技术参数	数 据	技术参数	数 据
规格/mm	690×500×700	喷涂效率/kg·h <sup>-1</sup>	3mm 锌丝 30;3mm 铝丝 10
空气压力/MPa	>0.5	线材直径/mm	1.6~3.0
输入电源	380V(三相),50Hz	电源质量/kg	179
输出功率/kW	16	送丝机质量/kg	20
输出空载电压/V	18~44	XTQ-1 型喷枪质量/kg	1
调整电压/V	2~24	QDIII-250 型喷枪质量/kg	2.65

## (2) 气体燃爆式喷涂设备

乌克兰科学院材料科学研究所研制的 Dnerp-3 型气体燃爆式喷涂设备的主要技术参数见表 7.8。目前应用较多的 Demeton 型气体燃爆式设备的主要技术参数见表 7.9。

表 7.8 Dnerp-3 型气体燃爆式喷涂设备的技术参数

技术参数	数 据
工作气体	丙烷-丁烷、乙炔、氧气等
工作气压力 /MPa	氧气 0.4;乙炔 0.15;丙烷-丁烷 0.4
每炮工作气消耗量/10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>	氧气(27~37);乙炔 23;丙烷-丁烷 12.5
炮膛内径/m	0.024
每炮涂层厚度/μm	5~20
爆燃频率/Hz	1~10

续表

技术参数	数据
粉料喷涂速度/kg·h <sup>-1</sup>	氧化铝 0.9~1.5; 钴-碳化钨 3.6~4.2; 镍铬粉 1.5~2.1
冷却水流量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	0.08
150μm厚的涂层效率/m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup>	0.8~0.5
外形尺寸/m	1.8×0.6×0.11
质量/kg	78
距喷枪口 0.5~1.0m 处噪声水平	≤150dB
电源参数	频率 50~60Hz; 电压 220V; 功率 300kW

表 7.9 Demeton 型气体燃爆式设备的主要技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
工作气体	丙烷-丁烷、甲烷、氧气等	冷却水流量/L·min <sup>-1</sup>	4.0
工作气压力/MPa	氧气 0.25; 燃料气 0.25	150μm厚的涂层效率/m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup>	5.4
每炮工作气消耗量/10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup>	氧气 3.4; 燃料气 1.4	外形尺寸/m	2.3×0.54×0.25
炮膛内径/m	0.024	质量/kg	56
每炮涂层厚度/μm	5~20	距喷枪口 0.5~1.0m 处噪声水平	140dB
爆燃频率/Hz	2~15	电源参数	频率 60Hz; 电压 110V; 功率 100kW
粉料喷涂速度/kg·h <sup>-1</sup>	0.0025		

## (3) 等离子喷涂设备

部分国产等离子弧喷涂用涂枪的型号及技术参数见表 7.10, 部分国产等离子喷涂成套设备的型号及技术参数见表 7.11。

表 7.10 部分国产等离子喷枪的型号及技术性能

型号	最大电流/A	最大功率/kW		喷涂范围/mm	
		Ar	N <sub>2</sub>	可喷涂最小孔径	喷涂深度
PQ-1SA 1JA	1000	80		外表面(平面、外圆、曲面等)	
PQ-1NA	500	40		102	500~700
PQ-2NA	500	37.5	38.5	60	450~600
PQ-3NA	500	30	40	45	450

表 7.11 部分国产等离子喷涂设备的型号及技术参数

设备型号	电源(硅整流直流电源)				
	型号	最大功率/kW	最大电流/A	工作电压/V	空载电压/V
GP	GDP 80	80	1000	80	165
LP 60Z	ZXG-500GY	60	5~50(Ar) 200~700(N <sub>2</sub> )	40~120	240
LP 50B	GDP-2	5~50	150~500	50~100	170

续表

设备型号	电源(硅整流直流电源)				
	型号	最大功率/kW	最大电流/A	工作电压/V	空载电压/V
GDP-2	GDP-2	5~50	150~500	50~100	170
GDP-1	GDP-1	5~35	150~450 150~800	60~100	90~165
GDP-35	GDP-35	35	150~450 50~800	50~100	90~165
GDP-50	GDP-50	50	500~1 000	500~1 000	90~165
GDP2K-50	—	50	≤500 ≤900	50~100 25~55	90~165
DDP-Ⅱ	DDP-Ⅱ	50	1 000(Ar) 500(N <sub>2</sub> )	80~100	
DDT 2	—	40	450~800	50~85	140~180

上海新业喷涂机械有限公司生产的 PPI-500A-P 型等离子喷涂设备主要由主控制柜、送粉器、热交换器、喷枪等组成。该设备主要用来制备高耐磨性、高质量的氧化物涂层或高熔点的涂层,如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Mo 及其他聚合物。PPI-500A-P 型等离子喷涂设备的主要技术参数见表 7.12。

表 7.12 PPI-500A-P 型等离子喷涂设备的主要技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
输入电压/V	380	电源外特性	陡降外特性
额定频率/Hz	50	电流调节精度	±1%
空载电压/V	交流 120	电网电压波动补偿精度	±2%
喷涂电流调节范围/A	40~500	喷涂过程中喷涂电流波动	≤3%
工作电压调节范围/V	30~120	高频引弧方式	串联谐振型高频引弧(触发板与高频引弧装置整体屏蔽)
额定工作电流/A	500	保护系统	过电流保护、过电压保护、过热保护、缺相保护
额定负载持续率/%	100	执行标准	IEC974
最大输出功率/kW	60	控制方式	可编程控制器控制

乌克兰与荷兰联合研制的 MPS-001 型微等离子喷涂设备,主要是将等离子弧的燃烧电流范围控制在几十安培到几安培之间,可以实现在极薄(几十微米至 2mm)的基体上进行喷涂。MPS-001 设备主要由控制面板、等离子枪、专用送粉器、独立的水冷系统组成,表 7.13 是 MPS-001 型微等离子喷涂设备的主要技术参数。

表 7.13 MPS-001 型微等离子喷涂设备的主要技术参数

技术参数	数据	技术参数	数据
工作气体	氩气	送粉气体流量/L·min <sup>-1</sup>	0.3~0.4
送粉气体	氩气或氢气	保护气体流量/L·min <sup>-1</sup>	1.0~4.0
保护气体	氢气	喷涂斑点直径/mm	1.0~5.0
功率/kW	最大 2.0	喷涂生产率/kg·h <sup>-1</sup>	0.25~2.5
电流/A	3.5~50	沉积效率/%	60~80
电压/V	最大 40	总体尺寸/mm	1 820×1 130×1 250
工作气体流量/L·min <sup>-1</sup>	0.15~0.5	质量/kg	580



美国 Metco 喷涂设备公司生产的真空等离子弧喷枪主要包括 F4-VB 型喷枪和 03C 系列喷枪等。

1) F4-VB 型喷枪

F4-VB 是用于真空喷涂的重型等离子喷枪。采用钍钨合金技术以延长喷嘴寿命，零部件更换少，使用成本较低。由于多数喷涂参数采用相同的喷嘴和电极构造，因此该喷枪适合于一般的喷涂作业。并可选用几种不同的电源接口以满足喷涂条件变化的需要。

2) 03C 系列喷枪

03C 系列等离子喷枪可进行 120kW 的连续喷涂，适合于进行 LPPS/VPS 和 CAPS 室内喷涂。喷枪配有多种在真空和控制气氛中喷涂不同材料的备用电极。这种喷枪具有反向转换电弧工件清理和预热处理技术等性能。

## 第 8 章 热喷涂材料

为适应工程结构零部件表面日益苛刻的耐腐蚀、耐磨和抗氧化性等性能要求，热喷涂技术和热喷涂材料得到迅速发展，目前已有的热喷涂材料有数百种以上。热喷涂材料的种类繁多，但凡在高温下不挥发、不升华、不分解、不发生晶型转变、可熔融的固态材料均可用做热喷涂材料，应用于不同的热喷涂技术领域。

### 8.1 热喷涂材料的分类及特性

#### 8.1.1 分类方法

##### (1) 按材料形状分类

根据热喷涂材料的不同形状，可以分为丝材、棒材、软线和粉末四类，其中丝材和粉末材料使用较多。不同形状的热喷涂材料见表 8.1。

表 8.1 不同形状的热喷涂材料

丝材	纯金属丝材	Zn、Al、Cu、Ni、Mn 等
	合金丝材	Zn-Al、Pb-Sn、Cu 合金、巴氏合金、Ni 合金、碳钢、合金钢、不锈钢、耐热钢
	复合丝材	金属包金属（铝包镍、镍包合金）、金属包陶瓷（金属包碳化物、氧化物等）、塑料包覆（塑料包金属、陶瓷等）
	粉芯丝材	7Cr13、低碳马氏体等
棒材	陶瓷棒材	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、TiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
粉末	纯金属粉	Sn、Pb、Zn、Ni、W、Mo、Ti
	合金粉	低碳钢、高碳钢、镍基合金、钴基合金、不锈钢、钛合金、铜基合金、铝合金、巴氏合金
	自熔性合金粉	镍基（NiCrBSi）、钴基（CoCrWB、CoCrWBNi）、铁基（FeNiCrBSi）、铜基
	陶瓷、金属陶瓷粉	金属氧化物（Al 系、Cr 系和 Ti 系）、金属碳化物及硼氮、硅化物等
	包覆粉	镍包铝、铝包镍、金属及合金、陶瓷、有机材料等
	复合粉	金属+合金、金属+自熔性合金、WC 或 WC-Co+金属及合金、WC 或 WC-Co+自熔性合金+包覆粉、氧化物+金属及合金、氧化物+包覆粉、氧化物+氧化物、碳化物+自熔性合金、WC+Co 等
	塑料粉	热塑性粉末（聚乙烯、聚四氟乙烯、尼龙、聚苯硫醚）、热固性粉末（酚醛、环氧树脂）、树脂改性塑料（塑料粉中混入填料，如 MoS <sub>2</sub> 、WS <sub>2</sub> 、Al 粉、Cu 粉、石墨粉、石英粉、云母粉、石棉粉、氟塑料等）

##### (2) 按材料成分分类

按喷涂材料的成分可分为金属、合金、陶瓷和塑料喷涂材料四大类。根据成分对热喷涂材料的分类见表 8.2。

##### (3) 按材料性质分类

按喷涂材料的性质以及获得的涂层性能可以分为耐磨喷涂材料、耐腐蚀喷涂材料、黏结底层喷涂材料及功能性喷涂材料等。

表 8.2 根据成分对热喷涂材料的分类

类 别		热 喷 涂 材 料
金属与合金	铁基合金	低碳钢、高碳钢、不锈钢、高碳钼复合粉等
	镍基及钴基合金	纯镍、镍包铝、铝包镍、NiCr/Al 复合粉、NiAlMoFe、NiCrAlY、NiCoCrAlY、MoCrSiFe、CoCrNiW 等
	有色金属	铝青铜、Cu、黄铜、填有 SiC 复合材料的铜管、巴氏合金、Cu-Ni 合金、Cu-Ni-In 合金、Zn、Al、Sn 等
	难熔金属及合金	Mo、W、Ta、Mo-Cr-B-Si-Fe、自熔合金+Mo 等
	自熔性合金	Ni-Cr-B-Si、Ni-Cr-Fe-B-Si、Fe-Cr-B-Si、Ni-WC-Co-Cr-B-Fe-Si、Co-Si-B-Cr-Ni-W 等
陶瓷材料	氧化物陶瓷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>7</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、TiO <sub>2</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> (CaO、Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、MgO)、TiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> 、NiO、BeO、HfO <sub>2</sub> 等
	碳化物	WC、WC-Co(12%~20%)、WC-Co 与 Ni+Al 的聚合物
	氮化物	TiN、BN、ZrN、AlN、HfN 等
	硅化物	MoSi <sub>2</sub> 、TaSi <sub>2</sub> 、Cr <sub>3</sub> Si-TiSi <sub>2</sub> 、WSi <sub>2</sub> 等
	硼化物	CrB <sub>2</sub> 、TiB <sub>2</sub> 、ZrB <sub>2</sub> 、WB、TaB <sub>2</sub> 等
塑料	热塑性塑料	尼龙(聚酰胺); 尼龙-11、小尼龙-1010、尼龙-66 等; 聚乙烯、聚苯硫醚、聚四氟乙烯
	热固性塑料	环氧树脂、酚醛树脂
	改性塑料	加 MoS <sub>2</sub> 、WS、Al 粉、Cu 粉、石墨粉等填料于尼龙中, 提高润滑性; 加石英粉提高硬度、耐热性; 加云母粉提高绝缘性、耐电弧性; 加石棉粉提高耐热性; 加氟塑料提高耐蚀性; 加颜料改善外观

1) 耐磨喷涂材料

耐磨喷涂材料的类型及特性见表 8.3。

表 8.3 耐磨喷涂材料的类型及特性

材 料	特 性
碳化铬	耐磨、熔点 1890℃
自熔性合金、Fe-Cr-B-Si、Ni-Cr-B-Si	耐磨, 硬度 30~55HRC
WC-Co (12%~20%)	硬度 > 60HRC, 红硬性好, 使用温度低于 600℃
镍铝、镍铬、镍及钴包 WC	硬度高, 耐磨性好, 可用于 500~850℃ 下的磨粒磨损
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、TiO <sub>2</sub>	抗磨粒磨损, 耐纤维和丝线磨损
高碳钢 (7Cr13)、马氏体不锈钢、铝合金	抗滑动磨损
镍包石墨	用于 550℃, 飞机发动机可动密封部件、耐磨密封圈及低于 550℃ 时的端面密封。润滑性好, 结合力较高
铜包石墨	润滑性好, 力学性能及焊接性能好, 导电性较高, 可作电触头材料及低摩擦系数材料
镍包二硫化钼	耐磨材料, 润滑性良好, 用于 550℃ 以上可动密封处
镍包硅藻土	作为 550℃ 以上高温耐磨材料, 封严、可动密封
自润滑自黏结镍基合金	耐磨, 润滑性好
自润滑自黏结铜基合金及其他的包覆材料 (包覆、聚酯、聚酰胺等)	耐磨, 润滑性好

耐磨喷涂材料主要用于具有相对运动且表面容易出现磨损的零部件，如轴颈、导轨、叶片、阀门、柱塞等。耐磨喷涂材料又分为高温耐磨喷涂材料和低温耐磨喷涂材料两种。

### 2) 耐腐蚀喷涂材料

耐腐蚀喷涂材料的类型及特性见表 8.4。

表 8.4 耐腐蚀喷涂材料的类型及特性

材 料	熔点/℃	特 性
Zn	419	暗白色、喷涂效率高，涂层厚度 0.05~0.5mm，黏结性好，常温下耐淡水腐蚀性好，广泛用于防大气腐蚀，在碱性介质时耐蚀性优于 Al，适于电弧喷涂
Si	1410	防石墨高温氧化
Al	660	黏结性好，涂层厚度 0.1~0.25mm，银白色，喷涂效率高，大工件或现场施工均可，广泛用于防大气腐蚀，在酸性介质时耐蚀性优于 Zn，使用温度超过 65℃ 亦可用，适于电弧喷涂
Ni	1066	密封后可作耐腐蚀层
Sn	230	与铝粉混合，形成铝化物，可用于腐蚀保护
Cr	1890	封孔后耐蚀
Cr <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	1600~1700	硬度高，致密性好，黏结强度高，高温抗氧化性好，耐磨
MoSi <sub>2</sub>	1393	用于石墨，防高温氧化
Ni-Cr(20%~80%)	1038	抗氧化，耐热腐蚀
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	封孔后耐高温氧化腐蚀等
TiO <sub>2</sub>	1920	层孔隙少，结合好，耐蚀
镍包铝	1510	自黏结，抗氧化
特种 Ni-Cr 合金	1038	抗高温氧化及耐腐蚀
高铬不锈钢	1480~1530	需加封孔，收缩率低
Ni-Cr-Al+Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	高温抗氧化
镍包氧化铝、包碳化铬	—	工作温度 800~900℃，抗热冲击
富锌的铝合金	<660	综合 Al 及 Zn 的各自特性，形成一种高效耐腐蚀层
常温尼龙	尼龙 210~250	常温、低温下耐酸、碱介质，适合火焰喷涂
高温塑料：聚苯硫醚、聚醚醚酮	—	工作温度 -140~220℃，最高可达 350℃，耐酸及碱介质腐蚀，适于火焰喷涂
自熔性镍铬硼合金	1010~1070	耐腐蚀性好，亦耐磨

耐腐蚀喷涂材料不仅可以耐腐蚀，还具有抗高温氧化等特性。常用于船舶、海洋钢结构、搭架、桥梁、石油化工机械、铁路车辆等。用于抗腐蚀的涂层在喷涂之后一般需经过封孔处理后使用。

### 3) 黏结底层喷涂材料

黏结底层喷涂材料常用于喷涂底层以增加表面的黏结力，尤其是面层为陶瓷脆性材料，基体为金属材料时，黏结底层喷涂材料的效果更明显。常用的黏结底层喷涂材料有 Mo、镍铬复合材料及镍铝复合材料等，其中最常用的为镍包铝（或铝包镍），它不仅能增加表面层的结合，同时还在喷涂时能产生化学反应，生成金属间化合物（Ni<sub>3</sub>Al 等）的自黏结成分，形成的底层无孔隙，并且属于冶金结合，可以保护金属基体，防止气体渗透进行侵蚀。

#### 4) 功能性喷涂材料

功能性喷涂材料是指具有特殊功能的涂层材料，例如，Al、Cu 和 Ag 具有良好的导电性，Al 喷在陶瓷或玻璃上可作电介电容；Cu 喷在陶瓷或碳质表面作电阻器及电刷；Ag 可作电器触点或印刷电路。FeCrAl、FeCrNiAl 等微波吸收层、高 Tc 超导体层、远红外辐射层和防 X 射线辐射层等喷涂材料获得的涂层，在较低温度下有很好的热辐射特性，同时吸收热辐射的能力又很弱，在受热时能辐射出波长较长的远红外波。含 BN、B<sub>6</sub>Si 等的复合粉末可喷涂于中子吸收装置上。含某些稀土元素和铅的功能性喷涂材料，具有较好的防 X 射线等辐射的能力。

#### 8.1.2 热喷涂用丝材

热喷涂用丝材主要包括锌及锌合金、铝及铝合金、锡及锡合金、铅及铅合金、铜及铜合金、镍及镍合金、碳钢、低合金钢、不锈钢及复合丝材等。

##### (1) 锌及锌合金丝

锌为蓝白色有色金属，熔点为 419℃，具有较好的耐大气腐蚀性能，在海水中的腐蚀速度也很慢。因此锌及锌合金是作为钢铁基体防腐蚀常用的涂层材料。在钢铁构件上，只要喷涂 0.2mm 厚的锌层，就可在大气、淡水、海水中保持较长的时间（甚至几十年）不发生锈蚀，目前锌及锌合金丝材被广泛应用于喷涂大型桥梁、塔架、钢窗、电视台天线、水闸门及各种容器等。

为了避免有害元素对锌涂层耐蚀性的影响，最好使用纯度在 99.85% 以上的纯锌丝，表面不应沾有油污等，更不能生成氧化膜。锌中加入铝可提高涂层的耐腐蚀性能，若铝含量为 30%，则锌铝合金涂层的耐蚀性最佳。但由于锌铝合金的延性较差，拉拔加工困难，各国使用的锌铝合金喷涂丝的含铝量一般控制在 16% 以下。

##### (2) 铝及铝合金丝

铝是银白色的轻金属，熔点为 660℃。它与氧的亲合力较强，易形成致密而坚固的氧化膜。铝用作防腐蚀喷涂层时，作用与锌相似。但与锌相比，在含有二氧化硫的气体中铝的耐腐蚀效果比较好。此外，在铝及铝合金中加入稀土元素不仅可以提高涂层的结合强度，而且能够降低涂层的孔隙率。

铝在高温作用下，能在铁基体上扩散，与铁发生作用形成抗高温氧化的 Fe<sub>3</sub>Al，从而提高了钢材的耐热性，因此铝还可以用作耐热喷涂层。目前铝及铝合金喷涂层已广泛应用于储水容器、硫磺气体包围中的钢铁结构件、食品储存器、碳化塔、烟道、石油储罐、燃烧室、船体和闸门等。

##### (3) 钼丝

钼是一种难熔金属，熔点为 2630℃。钼与氢不发生反应，因而在氢气保护或真空条件下可用作高温涂层。钼的摩擦系数很低，适用于喷涂活塞环和摩擦片等。

喷涂钼丝时，表面熔融的钼能溶入金属基体，甚至可以在切割光滑的工件表面上形成冶金结合，结合层厚度约为 1μm，所以也常用作打底层材料。

喷涂用钼丝常用于机床导轨喷钢的打底层，因为用钼丝作为打底层，可以增加钢与基体的结合强度。钼能与碳钢、不锈钢、铸铁、镍及镍合金、镁及镁合金、铝及铝合金等形成牢固的结合。钼也是耐热浓盐酸腐蚀的惟一金属。喷涂用钼丝纯度一般在 99.9% 以上，线材直径为 2.0mm 或 2.3mm。

##### (4) 锡丝

锡是比较活泼的金属，其中白锡具有延展性，可以制成喷涂用线材。用锡丝进行喷涂能够得到理想的致密涂层，耐蚀性好，硬度低，易抛光。锡涂层常用作食品器具的保护涂层，但为了保证食品的安全卫生，在食品器具上喷涂的锡中含砷量不得大于 0.015%。在电子工业中，锡丝可用作软钎焊过渡涂层。在机械工业中，锡丝还可用作轴承、轴瓦及其他滑动摩擦部件的耐磨涂层。此外由于锡熔点较低，可在熟石膏等材料上进行喷涂，制造低熔点模具等。

喷涂用锡丝的直径一般为 3mm 左右。

#### (5) 铅及铅合金丝

铅是一种较软的灰黑色金属，可塑性较好，并具有良好的润滑性和耐腐蚀能力，尤其在稀硫酸及硫酸盐溶液中，它的耐蚀性更为突出。在磷酸、亚硫酸、铬酸中相当稳定，但对于盐酸和氢氟酸的耐腐蚀性较差。

铅还有很好的防 X 射线等辐射的性能，可用作防辐射涂层材料。铅锡合金丝还可作为电子器件焊接表面的过渡涂层。

铅及铅合金的喷涂层较松软，用于耐腐蚀涂层时需经封孔处理。

#### (6) 铜及铜合金丝

纯铜具有良好的导电、导热性和良好的塑性，在大气中和冷、热水中的耐蚀性良好，主要用于电器开关的导电涂层以及塑像、水泥等建筑表面的装饰涂层。

黄铜涂层广泛应用于修复磨损及加工超差工件，修补有铸造砂眼、气孔的黄铜的铸件，也可用作装饰涂层。

铝青铜的强度比一般黄铜高，它耐海水、硫酸及盐酸腐蚀，有很好的腐蚀疲劳性能和耐磨性；铝青铜采用电弧喷涂时与基体有很好的结合强度，形成理想的粗糙表面，又可以作为打底涂层；主要用于喷涂水泵叶片、气闸阀门、活塞、轴瓦表面，也可用于喷涂青铜铸件及装饰件等。

磷青铜涂层较其他青铜涂层更为致密，有较好的耐磨性，主要用于修复轴类和轴承等易磨损部位，也可用作装饰涂层。

#### (7) 镍及镍合金丝

镍具有良好的化学稳定性，在空气中不会氧化，当加热到 500℃ 时，表面仅氧化一薄层。镍合金中用作喷涂材料的主要为镍铬合金，这类合金具有较好的抗高温氧化性能，可在 880℃ 高温下使用，是目前应用最广的热阻材料。

镍铬合金热喷涂丝还可耐水蒸气、二氧化碳、一氧化碳、氨、醋酸及碱等介质的腐蚀，因此镍铬合金被大量用作耐腐蚀及耐高温喷涂层。

#### (8) 碳钢及不锈钢丝

碳钢是应用最广泛的机械工程材料。热喷涂中最常用的碳铜丝为高碳铜丝和碳素工具铜丝，主要用于常温下工作的机械零件滑动表面的耐磨涂层以及磨损部位的修复，如曲轴、柱塞、机床导轨和机床主轴等。但碳钢丝的红硬性差，温度高于 250℃ 时硬度和耐磨性会有所降低，影响使用性能。

热喷涂用不锈钢丝主要有马氏体不锈钢、铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢，马氏体不锈钢丝 1Cr13、2Cr13、3Cr13 主要用于强度和硬度较高、耐蚀性不太强的场合，喷涂工艺较好，不易开裂。Cr17 与 Cr17Ti 等铁素体不锈钢丝在氧化性酸类、多数有机酸、有机酸盐的水溶液中有良好的耐蚀性。奥氏体不锈钢中 18-8 钢应用最广泛，有良好的工艺性，在多数氧化

性介质和某些还原性介质中都有较好的耐蚀性，用于喷涂水泵轴、造纸烘缸等。但涂层收缩率大，适于喷较薄的涂层，否则容易出现开裂和剥落现象。

#### (9) 复合热喷涂丝

复合热喷涂丝是用机械方法将两种或更多种材料复合压制成的喷涂材料，主要有镍铝、自结合不锈钢、铜铝复合喷涂丝等。

镍铝复合喷涂丝属于放热型喷涂材料，主要用于火焰喷涂，得到的涂层性能基本上与镍包铝复合粉末相同。

自结合不锈钢复合喷涂丝是由不锈钢、镍、铝等组成的复合丝，既利用了镍铝的放热效应，使涂层与多种母材金属形成牢固结合，又因复合其他强化元素，改善了涂层的性能。这种涂层致密度高、收缩率中等，喷涂参数容易控制，便于火焰喷涂。其主要用于油泵转子、轴承、汽缸衬里和机械导轨表面的喷涂，也可用来修补碳钢或耐蚀钢磨损件。

铜铝复合喷涂丝是一种自结合型青铜材料，涂层含有氧化物和铝铜化合物等硬质点，因此具有良好的耐磨性，主要用于铜及铜合金零部件的修补以及换挡叉、压力配合件、轴承座等工件的喷涂。

### 8.1.3 热喷涂用合金粉末

热喷涂用合金粉末主要包括：金属及其合金粉末、喷熔合金粉末、陶瓷及复合材料粉末、塑料粉末等。

#### (1) 喷涂合金粉末

用于喷涂的合金粉末不需或不能进行重熔处理，以喷涂状态使用。喷涂用的丝材都可以采用适当的方法制成粉末使用，特别是难以拉拔加工成丝材的、延展性差的金属或合金，大多数制成粉末使用，其成分及性能与丝材完全一致。

根据喷涂合金粉末的用途可分为打底层粉末和工作层粉末。打底层粉末主要用于增加涂层与母材基体之间的结合强度。目前采用的打底层粉末主要是镍包铝或铝包镍复合材料粉末。工作层粉末主要保证涂层具有所要求的使用性能。由于工作层粉末是在喷涂状态下使用，所以几乎所有的金属或合金都可作为喷涂工作层。

根据合金粉末的化学成分，喷涂合金粉末主要有镍基、钴基、铁基和铜基四类。喷涂合金粉末的牌号用F×××表示，其中“F”表示喷涂合金粉末，“F”后面第一位数字表示合金粉末的化学组成类型，其中F1××-镍基；F2××-钴基；F3××-铁基；F4××-铜基，牌号的第二、三位数字表示同一类型粉末中不同的序号。

#### (2) 自熔性合金粉末

自熔性合金粉末具有较低的熔点，一般在喷涂后，可在普通大气下再对涂层进行加热重熔。这种合金在熔融过程中，合金中的某些元素能与氧化合生成低熔点的熔渣上浮，覆盖于涂层的表面，防止涂层氧化。因而将基体和涂层中的氧元素加以清除，使合金涂层熔体与基体表面很好的润湿溶解、扩散，便形成冶金结合的涂层。

##### 1) 自熔性合金粉末的要求

为了顺利进行自熔性合金涂层的重熔和适应不同的喷熔工艺，以获得所希望的涂层，投入使用的粉末必须符合下列的物理和冶金要求。

① 熔点要低。对大多数工程材料的钢铁合金基体而言，其熔点都不太高，由于喷熔工艺是自熔性合金涂层熔融而基体不熔，所以自熔性合金的熔点必须低于基体的熔点，因此，自熔性合金的熔点一般不能超过1200℃。

② 具有自溶性。在喷熔过程中，粉末和基体表面都不可避免地存在着氧化物，这种氧化物会严重影响喷熔效果。因此，自溶性合金粉末必须包含有与氧亲和力较大并能自行脱氧的硼、硅元素，以清除熔融涂层和基体界面的氧，保证具有良好的润湿基体表面，对基体表面有自溶性。

③ 具有一定的液-固相线范围。对于喷熔一步法粉末，要求熔点低，液态流动性好，所以粉末的设计一般应靠近共晶点。而对于喷熔二步法粉末，要求合金有一定的黏度，因此二步法合金的设计成分，应偏离共晶点，使合金的固液相共存温度有一定的范围，一般设计为 $100^{\circ}\text{C}$ 左右。

④ 合适的粉末粒度。用于一步法和二步法的自溶性合金粉末的粒度是不相同的。在一步法喷熔中，粉末喷涂到基体表面上随之用火焰重熔，喷涂距离又较短，因此对粉末的粒度要求较细，而对粒度的均匀性没有非常严格的要求，一般为300目。使用二步法喷熔工艺时，在喷涂过程中，粉末在火焰中的停留时间较长，过细的粉末容易氧化，甚至发生气态，因此要求粉末的粒度较粗，粉末的粒度分布要求集中并均匀，一般为 $-150\sim 325$ 目。

#### 2) 硼、硅元素在自溶性合金粉末中的作用

自溶性合金粉末与其他合金粉末相比，其特殊之处在于它含有较多的硼、硅元素，并且硼、硅元素对合金粉末的性能起着决定性作用。

① 降低熔点。硼、硅元素可与合金粉末中的铁、钴、镍等元素在高温下生成共晶合金，使粉末合金的熔点大幅度降低，尤其以硼元素降低熔点的作用更为显著。

② 脱氧还原作用。硼、硅元素对氧的亲和力较强，能与氧生成 $\text{B}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 。不但可以降低自溶性合金的熔点，而且和其他金属氧化物一起熔融生成硼、硅酸盐玻璃渣。这层渣浮起覆盖在液态合金涂层上面，隔绝空气中的氧对液态合金涂层的氧化，使涂层致密无气孔，提高涂层质量。

另一方面，因硼、硅元素与氧具有较高的亲和力，所以它是强还原剂，对铁、钴、镍等的氧化物具有强烈的脱氧还原作用。

③ 硬化作用。硼、硅元素的含量对自溶性合金粉末涂层的硬度、耐磨性有着很大的影响。这种影响是通过硼、硅元素对合金涂层的金相组织的固溶强化和弥散强化作用实现的。图8.1所示为硼、硅元素对Ni-B-Si系自溶性合金涂层硬度的影响。

随着硼、硅元素含量的增加，涂层的硬度增加，而且硼元素的硬化效果比硅大得多。但是合金中硼、硅元素含量不能太高，因为随着硼、硅元素的继续增加，晶界上会出现较多的

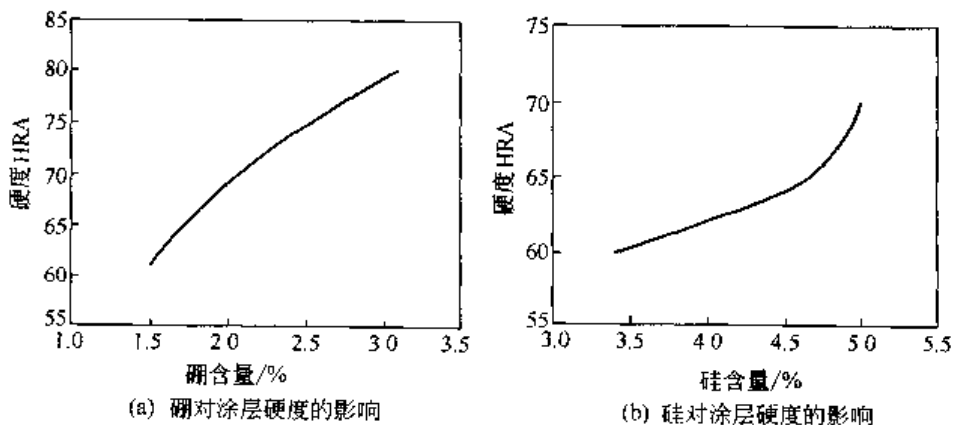


图 8.1 硼、硅元素对 Ni-B-Si 系自溶性合金涂层硬度的影响



脆性氧化硅或硅酸盐化合物，以及碳硼化合物，使涂层的塑韧性下降，脆性增加，容易产生裂纹，影响涂层性能。

由于自熔性合金中含有较多的硼、硅元素，因而形成一系列独特优点，即粉末状规则（多为球形与椭球形），熔点低，成渣性良好，去除熔融涂层和基体表面氧化物能力强，对基体润湿性好。自熔性合金的固液相区间范围较宽，涂层熔体在基体表面不易流失，成形美观，形成的涂层致密无孔等。

### 3) 自熔性合金粉末主要类型及性能

自熔性合金粉末按合金的基本成分可分为镍基、铁基、钴基、铜基和碳化钨型自熔性合金粉末。

① 镍基自熔性合金粉末 镍是一种耐蚀性优良、韧性较好的金属，在镍中加入适量的硼和硅，就得到镍基自熔性合金。这类合金熔点较低（约 $950\sim 1150^{\circ}\text{C}$ ），成渣性好，固-液相温度范围宽，对多种基体材料的润湿能力强，喷熔工艺性能好。

镍基合金粉末的应用范围很广，可用于运送机螺旋、拉丝机绞盘、玻璃和塑料模具、粉碎设备部件、混合机叶片、轧钢导板、轧辊、积压机冲头、纸芯绕轴、纺织机芯轴、泵柱塞、泵套、轴承套、曲轴、阀门、阀杆、农业机械以及需要耐磨、耐蚀的零部件的修补。

② 钴基自熔性合金粉末 钴基自熔性合金是在钴铬钨系合金基础上添加硼、硅元素制成的。钴是具有极好的耐热、耐蚀和抗氧化能力的金属。在其中加入铬，一部分铬与钴形成固溶体，起固溶强化作用，进一步提高钴基合金的抗氧化能力；一部分铬与合金中的硼和硅生成化合物，对合金起弥散强化作用，提高合金的耐热性能。其余的钨则和铬形成复式化合物，提高合金的硬度和耐磨性。

钴基自熔性合金粉末是所有自熔性合金粉末中综合性能最好的合金粉末。它具有良好的耐热、耐热震，抗蠕变、抗磨损、抗腐蚀等性能，在温度高达 $800^{\circ}\text{C}$ 时仍能保持较高的硬度和温度高达 $1080^{\circ}\text{C}$ 的抗氧化性能。钴基自熔性合金粉末主要用于高压泵柱塞、内燃机进排气阀、排风机叶片、飞机发动机零件的修补等，并特别适合热腐蚀条件下需要抗高温蠕变的涡轮叶片、燃料喷嘴、高温高压阀门密封面的喷涂等。

③ 铁基自熔性合金粉末 与镍、钴比较，铁易氧化。加入硼、硅元素后，也能降低熔点，增加自熔性，但熔点仍比相应的镍基和钴基合金高。虽然铁基自熔性合金喷涂和重熔过程中的工艺性能较镍基、钴基差，涂层的性能也差，但由于其价格便宜，在民用工业上，铁基自熔性合金也获得了广泛应用，如农业机械、矿山机械、建筑机械磨损件的修复。

④ 铜基自熔性合金粉末 铜基自熔性合金粉末主要有铝青铜、锡青铜、锰青铜、硅青铜和锰硅青铜等。部分铜基自熔性合金粉末中加入适量的磷，在喷熔时，磷能还原涂层和基体材料表面的氧化物，使其具有良好的自熔性。

铜基自熔性合金粉末所形成的涂层力学性能好，塑性高，易于加工，耐蚀性好，摩擦系数低，适用于各种轴瓦、轴承、机床导轨的修复等。

⑤ 碳化钨型自熔性合金粉末 由于碳化钨的硬度很高，在易遭受严重磨损的工件上，采用喷熔碳化钨型自熔性合金粉末进行喷涂，可以获得满意的效果。这类粉末一般由镍基、钴基或铁基自熔性合金粉末混以 $20\%\sim 80\%$ 的碳化钨粉末制成。其制作方法一般采用烧结法和雾化法。

碳化钨型自熔性合金粉末的涂层致密、超硬、耐磨粒磨损，可用于特别严重磨损部件的

修补或预防性喷熔。例如，链锯导杆、粉碎机部件、喷砂嘴、离心机叶片、油井工具接头、风头机叶片、螺旋输入器等。

### (3) 陶瓷及复合材料合金粉末

#### 1) 陶瓷合金粉末

陶瓷通常是指金属氧化物、碳化物、硼化物、硅化物和氮化物的总称。这种材料具有熔点高、硬度高、性能脆等特点。如果经过适当的制备，用热喷涂技术能得到具有性能良好的涂层。热喷涂陶瓷材料应用较多的是氧化物和碳化物，也少量应用硼化物和硅化物。由于氮化物很脆，耐氧化性能又差，它的应用甚少。氧化物陶瓷的性能见表 8.5。

表 8.5 氧化物陶瓷的性能

材 料	分子式	熔点/℃	氧化气氛 中最高使 用温度/℃	热膨胀系数 /10 <sup>6</sup> ℃ <sup>-1</sup>	热导率 /W·(m·℃) <sup>-1</sup>	抗热 振性	特 点
氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 015	1 950	8.0	2.4	良	硬度高，耐热性、绝热性、耐氧化性、耐磨性、耐腐蚀性良好，是电绝缘体
氧化锆	ZrO <sub>2</sub>	2 600	2 500	5.5	0.9	可	耐热性、绝热性、耐氧化性、耐磨损、耐腐蚀性良好，是电绝缘体（约 1 000℃ 以下），一般不受熔化金属、氧化物的侵害
氧化钙	CaO	2 600	2 400	13.6	—	可	—
氧化铬	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 265	—	9.6	—	—	耐热性、耐氧化性、耐磨性、耐腐蚀性良好
氧化钛	TiO <sub>2</sub>	1 840	—	7.0~8.1	3.2	—	硬度高，耐热性、耐氧化性、耐磨性良好，与基体有良好的结合性能
氧化铍	BeO	2 550	—	9.5	16.5	—	导热性，耐冲击性良好，在高温中稳定，不受熔化金属的侵害。无相变，不易还原，有毒
氧化铪	HfO <sub>2</sub>	2 790	—	6.45	—	—	耐热性、绝热性良好，在高温中稳定，化学性质不活泼，呈惰性
锆酸镁	MgO·ZrO <sub>2</sub>	2 120	—	—	—	—	耐高温粒子侵蚀，耐磨损，耐热和耐熔融金属侵蚀
锆酸钙	CaO·ZrO <sub>2</sub>	2 345	—	—	—	—	耐高温粒子侵蚀，耐磨性良好

① 氧化铝 在氧化铝所有形态中，白刚玉具有最小的化学活性，加热至高温也是稳定的，它在空气中不会改变化学性质。白刚玉具有良好的抗 NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和熔融玻璃的腐蚀作用。

氧化铝可广泛用于隔热涂层和绝缘涂层。在做隔热涂层时，应采取一些措施，例如用镍铬合金粉末作为过渡层，以保护工件基体不被氧化或腐蚀。因为在高温使用时，虽然氧化铝涂层的稳定性较好，抗氧化和耐腐蚀性能良好，但是有害介质能从涂层的孔隙中侵入母材，使结合界面上的母材氧化或受到腐蚀，导致涂层脱落。用镍铬合金或用镍包铝涂层作为中间

保护层，可较好地保护基体不受氧化或腐蚀。氧化铝可用作耐滑动摩擦磨损的涂层材料。但氧化铝涂层不能承受冲击载荷和局部碰撞，否则会造成涂层的损伤和脱落。

为改善氧化铝的性能，提高涂层的致密度，常常将其与氧化钛等混合或与镍铝复合，其涂层韧性与耐冲击力性能比纯氧化铝好。例如在氧化铝中加入一定量的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiO}_2$  制成的涂层，不会因加热、冷却而发生相变。因此，涂层和工件基体的综合性能和耐热循环性能可得到提高。氧化铝作为隔热涂层时，涂层中的气孔率允许高些；作为耐磨涂层时，喷涂功率应在 30kW 以上，保证粉末充分熔化，降低涂层的气孔率，提高涂层硬度，以便磨削加工出粗糙度低的表面。

氧化铝涂层已经广泛应用于泵类密封面和轴类表面、高炉风口和出渣口、电子器件、人工关节等。

② 氧化锆 主要特性是具有较高的耐热性和绝热性。在所有的高温耐热材料中，氧化锆的高温稳定性最好，故常用作重要零件的隔热涂层。氧化锆在低压条件下挥发很慢，所以也可以在真空中使用。

氧化锆是一种惰性物质，在低温时能抗各种还原剂的作用。熔融金属、硅酸盐、熔融玻璃和各种酸（浓硫酸和氢氟酸除外）等都不与氧化锆发生作用。

氧化锆涂层在近 2000℃ 高温下与石墨等黏结底层材料会发生化学反应。如果用钨作为过渡层，可抑制这种高温下的固体界面之间的反应。

如果工件基体材料不是高温抗氧化的材料，则与氧化铝涂层的处理方法相同，需采用镍铬合金或镍包铝作为过渡层，以便保护基本不受氧化。

③ 氧化镁 在 2400~2500℃ 下，氧化镁挥发很快，在等离子焰流的快速加热和淬冷冷却的条件下，也很难形成氧化镁涂层。为改善氧化镁的喷涂工艺性能，可采用  $\text{SiO}_2$  包覆  $\text{MgO}$  粉粒，阻止高温下氧化镁的挥发，大大提高粉末的沉积效率。

因为氧化镁不发生晶型转变，又具有良好的抗熔体侵蚀能力及高温绝缘性能；同时，氧化镁涂层与钢基体的结合强度比一般的陶瓷涂层要高，所以它将作为一种碱性耐火氧化物涂层在工业中，特别是冶金工业中得到广泛应用。

④ 氧化铬 是一种既耐高温又能耐磨的涂层材料，但它被加热到 2000℃ 时开始急剧蒸发。用等离子喷涂氧化铬所获得的涂层致密。氧化铬的耐腐蚀性能和化学稳定性好，既可在碱性介质中，也可在酸性介质中使用。氧化铬涂层已经在化工工业和轻纺工业中获得了应用。例如，化肥工业中用的氨泵的柱塞、轴套以及化纤工业中用的绕丝辊等的磨损表面，经喷涂氧化铬涂层，都取得了良好的结果，提高了零件的工作寿命，降低了生产费用。

⑤ 碳化物 包括碳化钨、碳化铬、碳化硅等，很少单独作为喷涂材料使用，往往采用钴包碳化物或镍包碳化物，以防止喷涂时产生严重的脱碳现象。为了获得优异的涂层质量，必须严格控制喷涂工艺参数，或在含碳的保护气氛中进行喷涂。

碳化钨是一种超硬的耐磨材料，但碳化钨涂层的组织结构及性能很难达到烧结的碳化钨硬质合金的性能。碳化铬、碳化硅也可用作耐磨或耐热涂层。

## 2) 复合材料粉末

凡是由两种或者两种以上性质不同的固相物质所组成的粉末称之为复合粉末。组成复合粉末的成分可以是金属及合金的相互复合、金属及合金与各种非金属的相互复合、非金属与非金属的相互复合等。复合粉末作为一种新型的复合材料，在热喷涂材料中占有十分重要的

地位。

由于复合粉末是由两种或两种以上性质不同的材料组成，因而可以充分发挥各种材料的优点，得到单一材料无法比拟的具有由于综合性能的涂层，成为一种新型的表面强化材料，其特点如下。

① 可以根据需要，采用不同的制造方法，制备出具有耐磨、耐腐蚀、耐高温、抗氧化、减摩润滑、绝缘导电、辐射与防辐射等不同综合性能的复合粉末。特别是金属及合金与非金属陶瓷制成的复合粉末的涂层，更是其他加工方法难以实现的。

② 具有单一颗粒的非均质性与粉末整体的均质性的统一。即就每一颗粒而言，它是由两个或更多的固相所组成，各组分具有不同的物理化学性能，存在明显的物相界面，因而是非均质的，但对于粉末的整体而言，在同一粒度下，则具有相同的松装比、流动性和喷涂工艺性等特性。因而使所获得的表面涂层具有均匀的综合物理、化学性能。因此，在复合粉末的储藏、运输和使用过程中，就不会出现成分偏析倾向，从而避免了由于成分偏析造成的涂层质量不均匀的缺陷。

③ 核心粉末受到包覆层或包覆粉末的保护，能够避免或减少喷涂过程中因高温火焰的作用而产生的元素氧化烧损、脱碳等现象，并能保持核心颗粒的几何形状和晶体结构，从而获得高性能的涂层。

④ 选择适当的组分，制成复合粉末，使在喷涂过程中粉末组分之间发生化学反应，生成熔点高于粉末各组分的金属间化合物，伴随着放出大量的热量，促使基体表面出现微观熔融薄层，从而增加喷涂基体和涂层以及涂层内部颗粒间的结合力，获得性能良好的涂层，如镍包铝复合粉末。

⑤ 复合粉末的生产工艺比传统的粉末冶金烧结法简单，组分和配比容易调整，性能比较容易控制，使用的设备较少，可以大批量生产，也可以实现实验室少量试制，调节十分灵活。

按复合粉末涂层的使用性能，大致可分为硬质耐磨复合粉末、抗高温耐热和隔热复合粉末、减摩密封复合粉末及放热型复合粉末等。

① 硬质耐磨复合粉末 硬质耐磨复合粉末的芯核材料为各种碳化物硬质合金颗粒，包覆材料为金属或合金。芯核材料与包覆材料以不同的组成和配比制成多种硬质耐磨复合粉末，如 Co-WC、Ni-WC、Fe-WC、NiCr-WC、NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、Co-WTiC<sub>2</sub>、Co-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 等。常用的硬质耐磨复合粉末主要是钴包碳化钨和镍包碳化钨等。用这种粉末制成的涂层具有很高的硬度和耐磨性能，如果在这类合金中加入具有自黏结能力的镍包铝复合粉末，则可以增强涂层与基体的结合强度，提高涂层的致密性和抗氧化能力；如果将硬质耐磨复合粉末中与自熔性合金粉末按一定比例混合进行喷涂，涂层表面硬度与单独采用自熔性合金粉末的涂层表面相比，其硬度可以提高 5~15HRC。

② 抗高温耐热和隔热复合粉末 对于抗高温耐热涂层来说，要求涂层致密，热传导快，这样容易将涂层表面的热散发出去；对于高温下的隔热涂层来说，则要求涂层为多孔性，传热和散热缓慢，这两种性能相互矛盾。因此，一种粉末材料要求同时满足高温下耐热和绝热是比较困难的，但是利用复合粉末材料，制成逐步过渡的阶梯涂层，以逐步减小外层、底层、坯料基体的热膨胀系数和热导率的梯度差，而达到耐热和隔热的目的。一般采用具有自黏结性能的耐热复合粉末或耐热合金线材打底，形成一层致密的耐热涂层，中间采用金属陶瓷型复合粉末材料，外层采用热导率低的耐高温的陶瓷粉末。

③ 减摩润滑复合粉末 常用的有镍包石墨、镍包硅藻土、镍包二硫化钼、镍包氟化钙等。经过热喷涂得到的涂层可以获得良好的减摩、润滑和密封性能。这种复合粉末得到的涂层可在 500℃ 以上高温工作。常用减摩润滑复合粉末的成分及主要性能见表 8.6。

表 8.6 常用减摩润滑复合粉末的成分及主要性能

类型	牌 号	主要化学成分/%	粒度范围/μ	性能及用途
镍包石墨	FNC-1	Ni 75, 杂质 ≤ 2, 石墨余量	-150 ~ 325	润滑性好、结合力强, 可做动密封部件的密封圈、低摩擦轴承等
镍包硅藻土	FNK-1	Ni 75~80, 硅藻土 20~25	-200	500℃ 以上的减摩材料, 耐磨密封涂层、低摩擦材料
镍包二硫化钼	FNM-1	Ni 75~80, 杂质 ≤ 2, MoS <sub>2</sub> 余量	-200	耐磨密封涂层、低摩擦材料
镍包氟化钙	FNF-1	Ni 75~80, CaF <sub>2</sub> 20~25	-140 ~ 240	润滑性、耐磨性好, 适于做温度高于 500℃ 时的低摩擦轴承材料及端面密封材料

④ 放热型复合粉末 在热喷涂中常用的放热型复合粉末是镍包铝复合粉末, 其镍铝比为 80:20、90:10 和 95:5。这种粉末的特点是在微小的铝粉核外面均匀地包覆着金属镍, 当喷涂过程中加热到一定温度, 并高速喷射到工件表面时, 粉粒受到巨大的撞击力而破裂, 在火焰高温的诱发下, 即产生镍铝反应和铝的氧化反应, 这种化学反应放出的热对于基体表面起着补充的加热作用, 从面粉末与基体表面产生微观冶金结合, 而涂层表面也比较粗糙, 形成了较为理想的连接其他喷涂材料的底层, 因此镍包铝复合粉末常用作涂层的打底材料。

放热型自黏结复合粉末的涂层性能见表 8.7。

表 8.7 放热型自黏结复合粉末的涂层性能

类型	符 号	主要化学成分/%	金属间化合物	涂层性能
镍包铝	Ni-Al	Ni 83, Al 17	Ni <sub>3</sub> Al, NiAl	自黏结, 致密, 抗高温氧化, 耐高温, 抗多种金属熔体和玻璃侵蚀
铝包镍	Al-Ni	Al 5, Ni 95	Ni <sub>3</sub> Al	
镍铬包铝	NiCr-Al	Ni-Cr 94, Al 6	含 Cr 的 Ni <sub>3</sub> Al	
钼包硅	Mo-Si	Mo 61~65, Si 39~35	MoSi <sub>2</sub>	涂层致密, 高温下具有优异的抗氧化能力
硅包钼	Si-Mo	Si 61~65, Mo 39~35	MoSi <sub>2</sub>	
硅包铬	Si-Cr	Si 15~52, Cr 15~48	Cr <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	
铬包硅	Cr-Si	Cr 85, Si 15	Cr <sub>7</sub> Si <sub>2</sub>	
铬包锆	Cr-Zr	Cr 53, Zr 47	铬化锆	
钛包铬	Ti-Cr	Ti 65, Cr 35	钛化铬	熔点很高, 涂层致密, 具有优异的抗高温氧化能力
铝包镧	Al-La	Al 25~30, La 75~70	铝镧化合物	
铝包铬	Al-Cr	Al 38~40, Cr 62~60	铬铝化合物	
铬包铝	Cr-Al	Cr 38~40, Al 62~60	铬铝化合物	

#### (4) 喷涂塑料粉末

塑料是指室温下处于玻璃态的高分子聚合物材料。喷涂塑料粉末分为热塑性粉末、热固性粉末两类。喷涂塑料粉末的种类及化学特性见表 8.8。

表 8.8 喷涂塑料粉末的种类及化学特性

粉 末	种 类	特 性
热塑性塑料	聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺(尼龙)、聚酰亚胺、ABS塑料、聚氯醚、聚苯醚、聚苯酯、聚甲醛、氟塑料	分子链为直链或带有支链的,众多分子链靠分子间力聚集在一起受热后软化、熔融、冷却后可恢复原状,多次反复其化学结构基本不变
热固性塑料	酚醛、环氧树脂、有机硅、聚氨酯、氨基塑料	具有网状分子链结构,各分子之间由化学键联结,一般不熔融,也不溶解。固化反应是不可逆的,通常与固化剂粉末混合进行喷涂

##### 1) 热塑性粉末

热塑性粉末使用最广泛的是聚乙烯树脂和尼龙。用于流动床涂敷的高压、中压聚乙烯都可以用于喷涂,粒度为 0.25~0.154mm,但这种粉末与金属的结合性能不太好。尼龙粉末在常温下的流动性较好,若将工件预热到 200℃左右喷涂,可获得耐磨性好、表面光滑的尼龙涂层。

聚乙烯树脂涂层结合性良好,可以在预热到 120~150℃的工件上用空气-丙烷火焰喷涂,涂层的厚度为 300 $\mu$ m~3mm。新型聚烯烃塑料粉末涂层具有结合性好、涂层表面光滑、粉末在喷涂装置的软管中流动性好等特点。又因其熔融温度与分解温度的差值较大,所以喷涂工艺性良好、不易燃烧、容易控制。涂层耐自然气候和耐蚀性都很好,一次喷涂可达 300 $\mu$ m~2mm。常用热塑性喷涂粉末化学特性和涂层性能见表 8.9。

表 8.9 常用热塑性喷涂粉末化学特性和涂层性能

种 类	涂层性能及应用
聚乙烯(PE)粉末	喷涂温度 200~250℃,厚度 0.3~2.5mm,硬度 70~85HBS,安全使用温度 -70~+110℃。低密度聚乙烯用于装饰涂层;高密度聚乙烯无光泽用作槽罐衬里涂层
聚氯乙烯(PVC)粉末	喷涂温度 170℃,厚度 0.38~2.5mm,硬度 60~95HBS,使用温度 -35~+70℃。应用于 60℃以下使用的耐蚀涂层,常温的绝缘涂层,钢板、大型钢管、钢结构保护涂层
聚酰胺粉末(尼龙)	喷涂温度低于 300℃,厚度 0.5~0.7mm,使用温度 -60~+80℃。应用于 100℃以下使用的耐蚀涂层、电绝缘涂层、耐磨、减摩涂层。例如,储槽、储罐、衬里、水泵叶轮、叶片
氯化聚醚粉末	喷涂温度 350℃,厚度 0.2~1.2mm,使用温度 -60~+120℃。应用于 120℃以下的耐腐涂层、减摩涂层、密封件耐蚀涂层。例如,化工厂的储槽衬里、泵和阀门及管道等
聚四氟乙烯(F4)粉末	喷涂温度低于 400℃,厚度 0.013~0.13mm,硬度 75HBS,使用温度 -80~+260℃。应用于 250℃左右的高耐蚀涂层、减摩自润滑涂层、绝缘涂层。例如,化工泵、叶轮,密封环,高耐蚀涂层,耐磨、减摩、轴承、活塞环、高频电缆及电容器的绝缘涂层
聚全氟代乙丙烯(F46)粉末	喷涂温度低于 385℃以下,厚度 0.01~0.13mm,硬度 85HBS,使用温度 -70~+225℃。应用于 200℃使用的高耐蚀和高绝缘涂层。例如,化工用塔、槽、罐的内衬防蚀涂层,雷达,印刷线路板用耐热绝缘涂层、食品机械用防粘涂层

## 2) 热固性粉末

热固性塑料粉末主要包括环氧树脂和聚苯酯，热固性塑料粉末的化学特性和涂层性能见表 8.10。环氧树脂粉末是由树脂染料、添加剂、硬化剂以及其他微量添加剂组成。喷涂时为控制涂层因收缩而产生的应力，可以加入  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  等添加物。

表 8.10 热固性塑料粉末的化学特性和涂层性能

种 类	涂 层 性 能
环氧树脂(EP)粉末	应用于 260℃ 以下使用的耐蚀、耐磨绝缘涂层,也用于金属、混凝土、木材等基体上。例如,化工设备用的耐蚀、耐磨衬里,高压电器的耐热、耐蚀绝缘涂层
聚苯酯粉末(聚对羟基苯甲酸酯)	等离子喷枪(枪外送粉)应用于 315℃ 以下使用的耐热、减摩自润滑涂层,耐有机溶剂和高温蒸汽的防蚀涂层,也用于高速轴承、轴套、活塞环、导轨等减摩自润滑涂层

## 8.2 热喷涂材料的选用

### 8.2.1 选用原则

被喷涂材料的表面使用要求不同、采用的喷涂工艺不同，选择的热喷涂材料类型也不一样。选择热喷涂材料主要应遵循以下原则。

① 根据被喷涂工件的工作环境，使用要求和各种喷涂材料的已知性能，选择最适合功能要求的材料。

② 尽量使喷涂材料与的工件材料的热膨胀系数相接近，以获得结合强度较高的优质涂层。

③ 选用的热喷涂材料应与喷涂工艺方法及设备相适应。

④ 喷涂材料应成本低，来源广。

(1) 根据热喷涂工艺方法选用

选用热喷涂材料时，应根据不同的喷涂工艺及方法，针对不同喷涂材料的特性进行选择。黏结底层喷涂材料适用的喷涂方法见表 8.11。

表 8.11 黏结底层喷涂材料适用的喷涂方法

喷 涂 材 料	火焰粉末喷涂	等离子弧粉末喷涂	丝材电弧喷涂	丝材火焰喷涂
Mo		√	—	—
Nb		√	—	—
Ta	—	√		—
Ni-Al(80%/20%)	√	√	√	—
Ni-Al(83%/17%)	√	—	√	√
Ni-Al(95%/5%)	√	√	√	√
Ni-Cr-Al		√	√	√

续表

喷涂材料	火焰粉末喷涂	等离子弧粉末喷涂	丝材电弧喷涂	丝材火焰喷涂
Ni-Cr(80%/20%)			√	√
铝青铜	√	√	√	√
Ni-Al-Mo(95%/5%/5%)	√	√	—	—

注：√表示适用。

## (2) 根据被喷涂工件的使用要求选用

喷涂时，被喷涂工件表面要求耐磨的场合下，常用的喷涂材料有自熔性合金材料（镍基、钴基和铁基合金）和陶瓷材料，或者是二者的混合物。碳化物与镍基自熔性合金的混合物等喷涂材料适合于不要求耐高温而只要求耐磨的场合。通常碳化物喷涂层的工作温度应在 480℃ 以下，超过此温度时，最好选用碳化钛、碳化铬或陶瓷材料。高碳钢、马氏体不锈钢、铝、镍铬合金等喷涂材料形成的喷涂层特别适合于滑动磨损情形。

被喷涂工件要求耐大气腐蚀的条件下，常选用锌、铝、奥氏体不锈钢、铝青铜、钴基和镍基合金等材料，其中使用最广泛的则是锌和铝。耐腐蚀喷涂材料本身具有良好的耐腐蚀性，但是如果喷涂层不致密、存在孔隙，腐蚀介质就会渗透。因此，在喷涂时要保证致密度和一定的厚度，并要对喷涂层进行封孔处理。

为使喷涂工件和喷涂层之间形成良好的结合，有时可以黏结底层喷涂材料使其在工件和喷涂层之间产生过渡作用。可作为这种黏结底层的喷涂材料有铝、镍铬复合材料和镍铝复合材料等，但是在选择底层喷涂材料时，主要应该考虑使用环境的腐蚀性和温度。

### 8.2.2 常用的热喷涂材料

#### (1) 对常用热喷涂材料的基本要求

① 应具有良好的使用性能。根据工件条件所要求的表面具有不同的使用性能，则所选用的热喷涂材料也应具有相应的性能。

② 应具有热稳定性。在喷涂过程中不挥发、不升华、不分解、不发生晶型转变等。

③ 热喷涂材料的线膨胀系数、热导率应尽可能的与工件材料接近，以减少涂层在冷凝过程中的热收缩应力。

④ 应具有良好的润湿性。表面张力越小，润湿角越小，液态流动性越好，喷涂后越容易得到平整光滑的涂层。

⑤ 固态流动性好。球形粉末流动性最好，粉末越湿，流动性越差。超细粉末或非球形粉末应配备专用送粉器。

#### (2) 常用热喷涂丝材

常用热喷涂丝材的牌号、成分及特性见表 8.12。

#### (3) 常用热喷涂粉末

常用喷涂合金粉末的成分、涂层性能及用途见表 8.13。

常用自熔性合金粉末的成分及主要性能见表 8.14。

常用国产陶瓷粉末的成分、主要性能及用途见表 8.15。

常用热喷涂复合粉末的成分及主要性能见表 8.16。



表 8.12 常用热喷涂丝材的牌号、成分及特性

类型	牌 号	主要化学成分/%	丝材直径/mm	主要性能及应用
锌及其合金	Zn-2	Zn $\geq$ 99.9	1.0~3.0	耐大气、淡水、海水等环境长效防腐
	ZnAl15	Al 15, Zn 余量	1.0~3.0	耐大气、淡水、海水等环境长效防腐, 铝涂层亦可做导电、耐热、装饰等涂层
	L1	Al $\geq$ 99.7	1.0~3.0	
	Al-Mg-R	Mg 0.5~0.6, RE 微量, Al 余量	1.0~3.0	
镍及其合金	N6	C 0.1, Ni 99.5	1.6~2.3	非氧化性酸、碱气氛和各种化学药品耐腐蚀涂层
	Cr20Ni80	C 0.1, Ni 80, Cr 20	1.6~2.3	抗 980℃ 高温氧化涂层和陶瓷黏结底层
	Cr15Ni60	Ni 60, Cr 15, Fe 余量	1.6~2.3	硫酸、硝酸、醋酸、氨、氢氧化钠耐腐蚀涂层
	蒙乃尔合金	Cu 30, Fe 1.7, Mn 1.1, Ni 余量	1.6~2.3	非氧化性酸、氢氟酸、热浓碱、有机酸、海水耐蚀涂层
铜及其合金	T2	Cu 99.9	1.6~2.3	导电、导热、装饰涂层
	HSn60-1	Cu 60, Sn 1~1.5, Zn 余量	1.6~2.3	黄铜件修复、耐蚀涂层
	QA19-2	Al 9, Mn 2, Cu 余量	1.6~2.3	耐磨、耐蚀、耐热涂层、Cr13 涂层黏结底层
	QSn4-4-2.5	Sn 4, P 0.03, Zn 4, Cu 余量	1.6~2.3	青铜件、轴承的减摩、耐磨、耐蚀涂层
碳钢	B2, C2	C 0.09~0.22, Si 0.12~0.30, Mn 0.25~0.65, Fe 余量	1.6~2.3	滑动磨损的轴承面超差修补涂层
	B3, C3		1.6~2.3	
	45 钢	C 0.45, Si 0.32, Mn 0.65, Fe 余量	1.6~2.3	轴类修复、复合涂层的底层、表面耐磨涂层
	T10	C 1.0, Si 0.35, Mn 0.4, Fe 余量	1.6~2.3	高耐磨零件表面强化涂层
不锈钢	2Cr13	C 0.16~0.24, Cr 12~14, Fe 余量	1.6~2.3	耐磨、耐蚀涂层
	1Cr18Ni9Ti	C 0.12, Cr 18~20, Ni 9~13, Ti 1	1.6~2.3	耐酸、盐、碱溶液腐蚀涂层
锡及其合金	Sn-2	Sn $\geq$ 99.8	3.0	耐食品及有机酸腐蚀涂层、木材、石膏、玻璃黏结底层
	CH-A10	Sb 7.5, Cu 3.5, Pb 0.25, Sn 余量	3.0~3.2	耐磨、减摩涂层
铅	Pb1, Pb2	Pb $\geq$ 99.9	3.0	耐硫酸腐蚀、X 射线防护涂层
其他金属	W1	W 99.95	1.6	抗高温、电触点抗烧蚀涂层
	Ta1	Ta 99.95	1.6	超高温打底涂层、特殊耐酸蚀涂层
	Cd-05	Cd 99.95	1.0~3.0	中子吸收和屏蔽涂层

表 8.13 常用喷涂合金粉末的成分、涂层性能及用途

合金 类型	粉末牌号	化学成分/%										涂层硬度	涂层性能及用途	
		Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Al	其他	粒度/目	涂层硬度			
镍	F111	余量	15			7						150~300	150HV	易切削,用于轴承喷涂
	F112	余量	15	--		7		3				150~300	200HV	涂层致密,用于泵轴喷涂
	F113	余量	10	1.5		--						150~300	250HV	耐磨性较好,用于堵塞喷涂
	F105Fe	余量	14~18	3~4.5	3.5~3.5	≤5	0.6~1.0			WC35		--	400HV	用于耐磨粒磨损涂层
	G101	余量	11~14	1.5~2.5	1.5~2.5	11~14	0.5~1.0					150~320	30~40 HRC	耐磨损、耐腐蚀,用于轴承面、轴套、活塞等的喷涂
	G102	余量	14~17	0.5~1.0	1.0~2.0	5~8	<0.5					150~320	10~20 HRC	易加工,用于泵套、轴承座、轴的喷涂
	G103	余量	9~12	1.0~2.0	2.0~3.0	7~10	0.5~1.0					150~320	20HRC	耐磨损,用于机床轴、曲轴、偏心轮等的喷涂
	NI70	余量	23	--			0.1					120	170HBS	耐热、耐高温氧化,可用作陶瓷涂层的结合层
	NI180	余量	15			0.8	≤7.0	0.1	≤0.3			120	180HBS	易加工、耐磨损,用于轴承面、轴套的喷涂
	NI222	余量	15			0.8	7.0	0.1	5.0			120	220HBS	耐腐蚀,用于印刷辊、电极轴的喷涂
	NI320	余量	15	1.5		3.0	7.0	0.8	1.5			120	320HBS	耐磨损,用于机床轴、曲轴、轧轴轴颈的喷涂
	钴	G-Ni-01	余量	15~16	≤1.0	0.8~1.5	5~7	0.1~0.2	3.5~4.5				140	446HV
G-Ni-02		余量	9~11	1.5~2.0	2.0~3.0	≤6	0.5~1.0	≤1.0			140			耐磨损、耐腐蚀,用于风扇叶片及轴类零件
G-Ni-03		余量	14~16	0.2~0.5	<1.0	5~7	0.3~0.5	≤0.5			140			易加工,用于轴承面的喷涂件
G-Ni-11		余量	79~80	20~21	--	--	--	--			140			耐腐蚀、抗氧化,用于结合层
LNi-02		余量	15	--		0.8	7	<0.5	5			140~300	210~230 HBS	易加工,用于轴类零件及轴承面的喷涂
LNi-03		余量	15	2.0	2.0	2.0	12	0.7	--			140~300	30~40 HRC	耐磨损、耐腐蚀,用于轴承面及轴套的喷涂
LNi-04		余量	15	0.7	1.5	7	0.3					140~300	163~170 HBS	易加工、耐腐蚀,用于泵套、轴承座及轴类零件的喷涂
LNi-05		余量	10	1.5	2.5	3	0.7					140~300	20~30 HRC	耐腐蚀,用于轴套、轴承及轴类零件的喷涂
NI-12		余量	9~10	1~2	2~3	≤6	<5					150~320	250HBS	用于修复各种轴类零件

合金 类别	粉末牌号	化学成分/%										涂层硬度	涂层性能及用途	
		Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Al	其他					
钴 基	G-Co 11	9.5~11.5	24	≤0.01	≤0.5	≤2	0.8~0.9	W 7.2~7.8 Mn≤0.5, Co余量	—	—	—	120~320	1000HV	耐磨损、耐高温、耐腐蚀,用于内燃机车进、排气阀喷涂
	Fe250	9	17	1.5	1.8	余量	0.2	—	—	—	120	250HBS	易加工,用于轴承面及汽车箱体密封面的喷涂	
	Fe280	37	13	1.0	2.5	余量	0.5	—	Mo 4.5	—	120	280HBS	硬度高,耐磨性好,抗压能力强,用于各种耐磨构件	
	Fe320	—	15	2.0	1.0	余量	0.1	—	—	—	120	320HBS		
	Fe450	13	15	1.6	2.5	余量	1.1	—	Mo 5.0	—	120	450HBS		
铁 基	L-Fe-02	5	15	0.9	0.9	余量	2.0	—	—	—	140~300	320~350 HBS	易加工,用于轴承及轴类零件的喷涂	
	L-Fe-03	9	15	2	2.5	余量	0.5	—	—	—	110~300	220~240 HBS	易加工,用于轴类零件的喷涂	
	L-Fe-04	4	15	2	0.8	余量	≤0.2	—	—	—	140~300	300~350 HBS	易加工,用于活塞、传动齿轮和轴的喷涂	
	F314	10	18	1.5	2	余量	—	—	—	—	150~300	250HV	耐磨损,用于轴类零件的喷涂	
铜 基	F316	—	15	1.5	2	余量	2	—	—	—	150~300	400HV	耐磨损,用于漆筒的喷涂	
	F412	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80HV	易切削,用于轴承的喷涂	
	F411	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	150HV	—	
	Cu150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	150HV	—	
基	Cu180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	180HV	—	摩擦系数小,易加工,用于压力缸体、机床导轨及铝、铜件
	Cu200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200HV	—	
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

表 8.14 常用自熔性合金粉末的成分及主要性能

类别	牌 号	主要化学成分 / %											硬度 HRC	主要性能及应用	
		C	Cr	B	Si	Ni	Mo	Mn	V	Fe	W	Co			Cu
镍基粉末	FZCr <sup>0</sup> -25~FZCr-45	≤0.2~0.6	5.0~15	1.0~3.0	2.0~4.5	余量	—	—	—	4.0~17	—	—	—	20~50	韧性好,耐冲击耐蚀,耐热性好
	FZNCr-55~FZNCr-60	0.4~1.1	14~20	2.5~4.5	3.5~5.5	余量	0~4.0	—	—	5.0~17	—	0~4.0	50~65	耐磨、耐腐、耐热性能好	
	FZN <sup>0</sup> -15~FZN-25	≤0.1	—	0.8~2.0	1.6~4.0	余量	—	—	—	—	—	0~21	15~30	耐磨、耐热冲击较好,用于铸件的修复	
钴基粉末	WF-111~WF-113	0.5~0.8	13~16	2.0~3.0	3.0~4.0	余量	—	—	—	5.0~8.0	—	—	40~53	适用于模具、内燃机气门、柱塞、轴类、冷加工模具等	
	WF-211	0.8~1.0	27~30	1.0~1.8	0.6~1.0	—	—	—	—	≤3.0	3.5~4.5	—	43~48	红硬性高,用于高温、高压阀门、模具、内燃机气门	
	WF-215~WF-218	0.8~1.0	18~30	1.0~2.6	0.5~3.5	10~13	0~2.0	—	—	3.0~5.0	3.5~8.0	—	40~55	红硬性高,用于冲模、锻模具等	
铁基粉末	WF-242	0.4~0.8	17~19	1.0~1.5	2.0~3.0	13~15	2.5~3.5	—	—	≤7.0	3.5~4.5	—	40~45	红硬性很好,用于过热蒸汽阀门	
	FZFeCr <sup>2</sup> 05-25H~FZFeCr10-50H	0.15~1.5	4.0~12	1.0~4.5	1.5~5.0	20~32	1.0~6.0	—	0~1.2	余量	1.5~10	—	25~60	耐磨性和韧性优良	
	FZF <sub>2</sub> Cr13 20H~FZF <sub>2</sub> Cr17-50H	0.15~1.8	11~18	1.0~4.0	2.0~4.0	6~31	0~6.0	—	—	余量	—	—	20~60	耐酸、耐腐蚀、耐磨性能优良	
铜基粉末	FZF <sub>2</sub> Cr19-30H~FZF <sub>2</sub> Cr30-50H	2.0~3.5	18~32	1.5~3.5	1.5~5.0	0~15	0~4.5	0~1.5	0~1.2	余量	0~3.0	—	30~65	具有优良的耐热、耐氧化、耐蚀和耐磨性	
	WF-411	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80~120 HB	具有良好的耐磨性,可用于低压阀密封面、配油盘、轴瓦等	
WF-412	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80~140 HB	—	

P 0.2~0.4, Sn 7~9, Zn 2~4, Cu 余量

Si 2.5~3.5, Mn 1~2, Cu 余量

① FZCr-X-X系列摘自 GB/T 5316—1985。

② FZN-X-X系列摘自 GB/T 5316—1986。

③ FZF<sub>2</sub>CrX-X-X系列摘自 GB/T 8549—1987。

注: 喷涂用合金粉末粒度通常为 140~320 目; 等离子喷涂用合金粉末, 粒度一般为 80~200 目。

表 8.15 常用国产陶瓷粉末的成分、主要性能及用途

类 型	牌 号	主要化学成分	主要性能及用途
氧化铝及复合粉末	AF-251	$Al_2O_3 \geq 98.4$	耐磨粒磨损、冲蚀、纤维磨损。840~1650℃耐冲击、热胀、磨耗、绝缘、高温反射涂层
	P7111	$TiO_2 3.0, Al_2O_3 97$	
	P7112	$TiO_2 13, Al_2O_3$ 余量	540℃以下耐磨粒磨损、硬面磨损、微动磨损、纤维磨损、汽蚀、冲蚀、腐蚀磨损涂层
	P7113	$TiO_2 20, Al_2O_3$ 余量	
	P7114	$TiO_2 40, Al_2O_3$ 余量	
	P7115	$TiO_2 50, Al_2O_3$ 余量	
氧化锆粉末	CSZ	$ZrO_2 93.9, CaO 4\sim 6$	845℃以上耐高温、绝热、抗热振、高温粒子冲蚀、耐熔融金属及碱性炉渣侵蚀涂层
	MSZ	$(ZrO_2 + MgO) \geq 98.45$	
	YSZ	$(ZrO_2 + Y_2O_3) \geq 98.25$	1650℃高温热障涂层, 845℃以上抗冲蚀涂层
氧化铬粉末	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$Cr_2O_3 91, SiO_2 8, Al_2O_3 0.61$	540℃以下耐磨粒磨损、冲蚀、250℃抗腐蚀、纤维磨损、辐射涂层
氧化钛粉末	P7420	$TiO_2 \geq 98$	540℃以下耐黏着、腐蚀磨损、光电转换、红外辐射、抗静电涂层
	TiO <sub>2</sub> ·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$TiO_2 53, Cr_2O_3 45$	540℃以下耐腐蚀磨损、抗静电涂层
	TZN	$TiO_2 5\sim 20,$ $ZrO_2 80\sim 90, Nb_2O_5 1$	红外及远红外波辐射涂层
	TZN-2	$TiO_2 5\sim 20,$ $ZrO_2 20, Nb_2O_5 3$	
其他粉末	OS-1	$Y 13.3, Ba 41.2, Cu 28.9$	超导涂层
	TiN	TiN	1000℃以下耐热、抗氧化、耐腐蚀、抗擦伤及彩色表面装饰保护涂层

表 8.16 常用热喷涂复合粉末的成分及主要性能

类 型	牌 号	主要化学成分/%	主要性能及应用
镍包铝复合粉	FF01·01	Al 9.0~11, Ni 余量	黏结底层和中间涂层,但在酸、碱、中性盐电解质溶液中不耐蚀,用于抗高温氧化、黏着磨损、密封涂层
	FF01·03	Al 17~20, Ni 余量	
镍包氧化铝粉	FF03·01	$Al_2O_3 20\sim 25, Ni$ 余量	高温热障涂层的中间过渡层,耐高温磨损腐蚀涂层
	FF03·02	$Al_2O_3 40\sim 45, Ni$ 余量	
	FF03·04	$Al_2O_3 60\sim 65, Ni$ 余量	
	FF03·05	$Al_2O_3 80\sim 85, Ni$ 余量	
钴包碳化钨粉	FF02·01	Co 8.5~9.5, C 5.3~5.6, W 余量	用于碳钢、镁、铝、铜及其合金基体上喷涂,耐低应力磨粒磨损、冲蚀磨损、微动磨损及硬面涂层
	FF02·02	Co 11.5~13.5, C 5.3~5.6, W 余量	
	FF02·04	Co 16~18, C 4.85~5.15, W 余量	
	FF02·07	Co 20~22, C 4.6~5.1, W 余量	
镍包铜粉	FF04·01	Cu 30~33, Ni 余量	耐海水、有机酸、盐溶液腐蚀涂层,抗黏着磨损涂层
	FF04·03	Cu 68~72, Ni 余量	
镍包铬粉	FF05·01	Cr 18~22, Ni 余量	900℃左右耐高温、抗氧化、耐腐蚀涂层
	FF05·03	Cr 58~62, Ni 余量	

注: 粉末粒度范围在 140~400 目。

### 8.2.3 热喷涂用气体

#### (1) 压缩空气

压缩空气是热喷涂中应用最广的一种气体，为了保证产品的可靠性，使用的压缩空气应该具有适当的质量。热喷涂用压缩空气不同级别的气体纯度极限见表 8.17。表 8.17 中并且对人工合成氧气和氮气所得空气的杂质规定了极限。

表 8.17 热喷涂用压缩空气不同级别的气体纯度极限

成分	A 级	B 级	C 级	D 级	E 级
污染限制 <sup>①</sup>	大气	大气	大气/19~23	大气/19~23	大气/19~23
常温常压下碳氢化合物/%	—	—	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
氧化碳/%	—	—	$5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$10^{-3}$
二氧化碳/%	—	—	—	0.1	$5 \times 10^{-2}$

①“大气”表示存在于大气空气中的正常体积含氧量为 21%。数值表示合成空气中的氧含量极限体积分数。

注：1. B 级比 A 级的水蒸气稍多。

2. 相对湿度小于 50% 和无油的 B 级或更好的空气，主要推荐用于冷却和设备的操作。对于供氧装置则要求 D 级或更高级的空气，使用者一定要坚持用现有设备按照制造厂家推荐的条件操作时所得到的最干燥、最干净的空气。

#### (2) 氧气

热喷涂用氧气的纯度级别列于表 8.18。表 8.18 中从 E 级到 H 级氧气适用于火焰喷涂。氧气中的水含量和露点两者都会严重影响涂层质量，因此，喷涂时应根据具体的使用标准来保持氧气的质量。

表 8.18 热喷涂用氧气的纯度级别

成分	E 级	F 级	G 级	H 级
最小含氧量/%	99.5	99.99	99.995	99.995
惰性气体/%	—	$4.5 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	余量
气味	无	—	无	—
水蒸气/%	$6.3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
露点/°C	-64	-61	-69	-70
碳氢化合物/%	—	$2 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$
甲烷/%	$4 \times 10^{-3}$	—	$10^{-3}$	—
乙烷/%	$3 \times 10^{-4}$	—	$3 \times 10^{-4}$	—
乙烯/%	$2 \times 10^{-5}$	—	—	—
乙炔/%	$5 \times 10^{-6}$	—	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
二氧化碳/%	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-1}$	$10^{-4}$	—
一氧化碳/%	—	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
N <sub>2</sub> O/%	$10^{-4}$	—	$10^{-4}$	$10^{-5}$

#### (3) 可燃性气体

用于火焰喷涂的可燃性气体较常用的有乙炔、氢气、丙烷和甲基乙炔丙二烯。这些气体的纯度应该大于 99.6%。喷涂用乙炔不应该有过量的丙酮蒸气，因为它们会降低火焰温度和扩散速度。乙炔抽出速度不应该大于气瓶可用总气量的 1.5% 或抽出的乙炔压力不应大

于 0.103MPa。

(4) 等离子气体

等离子气体包括氩气 (Ar)、氮气 (N<sub>2</sub>) 和氢气 (H<sub>2</sub>)。

① 氩气 表 8.19 列出了氩气的各种纯度等级, D 级到 H 级氩气适用于等离子喷涂。喷涂时经常检查的氩气品质指标是含水量、露点和氧(或氮)含量。

表 8.19 氩气的各种纯度等级

成分	D 级	E 级	F 级	G 级	H 级
最小含氩量/%	99.996	99.997	99.9975	99.998	99.999
水蒸气/%	$1.4 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$
露点/℃	-53	-60	-65	-68	-73
氧/%	$7 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
氮/%	$1.5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$
碳氢化合物/%	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
氢/%	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
二氧化碳/%	—	—	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$

② 氮气 等离子喷涂使用的氮气级别列于表 8.20。喷涂时主要检查的指标是含水量、露点和含氧量。通常使用的氮气等级是 H 级或更高的级别。

③ 氢气 等离子喷涂使用的氢气级别列于表 8.21。相当于 I 类的 F 级到 K 级气体或相当于 II 类的 A 到 D 级气体适用于等离子喷涂。

不同的喷涂材料推荐采用的等离子气体见表 8.22。

表 8.20 等离子喷涂使用的氮气级别

成分	H 级	J 级	K 级	L 级	M 级	N 级	P 级
最小含氮量/%	99.99	99.99	99.995	99.998	99.999	99.9985	99.999
水蒸气/%	$1.1 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$
露点/℃	-59	-68	-57	-68	-73	-73	-73
碳氢化合物/%	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	—	—	—	—	—
氧气/%	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
氢气/%	—	—	—	—	—	$10^{-4}$	—
氩、氟、氯/%	—	—	—	—	—	$5 \times 10^{-4}$	—
一氧化碳/%	—	—	—	—	—	$10^{-4}$	—

表 8.21 等离子喷涂使用的氢气级别

成分	I 类(气态)等级					II 类(液态)等级			
	F	G	H	J	K	A	B	C	D
最小含氢量/%	99.95	99.95	99.99	99.995	99.995	99.995	99.995	99.9995	99.9997
水蒸气/%	$3.2 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	—	—	—	—
露点/℃	-51	-62	-68	-68	-73	—	—	—	—

续表

成分	I类(气态)等级					II类(液态)等级			
	F	G	H	J	K	A	B	C	D
氧气/%	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	—	—	$10^{-4}$
氩气/%	—	—	—	—	—	—	$10^{-4}$	$10^{-4}$	—
氮气/%	$4 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	—	$2 \times 10^{-4}$
碳氢化合物/%	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-3}$	—	$2 \times 10^{-4}$	—	—
氯气/%	—	—	—	—	$5 \times 10^{-3}$	—	—	$3.9 \times 10^{-3}$	—
二氧化碳/%	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	—	—	—	—	—	—
一氧化碳/%	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	—	—	$5 \times 10^{-5}$	—	—

表 8.22 不同的喷涂材料推荐采用的等离子气体

喷涂材料	推荐使用的氣體				喷涂材料	推荐使用的氣體			
	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	Ar	Ar+H <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	Ar	Ar+H <sub>2</sub>
Ni-Cr-B-Si 合金	√	√			石灰处理过的氧化锆 <sup>②</sup>	√	√	√	√
Fe-Cr-B-Si 合金	√	√			镍包铝	√	√		
Co-Cr-W 合金	√	√			碳化铬			√	√
耐磨铸铁合金	√	√			稀土氧化物	√	√		
铝 <sup>①</sup>	√	√	√	√	40% 铝和氧化锆的混合物	√	√		
钨			√	√	40% 镍和氧化铝的混合物	√	√		
铜及铜合金	√	√			70% 氧化铝和镍包铝的混合物	√	√		
铝	√	√			30% 氧化铝和镍包铝的混合物	√	√		
含 TiO <sub>2</sub> 的氧化铝 <sup>②</sup>	√	√	√	√	氧化铬	√	√		
纯氧化铝 <sup>②</sup>	√	√	√	√	碳化钨			√	√
硅酸锆	√	√			钴包碳化钨			√	√

① 通常推荐使用 N<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>。在要求高沉积效率和喷涂速度时推荐使用 Ar 和 Ar+H<sub>2</sub>。

② 为了获得致密涂层，推荐使用 Ar 和 Ar+H<sub>2</sub>，对于其他应用时推荐使用 N<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>。



## 第 9 章 热喷涂工艺

喷涂层的性能和喷涂质量直接取决于热喷涂工艺，热喷涂工艺包括工件表面的预处理、喷涂以及涂层的后处理三个基本步骤，此外还包括喷涂材料选择、设备调整等。对于不同的热喷涂方法必须严格按照相应的喷涂工艺对工件进行喷涂，以获得具有不同使用要求的热喷涂层。

### 9.1 工件表面预处理

工件表面预处理是工件在喷涂之前必不可少的工序，它是保证涂层与基体粘接强度的主要手段之一。工件表面预处理的目的是使基体的待喷涂表面清洁、粗糙及修整成适当形状，以改善涂层与基体的结合性能。对于使用过的旧工件采用喷涂工艺进行修补时，还要先去除待喷涂表面上的表层（如疲劳层、氧化膜、硬化层、渗层、漆层等），然后再对表面进行预处理。

热喷涂工艺的基本流程如图 9.1 所示。

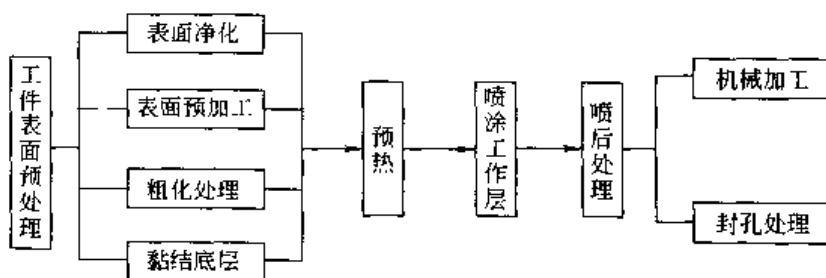


图 9.1 热喷涂工艺的基本流程

#### 9.1.1 表面净化及预加工

热喷涂前基体表面预处理的第一步，是除去表面所有的污垢，如油渍和油脂等。如不能除去这些污垢，喷涂过程中会严重影响涂层的粘接。将这些污垢去除之后，清洁度应一直保持到喷完为止。所有的工件都应小心保护，不能沾染灰尘和手印，搬动过程中要采用清洁工具。

##### (1) 蒸气除油及吹洗

###### 1) 蒸气除油

通常采用蒸气清除有机污垢，这是一种经济而有效的方法。工件应烘烤 15~30min，以去除缝隙以及表面孔隙中的油污。但是像砂型铸件或灰口铸铁这样一些多孔材料，烘烤时间应长一些。在蒸气除油或清洗过程中，如果处理的物件太大，可将物件浸泡于热洗涤剂或无油溶剂中由专人进行清洗，工件表面的残余物要用机械方法除净。

从安全性及清洗的温度方面，通常采用的除油剂是全氯乙烯、三氯乙烯和三氯乙烷。其中最常用的是三氯乙烯溶剂，三氯乙烯蒸气除油是在专门的蒸气箱内加热位于蒸气箱底部的三氯乙烯溶液，三氯乙烯受热成为蒸气上升，与悬挂在箱中的工件接触，蒸气在工件上冷凝，冷凝的三氯乙烯溶液带着溶掉的油脂下滴，回到蒸气箱底部的三氯乙烯溶液中。由于底

部温度控制适当,即使在使用一段时间后,底部已经是三氯乙烯和油脂的混合物,但形成的蒸气仍然是纯净的三氯乙烯。

三氯乙烯蒸气除油时,在蒸气箱的上部安装有水冷圈,没有与工件接触冷凝的蒸气上升到水冷圈时就会成为液态或者成为比热蒸气密度大的雾状冷凝气下降,只要箱口没有较大的气流干扰,箱内的蒸气就在不停地上下运动,三氯乙烯反复循环,消耗量较少。

蒸气除油可以去除较多的油脂、蜡类和焦油等,并能同时冲刷掉附着在油污中的杂质。但是三氯乙烯、三氯乙烷等很多的烃类溶剂是危险品,有关用途、场所及处理都应遵照厂家的使用说明。生产厂家应考虑溶剂的再循环使用问题。氯化物溶剂会留有轻微的残渣,这可通过浸没洗涤法或用乙丙醇及丁酯擦拭。

氯气对钛及钛合金材料有诱发裂纹的作用,因此,禁止用氯化物溶剂清洗这类材料。钛及钛合金零件可选用碱洗、蒸气吹、酸浸或挥发性溶剂洗涤等任何一种方法。或者,如有必要,可联合采用这些方法。

## 2) 蒸气吹洗

蒸气吹洗、湿式喷砂和液体研磨等过程,是将稀砂浆介质用空气喷枪喷射到基体表面。清洗过程在密闭室中进行。所采用的磨削介质是氧化铝、致密石英岩或金刚砂粉。大多数磨料的粒度在200~1200目的范围内。与水混合的比例为每升水加0.6kg砂。在这种浆化液中还含有防锈剂及阻凝剂等添加物。工件清洗后,要彻底用水冲洗。

蒸气吹洗主要用于去除轻微的毛刺、锈蚀物、油漆、先前的涂层材料等,有时可以起到粗化表面,以适应等离子或电弧喷涂要求的作用。

## (2) 液体清洗

采用工业汽油清洗除油,是常见的有机溶剂清洗方法。这类方法都是利用溶剂对油污的良好溶解性来实现除油的。由于可以选择无腐蚀性的溶剂,而且溶剂清洗工艺简单。但是大多数溶剂都易燃、易爆,有些还容易产生有害的挥发性气体,在选择溶剂和操作使用过程中,都应充分注意。

采用工业汽油、溶剂汽油、四氯化碳等进行清洗,工艺简单,适用于大型工件,可以擦洗、浸洗、刷洗和喷洗。操作时应严格遵守安全使用规程,工作现场不得吸烟和穿带铁钉的鞋。

酸浸或稀酸浸洗,是一种比蒸气吹洗更为强烈的过程。该过程应该是工件加工的最后一步,以减小酸所引起的危害或伴随出现晶间腐蚀。酸浸时,要求将工件全部浸泡在酸液中。根据工件表面的污垢情况及对坯料表面的要求决定浸泡的时间和周期。酸浸之后,用热水冲洗、碱水浸泡,最后再用热水或蒸气彻底清洗或吹洗。

被酸污染的表面,可浸泡在小苏打溶液或热碱浴中进行中和清洗。相反,被碱污染的表面,可用1%的盐酸溶液或10%的醋酸溶液进行中和清洗,然后再用清洁的水冲洗,并用空气或压缩空气吹干。

碱液清洗主要用于除油,同时也可以除掉附着在工件表面上的金属碎屑及混在油脂中的研磨料、残渣等杂质。

碱液清洗一般都采用浸洗,适用于生产线上批量较大而工件尺寸并不太大的工件。清洗方法可选用手工清洗、浸渍清洗、机械喷洗、电解清洗和蒸气喷溅等。手工清洗适用于批量较小或者尺寸很大以及形状非常复杂的零件。电解液清洗可以获得有活性的清洁表面。

经过碱液清洗的工件必须用软水漂洗,一些受高负荷的钢零件在采用碱液电解清洗前应

清除应力，在电解液清洗后还要消除氢脆。消除应力和消除氢脆的方法一般是将工件加热到 $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$ 、保温 2h。在手工清洗时要注意防止碱液伤害皮肤和眼睛。

典型的碱液清洗配方见表 9.1。其中碱液浓度和温度等可根据生产批量、工件的几何形状以及油污程度和清洁度作适当调整。用作手工清洗时操作温度不可过高，碱溶液浓度也应选用低指标，一般应低于 30g/L。

表 9.1 典型的碱液清洗配方

被洗材料	清洗液配方 $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	工作条件
一般钢铁材料	$\text{Na}_3\text{PO}_4$ 25~35; $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 25~35; 合成洗涤剂 0.75	80~100℃浸洗
	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 8; $\text{Na}_3\text{PO}_4$ 4; $\text{NaOH}$ 3	80℃冲淋
黄铜、锌、铅等	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 50~60; $\text{Na}_3\text{PO}_4$ 20~30; 皂粉 1~2	70~80℃浸洗
铝及铝合金	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 10~50; $\text{Na}_3\text{PO}_4$ 40~60; 水玻璃 2~5; 润湿剂 3~5mL/L	70~90℃浸洗

### (3) 超声波清洗

对于污垢积聚在狭窄区域内的工件，适用于超声波清洗。该装置包括盛清洗液的容器及在容器内的超声波振荡发生器，根据所遇到的具体问题选择清洗液。由于操作中产生热量，对于长时间作业，不推荐采用易燃或易挥发的溶剂。

### (4) 烘烤

许多机器零件往往是用多孔材料制造的，例如砂型铸件。这类零件吸附大量的油脂。喷涂之前，应先将油脂去除。经过荧光渗透检查的焊接组件，尤其要经受这种处理。一般在 $315^\circ\text{C}$ 的炉中烘烤 4h，即可达到除油效果。

薄金属板面、冲压件及焊接件的表面制备，要比机械零件困难。各种原始板材往往要用墨水、颜料或油漆，连续印上制造厂家的名称、材料类型及熔炼的炉次等，表面上通常有最终热处理的氧化皮，这些杂质应予以除净。在随后的制造过程中，也经常增加或产生表面氧化物，喷涂前必须将其去除。

当只需要局部进行清理喷涂件时，可用金属丝刷擦光。可以采用电机驱动的金属丝刷，借助划痕作用清除表面。

### (5) 表面预加工

喷涂前工件表面的预加工量由涂层设计规定的涂层厚度决定。对维修旧件，建议切去该零件最大磨损量以下 0.1~0.2mm。对制造新产品，预加工量与零件工作条件有关：在等离子喷涂时，轴承配合表面的预加工量为 0.1~0.15mm；轴与轴套之间的滑动配合，轴的预加工量为 0.15~0.18mm；抗磨粒磨损表面的预加工量为 0.2~0.25mm 或略大一些。

预加工的方法有车削和磨削等。

预加工时，要特别注意边角过渡，这是因为涂层中存在着内应力，在涂层边缘，特别是锐角处，有剥离的倾向。在边角处有较大的圆角或倒角能防止涂层的剥离。边角过渡加工示意图 9.2。

## 9.1.2 粗化处理

工件清洗之后，为了产生能与喷涂层黏附的表面，主要采用喷砂和宏观粗化等方法。在热喷涂过程中，熔融的喷涂合金颗粒冲击到基体表面之后，击撞成薄片，冷却或硬化时，必然黏附到工件表面。经过粗化处理的表面，有助于涂层的机械结合。

为了使涂层与涂层以及涂层与基体之间的结合得到强化，对基体表面进行粗化处理，主

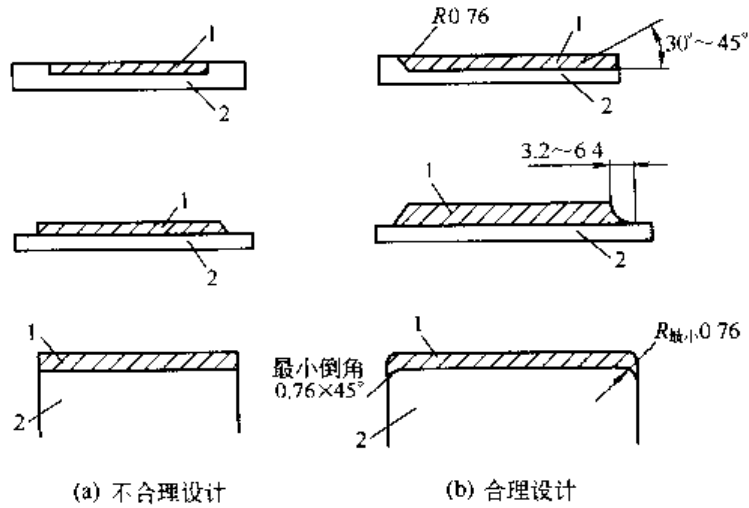


图 9.2 边角过渡加工示意  
1—涂层；2 基体

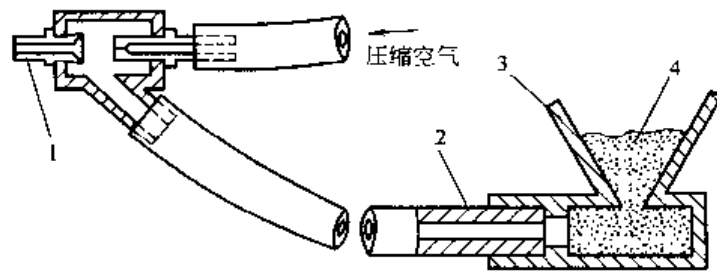
要作用有提供表面正压力、构成涂层连锁的叠层、增大结合面积以及净化表面等。

获得优良而耐用的涂层所需要的粗化程度，主要取决于所用的材料、喷涂方法及工件的工作条件。粗化程度一般采用表面粗糙度来进行评定。表面粗糙度的测量规定应采用与中性面差的算术平均值表示。中性面表示一个绝对平的、而没有凹凸不平的平面，以该平面作为测量表面上下点的中心线。也可以采用表面光度仪进行测定，该仪器利用很细的笔尖在整个工件表面上移动，测出中心线的多个峰和谷的高度，然后取其平均值。

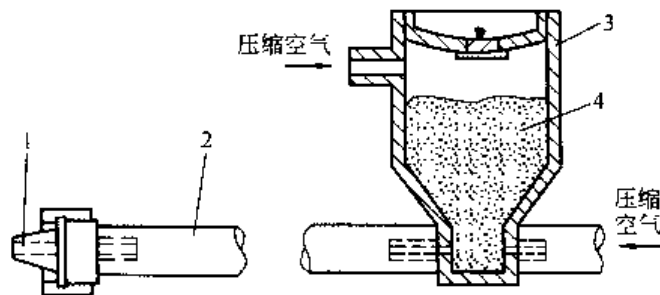
(1) 磨粒喷砂

1) 喷砂设备

喷砂设备可分为两大类，一类是利用气流或水流为动力；另一类是向高速旋转的叶轮连



(a) 压力式喷砂设备



(b) 吸入式喷砂设备

图 9.3 干喷砂设备工作原理

1—喷嘴；2—软管；3—料斗；4 砂粒

续输送磨料，使磨料沿叶轮流动，并通过离心力的作用，从叶轮外端冲向工件表面。第二类设备造价较高，但运转经济，一般适用于传送带把工件送到生产线上进行加工的场合。前一类设备又分为用压缩空气的干喷砂和用水的湿喷砂设备。用于喷砂的喷砂设备一般都采用干喷砂设备。干喷砂又有压力式和吸入式两种，其工作原理如图 9.3 所示。

### 2) 喷砂的选择

磨粒喷砂是最常用的粗化工工艺方法。喷砂砂粒选择的影响因素主要有工件的材料及其硬度，工件喷砂部位的结构和厚度，工件的大小、砂粒的粗细、喷砂压力、喷嘴尺寸、良好结合所要求的涂层厚度及表面粗糙度，工作环境以及生产率要求等。其中锋利、坚硬及有棱角的砂粒可提供最好的喷砂效果。一般不要采用球形或圆形砂粒，所有砂粒都应清洁而干燥，不应含油、长石和杂物等。生产中常用的喷砂及特性见表 9.2。

表 9.2 生产中常用的喷砂及特性

砂粒磨料	来源	主要化学成分	形状	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	损失率/%	硬度 HRC
激冷钢砂	人造	铁	多角状	7.65	0	100
激冷铁砂	人造	铁	多角状	7.40	8	97
纯氧化铝	人造	铝	立方	3.80	24	76
再生氧化铝	人造	铝	立方	3.76	34	66
金刚砂	天然	铁石英	立方	4.09	46	54
矿渣	人造	硅酸铝铁	立方	2.79	61	39
燧石	天然	石英	多角状	2.61	67	33
石英砂	天然	石英	立方	2.61	77	23
	天然	石英	角状	2.63	90	10
碳化硅	人造	碳化硅	块状	3.81	57	43
标准砂	天然	石英	角状	2.62	84	16

喷砂的正确选择主要取决于基体的硬度，带有尖锐棱角耐熔金属的氧化物，有可能嵌入软金属基体中。对于硬度低于 40~45HRC 的大多数基体，最好采用激冷铁砂，在碰撞时变钝而不会破碎。激冷铁砂通常比氧化铝容易给基体造成更大的应力。因此，激冷铁砂不适于喷薄件基体，以免基体发生变形。

氧化铝可用于马氏体钢类的硬质基体。若用于较软基体的喷砂处理，则需要立即用空气喷吹，以去除任何被嵌入的颗粒。

碳化硅嵌入基体的倾向性更大，同时比氧化铝更易破碎。

工件表面的粗糙度取决于喷砂颗粒的大小，因此，砂粒具有不同的粒度。较小颗粒的砂粒适用于单位时间内处理较大的基体表面。较大颗粒的砂粒可以更迅速地从基体表面去除不需要的物质，并获得合适的粗糙面。

在车间或生产中所用的喷砂磨料，经过清理和筛分后可循环使用。带棱角的激冷铁砂和氧化铝，经常要经过这种处理而反复使用。当一种磨料重新应用时，要清理其中的灰尘，经过筛分，使之至少其中有 80% 的量要符合原始粒度的要求。对于那些被污染的磨料或质量有问题的部分，不应再返回使用。要及时从磨料中除去破碎的细砂，否则有损于涂层与基体的正常结合。

### 3) 喷砂工艺

喷砂时的主要工艺参数包括空气压力、喷砂角度、距离和喷砂时间。

凡是可能被喷砂造成损伤的或已喷涂层的所有基体表面，都必须遮蔽进行保护。黏附在基体表面的灰尘或磨料，在喷涂之前都应吹掉。

喷砂用空气的压力取决于基体材质、要求的表面粗糙度、砂粒的流动性、质量（重量）、粒度以及所用喷嘴和喷砂设备的类型，一般空气压力取为 0.34~0.88MPa。对于铝、铜合金、青铜及塑料类的基体，宜采用低风压及软而细的砂粒，以减小砂粒嵌入的可能。高风压气体会产生正压力，导致薄件基体的变形，也容易使砂粒迅速破碎。对压力式喷砂设备：采用氧化铝、碳化硅、燧石或炉渣，最小风压为 0.345MPa，最大风压为 0.414MPa；采用砂石、金刚石或激冷铁砂，最小压力为 0.517MPa，这些压力值不是风机罐的压力，而是用压力传感探头在喷嘴处测定的。采用吸入式喷砂：采用氧化铝、碳化硅、燧石或炉渣时的最大喷嘴压力为 0.517MPa；采用砂石、金刚石或激冷铁砂，最大的喷嘴压力为 0.621MPa。

喷砂时压缩空气机应提供必需的压力和风量，以保证正常的喷砂质量。压缩空气中应无油、水及其他的污物。因为其中的油和水不仅阻塞整个供气系统，还会对表面制备及涂层的结合强度产生不利影响。

喷砂束流与基体表面应成  $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$  喷射角。喷砂要从一端移动到另一端进行。

喷嘴到基体表面的距离，取决于磨料的粒度及类型、喷嘴口径的大小及喷砂机的处理能力，一般在 102~304mm 范围内波动。此外，在表面喷砂处理过程中应对喷砂表面的结构及均匀程度进行目视检查，从而确定所需要的喷砂时间，过长的喷砂时间会导致不良的表面结构。

喷砂速度主要取决于喷砂设备的类型、尺寸与负荷能力以及基体材料。

采用喷砂进行粗化后所暴露的新鲜表面，极易受外界的污染，要避免用手触摸。因为油迹或手印会明显影响涂层的结合。喷涂作业应在新鲜表面没有被氧化之前完成。干净的粗糙表面因存有湿气或凝聚物而退化，即使是轻微的腐蚀也是由潮湿引起的。如条件许可，在喷涂或表面制备过程中，应使湿度维持在 60% 或更低。在某些情况下，喷砂前应进行轻微的预热。

## (2) 机械加工

机械加工也是常用的粗化处理方法，如车螺纹、磨削及滚花等。在车削和磨削过程中，还要结合采用喷砂或喷黏结底层，或是既喷砂又喷黏结底层。

### 1) 下切

下切是用车削或磨削的加工方法，将表面适当去除以便为热喷涂层提供空间的一种操作。在机械零部件需要修复时，通常采用下切法。

为了使精加工涂层获得均匀的厚度，或者为了去除加工硬化的表层、化学污染、氧化物及先前遗留的热喷涂层的工件表面，往往也采用下切。由于下切会减小工件的横截面积，从而影响到工件的抗拉强度和抗疲劳强度。

在圆柱体工件的每个下切切面，都必须在肩部切成方的或小钝角。锐角楔形是不利的。不推荐采用。每个下切过渡角的半径应为 0.37~0.50mm，下切面不应延伸到轴套。在下切截面的

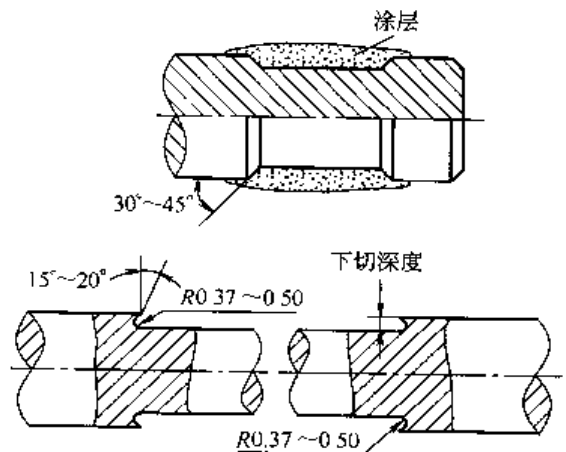


图 9.4 圆柱体工件下切时的过渡角

尽头，任何可能的地方都要有圆弧过渡。圆柱体工件下切时的过渡角见图 9.4。

对于涂层经受来自端部压力的圆柱面（如泵柱塞），在其受压端的外圆，推荐采用堆焊层。将这道焊层机加工成 3.2mm 的最小圆弧过渡，圆弧半径应比轴的最后精加工尺寸大一些。在承受压力工作过程中，焊层比热喷涂层效果好。但是由于焊接会影响基体金属的性能，在修补与维护中不推荐采用。

### 2) 车削螺纹或沟槽

轴类零件表面车削螺纹或沟槽可以达到减少收缩应力、增大结合表面、使涂层产生起伏叠层，以起到限制内应力的作用，提高涂层的抗剪强度。零件表面车削螺纹的形状及所用刀具见图 9.5。车削螺纹时推荐的刀尖位置及进给量见表 9.3。零件表面车削沟槽的形状见图 9.6。

表 9.3 车削螺纹时推荐的刀尖位置及进给量

工件直径/mm	刀尖低于工件中心线位置/mm	进给量/mm·r <sup>-1</sup>	工件转速/m·min <sup>-1</sup>
<25	2	0.8	<12
25~50	3~4	1.0	<12
50~100	4~5	1.2	<12
100~200	5~6	1.25	<12
200~300	6~7	1.25	<12
>300	7	1.25	<12

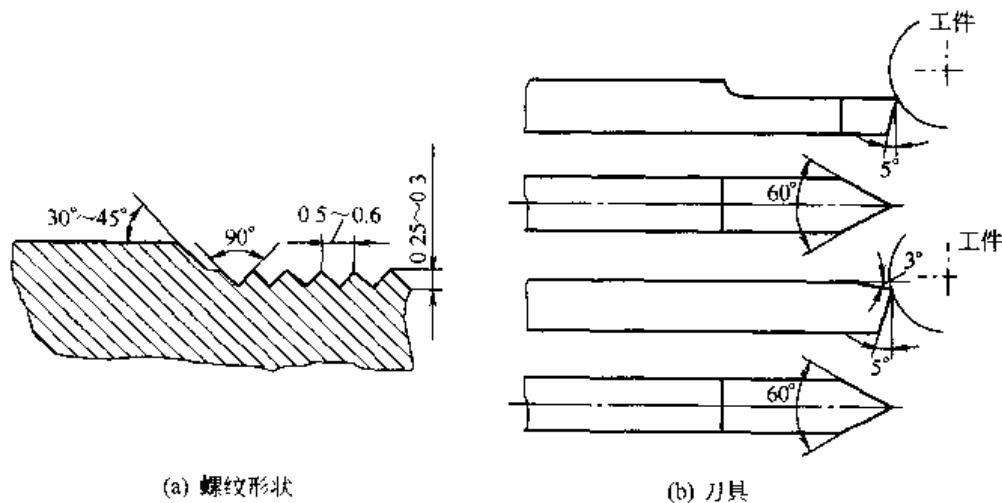


图 9.5 零件表面车削螺纹的形状及所用刀具

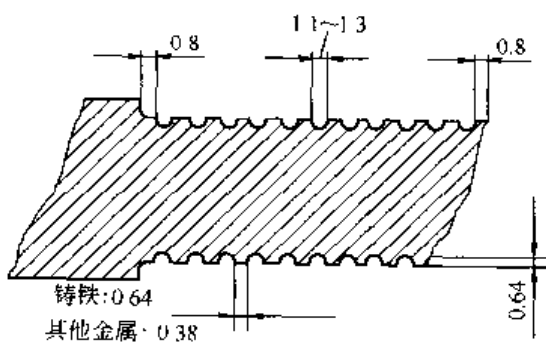


图 9.6 零件表面车削沟槽的形状

因收缩所产生的内应力在涂层内发展，会导致涂层结合的破坏。这种应力随着涂层厚度的增加而增大，尤其是硬质金属或陶瓷更为严重。由于车削螺纹能使应力分散成很多的小分量，可以有效地减小应力。

热喷涂层是由很多叠层或被击扁的颗粒片组成的，当涂层表面车螺纹后，由于叠层在大的凹槽上下起伏，从而改善了涂层的强度，使涂层产生分裂的倾向减弱。因此在以下情况时，应考虑

对喷涂表面车削螺纹或沟槽处理：

① 厚度超过 1.27mm 的所有涂层；

② 涂层的收缩性高，而其厚度又超过 0.76mm，任何部位有一条棱边的地方；

③ 没有棱边的涂层，例如在圆柱体表面上的连续喷涂，但工作条件苛刻；或者是由于涂层较厚，或是高收缩性的材料，而有开裂的危险。

### 3) 平面布钉或切缝

在平面上的硬金属涂层工作时会出现涂层剥落现象。因为如果基体属于较硬的金属，喷砂所能剥蚀的深度将会减小，导致涂层的结合强度下降。另外，硬质金属涂层通常较厚，在冷却过程中涂层的总收缩量较大。这种情况下，通常要对平面进行布钉。布钉过程包括钻孔与攻丝，孔间距离为 25mm，孔内插入没有镀层的平头螺钉，其材质应与基体成分相符。螺钉直径为 3~6mm，固定之后，对表面和螺钉都要进行喷砂。

对于某些特殊类型的工件，不适宜进行车螺纹，而是采用粗粒喷砂进行粗化处理。采用粗粒喷砂成本低、生产率较高，能够提供足够的粗化程度，可加强结合性能，并造成叠层中充分的折叠，有效代替车螺纹的功能。

经过制备的新表面，如果不是立刻进行喷涂，可用清洁的塑料膜覆盖保护。在放置期间，所有经过制备的零件，都应放入清洁的预热过的橱柜或箱内，或置于有干燥剂的封闭袋包中，加热储藏可减少喷涂预热的困难。

经过表面制备的工件，在完成喷涂作业之前，若进行搬动，应戴清洁的不脱绒手套或相类似的物品。

### 9.1.3 黏结底层

采用黏结底层是表面制备的另一种方法。某些材料能够在范围宽广的条件下黏结在清洁而光滑的表面上，形成强结合的涂层。作为一种黏结底层，只需很薄的一层，就能对随后喷涂的另一种涂层有良好的黏结作用。为了达到最好的结果，在基体喷涂黏结底层或中间层之前，也应进行喷砂处理。采用黏结底层的涂层，通常比不采用黏结底层的结合强度要高。

在使用黏结底层时应遵循一定的准则。在决定黏结底层时，一定要考虑使用环境，尤其是当涂层用于腐蚀或氧化的环境时。钼的抗氧化性能很差，在空气中它不能用于 316℃ 以上的工作温度。Ni-Al 涂层不耐盐水溶液的腐蚀，因为它们处于电解液中，Ni-Al 涂层对基体金属是阴极，会加速腐蚀或脱落。

黏结底层的采用可能会限制随后喷涂的工作层的厚度，除非基体首先经过处理，黏结底层不能吸收由厚涂层或硬金属涂层所产生的收缩应力。黏结底层应有足够的厚度，要能全面遮蔽基体表面，通常为 0.08~0.18mm。但除了黏结底层本身作为工作层之外，过厚的黏结底层没有实际的经济上或工程上的优点。

生产上采用的黏结材料，包括钼和镍钼复合粉末与合金。在喷涂过程中，这些材料与基体产生冶金反应。表 9.4 列出了常用的黏结材料及其最高工作温度。

表 9.4 常用的黏结材料及其最高工作温度

黏结材料	最高工作温度/℃	黏结材料	最高工作温度/℃
Mo	315	80Ni-20Cr	1260
80Ni-20Al	620	94NiCr-6Al	980
95Ni-5Al	1010		



Ni-Al 黏结底层应用最为广泛，具有良好的高温性能，对很多基体都适用。铝、钛、锌黏结底层适用于塑料基体材料的结合，但只具有良好的耐低温性能。Ni-Cr 合金或其他的金属-Cr-Al 合金，具有较好的抗热冲击性能，这类材料尤其适用于 1 260~1 316℃ 的高温热障涂层。

对陶瓷涂层的表面制备，与其他金属相同，通常要采用黏结底层。黏结底层的类型随基体性能及成分的变化而变化，一般根据涂层的工作介质来确定黏结底层的类型。镍、铬、不锈钢或其他耐蚀性合金的黏结底层的厚度，通常采用 0.05~0.35mm 或更厚一些。它们为陶瓷层提供良好的黏结底层。陶瓷涂层常遭受热循环、高温和化学腐蚀。在这种条件下，较厚的黏结底层有助于延长寿命。

#### 9.1.4 特殊材料的表面预处理

布、纸、木材、石膏、塑料、玻璃之类的材料表面也可以进行喷涂加工。

布、纸、木材以及尼龙等材料尽管易燃，但只要适当增大喷涂距离，加快工件的移动速度，也能达到较好的喷涂效果。干燥、清洁的布喷涂前不需要对表面进行预处理。光面纸和玻璃纸可以先喷涂锌，如果锌仍黏结不好，可以先喷涂锡，然后再喷涂其他材料。

干燥的木材和层板很容易进行喷涂，如果木材含有较大的湿气，则喷涂受热时，湿气快速蒸发，木材会出现裂纹和变形，涂层也会随着裂纹的产生有所脱落。木材表面太光可以用砂纸打磨粗化处理，如能用喷砂进行粗化，涂层与母材的黏结性就会更好。另外，也可以先喷涂锌或锡的底层，再喷涂所需要的其他材料。

石膏制品表面如经过蜡处理，由于蜡不利于喷涂层的黏结，因此石膏制品喷涂前应除蜡。表面没有蜡的干燥石膏制品能够比较容易实现喷涂。如能进行较低压力的喷砂预处理，便会获得更好的黏结效果。

热硬塑料喷涂前表面预处理与木材一样，只要干燥就可以在其表面进行喷涂。如果表面适当进行喷砂处理，并且先在干燥箱内加温至接近 115℃，保温 2~3h，效果会更好。还可以先在表面涂上一层薄薄的干净纤维素树脂，直到表面发黏时直接进行喷涂。

在玻璃表面进行喷涂前，除应像金属一样通过喷砂处理外，还可以将玻璃加热到表面呈现红热状态，然后直接进行喷涂。

## 9.2 热喷涂工艺参数的选用

### 9.2.1 喷涂工艺的特点及主要参数

#### (1) 热喷涂工艺的特点

① 喷涂工艺参数的复杂性 影响涂层质量的工艺参数涉及热源、材料、雾化、操作等方面，主要的工艺参数多达十几个，甚至几十个，而且这些参数之间彼此是相互制约、相互影响的。

② 喷涂工艺的方向性 要制备出致密的涂层，必须考虑到喷射束流的方向，否则就会出现喷不到的部位，或在沉积过程中产生所谓的“遮蔽效应”，影响涂层质量。

③ 喷涂微粒的非均匀性 喷射的微粒束流，在径向上颗粒分布的密集度，颗粒的温度和速度都是不均匀的，因此，在不同程度上总有一部分颗粒因温度、速度不够或方向偏离，造成飞散或反弹消失，影响涂层质量和降低沉积效率。

#### (2) 主要工艺参数

虽然不同的热喷涂方法具体工艺参数有差别，但作为共性的主要工艺参数基本相同，主

要有热源参数、送丝速度、送粉速度、送粉气流量、喷涂距离、喷涂角度、喷枪移动速度等。工艺参数选择是否正确、合理，直接影响到工艺稳定性、涂层质量、喷涂速率和沉积效率。

#### 1) 热源参数

热源参数是直接和喷枪有关的参数，它决定了热源的功率、温度、气氛和射流速度，直接影响喷涂材料的加热熔化状况，因而影响喷涂速率、沉积效率和涂层质量。

① 对喷涂速率的影响 提高喷枪功率就能提高喷涂速率，即提高生产效率，这对所有的热喷涂方法却是一致的。提高喷涂速率相对降低了单位喷涂量的消耗和生产成本，这是目前致力于发展大功率喷枪的原因所在。

② 对沉积效率的影响 一般来说，随着喷涂功率的提高，沉积效率也提高。只在某些情况下，当功率上升到一定程度后，因喷涂材料的烧损增加，会导致沉积效率降低。

③ 对涂层质量的影响 喷涂功率对涂层质量的影响涉及多种因素，尤其是喷涂材料的物理性质。在一般情况下，提高热源功率，射流的温度和速度也相应提高，因而涂层的结合强度和密度提高，有利于改善涂层质量。

热源功率的选择除了受到涂层质量的某些制约外，主要还受到喷枪的制约，对特定喷枪，受到最大使用功率的限制，有最合适的使用功率范围。

#### 2) 送丝速度

线材火焰喷涂和电弧喷涂的送丝速度决定了喷涂速率，参数的选择取决于热源参数和线材的性质。对于电弧喷涂，当采用平特性直流电源，电弧电流有很强的自调节性能，随着送丝速度的增减，电弧电流自行增减，使电弧功率和喷涂速率处于平衡状态。对于火焰喷涂，热源参数确定后，送丝速度要调节适中，速度过快，熔融颗粒会变得粗大，甚至出现一段段未熔化的丝材，影响涂层质量。

#### 3) 送粉速率及送粉气流量

送粉速率即单位时间的送粉量，无论对火焰喷涂还是等离子喷涂，它是影响沉积效率和涂层质量的重要参数。在热源参数确定后，送粉速率偏大，不仅沉积效率降低，而且涂层还会含有未熔化的粉粒，使涂层质量降低，甚至产生不合格的涂层。如送粉速率太低，则喷涂速率也会太低，使生产效率降低，喷涂费用增加。

送粉速率的最佳选择涉及到多方面的影响因素，除热源功率外，还要考虑到粉末的粒度及物理特性，主要以沉积效率和涂层质量作为衡量的依据。

送粉气是输送粉末的载体，气流量应保证粉末输送流畅。过大的送粉气流量会造成对熔流的干扰，降低射流的温度，也会降低沉积效率。

对于线材火焰喷涂和电弧喷涂，都是通过外加的压缩气流对熔化的材料进行雾化和对熔融颗粒加速。雾化气体的压力、流量影响雾化效果。压力和流量不够时，雾化的颗粒粗大，影响涂层质量；压力和流量过大时，则对热源干扰，使热源温度降低和影响热源的稳定性。

#### 4) 喷涂距离

喷涂距离指喷嘴端面到基体表面的直线距离。喷涂距离是喷涂的颗粒飞行的距离，在行程中，其速度和温度都要发生变化。颗粒飞行速度先是加速而后减速。

颗粒温度随着距离增加而降低。因此，当喷涂距离过大时，由于颗粒打击基体表面的温度和动能不够，不能产生足够的变形，降低涂层结合强度。还会造成更多的颗粒反弹散失而降低沉积效率，同时因更多地受周围大气影响，氧化趋于严重，造成涂层氧化物夹渣增多。

喷涂距离过小时，颗粒在热源中因停留时间过短而未能受到充分加热或加速，也影响到涂层质量，而且基体表面会因接触热源的高温区域而过热。因此，喷涂距离要根据热喷涂方法、采用的喷涂材料等具体情况，控制在一定范围内。各种热喷涂方法的推荐喷涂距离见表 9.5。

表 9.5 各种热喷涂方法的推荐喷涂距离

喷涂方法	喷涂距离/mm	喷涂方法	喷涂距离/mm
火焰线材喷涂	100~150	等离子弧喷涂(金属)	70~130
火焰粉末喷涂	150~200	等离子弧喷涂(陶瓷)	50~100
电弧喷涂	100~200		

### 5) 喷涂角度

喷涂角度是指喷涂射流轴线与基体表面切线之间的夹角。控制喷涂角度是喷涂工艺方向性所要求的。喷涂角度不能小于  $45^\circ$ ，一般为  $60^\circ \sim 90^\circ$ 。当喷涂角度小于  $45^\circ$  时，会产生所谓的“遮蔽效应”（见图 9.7）。即当喷涂颗粒粘在基体表面上时，这些颗粒阻碍继续喷上去的

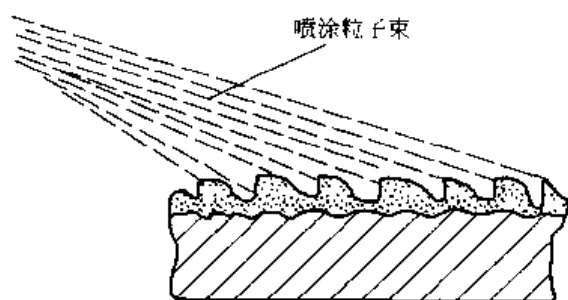


图 9.7 “遮蔽效应”示意

颗粒，结果在其后面形成一种“掩体”，使涂层结构发生急剧变化，形成具有许多不规则空穴的多孔涂层，大大降低了涂层与基体的结合强度，并使氧化物夹渣的含量增加。

### 6) 喷枪和工件移动速度

喷枪移动速度是指在喷涂过程中喷枪沿基体表面移动的速度。通过喷枪和工件的相对运动，在基体表面沉积涂层。

在喷涂速率和沉积效率确定的情况下，喷枪和工件的相对移动速度决定了一次喷涂获得的涂层厚度。为获得均匀的涂层组织结构，该厚度应控制在一定范围之内，根据喷涂方法和喷涂材料而定。火焰喷涂每次喷涂厚度为  $0.1 \sim 0.15\text{mm}$ ，等离子喷涂每次喷涂厚度一般小于  $0.05\text{mm}$ 。根据每次喷涂厚度的要求，通过计算选择正确的喷枪和工件相对移动速度。应特别注意的是，不要因喷枪移动速度太慢而造成基体表面局部过热。为了得到较厚的涂层，应进行多次喷涂。

对于喷涂圆柱形工件，涉及工件旋转速度和喷枪横向移动速度。工件旋转速度使工件表面的线速度符合喷枪和工件相对移动速度的要求。喷枪横向移动速度应考虑到在一定螺距下涂层搭叠的厚度，使得在圆柱面上获得的涂层厚度均匀。

### 7) 预热及工件温度控制

工件喷涂前要进行预热，如果修复旧件为轴类零件也往往采用预热、粗车、喷涂。工件表面预热的主要目的是：

① 提高喷涂粉粒与基体的接触温度，有助于工件表面活化，促进表面物理化学作用的进行，提高粉末沉积率，以增强涂层与基体的结合强度；

② 降低粉粒的冷却速度，有利于粉粒的变形和内部结晶，而且可以起到缓和内应力的作用；

③ 预热可以使基体产生适当的热膨胀，喷涂后随涂层一起冷却时，减少两者收缩量的差别，减少涂层热应力的积累；

#### ④ 去除工件表面的冷凝物和潮气。

对于旋转工件，预热可以在表面预处理之后进行，也可以先对工件进行预热，然后再进行粗车削。当有些金属材料工件的温度还比较低的时候，预热火焰一旦离开工件表面，呈金属光泽的表面就会有颜色变化，在表面形成了一层极薄的氧化膜，如果在这层氧化膜上喷涂涂层，结合强度会受到影响。可以通过去除这层氧化膜来提高结合强度。所以对旋转零件在喷涂工艺中先对工件预热再进行表面粗车削，紧接着喷涂涂层也是比较合理的。

如果趁热进行粗车削后获得的新鲜金属表面颜色仍会发生变化，可能是由于预热温度过高，表面被氧化；也可能是由于预热温度过低，而环境温度湿度很大，表面吸收了一层水膜。因此应适当控制预热温度、注意现场的环境湿度。

对于旋转工件在车削后的表面上直接进行喷涂，一般只适用于自黏结材料涂层和需后处理的自熔性合金涂层。

预热工件时，为了防止工件局部过热，加热应缓慢、均匀。通常的预热可在电炉中进行，工件预热的温度为 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ 。如果氧-乙炔火焰喷涂时，可以采用中性焰或碳化焰进行预热。

在喷涂过程中工件温度的控制包括喷涂中的保温，以及防止喷涂局部区域过热的措施。喷涂过程中的保温作用与工件喷涂前预热作用相同。

控制喷枪移动速度是控制工件温度的方法之一。如果工件大，一般可通过合适的喷枪移动速度，使喷涂射流的热分布在整个工件上，不致产生局部热点。而且由于工件自身的热辐射和热传导的散热作用，使工件可自身冷却到所要求的温度，从而可以控制整个工件温度。如果由于工件自身的冷却过快，达不到工件所希望的温度时，需要用火焰或其他加热措施对工件进行辅助加热。在这种情况下，火焰应离喷枪有一段距离。

采用辅助吹风冷却也是控制工件温度的常用方法。按吹风冷却的主要作用不同有两种吹冷方式。

① 控制整个工件的温升 在这种情况下，吹风必须对着工件，并离喷涂部位有一定距离，最好朝着工件不喷涂的部位。风冷的强弱取决于对工件温度的控制。工件在喷涂过程中的温度一般不超过 $200^{\circ}\text{C}$ 。

② 防止喷涂部位局部过热 工件上的局部热点对涂层和工件的不利影响比工件整个温升的影响要大。尤其是采用等离子喷涂导热性差的陶瓷材料和对氧化敏感的金属时，因局部过热造成涂层损坏的问题非常突出。在这种情况下，为了减少表面热点的温度，采用在喷涂部位邻近的地方吹风冷却，吹冷气流直接冷却刚沉积的涂层周围。为了减少吹冷气的氧化作用，可以采用惰性气体或液态二氧化碳作冷却气流。

#### 8) 喷涂气氛

在喷涂过程中，飞行中的微粒会与氧气和氮气接触产生反应，造成涂层中含有氧化物和氮化物夹杂。产生的原因有如下两方面。

① 热源的气氛 火焰喷涂，即使调节到中性焰，也会使喷涂的微粒氧化。用压缩空气进行雾化的线材喷涂，雾化后的微粒完全在空气中飞行，使得微粒氧化。采用惰性气体等离子喷涂，当采用氮气时，喷涂的粉末是在氮气介质中受到急剧加热，熔融颗粒会与氮发生反应。

② 大气环境影响 一般喷涂都是在大气中进行，喷涂射流都会卷入大量的空气，使喷涂的微粒氧化。

由于上述原因，使得涂层中的变形颗粒被较薄的氧化膜包覆，显现出明显的边界。涂层中过多的氧化物夹杂会严重影响涂层性能，有些活泼的金属甚至不能在大气中喷涂。为了减少微粒的氧化，对喷涂环境进行气氛控制是有效的办法。喷涂气氛控制的方法主要有真空室喷涂、气氛压力室喷涂和保护气氛罩喷涂。

真空室喷涂亦称低压室喷涂，主要应用于等离子喷涂。真空室喷涂是全封闭式喷涂，喷枪、操作装置及工件均置于容器内，该容器（真空室）抽吸到一定的真空度。在喷涂过程中，有一套气体抽吸和过滤装置，保证所要求的真空度和提供具有足够保护作用的控制气氛。真空室喷涂现在已发展到实用化。

气氛压力室是具有一定压力的保护气氛密封室。室内充满了保护性的惰性气体。封闭室设有带有手套的操作手孔和观察窗，操作人员可以在室外操作。它还有两个单独隔间，待工件先放在喷涂室旁的预备隔间里（气体从隔间流过），再置入净化隔间，经过一定时间后，才将工件移到喷涂室内。这样，更换工件时不会破坏喷涂室中的气氛。气氛压力室利用热交换器使环境气氛冷却，保护气连续地从气氛压力室通过换热器回到原室进行再循环。因有充分的冷却，可允许连续操作。

保护气氛罩喷涂是为了防止在大气中喷涂时周围大气卷入喷涂射流而设计的，也主要用于等离子喷涂。所谓保护气氛罩，是在喷枪上装有保护罩或气体喷射环，通过保护罩的隔离作用或外加保护气流，使具有惰性气体的等离子喷涂射流不受空气的污染，并对工件上进行喷涂部位的涂层起到一定的保护作用。

### 9.2.2 气体火焰喷涂工艺参数

#### (1) 线材喷涂

为了获得高硬度、并且不易碎裂的喷涂层，轴类零件喷钢可以选用收缩率小的 80、85 号高碳钢丝为宜。工件与喷枪的相对运动应配合适当。工件温度应不高于 70~80℃。送丝速度应保证喷涂过程连续、稳定，喷涂火花浓度集中。工作直径为 70~100mm 时的喷涂工艺参数见表 9.6。

表 9.6 火焰线材喷涂工艺参数

压缩空气压力/MPa		0.55~0.60
工件旋转线速度 /m·min <sup>-1</sup>		5~12
工件每转喷枪移动量/mm		3~10
工件与喷枪距离/mm	喷钢	100~150
	喷铜	70~80
	喷铝	100~200
	喷其他材料	100~150
喷枪中心线与工件中心线关系		略仰

#### (2) 粉末喷涂

这种喷涂方法对于工艺参数的要求不十分严格。喷涂结合底层一般采用放热型铝包镍复合粉末。喷涂时多采用中性焰或微碳化焰，工件预热温度为 100~120℃，喷涂距离为 150~200mm，喷涂厚度一般为 0.10~0.15mm。当喷涂铜基合金粉末时，需使用氧化焰，喷涂距离一般为 180~200mm。

喷涂工作层粉末时，所需的火焰功率要大，出粉量要适当，以粉末加热到白色亮为宜。

为防止小型工件的温度过高，影响喷涂质量，可以采用间断式多次喷涂的方法。普通的火焰喷枪没有精确的送粉控制装置，喷涂时凭经验控制送粉参数，送粉量一般为 20~30g/min。

超音速火焰喷涂是近年来新发展起来的一种新型火焰喷涂方法，它是利用一种特殊火焰喷枪获得高温、高速焰流用来喷涂碳化钨等难熔材料粉末并获得优异性能的喷涂层。超音速火焰喷涂的主要工艺参数有喷嘴长度、燃气压力和喷涂距离等。表 9.7 列出超音速喷涂工艺参数与涂层硬度和沉积效率的关系。所用喷涂材料为含钴优质碳化钨 WC-Co (12%)。

表 9.7 超音速喷涂工艺参数与涂层硬度和沉积效率的关系

参 数	喷 嘴 长 度							
	150mm				300mm			
燃气压力/MPa	0.6		0.63		0.6		0.63	
喷涂距离/mm	178	305	178	305	178	305	178	305
涂层硬度 HV	1 278	1 108	1 442	1 273	1 236	1 036	1 510	1 411
沉积效率	0.71	0.71	0.56	0.56	0.87	0.87	0.63	0.63

超音速火焰喷涂时，在一定喷嘴长度条件下，随着燃气压力的增大，涂层的硬度明显提高，但沉积效率逐渐下降。

### 9.2.3 电弧喷涂工艺参数

电弧喷涂的结合强度和喷涂层金属硬度取决于：压缩空气的压力、喷射金属颗粒所消耗压缩空气量（风口直径）、被喷涂工件表面预处理程度、喷枪喷嘴相对工件的距离、喷枪的生产率、电弧电压和喷涂金属丝材的化学成分等喷涂参数。

随着压缩空气压力的提高，增加了金属颗粒的撞击力，因而增大了它的变形，涂层的结合强度也提高了。增加压缩空气的流量，也具有同样的作用。随着压缩空气压力以及流量（喷嘴直径）的增加，涂层硬度也会提高。

喷枪喷嘴与工件表面距离的增加，会降低金属颗粒的喷射速度。除此以外，还会增加它的氧化程度。因此，喷涂距离的增加会使结合强度降低。

提高电弧的电压所引起的结合强度的降低是极小的，因而为能保证喷枪电弧稳定，有时提高电弧的电压。但是从金属的损失量、颗粒雾化质量、喷涂金属的硬度和耐磨性的观点上来看，应当以最小限度的电弧上的电压来操作。

改变电弧喷枪的生产率，增大电流能使金属颗粒在撞击前的温度增加，也就增加了冷却的延续时间，因此涂层硬度就会降低。

直径 3mm 常用线材电弧喷涂的工艺参数见表 9.8。

表 9.8 电弧喷涂的工艺参数

喷涂材料	丝材直径/mm	电弧电压/V	工作电流/A	压缩空气/MPa
铝	3	34	150	>0.55
锌	3	28	120	>0.5
铝青铜	3	35	200	>0.5
碳钢	3	35	200	>0.5

电弧喷涂时的电弧电压和工作电流决定了电弧功率。电弧电压的选择主要取决于喷涂材料的性质，低熔点金属选择较低的电弧电压。工作电流取决于喷涂速率，即电弧功率越大，

喷涂速率越高，电弧喷涂的喷涂速率见表 9.9。

表 9.9 电弧喷涂的喷涂速率

喷涂材料	工作电流/A		
	100	200	400
	喷涂速率 /kg · h <sup>-1</sup>		
铝	3.2	5.0	10.0
锌	8.2	15.9	40.9
铝青铜	3.6	7.3	15.0
巴氏合金	11.4	18.2	40.9
不锈钢	4.1	8.6	18.6
碳素钢	3.9	7.7	18.2

#### 9.2.4 等离子弧喷涂工艺参数

等离子弧喷涂工艺参数主要有热源、工作气种类及流量、送粉气种类及流量、送粉量、喷涂距离、工件移动速度等。

热源参数是关键的工艺参数。对于具体的设备，只能在小范围内通过对主气体和加入氢气的流量进行控制来调整电弧电压，电弧电压基本固定，因此电参数主要是确定工作电流。工作电流可通过测定沉积效率来确定（沉积效率即在某一时间内沉积在涂层上的质量与输送的粉末质量之比）。一定成分的粉末在送粉量一定时，电弧功率与粉末的沉积效率之间存在着一个最佳对应值。在这个电弧功率下喷涂时，不但粉末的沉积效率较高，而且喷涂层的结合强度和耐磨性等各项指标也最好。几种合金粉末的电参数见表 9.10。

表 9.10 几种合金粉末的等离子喷涂电参数

粉末牌号	在 70V 时的工作电流/A	电弧功率/kW	粉末牌号	在 70V 时的工作电流/A	电弧功率/kW
Lni04	260~300	18~21	NT2	260~310	18~22
LFe04	280~320	19.5~22.5	Ni/Al	400~500	28~31.5
LFe07	310~340	21.5~24			

为了得到大功率的热源，应从热源参数上着手研究，例加大功率的水稳等离子喷涂和超音速等离子喷涂，就是设法把电弧电压提高到 300V 以上，从而得到高温、高速的大功率等离子射流，使喷涂速率和沉积效率都大幅度提高，等离子弧喷涂不同热源参数的喷涂速率和沉积效率见表 9.11。

表 9.11 等离子弧喷涂不同热源参数的喷涂速率和沉积效率

等离子喷涂种类	气稳等离子喷涂	水稳等离子喷涂	超音速等离子喷涂
电参数	输入功率/kW	15	200
	工作电流/A	500	500
	电弧电压/V	30	400
喷涂速率/kg · h <sup>-1</sup>	2	20	20
沉积效率/%	60	70	80

注：喷涂粉末为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

等离子弧喷涂工作气的种类主要有氮气和氩气，此外还可以加入少量的氢气作为辅助气体，以提高电弧电压。

工作气流量对电弧电压、焰流的速度和热量都有较大的影响。在电弧功率一定的条件下，如果工作气体流量过大，则提高等离子焰流的速度，导致被喷涂粒子在等离子焰流中停留时间短，加热不充分，出现过多的未熔化粒子。如果工作气流过小，则将使过多的喷涂粉粒被烧掉。因此，工作气流量过大和过小，都将降低结合强度和沉积效率，并使涂层的气孔率增加。工作气流量与喷涂效率的关系曲线见图 9.8。工作气流量与涂层气孔率的关系曲线见图 9.9。

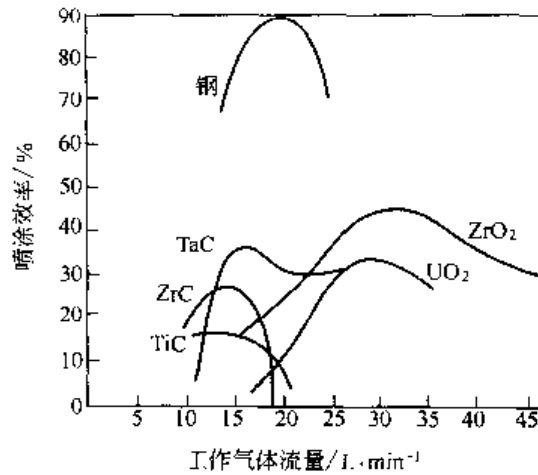


图 9.8 工作气流量 (氩) 与喷涂效率的关系曲线

喷涂距离为 76~102mm；工件移动速度为 0.9~1.8m/min；喷涂材料分别为氧化铀 (UO<sub>2</sub>)、氧化锆 (ZrO<sub>2</sub>)、碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC)、钢及碳化锆 (ZrC)，相应的输入功率分别为 23kW、15kW、19kW、19.5kW、10kW 和 17.5kW，送粉量分别为 60g/min、25g/min、14.5g/min、14.4g/min、12.7g/min 和 11.2g/min

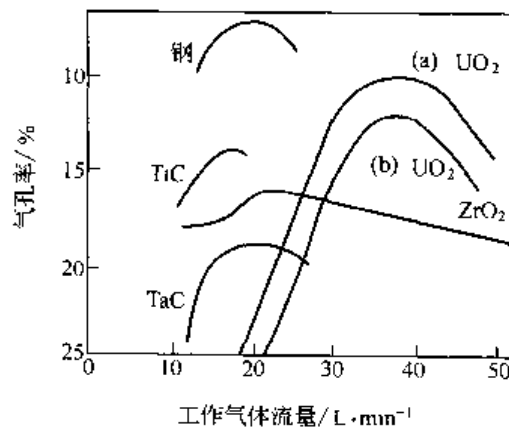


图 9.9 工作气流量 (氩) 与涂层气孔率的关系曲线

喷涂距离为 76~102mm；工件移动速度为 1.1~1.8m/min；喷涂材料分别为氧化铀 (a) (UO<sub>2</sub>)、氧化铀 (b) (UO<sub>2</sub>)、氧化锆 (ZrO<sub>2</sub>)、碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC) 和钢，相应的输入功率分别为 25.5kW、24kW、15kW、19kW、19.5kW 和 10kW，送粉量分别为 60g/min、60g/min、25g/min、14.5g/min、14.4g/min 和 12.7g/min



送粉气体的种类一般与等离子气相同，流量通常为工作气流量的  $1/3 \sim 1/5$ ，一般为  $15 \sim 18 \text{ L/min}$ 。送粉量与电弧功率、粉末特性、喷嘴结构有关。在喷涂电弧功率一定的情况下，送粉量过大或过小都会影响涂层质量的好坏。当送粉量过大时，粉末熔化不良，这样不仅降低了涂层和基体的结合力，而且涂层本身强度也降低，变得松软；反之送粉量过小，粉末颗粒过热，造成涂层氧化物增加。等离子弧喷涂送粉量一般为  $80 \sim 140 \text{ g/min}$ 。

等离子弧喷涂常用粉末的粒度为  $120 \sim 300$  目。为了得到致密涂层，也可采用超细粉末喷涂。粉末在喷涂前必须经过认真过筛，按不同粒度进行分类，因为使用时粒度范围越窄越好。这不仅使粉末流动性好，送粉易均匀，而且对稳定工艺和获得均匀涂层都有良好的作用。

喷涂操作时，如喷涂射流的轴线与被喷涂工件表面的夹角太小，则喷涂粒子与工件表面结合不良，喷涂层结合强度低，因此两者的夹角不应小于  $45^\circ$ 。

在喷涂过程中，如果工件的温度过高，就容易产生热应力，造成喷涂层开裂和工件变形。因此，在喷涂时工件的温度应低于  $150^\circ\text{C}$ ，如果高于此温度，应当暂停工作，待降温后再继续喷涂。此外，喷涂过程中也可以对喷涂区附近的不喷涂部位用冷却气流进行冷却降温处理。

喷涂厚度的控制是通过调节喷枪移动速度来实现的，一般每次不超过  $0.25 \text{ mm}$ 。喷枪移动速度还对工件的温升有影响，因此希望移动速度快些为好。

为获得高质量的涂层，必须选择上述工艺参数的最佳匹配。几种材料的等离子弧喷涂工艺参数见表 9.12。

表 9.12 几种材料的等离子弧喷涂工艺参数

喷涂材料	电弧功率/kW	工作气体流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	送粉气流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	送粉率/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	粉末粒度/ $\mu\text{m}$	沉积效率/%
Fe-Cr-B-Si	25~26	$\text{N}_2$ 2.6	$\text{N}_2$ 0.5	2.5	71	65
Ni-Cr-B-Si	22~24	$\text{N}_2$ 1.6, $\text{H}_2$ 0.1	$\text{N}_2$ 0.6	2.4	71	70
镍包铝	24~26	$\text{N}_2$ 2.2, $\text{H}_2$ 0.2	$\text{N}_2$ 0.6	0.8~1.2	90~50	60
WC/Co	24~26	$\text{N}_2$ 2.2, $\text{H}_2$ 0.2	$\text{N}_2$ 0.6	0.7~1.1	71~45	50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20~25	$\text{N}_2$ 2.5, $\text{H}_2$ 0.3	$\text{N}_2$ 0.5	1~1.5	71	80
$\text{ZrO}_2$	22~28	$\text{N}_2$ 2.0, $\text{H}_2$ 0.3	$\text{N}_2$ 0.6	1	90	70
W	22~28	$\text{N}_2$ 2.25, $\text{H}_2$ 0.3	$\text{N}_2$ 0.6	3~5	71~45	75
Mo	15~20	Ar 1.8, $\text{N}_2$ 0.2	$\text{N}_2$ 0.45	—	90~45	65
Cr	电压:40V 电流:300A	Ar 1.8, $\text{N}_2$ 0.2	$\text{N}_2$ 0.4	—	90~45	60
Fe	电压:40V 电流:300A	Ar 1.8, $\text{N}_2$ 0.2	$\text{N}_2$ 0.45	—	90~45	65
耐磨铸铁	10~15	Ar 1.8, $\text{N}_2$ 0.15	$\text{N}_2$ 0.5	—	90~45	60

### 9.2.5 氧-乙炔火焰喷焊工艺

采用氧-乙炔火焰合金粉末进行喷焊时，根据喷粉和熔化的先后次序，可分为一步法和二步法两种。

#### (1) 一步法喷焊

一步法喷焊是喷粉和熔化同时进行的工艺。操作时，选用中、小型喷焊枪，粉末喷洒和

熔化工序是交替进行的。一步法喷焊过程主要包括喷焊前准备（工件表面制备）、预热、预喷、喷粉重熔及缓冷。

#### 1) 工件表面准备

待喷焊工件表面准备与待喷涂工件表面准备基本上相同。均要求待喷表面洁净、粗糙。即对待喷焊表面要进行去油污和粗化处理，使工件露出新的表面，以保证喷焊工作的顺利进行和喷焊层质量的稳定。

#### 2) 预热

预热的主要目的是：提高喷层与工件表面的结合强度，减小应力，避免喷焊层出现开裂脱壳和提高粉末喷焊的沉积效率。

根据工件的大小、形状、材质和粉末的类型来选择预热温度。小件和薄壁工件的预热温度为 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ ；普通碳钢为 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ ；膨胀系数大，抗氧化性好的镍铬不锈钢可取 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ；耐热奥氏体不锈钢可提高到 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。大工件预热温度可偏高些，极小而薄的件甚至可以不用预热。对于形状复杂的工件应注意预热的范围与部位，以减小变形和开裂。局部修复只需局部进行预热。对于几何形状复杂而厚度又不均匀的工件，要注意均匀预热，防止工件在喷焊时产生较大变形或裂纹。预热温度不能过高，过高的预热温度势必导致基体表面急剧氧化。预热火焰宜采用中性焰或微碳化焰。喷枪距工件距离约为 $100\sim 150\text{mm}$ ，为使待喷焊表面均匀预热和避免局部过热，预热枪应往复均匀移动，不停留在某一点上，预热范围应超出待喷焊面边缘 $50\sim 100\text{mm}$ 。

#### 3) 预喷粉

工件达到预热温度后，立即在待喷的表面预喷一层厚度为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 的保护粉层。其目的是为了减少基体表面在后继喷焊过程中的氧化。

#### 4) 喷粉重熔

预喷一层保护粉后，将喷焊枪的火焰集中在工件喷好部位的端部（从距边缘 $10\sim 15\text{mm}$ ），用柔和的中性焰进行局部加热。这时把喷枪放低，距工件面约 $20\sim 30\text{mm}$ ，使焰心到工件表面距离为 $10\sim 20\text{mm}$ ，夹角为 $60^{\circ}$ ，对着工件表面不动，或轻微摆动。把工件表面加热到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ （呈暗红色），按下送粉开关，将粉末均匀地喷在这个位置上，喷到一定厚度后，并用同一火焰将这个局部区域的涂层熔融，直到出现“镜面反光”现象。注意不能产生溢流出现波浪状，更不能把喷焊层吹开露出基体面。然后均匀面缓慢地将喷枪移到下一个位置，重复上述工艺过程，直至整个工件表面均被喷焊层覆盖。

也可采用边喷粉、边重熔的方法，粉末不断地投入熔池，熔池随喷枪的移动面移动，直至整个待喷表面被喷焊层覆盖到预定的厚度为止。喷枪沿喷焊面前移的速度，根据粉末熔化的情况及喷焊层的厚度决定。

在喷粉重熔时，喷枪还可做圆周运动，圆的直径约为 $5\sim 15\text{mm}$ ，将圆内的待喷焊面加热到 $500^{\circ}\text{C}$ 以上，间歇按下送粉阀，边喷粉、边熔化。接着在前进方向的前半圆上送粉，后半圆停止送粉着重于重熔。第一个圆与第二个圆的圆心距宜在 $5\text{mm}$ 左右，视所需的焊层厚度与送粉量而变。送粉量与圆周运动的速度根据工件表面与喷焊层的温度而定。一般情况下送粉量小，焊层表面易平整。

#### 5) 冷却

喷焊用的自熔合金膨胀系数大，塑性差，因而在冷却时易产生裂纹和变形。特别对材质特殊、厚度大、形状复杂的工件，喷前预热，喷后缓冷是很重要的措施。

一般低碳钢、形状简单且壁厚均匀的中碳钢，喷焊后在空气中冷却即可。刚性大，形状复杂的工件在喷焊后要放入干燥的或加热到 $100^{\circ}\text{C}$ 以上的石棉粉、干砂、草木灰等材料中缓冷。必要时可采用随炉冷却。但当两种材料的膨胀系数较接近时，可不用保温。

一步法喷焊工艺热输入较少，工件变形小，粉末飞溅也少。如进行多次连续喷焊，厚度可逐渐增加，但总厚度一般不大于 $2\text{mm}$ 。一步法适用于小零件的表面和大、中型零件边角处表面的喷焊。

## (2) 二步法喷焊

这种喷焊工艺是先喷粉后熔化，即粉末和熔化是分开进行的。对工件表面进行预热、喷敷合金粉末以及对焊层进行重熔处理时，不一定使用同一热源，可根据零件大小和结构尺寸，或用同一把喷枪，或附加一至几把火焰重熔枪进行，也可用电炉、保护气氛炉、感应线圈加热等方式进行重熔。

SPH-E型喷焊两用枪适用于二步法。二步法喷焊工艺适用于回转零件和面积较大的零件的喷焊。

二步法喷焊的工艺流程包括选择粉末颗粒度、工件表面预处理、工件预热、喷敷合金粉末、对喷焊层进行重熔、冷却喷焊层以及必要时对喷焊层进行精加工。

### 1) 选择颗粒度

喷涂层与喷焊层是两种不同性质的含义。喷涂层与基体结合强度的大小，取决于工件表面的粗糙程度、颗粒的飞行速度和颗粒的熔透性等因素；而喷焊层与基体的结合强度不是单靠提高粉末冲击速度来实现的，而是靠随后的重熔扩散来达到牢固的结合。所以在喷粉过程中，只要求合金粉末能呈塑性变形沉积在工件表面。

喷焊用合金粉末的颗粒大小与喷枪功率有一定的内在联系。如果喷枪功率小，而粉末粒度大，则粉末在火焰中没有被充分加热，达不到熔融状态，这就会增加粉末的飞溅损失，降低沉积效果，即使沉积上去，涂层也是相当疏松的。反之，粉末过细会受到过分加热，产生大量黑烟。冒黑烟的过程，实质上是氧化过程。如果含氧量超过硼、硅脱氧能力，这样得到的喷焊层必将产生夹渣、气孔等缺陷。所以，喷焊时选择的粉末粒度，不能太粗，也不能太细，一般在 $-150\sim 270$ 目之间。

### 2) 工件表面预处理

要得到性能良好的喷焊层，除掌握工艺要点外，必须十分重视工件表面预处理。预处理的好坏直接影响到喷焊层与工件的结合强度以及喷焊过程的顺利进行。

为了使工件表面获得一定厚度的耐磨或耐蚀的喷焊层，喷焊前一定要把工件表面上的油污、铁锈、氧化物等彻底清除干净，而且渗碳层、氮化层、电镀层、疲劳层也必须清除掉。这是因为自熔性合金中含有硼，在熔化过程中硼与渗碳层的碳结合，会生成碳化硼；硼与氮化层中的氮结合，会生成氮化硼。碳化硼和氮化硼这两种化合物很硬，很脆，容易引起翘皮，甚至使喷焊无法进行。

去油，一般可用汽油或三氯乙烯，或丙酮，或碱液清洗。对于铁锈和氧化物，可采用喷砂方法或用机械加工方法除去。机械加工时，不需加润滑剂或冷却液。如果工件表面（如轴类零件）只要求局部喷焊，则对此局部表面机械加工时，两凸肩应加工出 $30^{\circ}$ 倒角，带棱角部位要倒圆。这样可使喷焊层过渡平缓，防止应力集中，避免收缩应力而引起翘皮、剥落等缺陷。如果工件表面有孔、槽等不需要喷焊的部位，可采用石墨块填满，它的高度可与喷焊面的高度一样，待喷焊完毕并经加工后取出石墨即可。

### 3) 预热

合金粉末喷涂到工件表面后还要进行重熔，工件将受到高温加热。由于喷焊层与基体材料的热膨胀系数不同，热量积累会造成内应力的差异，有时会产生裂纹，所以喷焊前应按照工件的热容量大小和基体金属的种类（主要取决于热膨胀系数和抗氧化性能）而选择预热温度。预热温度太低，喷焊层容易脱落；太高，则基体金属表面氧化加剧，重熔时润湿性变差。经多次试验和实践，一般碳钢的预热温度由于受氧化的限制，可控制在 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ ；而对抗氧化性能好的耐热奥氏体钢，预热温度可控制在 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ；对于局部喷焊的工件没有必要进行整体预热，只需在喷焊处局部加热即可；但对刚性大、结构复杂的工件，特别是复杂的铸铁件，应采取整体预热。预热火焰应采取中性焰或弱碳化焰，以避免工件表面的氧化加剧。

### 4) 喷涂合金粉末

① 喷涂距离 当工件预热到所要求的温度时，即可喷涂合金粉末。这时，火焰应调节成中性焰，面喷涂距离的远近，对喷焊层质量有直接的影响。距离太近，火焰加热粉末的时间短，受热不足，不易发生塑性变形和相互嵌合；喷距太远，粉末喷敷到工件表面的冲撞力太小，涂层不致密，疏松。根据粉末的熔点（ $1050\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ）和火焰温度分布图，喷涂距离一般可控制在 $180\sim 200\text{mm}$ 。

② 工件转速与喷枪移动速度 喷焊轴类零件时，可装夹在车床上进行。如果工件转速和喷枪移动速度太慢，将使一次喷涂层太厚，易造成应力积累而产生裂纹。如果工件转速太快，喷涂点的切线处会产生滑射角，这样，对涂层附着力有不良影响。如果喷枪移动太快，涂层将产生螺旋状，最后导致夹灰涂层。为了避免上述现象，一般情况下，工件线速度应为 $20\text{m}/\text{min}$ ，喷枪的移动速度应为 $5\sim 7\text{mm}/\text{r}$ ，喷嘴与水平轴线成 $90^{\circ}$ 最佳，最小不能小于 $45^{\circ}$ 。

对于易氧化的工件，可采用预保护方法，以减少表面氧化。当预热温度较低时，对工件表面均匀地喷上薄薄的一层（约 $0.1\text{mm}$ ）合金粉末，就可以起到预保护作用。然后提高温度，这样做对粉末的沉积效果较好，而且能避免涂层在重熔时脱离基体金属。

### 5) 喷涂层的重熔处理

当合金粉末经喷枪喷涂到金属的表面成为涂层时，还是疏松、多孔的，与基体金属之间只是机械结合，因此必须通过重熔这一道工序来使涂层由原来的疏松多孔变为连续致密的表面层。而且与基体金属的结合，由机械结合变为冶金扩散结合。

重熔处理是发挥自熔合金喷焊特点最重要的过程。在合金粉末喷涂之后，当它产生的热量尚未降低时，就进行重熔操作。火焰应调节成中性焰或弱碳化焰。喷嘴与工件表面的距离约为 $20\sim 30\text{mm}$ （视工件尺寸、结构、焰心程度而定），火焰与工件略微倾斜，夹角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。重熔速度要快，否则基体表面容易过熔，因为粉末在长时间的高温作用下会产生氧化，导致喷焊层质量下降，甚至使喷焊失败。重熔温度一般凭经验掌握，若喷焊层表面呈“镜面反光”现象，则表明粉末已经很好地熔敷，重熔完成。

重熔时可用重熔枪或感应加热器等。对于小型工件可直接使用喷焊枪，对于较大的工件，可用几支重熔枪同时进行。重熔时，火焰不能直接对着喷涂层加热，防止喷涂层急剧膨胀而剥落，应当从基体金属边缘加热，逐渐引向涂层。当温度上升到涂层表面呈“镜面反光”时，可将火焰徐徐摆动向前，顺次熔融，直到全部重熔完毕。对于轴类零件应在旋转的条件下进行，对于平板式零件应在水平位置进行，有必要在垂直位置重熔时，可自下而上进行。

### 6) 冷却处理

自熔性合金的线膨胀系数较大，一般为  $(14\sim 16)\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，所以，在重熔后的冷却过程中，喷焊层往往会产生裂纹。因此，应根据不同的情况采用不同的冷却措施。一般低碳钢、低合金钢在冷却时不需要特殊处理，但当工件形状复杂时，如果喷焊层急剧冷却，就容易产生裂纹，这时最好将重熔后的喷焊件放在炉内缓冷或放在石棉、草木灰等绝热材料中缓冷。

对于 18-8 奥氏体不锈钢来说，应避免在  $450\sim 850^{\circ}\text{C}$  温度下长期加热，否则会产生晶间腐蚀，因此，重熔后应将工件放在  $860\sim 900^{\circ}\text{C}$  的电炉或气氛炉内作稳定化处理。对于空冷硬化工具钢或马氏体铬不锈钢，由于存在马氏体钢相变时的组织应力，有可能导致裂纹。为了保证质量，重熔后，不能置于空气或其他低于  $550^{\circ}\text{C}$  的保温设备中冷却，而必须立即在  $750\sim 800^{\circ}\text{C}$  的电炉内或保护气氛炉内作保温缓冷处理。

### 7) 喷焊层的加工

经重熔后的喷焊层，表面已经相当光洁，在要求不高的情况下，不需要机械加工即可使用。当需要较高的精度时，可进行车削和磨削加工。由于喷焊层选用的材料为镍基、碳化钨弥散型自熔合金、钴包碳化钨自熔合金，致使焊层的硬度很高，而且韧性很好，因而给机械加工带来一定的困难。如果采用一般的刀具和砂轮来加工，效率极低。为了提高生成率，同时获得较好的加工质量，根据实际使用情况，选用国内生产的牌号为 726、610 和 YC-9 刀头以及 JRC 金刚石砂轮和立方氮化物砂轮较好。

### (3) 喷焊层的常见缺陷及预防措施

氧-乙炔火焰金属粉末喷焊层常见的缺陷有喷焊层剥落、喷焊层开裂、夹渣、气孔、喷焊层聚缩等。

氧-乙炔火焰喷焊层常见缺陷的产生原因及预防措施见表 9.13。

表 9.13 氧-乙炔火焰喷焊层常见缺陷的产生原因及预防措施

缺陷	产生原因	预防措施
喷焊层剥落	(1) 工件表面不清洁 (2) 工件预热温度过高，表面发生氧化 (3) 重熔时工件温度过低，喷焊层与基体之间未形成冶金结合 (4) 重熔时火焰移动速度过快，喷焊层内部未熔融	(1) 按规定要求对工件进行表面预处理 (2) 降低工件预热温度，或先在工件表面喷一薄层喷涂合金粉末，然后再预热 (3) 重熔时先加热喷焊层附近的基体，使之接近粉末的熔化温度 (4) 熔化较厚的喷焊层时，火焰应稍做停留，使表面均发生熔融
喷焊层开裂	(1) 喷焊前工件预热温度过低 (2) 喷焊后冷却速度过快 (3) 喷焊层与基体的线膨胀系数相差太大	(1) 适当提高预热温度 (2)(3) 喷焊后缓冷或进行等温处理
喷焊层夹渣	(1) 重熔时火焰移动过快，熔渣未完全浮出 (2) 粉末的自熔性差，熔点高，黏度大	(1) 在喷焊层熔化的瞬间，稍提高火焰，在熔融处停留，使熔渣浮出 (2) 选择高质量的自熔性合金粉末
喷焊层气孔	(1) 工件表面有铁锈和油污 (2) 工件表面和粉末在喷焊前被氧化 (3) 乙炔气体中有水汽 (4) 熔化温度过高，时间过长，引起喷焊层翻泡	(1) 按规定要求清理工件表面 (2) 降低工件预热温度，用于第二步法喷焊的粉末粒度为 180 目的要占 80%~90% 以上 (3) 乙炔发生器加入电石后，要排除含有水分的乙炔 (4) 掌握好重熔的温度和时间

## 9.3 涂层后处理及质量检测

### 9.3.1 涂层后处理

有些热喷涂涂层可采用后处理的办法来改善涂层的特性。常见的涂层后处理方法有：封孔处理、强化处理、扩散处理和重熔处理。

对于喷涂层中的气孔，有些气孔是可以利用的，如隔热涂层中的气孔可以降低涂层的热导率，因此这些涂层中的气孔没有必要去除。然而抗腐蚀涂层，就不希望涂层中存在气孔。因为腐蚀介质会透过气孔腐蚀基体材料。为了弥补涂层中存在的气孔缺陷，可采用封孔处理方法，堵塞涂层中的气孔。

热喷涂涂层中存在的收缩应力，在某些情况下，具有破坏涂层与基体结合的倾向。特别是处在高负荷下工作的涂层，其破坏作用尤为突出。这时可通过对涂层进行补充处理，如喷丸处理来强化涂层，改善涂层的性能。

#### (1) 封孔处理

喷涂层本身具有孔隙，而且内部的孔隙有时会相互连接，并由喷涂层表面断续延伸至被喷涂工件的表面。因此，在喷涂之后还需要进行封孔处理。封孔处理可以提高钢铁零件的防锈性能、耐蚀性能、绝缘性能和减摩性能，还可以防止封孔后的磨削过程中磨屑玷污涂层的孔眼，提高磨削加工速度和质量，并有利于提高涂层的工作性能。

封孔处理之前，必须将喷涂层表面清理干净，最好是喷涂完毕马上进行封孔处理。如果喷涂层表面有油污时，应该用适当的溶剂洗净并蒸发后，方可进行封孔处理。操作时，可用刷子直接涂敷，也可用加压喷枪喷射，或者将零件置于真空中减压，然后使封孔剂渗入涂层气孔中。

封孔剂常用材料包括有机合成树脂、合成橡胶、石蜡、某些油漆或油脂等。酚醛树脂是广泛使用的封孔剂。固化后酚醛树脂具有良好的耐有机溶剂和弱酸的能力，使用温度为 $150\sim 260^{\circ}\text{C}$ 。

为保证封孔剂的良好渗透性，可选用丙烯酸酯类胶黏剂。这类胶黏剂在空气中为液态，不会固化。当涂敷于喷涂层的孔隙中时，胶黏剂与空气中的氧气隔绝，就会很快固化起到密封作用。它具有较好的耐水和耐油性能，可长期工作在 $150^{\circ}\text{C}$ 的环境下。

对于在较低温度（ $100\sim 290^{\circ}\text{C}$ ）下工作的喷涂层，常用石蜡作为封孔剂。石蜡具有耐淡水、海水及大多数的酸、碱的性能，但是在有机溶剂和油中石蜡会发生溶解，影响涂层的封孔处理效果。普通的石蜡没有明显的熔点，因此必须选用具有明显熔点的微结晶石蜡作为封孔剂，该石蜡熔点为 $90^{\circ}\text{C}$ 左右。封孔处理时将喷涂层加热到微结晶石蜡的熔点以上的温度，待石蜡溶化后直接涂上去。

此外，许多工业用的密封胶也可作为喷涂层的封孔剂。

#### (2) 强化处理

喷涂层一般都具有由于收缩造成的残余拉应力，这就容易使涂层出现裂纹或在边缘部分起翘。通常采用喷丸和滚压来改变表面层的应力状态，消除拉应力，造成压应力，从而改进涂层的疲劳性能。

##### 1) 喷丸强化

喷丸强化的设备与喷砂相似，只是磨粒为金属或玻璃丸，靠丸球冲击零件表面产生压应力表面层。其应力大小和均匀性以及应力层的深度都应严格进行控制。控制的途径是选择喷

丸过程中的合适工艺参数，例如，空气压力或轮速、喷嘴与零件表面之间的距离、喷射流与零件表面的倾斜角度、零件相对移动速度及丸球直径等。所用丸球的破碎率不得超过10%。

## 2) 滚压强化

在喷涂层表面施加适当的压力，可以使涂层结构紧密，降低气孔率，提高硬度。除了改变涂层的应力状况，还可降低涂层表面粗糙度数值和提高尺寸精度。这对于硬度高，难以进行切削加工的自熔性合金涂层有重要的作用。自熔性合金涂层，由于液态金属表面张力作用，重熔后的形状往往与零件要求的形状相差较大，而自熔性合金涂层又多用于尺寸要求较严格的配合面。这样需要切削加工的量就大，一方面浪费合金粉末，另一方面涂层硬度高，车削和磨削都很困难，一般推荐采用BN和SiN刀具，但价格昂贵。

在涂层重熔后趁热进行滚压加工，或将已经制备好的涂层重新加热进行滚压处理，使其具有与它所要求的形状更接近的涂层表面和较低的表面粗糙度数值，从而可以实现少切削或无切削加工，减少机加工工作量和合金粉末用量，降低成本。同时，经滚压处理后的涂层结构更加紧密。

滚压是利用涂层与滚轮之间的摩擦力使滚轮转动，同时施加径向挤压力实现挤压的。滚压轮直接与红热的涂层接触，在工作过程中滚轮体的温度也要升高，因此滚轮材料要有较好的红硬性和抗氧化性。滚轮的表面粗糙度数值越低，则滚压后的涂层表面粗糙度数值也越低，一般要求滚轮表面粗糙度 $R_a$ 在 $1.6\mu\text{m}$ 以下；同样滚轮回转精度越高，则滚压后的尺寸精度也越高。一般要求滚轮的径向跳动量不得大于 $0.01\text{mm}$ ，这样可使滚压处理的圆柱及圆锥形零件表面母线跳动量控制在 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 之间。

滚压处理时，应根据情况对零件加热保温，使涂层温度保持在液-固相线之间。如果温度过低，则成形困难，温度过高会粘滚轮，甚至使涂层全部挤掉，加热火焰还应避免直接对着滚轮进行加热。

滚压处理可以用于圆柱形、圆锥形零件，也可用于平面零件。圆形零件在滚压处理时的转速不宜太高，以免离心力的作用使涂层组织疏松，降低滚压效果；零件转速也不宜太低，否则通过滚轮散失的热量，使涂层变形所需要的滚压力也要增大，有时甚至会造成零件变形。

## 3) 其他强化方法

对喷涂层表面进行连续密集的敲击，也能达到类似强化效果，但所用压力和均匀性都不易控制。对于较软的金属涂层，采用钢丝刷也能封闭涂层孔隙，获得光滑的呈现金属光泽的表面。

### (3) 扩散处理

扩散处理是通过热处理的作用，使涂层与基体的界面部分相互扩散，形成两种或多种元素的化合物和固溶体，改变基体表面的成分和组织，以提高其使用性能。

常用喷涂铝层作扩散处理来提高碳素钢、低合金钢、不锈钢和镍基、钴基耐热合金的高温抗氧化和抗含硫介质腐蚀的能力。也可以用来改善铁基粉末冶金产品、铜合金和钛合金的表面性能。碳素钢喷铝扩散后，在 $870^\circ\text{C}$ 以下的抗氧化、抗渗碳、抗碳氮共渗能力得到大幅度提高，可代替高合金奥氏体钢作热处理炉内构件。低碳钢和含铬钼的低合金钢经喷铝扩散处理还能提高在高应力、高温下工作的零件寿命，例如，在 $760^\circ\text{C}$ 抗氧化、抗含铅燃料产物腐蚀的汽车排气阀，在 $900^\circ\text{C}$ 左右工作的燃气轮机转子和静子叶片等。

扩散处理的方法较多，主要有感应扩散和涂料保护扩散。

### 1) 感应扩散

感应扩散的具体操作步骤包括:

- ① 零件酸洗后感应加热 150~315℃;
- ② 零件表面喷涂纯度大于 99.9% 的铝, 厚度为 0.3~0.5mm;
- ③ 在 5~20s 时间内感应加热到 790~860℃, 保温 5~40min, 根据时间长短最多可得到厚度 25 $\mu$ m 的渗层。

### 2) 涂料保护扩散

几种加涂料作热处理的保护扩散的方法见表 9.14。

表 9.14 几种加涂料作热处理的保护扩散的方法

保护涂料	铝涂层厚度/mm	加热温度/℃	保温时间/min
沥青	0.13~0.4	760~900	5~10
硅酸钠	0.3	800~850	15~180
硼砂	0.3	600~850	30~180

扩散处理时, 对喷涂和喷前表面净化要求较高, 如果涂层与基体材料黏结不完全, 未黏结部分则不能生成扩散层, 扩散温度不能过高, 超过 900℃ 就可能会产生龟裂。

扩散处理后如果再进行扩散退火处理, 可以降低渗层表面的铝浓度和增加渗层厚度。富铝的 FeAl<sub>3</sub> 相常使表面多孔而酥脆, 对基体没有保护作用。如果经过再加热扩散退火处理, 铝和铁进一步扩散, 形成铝在基体中的固溶体, 渗层加厚, 表面铝浓度降低, 渗层的延展性和韧性都可以得到改善。

### 9.3.2 涂层的机械加工

对喷涂层进行机械加工时必须采取适当的机械加工方法。因为喷涂层的硬度一般较高, 内部主要为机械组合, 且有一定的孔隙, 不当的加工方法不仅降低精度和工作效率, 而且可能引起喷涂层损坏或整体脱落。对于某些零件的配合面由于其加工精度要求很高, 为防止切屑进入喷涂层的孔隙, 通常进行封孔处理后方可进行机械加工。

常用的机械加工方法是车削和磨削。对于钢、铝、纯铁等少数喷涂层可以采用高速钢刀具进行车削, 其他大部分材料的喷涂层应使用添加碳化钽或碳化铌的超细晶粒硬质合金刀具或立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、金刚石刀具才能进行加工。有些喷涂层只能采用磨削加工。磨削加工时, 应选用绿色碳化硅、人造金刚石或立方氮化硼等高硬度砂轮。选用粒度稍粗的砂轮可防止加工中脱落的磨粒嵌入喷涂层孔隙而影响磨削质量。

#### (1) 车削

许多热喷涂层合金基体的硬度并不高, 但因为固溶体组织具有滑移系多、塑性变形大的特点, 所以在切削加工时, 塑性变形区晶格滑移严重, 产生冷作硬化, 使切削力增大。大量弥散的高硬质点包括碳化物、硼化物及金属间化合物等, 组织稳定, 高温时仍保持相当高的硬度, 因此, 在切削时刀具磨损加剧。此外, 固溶体导热性差, 加之喷涂层多孔性则更进一步降低了导热性。

切削时由于固溶体塑性变形大, 切削抗力增大, 刀具和工件间存在着强烈摩擦, 产生大量的切削热难以扩散。大部分热量集中在切削区, 使切削温度很快升高。又因喷涂层的加工余量很小, 为了提高表面加工质量, 往往分为粗加工、半粗加工、精加工。因此, 每次切削吃刀深度甚小, 走刀量也小, 这就使切削热量集中在刀具刃口很小的部分上——刀尖处, 造



成刀具过热，加速了刀具的磨损以及非正常破裂。

车削热喷涂层的硬质合金刀具及其性能见表 9.15。

表 9.15 车削热喷涂层的硬质合金刀具及其性能

牌 号	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	硬度 HRA	抗弯强度/MPa	性 能 及 用 途
YG3X	15.0~15.3	92	1 000	耐磨性较好,冲击韧性较差,适用于一般涂层的机械加工
YC69	14.8~15.0	94	1 200~1 400	耐磨性高,红硬性好,适用于镍、钴、铁基含碳化钨高、耐磨热喷涂层的加工
YG10HT	14.3~14.5	91.8	2 000~2 200	耐磨性较高,抗冲击、抗震性好,适用于切削一般耐磨喷焊层表面
YH1	14.2~14.4	93	1 800~2 200	耐磨性高,红硬性及韧性好,适用于铣削一般喷焊层表面
600	14.6~14.9	93.5	1 000	可车削含碳化钨的高耐磨热喷涂层
726	13.6~14.5	92	1 400	可车削一般热喷涂层
610	14.4~14.9	93	1 200	可用于喷焊层的连续车削

由于热喷涂层具有特殊性，切削工艺选择是否合理，直接关系着加工效率和加工质量。如轴类零件，喷层有两种类型：第一种是零件部分进行喷涂，其余部分为未喷涂的普通钢材；第二种是零件全部进行喷涂。这两种类型的切削加工方法各不相同，第一种加工时应从普通钢材处进刀，向尾座方向走刀，这样可避免开始切削抗力大，损坏刀具，并且能保证切削质量。第二种类型车削加工时首先在轴类零件上进行倒角，车进刀台，一次可切去大部分加工余量，这样可提高刀具的耐用度，并能提高加工效率。

根据喷涂层的加工特点，应合理选择切削用量。切削用量是指切削速度、吃刀深度和走刀量。切削喷涂层时，切削深度一般取 0.15~0.5mm；精车削时，一般取 0.05~0.1mm。若切削深度过大，喷涂层易崩碎而脱落。

切削喷涂层时，为了提高切削效率，可以适当增加进给量。一般粗加工或半精加工时，进给量为 0.3~1.0mm/r，精加工时，宜选用较大的刀尖圆弧半径，进给量比粗加工或半精加工的要小些。

由于喷涂层表面硬度较高，各种合金元素形成耐磨的硬质相较多，因此切削速度要比相同的淬硬钢低。一般按硬度的高低来选择不同的切削速度，硬度在 45HRC 以下，切削速度为 25~50m/min；硬度在 45~55HRC，切削速度为 10~25m/min；硬度在 55HRC 以上时，切削速度为 6~10m/min。

一些喷涂层的切削工艺实例见表 9.16。

## (2) 磨削

喷涂层是多孔组织，喷涂层与基体结合是以机械结合为主，喷涂层厚度相对喷焊层而言较薄。因此，对其进行磨削加工时，首先要考虑是否封孔，其次要选择适当的磨具和磨削参数。

磨削喷涂层的砂轮应较粗，呈疏松结构，且黏结度低。除了含高浓度碳化钨的涂层外，一般均可采用碳化硅砂轮。常用的砂轮特性如下：磨料粒度 40~60 $\mu\text{m}$ ，硬度中软，疏松结构，用陶瓷黏合剂。砂轮的规格可根据特定的工件而改变。如果与工件的接触面积大，工作台移动速度较快，使用压力小的宽砂轮时，就应选用较软的砂轮；相反，如果接触面较小，采用窄砂轮和高压力，就应增加砂轮的硬度，以获得更好的粗糙度。

表 9.16 一些喷涂层的切削工艺实例

工 件	喷涂材料	喷涂层硬度 /HRC	加工表面 /mm	切 削 用 量			加 工 效 果
				切削速度 / $m \cdot min^{-1}$	进给量 / $mm \cdot r^{-1}$	切削深度 /mm	
拉杆	Ni 基	50~52	$\phi 40 \times 400$	5.5	0.2	0.5	粗糙度 $R_a$ 为 $6.3 \sim 3.2 \mu m$
	Co 基 (含 35% WC)	50~52	$\phi 100 \times 30$	26.6	0.068	0.7	一次刃磨可加工长 100mm 工件, 粗糙度 $R_a$ 为 $3.2 \mu m$
柱塞	Ni 基	55	$\phi 50 \times 285$	20	0.13	0.2~1.0	粗糙度达 $R_a$ 为 $1.6 \mu m$
	Ni104	50	$\phi 70$	21	0.11	1	加工 5~6 件后, 刀刃略有磨损
样棒	Fe09	50~66	$\phi 16$	36	0.1~0.2	0.5~1.5	加工 2~3 件后, 刀刃略有磨损
阀座	Co-Cr-B-Si	58~60		50	0.12	0.2~1.0	粗糙度 $R_a$ 为 $1.6 \mu m$

当喷涂的金属易堵塞砂轮时, 就应采用较粗和低黏结强度的砂轮, 避免磨屑堵塞砂轮孔, 防止产生磨削裂纹。若选用不适当的磨料或陶瓷黏结的砂轮, 都可能导致高的剪切力, 产生严重的局部过热。由于喷涂层的导热性差, 这种热量会聚集, 从而产生烧蚀和热裂纹。为了避免局部过热和堵塞现象, 可改变砂轮结构, 采用开槽的方法使砂轮与工件尽量减少接触面积, 以达到降低磨削热的目的。

使用合格的砂轮磨削时, 始终都应采用较轻的压力。要求喷涂层表面具有较低的粗糙度时, 要用较细的原料和大量冷却液, 不能使用偏心砂轮; 干磨时要选用坚固设备, 以防止砂轮剧烈振动。

选择磨削加工的工艺参数时, 要根据磨床条件的变化来确定。当使用较软的砂轮时, 要选择较快的工件移动速度, 并且选用较小的压力和较宽的砂轮; 当使用较硬的砂轮时, 可选择较重的压力和较窄的砂轮, 加工出具有较低粗糙度的涂层表面。

### 9.3.3 涂层的缺陷及防止措施

热喷涂层的常见缺陷有: 涂层碎裂、涂层脱壳、涂层分层、涂层不耐磨等。常见的喷涂层缺陷及产生原因见表 9.17。应依据各种缺陷的产生原因采取相应的预防措施, 以获得优质的喷涂层。

表 9.17 常见的喷涂层缺陷及产生原因

缺 陷	产 生 原 因
涂层脱壳	(1) 表面粗糙程度不够或有灰土吸附, 使涂层附着力减低 (2) 工件含有油脂, 喷涂时油脂溢出, 特别是球墨铸铁曲轴 (3) 压缩空气中有可见的油与水 (4) 喷枪离工件太远, 当金属微粒达到工件前塑性降低, 未能充分降低 (5) 车削与拉毛、拉毛与喷涂各道工序相隔时间太久, 致使表面氧化 (6) 磨削时采用氧化铝砂轮, 致使涂层局部过热而膨胀 (7) 喷枪火花不集中, 喷涂时火焰偏斜, 致使金属微粒不能有力地黏附在工件表面 (8) 工件线速度和喷枪移动速度太慢, 喷涂中夹杂物漂浮于表面, 减低了附着强度
涂层分层	(1) 采用间歇喷涂时, 没有一次喷完, 停喷太久, 涂层在磨光时会产生分层剥落现象 (2) 喷涂中压缩空气带出的油和水溅在工件表面上 (3) 喷涂场所不洁, 每一层喷涂后有大量灰尘吸附到工件表面, 使层与层有外来物隔离或部分隔离

缺陷	产生原因
涂层碎裂	(1)喷涂时喷枪移动太慢,以致一次喷涂的涂层过厚,造成涂层过热 (2)喷枪距离太近,促使涂层过热 (3)喷涂材料收缩率过高或含有较多的导致热裂冷碎的元素,如硫、磷等 (4)电喷时,电流过高;气喷时,使用了氧化焰,涂层过分氧化 (5)喷好后的工件过度急冷而碎裂 (6)压缩空气中有水汽和油雾,降低了涂层结合强度 (7)工件回转中心不准,喷涂火花偏斜在一面,使第二层涂层有厚有薄,收缩率不均
涂层不耐磨	(1)喷涂时喷枪离工件太远,金属颗粒提早冷却,喷到工件上后成为疏松涂层,涂层工作时,颗粒部分脱落,擦伤摩擦面 (2)磨削时有大量的砂轮屑嵌入涂层,擦伤表面 (3)金属丝进给速度太快,颗粒呈片状 (4)金属材料不合适,硬度不高,不耐磨(如钢丝的含碳量低,涂层太软) (5)空气压力太低,喷枪距离太远,致使结合强度降低

## 9.4 热喷涂工艺的应用实例

### 9.4.1 水闸门火焰线材喷涂工艺

闸门是水电站、水库、水闸、船闸、抽水站等水利工程控制水中位的主要钢铁构件,它有一部分长期浸在水中。在开闭和涨潮或退潮时,表面经受干湿交替,特别在水线部分,受到水、气体、日光和微生物的侵蚀较严重,钢材很容易锈蚀,严重威胁水利工程的安全。原来用油漆涂料保护,一般使用周期为3~5年。而采用线材喷锌和涂2层氯化橡胶铝粉漆作为封闭剂,大大提高了钢制闸门的耐腐蚀性能,使用寿命可达20~30年,比原用油漆涂层寿命延长6~10倍。

水闸门喷涂锌的工艺如下。

① 采用粒径为0.5~2mm的硅砂对水闸门的喷涂表面进行喷砂处理、去污、防锈,并且粗化水闸门表面。

② 喷涂时使用SQP-1型火焰喷枪,用锌丝喷涂材料。

③ 为保证涂层质量及其与结构的结合强度,喷涂过程中,应严格控制氧和乙炔的比例和压力,使火焰为中性焰或稍偏碳化焰。

④ 水闸门喷涂锌采用的工艺参数见表9.18。喷涂时应采取多次喷涂法,使涂层累计总厚度达到0.3mm,以防止涂层在喷涂过程中翘起脱落。

表 9.18 水闸门喷涂锌采用的工艺参数

喷涂材料	氧气压力/MPa	乙炔压力/MPa	压缩空气压力/MPa	喷涂距离/mm	喷涂角度/(°)
锌	0.392~0.49	0.392~0.49	0.49~0.637	150~200	25~30

⑤ 涂层质量经检验合格后,进行喷后处理。如果涂层中有气孔,一般选用沥青漆进行涂漆封孔处理。

### 9.4.2 主轴轴颈及球罐火焰粉末喷涂工艺

(1) 大型轴流式风机主轴颈的喷涂修复

大型轴流式风机的最大输出压力为4.41MPa,最高输出风温为265℃,输出风量为

6 000m<sup>3</sup>/min, 主轴额定转速为 3 860r/min。在工作过程中造成轴颈的严重磨损, 磨损宽度为 50mm, 磨损沟的最大深度为 1.91mm。主轴的材质为 25NiCr 合金钢, 轴颈的尺寸为  $\phi 250$ mm。采用火焰粉末喷涂工艺, 将该轴修复成功。其喷涂修复工艺如下。

① 按磨损程度加工轴颈, 加工后的最小直径为  $\phi 245.5$ mm, 其宽度为 50mm; 其余喷涂修复面均加工成  $\phi 249.2$ mm, 总宽度为 164mm。

② 用三氯乙烯洗去轴颈表面的油污。

③ 用 70 粒度的砂轮打磨待喷涂表面, 打磨深度约为 0.06~0.07mm。

④ 正式喷涂前, 车床应进行空载自动行走试验, 以备喷涂时使用。试验时轴的转速为 28r/min, 喷枪移动速度为 135mm/min, 喷枪距工件表面距离为 200mm。

⑤ 用加热枪, 将轴颈局部加热到 80~100℃。在此热状态下, 再一次进行打磨清理。

⑥ 喷涂时氧气压力为 0.392MPa, 乙炔压力为 0.686MPa。首先在轴颈中部宽度为 50mm 范围内, 用铝包镍复合粉末按预定工件转速和喷枪移动速度进行喷涂, 共喷 5min。喷涂后测得的表面温度为 60℃, 其尺寸为  $\phi 249.3$ mm。然后将涂层车削加工成  $\phi 249.12$ mm。接着在轴颈宽 164mm 范围内, 喷涂铝包镍复合粉末, 共喷 3.5min, 喷涂后测得表面温度为 40℃。最后在车床上进行自动行走喷涂铁基自熔合金粉末作为轴颈表面的工作层。来回行程共 11 次, 每次耗时 80s, 测得表面最高温度为 80℃, 平均温度为 70℃、喷涂后的轴颈尺寸为  $\phi 251$ mm。

⑦ 喷涂后立即用石棉布将轴颈包裹起来, 使其缓冷, 并在车床上以 38r/min 的速度旋转 4h。

⑧ 用 YT15 硬质合金刀车削喷涂面, 每次切削深度为 0.15mm 左右。车削后轴颈为  $\phi 250.5$ mm, 再用碳化硅砂轮进行磨削加工, 最后用牛皮进行抛光, 使轴颈尺寸和表面粗糙度都达到了修复前的水平。

喷涂后的风机主轴经运行 60 天后, 打开轴承检查, 其轴颈工作正常。

## (2) 200m<sup>3</sup> 球罐喷涂修复

200m<sup>3</sup> 球罐的材质是 16MnR, 厚度为 24mm, 储存介质为液化石油气。液化石油气中 H<sub>2</sub>S 含量较高。球罐使用几年后, 发现严重的开裂。经分析确定是 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀开裂。裂纹主要分布在焊接接头区域, 对球罐的安全使用造成严重威胁。

为防止和延缓 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀开裂, 在球罐内壁焊接接头区域喷涂铜合金粉末。利用铜合金粉末涂层将基体与液化石油气介质隔离, 并且通过电化学反应原理, 控制喷涂保护区的阴极吸氢反应, 还可以通过喷涂加热减少焊缝区的应力, 从而防止球罐的 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀开裂。球罐喷涂修复工艺如下。

① 表面处理 对经探伤合格后的焊缝及热影响区用砂轮机打磨, 清除铁锈。打磨的宽度为 150~170mm。然后用棉纱蘸丙酮擦洗 2~3 次。

② 预热 喷涂部位的外壁用液化石油气火焰预热, 用表面温度计测量球罐内表面温度, 预热温度控制在 250~350℃。

③ 喷涂过程 当球罐内壁温度达到预热温度时, 即用第一把喷枪喷镍包铝合金粉末, 作为过渡层。然后用第二把喷枪喷铜合金粉末。喷涂工艺参数为乙炔压力 0.049~0.098MPa; 氧气压力 0.588~0.784MPa; 喷枪距工件的距离 150~200mm; 喷涂宽度 120~150mm。开始喷涂后, 将预热用的液化气火焰调小, 待该段喷涂完毕立即灭火。

经喷涂后的球罐, 经过半年的运转使用, 效果良好, 均未发现 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀开裂, 提

高了球罐的使用寿命。

### 9.4.3 葡萄酒罐内壁火焰喷涂塑料工艺

某葡萄酒厂低温发酵车间的发酵罐是采用普通不锈钢板焊接而成，使用后内部出现点状腐蚀。在该车间进行技术改造时，为了防止酒罐内壁继续腐蚀，采用现场火焰喷涂塑料涂层对葡萄酒罐进行保护，取得了良好的效果。

#### (1) 涂层材料

喷涂后，要求内壁涂层材料无毒、无味、不影响葡萄酒质量，具有一定的耐酸性和耐碱性，涂层与酒罐内壁结合良好，使用中不得出现涂层脱落现象。并且要求涂层最好与酒石酸不粘或粘后易于清除，表面光滑，具有一定的耐磨性。因此，根据低温发酵罐工作情况，选择白色聚乙烯粉末作为葡萄酒罐内壁的涂层材料。

#### (2) 火焰喷涂工艺

聚乙烯粉末火焰喷涂使用塑料喷涂装置，包括喷枪、送粉装置等。喷涂工艺流程为：喷砂→预热→喷涂→加热塑化→检查。

① 预处理 在喷涂塑料前，采用压力式喷砂设备，使用刚玉砂对酒罐内壁表面进行喷砂处理。

② 表面预热 将酒罐预热至接近聚乙烯粉末材料的熔点。其目的是除去表面潮气，使熔融塑料完全浸润工件表面，从而得到与工件基体的最佳结合。

③ 喷涂 经预热使工件表面温度达到要求后，即可送粉喷涂。葡萄酒罐火焰喷涂采用由上到下的顺序进行，即顶部→柱面→底部。喷涂时，应保持喷枪移动速度均匀、一致，注意涂层表面状态，使喷涂层出现镜面反光现象，与工件表面浸润并保持完全熔化。火焰喷涂聚乙烯涂层的工艺参数见表 9.19。

表 9.19 火焰喷涂聚乙烯涂层的工艺参数

喷涂材料	氧气压力/MPa	乙炔压力/MPa	压缩空气压力/MPa	喷涂距离/mm
聚乙烯	0.2~0.25	0.1~0.13	0.2~0.4	250~300

④ 加热塑化 由于聚乙烯熔化缓慢，喷涂聚乙烯涂层流动性略差，因此在喷涂后，需用喷枪重新加热处理或者喷涂后停止送粉使涂层完全熔化，涂层流动、表面平整后再继续喷涂。加热时，应防止聚乙烯涂层过热变黄。

⑤ 涂层检查 在喷涂过程中及喷涂完酒罐后，对全部涂层进行检查。主要检查有无漏喷，表面是否平整光滑、是否存在机械损伤等可见缺陷。葡萄酒罐装酒前经酸液和碱液消毒清洗，需要再次进行检查。对发现涂层与酒罐内壁结合不良的部位应重新进行修补。

### 9.4.4 发动机曲轴电弧喷涂工艺

曲轴是发动机的重要零件，发动机发出的功率通过曲轴传递到工作部件，它的转速很高并承担繁重的交变载荷。在使用中经常产生的缺陷是轴颈产生疲劳裂纹和轴颈表面磨损等，这些缺陷对发动机的工作和寿命有很大的影响。

#### (1) 修前检查

曲轴在修复前应当检查轴颈和圆角的裂纹、轴颈的磨损等。喷涂修复曲轴只能恢复尺寸，不能恢复强度。有裂纹的曲轴只能在用焊接的方法消除裂纹后，才能用喷涂法修复。因此，曲轴在喷涂修复前必须采用探伤法仔细检查是否有裂纹。圆角处有裂纹的曲轴不能修

复，轴颈上长度不大于 30mm、并且未延伸到圆角处的裂纹可用手砂轮将裂纹磨掉，再用手工堆焊将坡口堆满，车削后再进行喷涂。

#### (2) 表面预处理

表面预处理包括表面除油与表面粗化，首先将喷涂部位及周围表面的油彻底清洗干净，然后用特制的加长刀杆车刀，车去轴径表面疲劳层 0.25mm，最后用 60°螺纹刀在轴颈表面车出螺纹。

#### (3) 涂层材料

曲轴材料牌号为 KSF55，相当于 35 号锻钢，因此，选用铝青铜喷涂底层，3Cr13 作为喷尺寸层及工作层。丝材直径为 3mm。

轴颈表面预处理后的尺寸为  $\phi 192\text{mm}$ ，要求的基本尺寸为  $\phi 195\text{mm}$ ，所以应当喷涂至  $\phi 199\text{mm}$ 。

#### (4) 喷涂工艺参数

曲轴电弧喷涂工艺参数见表 9.20。

表 9.20 曲轴电弧喷涂工艺参数

喷涂材料	喷涂电压/V	喷涂电流/A	空气压力/MPa	喷涂距离/mm
铝青铜(底层)	40	100	0.7	200~250
3Cr13(工作层)	10	400	0.7	200~250

喷涂时，曲轴在 C650 车床上慢速移动，喷枪沿轴径法线方向喷射，并沿轴线方向轻轻摆动。

#### (5) 喷涂层的机械加工

用专用车刀车削加工，留下 0.8mm 磨削余量，然后安装在曲轴磨床上磨削至标准尺寸  $\phi 195\text{mm}$ 。

#### (6) 涂层质量检验

现场喷涂的试片，用锤击法检验，无裂纹，无起皮现象，说明采用电弧喷涂，涂层与曲轴基体结合良好。

### 9.4.5 发动机叶片等离子弧喷涂工艺

在军用和民用喷气发动机的高压压气机内，空气流是直接围绕和通过静止的静子叶片面流动的，这些整流叶片是单独地安装在静子机箱内径圆周上的燕尾槽内。整流叶片的数量和尺寸，取决于发动机的推力，在正常情况下，叶片的数量超过 1 000 片，其长度大于 25mm。

静子叶片的用途，是用来帮助空气流定向的。当被压缩的空气强制进入涡轮的时候，在叶片上产生间歇的负载。这种负载传到在静子燕尾槽内的叶片根部，静止叶片根部也有燕尾槽外形。静子叶片在燕尾槽内振动时，就使其在它的表面层和槽的外径两者都形成微动磨蚀。为了减少金属的损失，应在其配合表面上熔敷一层润滑耐磨涂层。如用常用的润滑剂，如胶状石墨，或二硫化钼，当它们在发动机工作负载的应力作用下，润滑剂就迅速向外挤出，起不到抗微动磨蚀的作用。

采用等离子弧喷涂一层厚度为 0.05~0.1mm 的铜-镍-钼合金 (Cu-Ni-In) 涂层，就足以经得起耐磨防护，并且提供了一个润滑剂的储存库。钢本身有润滑能力，同时在涂层的气孔和凹槽中，又保留了润滑剂。

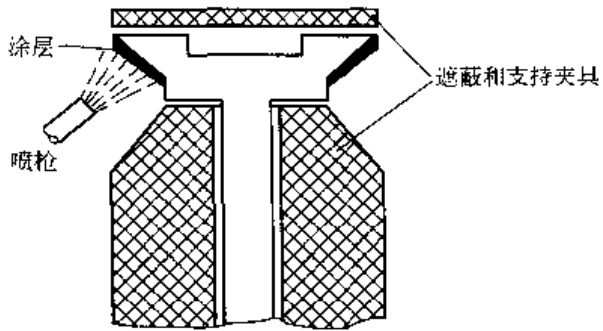


图 9.10 叶片装在夹具内喷涂示意

喷涂前，所有的静子叶片，都在溶剂中进行漂洗以除去在机械加工和成形时残留在其表面上的油脂和油污。清洗之后将叶片装于夹具内，在吹砂和喷涂时保护叶片，见图 9.10。

典型的夹具长达约 1.2m，可夹持 20~40 片叶片，可以实现批量进行喷涂。装夹完毕后，在自动吹砂机上对叶片吹砂，然后用等离子喷枪操纵器喷涂表面。在叶片每边喷涂两遍 Cu-Ni-In 合金粉末。

喷涂完之后，将叶片从夹具上拆下，用电动钢丝刷刷去松散黏附的颗粒，并进行涂层质量检查。

#### 9.4.6 高压平板阀闸喷焊工艺

高压平板阀闸板采用 35CrMo 钢制造，其结构如图 9.11 所示。根据使用情况及工作条件，要求喷焊 F102 (FZNCr-60) 自熔性合金粉末。

高压平板阀闸板结构为平面型，喷焊面积较大。为得到厚度均匀的喷焊层，避免产生裂纹，选用氧-乙炔火焰二步法喷焊。

由于喷焊层设计为双面对称结构，基体厚度为 50mm，具有足够的刚性，喷焊时可以两面连续操作，不会引起闸板的变形。

喷焊前基体金属要求正火状态，喷焊后如无裂纹缺陷，可以自然空冷。由于氧-乙炔火焰加热均匀，喷焊后可不再进行消除应力回火热处理。

高压平板阀闸板的二步法喷焊操作要点如下。

① 喷砂或车削待喷焊表面，至闸板厚度为 49mm。严格保证待喷焊表面的清洁，无污染。

② 将闸板立放，遮挡非喷焊部位，防止粉末黏结，造成粉末清除困难。

③ 预热闸板 250~300℃，严禁全部或局部氧化。

④ 喷涂保护粉末。用高效喷涂喷焊两用枪，梅花形喷嘴，均匀地在两面先后喷涂厚度约为 0.1mm 的 F102 粉末，以保护待喷焊表面，预防继续加热造成表面氧化。

⑤ 继续加温。用喷涂喷焊两用枪或重熔枪均可，将闸板加热到 500℃ 左右，呈不明显微红色为止。

⑥ 喷涂工作层粉末。喷涂过程中应保证厚度均匀，喷粉时喷枪要顺序逐步移动，保证每次沉积的粉末有 1/3 叠加在前一次的沉积粉末上。中间通道 ( $\phi 103\text{mm}$ ) 部分不要绕过，都应喷涂。

根据计算的耗粉量，控制涂层的厚度。当耗粉量达到一半时，测量涂层的厚度是否达到要求；一旦达到要求的涂层厚度，立即转向另一面进行喷涂。喷涂过程中，应注意不能降低闸板的温度。如发现温度降低，则应一边喷粉，一边用另一把喷枪加热闸板。

⑦ 继续加温。要保证涂层与基体同时升温。升温速度要快，否则加热时间太长，涂层

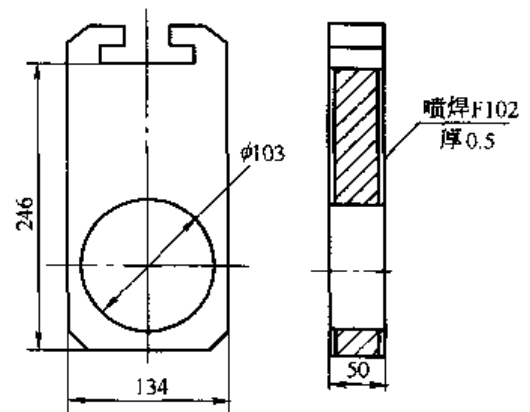


图 9.11 高压平板阀闸板结构

氧化、自熔性变差，影响喷焊层的质量。

⑧ 重熔。当温度达到 800℃时，闸板呈暗红色。将闸板放平，即可重熔。重熔过程中注意不能过热。重熔完第一面后，接着重熔第二面。重熔后将工件放在空气中自然冷却，冷却至室温后测量闸板厚度应符合尺寸要求。



## 第 10 章 喷涂层性能及应用

为了使热喷涂技术作为一种表面强化工艺，可靠地应用于各种机械设备零部件的制造与修复，必须保证喷涂层具有较高的质量和性能。因此，需要采用准确而又方便的检验方法，对喷涂层的质量和性能进行可靠的评价，使喷涂层的强度、耐磨、耐热、耐腐蚀等性能满足实际应用中的使用要求，保证工程结构件的安全运行。

### 10.1 喷涂层的性能检测

#### 10.1.1 涂层性能检测的目的

##### (1) 满足工艺制造上的要求

通过喷涂层性能数据的比较，检查工艺参数是否选择适当，是测定涂层性能的第一个目的。为此而选用的测试项目应该对工艺参数十分敏感，而且简单易行。目前采用最多的是抗弯试验或杯突试验。在更换或选择新工艺参数时，要仔细测定喷涂层与基体之间的结合强度。

##### (2) 满足设计上的要求

根据测定的喷涂层性能数据，设计或计算涂层的结构和厚度，以满足产品使用上的要求。这类性能对工艺参数不太敏感，通常是涂层的基本物理性能，特别是长期持续高温下工作的耐热涂层，应测定涂层的比热容和热膨胀系数等。测定这些性能需要专用设备，并要求喷制一定规格的标准试样，这在一般车间或工厂内难以做到。

##### (3) 满足实际使用上的要求

判断涂层在实际情况下可能出现的损坏以及使用寿命，是测定涂层性能的又一个目的。如涂层在动态下的隔热和抗蚀性能、涂层在某一部件上的耐磨蚀性能等，这些往往要求根据具体的使用环境，专门设计和研制出专用测试设备来进行涂层性能的测试。

#### 10.1.2 涂层的力学性能测定

##### 10.1.2.1 结合强度

涂层的结合强度包括涂层与基体之间的结合强度以及涂层颗粒之间的自身结合强度。涂层与基体之间的结合分机械结合、显微冶金结合和物理结合三种形式。镍铝复合粉和钼、铌、镍铝等合金，具有很高的结合强度。因此，将这些材料用于打底层，可以改善涂层与基体之间的结合强度。

涂层颗粒之间的结合强度主要取决于喷涂合金粉末的特性，如质量和比热容等。喷涂层的抗压强度高于结合强度。一般是最大结合强度的 3~4 倍。抗压强度对不少机器构件来说是一项重要性能，例如各轴类的轴承负荷、法兰及轴承座等。

薄涂层比厚涂层更适合传递抗压负荷。工作过程中，当零件经受突然的压力负荷时，喷涂层不会受到破坏。

##### (1) 涂层与基体的结合强度

涂层与基体的结合强度是判断涂层能否实用的基本因素之一。测定涂层与基体结合强度的方法很多，大体上可分为用黏结剂的和不用黏结剂的两大类。测定结合强度的基本原理

是，在材料试验机上，将涂层从基体上拉开，测定所用力及受力面积，计算出结合强度。试验时大多采用夹具，这类夹具采用球面支撑和铰链结构，可有效防止作用力不通过试样中线产生的附加弯矩。通常喷涂层不能承受冲击载荷，因此拉力速度应控制在 10mm/min 以下。

### 1) 拉伸试验方法

常用的喷涂层结合强度拉伸试验有两种。第一种是不采用黏结剂的方法，其试验方法如图 10.1 所示。它是在基体 A 的中心部位开孔，使活塞 B 与中心孔滑配合，并使基体面与活塞端面处于同一平面后，按所选工艺进行喷涂。然后在万能材料试验机上，从下面支撑基体 A，垂直向下拉活塞 B，将喷涂层拉断。喷涂层结合强度可按下式计算，即

$$\sigma_b = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (10.1)$$

式中  $\sigma_b$  ——喷涂层的结合强度，MPa；

$P$  ——喷涂层被拉断时的外加载荷，N；

$d$  ——活塞的直径，mm。

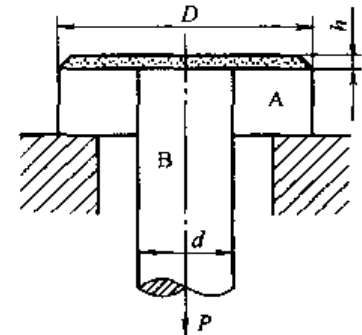


图 10.1 喷涂层结合强度拉伸试验

这种试验方法即使活塞与基体的配合精度很高，在两者的平面间也会形成桥状涂层，而且应力集中在该部位。在低载荷情况下，这个部位就成为断裂中心。因此，采用此种方法得出的测定值是偏低的。另外，涂层较薄时，会从活塞外周边缘间涂层内的上方产生剪切性断裂，致使不能完成结合强度试验。

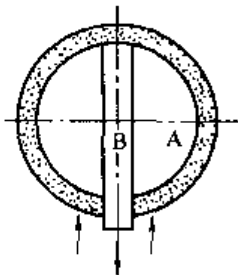


图 10.2 圆柱表面结合强度拉伸试验

如测试圆柱表面的喷层结合强度，可在圆柱基体 A 上开孔，使活塞 B 通过，并使活塞的上表面曲率与圆柱基体曲率形成同一曲面，装好后即可喷涂，如图 10.2 所示。其计算方法与平面喷涂层结合强度拉伸试验相同。

另一种是采用黏结剂的方法。图 10.3 所示为采用黏结剂的结合强度拉伸试验测试原理。在圆柱形试样 A 的端面进行粗糙处理，并进行喷涂，制成试验所要求的涂层。再将此涂层面同尺寸的圆柱试样 B 的端面用高强度黏结剂粘接起来，做成试样。粘接时应按所选用的胶、根据指定的胶接工艺粘牢。将试样在万能试验机上拉断，用试样断面积除断裂时的载荷，即可得到结合强度。

采用这种试验方法测定喷涂层结合强度时，要求涂层厚度在 0.25mm 以上，且必须使整个试样表面的涂层是均匀的。为了达到上述要求，在试样喷涂时，可将涂层喷至 0.8mm，再加工至 0.5mm 左右，然后与试样 B 粘接在一起。

这种试验方法的精确度不高。当试样尺寸变化时，即使其他因素不变，试验结果也是不同的。一般的规律是随试样直径的增大，其结合强度的测定值也增大。因此，在做同

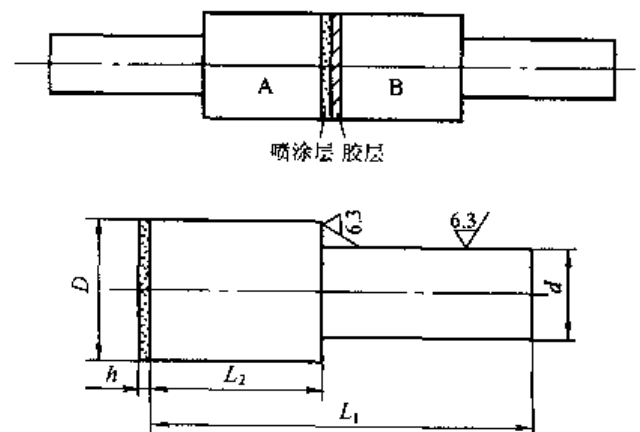


图 10.3 采用黏结剂的结合强度拉伸试验

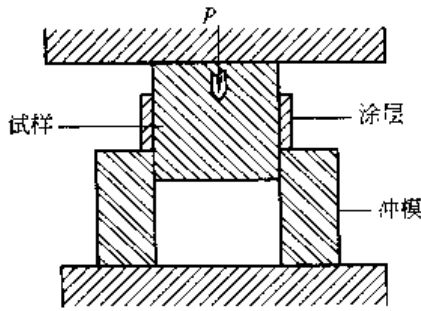


图 10.4 喷涂层结合强度的剪切试验

一批试验时，试样尺寸不宜变动，直径一般采用 10~40mm。这种试验方法简便易行，但不适用于其涂层结合强度高于黏结剂强度的情况。

### 2) 剪切试验方法

喷涂层结合强度的剪切试验如图 10.4 所示。在万能试验机上加载时，要做到无冲击缓慢加载（加载速度约为 4mm/min），直至涂层环被剪切掉时，读取剪掉涂层环时的最大压力。其涂层的抗剪结合强度为

$$\sigma_{\tau} = \frac{P}{\pi DS} \quad (10.2)$$

式中  $\sigma_{\tau}$  ——喷涂层剪切结合强度，MPa；

$P$  ——涂层剪切时的最大剪切力，N；

$D$  ——试样喷涂前的直径，mm；

$S$  ——试验涂层环的宽度，mm。

测定圆柱形工件表面喷涂层强度时，剪切试样和喷涂层尺寸如图 10.5 所示。在试样的喷涂层上，开有一个平行于轴线方向的槽，以起到释放喷涂层在冷却时所产生的收缩应力的作用。冲模材料可用中碳钢或高碳钢，热处理后的硬度最好能达到 60~62HRC。冲模的尺寸见图 10.6。

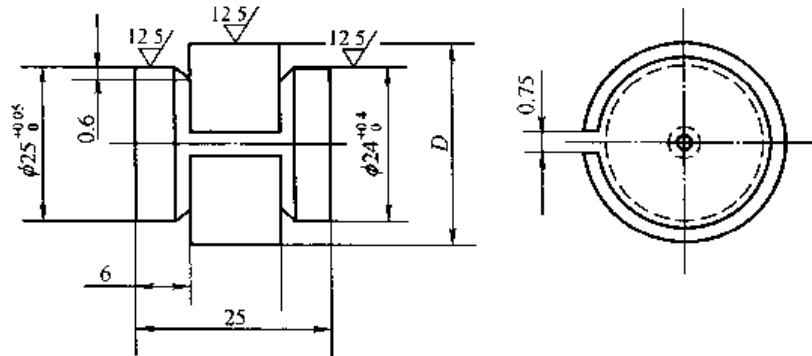


图 10.5 圆柱形试样和喷涂层尺寸

喷涂层的剪切结合强度比拉伸结合强度要高得多，一般情况下，剪切结合强度是拉伸结合强度的 2~2.5 倍。

### (2) 涂层的自身结合强度

涂层的自身结合强度是指涂层材料粒子之间的结合强度。涂层自身强度在平行涂层方向和垂直涂层方向上差别很大。

#### 1) 平行于涂层方向的喷涂层自身强度

试样装配如图 10.7 所示。推荐的试样尺寸及拉伸速度见表 10.1。

试样表面制备好后，在其结合面两侧喷涂，涂层厚度大于 1.2mm，宽为 50mm 以上。将涂层外表面精车削至涂层厚度为 1mm。然后在万能试验机上进行无冲击缓慢加载，直至试样被拉断。

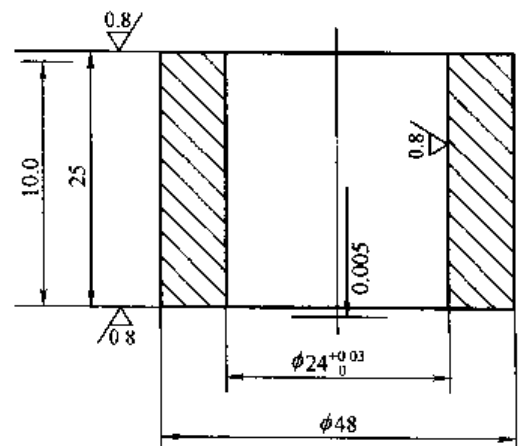


图 10.6 冲模的尺寸

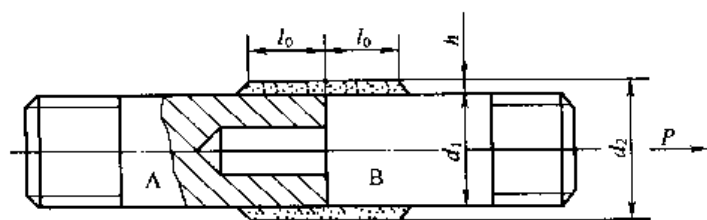


图 10.7 平行于涂层方向的喷涂层自身强度试验

表 10.1 推荐的试样尺寸及拉伸速度

试样尺寸/mm			拉伸速度/mm·min <sup>-1</sup>
d <sub>1</sub>	h		
	喷涂后	车削后	4
φ20	>1.2	1.0	
			>4h

喷涂层自身强度的计算公式为

$$\sigma_b = \frac{4P}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \quad (10.3)$$

式中  $\sigma_b$  ——喷涂层自身的抗拉强度，MPa；

$P$  ——试样被拉断时的最大载荷，N；

$d_1$  ——试样喷涂前的直径，mm；

$d_2$  ——试样喷涂后的直径，mm。

### 2) 垂直于涂层方向的喷涂层自身强度

垂直于涂层方向的喷涂层自身强度的测试试验方法见图 10.8。在合适的基体上制成低熔点的焊锡薄膜，用喷砂法对该膜表面做粗糙处理，然后在表面喷涂待测试涂层，再把焊锡熔化取下涂层，按图 10.8 所示粘接在两个拉杆端面之间，在万能试验机上进行拉伸试验。根据拉断时的拉力值和喷涂层的断面积，可计算出喷涂层自身强度。

### (3) 弯曲试验和杯突试验

在生产现场往往需要简单易行的方法判断涂层与基体的结合情况，常用的有弯曲试验、杯突试验和偏车削定性试验。这些试验都属于定性的测试方法。

#### 1) 弯曲试验

弯曲试验可以采用厚度为 1~1.5mm 的 60mm×100mm 普通钢材做成试样，在平面上喷涂约 0.3mm 的涂层。然后将试样在两支点的中心处加压进行弯曲，

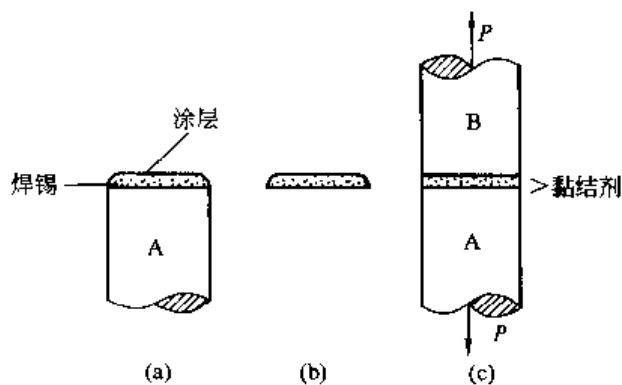


图 10.8 垂直于涂层方向的喷涂层自身强度试验方法

比较开始发生龟裂的弯曲角度。试样弯曲试验如图 10.9 所示。喷涂层结合强度弯曲试验也可以采用曲率半径为 10mm 的模具，缓慢地将试样弯曲成直角（见图 10.10），观察弯曲后涂层开裂情况。如喷涂层发生开裂而不与基体分离者为结合良好；如有喷涂层剥离现象，则为结合较差。

#### 2) 杯突试验

杯突试验也称球面凹坑试验。在厚度为 1.3~1.5mm、截面积 75mm×44mm 的普通碳

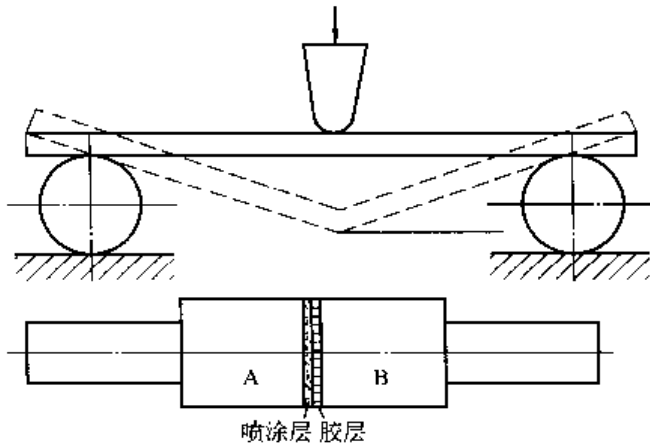


图 10.9 试样弯曲试验

薄，否则即使是不良状态，从涂层表面也难看出破损的痕迹，容易造成错误的判断。

涂层的破坏情况与材料的性质有很大关系，硬而脆的材料往往容易产生龟裂。

### 3) 偏车削试验

先将试样制成  $\phi 60\text{mm} \times 150\text{mm}$  圆棒。经预处理后的试样夹在车床的夹头或专用夹具上，按要求喷涂涂层，涂层厚度为 1mm。

将试样偏心夹于车床上，偏心量  $e$  约为 1mm，如图 10.11 所示。用专门的车刀车去涂层，使其在某一部位裸露基体为止，观察涂层与基体的结合情况。

用肉眼或低倍放大镜观察从基体至涂层的变化情况，主要是观察基体与涂层交界处是否呈光滑过渡，是否有起皮或崩离现象，以此来说明涂层与基体的结合质量。因为在偏车削时，涂层所受的冲击切削力，一边是顺刀，一边是逆刀；在过渡处涂层极薄，如果涂层结合较差，逆刀一边的涂层就容易翘起面产生起皮现象。如果涂层内聚强度较低，可能产生崩离现象。

应特别注意的是，偏车削喷涂层时，车刀一定要锋利，否则影响试验的准确性。因为涂层的内聚强度以及涂层与基体的结合强度是有限的，车刀不锋利很容易造成起皮和崩离。对

硬度较高的涂层不能进行车削时，可在磨床上采用偏心磨来进行试验。

#### 10.1.2.2 表面层硬度

喷涂层是一种非均质结构，由喷涂材料、氧化物和孔隙组成。

喷涂层的硬度分宏观硬度与显微硬度两种。喷涂层宏观硬度值并不真实地表示喷涂层硬度，而是对给定材料喷涂层质量的一般表示。喷涂层的宏观硬度值比相同材料的铸造或锻造部件都要低一些。在考察喷涂作业中，经常用获得最硬的涂层来确定最佳的工艺条件，而在喷涂金属材料的情况下，高硬度的涂层则表示涂层含有较多的氧化物。

#### (1) 试样制备

钢板试样上喷涂，涂层厚度为 0.1 ~ 0.15mm，然后将试样放置在杯突试验机上进行试验。试样的喷涂层面朝上，用预压环压住，预压力为 100MPa。然后由液压系统把直径为 20mm 的钢环从涂层背面以 10mm/min 的速度，将喷涂层压凹到 7.6mm 的深度，使喷涂层突起如杯状。

根据变形后的涂层状态，如龟裂情况，可以选定喷涂条件或确定作业情况和涂层性质。制备试样时，应注意不要使涂层太

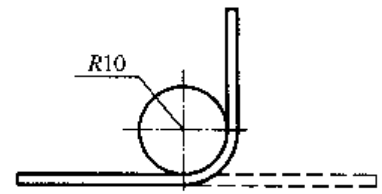


图 10.10 喷涂层结合强度弯曲试验

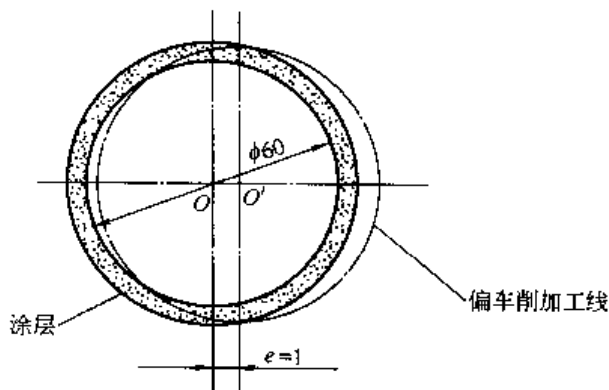


图 10.11 偏车削试验示意

根据喷涂工艺要求，以接近零件的喷涂状态，先喷涂测试硬度的试样。试样的具体尺寸没有严格的限制，也可用 80mm×30mm×18mm 长条形或 φ80mm×18mm 圆柱形。

试样表面预处理后，按要求喷涂涂层，涂层厚度为 2mm 以上。测量涂层硬度的表面必须是平面，而且这个面还必须保持和用于支撑试样的硬度机砧座平面平行。同时，在测量硬度前还要对要测定硬度的涂层表面进行制备，如用砂纸轻轻地将涂层表面打磨。注意在打磨过程中用力不要过大，防止磨粒嵌入涂层中，导致测出的涂层硬度失真。在试样制备过程中还应注意不要因操作不当导致涂层出现热裂。

## (2) 试验方法

选择硬度机时，一方面要考虑喷涂层的软硬程度，另一方面还要考虑喷涂层的厚度，切忌将基体的硬度反应到喷涂层中。一般喷涂层硬度的测定较多采用布氏硬度计，而喷焊层或等离子弧粉末喷涂层也可以采用洛氏硬度计。为了准确读数，喷涂层厚度应当为硬度计压痕深度的 10 倍。如果喷涂层厚度不够，需改用表面硬度计进行测定，然后换算成常用硬度值。

在标准洛氏硬度机上试验时，根据被测涂层特性，选择合适的钢球和刻度表。更换钢球时，第一次测定硬度的读数去除，以防因钢球未安装合适而造成读数不准确。然后将试样平稳地放于砧座上，以适当方式施加小负荷，时间控制在 10s 内，并校正刻度表尺指零位。然后放开操纵杆施加主负荷，15s 后除去主负荷，并读出刻度表的硬度值。

如果是圆柱形试样时，要把测试硬度的表面磨平，使其与硬度机砧座平面平行。测试点应在涂层表面中心线上均匀分布，并避开缺陷。测量点数不应少于 5 个，最后取其平均数为该涂层的硬度值。

喷涂层具有多相结构，因此不能将喷涂层的宏观硬度与一般金属材料的宏观硬度值做对比。由于宏观硬度不能反应喷涂层的性能，可用标准的显微硬度计测定。喷涂层内的各主要组分，如基体和主要的硬质相，都要测其显微硬度。特别是硬质相的硬度，对分析喷涂层的耐磨性起着重要作用。

### 10.1.3 涂层的耐磨、耐蚀性试验

#### (1) 耐磨性

热喷涂和喷焊技术能提高基体材料表面的抗磨损性。与同类材料的铸造或锻造结构相比，喷涂层具有较高的耐磨性。

喷涂层的孔隙可以储存润滑油，可以提高涂层在润滑不足条件下的耐磨性。喷焊层合金粉未经重熔后组织致密，储油性较差。在滑动摩擦副中遇到润滑不足的情况，喷焊层的耐磨性不明显，但具有优良的抗磨粒磨损性能。喷焊层的耐磨粒磨损性能见表 10.2。

表 10.2 喷焊层的耐磨粒磨损性能

试样种类	平均硬度 HRC	绝对磨损量/g	相对磨损量	相对耐磨性	备注
35CrMo 850~860℃油淬 180~200℃回火	63.9	2.945	—	—	—
		3.005 0			
		3.292 5			
粉 301 喷焊	46.7~50.5	0.759 5	0.262	4.27	喷焊层磨穿
		0.684 0			
		0.983 0			
粉 102 铁喷焊	25.7~62	0.309 5	0.098	10.20	喷焊层磨穿约 1mm <sup>2</sup>
		0.239 0			
		0.362 5			

与宏观硬度值相同的淬火锅相比较，喷焊合金有很高的耐磨粒磨损性能。原因在于喷焊合金基体上弥散分布了许多硬质相，在磨粒作用于零件时，这些硬质相可以保护喷焊层基体，使喷焊合金不致快速磨损。

喷焊合金的基体组织为韧性较好的铬-镍奥氏体，喷焊层与基体之间的结合强度高。因此，喷焊合金的耐冲刷式磨粒磨损性能优良。

热喷涂技术广泛用于表面耐磨强化处理，取得了较好的效果。但在新产品投产前，通常都要进行喷涂层的耐磨性试验，作为选择喷涂层材料和热喷涂工艺的依据。

#### 1) 试验方法

喷涂层的耐磨性试验分为三类：试样试验、台架试验和使用性试验。

① 试样试验 将热喷涂试样在专用试验机上进行试验。这种试验方法周期短，影响因素容易控制，试验条件可以在较宽的范围内选择，在短时间内可以进行较多试样和较多参数的试验，试验数据的重复性和可比性好。但试验条件与实际工作条件有差别，如试验机选择不适当，差别就变得更大了，以致最后的试验结果不能说明喷涂层的耐磨性能。

② 台架试验 为了缩短试验周期，强化实际使用条件，台架试验在试样试验的基础上，选出较佳的喷涂层材料和喷涂工艺，制成工件装在机器上，模拟实际的使用条件而进行试验。这种试验方法的测定结果能够比较准确地说明所选喷涂层材料和工艺的优劣。

③ 使用性试验 在上述两种试验的基础上，再进行实物使用性试验，即运行考核。这种试验方法具有较好的真实性和可靠性，但试验周期长。有的耐磨涂层试验周期需要1年以上，而且该试验需要特殊的测量工具和仪器，消耗大量的人力和物力，费用较高。此外，试验结果是多因素综合影响造成的，难以进行单因素的考察，不易分析产生问题的原因。

#### 2) 常用的典型试验机

测定喷涂层耐磨性的试验机种类很多，有快速磨损试验机、磨料磨损试验机、腐蚀磨损试验机、接触疲劳磨损试验机、高速高温磨损试验机、冲刷磨损试验机和真空摩擦磨损试验机等。

① M-200型磨损试验机 将各种金属粉和非金属粉末喷涂制成的试样，在滑动摩擦、滚动摩擦、滑动滚动复合摩擦和间歇接触摩擦各种状态下进行耐磨性试验。然后以试样的失重进行耐磨性评定。试验机可模拟一些工作条件，并带有测量装置，同时，可测定喷涂层的摩擦系数及摩擦力所作的功。

② 销盘式磨料磨损试验机 将砂纸或砂布装在圆盘上，作为试验机的磨料。喷涂层试样做成销钉式，在一定的负荷下压在砂纸上。圆盘转动，试样沿圆盘的径向做直线运动。经过一定的摩擦行程后，根据测定喷涂层试样的失重来评定其磨损性。试验结果可作为确定热喷涂材料和工艺的依据。

③ 橡胶轮磨料磨损试验机 将方块形试样与橡胶磨轮接触。将磨料流入接触处，受橡胶轮的挤压，磨料与试样之间产生磨料磨损。在一定的负载下，经过一定的摩擦行程后，测定喷涂试样的失重评定喷涂层的耐磨性。

在实际工作中，有时工件的使用条件非常特殊，通用试验机不能满足其耐磨性评定要求，此时最好模拟工件的使用条件，自行设计专用的磨损试验机。

#### (2) 耐蚀性

在摩擦过程中，金属表面同时与各种气体、酸、碱、盐等腐蚀介质发生化学或电化学反应而引起破坏，导致零部件出现严重腐蚀。其中化学腐蚀是金属与介质发生化学反应而引起

的损坏，其腐蚀产物是在金属表面形成表面膜。如果该表面膜致密、完整，强度和塑、韧性好，线膨胀系数与金属近似，膜与金属的黏着力强，则表面膜就能对金属提供有效的保护作用。铝、铬、锌、硅等元素在金属表面能生成这样的氧化膜，可以缓解金属的腐蚀。

电化学腐蚀是金属与电解质溶液相接触时，由于形成原电池而使其中电位较低的部分遭受腐蚀，如金属在潮湿大气中的大气腐蚀、不同金属接触处的电偶腐蚀等均属于电化学腐蚀。钴基合金、镍基合金、奥氏体不锈钢、铝青铜等涂层，在封孔处理之后，都具有不同程度的抗大气腐蚀性能。实用中，应根据特定环境选择适当的合金材料涂层。

当液体相对于金属表面高速运动时，表面不断产生气穴，随后在气穴消失过程中，液体对金属表面产生强烈的冲击力，如此反复作用，再加上液体介质的腐蚀作用，就造成了金属表面的汽蚀破坏。水轮机转于叶片、船舶螺旋桨、水泵等常常发生汽蚀现象。汽蚀的形成原因复杂，既有冲击磨损、磨料磨损又有腐蚀问题，因此宜选用既有较好抗腐蚀性、又有较高强度和韧性的喷涂合金。

在热喷涂层中有相当一部分是针对耐腐蚀要求而设计的，其中多数是用于保护钢铁材料。为了评定涂层的耐腐蚀性能，除了工况使用考核外，进行试验室的腐蚀试验和户外的曝晒试验是对涂层进行耐腐蚀性能评定的必要方法，为涂层设计和使用效果预测提供有利依据。

由于涂层的多孔性或由于使用中的损伤，造成涂层或多或少地不能完全覆盖基体，因此在进行涂层耐腐蚀试验时要考虑涂层材料和基体间的电化学反应问题，从而选择合适的试验方法和试样处理工艺。

按腐蚀试验类型可分为常规性试验和特殊的加速腐蚀试验。按试验方法可分为标准方法和非标准方法。常规性耐腐蚀试验主要有以下几种。

#### 1) 盐雾试验

中性盐雾试验是一种规范的国际通用标准试验，按 ISO 3768 标准规定的方法进行。该方法规定了一种标准化的试验程序，从试样制备处理方法、试验过程一直到结果评定均按规定进行。

将试样或试件按标准规定的要求进行试验前处理，包括表面清洗、试样封样等，并对试样尺寸、外观等作好记录。然后按一定的排布方法放置于标准试验箱中，盖好箱盖，启动机器，此时箱中喷头会将中性盐水溶液雾化并按一定的角度及流量定时喷出，使箱中充满盐雾。

试验过程是以一定的试验时间为周期。根据要求，试验过程要经过若干周期的试验。试验后对试样进行处理和评级。这类试验方法主要用作耐蚀性对比或评判。与盐雾试验相类似的还有醋酸盐雾试验和铜加速醋酸盐雾试验。

#### 2) 湿热试验

在试验箱中保持一定的湿度（相对湿度）和温度，以一定试验时间为周期，对涂层试样进行湿热试验。该试验是模拟自然大气环境，在储藏运输等过程中的腐蚀。通过本试验可以评定在人为模拟的某种温度和湿度下（或周期变化状态下）涂层的抗腐蚀性能。

#### 3) 二氧化硫标准试验

城市或工业大气环境下的主要腐蚀，是由于产业部门向大气中排放二氧化硫（SO<sub>2</sub>）造成的，所以模拟 SO<sub>2</sub> 的腐蚀试验是一种常用的标准化试验。一般采用 750mm×500mm×750mm 的试验箱，斜顶结构，相对湿度可以调节，温度可以恒定。试样放置后，由泵送入



SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>等气体，温度恒定(40±2)℃，在相对湿度100%RH的SO<sub>2</sub>气氛中保持8h，然后放出SO<sub>2</sub>气体，定温条件下保持16h，如此24h为一个试验循环周期。另外一种方法是温度恒定(25±2)℃，相对湿度95%RH，通SO<sub>2</sub>气氛(含SO<sub>2</sub>量在5%~20%)，以24h为一周期。试验后对涂层耐SO<sub>2</sub>腐蚀性能进行评定。

#### 4) 浸泡腐蚀试验

从浸泡方式可分为全浸试验、半浸试验和间浸试验。根据试验要求，配制好试验溶液，并恒定溶液温度，将试样封好，进行一定周期的浸泡。

上述常规性试验的结果一般按失重法测定腐蚀速度，也可按形貌评定其腐蚀等级。失重法是按试验前后试样质量的变化，按涂层密度计算出的数值来表征腐蚀量。形貌评定是按照标准的图谱，用网格面积分布法评定级别。

除以上试验外，为评定涂层的耐蚀性能，还可进行一些专门的试验，如电化学试验、应力腐蚀试验、疲劳腐蚀试验等。

#### 10.1.4 涂层的高温性能试验

金属工件在高温下工作，可能引起氧化或起皮，组织因回火或相变而软化，高温条件下长期工作而产生蠕变破坏，承受反复加热或冷却而导致热疲劳破坏等。因此，在高温下工作的喷涂层必须具有抗氧化性、隔热性、热硬性、抗热震性、抗高温磨损和耐高温腐蚀等性能。

工件表面的磨损现象比较复杂，对同一种工作条件往往存在多种磨损形式。如轧辊、热锻模等在工作过程中不仅受热疲劳作用，而且还承受磨料磨损、氧化磨损和冲击磨损等；高、中压阀门密封面，在不同条件下可能承受磨料磨损、黏着磨损、腐蚀磨损等多种磨损形式。所以，必须具体情况具体分析，并找出起主要作用的磨损类型，作为选取喷涂合金的重要依据。

在拉伸负载或弯曲运动条件下，不推荐采用喷涂层。因为在这种工作条件下，喷涂层的结构及其对裂纹传播的敏感性，容易导致破裂。

##### (1) 抗氧化性试验

涂层抗高温空气氧化性能，包括涂层材料本身实际抗氧化性能和涂层保护基体免受高温氧化损坏的性能。后者是因为涂层有贯穿性的气孔，对基体的保护能力除了取决于涂层材料外，还取决于涂层厚度及涂层中的孔隙情况。

为了精确测定涂层本身的抗氧化性能，可将从基体材料上剥离下的涂层作为试样，清理干净并称量后放入已加温的炉内，保温1~2h。然后将试样从炉中取出，在室温下冷却并称量。重复上述试验达到足够长的时间，得出试样质量随试验时间的变化曲线，并目视检查涂层的氧化情况。

为了测定涂层对基体高温氧化的保护性能，用基体材料制成试棒或平板试样。在试样表面喷涂设计厚度的涂层，并称量喷涂好的试样，精确到10mg。将试样放置到已加温的空气炉内(炉温度为1000℃或1300℃)，定期观察炉内试样的状态。如果在24h内涂层损坏，记录其结果并结束试验。如果在24h后涂层未损坏，将试样从炉内取出，在室温下自然冷却。如冷却后涂层仍是完好的，将试样称重后，再放入炉内并重复上述试验，理想的情况可反复试验几星期。

试验后将试样切开检查基体材料的氧化情况。对于平板试样，首先遭到破坏的是平板边缘上的涂层，试验结果对边缘涂层抗氧化保护效果可作出评定，以确定在实际环境下涂层的

可用性。

### (2) 隔热试验

试验目的是评定涂层的隔热效果。试验涉及一套专门的试验装置，其中包括：对试样加热的热源装置；对试样加热的热流量测定装置；试样的温度测定、自动记录装置以及试样的移动机构等。可采用等离子喷枪或氧-乙炔火焰喷枪产生的高温火焰作为加热热源，将试样放在离喷嘴 50~100mm 处，试样可与火焰中心垂直，也可成 40°。试验过程中保持操作条件恒定和定时检测热流量。

试样温度变化的检测，是在试样的背面点焊（或紧接放置）一个带底座的热电偶，温度可以在毫伏计上连续记录并绘制曲线。火焰对试样加热过程中，测定试样温度随时间变化曲线，一旦达到平衡状态，即停止试验，一般大约需要 5min。通过比较试样温度随时间变化的曲线来评定涂层的隔热性能。

### (3) 热寿命试验

热寿命试验可与隔热试验结合进行。试验前先称量试样，测定试样在火焰的热冲击下，涂层被烧穿所需的时间，或试验一定的时间，测定试验后试样质量和厚度的变化用以评定不同涂层的耐热性能。

为了减小试验开始时的热冲击影响，开始试验时加大试样与喷嘴的距离，然后慢慢减小到规定的距离。

### (4) 抗热震试验

抗热震试验也称为热循环应力试验，是测定涂层在反复加热、冷却状态下，涂层抗热应力剥离的能力。试验时将试样按规定的时间暴露在火焰中，或放置在已加热的炉内，然后自然冷却或用空气吹冷，反复试验直至试样损坏为止。记录循环时间、循环次数和试样损坏情况，以评定喷涂层的抗热震性能。

## 10.1.5 涂层的气孔率和透气性

### (1) 气孔率的测定

含有气孔的喷涂层的密度  $\rho$ ，显然比喷涂材料的实际密度  $\rho_z$  要低。则气孔率  $p$  可表示为

$$p = (1 - \rho / \rho_z) \times 100\% \quad (10.4)$$

测试气孔率一般有以下几种方法。

#### 1) 浮力法

将喷涂层从基体上取下，在 110°C 下干燥 2h，在其表面薄薄地涂上一层凡士林。再用细金属丝吊起来，测定涂层在空气中及在蒸馏水中的质量。涂层的气孔率  $p$  可表示为

$$p = \left( 1 - \frac{w_z / \rho_z}{\frac{w - w'}{\rho_w} - \frac{w_0 - w_v}{\rho_0} - \frac{w_v}{\rho_v}} \right) \times 100\% \quad (10.5)$$

式中  $\rho_z$  —— 喷涂层材料的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_w$  —— 蒸馏水的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_0$  —— 金属丝的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_v$  —— 凡士林的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$w_z$  —— 喷涂层在空气中的质量，kg；

$w_0$  —— 浸入蒸馏水部分的金属丝质量，kg；

- $w_1$ — 喷涂层表面凡士林的质量, kg;
- $w$ — 喷涂层和金属丝及凡士林在空气中的总质量, kg;
- $w'$ ——用金属丝吊挂着的涂有凡士林的涂层在蒸馏水中的质量, kg。

### 2) 直接称量法

直接称量法所用的试样如图 10.12 所示。试样中推荐的尺寸见表 10.3。在规定的圆柱形坯料凹下部分进行喷涂后, 把多余部分磨去, 精加工使其成圆柱形。根据圆柱基体原尺寸可知涂层的体积, 准确地称量磨削后的圆柱质量, 即可求出喷涂层的质量, 从而计算出喷涂层的密度  $\rho$ 。根据涂层材料的密度  $\rho_2$ , 进而求出气孔率  $p$ 。

表 10.3 试样中推荐的尺寸/mm

D	d	$L_1$	$L_2$
$\phi 25$	$\phi 22$	64	50

这种方法是以前喷涂材料的密度为标准进行计算的。实际上, 由于喷涂层中存在着氧化物, 而氧化物的密度与喷涂材料的密度是不同的, 因此, 用这种方法测得的气孔率是存在误差的。

### 3) 渗透液体分称量法

该方法是测定从基体上剥下来的涂层试样的质量以后, 再将试样浸入甲苯中沸腾 1h, 然后测量试样在甲苯浸透涂层孔隙后的质量, 就可计算出涂层的气孔率。

### 4) 金相法

在显微镜下观察喷涂层磨片上的气孔, 用定量金相技术, 可求出气孔所占面积, 从而推算出气孔率。

### (2) 透气性的测定

透气性是气体通过喷涂层内的一种性质。对于耐蚀、耐热涂层, 喷涂层的透气性是一个极为重要的性质。测定喷涂层透气性试验装置如图 10.13 所示。

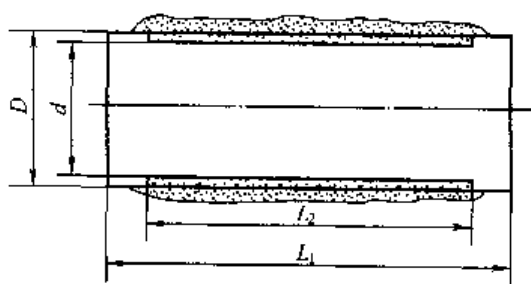


图 10.12 直接称量法测定喷涂层气孔率用试样

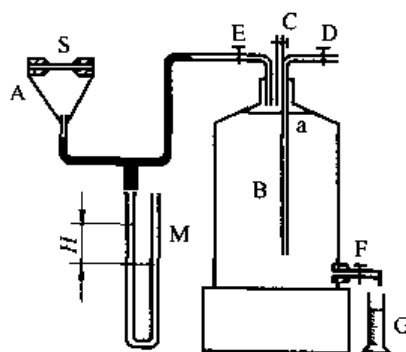


图 10.13 透气性的测定装置

把从基体上取下来的喷涂层试样 S 置于接受台 A 上, 并用石蜡将其粘接封住, 使其不漏气。此时需注意石蜡不能粘到有效透气面积 S 上。打开阀门 C, 使水从阀门 D 中注入容器 B, 到达标线 a 处。再将阀门 C、D 关闭, 打开阀门 E、F, 使容器内的水流出。这样, 容器内的压力在大气压以下, 空气就会通过试样 S 的气孔流入。这时调节阀门的开关, 使压力计 M 的水位差  $H$  保持一定, 也就是使空气流入状态稳定。这样便可根据从阀门 F 流进量筒 G 的水, 测出流出  $W$  体积水所需要的时间  $T$ 。若试样厚度为  $L$ , 则透气率  $p$  可用下式求

出, 即

$$p = \frac{LW}{SHT} \quad (10.6)$$

式中  $p$  — 透气率,  $m^3/s$ ;

$L$  — 试样厚度,  $m$ ;

$W$  — 流出水的体积,  $m^3$ ;

$S$  — 试样的有效透气面积,  $m^2$ ;

$H$  — 水位差,  $m$ ;

$T$  — 流出  $W$  体积水所需要的时间,  $s$ 。

测定时应注意: 涂层如果受潮, 则透气性降低。另外, 必须使容器内的水量保持一定。

### 10.1.6 涂层的其他性能测定

#### (1) 物理性能

① 热膨胀系数是喷涂层的重要物理性能, 涂层和基体的热膨胀系数之差对涂层的结合强度、抗热震性能和涂层中的残余应力有重要影响。

② 比热容是物质的一个基本热力学参数。准确地测定涂层的比热容, 特别是高温下使用的涂层, 对于涂层中系统设计具有相当重要的参考价值。

③ 热导率是表示材料传热好坏的一个性能, 是高温绝热涂层系统设计的重要依据。

喷涂层的热膨胀系数、比热容和热导率等物理性能的测试, 需要专门的测量仪器来完成。但是在制备喷涂试样时, 既要考虑测试仪器的要求, 又要考虑涂层材料和工艺等方面的特点。

#### (2) 厚度

喷涂层的厚度是喷涂时必须控制的一个参数。涂层太薄, 不能满足使用要求, 或没有必要的加工余量; 涂层太厚, 不仅浪费材料、喷涂工时和加工工时, 而且在涂层中还会引起应力, 严重削弱涂层与基体的结合强度, 甚至从基体上剥落下来。

现有的测量厚度仪器只能在静止状态下测量。涂层厚度可用机械量具测定, 在无法使用机械量具时, 可用磁性测厚仪和涡测厚仪等。涂层厚度也可从金相磨片上确定。

#### (3) 金相检测

制备喷涂层金相观测所需要的试样时需要注意防止涂层粒子脱落下来。金相观测内容主要有以下方面。

① 氧化物 在显微镜下观察氧化物的夹杂状态, 其含量是否过多。观察其他夹杂物的尺寸和含量, 如喷涂层与基体界面上经常有氧化物和污垢, 会使喷涂层与基体分离, 降低结合强度。

② 聚缩 重熔时合金粉熔融后不能均匀地润湿基体表面而是聚缩成球, 主要是由于基体表面或合金粉氧化严重, 超过了自熔剂的脱氧能力, 氧化层将合金与基体表面隔开, 液态合金在表面张力的作用下聚缩所致。如发现产生聚缩的喷涂层, 则作为废品处理, 必须除去进行重熔。

③ 喷涂层剥落 喷涂层剥落是由于喷涂层与基体结合不良而引起的。如发现剥落, 必须将喷涂层除去, 重新清理工件表面, 再进行补喷。

④ 气孔和夹渣 气孔是在工件准备不当、合金粉含氧量过高、乙炔中含有水分以及重熔时火焰吹力过大等情况下产生的。夹渣是因合金粉末质量不好, 例如熔点高、黏度大、脱

氧能力不足以及粉内含有杂质等问题而产生的。另外，重熔时火焰移动速度过快，熔渣难以充分浮出，亦会引起夹渣。

气孔或夹渣均会使喷涂质量下降，直接影响到工件的耐磨、耐腐蚀等性能。还会引起应力集中，影响工件的强度。气孔和夹渣根据工件的工作条件确定是否报废。对于有耐磨要求的工件，涂层在  $1\text{cm}^2$  的面积内直径小于  $0.04\text{mm}$  的气孔或夹渣不得多于 5 个。

⑤ 裂纹 裂纹引起的原因很多。裂纹在热喷涂层中不允许存在的，一旦发现，必须重新喷涂。防止裂纹产生，必须严格遵守工件喷涂的工艺要求。

## 10.2 热喷涂层的应用

### 10.2.1 耐磨涂层的应用

#### (1) 在机床导轨上的应用

机床导轨是整个机床的装配基础，其耐磨性及尺寸精度是影响机床使用寿命和保持精度的主要因素之一。由于机床导轨用铸铁制造，其硬度和耐磨性都比较低，导轨在不断的往复滑动摩擦过程中，磨损较快，一般 3~5 年就需大修，因此在机床修理工作量中，导轨修理约占 50%~90%。

为了提高机床导轨的耐磨性能，从材料方面研究了比普通铸铁耐磨性能更高的磷铜钛铸铁、钒钛铸铁和高磷铸铁；从热处理方面采用了接触电阻淬火和感应淬火，后来又发展了低摩擦系数的塑料导轨。但是上述措施对于局部磨损而需要修复其原有的精度是不适用的。而采用氧-乙炔线材喷涂工艺，先喷钼打底层，再喷涂 T8 钢或铬钢制成涂层导轨。这种方法不仅能够修复局部磨损和严重划伤的部位，而且还可以作为一种提高耐磨性的重要措施之一。

涂层导轨表面是由无数微粒质点组成的，微粒之间存在一定的孔隙度，在实际使用过程中，涂层导轨表面的孔隙有利于润滑油的储存，特别在导轨副润滑条件差、失油现象严重和滑动摩擦的情况下，涂层导轨孔隙的含油性能更显示出它的优越性。由于油膜始终存在于摩擦副之间，所以抗黏附性能很好。此外，导轨副之间的接触是若干点的接触，其粒度范围在  $4\sim 40\mu\text{m}$  之间，颗粒显微硬度可达 60HRC 左右。涂层导轨这一特性是提高导轨面耐磨性能的重要因素。

使用高碳钢制成的导轨涂层在各种型号的龙门刨床、铣床、车床等机床中得到了应用。经热喷涂后制成的高碳钢导轨涂层，在实际使用一个大修周期后，测得靠车头一段仅磨损  $0.03\text{mm}$ 。

机床喷涂导轨具有很好的抗滑动磨损性能，能长期保持机床的精度，磨损量很小，从而大大延长了机床的大修周期，涂层导轨使用寿命比一般铸铁导轨提高 1~2 倍，甚至更高。因此推广应用涂层导轨工艺，必将在机床制造业和机床维修业中取得明显的技术经济效果。

#### (2) 在活塞环上的应用

随着柴油机的高速强化发展而出现的活塞环黏着磨损也越来越严重，直接影响发动机运转的可靠性和寿命的要求。为此对活塞环的防黏着磨损除了建立活塞环一整套设计参数外，又从表面的镀铬处理发展为采用等离子弧喷涂钼基合金涂层（即 65%~75% Mo+25%~35% Ni-Cr-B-Si），显示了这种涂层材料所具有的特性。

涂层材料中以高熔点的钼为基础，使得整个涂层可以承受瞬时摩擦高温而带来的热影响。涂层具有多孔性，有很好的储存润滑油效果。当处于临界润滑状态时，因摩擦高温致使孔隙中的润滑油膨胀，在毛细管作用下，润滑油沿孔隙外溢，从而起到了良好的润滑调节作

用。而且在一定的条件下，钼与油中的硫相互作用，生成硫化钼，为摩擦副提供了良好的减磨润滑介质。另外，孔隙中存油也起到了吸热作用，有利于向缸壁传导热量。涂层材料均能有效地抵御燃气及润滑中的腐蚀介质，其硬度对温度的变化不敏感。

活塞环涂层试验结果表明，活塞环在工作过程中磨损正常，与其匹配的缸套磨损低于和镀铬环匹配的缸套。涂层的这些特点提供了抗黏着磨损的可靠性。采用等离子弧喷涂的活塞环已应用于机车上，最长行程达  $40 \times 10^4 \text{ km}$ ，均没有发生过黏着现象。

### (3) 阀门密封面的应用

阀门是机械工业中用量大而广的主要基础部件之一。阀门在频繁的启闭过程中，其密封面受到擦伤，加上介质的腐蚀、冲刷及高温等因素的作用，而使阀门密封面过早的损坏，成为密封不严、发生泄漏的根源之一。采用等离子弧喷涂耐高温、耐蚀、耐磨的钴基合金粉末或耐热、耐磨的镍基合金粉末代替手工堆焊工艺，可使生产效率提高 1 倍多，生产费用降低 40%~50% 以上，使用寿命可延长数十倍。

### (4) 冷拔无缝管内模的应用

冷拔无缝钢管时，内模与钢管壁产生强烈的摩擦和挤压，使内模表面产生严重的黏着磨损、钢管内壁产生许多划痕，影响产品质量。严重时，这些钢管可能成为废品。如采用氧-乙炔喷涂工艺，在 45 钢冷拔无缝管内模基体表面喷涂镍基合金耐磨涂层，这种模具可拉拔无缝钢管 250 根左右，平均寿命提高 5~6 倍，最高提高近 10 倍。

### (5) 塑料挤出机螺杆上的应用

由于塑料工业的迅速发展，塑料品种增加，有的含有碳化钙玻璃纤维等，因面对生产塑料的挤出机设备提出了更高的要求。关键在于挤出机的螺杆和机筒表面的耐磨及耐蚀性。根据实际使用情况，采用了氧-乙炔喷焊自熔性合金粉末工艺，材料选用镍基合金粉末或加 WC 的镍基合金粉末 (WC 20%)。

镍基自熔性合金粉末喷焊层的金相组织通常在镍基固溶体中析出非常硬的硼化物 ( $\text{Ni}_3\text{B}$  和  $\text{CrB}$  等) 和碳化物 ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  等)，合金层由低摩擦系数的固溶体基体和高硬度的硬质点组成 (高达 2000HV 左右)，所以能够很好地抵抗螺杆的磨损。各类工艺表面处理后的磨损试验情况如图 10.14 所示。喷焊层与气体氮化层的硬度变化曲线如图 10.15 所示。

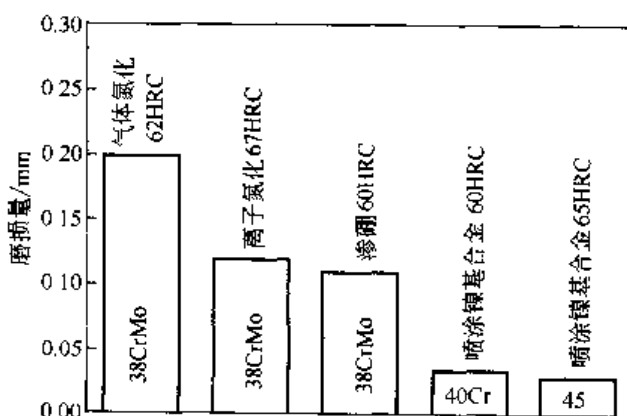


图 10.14 各类工艺表面处理后的磨损试验情况

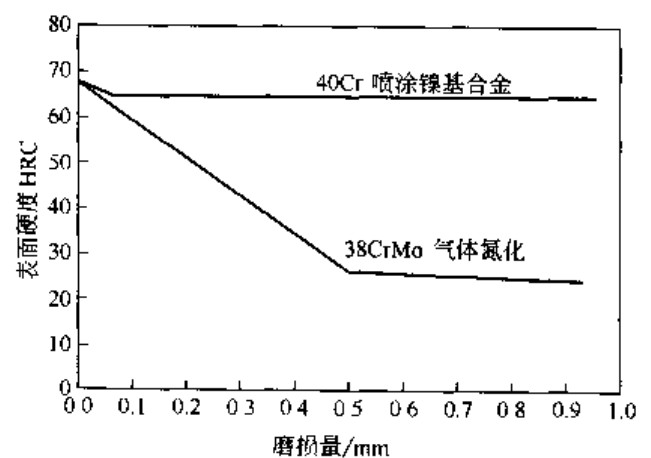


图 10.15 喷焊层与气体氮化层的硬度变化曲线

喷焊层的硬度并不随着磨损量的增加而降低，说明喷焊层表面硬度与其内层硬度均匀而稳定。而气体氮化层的硬度在磨损量达到 0.1mm 时，接近喷焊层硬度，但氮化层的硬度随

着磨损量的增加而急剧下降，所以从硬度的角度来看，喷焊层比氮化层耐磨。

#### (6) 在泥浆泵上的应用

活塞杆是泥浆泵的主要易损件之一，它在工作中除传递交变的轴向载荷外，还受着悬浮在泥浆液中的硅酸盐、石英砂磨粒的擦伤和泥浆液的化学腐蚀，这些磨粒硬度可达1200 HV，在高压、大流量的泥浆液携带下，磨料冲刷杆面，并挤入密封填料中与杆面发生严重摩擦，使杆面过早出现“拉槽”和磨损，甚至导致报废。

活塞杆平均使用寿命较短，导致停机维修频繁，影响了油田开发的速度。为了提高零件的耐磨性，应选用大于或近似于磨粒硬度的材料，以防止杆面的擦伤和早期磨损。而镍基自熔性合金粉末或含 WC 的自熔性合金粉末所形成的硬质喷焊层，则能满足上述要求。由于这些合金中含有较高的镍、铬元素，所以喷焊层也具有很好的抗化学腐蚀性能。

将经过喷焊含 WC 自熔性合金粉末的泥浆泵活塞杆与普通生产的活塞杆装机对比试验结果表明，使用寿命由原来平均 200h 延长到 1000h 左右，大大提高了活塞杆的使用寿命。试验时的泥浆泵压为 15~18MPa，最高冲击次数为 65 次/min，含砂量为 0.1%~0.5%。

#### (7) 犁铧上的应用

农用犁铧在耕地作业中受到泥沙的摩擦，是一种典型的低应力磨粒磨损易损件。如果采用常规的 65Mn 或 65SiMn 钢制造，磨损很严重，每年需消耗大量锰钢。而采用氧-乙炔火焰喷焊工艺，在犁铧工作刃口上喷焊一层 1.5~2mm 厚的镍基合金粉末或用等离子喷焊法喷上 2mm 厚的高铬铸铁型自熔性合金喷焊层，可显著提高耐泥沙磨损，提高使用寿命 3 倍左右。

#### (8) 其他应用

铁路钢轨特别是其接头部位，在使用过程中，由于遭到车轮频繁的冲击、擦伤、打滑、磨损而出现剥蚀、剥落和撕裂以致形成低塌和洼坑，产生表面疲劳磨损，严重影响钢轨的使用寿命和行车安全，影响铁路运输的正常运行。

采用氧-乙炔火焰喷焊铁基自熔性合金抗表面疲劳磨损涂层，通过 200 万次（脉冲次数）的疲劳试验和在 200t 液压试验机上进行压弯试验，未发现裂纹、起壳、剥落、分层等情况。经现场焊补的钢轨使用结果表明，焊层质量良好，焊层平整、光滑、具有良好的抗疲劳磨损性能，而且施工方便，成本低廉。

修补钢轨的热喷涂涂层的主要性能见表 10.4。

表 10.4 修补钢轨的热喷涂涂层的主要性能

合金粉末	相对耐磨性 <sup>①</sup>	抗拉强度/MPa	疲劳试验循环次数
氧-乙炔火焰喷焊铁基合金	29.2~33.8	475~492	200 万次无裂纹

① 钢轨的相对耐磨性为 12.7。

发电厂使用的风机叶片长期高速运行，吸风力强，经常受到煤灰粒子强烈的磨损，一般使用寿命在 4~6 个月，现采用氧-乙炔粉末喷焊工艺，使用寿命比原来延长 6 倍以上，效果显著。

矿下采煤用单链刮板输送机在连续输煤过程中，中部槽板受到钢链刮板和煤块的严重磨损，原用厚度为 6mm 的进口锰钢（16Mn）板制造，一般使用半年就磨穿。每年不仅要耗用大量锰钢板，而且直接影响煤矿的生产，成为影响煤机寿命的主要部件之一。而采用喷焊工艺，在输煤机中部槽板上喷焊厚度为 2~3mm 的高铬铸铁合金焊层，增强了抗磨粒磨损性

能，使槽板的使用寿命延长 3 倍以上。

铸造车间的混砂机刮板，遭受砂粒的严重磨损，采用镍基合金粉末喷涂后，寿命比原 40 铸钢刮板提高 8 倍。对 N-7 型碾米机刀片采用 F305 喷涂层后，使刀片寿命提高 10 倍以上。

内燃机车扫气泵上、下叶轮轴颈磨损，喷涂镍包铝粉末作打底层、F112 作表面工作层修复后，可以大大节约成本，提高使用寿命。棉纺厂浆纱辊筒轴颈工作过程中磨损 2mm，喷涂镍包铝粉末作打底层，再喷涂镍基合金粉末作表面工作层，可以节约成本、延长使用寿命。

### 10.2.2 耐腐蚀涂层的应用

#### (1) 汽油稳定泵拉杆上的应用

热裂化装置的汽油稳定泵拉杆，在使用过程中受到汽油的腐蚀和往复运动中的磨损，因此该零件是炼油设备的易损部件之一。原采用镀铬处理，但耐磨性差，使用寿命短，每年每台泵要损耗近百根拉杆。而且由于腐蚀磨损还会引起设备严重泄漏，既影响生产，又威胁生产装置的安全和环境的污染。而采用氧-乙炔火焰喷焊一层镍基自熔性合金涂层，可以大大延长其使用寿命，节约大量钢材和资金，减少维修工作量，经济效果十分突出。

#### (2) 造纸烘缸上的应用

造纸烘缸的表面受纸浆中所含碱液以及松香、明矾等化学介质的腐蚀。工作时又通入约 120℃ 的蒸汽，并在不断旋转中烘干一定数量的纸浆，同时，又不断地与铲刀发生接触摩擦，所以工况条件恶劣。如某些腐蚀严重的造纸厂每当春旱季节，水中氟离子含量很高，烘缸一转就会立即泛出“白霜”，越积越厚、腐蚀磨损十分严重，2~3 个月就需磨削一次，每次磨削需停产 3~5 天，损失产值 2~3 万元。现采用普通钢板或用铸铁浇铸，并在其表面用电弧喷涂 1Cr18Ni9Ti 不锈钢后，造纸烘缸的维修期就延长到 1 年以上，节约了大量的停工停产维修费用，还提高了纸张的质量，能够制造照相纸、电容器纸等高质量纸张。

#### (3) 平板式闸阀阀板上的应用

平板式闸阀是油田油井和天然气气井的井口装置。闸阀的主要部件是阀板，要承受 1 000 个大气压力，遭受 H<sub>2</sub>S 气体腐蚀和开启、关闭过程中的磨损，技术要求很高。其质量的好坏直接影响油和气田的开采与安全。采用火焰喷焊工艺对阀板喷焊镍基合金后经现场试验证明，其硬度达 58HRC，抗 H<sub>2</sub>S 气体腐蚀的性能优良。

#### (4) 印染导布辊上的应用

印染行业所使用的导布辊，其规格之多、数量之大是惊人的，在使用过程中要与酸、碱和颜料等直接接触。如果采用不锈钢板卷制包扎而成，其工艺复杂，而且往往由于刚度不足造成弯曲变形，迫使停机，影响生产。而采用在普通无缝管表面喷涂 2Cr13、1Cr18Ni9Ti 材料制作导布辊，内有厚壁衬管，刚度好、抗弯曲能力强、辊面平整、涂层材质均匀，不存在焊缝晶间腐蚀。

#### (5) 其他应用

化工炼油设备中的热裂化汽油往复泵拉杆，处于高温、高压下工作，由于腐蚀磨损及冲刷作用，损坏较快，寿命很短。采用氧-乙炔火焰粉末喷涂后，寿命比原件提高 16 倍以上。并且经喷涂后的零件，经长期使用，去除涂层，重新喷涂后仍可继续使用。

用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制作的盐水过滤器的寿命只能使用 3 年。而如果改用低碳钢制作盐水过滤器，在表面喷涂镍包铝作打底层，再喷涂镍基粉末作工作表面层，不但延长寿命，



还能够大大节约成本。

碳化塔是小型氮肥厂的关键设备之一，遭受碳酸氢氨的强烈腐蚀。原在塔壁钢板上涂刷油漆进行防蚀，只用5个月后，漆膜全部脱落，钢板蚀深2~3mm，而采用喷铝涂层，用环氧树脂进行封孔处理，使用5年以后检查涂层完好，仍可继续使用。

输电铁塔、电视台天线等构件因长期暴露在大气中，由于受到气候变化的影响而使钢铁构件迅速氧化。原采用油漆，保护寿命不长，需经常维修保养，如高达205m的电视台天线，最高一段的维修保养是极其困难的。而采用气体火焰喷涂工艺喷锌涂层加以保护，可达到几十年内无需保养的效果。

铁路桥梁的轨道下面是枕木，枕木搁在钢制纵梁上面，纵梁的顶面（也称为上盖板）由于雨水和河流蒸发的水汽，在枕木下面聚集，致使该部位十分潮湿、不易干燥，因而极易腐蚀。采用氧-乙炔火焰喷涂锌合金层，再涂刷6道耐磨漆，可以大大延长使用寿命，节约成本。

### 10.2.3 抗高温涂层的应用

多种受热容器、玻璃模具、无缝钢管顶头等零部件往往受高温氧化、挤压、冷热作用，热磨损严重，导致使用寿命缩短。采用热喷涂工艺，制备抗热磨损性能的表面强化层，是有效的解决途径之一。

#### (1) 退火包抗高温氧化涂层的应用

钢铁件在高温中极易氧化烧损，渗铝扩散是经济可靠的表面处理工艺之一。渗铝有固体渗铝、液体渗铝和喷涂渗铝三种。除了大量生产的小工件外，喷涂渗铝是惟一的有效方法。

铝的熔点是660℃，本身不能经受高温，但它有一个特性，就是同氧有强烈结合的倾向。对钢或铸铁进行渗铝以后，能生成铝铁合金，越接近表面含铝量越高，结果在表面形成致密的一层氧化铝（ $Al_2O_3$ ）保护薄膜，这层薄膜是连续的，而且是无孔的。 $Al_2O_3$ 薄膜在退火包表面可以有效地防止氧继续侵入而生成氧化铁，因此，它能使一般不耐高温的钢或铸铁件在经过渗铝处理后，变成耐热、耐蚀的优良材料。

喷涂渗铝的应用范围很广，如盐浴坩埚、热电偶套管、炉板、炉门、气体渗碳炉中的支架和装料管、内燃机的排气管、退火包等。以退火包为例，其炉胆直径为780mm，高为1850mm，采用12~14mm厚的钢板制成。由于长期处于900℃高温中，容易发生氧化烧穿，报废严重。而且由于氧化皮剥落，导致电炉丝短路，时常造成停产事故。为此，采用了喷涂渗铝工艺，试验证明可以使退火包的使用寿命大大延长，经济效果显著。

#### (2) 玻璃模具耐热磨损涂层的应用

玻璃模具通常采用灰口铸铁制造，经常受到高温玻璃熔体和残留的低温硬性玻璃的挤压作用，使模具沿模型腔线、杯口等部位发生崩口、塌凹和腐蚀。并在热疲劳作用下，热磨损很快，模具寿命一般为24h左右。喷焊镍基合金粉末（Ni-B-Si）涂层后，可以使模具的使用寿命提高5倍以上，节约修理成本80%左右。

在实际使用中，零部件的磨损很少只是由于单一的磨损机理引起。在许多情况下可能由一种磨损形式转变为另一种磨损形式。例如，黏附磨损产生的磨屑就可能引起磨粒磨损形式。实践证明，热喷涂技术在各行各业中已得到广泛的应用，并取得显著的经济效果。

### 10.2.4 其他涂层的应用

#### (1) 封严涂层

燃气轮机涡轮导向器采用镍包硅藻土涂层进行封严处理，可控制涡轮叶片和涡轮外环的

间隙，提高燃气涡轮的效率。

对于燃气轮机的压力机上的六、七、八级半环喷涂镍包石墨或铝石墨涂层，控制压气机静于叶片叶尖和鼓筒处的间隙，减少气流损失，提高了压气机效率。对燃气轮压气机后舱喷涂镍包石墨涂层，控制转子叶片叶尖和机匣的运转间隙，减少漏气损失，也可以提高压气机的效率。

### (2) 尺寸修复涂层

在制造零件过程中，由于各种原因造成零件的尺寸超差，或在运输、安装过程中使重要零件的工作面受到损伤而报废，有的零件往往受材料、结构和工况的限制，采用其他修复工艺难以完成，而采用氧-乙炔火焰粉末喷涂工艺进行修复能得到满意的效果。

从德国进口的 MP4000 热模锻机的压力销，材料为 35CrNiMo，重 5.3t，由于运输过程中碰上压力销的工作面而不能使用，采用镍包铝粉喷涂对损伤部位进行了修复，得到了满意的效果。

材质为 9Cr2Mo 的冷轧机轧辊，在使用过程中造成 90mm×50mm×1.5mm 的缺陷坑，用镍包铝粉喷涂进行较为成功的修复。

35CrMo 轴由于加工超差 0.04mm，通过喷涂镍包铝粉进行了修复，使其达到了正常要求的尺寸。铝或钢质材料制成的压气机叶片，由于叶根部位磨损而不能使用。采用喷涂镍包铝合金粉末修复磨损部位后，该涂层既恢复了尺寸，又具有较高的耐磨性。

## 10.3 热喷涂安全与防护

### 10.3.1 热喷涂安全技术

#### (1) 防火防爆

氧-乙炔火焰喷涂与氧-乙炔火焰焊接一样，也存在回火的问题。而且当喷涂空心工件时，工件上必须开通气孔。否则当工作喷涂加热时，内腔气体膨胀，其压强大于工件材质的强度时，会引起爆炸。特别是喷涂、喷焊薄壁空心件时，更应注意开通气孔。

氧和乙炔系统密封不严，出现气体泄漏于空气中，与其混合成一体，当浓度达到一定比例后，也会引起燃烧和爆炸的危险。特别是室内作业，通风不好时，应事先做好密封检查，并采取通风措施。

#### (2) 电器设备和机械设备的防护

热喷涂过程中，会出现合金粉末飞扬于空气中，这些合金粉末是良好的导体。但当这些合金粉末进入电器设备后，会造成短路的危险，易引起着火或爆炸，此时应采取相应的措施。在可能的情况下，尽量将电器设备远离现场，不能远离的应加强设备的防粉尘措施。

热喷涂技术中所用的合金粉末绝大多数是优良的耐磨材料。工作过程中很容易进入设备里面，造成设备的严重磨损或腐蚀，影响机械设备的精度和寿命。特别是机械设备中的滑动部分和传动部分，必须采取相应的防护措施，例如可用蛇形管来保护液压或机械升降系统等。

#### (3) 喷砂的安全技术

① 喷砂操作人员应戴上手套、帽子、口罩，穿上工作服和护腿等，以防止砂粒伤人。

② 喷砂应在喷砂室或柜内进行。必须在室外喷砂时，操作人员要穿戴带头盔的衣裤，在头盔的后面通入经过滤清的空气，送入头盔的空气流量约为 200L/min，以操作人员有一种清凉的感觉为宜。头盔带有涂敷橡胶的布质披肩和袖子，以便扎紧在腰部。

③ 更换喷嘴时，必须先关闭喷砂枪的压缩空气开关。

④ 喷砂机应有良好的排风除尘装置。喷砂前要先打开排风机和湿式除尘器的水开关，然后进行喷砂。

#### (4) 乙炔发生器的使用安全技术

① 乙炔发生器可以安置在通风良好的房内，也可以安置在室外，但离火源必须远一些（12m 以上）。严禁在乙炔发生器旁边引燃火焰或抽烟。晚间装电石时，不得用明火照明。

② 加入发生器的水必须清洁，不含油脂和杂质。

③ 工作中，经常检查各接头处的密封性，并经常注意回火防止器的水位是否正常。

④ 装入发生器的电石量，一般不能超过电石篮容积的一半。

⑤ 在开始工作时，必须首先将发生器中的空气排出，然后才能向喷枪输送。如果发生器同时向两把以上的喷枪供给乙炔气，则每把喷枪必须设有单独的乙炔回火防止器。

⑥ 发生器全天使用时，中间必须换水。用后应清洗干净。

⑦ 正常工作时，发生器内的水温不应超过 60℃。工作环境温度低于 0℃ 时，应向发生器和回火防止器内注入温水，也可以将水中加入少量食盐，防止发生器冻结。当工作结束后，应将水全部放出。如果发生冻结，则必须用热水或蒸汽来解冻，严禁用火烘烤或用铁锤敲打。

⑧ 停止工作时，不应在发生器内留有未分解的电石。固定式发生器中剩余压力不应超过 0.1atm（1atm≈0.1MPa）。

⑨ 发生器长期不使用时，应经过彻底清洗，将水全部放出并擦干净，注意维护。

⑩ 发生器不得任意拆分，并按规定使用金属薄片（爆破薄膜片）。如果需要用焊接方法修补发生器及其附属设备时，补焊前必须进行多次清洗，核实无乙炔和电石渣后，再进行补焊。

#### (5) 气瓶及减压器使用安全技术

① 氧气瓶未装减压器之前，应检查氧气瓶的出气口内是否清洁，以免脏物堵塞减压器。

② 气瓶阀与减压器连接螺纹的规格应相同，安装前应吹除连接处的脏物。减压器与气瓶相连要牢固。

③ 氧气瓶与乙炔瓶所用的减压器，必须有符合要求的高压表和低压表。高、低压表的指针应动作灵敏，以便正确反映瓶内的气压。

④ 气瓶减压器装好后，应先将减压器调节螺钉拧松，然后慢慢地打开氧气阀门，防止高压气体突然冲到低压气室，使弹簧膜装置和低压表损坏。此时操作者应该站在减压器侧面或后面，不允许站在氧-乙炔瓶出口正面。工作结束时，先将气瓶阀关紧，再将调节螺钉拧松。

⑤ 搬运气瓶时，应将瓶口颈上的保护帽装好。放置在妥善可靠的地方后，才能将瓶口颈上的保护帽取下来。氧气瓶不能与其他可燃气瓶及油料等可燃物一起运输。

⑥ 氧、乙炔的输气管路要涂色漆区别。氧气导管涂成蓝色，乙炔导管涂成白色。各管路及接头处不得漏气。

⑦ 乙炔瓶体表面的温度不应超过 30~40℃，因为温度过高会降低丙酮对乙炔的溶解度，使瓶内压力急剧增加。

#### (6) 火焰喷涂的安全操作

##### 1) 喷枪的使用安全技术

- ① 喷枪与软管连接要牢固，不准漏气。枪体各接头及调节阀不准漏气。
- ② 点火前检查喷嘴，不准堵塞，必要时用通针疏通。
- ③ 喷嘴尺寸选择要合适。与喷枪连接处要拧紧，不能松动。
- ④ 喷枪点火前不准打开送粉阀，以防止堵塞送粉通道。
- ⑤ 点火时先开适量乙炔，后开少量氧气，再点火。
- ⑥ 不准在易燃材料旁边进行喷涂作业，更不准将喷枪对着装有气体的容器。

## 2) 喷涂的安全操作

- ① 喷涂时，每个氧气与乙炔气管道上的接头应拧紧，不得有气体泄漏。
- ② 打开任何气阀之前，应对工作场地进行通风。

③ 喷枪点火时，必须用摩擦点火器或用喷枪专用点火装置，以防止手被灼伤。供给喷枪的氧气和乙炔的压力及流量，应在规定的工作参数范围内连续调节，并能有参数指示和确保操作安全的装置。应采用气体控制屏，气体控制屏中不得含有可发生火花的电气装置，如有，则必须安装排风扇，防止泄漏的燃气着火。乙炔气体所经过的管道零件禁止使用紫铜、银或含铜量超过 70% 的钢合金制造。

④ 喷涂时如果喷枪连续发生自动熄火和发生回火现象时，在没有检查出原因之前，不得继续使用。

- ⑤ 火焰喷枪和它的软管，都不能挂在气瓶阀或减压器上，避免引起燃烧和爆炸。

## 3) 喷枪回火的处理方法

当喷枪发生回火时，首先应立即关枪，迅速用手将氧气胶管折弯，切断氧气。待外部火焰熄灭后再开启喷枪开关，喷枪开关开启后把折弯的氧气管放开。此时，喷枪或管内若无燃气燃烧的吱吱响声，则说明回火发生在喷枪气路开关与枪口之间，回火已处理完毕。这时可立即打开气路开关，让气流吹出积炭和烟尘。如果喷枪或管内仍然发生燃气燃烧的吱吱声，则说明回火现象仍然存在，并未消除，而且回火已越过喷枪气路开关而进入胶管内部。这时应立即将氧气瓶上的阀门关闭，切断氧气来源，若三气管均使用快速接头时，可将氧气和乙炔气的快速接头迅速拔下，回火即可熄灭。

## (7) 电弧喷涂和等离子喷涂的安全操作

- ① 对操作人员进行必要的技术培训，使其熟悉设备的使用和维护。
- ② 对电源或手持喷枪的金属外壳，应进行接零和接地保护。
- ③ 在没有切断整个系统的电源和气源的情况下，不能进行清洗或维修电源、控制柜和喷枪。
- ④ 为了防止金属粉尘的堆积，应经常清理喷枪和电源，以防止集尘造成的短路。
- ⑤ 与电弧喷涂设备连接的送丝装置，应该很好地接地或绝缘。
- ⑥ 若等离子喷枪或电弧喷枪是悬挂的，则接钩应该绝缘或接地，喷枪停止工作时，喷枪上的两根线材要退出。
- ⑦ 在等离子喷枪调整时，应尽可能缩短高频使用时间或减少使用次数，以防止高频对其他电气设备的损坏。等离子喷枪应和其支持架保持足够绝缘。

## (8) 高空喷涂的安全措施

在距地面 2m 以上的脚手架上或在没有平整的立脚处，坡度大于 45° 的斜面上，以及在吊篮中有振动的地方进行喷涂工作均属于高空作业。高空作业者，即使是临时性的，也要定期进行体格检查，合格者才允许高空作业。另外，高空作业者和与之配合的助手还必须熟悉

本工种的专门技术和安全技术。

进行高空作业时，应佩带安全带，并将绳勾牢固地系在坚固的构件上，切勿系到不稳的物体上。要使用符合安全要求的梯子，对搭好的跳板及脚手架必须检查是否牢固。在高空喷涂时，气体胶管不要缠绕在身上或搭在背上工作；要防止辅助工具（如手钳、扳手等）掉落，以免砸伤下面的人员；电、气开关应在监护人附近，遇有危险迹象时，应立即切断气源，并进行营救。

### 10.3.2 热喷涂防护

热喷涂工艺过程以及热喷涂用材的生产过程中，均会产生一些有害物质，影响专业工作人员的健康。但只要采取相应的防护措施，可将其影响减少到最低限度，甚至有的可以避免。

热喷涂中可能出现的有害因素见表 10.5。

表 10.5 热喷涂中可能出现的有害因素

工 序	工 种	有 害 因 素
工件表面制备	除锈、去油、酸洗	异种气体、粉尘
	喷砂	粉尘、噪声
热喷涂	等离子弧喷涂	弧光辐射、金属粉尘、臭氧、氮氧化物、噪声、高频电磁场
	氧-乙炔火焰喷涂、喷焊、电弧喷涂	金属粉尘、热辐射、紫外线辐射、红外线辐射
粉末制造	合金粉末生产	高频、热辐射、有害气体、金属氧化物
	粉末筛粉与粉末包装	粉尘

#### (1) 有害因素及其影响

##### 1) 臭氧

① 特性及其产生 臭氧是一种淡蓝色的气体，具有强烈的刺激性气味。浓度较高时呈腥臭味并略带酸味。其密度为空气的 1.5 倍，不稳定，可分解为游离态的氧。

热喷涂中的臭氧，主要是由电弧紫外线辐射或高频电磁场的作用而产生的。

② 对人体的影响 主要是刺激呼吸系统发生病变。其浓度超过一定量时，往往引起人的口干、咳嗽、胸闷、食欲不振、疲劳无力、头晕、全身疼痛等症状。

##### 2) 氮氧化物

① 种类和特性 热喷涂工作中可能遇到的氮氧化物主要有氧化亚氮 ( $N_2O$ )、一氧化氮 ( $NO$ )、二氧化氮 ( $NO_2$ ) 和三氧化二氮 ( $N_2O_3$ ) 等。在空气中多以二氧化氮的形式作用于人体。室温下二氧化氮呈红棕色，受热后呈深褐色，它具有特殊臭味和剧毒性。

② 对人体影响 氮氧化物能引起人体中毒，造成头疼、咳嗽、呼吸困难、失眠、虚脱、全身软弱无力、食欲不振、慢性咽炎、慢性支气管炎及皮肤过敏等症状。

更为严重的是当臭氧和氮氧化物同时存在时，要比单一因素对人体的危害更大，其毒害作用要比单种气体高 15~20 倍。

##### 3) 等离子弧辐射

① 辐射特性 等离子弧不仅有很高的温度，而且还具有比一般电弧更强烈的弧光。等离子弧心部温度高达 20 000℃，焰流温度也要在几千摄氏度以上。这种高温焰流是一种强烈的光辐射源，其强度一般为电弧光的 30~60 倍。其光辐射主要是紫外线、可视线和红外线。等离子弧的短波紫外线辐射较强，在波长 260~290nm 时，约为手工电弧焊辐射强度的 3.6

倍。在波长 200~233nm 时，约为 95 倍。红外线的辐射强度也比手工电弧焊强烈。

② 对人体的影响 等离子弧压缩越深，电流越大，强光越强烈，对人体危害越大。其主要危害表现在以下几方面。

a. 眼睛灼伤 眼睛受等离子弧光照射后，很快就会有灼热、灼烧痛感和闪光幻。经数小时后，出现剧烈的刺痒，有砂粒感、疼痛、结膜充血、红肿、视力不清等症状，并伴有头痛感觉，但一般经数日后能恢复好转，不会造成永久性损伤。

b. 皮肤损伤 弧光中的紫外线对人体组织有光化作用，其影响主要是皮肤的伤害。人体裸露部分受弧光照射后，即使时间很短，也会有伤害。一般是先发红，继后脱皮，对有些人甚至会引起皮炎。

另外，紫外线辐射除了对人体有危害外，对纤维也有严重的破坏作用，特别是棉织品尤为严重。由于光化作用，导致工作服氧化变质而破碎，失去对人体皮肤的防护作用。

#### 4) 金属粉尘和金属氧化物

多种喷涂、喷熔和粉末堆焊方法均采用合金粉末做熔敷金属。在工作过程中，粉末的飞散和飞溅向现场空间扩散、飞扬飘浮于空中，造成金属粉尘。合金粉末在高温热源作用下形成涂层，在其加热熔化的过程中，不可避免地会产生四处飞散的金属氧化物。这两种有害物质在热喷涂过程中较为普遍，应采取相应的防护措施对人体加以保护。

金属粉尘及其氧化物对人体的危害作用是一个比较复杂的问题。这些物质的危害会长期进行积累，逐渐使人体产生疾病，如鼻炎、呼吸道疾病和硅沉着病等。

#### 5) 高频电场

高频电场对人体的作用是致热作用，并有可能引起中枢神经系统的某些机能障碍。

当高频电只用作引燃电弧时，其高频电场只在引弧的瞬间存在，且其功率较小，对人体的影响较小。但对于用高频电进行稳弧的一些工艺，其高频电场的强度若超过 10V/m，又属于长期工作，则其危害较为显著，会导致人体周身不适、头痛、疲劳、记忆力减退等症状。个别人还会出现脱发等现象。严重者血压降低、白血球不正常等。

在振荡器、喷枪或喷嘴附近，其电场强度为 13~38V/m，而国家标准规定的最高允许值为 20V/m。因此使用这种高频振荡器一定要安装屏蔽装置。

#### 6) 噪声

各种不同频率和强度的声音振动，毫无规律地、机械性地混在一起，就成为噪声。噪声对人体健康的影响主要取决于噪声的强度、频率和所作用的时间。在热喷涂中，噪声的声压强度和频率高低与等离子弧的功率大小、气体流量和等离子弧类型等因素有关。

等离子弧喷涂时，其噪声可达 120dB 以上。一般可认为噪声在 80dB 时，对人体没有危害，高于 80dB 时就会对人体造成危害，并且这种噪声危害是多方面的，如中枢神经系统、血液循环系统以及人的心理状态等都会受到较大的影响。

#### 7) 放射性

目前，等离子弧喷涂工艺中，仍有少数设备的喷枪采用钍钨棒做电极。钍钨棒中含有 1%~1.2% 的氧化钍而存在放射性。

钍对人体的影响分为外照射和内照射。喷涂时离开钍钨极 10~20cm 距离时，纸和布物可以完全将放射性粒子全部吸收。钍的放射性依靠贯穿作用所引起的外照射危害极微。但需要重视的是，钍粉尘进入人体中所造成的内照射是长期危害人身健康的。因此必须采取有效的防护措施，避免造成内照射。

## (2) 保护措施

### 1) 臭氧、氮氧化物和金属粉尘的防护

对于臭氧、氮氧化物、金属粉尘及金属氧化物等有害物可采用的防护措施如下。

① 工作现场应宽敞，空气流通，最好配有通风装置。

② 安装封闭式防护通风罩，并隔离操作，以便有效地隔离有害因素与人体的接触。

这不仅对上述几种有害物有最好的防护效果，而且是对所有的有害因素都能起到防护作用。因为在喷涂过程中产生的有害因素，可最大限度地控制在密封罩内，同时用抽风机经过滤器、分离器处理和通管道连续不断地将全部有害物质排除掉。

针对不同要求和具体条件，封闭式防护通风罩又分为两种。一种是局部封闭式防护通风罩。它是将工件和热源（如等离子弧等）封闭在防护通风罩内，即将工作点罩住，然后把有害物质排除掉，抽风罩口的抽气速度以  $1\text{m/s}$  左右较为适宜。另一种是全封闭式防护通风罩。它是将工件和整个工作机构封闭在防护罩内，等于是一个封闭的工作室，而控制系统等均在工作室外隔离操作。这种形式的防护效果最好。抽风罩口的抽风速度应达到  $2\sim 3\text{m/s}$ 。

防护罩的大小、形状和结构，依工件形状、大小、设备情况及操作要求等具体情况而定。为防止在长时间工作后罩体过热，罩板与热源要有一定的距离。罩体一般用金属板做外壳，内衬石棉板或红纸板等绝热材料。排气孔置于罩体上方或侧面，不要直对电弧，以免影响电弧的稳定燃烧。

③ 机械化、自动化操作，可以使操作者实现远距离控制。尤其是定型产品，当热喷涂的工艺方法确定后，就可用专用设备进行机械化、自动化生产，操作者可以远距离监视和控制。有条件时，配有工业电视进行监视，效果更为理想。

④ 现场工作人员应戴防尘口罩，最好是滤膜防尘口罩。

### 2) 火焰及弧光辐射的防护

① 人体裸露部分要严防等离子弧的照射。如不戴防护镜不得直接观察火焰及弧光。

② 氧-乙炔火焰喷涂操作者必须戴深色防护眼镜，为了反射热辐射，最好使用镀铬深色镜面的防护镜。

③ 等离子弧喷涂操作者，最好使用有反射护目镜的面罩。一般的镜片以绿色和黄色吸收紫外线效果较好。

④ 安装封闭式防护通风罩并隔离操作对防止光辐射、热辐射等效果最好。防护罩不仅可以将弧光遮挡，而且吸收了紫外线和红外线。工作情况可通过装有防护镜的观察窗口进行观察。

### 3) 噪声的防护

① 噪声不厉害时可以采用戴隔音耳罩或在耳内塞棉花也能降低噪声  $10\sim 20\text{dB}$ 。

② 采用机械化、自动化作业，实现隔离控制。

③ 采用隔音室和机械化自动隔离操作是防护噪声最理想的措施。尤其当使用大功率的等离子弧喷涂时，更应该采取这种防护措施。

### 4) 高频电场的防护

① 高频发生器系统应设有屏蔽装置。

② 提高设备的引弧能力，缩短引弧时间。其措施主要有：一是提高和保证喷枪的加工精度，以便减少使用高频火花检查电极对中的次数和时间；二是火花间隙和钨极内缩短距离应调整在所要求范围内，尽可能减少使用高频的时间；三是在电器线路上要充分保证引弧

后，能立即切断高频电路；四是要实现微弱高频火花，且能瞬间引弧的方法。

#### 5) 放射性防护

在热喷涂技术中防护放射性主要是防护钍钨电极中钍的放射性。特别要防止钍粉尘进入人体内所产生的内照射。主要从保管、加工、粉尘后处理和个人防护四个方面采取措施。

① 最好的办法是不用钍钨电极，而是改用铈钨电极或钇钨电极。

② 钍钨棒必须集中管理、专人保管，应有专门的存放处，用铅筒或厚壁铁皮制成容器储存。

③ 打磨加工钍钨棒时，应注意个人防护，应戴口罩、手套和穿工作服、工作鞋等，并经常洗涤。每次工作后，必须用流动水和肥皂清洗手和面部。

④ 加工钍钨棒时应对工作现场进行防护。打磨砂轮必须安装抽风、排尘、过滤、分离处理设备。经常进行湿式清扫，妥善处理粉尘。



## 参 考 文 献

- 1 董祖铨, 黄庆云, 高峰, 林中. 国内外堆焊发展现状. 见: 中国机械工程学会焊接学会编. 第八次全国焊接会议论文集. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 2 尹士科主编. 焊接材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2000
- 3 徐滨士, 刘世参编著. 表面工程. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 4 R. A. 林德伯格等著. 焊接及其它连接方法. 李致焕等译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983
- 5 程恢等编译. 保养焊接技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1980
- 6 上海第八钢铁厂编著. 钢轧辊自动埋弧堆焊. 北京: 冶金工业出版社, 1986
- 7 吴树雄, 尹士科编著. 焊丝选用指南. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 8 李亚江主编. 焊接材料的选用. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 9 Frank M Marlow, Welding Fabrication and Repair; Questions and Answers, New York: Industrial Press Inc. 2002
- 10 周振丰主编. 金属熔焊原理及工艺. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 11 徐滨士, 刘世参编著. 表面工程新技术. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 12 粟粘主编. 等离子喷涂和燃烧火焰喷涂技术. 北京: 国防工业出版社, 1981
- 13 董允, 张廷森, 林晓婷. 现代表面工程技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 14 曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册. 北京: 化学工业出版社, 1998
- 15 中国机械工程学会焊接学会编. 焊工手册. 手工焊接与切割. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 16 傅积和, 孙玉林主编. 焊接数据资料手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 17 陈祝年编著. 焊接工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 18 王震林, 韩勇, 许晋生编著. 金属热喷涂技术及其应用. 北京: 纺织工业出版社, 1992
- 19 高清宝, 王德权, 苏志东等编著. 阀门堆焊技术. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 20 麻毓璜编著. 氧乙炔焰粉末喷涂技术. 成都: 四川科学技术出版社, 1983
- 21 韦福水, 蒋伯平, 汪行恺等编著. 热喷涂技术. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 22 张官宝编著. 氧-乙炔焰热喷涂技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986
- 23 邹增大, 李亚江, 孙俊生等编著. 焊接材料、工艺及设备手册. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 24 William Galvery, Frank M Marlow. Welding Essentials; Questions and Answers, New York: Industrial Press Inc. 2001
- 25 张清主编. 金属磨损和金属耐磨材料手册. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 26 蔡泽高, 刘以宽, 王承忠等编著. 金属磨损与断裂. 上海: 上海交通大学出版社, 1985
- 27 徐滨士. 表面工程领域的最新进展和发展趋势. 见: 中国机械工程学会焊接学会编. 第十次全国焊接会议论文集. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2001
- 28 徐滨士, 刘世参, 刘学蕙编著. 等离子喷涂及堆焊. 北京: 中国铁道出版社, 1986
- 29 完卫国编著. 焊条电弧堆焊应用实例. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 30 陈天佐, 李泽高编著. 金属堆焊技术. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 31 王汉功著. 超音速电弧喷涂技术. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 32 中国腐蚀与防护协会主编. 热喷涂. 北京: 化学工业出版社, 1992
- 33 王守强主编. 钢闸门喷涂锌防腐. 北京: 水利电力出版社, 1988
- 34 于丕涛编著. 金属电弧喷涂. 北京: 农业出版社, 1989
- 35 李亚男编著. 热喷涂(焊)技术在汽车修理中的应用. 北京: 人民交通出版社, 1992
- 36 胡传忻编著. 热喷涂原理及应用. 北京: 中国科学技术出版社, 1994
- 37 鲍明远, 孟凡吉编著. 氧乙炔火焰粉末喷涂和喷焊技术. 北京: 机械工业出版社, 1993

