

# 表面涂层技术

陈学定 韩文政 主编  
徐滨士 主审

(京) 新登字 054 号

《表面涂层技术》是由国内学者编写的一部有关零件表面强化领域内的专著。它系统地深入地论述了热喷涂、电刷镀、镀膜、堆焊等表面涂层技术的基本理论、涂层材料、涂层工艺及设备、应用实例等内容，还综合详细地介绍了表面涂层的加工、检测、设计等相关内容。本书不仅内容新颖，选材广泛，且具有理论上深入、实用性强的特点，引导读者正确选择与设计表面涂层及进行涂层质量的控制与检测。

本书可作从事材料及机械产品研究、设计、制造、使用、维修等方面的工程技术人员及高校中焊接专业或其它有关专业师生的参考用书。

## 表面涂层技术

陈学定 韩文政 主编

\*

责任编辑：董连仁 版式设计：胡金瑛

封面设计：方芬 责任校对：陈立耘

责任印制：王国光

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

蓝地公司激光照排

开本 787×1092 1/16·印张 15 $\frac{3}{4}$ ·字数 378 千字

1994 年 5 月北京第 1 版·1994 年 5 月北京第 1 次印刷

印数 0 001—5 500 定价：9.00 元

\*

ISBN 7-111-04029-5/TG·877

## 序

随着工业现代技术的发展,对各种机械设备、零件的表面性能要求越来越高,一些在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质等条件下工作的零件,往往因其表面局部损坏而使整个零件报废,最终导致整个设备停用。为提高零件的可靠性,延长使用寿命,国际上都在努力研究和应用提高零件表面性能的表面涂层新技术和新工艺,如采用非金属材料的硬化处理(C、N、B元素清面扩渗处理)、物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、电镀、刷镀、热喷涂、高能束热源表面强化(激光、电子束等)、化学粘涂、堆焊等。表面涂层技术能够制备各种特殊功能的涂层,用极少量的材料就起到大量、昂贵的整体材料所难以起到的作用,又极大地降低了产品的加工成本。利用表面涂层技术赋予零件表面耐磨、耐蚀、耐热、耐疲劳、耐辐射以及光、热、磁、电等特殊功能,从而达到提高产品质量、延长使用寿命的目的。表面涂层技术是80年代世界十项关键技术之一,是表面工程学科的重要组成部分。

表面技术的应用促进了新型表面材料的发展,如各类堆焊焊条、合金粉末、热喷涂材料、刷镀溶液、化学粘涂材料、润滑油的添加剂等。值得注意的是:各种非金属材料(如陶瓷材料、高分子合成材料及复合材料)正逐步代替部分金属材料;表面涂层技术又为高科技的发展提供特殊性能的材料,如非晶态材料、超导材料、固体润滑材料、太阳能转换材料、金刚石薄膜等。

在改革开放的新形势下,在“科技是第一生产力”的思想指引下,我国的表面工程得到了迅速的发展。国外对表面工程的概念始于20世纪80年代。1984年在英国建立了第一个表面工程学会和出版了第一本国际性的表面工程杂志。1985年召开了第一届表面工程国际会议。

中国机械工程学会于1987年12月批准成立学会性质的中国机械工程学会表面工程研究所;1988年11月在北京召开了全国首届表面工程现状与未来发展研讨会;同年创办了我国第一本“表面工程”杂志。此后,还多次举办了国内学者的学术活动和中日表面工程研讨会,在国内外均有好的影响。

我国表面工程在国民经济发展中发挥了重要作用,在研究水平与规模方面,在一此领域内已达到国际水平,并有自己的独创和特色。

《表面涂层技术》一书重点介绍了四类表面涂层技术,即堆焊技术、热喷涂技术、电刷镀技术及镀膜技术。另外,书中对表面涂层的加工、检测试验及涂层设计也做了深入简要的探讨。该书的作者在上述表面工程的各个领域中具有较深的造诣和丰富的实践。书中除了介绍他们自己的经验外,还吸收了有关的研究成果,因此,可以说本书是我国近年来这一方面的经验总结。本书的出版必将促进表面涂层技术的推广和应用,对于表面技术的开发研究也有重要意义。

从现在起到本世纪末,是我国社会主义建设和改革的关键时期,应抓住当前有利时机,强

化科技意识，依靠科技进步发展表面工程，为我国的工业现代化做出新贡献！

徐滨士<sup>⊙</sup>

1993年5月16日于北京

---

<sup>⊙</sup> 徐滨士同志系中国设备管理协会副会长兼技术委员会主任；中国机械工程学会理事兼表面工程研究所所长；北京工业大学表面工程研究所所长、教授；“表面工程”杂志编委会主任。

## 前 言

表面涂层技术是表面工程学科的重要组成部分。它能赋予零件表面耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、抗疲劳、防辐射、导电、导磁、绝缘、装饰等多种特殊性能，是提高产品质量、节约能源和资源、获得显著技术经济效益的一种新的表面强化技术，有时也用于新材料的开发，因此，在许多工业部门中获得越来越广泛的应用。

本书内容总结了编著者和国内同行近十多年来的生产实践和科研成果，并收集了国外的发展成就和有关资料。本书选材力求具有实用性、科学性和先进性，并在理论上对重点内容进行了深入论述。

本书共分七章，不公系统深入地介绍了热喷涂、电刷镀、镀膜、堆焊等表面涂层技术的基本理论、涂层材料、涂层工艺及设备、应用实例等内容，还综合且较详细地介绍了表面涂层加工、表面涂层检测、表面涂层设计等相关内容，对陶瓷材料和新的表面涂层技术也作了相应介绍，使本书具有理论上深入、内容丰富且实用性强的特点。

参加本书编著工作的有：二、六、七章由甘肃工业大学陈学定教授、路文江副教授编写；一、三、五章由装甲兵工程学院韩文政教授、马世宁教授、翁熙祥教授编写；四章由兰州 510 研究所张世良高级工程师编写。由甘肃工业大学陈学定教授、装甲兵工程学院韩文政教授任主编；装甲兵工程学院徐滨士教授任主审。本书在编审过程中不仅得到了中国焊接学会堆焊与热喷涂分委会的支持与帮助，还承蒙许仁撑、黄庆云等有关专家的热情关照，对本书提出了许多宝贵意见，谨此一并致谢。

由于表面涂层技术内容新，涉及范围广，加之时间仓促，书中错误难免，诚恳希望广大读者提出批评。

编 者

1993 年 5 月

# 目 录

序	
前言	
第一章 堆焊技术	(1)
§ 1-1 概述	(1)
一、堆焊与堆焊技术	(1)
二、堆焊方法的分类和主要特点	(2)
§ 1-2 堆焊材料及选择	(4)
一、机械零件的磨损	(4)
二、堆焊合金的类型和特点	(5)
三、堆焊合金的选择原则	(16)
§ 1-3 手工电弧堆焊及应用	(18)
一、手工电弧堆焊设备与焊条	(18)
二、手工电弧堆焊的要点	(20)
三、手工电弧堆焊应用实例	(21)
§ 1-4 埋弧自动堆焊	(22)
一、埋弧自动堆焊原理	(22)
二、埋弧自动堆焊的分类	(22)
三、埋弧自动堆焊设备	(24)
四、埋弧自动堆焊材料	(25)
五、埋弧自动堆焊工艺	(26)
六、埋弧自动堆焊应用实例	(28)
§ 1-5 二氧化碳气体保护自动堆焊	(29)
一、二氧化碳气体保护自动堆焊原理及特点	(29)
二、二氧化碳气体保护自动堆焊装置	(30)
三、二氧化碳气体保护自动堆焊材料	(31)
四、二氧化碳气体保护自动堆焊的规范参数	(31)
五、应用实例	(31)
§ 1-6 等离子弧堆焊	(33)
一、等离子弧堆焊的分类	(33)
二、粉末等离子弧堆焊设备	(34)
三、粉末等离子弧堆焊工艺及应用	(34)
参考文献	(39)
第二章 热喷涂技术	(40)
§ 2-1 概述	(40)
一、热喷涂技术的由来	(40)
二、热喷涂技术的特点	(42)
§ 2-2 热喷涂材料	(42)
一、热喷涂材料的工艺性能及其分类	(42)
二、金属线材	(43)
三、金属粉末材料	(46)
四、自熔性合金粉末	(47)
五、复合粉末	(52)
六、耐热合金材料	(55)
七、陶瓷材料	(56)
八、塑料	(62)
§ 2-3 热喷涂方法及装置	(63)
一、火焰喷涂法	(63)
二、电弧喷涂法	(65)
三、等离子喷涂法	(66)
四、新的等离子喷涂法	(67)
五、气体爆炸喷涂法	(68)
六、其它喷涂法	(69)
§ 2-4 热喷涂工艺	(71)
一、待喷涂表面的制备	(71)
二、粉末火焰喷涂工艺	(73)
三、等离子弧喷涂工艺	(75)
四、电弧喷涂工艺	(77)
五、自熔性合金粉末火焰喷熔工艺	(78)
六、塑料喷涂工艺	(80)
§ 2-5 热喷涂基础理论	(82)
一、热喷涂工艺过程	(82)
二、喷涂时粒子的飞行速度与温度	(82)
三、热喷涂涂层的形成	(85)
四、涂层的结合机理	(90)
五、热喷涂的损失	(93)
§ 2-6 热喷涂应用实例	(94)
一、粉末火焰喷涂应用实例	(94)
二、等离子弧喷涂应用实例	(96)
三、火焰喷熔应用实例	(99)
四、塑料喷涂应用实例	(101)

参考文献	(103)	具上的应用	(144)
第三章 电刷镀技术	(104)	六、电刷镀技术在汽轮机转子修复上的应用	(144)
§ 3-1 概述	(104)	参考文献	(146)
一、电刷镀技术发展概况	(104)	第四章 镀膜技术	(147)
二、电刷镀技术的基本原理	(104)	§ 4-1 蒸发镀膜	(147)
三、电刷镀技术的特点	(104)	一、蒸发镀膜对真空环境要求	(147)
四、电刷镀技术应用范围	(105)	二、材料蒸发、蒸气粒子能量及镀膜厚度分布	(149)
§ 3-2 电刷镀电源设备及镀笔	(107)	三、蒸发源	(150)
一、电刷镀电源应具备的主要性能	(107)	四、薄膜生长	(153)
二、电源的组成和作用	(108)	五、薄膜结构	(153)
三、电刷镀镀笔	(108)	六、薄膜与衬底的结合	(155)
§ 3-3 电刷镀溶液	(109)	七、薄膜应力	(157)
一、概述	(109)	八、蒸发镀膜装置	(158)
二、常用预处理	(110)	§ 4-2 溅射镀膜	(158)
三、常用电刷镀溶液	(112)	一、溅射现象与溅射产额	(158)
§ 3-4 电刷镀工艺	(122)	二、磁控溅射镀膜	(162)
一、电刷镀的一般工艺过程	(122)	三、射频溅射镀膜	(166)
二、电刷镀主要工艺参数的选择	(122)	四、溅射薄膜结构模型	(167)
三、镀层工艺规范的选择	(124)	§ 4-3 离子镀膜	(168)
四、工序间的水漂洗	(126)	一、粒子轰击效应与荷能粒子性质	(168)
五、在不同金属材料上刷镀	(126)	二、离子镀薄膜的结构模型	(171)
§ 3-5 电刷镀镀层的结合机理与强化机理	(127)	三、二极离子镀膜	(171)
一、镀层与基材的结合机理	(127)	四、活性反应离子镀膜	(172)
二、镀层的强化机理	(129)	五、磁控溅射离子镀膜	(172)
三、镀层的再强化机理	(130)	六、空心阴极电子枪离子镀膜	(172)
§ 3-6 电刷镀技术的新进展	(130)	七、冷阴极电弧离子镀膜	(172)
一、电刷镀镀层的抗接触疲劳性能	(130)	八、离子镀膜设备及工艺	(175)
二、电刷镀非晶态镀层的性能研究	(131)	§ 4-4 化学气相沉积薄膜	(177)
三、电刷镀复合镀层的研究	(132)	一、化学气相沉积 (CVD) 薄膜原理	(177)
四、电刷镀金刚石砂轮工艺研究	(133)	二、CVD 主要工艺参数	(178)
五、摩擦电喷镀技术研究	(134)	三、CVD 反应器	(178)
六、稀土元素在电刷镀技术中的应用	(134)	四、等离子体增强化学气相沉积 (PCVD) 薄膜	(179)
§ 3-7 电刷镀应用实例	(135)	五、PVD 和 CVD 薄膜的特点和主要用途	(181)
一、电刷镀修复机床铸铁导轨工艺的综述	(135)	参考文献	(183)
二、大面积刷镀银在国家乙烯工程中的应用	(139)	第五章 表面涂层的切削加工	(184)
三、电刷镀工艺在模锻锤大修中的应用	(140)	§ 5-1 概述	(184)
四、刷镀技术在油缸修复中的应用	(142)	§ 5-2 堆焊层的切削加工	(184)
五、电刷镀技术在修复摩托车边斗舱模具上的应用	(144)	一、堆焊层的车削	(185)

二、堆焊层的磨削·····	(187)	二、硬度示值分析·····	(227)
§ 5-3 热喷涂涂层的切削加工·····	(189)	§ 6-6 磨损试验法·····	(228)
一、热喷涂涂层的车削·····	(190)	一、磨粒磨损试验·····	(229)
二、热喷涂涂层的磨削·····	(196)	二、滑动摩擦磨损试验·····	(229)
三、热喷涂涂层的电解磨削·····	(199)	三、滚—滑动摩擦磨损试验·····	(230)
四、热喷涂涂层的超声振动车削·····	(204)	§ 6-7 腐蚀试验法·····	(231)
第六章 表面涂层试验法·····	(209)	一、液态浸渍法·····	(231)
§ 6-1 涂层外观检查·····	(209)	二、大气自然腐蚀法·····	(232)
§ 6-2 涂层厚度测量法·····	(209)	三、人造海水浸泡腐蚀法·····	(232)
一、显微镜断面测量法·····	(209)	四、盐雾喷射试验·····	(232)
二、千分尺测量法·····	(209)	五、耐有机气氛腐蚀试验·····	(232)
三、涡电流式厚度计测量法·····	(210)	六、二氧化硫腐蚀试验·····	(232)
四、触头扫描式测厚法·····	(210)	§ 6-8 疲劳强度测试·····	(233)
§ 6-3 涂层孔隙率测定法·····	(211)	§ 6-9 残余应力的测定·····	(233)
一、涂层剥离称量法·····	(211)	一、X射线衍射法·····	(233)
二、直接称量法·····	(211)	二、环状试样弯曲曲率法·····	(234)
三、孔隙着色法·····	(211)	§ 6-10 喷涂时粒子沉积率的测定·····	(235)
四、涂膏法·····	(212)	参考文献·····	(235)
五、高压放电试验·····	(212)	第七章 表面涂层的设计·····	(237)
六、金相法·····	(213)	§ 7-1 表面涂层的设计原则·····	(237)
§ 6-4 结合强度试验·····	(213)	一、表面涂层的目的·····	(237)
一、定性试验·····	(213)	二、表面涂层设计的一般原则·····	(237)
二、定量试验·····	(218)	§ 7-2 表面涂层材料与方法的选择·····	(239)
§ 6-5 硬度测试法·····	(225)	一、表面涂层材料的选择·····	(239)
一、硬度测试方法·····	(226)	二、表面涂层方法的选择·····	(240)



# 第一章 堆焊技术

## § 1-1 概 述

### 一、堆焊与堆焊技术

堆焊是用焊接方法在零件表面堆敷一层金属的工艺过程。其目的不是为了连接零件，而是为了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，或是为了恢复或增加零件的尺寸。

显然，堆焊有两方面的应用，一方面可以恢复零件因磨损或加工过程中的失误而造成的尺寸不足；另一方面可以对零件表面进行改性，以获得所需要的特殊性能。这两方面的应用在表面工程学中称之为零件的修复与强化。所谓修复是指零件尺寸的恢复；强化是指赋予零件表面的特殊性能。

从当前国内外表面工程的状况看，要达到零件的修复和强化的目的，其途径多种多样，例如，热喷涂技术、电刷镀技术、电镀技术、低真空熔结技术、堆焊技术、重熔技术、粘涂技术等，其中堆焊技术是一种常用的修复与强化技术。

所谓堆焊技术，是指为了达到上述目的而采用的各种堆焊工艺途径。例如，某个零件的某个部位在服役过程中发生了严重的磨损，为了修复或强化这个部位，可以采用手工电弧堆焊，也可以采用振动电弧堆焊、埋弧自动堆焊、等离子粉末堆焊等。不管采用何种方法，都有堆焊材料的选择、特定设备的运用、工装夹具的设计、堆焊工艺参数的确定、堆焊后的处理等一系列技术问题。因此凡是与实现堆焊目的有关的工艺问题都应包括在堆焊技术之列。

堆焊的物理本质、冶金过程和热过程的基本规律，与一般焊接工艺基本上没有区别。但是，由于堆焊的主要目的是保证堆焊层的性能，而不是为了连接，因此堆焊有其本身的特点。

#### 1. 必须尽量控制稀释率

堆焊金属的稀释率（以百分比计）等于熔化的母材量（ $B$ ）除以堆焊的金属量和熔化的母材金属量之和，见图 1-1 所示，即

$$\text{稀释率}(\%) = \frac{B}{A+B} \times 100$$

堆焊金属的稀释率大小会直接地影响到堆焊层的成分和性能，因此，它常常成为关系到堆焊质量的关键。对于具体产品堆焊时，必须考虑所采用堆焊方法的稀释率，以便对堆焊材料和堆焊方法的合理搭配作适当的选择，从而保证堆焊层的成分和性能。



图 1-1 堆焊金属稀释率的概念

#### 2. 合理地选择堆焊层的合金系统

堆焊层的合金系统是决定堆焊效果的主要因素，而堆焊层合金系统的确定必须从堆焊零

件的具体情况来确定。这一问题将在下一节中讨论。

### 3. 综合考虑堆焊方法

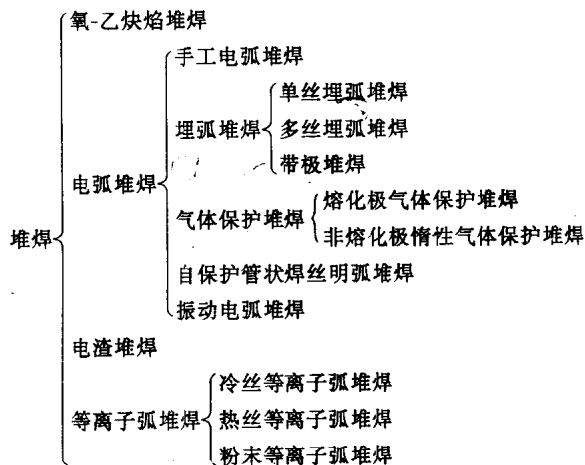
堆焊对象的具体情况有时相差甚大，例如需要堆焊修复的零件有时只有一件，有时却有一大批。对于前者，堆焊修复的生产率虽然也关系到修复成本，但毕竟是有限的；而后者，生产率与经济效益非常密切，这就要综合考虑选择堆焊方法和修复程序，以达到降低成本、保证质量的目的。

## 二、堆焊方法的分类和主要特点

### 1. 堆焊方法的分类

按照热源的特点，可将常用的堆焊方法进行如表 1-1 所示的分类，以便于讨论各种堆焊方法的特点和应用。

表 1-1 按热源特点对堆焊方法的分类



### 2. 常用堆焊方法的主要特点

常用堆焊方法的稀释率、熔敷率和单层堆焊的最小厚度列于表 1-2。

下面将简单介绍常用堆焊方法的主要特点和应用。

(1) 氧-乙炔焰堆焊 氧-乙炔火焰的温度较低 ( $3050\sim 3100^{\circ}\text{C}$ )，将它应用于堆焊时能得到非常小的稀释率 ( $1\%\sim 10\%$ ) 和小于  $1\text{mm}$  厚的均匀薄堆焊层。同时，该堆焊方法设备简单、使用方便、成本低。其缺点是生产率低、工人的劳动强度大。该法一般适用于堆焊较薄的零件，如内燃机排气阀阀面、农机零件等。

(2) 手工电弧堆焊 手工电弧堆焊的设备简单、机动灵活、成本低，应用实心堆焊焊条和管状焊条能获得范围较大的堆焊合金，因此应用很广。但是，它的稀释率较高、生产率较低、堆焊层不太平整，堆焊后的加工量较大，因此通常应用于少量零件的修复和强化。

(3) 埋弧堆焊 埋弧堆焊有单丝、多丝和带极埋弧堆焊等多种。单丝埋弧堆焊的熔深大、稀释率高 ( $30\%\sim 60\%$ )、生产率中等。为了改进这些缺点，可以采用焊丝摆动法、加入填充丝 (冷丝或热丝) 等，以增加熔敷率和降低稀释率。双丝、三丝及多丝埋弧堆焊，电弧将周期性地从一根焊丝移向另一根焊丝，使熔敷率大大提高，而稀释率大为降低。带极埋弧堆焊

是用金属带来代替焊丝作电极，其熔深浅、稀释率低，而熔敷率很高。

表 1-2 几种堆焊方法的主要特点

堆焊方法	应用形式	渗合金方法	稀释率 (%)	熔敷率 (kg/h)	单层堆焊最小厚度 (mm)
氧-乙炔气焊	手 工	实心焊丝; 药心焊丝	1~10	0.45~2.7	0.8
	手 工	合金粉末	1~10	0.45~6.8	0.8
手工电弧焊	手 工	实心焊条; 药心焊条	15~25	0.45~2.7	3.2
熔化极气(自)保护焊	半自动或自动	实心焊丝; 药心焊丝	15~25	2.3~11.3	3.2
钨极气保护焊	手 工	实心焊丝; 药心焊丝	10~20	0.45~3.6	2.4
	自 动	实心焊丝; 药心焊丝	10~20	0.45~3.6	2.4
埋 弧 焊	半自动	药心焊丝	20~60	4.5~9.0	3.2
	单丝自动	药心焊丝	30~60	4.5~11.3	3.2
	多丝自动	药心焊丝	15~25	11.3~27.2	4.8
	串联电弧自动	药心焊丝	10~25	11.3~15.9	4.8
	单带极自动	带 极	10	12~36	3
	双带极自动	带 极	5	22~68	4
等离子弧焊	自 动	合金粉末	5~30	0.45~6.8	0.8
	双热丝自动	焊 丝	5	13~27	2.4~6.4
电 渣 焊	丝 极	焊 丝		20~60	
	板 极	板 极		<150	

多丝埋弧堆焊和带极埋弧堆焊在机车轮缘堆焊、轧辊表面堆焊、化工设备不锈钢衬里堆焊等方面得到了广泛的应用。

(4) 气体保护和自保护明弧堆焊 气体保护堆焊分熔化极气体保护堆焊和非熔化极惰性气体保护堆焊两种。

熔化极气体保护堆焊是用  $\text{CO}_2$ 、Ar 或混合气体作为保护气体，它有较高的熔敷率，但稀释率也较高 (大约 15%~25%)。

非熔化极惰性气体保护堆焊，主要是以手工送进各种合金焊丝进行堆焊。这种方法的保护效果好，合金元素的过渡系数高，稀释率比熔化极气体保护堆焊低；但生产率低，保护气体昂贵。

不加保护气体的自保护药芯焊丝的明弧堆焊的设备简单、方便灵活，但堆焊时的飞溅较大。

(5) 振动电弧堆焊 振动电弧堆焊是等速送进焊丝自动电弧堆焊的一种特殊形式。它的特殊性表现在细直径焊丝 ( $\phi 1.0\sim 2.0\text{mm}$ ) 相对于零件表面作一定频率和振幅的振动，使焊丝与工件间产生短路和脉冲放电；从而使焊丝可以在较低的电压 (12~22V) 并以较小的熔滴稳定而均匀地过渡到工件表面，形成一层薄而均匀的堆焊层。由于这些特殊性，使振动电弧堆焊具有熔深浅、热影响区小、零件的变形较小、其生产率较高、劳动条件也较好等一系列优点。

但是，振动电弧堆焊的电弧区保护作用差，空气中的氢、氧、氮极易侵入电弧区和熔池，在堆焊层以及与基本结合处易产生针眼状气孔；堆焊层的含氢量高，易产生裂纹；因堆焊层受热和冷却不均匀，易造成组织和硬度分布不均等缺陷。

加强对电弧区的保护是提高堆焊质量的有效措施。最常用的保护措施是向电弧区喷射一定量的水蒸气、二氧化碳气等，也可采用焊剂作为保护介质。

水蒸气保护时,水蒸气的压力为 0.05~2MPa,其喷射长度为 180~200mm。

采用二氧化碳气作保护介质时,可有效地防止空气中的氮、氢、氧侵入熔化金属,因而堆焊层具有较好的抗裂性,硬度较均匀,气孔率也有所降低。但二氧化碳保护振动电堆焊要求使用含有脱氧元素的合金钢丝,如 08Mn2SiA 等。

振动电弧堆焊的振动机头有立式和卧式两种;焊丝的振动有电磁振动和机械振动之别。立式振动机头适用于轴类零件的外表面堆焊;卧式振动机头既可用于外圆表面堆焊,又适用于内圆表面的堆焊。

目前,振动电弧堆焊由于受到堆焊材料及堆焊质量的影响,因此只在汽车、拖拉机、工程机械零件的修复中有少量的应用。

(6) 电渣堆焊 电渣堆焊的熔敷率最高,板板电渣堆焊的熔敷率可达 150kg/h,堆焊的厚度也很大,但稀释率并不高。它的缺点是堆焊层严重过热,堆焊后需进行热处理,堆焊层一般不能太薄。因此,它适用于需要较厚堆焊层、堆焊表面形状比较简单的大中型零件,例如热锻模堆焊等。

(7) 等离子弧堆焊 等离子弧堆焊包括冷丝、热丝堆焊,还包括合金粉末堆焊。由于等离子弧的温度很高,因此能堆焊难熔材料,有高的堆焊速度和高的熔敷率,稀释率很低(最低可达 5%左右)。它的缺点是设备成本较高,堆焊时有很强的紫外线辐射和臭氧污染,需进行有效的保护。它在零件修复中已得到了推广应用,如发动机排气阀的阀面堆焊等。

## § 1-2 堆焊材料及选择

### 一、机械零件的磨损

机械零件堆焊修复及强化的目的是恢复尺寸及提高耐磨性能。为了达此目的,首先对零件的磨损现象应有一定的认识,才能合理地选择堆焊材料。

#### 1. 磨损的定义及分类

(1) 磨损的定义 我国摩擦学学会组织编写的《摩擦学名词术语》中对磨损的定义为:物质相对运动时,相对运动表面的物质不断损失或产生残余变形称为磨损。

可以认为,在以下几种情况下,可能会产生磨损:

- 1) 有相互接触的表面。
- 2) 接触表面必须产生相对运动或相互作用(主要是机械作用)。
- 3) 在固体接触表面产生不希望有的材料损耗或迁移。

(2) 磨损的分类 目前,比较通用的分类方法是按照磨损机理为基础,将磨损分为磨料磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、冲蚀磨损和微动磨损等六类。

英国的 T. S. Eyre 曾对工业领域中发生的各种磨损类型所占的比例作了大致的估计,如表 1-3 所示。

#### 2. 材料的耐磨性和评定方法

材料的耐磨性是指某种材料在一定的摩擦条件下抵抗磨损的能力。材料的耐磨性通常是以磨损率的倒数来表示,即

$$\epsilon = \frac{1}{\dot{W}}$$

式中  $\epsilon$  ——材料的耐磨性；

$\dot{W}$  ——材料在单位时间或单位运动距离内产生的磨损量，即磨损率。

表 1-3 各种磨损类型所占的比例

序号	磨损类型	百分比 (%)	序号	磨损类型	百分比 (%)
1	磨料磨损	50	4	微动磨损	8
2	粘着磨损	15	5	腐蚀磨损	5
3	冲蚀磨损	8	6	其它	14

材料的磨损特性并不是材料的固有特性，而是与磨损过程的工作条件如载荷、速度、温度、润滑、表面粗糙度以及材料特性等因素有关的摩擦学系统的特性。因此，材料的耐磨性不仅是材料的函数，也是工作条件的函数，脱离材料的工作条件来评定材料的耐磨性是没有意义的。

在实际工程问题中，往往采用材料的相对耐磨性来评定材料的耐磨性能。材料的相对耐磨性是指试验（或考核）材料与对比材料在同一工况条件下的耐磨性之比：

$$\epsilon_{\text{相}} = \frac{\epsilon_{\text{试}}}{\epsilon_{\text{比}}} = \frac{\frac{1}{\dot{W}_{\text{试}}}}{\frac{1}{\dot{W}_{\text{比}}}} = \frac{\dot{W}_{\text{比}}}{\dot{W}_{\text{试}}}$$

式中， $\dot{W}_{\text{比}}$  和  $\dot{W}_{\text{试}}$  分别为对比材料及试验材料的磨损率； $\epsilon_{\text{相}}$  为试验材料相对于对比材料的相对耐磨性（对比材料的相对耐磨性为 1），它是一个无量纲参数。

采用相对耐磨性来评定材料的耐磨性，在一定程度上可以避免在磨损过程中参量变化或测量误差造成的系统误差，可以比较方便而精确地评定材料的耐磨性。

例如，在研究某重载车辆扭力轴轴头修复材料时，应用新研制的材料修复了三根扭力轴，装于试验车辆的右侧，并在该车辆左侧的相应位置装了三根新轴。在车辆使用过程中定期进行检测，其结果列于表 1-4。由表 1-4 可知，新研制的材料在扭力轴轴头的工况条件下，其相对耐磨性为零件材料的 2.88~13.58 倍。

显然，相对耐磨性也可用于实验室磨损试验机试验结果的处理。

实际上，零件的磨损现象是很复杂的，有时同一个零件表面往往有几种磨损形式。例如，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、中压阀门的密封面，在不同条件下可能发生磨料磨损、粘着磨损、腐蚀磨损等多种磨损形式。因此，在分析实际零件的磨损问题时，要根据实际情况作具体分析，以找出起支配作用的磨损类型，并以此来选择合适的堆焊材料。

## 二、堆焊合金的类型和特点

所有的堆焊合金可归纳为铁基、镍基、钴基、铜基和碳化钨堆焊材料等几种类型。

铁基堆焊合金性能范围广，韧性与抗磨性配合好，能满足许多不同的要求，而且价格较

低,品种也最多,所以应用最广。镍基、钴基堆焊合金价格较高,由于高温性能好、耐腐蚀,主要用于要求耐高温磨损、耐高温腐蚀等场合。铜基材料的耐蚀性好,有时也用于堆焊材料。碳化钨堆焊合金的耐磨料磨损性能最好,虽然其价格较贵,但在耐严重磨料磨损部位堆焊和工具堆焊中占重要地位。

表 1-4 装车考核结果

装车位置		材料	行驶里程 (km)	磨损量 (mm)	磨损速率 (mm/h·km) <sup>①</sup>	相对耐磨性
1	左	新件	4245	0.98	$23.09 \times 10^{-3}$	1
	右	研制材料	4245	0.34	$8.01 \times 10^{-3}$	2.88
2	左	新件	4245	0.645	$15.19 \times 10^{-3}$	1
	右	研制材料	4245	0.09	$2.12 \times 10^{-3}$	7.17
3	左	新件	4245	1.36	$32.04 \times 10^{-3}$	1
	右	研制材料	4245	0.10	$2.36 \times 10^{-3}$	13.58

① 磨损速率的单位为每百公里的磨损量 (mm)。

### 1. 铁基堆焊合金

铁基堆焊合金由于碳含量、合金元素含量和冷却速度的不同,堆焊层的组织可以是马氏体、奥氏体、珠光体和莱氏体碳化物等几种基本类型。

(1) 珠光体类的堆焊材料及特点 珠光体堆焊合金的碳含量一般在 0.5% 以下,合金元素总量在 5% 以下,以 Mn、Cr、Mo、Si 为主要合金元素。

在堆焊后自然冷却时,堆焊层的组织以珠光体为主(包括索氏体和托氏体),其硬度为 20~38HRC。珠光体堆焊材料见表 1-5~表 1-7。

珠光体堆焊合金的特点是堆焊性能优良,具有中等的硬度和一定的耐磨性,冲击韧度好,易机械加工,价格便宜。

(2) 马氏体类的堆焊材料及特点 马氏体类堆焊合金的碳含量一般在 0.1%~1.0% 之间,个别的高达 1.5%,另外还有低或中等含量的合金元素。加入 Mo、Mn、Ni 能提高淬硬性,促进马氏体、贝氏体的形成。加入 Cr、Mo、W、V 可形成抗磨的碳化物。堆焊合金中的 Mn、Si 能改进焊接性能。这类堆焊合金的组织为马氏体,有时也会出现少量的珠光体、贝氏体和残余奥氏体。堆焊层的硬度为 25~65HRC,主要决定于碳含量和转变成马氏体的数量。根据碳含量的高低可将这类合金分为低碳、中碳和高碳马氏体堆焊合金。

表 1-5 珠光体堆焊焊条的成分硬度与用途

序号	牌号	堆焊金属化学成分 (%)								堆焊金属硬度 HRC	用途
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	其它		
1	D102	≤0.20	—	≤3.5	—	—	—	—	—	≥22	车轮、齿轮、轴类等。拖拉机辘子、链轮牙、链轨板、履带板堆焊及恢复尺寸层、过渡层的堆焊
2	D107	~0.15	≤1.50	≤3.5	—	—	—	—	—	≥22	
3	D112	≤0.25	—	—	≤2.0	≤1.5	—	—	≤2.0	≥22	
4	Di27	≤0.2	—	≤4.2	—	—	—	—	—	≥28	

注:堆焊金属化学成分余量为 Fe。

5  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11

表 1-6 珠光体钢堆焊药心焊丝的成分、硬度及用途

序号	焊丝种类	牌 号	堆焊金属化学成分(%)						堆焊金属硬度 HV	用 途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	MAG 药心焊丝	FLUXOFIL50	0.17	0.45	1.4	0.70	—	—	HBS 225~275	用于零件恢复尺寸层堆焊、过渡层堆焊和受金属间磨损的中等硬度零件表面层堆焊。如轴、惰轮、滑轮、链轮、连接杆等
2		FLUXOFIL51	0.20	0.16	1.5	1.25	—	—	HBS 275~325	
3		A-250	0.17	0.42	1.21	1.63	0.50	—	290	
4		A-350	0.23	0.42	1.48	2.70	0.20	—	378	
5		AS-H250	0.06	0.48	1.54	1.17	0.40	—	279	
6		AS-H350	0.10	0.65	1.56	1.66	0.49	—	384	
7	自保护 弧焊药 心焊丝	GN-250	0.18	0.15	1.4	0.57	0.14	—	276	
8		GN-300	0.23	0.26	1.42	1.10	0.21	—	331	
9		GN-350	0.26	0.16	1.42	1.25	0.24	—	360	
10	埋弧堆 焊药心 焊丝	FLUXOCORD50	0.14	0.70	1.6	0.16	—	—	220~270	
11		FLUXOCORD51	0.18	0.70	1.7	1.1	—	—	250~350	
12		S-250/50	0.05	0.67	1.72	0.72	0.48	—	248	
13		S-300/50	0.08	0.84	1.55	0.93	0.47	0.12	300	
14		S-350/50	0.10	0.66	2.04	1.96	0.54	0.17	364	

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 1-7 珠光体钢埋弧堆焊堆焊层的成分、硬度及用途

序号	规格 (mm)	焊剂/带极牌号	堆焊层金属化学成分(%)					堆焊层数	堆焊金属硬度 HV	用 途
			C	Si	Mn	Cr	Mo			
1	50×0.4	BH-200/SH-10	0.08	0.57	1.61	0.50	0.20	3	190~220	各种辊子及硬堆焊层打底焊
2	50×0.4	BH-260/SH-10	0.08	0.65	1.61	0.80	0.30	3	240~260	各种辊子及离心铸造模等的堆焊
3	50×0.4	BH-360/SH-10	0.12	0.35	0.65	2.22	1.2 (V0.12)	3	310~360	连铸机夹送辊、送料台辊子

注：1. 带极 SH-10 的成分 (%) 为：C 0.05、Si 0.03、Mn 0.35、P 0.018、S 0.005，其余为 Fe。

2. 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

低碳马氏体堆焊合金的碳含量小于 0.30%，堆焊层的组织为低碳马氏体，硬度为 25~55HRC。这类合金的特点是抗裂性好，堆焊前不需预热，硬度较高，有一定的耐磨性，能用碳化钨刀具加工，能承受中度冲击，线膨胀系数较小，变形和开裂倾向较小。

中碳马氏体堆焊合金的碳含量在 0.30%~0.60% 之间，堆焊层的组织为片状马氏体，有时也有少量板条状马氏体、珠光体和残余奥氏体。其硬度为 38~53HRC，具有较好的耐磨性和中等抗冲击能力。开裂倾向比低碳马氏体堆焊合金大，因此堆焊前一般应预热到 250~350℃。

高碳马氏体堆焊合金的碳含量在 0.60%~1.0% 之间，有时高达 1.5%。堆焊层的组织是片状马氏体和残余奥氏体，其硬度高达 60HRC 左右，具有良好的抗磨料磨损性能，但抗冲击

性能较差，堆焊时易产生裂纹，因此一般应预热到 350~400℃。堆焊后只能用磨削加工。

马氏体堆焊合金的成分、硬度及用途见表 1-8~表 1-12。

表 1-8 低碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	堆焊金属化学成分(%)						堆焊金属硬度 HRC	用途
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	DM-742	0.09	0.70	2.0~2.2	6.0~6.5	0.80~1.00	0.45	42~45	吊卡、吊车轮、各种辊子、轴等堆焊
2	广堆 1#	0.13	0.87	4.0	—	5.1	0.16	47	各种辊子、齿轮、轴、销堆焊
3	广堆 2#	0.20	0.23	0.30	5.5	2.3	0.19	49	
4	广堆 3#	0.21	0.35	5.4	5.4	—	0.21	49.5	
5	广堆 4#	0.24	0.68	1.4	4.0	—	0.13	51	
6	D217A	≤0.30	0.8~1.2	1.2~1.8	1.8~2.2	≤1.5	Ni1.4	≥50	轧辊、矿石破碎机部件、电铲斗齿、挖掘机斗齿堆焊

注：1. 序号 1~5 为非标产品，DM-742 为哈焊所研制，余为广州焊条厂研制。

2. 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 1-9 中碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	堆焊金属化学成分(%)						堆焊金属硬度 HRC	用途
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	D172	≤0.50	—	—	≤2.5	≤2.5	—	≥40	齿轮、挖泥斗、拖拉机刮板、犁犁、矿山机械磨损件堆焊
2	D167	≤0.45	≤1.0	≤6.5	—	—	—	≥50	大型推土机、动力铲滚轮、汽车环链、农业与建筑磨损件堆焊
3	D212	0.30~0.60	—	—	≤5.0	≤4.0	—	≥50	齿轮、挖斗、矿山机械磨损件的堆焊
4	D237	0.30~0.60	—	—	8.0~10.0	≤3.0	0.5~1.0	≥50	水力机械、矿山机械磨损件的堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

^

表 1-10 高碳马氏体钢堆焊焊条的成分、硬度及用途

序号	牌号	堆焊金属化学成分(%)						堆焊金属硬度 HRC	用途
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	D207	0.50~1.00	≤1.0	≤2.5	≤3.5	其它 ≤1.00	—	≥50	推土机零件、螺旋桨堆焊
2	D227	0.45~0.65	—	—	4.0~5.0	2.0~3.0	0.40~0.50	≥55	掘进机滚刀、叶片堆焊

注：堆焊金属化学成分余量为 Fe。

7  
8  
9  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
11



表 1-11 马氏体钢堆焊药心焊丝的成分、硬度及用途

序号	焊丝名称	牌号 焊丝/焊剂	堆焊金属化学成分(%)						堆焊金属硬度 HV	用途
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	CO <sub>2</sub> 焊 药心焊丝	A-450	0.19	0.66	1.52	1.83	0.60	—	445	履带辘、链轮、惰轮、轴、销、链带、搅叶堆焊
2		A-600	0.38	0.32	2.76	6.16	3.25	—	628	挖泥船泵壳, 输送螺旋推土刀堆焊
3	自保护 弧焊药 心焊丝	GN450	0.45	0.14	1.80	2.65	0.49	—	480	驱动链轮、轴、销、搅叶、链带、辘轮、齿轮堆焊
4		GN700	0.65	0.89	1.27	5.92	1.61	—	675	推土机刀、搅叶、割刀、泵壳、搅拌机堆焊
5	埋弧焊 药心焊丝	S400/50	0.12	0.80	2.04	1.99	0.54	0.19	400	推土机铲土机的引导轮、支重轮、惰轮、链轨节堆焊
6		S450/50	0.20	0.60	1.50	2.80	0.80	0.30	450	
7		S600/80	0.25	0.90	1.55	7.0	4.2	W 0.45	580	

注: 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

表 1-12 马氏体钢埋弧堆焊堆焊层成分、硬度及用途

序号	名称	焊剂/带极 牌号	堆焊金属化学成分(%)							堆焊金属硬度 HV	用途
			层数	C	Si	Mn	Cr	Mo	V		
1	堆焊带极 (50×0.4mm <sup>2</sup> )	BH-400/SH-10	1	0.13	0.31	0.56	3.26	0.77	0.11	345	各种辘子堆焊
			2	0.13	0.34	0.55	4.02	0.96	0.12	377	
			3	0.16	0.35	0.56	4.15	0.99	0.12	392	
2		BH-450/SH-10	3	0.16	0.43	0.56	5.45	0.95	0.13	430~480	各种辘子堆焊

注: 堆焊金属化学成分余量为 Fe。

### (3) 高速钢及工具钢堆焊合金

按其用途, 这类堆焊合金分为高速钢、热加工工具钢和冷加工工具钢堆焊合金。

高速钢堆焊合金的碳含量在 0.70%~1.0% 之间, W、Mo 的含量较高。堆焊层的组织为马氏体加碳化物, 还有残余奥氏体, 其硬度高于 55HRC, 具有良好的红硬性 (达 600℃)。这类合金的成分、硬度和用途见表 1-13。

热工具钢堆焊合金主要用于热锻模和热轧辊的堆焊。这类堆焊合金除有较高的高温硬度外, 还要有较高的强度和冲击韧性。因此, 它的碳含量较高速钢堆焊合金低些。这类合金还应具有较高的抗冷热疲劳性能以及高的抗高温氧化性能、耐磨性能。用于热锻模的堆焊合金见表 1-14, 用于热轧辊堆焊合金见表 1-15。