

电弧喷涂技术

■ 易春龙 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

电弧喷涂技术

■ 易春龙 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电弧喷涂技术/易春龙编著. --北京: 化学工业出版社, 2006.7
ISBN 7-5025-9117-6

I. 电… II. 易… III. 电弧喷涂 IV. TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 083917 号

电弧喷涂技术

易春龙 编著

责任编辑: 段志兵

文字编辑: 刘志茹

责任校对: 郑捷

封面设计: 韩飞

*

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)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 438 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9117-6

定 价: 36.00 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



图5-20 钢铁锈蚀A等级



图5-21 钢铁锈蚀B等级

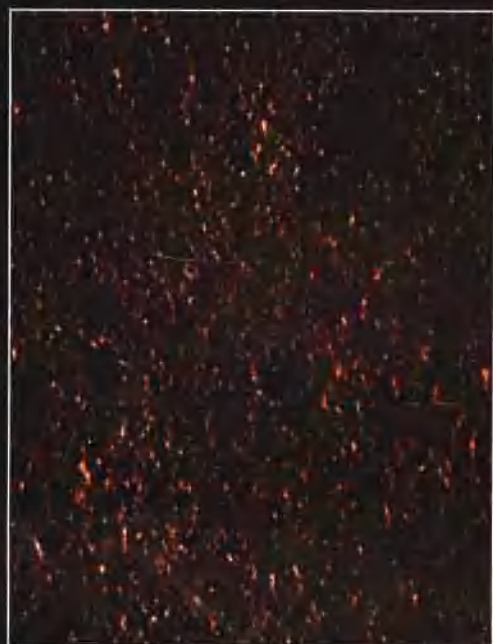


图5-22 钢铁锈蚀C等级

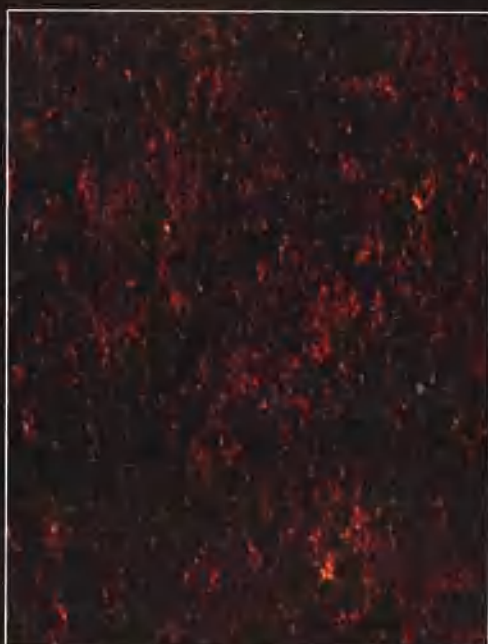


图5-23 钢铁锈蚀D等级



图5-24 钢铁喷砂除锈ASa3等级



图5-25 钢铁喷砂除锈BSa3等级



图5-26 钢铁喷砂除锈CSa3等级



图5-27 钢铁喷砂除锈DSa3等级

前 言

电弧喷涂技术是新兴的表面工程学科中热喷涂技术的一个重要分支，也是一种材料表面防护和强化的新技术，在制备防腐蚀涂层、耐磨损涂层、耐高温抗氧化涂层、电导和电磁屏蔽涂层、恢复尺寸涂层、装饰性涂层和其他特种功能性涂层等方面具有独特的优越性，并且具有能源消耗低、生产效率高、涂层结合强度高、生产成本低等特点。电弧喷涂技术的实际应用已经有超过八十年的历史，工业发达国家已在许多大型钢结构防护工程中取得很好的应用效果。随着电弧喷涂技术、设备和材料的发展，电弧喷涂技术的应用范围正在进一步扩大，在各行各业都可以找到具体用途。电弧喷涂技术也是目前大型钢结构防护工程中防腐蚀寿命最长、寿命周期成本最低的防护涂层技术之一，其技术优势和长期的经济性已经得到世界公认。

电弧喷涂技术在国内的研究和应用都比较晚，国内许多从事设计、施工和监理的工程技术人员对该技术的了解不多，这方面的著作也很少见。普及和推广电弧喷涂技术，让更多的人了解和应用该技术，充分发挥该技术的价值，节约宝贵的社会资源，是编写这本书的初衷。

本书的编写过程中，编者查阅了大量的国内外相关文献资料，并结合了十年来从事电弧喷涂技术和设备研究的成果和应用经验，希望能够系统地总结近年来国内外电弧喷涂技术、设备、材料、工艺和质量控制、涂层设计与测试方法、操作安全和环境保护等方面的进展情况，并及时反映一些最新的研究成果、应用实例和发展动向，以期对电弧喷涂技术在我国工业上的应用和发展有所促进。

全书共8章。第1章绪论，对热喷涂技术进行了概述，然后对电弧喷涂技术原理、发展概况作了介绍，与其他几种表面技术进行了对比，对电弧喷涂涂层的经济性（寿命周期成本）进行了分析，简单介绍了应用领域和一些实例；第2章主要介绍了电弧喷涂系统的组成和国内外电弧喷涂设备的发展情况；第3章对电弧喷涂材料按化学成分进行了分类，介绍了线材的供货技术条件、性能、质量检测方法等，简要介绍了电弧喷涂材料的生产方法；第4章为电弧喷涂涂层设计，介绍了涂层设计影响因素、腐蚀环境的分类、典型腐蚀环境下的涂层和复合涂层体系设计的指导性原则等；第5章为电弧喷涂工艺，介绍了工艺设计、表面预处理、电弧喷涂、封闭处理和焊缝处理方法等；第6章为电弧喷涂质量控制，对质量控制程序和质量控制检验点进行了分析；第7章为电弧喷涂层性能试验与测试，主要阐述了电弧喷涂涂层的试验方法与标准，介绍了国内外对喷涂层的试验情况；第8章为电弧喷涂操作安全与环保，介绍了安全施工和消防措施，以及一些常用的操作人员防护装备。附录中列举了相关的标准目录，同时附上了国际标准ISO 2063:2005《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》的中文全文。

本书的主要读者对象为希望了解金属喷涂技术的工程技术人员、与钢结构防腐蚀和机械零部件耐磨损修复有关的设计人员、从事防腐蚀工程施工及监理的专业技术人员和技

干部，还可以作为电弧喷涂操作人员的业务知识培训和考核用的参考教材。本书也可以供高校相关专业的本、专科学生和研究生学习参考。

由于编者的阅历、知识和能力有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

易春龙

2006年6月于中国矿业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 热喷涂技术概述	1
1.1.1 热喷涂技术简介	1
1.1.2 热喷涂的分类	2
1.1.3 典型热喷涂工艺	4
1.1.4 热喷涂涂层命名方法	9
1.1.5 热喷涂涂层的基本特性.....	10
1.2 电弧喷涂技术原理.....	11
1.2.1 电弧喷涂技术.....	11
1.2.2 电弧特性及熔化-雾化过程	12
1.2.3 电弧喷涂的主要特点.....	14
1.3 电弧喷涂技术的发展概况.....	15
1.4 电弧喷涂技术与其他表面技术的对比.....	17
1.4.1 电弧喷涂与堆焊的对比.....	17
1.4.2 电弧喷涂与热浸镀的对比.....	18
1.4.3 电弧喷涂与电镀的对比.....	18
1.4.4 电弧喷涂与涂料的对比.....	19
1.5 电弧喷涂涂层的寿命周期成本.....	20
1.6 电弧喷涂技术的应用.....	22
1.6.1 钢桥梁电弧喷涂防腐蚀及应用.....	24
1.6.2 煤矿钢结构电弧喷涂防腐蚀及应用.....	26
1.6.3 水工钢结构电弧喷涂防腐蚀及应用.....	26
1.6.4 电力行业电弧喷涂防腐蚀及应用.....	28
1.6.5 广播电视铁塔电弧喷涂防腐蚀及应用.....	30
参考文献	30
第 2 章 电弧喷涂系统	32
2.1 电弧喷涂系统简介.....	32
2.1.1 电弧喷枪.....	33
2.1.2 电弧喷涂电源.....	53
2.1.3 线材输送机.....	64
2.1.4 电弧控制器.....	69
2.1.5 压缩空气系统.....	72
2.1.6 喷涂辅助装置.....	74

2.2	电弧喷涂设备的验收检查	74
2.2.1	喷涂电源	75
2.2.2	雾化气输入	75
2.2.3	喷嘴系统	75
2.2.4	线材输送系统	75
2.2.5	监视和控制	75
2.2.6	复验	75
2.2.7	检查报告	75
2.3	电弧喷涂设备的重要发展	76
2.3.1	真空电弧喷涂设备	76
2.3.2	微机控制电弧喷涂设备	77
2.3.3	矩形线材电弧喷涂设备	78
2.3.4	水下电弧喷涂设备	79
2.3.5	电弧喷涂机器人	80
2.4	电弧喷涂专家系统	81
	参考文献	83
第3章	电弧喷涂材料	85
3.1	电弧喷涂材料的种类	85
3.1.1	锡和锡合金线材	85
3.1.2	锌和锌合金线材	86
3.1.3	铝和铝合金线材	88
3.1.4	铜和铜合金	90
3.1.5	铁和铁合金线材	91
3.1.6	镍和镍合金线材	94
3.1.7	钨线材	96
3.1.8	其他线材	97
3.2	电弧喷涂材料的供货技术条件	98
3.2.1	化学成分	98
3.2.2	尺寸及精度	98
3.2.3	包装及标记	99
3.2.4	贮存及运输	100
3.3	电弧喷涂材料的性能	100
3.3.1	线材的物理性能	100
3.3.2	线材的力学性能	100
3.3.3	线材的表面性状	100
3.3.4	线材的使用性能	101
3.4	电弧喷涂材料的验收和检测	101
3.4.1	质量保证书	101
3.4.2	验收标准和质量控制	102
3.4.3	抽样检测	102

3.5 电弧喷涂材料的生产	102
参考文献	104
第4章 电弧喷涂涂层设计	105
4.1 电弧喷涂涂层设计的影响因素	105
4.1.1 环境因素	105
4.1.2 其他因素	107
4.2 工作环境的分类	109
4.2.1 国外标准对腐蚀环境的分类	109
4.2.2 我国对大气腐蚀环境的分类	110
4.2.3 不同环境对钢材腐蚀速度的影响	112
4.3 典型环境下的防腐蚀涂层设计	112
4.3.1 淡水浸渍环境下钢铁电弧喷涂防护涂层的选择	112
4.3.2 海水浸渍环境下钢铁电弧喷涂防护涂层的选择	113
4.3.3 大气暴露环境中钢铁电弧喷涂防护涂层的选择	113
4.3.4 高温环境中钢铁电弧喷涂防护涂层的选择	113
4.3.5 混凝土中钢筋的阴极保护电弧喷涂防护涂层的选择	114
4.3.6 电弧喷涂防滑涂层	114
4.3.7 电弧喷涂耐磨损涂层	115
4.4 涂层材料的选择	115
4.5 涂层厚度的选择	116
4.6 电弧喷涂复合涂层体系设计	118
4.6.1 电弧喷涂长效防腐复合涂层体系	118
4.6.2 电弧喷涂阶梯复合涂层体系	123
4.6.3 电弧喷涂伪合金复合涂层体系	126
4.7 防腐蚀涂层体系设计快速指导	130
4.7.1 美国 TAFE 公司防腐蚀涂层体系设计	131
4.7.2 英国 Metallisation 公司防腐蚀涂层体系设计	133
参考文献	134
第5章 电弧喷涂工艺	135
5.1 电弧喷涂工艺设计	135
5.1.1 电弧喷涂工艺设计要求	135
5.1.2 电弧喷涂典型工艺流程	139
5.1.3 电弧喷涂车间工艺设计	139
5.2 表面预处理	146
5.2.1 概述	146
5.2.2 表面净化处理	147
5.2.3 表面喷砂处理	149
5.2.4 其他表面处理方法	170
5.2.5 黏结底层	173
5.2.6 表面处理方法对结合强度的影响	174

5.2.7	非喷涂面的遮蔽	175
5.2.8	喷涂表面的合理设计	176
5.3	电弧喷涂	176
5.3.1	喷涂工艺要求	177
5.3.2	喷涂工艺参数	179
5.3.3	涂层检验标准和方法	184
5.4	喷涂层的封闭处理	185
5.4.1	封闭的作用和原理	185
5.4.2	封闭剂的定义及性能要求	186
5.4.3	封闭剂的选用原则	187
5.4.4	几种封闭剂介绍	189
5.4.5	封闭处理工艺和方法	192
5.5	焊缝的喷涂处理	193
5.5.1	焊缝喷涂处理的要求	193
5.5.2	焊缝喷涂处理工艺与方法	193
5.5.3	焊缝喷涂层的检验	194
	参考文献	194
第6章	电弧喷涂质量控制	196
6.1	概述	196
6.2	电弧喷涂质量要求的控制程序	197
6.2.1	选择喷涂质量要求的流程图	197
6.2.2	合同和设计的评审	197
6.2.3	分承包	199
6.2.4	热喷涂人员	199
6.2.5	质量测试人员	199
6.2.6	设备	200
6.2.7	热喷涂的实施	201
6.2.8	热喷涂耗材	201
6.2.9	基体材料的贮存和搬运	201
6.2.10	与热喷涂相关的检查和试验	201
6.2.11	不合格与纠正措施	202
6.2.12	校准	203
6.2.13	标识和可追溯性	203
6.2.14	质量记录	204
6.3	质量控制检验点	204
6.3.1	表面污染状况	204
6.3.2	表面保护	204
6.3.3	压缩空气	205
6.3.4	喷砂磨料	205
6.3.5	喷砂质量	205

6.3.6	环境和时间	206
6.3.7	喷涂设备	207
6.3.8	喷涂操作	207
6.3.9	封闭处理	207
6.3.10	中间漆和面漆	208
6.4	售后服务	208
	参考文献	209
第7章	电弧喷涂层性能试验与测试	210
7.1	概述	210
7.2	喷涂层试验方法与标准	211
7.2.1	国家标准	211
7.2.2	涂层物理性能的测定	211
7.2.3	涂层力学性能的测定	224
7.2.4	涂层化学性能的测定	237
7.3	国内外户外试验研究	242
7.3.1	国外对热喷涂层的户外试验研究	242
7.3.2	国内对热喷涂层的户外试验研究	244
7.4	电弧喷涂效率与雾化试验	244
7.4.1	电弧喷涂效率与沉积率	244
7.4.2	电弧喷涂雾化效果	245
	参考文献	245
第8章	电弧喷涂操作安全与环保	246
8.1	安全施工	246
8.1.1	表面处理安全施工	246
8.1.2	电弧喷涂安全施工	247
8.1.3	封闭和面漆安全施工	251
8.1.4	高空作业安全	251
8.1.5	受限空间作业安全	252
8.1.6	安全计划	252
8.2	操作人员防护装备	253
8.3	环保措施和设备	257
	参考文献	258
附录	259
附录一	相关国家标准目录	259
附录二	ISO 2063: 2005 热喷涂—金属和其他无机覆盖层—锌、铝及其合金 (第三版)	261

第 1 章 绪 论

1.1 热喷涂技术概述

1.1.1 热喷涂技术简介

热喷涂技术是指利用不同的热源来加热各种被喷涂的材料（如金属、合金、陶瓷、塑料及复合材料等）至熔融状态，并借助于雾化气流的加速使其形成“微粒雾流”，高速喷射到经过表面预处理的工件上，形成与基体紧密结合的堆积状喷涂层的技术。图 1-1 是热喷涂原理示意图，固态的喷涂材料通过热喷涂设备后被热源加热至熔融态，然后被雾化气流高速喷射到基体表面形成涂层。这个热喷涂过程又可分为四个部分：材料熔化、雾化和加速、粒子束飞行和涂层形成。热喷涂的涂层形成及与基体结合的机理如图 1-2 所示，涂层的形成主要有四个过程，分别为飞行的喷涂粒子飞向基体表面、粒子高速撞击到基体表面、粒子传热给基体、粒子凝固，喷涂层与基体的结合机理有机械结合（或称锚固结合）和局部熔结（或称冶金结合）两种方式。

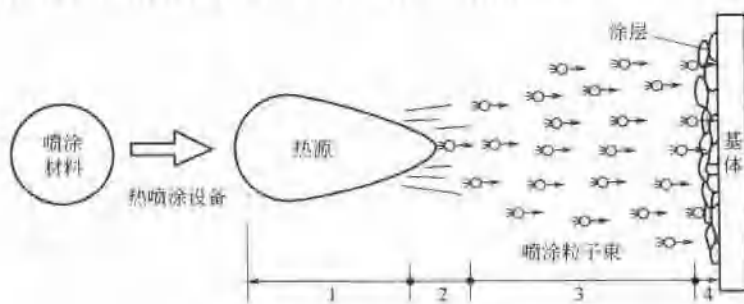


图 1-1 热喷涂原理示意图

1—材料熔化；2—雾化和加速；3—粒子束飞行；4—涂层形成

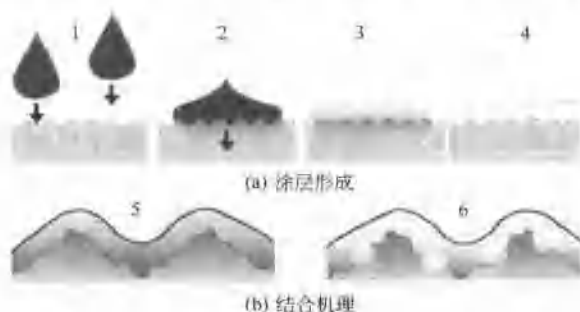


图 1-2 热喷涂的涂层形成及结合机理示意图

1—飞行的喷涂粒子；2—撞击到基体表面；3—粒子传热给基体；4—粒子凝固；5—机械结合；6—局部熔结

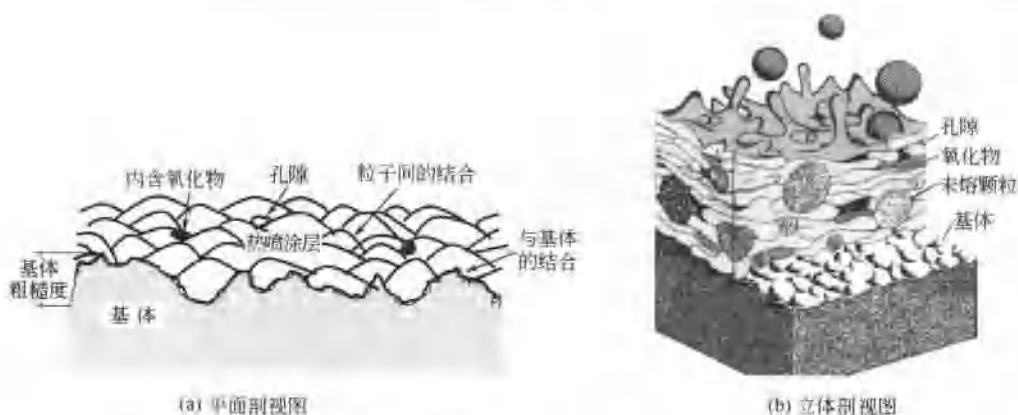


图 1-3 热喷涂层的剖面示意图

图 1-3 是一个典型的热喷涂层的剖面示意，可以看到涂层是许多粒子撞击变形后堆积而成的，涂层并不是同质的，还含有一定程度的孔隙、金属氧化物、未完全熔化的颗粒和其他一些内含物。为了增强涂层与基体的结合，基体一般要喷砂处理以获得良好的表面清洁度和表面粗糙度，提高基体表面温度或熔滴温度均有利于涂层与基体的结合，热喷涂材料可以是任何能熔化的物质，包括金属、金属化合物、氧化物、玻璃和聚合物材料等，这些喷涂材料可以被制成粉末、线材或棒材。热喷涂涂层的性能取决于所用的喷涂材料，喷涂工艺、喷涂参数和涂层的后处理。

随着科学技术的发展，现代的热喷涂技术早已突破了传统的热喷涂技术的概念，成为一项综合性的高新技术。通过对“热源”的研究，已从传统的熔液喷涂和氧-乙炔火焰喷涂发展到多种气源（如丙烷、丙烯和其他碳氢化合物）喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、激光喷涂、电子束喷涂等；通过利用空气动力学对热喷涂速度的研究，喷涂粒子的射流速度从传统的粉末火焰喷涂的 30~50m/s，发展到高速电弧喷涂的 250~500m/s，而超音速火焰喷涂（HVO/AF）的速度更是高达 700~1500m/s 以上；通过对热喷涂材料的研究，不仅从普通的金属材料喷涂发展到金属、合金、陶瓷、塑料及各种复合材料都可以喷涂，更是可以通过热喷涂的方法来合成和制造新的材料。因此，现代的热喷涂技术是各种喷涂方法的总称，是一项十分重要的表面工程技术。

1.1.2 热喷涂的分类

近百年来，热喷涂技术的发展十分迅速，热喷涂工艺方法随着技术的进步也在不断扩展。热喷涂技术可以简明地分成四大类：火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和特种喷涂。实际上，通常所说的火焰喷涂是指以氧-乙炔等可燃性气体火焰为热源的喷涂，又可以细分为线材火焰喷涂、粉末火焰喷涂、棒材火焰喷涂、气体爆炸火焰喷涂、高速/超音速火焰喷涂等。如果按照所使用的热源来分类，热喷涂通常可以分为熔体热喷涂、火焰热喷涂、电能热喷涂和高能束热喷涂等，其中电能热喷涂又主要包括电弧喷涂、等离子喷涂和线爆喷涂，高能束热喷涂主要有激光喷涂和电子束喷涂两种。

按照所选用的热源和喷涂材料的形状来分类，热喷涂工艺方法可分类如图 1-4 所示。

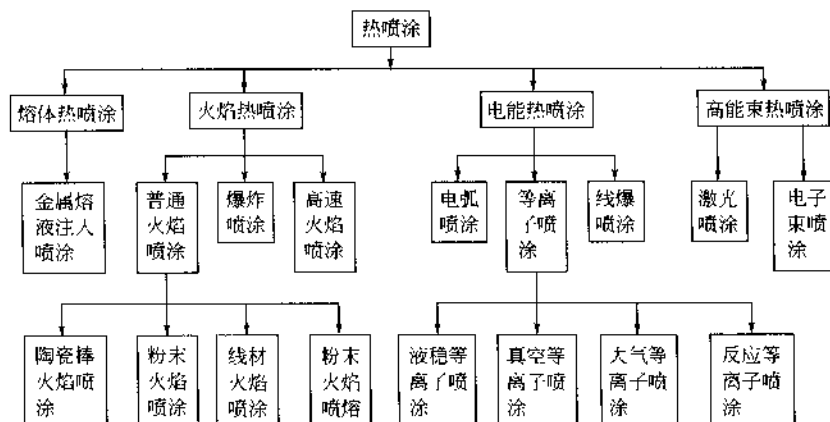


图 1-4 热喷涂方法分类

同样地，我们对热喷涂涂层也可以按照腐蚀环境和使用要求的不同来分类，热喷涂涂层可分为耐大气腐蚀热喷涂层、耐海水腐蚀热喷涂层、耐土壤腐蚀热喷涂层、耐高温腐蚀热喷涂层等。

另外，也有人将常用的热喷涂涂层划分为如下三大类。

(1) 防腐蚀的热喷涂锌、铝及其合金涂层

热喷涂锌、铝及其合金涂层是重要的防腐蚀涂层，因为它们相对于钢铁来讲是阳极，换句话说，它们先于钢铁腐蚀，起到牺牲自我来保护钢铁的作用。在钢铁结构的防腐蚀方面，锌与铝相似，但锌涂层对钢铁基体的电化学保护作用要好于铝涂层。另一方面，铝涂层比较硬，有更高的附着力，并且表面能形成一层保护性的氧化膜来自我保护。因此铝涂层实际上对钢铁起到了阳极性涂层和隔离涂层的双重作用：铝涂层在表面完好时，其惰性的表面氧化膜起着隔离腐蚀介质的作用；一旦铝涂层表面受到损伤，它又能提供活性的阴极保护作用。锌铝合金的性能，则基本上介于这两者之间，也取决于合金中锌、铝含量的比例。Zn85-Al15 合金（按质量比）是一种广泛应用的热喷涂材料，据认为它是这两种金属性能的最佳配比。

(2) 喷塑涂层

热喷涂塑料（高分子聚合物）是利用火焰喷涂或者等离子喷涂方法来喷涂热塑性的粉末。这些高分子聚合物材料有一个较低的熔化温度，其熔点低于金属或其他无机物，以便于进行热喷涂，同时应保证聚合物材料不能在火焰中再次聚合、分解或者烧结。热喷涂塑料也可用于钢结构的防腐蚀应用，其防腐机理与涂料相似，只起到将腐蚀介质与钢铁基体隔离的作用。热喷涂的塑料粉末中不含有对环境有害的有机挥发物（VOC）。在环境气温很低的条件下，涂料已不能正常使用，而热喷塑涂层还照样可以在钢铁上进行涂装。塑料粉末火焰喷涂与其他喷涂工艺的不同之处在于塑料喷涂层可以获得完全无孔隙的、表面致密光滑的涂层，其涂层外观质量已接近静电喷涂。如果在塑料粉末中加入各种颜料粒子，则还可以获得具有各种美丽色彩的塑料喷涂层，使其具有很好的装饰功能。

(3) 其他的热喷涂涂层

其他的热喷涂涂层材料多用于一些特殊应用。例如，特殊的金属合金涂层可用于诸如农机具磨损表面、喷气发动机部件、机械工具等需要高硬度高耐磨涂层的表面，铁基金属合金

常用来修复磨损的设备，还有专门用于耐高温腐蚀的铁基合金。一些工程陶瓷热喷涂层已经在人工关节等医疗卫生领域获得应用；导电金属涂层已经被用来屏蔽电磁场以保护灵敏的电子设备；陶瓷涂层也已经被用来制作低摩擦系数的减摩涂层。上述应用与其他更多的应用也显示出了热喷涂层的重要价值。

1.1.3 典型热喷涂工艺

工程用的典型热喷涂工艺主要有：火焰喷涂（flame spraying）、电弧喷涂（arc spraying）、等离子喷涂（plasma spraying）、高速火焰喷涂（HVOF spraying）及冷气动力喷涂，简要介绍如下。

(1) 火焰喷涂

火焰喷涂是热喷涂最古老的形式，可以使用各种各样的原材料，包括金属或合金线材、陶瓷棒材、金属和非金属粉末。在火焰喷涂中，原材料不断被送到喷枪头部，在那里原材料被燃烧的火焰所熔化，并被雾化气流吹喷到工件基体上。最经常使用的可燃性气体有乙炔、丙烷和甲基乙炔气等，而压缩空气是最经常使用的雾化气体。目前最普遍使用的火焰喷涂工艺还是氧-乙炔火焰喷涂，因为氧-乙炔气体燃烧能提供较高的温度并且易于控制。丙烷燃烧的火焰温度比较低，可用于低熔点的材料，如铝、锌和塑料等的热喷涂。

火焰喷涂系统最基本的组成包括火焰喷枪、喷涂材料和输送装置、氧气和燃气供给装置、压缩空气供给装置。图 1-5 为典型的火焰喷涂系统示意图，图 1-6 和图 1-7 分别是线材和粉末火焰喷枪工作原理示意图。图 1-8 和图 1-9 分别是线材火焰喷枪和粉末火焰喷枪喷涂工作实例图。

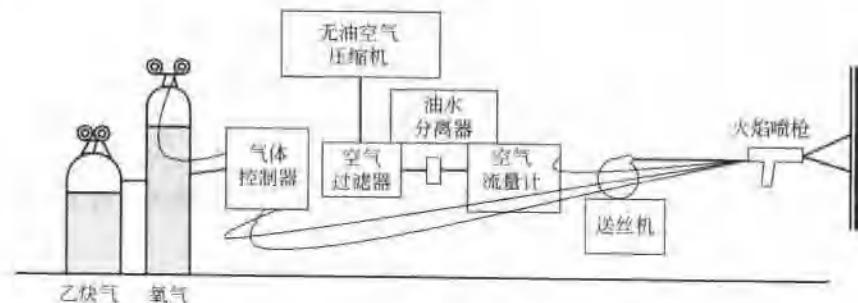


图 1-5 典型的火焰喷涂系统示意图

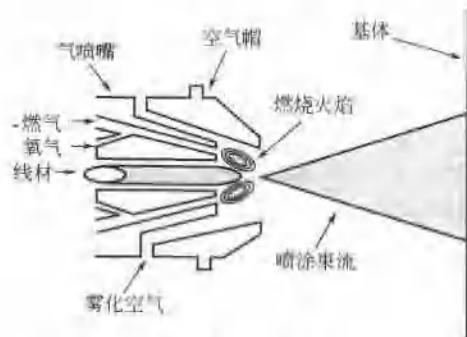


图 1-6 线材火焰喷枪工作原理示意图

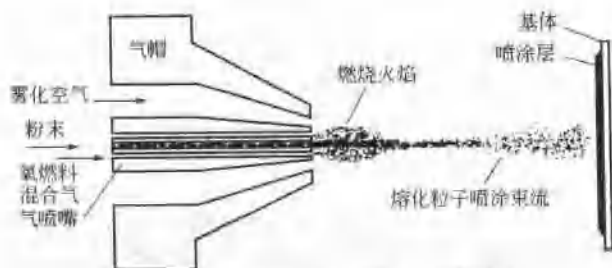


图 1-7 粉末火焰喷枪工作原理示意图



图 1-8 线材火焰喷枪喷涂实例图



图 1-9 粉末火焰喷枪喷涂实例图

(2) 电弧喷涂

电弧喷涂是钢结构防腐蚀、耐磨损和机械零件维修等实际工程应用中最普遍使用的一种热喷涂方法，也是本书介绍的重点。锌、铝及其合金喷涂层是最常用的钢结构防腐蚀涂层，电弧喷涂工艺是这类防腐涂层大面积涂装施工的最经济和最高效的热喷涂方法。与线材火焰喷涂相比，电弧喷涂具有能量消耗低、生产效率高、涂层结合强度高、生产成本低等特点。但电弧喷涂只能使用导电的线材，如金属、合金、金属-金属氧化物的混合物等制成的实芯或粉芯线材。如果使用两根材料不同的线材进行电弧喷涂，还可获得“伪合金”涂层。图 1-10 是典型的电弧喷涂系统示意图，包括直流喷涂电源、线缆、电弧喷枪、线材输送机、压缩空气供给系统等。图 1-11 是电弧喷枪工作原理示意图。

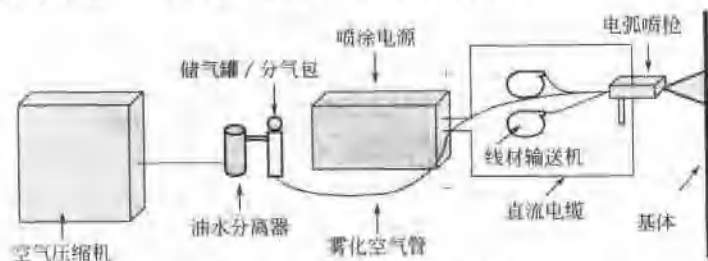


图 1-10 电弧喷涂系统示意图

(3) 等离子喷涂

等离子喷涂也是一项重要的热喷涂工艺技术，几乎所有的热喷涂粉末材料都可以通过等离子喷涂制备成涂层。已获得应用的等离子喷涂方法主要有大气等离子喷涂、真空等离子喷涂、低压真空等离子喷涂、液体稳定等离子喷涂、可控气氛等离子喷涂和反应等离子喷涂