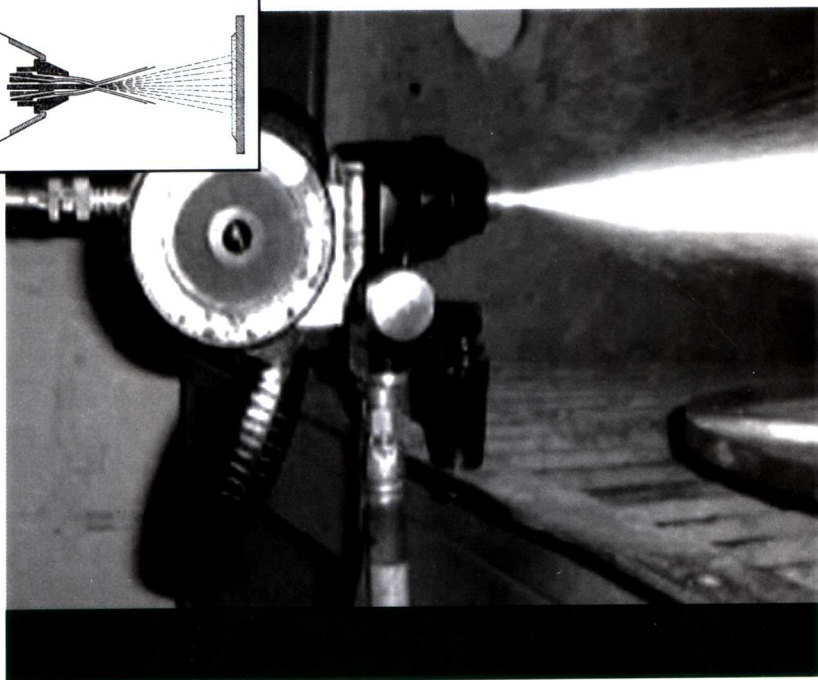
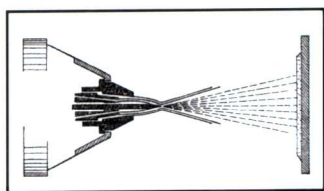


张忠礼 编著

钢结构 热喷涂防腐蚀技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

钢结构热喷涂防腐蚀技术

张忠礼 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

钢结构热喷涂防腐蚀技术/张忠礼编著. — 北京:
化学工业出版社, 2004.5
ISBN 7-5025-5551-X

I. 钢… II. 张… III. 钢结构-热喷涂-防腐
IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043887 号

钢结构热喷涂防腐蚀技术

张忠礼 编著

责任编辑: 段志兵 刘丽宏

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

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

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 328 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5551-X/TQ·1986

定 价: 30.00 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

热喷涂防腐技术是钢结构长效防腐的一种新型方法。这种方法可以保护钢结构在大气、土壤或水中至少 20 年不需任何维护和超过 40 年后的少量维护。世界许多国家几十年的现场试验和工程应用证明：热喷涂防腐技术是迄今为止对大型及重要钢结构做长效防腐的最好方法。目前在欧洲、北美以及日本等地对该技术的应用已非常广泛，许多钢结构桥梁、铁塔、水利设施、海洋设施、地下埋设的钢结构以及盛装油、气及化学品的钢制贮罐都采用了这项长效防腐技术。现在，热喷涂长效防腐技术已经开始向传统的防腐方法提出挑战。正如世界的著名腐蚀防护杂志《Journal of Protective Coatings and Linings》在 1997 年 8 月刊登的一篇名为“Weapons Directed Against Corrosion”的文章中所指出：“现在热喷涂防腐技术的长效优势和降低成本的努力已对涂料市场构成巨大的威胁，即使现有最好的涂料也很难与热喷涂技术去竞争。”

我国对热喷涂防腐技术研究和应用起步较晚，还不够普及，许多从事钢结构设计和防腐施工的技术人员对该技术了解较少，并且目前能够比较系统地介绍该技术的著作非常有限。为了让更多的读者了解这项技术，为了在我国更好地普及这项有效的防护技术，编写了这本《钢结构热喷涂防腐技术》。

在本书编写中，编者在查阅大量国内外的有关文献的基础上，根据近二十年从事热喷涂防腐技术的研究成果和应用经验，对该技术做了比较全面的介绍，以便读者能对该技术有系统的认识和掌握。在热喷涂防腐技术中，电弧喷涂锌或铝涂层的应用占有很重要的地位，所以本书对此做了重点的介绍。

本书的编写得到了国际热喷涂委员会委员、中国焊接学会理事温瑾林教授的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢。沈阳工业大学于锦教授和耿维生、刘爱华工程师也对本书的编写给予了许多帮助，在此一并表示感谢。

由于编者的知识和能力有限，书中难免有不妥或错误之处，恳请广大读者批评指正。

张忠礼

2004 年 2 月于沈阳工业大学

内 容 提 要

热喷涂防护技术是对大型及重要钢结构做长效防护的一种技术。本书对该技术做了系统、全面地介绍。重点介绍了热喷涂技术的工艺方法、涂层材料的特性和种类、相关技术要求和设备以及工程质量控制和施工人员的安全防护,同时列举了钢结构热喷涂防护的典型应用实例,图文并茂、通俗易懂,易于读者系统地认识和掌握该技术。

本书可供钢结构设计人员和腐蚀防护技术人员以及腐蚀与防护相关专业的科研人员和大专院校师生阅读参考。

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 钢结构的腐蚀与防护	1
1.2 热喷涂技术的发展回顾	3
1.3 国外热喷涂防腐技术中的应用	5
1.4 我国热喷涂防腐技术中的应用	9
1.5 国外对热喷涂防腐技术的试验研究	12
1.5.1 美国焊接学会的 19 年腐蚀试验	13
1.5.2 其他重要的腐蚀试验结果	14
1.6 我国对热喷涂防腐技术的试验研究	15
1.6.1 大气腐蚀试验	15
1.6.2 复合涂层的失效规律的研究	16
1.6.3 复合涂层层间的附着特性	17
1.6.4 热喷涂锌、铝及锌铝合金涂层对中高强钢的防腐的适应性	18
1.7 热喷涂与其他传统防腐技术的比较	18
1.7.1 与涂料涂装比较	18
1.7.2 与电镀、热浸镀比较	20
1.8 热喷涂长效防护技术发展趋势	21
1.8.1 产品制造中采用长效防护	21
1.8.2 新型金属涂层材料的发展	22
1.8.3 专业厂家生产锌、铝涂层预涂钢材	22
1.8.4 电弧喷涂大截面线材, 提高生产效率	22
1.8.5 制定完整的热喷涂标准, 建立丰富的数据库	23
参考文献	24
第 2 章 热喷涂涂层的形成及热喷涂方法	25
2.1 热喷涂涂层的形成与结构	25
2.1.1 热喷涂涂层的形成	25
2.1.2 涂层的结构	27
2.1.3 热喷涂涂层的结合机理	28
2.2 热喷涂特点	29
2.3 燃烧法	30
2.3.1 线材火焰喷涂	30
2.3.2 粉末火焰喷涂	31
2.3.3 爆炸喷涂	32

2.3.4 超音速火焰喷涂·····	33
2.4 电加热法·····	34
2.4.1 等离子喷涂·····	34
2.4.2 其他电加热喷涂方法·····	35
2.5 电弧喷涂·····	37
2.5.1 电弧喷涂原理与电弧喷涂技术发展·····	37
2.5.2 电弧喷涂系统组成·····	38
2.5.3 电弧喷涂的特点·····	38
参考文献·····	40

第3章 涂层的物理与力学性能 ·····	41
3.1 涂层的物理性能·····	41
3.2 涂层的力学性能·····	42
3.3 涂层的结合强度测定·····	44
3.3.1 拉力试验方法·····	44
3.3.2 切格试验法·····	46
3.4 涂层的其他性能测定·····	48
3.4.1 涂层抗拉强度·····	48
3.4.2 剪切强度·····	49
3.4.3 硬度与耐磨性·····	50
3.4.4 厚度·····	50
3.4.5 密度·····	51
参考文献·····	52

第4章 涂层的耐蚀性与评定方法 ·····	53
4.1 金属腐蚀的基本特性·····	53
4.1.1 金属腐蚀的分类·····	53
4.1.2 电化学腐蚀·····	53
4.1.3 金属的电极电位·····	54
4.2 电化学性能的测量·····	55
4.2.1 电极电位·····	55
4.2.2 极化曲线·····	55
4.3 腐蚀实验室试验方法·····	56
4.3.1 全浸试验·····	56
4.3.2 半浸试验·····	57
4.3.3 间浸试验·····	57
4.3.4 盐雾试验·····	58
4.4 腐蚀的现场试验·····	58
4.4.1 大气暴露腐蚀试验·····	58

4.4.2	海水腐蚀试验	60
4.4.3	淡水腐蚀试验	61
4.4.4	土壤腐蚀试验	61
4.5	腐蚀试验结果的评定	62
4.5.1	外观检查	62
4.5.2	重量法	62
4.5.3	深度法	62
4.5.4	电化学法	63
4.6	涂层的保护机理	64
	参考文献	65
第5章	涂层材料	66
5.1	对涂层材料的要求	66
5.2	锌	67
5.2.1	物理性能	67
5.2.2	电化学特性	67
5.2.3	耐蚀性	67
5.2.4	锌涂层对钢铁基体的保护机理	69
5.3	锌铝合金	70
5.3.1	锌铝合金开发	70
5.3.2	涂层的组织与性能	71
5.3.3	涂层的耐蚀性	71
5.3.4	涂层特点	72
5.4	铝	72
5.4.1	物理性质	72
5.4.2	电化学性质	73
5.4.3	表面氧化膜	74
5.4.4	耐蚀性	74
5.4.5	铝涂层的一些特性	76
5.5	稀土铝合金	77
5.5.1	组织与性能	77
5.5.2	合金耐蚀性	78
5.5.3	涂层的耐蚀性	79
5.6	铝镁合金	80
5.7	伪合金涂层	81
5.7.1	伪合金涂层的制备方法	81
5.7.2	锌-铝伪合金	82
5.7.3	锌-铝-镁伪合金	83
5.8	其他金属涂层体系	84

5.8.1 锡和铅	84
5.8.2 奥氏体不锈钢	85
5.8.3 镍基合金	86
5.9 陶瓷涂层材料	86
5.9.1 陶瓷材料	86
5.9.2 陶瓷喷涂的设备和工艺	87
5.10 塑料涂层材料	88
5.10.1 塑料涂层材料的特性	88
5.10.2 塑料涂层材料的品种	89
5.10.3 塑料喷涂的工艺特点与设备	90
参考文献	91

第6章 热喷涂防腐施工工艺的制定 93

6.1 涂层设计	93
6.1.1 涂层材料选择	93
6.1.2 涂层厚度选择	94
6.2 复合涂层防护体系设计	94
6.2.1 金属涂层+封闭涂料	94
6.2.2 金属涂层+封闭涂料+面漆	96
6.2.3 复合涂层防护体系设计举例	97
6.3 TAFE 涂层设计速查法	98
6.3.1 工作环境分类	98
6.3.2 涂层体系分类	99
6.3.3 选择涂层体系的快速指导	100
6.3.4 涂层体系与使用年限	100
6.4 制定施工计划	101
6.4.1 收集信息	101
6.4.2 施工方案	102
6.4.3 施工准备	103
6.4.4 施工预算	104
6.5 热喷涂的经济性分析	104
参考文献	108

第7章 工件表面预处理 110

7.1 表面准备	110
7.2 喷砂处理设备	110
7.2.1 压力式喷砂机	111
7.2.2 射吸式喷砂枪	113
7.2.3 射吸加速式喷砂枪	113

7.2.4 离心式喷砂机	114
7.3 选择磨料	116
7.4 喷砂工艺	117
7.4.1 喷砂工艺	117
7.4.2 喷砂质量与效率	118
7.4.3 压缩空气	119
第8章 热喷涂设备及喷涂工艺	121
8.1 火焰喷涂	121
8.1.1 火焰喷涂装置	121
8.1.2 喷涂工艺	121
8.1.3 故障及消除方法	123
8.2 电弧喷涂设备	124
8.2.1 电弧喷涂设备组成	124
8.2.2 喷涂电源	124
8.2.3 送丝机构	126
8.2.4 送丝软管	127
8.2.5 喷涂枪	128
8.2.6 控制系统	130
8.2.7 电弧喷涂设备维护与故障排除	130
8.2.8 XDP 型电弧喷涂设备简介	131
8.3 电弧喷涂工艺参数	132
8.3.1 喷涂电压	133
8.3.2 工作电流	134
8.3.3 雾化空气	134
8.3.4 喷涂距离	135
8.4 电弧喷涂工艺过程	136
8.4.1 设备连接	136
8.4.2 操作步骤	137
8.4.3 喷涂操作要点	138
8.4.4 机械化喷涂	139
8.5 涂层的封闭处理及面漆施工	140
8.5.1 封闭剂的性能要求	140
8.5.2 封闭剂的施工要点	140
8.5.3 面漆施工要点	141
参考文献	142
第9章 热喷涂防腐蚀技术的应用领域	143
9.1 抗大气腐蚀	143

9.1.1	钢铁材料在大气中的腐蚀	143
9.1.2	大气腐蚀的分类	144
9.1.3	热喷涂在防止大气腐蚀方面的应用	146
9.2	抗海水腐蚀	148
9.2.1	海水腐蚀特点	149
9.2.2	不同海水区域的腐蚀	149
9.2.3	热喷涂在防止海水腐蚀方面的应用	150
9.3	抗土壤腐蚀	151
9.3.1	土壤腐蚀特点	151
9.3.2	土壤腐蚀的几种形式	153
9.3.3	热喷涂在防止土壤腐蚀方面的应用	153
9.4	抗淡水腐蚀	154
9.4.1	淡水腐蚀特点	154
9.4.2	淡水腐蚀的影响因素	154
9.4.3	热喷涂在防止淡水腐蚀方面的应用	156
9.5	保护混凝土钢筋	158
9.5.1	混凝土钢筋腐蚀危害	158
9.5.2	混凝土钢筋腐蚀特点	160
9.5.3	混凝土钢筋腐蚀的原因	161
9.5.4	混凝土钢筋的热喷涂保护	162
9.6	抗工业环境腐蚀	163
9.6.1	油罐的腐蚀与防护	163
9.6.2	化工气柜防腐蚀	166
9.6.3	工业污水系统防腐蚀	167
9.6.4	工业设施的防腐蚀	169
9.7	抗高温腐蚀	173
9.7.1	对单纯高温氧化防护	173
9.7.2	对高温防腐蚀的防护	175
9.7.3	对锅炉“四管”的高温腐蚀防护	176
参考文献		178

第 10 章	钢结构热喷涂防护技术应用实例	180
10.1	美国亚利桑那州 MORMON FLAT 水库闸门	180
10.2	三峡工程金属结构件的热喷涂防护	181
10.3	中国西南航空公司“886”机库钢网架	184
10.4	美国俄勒冈州 Cape Creek 钢筋混凝土大桥	186
10.5	天津加气混凝土厂的蒸压釜	190
10.6	市区桥梁的热喷涂防护	192
10.7	煤矿井筒金属装备	193

10.8 尿素厂变换工段的反应塔.....	195
参考文献.....	196
第 11 章 质量控制与安全防护	198
11.1 质量控制.....	198
11.1.1 质量控制的必要性.....	198
11.1.2 质量控制措施.....	198
11.1.3 培训.....	201
11.2 安全与防护.....	201
11.2.1 安全要求.....	201
11.2.2 喷砂过程的安全防护.....	202
11.2.3 电弧喷涂的安全防护.....	203
11.2.4 火焰喷涂的安全防护.....	203
附录 1 GB 9793—88 热喷涂锌及锌合金涂层	206
附录 2 GB 9795—88 热喷涂铝及铝合金涂层	211

第 1 章 概 述

1.1 钢结构的腐蚀与防护

钢铁对人类文明进步起到了巨大的推动作用,今天钢结构的运用更是越来越多,越来越普遍。不但桥梁、输电铁塔、水利设施、矿井设施、海洋设施采用钢结构,钢结构还在建筑工程中发挥着独特且日益重要的作用。钢结构因其强度高、施工速度快、商品化程度高、综合经济效益好和可再生利用的优点,受到设计师们的青睐。钢结构被广泛运用于摩天大楼、厂房、体育馆、展览馆、机场机库等工程的建设中。钢结构的市场需求越来越大,越来越多的重要工程采用了钢结构建筑体系。

钢结构虽然有诸多优点,但它在自然环境下的腐蚀问题一直困扰着设计师们。金属材料的腐蚀问题是当今材料科学与工程领域不可忽略的课题。经过长期的应用实践,人们发现人类使用的钢结构较少由于单纯机械因素(如拉、压、冲击、疲劳、断裂和磨损等)或其他物理因素(如热能、光能等)引起破坏,绝大多数金属结构的破坏事故都与其周围环境的腐蚀因素有关。因此,钢结构的腐蚀与防腐蚀已成为当今材料科学、化学工业与工程等领域的重大课题,受到了政府与钢结构应用相关的各行业的重视。

金属材料尤其是钢铁材料的腐蚀现象十分普遍,从日常生活到交通运输、机械、化工、冶金,从尖端科学技术到国防工业,凡是使用金属材料的地方,都不同程度地存在着腐蚀问题。

腐蚀给国民经济带来巨大损失。以金属材料为例,据一些工业发达国家统计,每年由于腐蚀而造成的经济损失约占国民经济生产总值的 1%~5%。美国 1995 年因腐蚀造成的经济损失约为 3000 亿美元,约占当年国民生产总值的 4.21%,其中 33% 的损失可以避免;在 1998 年美国的腐蚀损失为 2757 亿美元,约占当年国民生产总值的 2.76%,英国 1969 年腐蚀损失为 13.65 亿英镑,占国民生产总值的 3.5%。日本 1997 年的腐蚀损失为 39376.9 亿日元。2000 年我国的国民生产总值 10710 亿美元,年腐蚀损失约为 5000 亿元,相当于 600 亿美元,约占国民生产总值的 6%。以上数据表明,因腐蚀而造成的经济损失是十分惊人的^[1]。

腐蚀事故危及人身安全。腐蚀引起的灾难性事故屡见不鲜,损失极为严重。例如 1965 年 3 月,美国一天然气输气管线因应力腐蚀破裂着火,造成 17 人死亡。日本 1970 年大阪地下铁道的管线因腐蚀折断,造成瓦斯爆炸,乘客当场死亡 75 人。美国俄亥俄州大桥使用 40 年后,在 1967 年突然断裂,导致 46 人丧失生命,事故原因就是环境应力腐蚀。又如 1979 年我国某市的液化石油气贮罐因应力腐蚀导致破裂,造成爆炸起火,伤亡几十人。

腐蚀耗竭了宝贵的资源和能源。据统计,每年由于腐蚀而报废的金属设备和材料相当于金属年产量的 10%~40%,其中 2/3 可再生,而 1/3 的金属材料被腐蚀掉无法回收。

我国目前年产钢以 1 亿吨计, 则每年因腐蚀消耗掉的钢材近千万吨。全世界每 90s 就有 1t 的钢铁变成铁锈, 而炼制 1t 钢铁所需的能源足够一个家庭使用 3 个月。可见, 腐蚀对自然资源是极大的浪费, 同时还浪费了大量的人力和能源。因此, 从有限的资源与能源出发, 研究解决腐蚀问题, 已刻不容缓。

腐蚀引起的环境污染也是相当严重的。由于腐蚀增加了工业废水、废渣的排放量和处理难度, 增多了直接进入大气、土壤、江河及海洋中的有害物资, 因此造成了自然环境的污染, 破坏了生态平衡, 危害了人民健康, 妨碍了国民经济的可持续发展。此外, 由于腐蚀现象的普遍性, 许多新技术的发展往往都会遇到腐蚀问题。

实践告诉人们, 若充分利用先进的防腐蚀技术, 广泛开展防腐蚀教育, 实施严格的科学管理, 因腐蚀而造成的经济损失中有 30%~40% 是可以避免的。金属腐蚀防护的重要意义是多方面的。其一是经济方面, 这包括降低因管道、贮罐、各类机械的金属零件、船只、桥梁、海洋工程结构的腐蚀所造成的金属损失。其二是提高了设备运行的安全性, 因为腐蚀可能造成设备灾难性的破坏事故。其三是保护资源, 主要指金属资源, 因为它们在全球的储量有限, 并且, 它们的浪费还伴随着这些金属构件生产制造的能源和水的浪费。人类在为那些被腐蚀的金属设备设计和重新制作过程所耗费的精力并非无足轻重, 否则, 这些精力本可用于其他有益的目的。

与直接损失相比, 因腐蚀造成的间接损失较难估计, 主要包括停产损失、产品泄漏或污染、过度设计, 以及管道锈蚀引起的传热效率或物料输送效率的降低。尽管间接损失的总数难以得到准确的估计, 但是很显然, 它们是因腐蚀导致经济损失的一个主要组成部分。当输气管道、贮罐或化学设备意外破裂爆炸, 桥梁突然腐蚀断裂、坍塌导致健康或生命损失时, 这种间接损失就更难估计, 而且超出用金钱概念来衡量的范围。

大型钢结构的应用日益广泛, 数量增加很快。相应地钢材的腐蚀问题也日益突出, 由此引起的损失与日俱增。腐蚀给人类带来的经济损失和社会危害非常巨大, 如果合理使用目前已有的腐蚀控制技术, 就可避免上百亿元的损失, 所以说开发和推广钢结构长效防护技术的意义重大。从我国在 2000 年的腐蚀造成经济损失占国民经济总产值的 6%, 远高于美国、日本等发达国家的这个事实可以说明, 我国在防腐蚀方面的认识、管理和普及应用先进的防腐蚀技术方面远落后于发达国家。因此, 除了加强防腐蚀的宣传和管理外, 让我国的钢结构设计师们和防腐蚀工程师们多了解和掌握一些先进有效的防腐蚀技术是非常必要的。

长期以来, 人们在不断地寻求各种有效的方法与腐蚀做斗争, 尽可能地减少钢铁的腐蚀, 降低腐蚀所带来的危害。迄今防腐蚀的方法有许多种, 除了在结构设计和工艺设计方面正确地选用金属材料外, 最常用的方法是在钢铁表面施加金属涂层和非金属涂层对钢结构进行保护。这些表面涂层包括: 有机或无机涂料、电镀或热浸镀金属镀层以及在本书中将要系统介绍的热喷涂金属涂层。

涂料涂装、电镀、热浸镀等工艺方法虽然都各有其长处, 但它们都很难满足大型钢结构的长效防腐蚀要求。许多现代重要的大型钢结构通常要求在其服役期间不维护或少维护, 或者要求在重腐蚀环境下有更长的使用寿命。相对来说, 热喷涂技术是最有竞争力的方法之一^[3]。正如本书前言中所介绍, 这种方法可以保护钢结构在大气、土壤或水中有至少 20 年不需任何维护和超过 40 年后的少量维护。是迄今为止对大型及重要钢结构做长效

防腐的最好方法。许多国家都制定标准将热喷涂防腐技术作为重要钢结构首选的防护方法。目前在欧洲、北美以及日本等发达国家对该技术的应用已非常广泛,许多钢铁桥梁、铁塔、水利设施、海洋设施、钢制贮罐都采用了这种防腐措施。

1.2 热喷涂技术的发展回顾

金属热喷涂工业开始于20世纪初。1910年,瑞士苏黎世的M. U. Schoop博士发明了金属喷涂方法和后来第一个使用金属丝形式的金属热喷涂的设备,并在美国申请了一项“大气中金属沉积”的技术专利,由此开创了热喷涂技术的先河。热喷涂工艺的早期商业应用在德国进行,以后传到法国。Schoop把他的专利出售给称为Metallizator的一家德国公司,后来在公司生产并且在欧洲出售这些热喷涂设备。在1920年以后,英国和美国开始使用这种技术。其中费城的Metal Coatings公司和Metalweld公司以及洛杉矶的Metalizing公司是应用这项技术较早的美国公司。他们在铁路油罐车、海军军舰的油箱、运煤驳船和对巴拿马运河的应急闸门等构件上使用了这种热喷涂技术。

在美国经济“大萧条”期间,热喷涂技术在工业领域加速了应用。在这10年期间,火焰喷涂装置的发明对热喷涂技术的应用起了巨大的推动作用。四名美国企业家,Larry Kunkler, Rea Axline, Charles Boyden. Sr. 和 Charles 以及来自美国的Metallizing公司的Charles Stipp先生对推进美国热喷涂工业发展做出了巨大的努力。在1932年,后来的Metco公司创始人Rea Axline在圣路易斯饭店召开的电镀学会年会上展览了他们发明的一种热喷涂装置。16年以后,美国金属喷涂协会,也就是后来的国际热喷涂协会(ITSA)的前身,在相同的饭店建立。圣路易斯Metallizing公司的Walter B. Meyer先生和芝加哥的Metallizing股份有限公司的William H Fatka先生主持了会议。不久他们出版了一本简报,共同分享热喷涂方面新的技术信息,并且为其成员提供开辟新市场的机会。

由于当时的电弧喷涂枪不够可靠、不够稳定,实际最广泛使用的主要是氧乙炔火焰喷涂工艺。其应用范围仅限于喷涂镀锌涂层保护钢铁结构抵抗环境腐蚀,以及小规模机械零部件修复。直到第二次世界大战时,热喷涂技术取得了较大的进步,并在钢结构防腐和机械零部件修复领域得到比较广泛的应用。由于第二次世界大战的来临,美国热喷涂工业迅速发展,在美国金属喷涂协会中起关键作用的协会成员为工业设备零部件的修复再生发挥了巨大的作用。为军队服务的Walter Meyer公司和Tom Lufkin公司与海军合作,解决了许多修复和防腐的问题。在二战结束前,金属喷涂技术已成为一种重要的工业方法,它们的应用领域包括大的供水水塔、金枪鱼捕捞船、化学工业设备、坦克和汽车零部件、电容器、铸件和管道等。

在钢铁时代,由于能源便宜,设备的质量不是很重要,简单的生产就可满足工程需要。二战后,航空工业的发展和宇宙时代的来临,推动了热喷涂技术的发展。航空或航天飞行器要求使用具有高力学性能的轻质材料,还要求这些材料在较大温度变化范围仍保持优异的性能,如耐磨、耐蚀、抗氧化以及绝热等。由于材料作为整体很难满足这样苛刻的要求,所以人们在不断地进行对金属材料表面改性的研究。在这些技术中,热喷涂是最有潜力的技术之一。据统计,恶劣条件下服役的工件失效几乎都是由表面开始,如果能使用低成本的材料作为基体,在它的表面沉积具有更好性能的涂层,就可以制造出低成本、

高性能的工件。这是一个很简单的构思,并有很广泛的应用前景。热喷涂技术就是可以制备各种涂层的可靠技术之一。使用热喷涂方法可以获得耐磨、耐蚀、抗氧化、隔热、导电、电绝缘以及其他特殊性能的涂层。它的恰当的应用可以改进工件的性能、降低成本、延长使用寿命。热喷涂技术的这些特点使得工业界对它的兴趣越来越大,热喷涂技术本身的发展也越来越快,它的应用领域也越来越广泛。这种方法不但可以降低新工件的磨损和腐蚀,又可以修复表面损坏工件。热喷涂技术可以对许多金属材料进行表面改性,在材料表面附加一层具有某些特殊性能的涂层,因此,该技术受到航空、航天以及其他一些工业部门的高度重视。

1976年,在美国迈阿密的第八届国际热喷涂会议之后,在航空工业迅速发展的需求与推动下,等离子喷涂技术、陶瓷材料和金属陶瓷材料找到了用武之地。相继出现了高性能、高技术的耐磨、耐高温、抗燃气腐蚀及隔热等表面工程涂层材料和制备工艺,使热喷涂技术开始从简易的维修车间步入宇航和飞机等高科技产业领域,并解决了大量令冶金工程师头痛的材料问题。不仅使那些担心采用这项技术会使飞机从天上掉下来的飞机设计师放下了心,而且自那时起,一架航空发动机有成百件以上的零件必须采用热喷涂技术才得以达到设计师们的要求。

20世纪40年代后,除了火焰喷涂、电弧喷涂这两种传统的热喷涂装置在不断地改进和完善外,又陆续出现了等离子喷涂、爆炸喷涂、超音速火焰喷涂以及俄罗斯科学家发明的冷喷涂设备和工艺。几十年来,新的热喷涂技术不断出现,热喷涂技术应用的新领域被不断开发和拓展。目前在机械、冶金、航天、石油、化工、水利、交通、煤炭、通讯、农业、轻工、医疗等许多部门都可以看到热喷涂技术的应用,这种应用几乎遍及国民经济的各个领域。现在热喷涂已成为不可替代的技术在国民经济的众多领域,尤其是高科技领域发挥重要的作用。在航空工业中,最先进的飞机发动机需要采用等离子技术喷涂、超音速火焰喷涂制作各种耐磨涂层、封严涂层、热障涂层和高温防护涂层。在航天工业中,不但在运载火箭上需要热喷涂涂层,在宇宙飞船、卫星中也要应用热喷涂技术。热喷涂技术加工的人工骨骼和人工牙齿在生物医学领域的应用越来越成熟、越来越广泛。

热喷涂技术的功能和作用在以下六个方面得到体现:

- (1) 提高材料的耐腐蚀能力,延长制品的使用寿命;
- (2) 提高工件的耐磨性能,节约能源和材料;
- (3) 赋予部件表面某种特殊的物理性能,以适应制造技术的需要;
- (4) 恢复工件的尺寸,提高力学性能;
- (5) 赋予表面特种功能,满足高科技发展需求;
- (6) 赋予制品表面装饰特性,美化环境。

在过去的十几年中,热喷涂技术发展迅速(每年增长5%~10%),到1997年全球热喷涂工业产值达到13.5亿美元。2002年,全球热喷涂工业产值又增至40亿美元。其中美国20亿美元,日本8亿美元,德国2.5亿美元,中国1.2亿美元。这四个国家的热喷涂工业产值占国民经济总产值GDP的百分比如下:美国0.2‰,日本0.16‰,德国0.1‰,中国0.09‰^[4]。表1-1是从1960年到2000年40年中世界上几种常用热喷涂方法所得产值的变化情况。

表 1-1 过去 40 年中热喷涂技术取得产值的变化^[3]

热喷涂技术	1960 年	1980 年	2000 年
火焰粉末喷涂	70%	28%	8%
火焰线材喷涂	—	11%	4%
电弧喷涂	15%	6%	15%
等离子喷涂	15%	55%	48%
超音速火焰喷涂	—	—	25%

虽然, 航空航天工业给热喷涂产业带来巨大的产值, 推动热喷涂技术取得重大进展, 但是在今天, 钢结构防腐蚀应用仍是热喷涂技术取得工作量最大的领域。据统计, 目前世界锌产量的 1/2 用在钢结构的防护涂层。电镀、热浸镀和热喷涂是获得锌涂层的三种最重要的方法。每年热喷涂防腐蚀使用锌和铝材的数量逐年快速增长。采用热喷涂方法喷涂锌、铝或相应合金涂层可以保护钢铁结构在海水、淡水、土壤、工业大气等多种腐蚀环境下长期、安全地运行, 实现在至少 20 年内不维护和 40 年内少维护的长效防腐蚀要求。经过半个多世纪的试验研究和现场应用证明: 热喷涂防腐蚀技术是当今钢结构长效防腐蚀的最好方法。

1.3 国外热喷涂防腐蚀技术的应用

众所周知, 工程的防护寿命主要取决于涂层的耐蚀性能, 但是迄今为止没有任何一种防腐蚀技术可与设计的工程同寿命, 这就使得设计人员在设计时必须考虑许多维护问题。寻求能够保护钢铁基体更长久的措施是人们始终不断的追求。当热喷涂技术出现后, 有人意识到使用这种方法喷涂阳极性涂层材料可能会对钢铁基体提供预期更久的保护。钢结构热喷涂防腐蚀方法的实际应用开始于 20 世纪 20 年代。英国是最早使用了这项技术的国家之一。在这个时期, 英国首先使用热喷涂技术喷涂锌涂层保护钢结构, 但由于种种原因该技术发展很慢, 没有得到比较大规模的应用。到了 20 世纪 40 年代, 在对威尔士 Menai 海峡大桥的钢索进行防护时英国人应用了这项技术。经过近 20 年的恶劣海洋大气环境现场应用考验, 热喷涂防腐蚀技术逐渐显露出其显著的抗腐蚀能力。正是这些成功的应用致使英国政府在 20 世纪 60 年代初开始下决心对新建的重要桥梁大规模地采用热喷涂长效防腐蚀技术。

1961 年, 英国对苏格兰 Queensferry 的 Forth Road 大桥钢结构的外表面喷涂了 0.125mm 厚的锌涂层, 然后涂刷了三层涂料用于封闭和装饰。该桥长 3620m, 主跨 1000m, 位于多风的海洋环境。大桥需热喷涂防护的钢结构有 2 万吨, 是当时世界上应用热喷涂防腐蚀技术的最大工程。几十年来, 英国已有数十座新建大桥采用了这种防腐蚀工艺。例如, 建于 1959 年的格洛斯特舍尔的 Queen Hill 大桥, 建于 1961 年的普利茅斯 Tamar 大桥, 建于 1964 年的南威尔士新港的 George Street 大桥以及跨越泰晤士河的 Maidenhead M4 桥、Arborfield A327 桥等数十座重要桥梁都应用了热喷涂长效防腐蚀技术。

英国政府有关部门以及大桥的管理者在采取热喷涂防腐蚀措施后的若干年内, 曾多次对大桥的防腐蚀效果进行检查, 他们发现几乎所有检查结果都令人满意。苏格兰 Quces-