

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电热爆炸喷涂腐蚀防护技术

魏世丞 王海斗 王玉江 梁义 等 编著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电热爆炸喷涂腐蚀防护技术

魏世丞 王海斗 王玉江 梁义等 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书以电热爆炸喷涂工艺和喷涂材料为主线,从电热爆炸喷涂设备的原理、工艺优化、材料选择、性能表征、质量控制、防护机理等角度详细阐述电热爆炸喷涂腐蚀防护技术。主要内容包括电热爆炸喷涂技术及涂层体系、电热爆炸喷涂层制备工艺流程、电热爆炸喷涂工艺动力学数值分析、电热爆炸喷涂层的质量控制和性能检测、电热爆炸喷涂层耐蚀性能及耐蚀机理,并对国内外电热爆炸喷涂技术的研究现状及发展趋势进行了分析、总结。

本书可供表面工程技术人员、研究人员、高校师生以及从事材料腐蚀与防护工作的人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书:典藏版/侯保荣主编. —北京:科学出版社, 2018.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-056255-5

I. ①中… II. ①侯… III. ①腐蚀-调查研究-中国 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 002936 号

责任编辑:李明楠 宁 倩/责任校对:王 瑞

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 196 000

定价: 3200.00 元 (全 32 册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	郝吉明
胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪	翁宇庆
高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基	魏复盛

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新兴能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

丛 书 前 言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”倡议的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解 and 认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

电热爆炸喷涂作为制备优质涂层的一种表面技术，利用脉冲式气体燃烧爆炸后产生的能量将喷涂的粉末加热熔化，并将其加速轰击到工件表面，形成致密、高质量的涂层，主要用于航天、电力、核工业、军工等领域。随着电热爆炸喷涂技术的不断发展，其在装备腐蚀防护领域获得了越来越广泛的应用。

《电热爆炸喷涂腐蚀防护技术》的作者及其合作单位经过多年的理论和应用研究，辅以较丰富的工程实践，在电热爆炸喷涂腐蚀防护理论和腐蚀防护技术方面取得了较为显著的成果，为国民经济、国防建设做出了贡献。该书以电热爆炸喷涂工艺和喷涂材料为主线，系统阐述了电热爆炸喷涂设备和技术途径，涵盖电热爆炸喷涂设备的原理、工艺优化、材料选择、性能表征、质量控制、耐蚀机理等环节。

该书学术见解独到，数据翔实，对从事科学研究的学者和工程实践的一线技术人员均具有较好的理论指导和借鉴作用。相信该书的出版会使读者对电热爆炸喷涂的特点及其在腐蚀防护领域的应用有更为全面而深入的理解，并将有力推动电热爆炸喷涂技术在装备腐蚀防护领域的推广应用。

侯保荣

2017年8月

前 言

装备腐蚀问题已成为当今材料科学、表面工程等领域的重大课题，国内外专家、学者均在积极探索防腐蚀技术，研究金属在腐蚀环境中的失效规律，研制新的材料防护体系，从而延长装备的使用寿命，保障设备设施的正常运行和安全使用。目前，国内外均在采取积极的措施，其中电热爆炸喷涂具有结合强度高、涂层致密等特点，在装备腐蚀防护领域具有较为广阔的应用前景。

电热爆炸喷涂技术自 19 世纪 50 年代提出以来，一直在不断完善、发展自身的工艺体系，在交叉学科的基础上逐步形成了具有鲜明特色的基础理论和技术理论。应用上，电热爆炸喷涂技术已在腐蚀防护、抗磨减摩等领域获得广泛应用，并将产生越来越大的经济效益和社会效益。为了与有关学者、工程技术人员共同推进表面工程的发展，我们编著了本书。全书以电热爆炸喷涂工艺和喷涂材料为主线，分为绪论、电热爆炸喷涂技术及涂层体系、电热爆炸喷涂层制备工艺流程、电热爆炸喷涂工艺动力学数值分析、电热爆炸喷涂层的质量控制和性能检测、电热爆炸喷涂层耐蚀性能及耐蚀机理 6 章。从喷涂设备的原理、工艺优化、材料选择、性能表征、质量控制、耐蚀机理等角度详细阐述电热爆炸喷涂腐蚀防护技术，并结合钢结构腐蚀失效分析，介绍电热爆炸喷涂层的腐蚀防护原理、喷涂材料选择等基础科学问题，兼顾了理论性和实用性，突出了技术的应用性和可操作性，便于读者掌握技术的本质及要领。

本书由魏世丞任主编，王海斗、王玉江、梁义任副主编。各章节编著人员如下：第 1 章为魏世丞、刘宗德、王海斗、宝志坚、金国，第 2 章为魏世丞、金国、梁义、吕红，第 3 章为魏世丞、刘宗德、王海斗、徐亮、苏宏艺，第 4 章为魏世丞、王玉江、郭蕾、王博、苏宏艺，第 5 章为魏世丞、梁义、吕红，第 6 章为魏世丞、王博、朱晔、郑超、黄玉炜。全书由魏世丞、王玉江统稿。

本书的编写基础是国家 863 计划项目“电热爆炸超高速喷涂法制备超细晶、纳米晶涂层”、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“表面技术与表面效应”、中国工程院重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”。

借本书出版之际，向科学技术部、国家自然科学基金委员会、中国工程院等单位 and 部门表示衷心感谢。同时，向书中参考文献的作者致以谢意。限于编著人员水平，书中难免存在不当之处，恳请读者指正并提出宝贵意见。

作 者

2017 年 8 月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 腐蚀的危害	1
1.2 装备腐蚀防护措施	2
1.2.1 高速电弧喷涂防腐技术	4
1.2.2 纳米电刷镀防腐技术	5
1.2.3 等离子喷涂防腐技术	6
1.2.4 非晶态合金化学镀层防腐技术	6
1.2.5 纳米固体薄膜减摩防腐技术	6
1.2.6 纳米防腐涂料及涂装技术	7
1.2.7 电热爆炸喷涂防腐技术	7
1.3 电热爆炸喷涂工艺国内外研究进展	8
第 2 章 电热爆炸喷涂技术及涂层体系	12
2.1 电热爆炸喷涂技术原理及特点	12
2.2 电热爆炸喷涂设备	14
2.3 电热爆炸喷涂常用涂层体系	16
2.3.1 电热爆炸喷涂制备防腐涂层	16
2.3.2 电热爆炸喷涂制备耐磨涂层	18
2.3.3 电热爆炸喷涂制备热障涂层	19
第 3 章 电热爆炸喷涂层制备工艺流程	21
3.1 涂层的制备工艺流程	21
3.2 工件预处理工艺	23
3.2.1 表面预加工	24
3.2.2 表面净化处理	25
3.2.3 基材表面处理工艺	30
3.3 电热爆炸喷涂层制备工艺	31

3.3.1	喷涂材料的选择及优化	31
3.3.2	电热爆炸喷涂试样制备	34
3.4	电热爆炸喷涂层的后处理工艺	35
3.4.1	封孔处理	35
3.4.2	重熔处理	37
3.4.3	强化处理	40
3.4.4	扩散处理及其他后处理	42
第4章	电热爆炸喷涂工艺动力学数值分析	44
4.1	电热爆炸喷涂动力学	44
4.2	数值分析建模技术	44
4.3	电热爆炸喷涂冲击效应模型	45
4.3.1	一维运动活塞模型	45
4.3.2	金属导体自由爆炸模型	48
4.3.3	FeCrAlRE 电热爆炸喷涂反应动力学分析	51
第5章	电热爆炸喷涂层的质量控制和性能检测	53
5.1	电热爆炸喷涂层质量控制技术	53
5.2	电热爆炸喷涂层的基本性能检测	54
5.2.1	涂层物理性能测试	54
5.2.2	涂层耐蚀性能检测	56
5.2.3	涂层微观组织形貌分析	60
5.2.4	结合机理及结合强度测试	60
5.2.5	试验所用材料、仪器及装置	62
5.3	电热爆炸喷涂层力学性能的检测	63
5.4	电热爆炸喷涂层微观组织分析	66
5.4.1	电热爆炸喷涂层扫描电镜分析	67
5.4.2	高速电弧喷涂层扫描电镜分析	78
5.4.3	电热爆炸、电弧喷涂层能谱分析	82
5.4.4	电热爆炸喷涂层透射电镜分析	90
5.5	电热爆炸喷涂层常见缺陷及其成因	94
第6章	电热爆炸喷涂层耐蚀性能及耐蚀机理	96
6.1	电热爆炸喷涂层耐蚀性能	96
6.1.1	干湿交替浸泡试验	96
6.1.2	铜加速乙酸盐雾腐蚀试验	98
6.1.3	Fe 基电热爆炸喷涂层中温热腐蚀性能测试	99

6.1.4 Fe 基电热爆炸喷涂层高温热腐蚀性能测试	103
6.1.5 电化学测试分析	107
6.1.6 电化学噪声分析	112
6.2 电热爆炸喷涂层耐蚀机理	121
6.2.1 全面腐蚀阶段耐蚀机理	121
6.2.2 全面腐蚀抑制阶段耐蚀机理	123
6.2.3 孔蚀阶段喷涂层防护机理	124
6.2.4 基体腐蚀阶段防护机理	125
参考文献	128

第1章 绪 论

1.1 腐蚀的危害

在信息、能源、材料作为三大支柱的当今科技社会，人类面临诸如淡水短缺、能源危机、环境污染等一系列巨大挑战。据统计，全球每年因腐蚀造成的经济损失约为 7000 亿美元，腐蚀损失约为综合自然灾害（即地震、台风、水灾等）损失总和的 6 倍。腐蚀危害已遍及所有行业，如石油、化工、矿山、冶金、交通、运输、农林、医药卫生、机械、电子、航空、航天、海洋开发及军事等领域。

腐蚀给国民经济带来巨大的损失。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占国民经济生产总值的 1%~5%。美国 1998 年腐蚀损失约为 2757 亿美元，约占当年国民生产总值的 2.76%；日本 1997 年腐蚀损失为 39376.9 亿日元。我国于 1999 年根据柯伟、曹楚南、徐滨士等院士提出的建议和申请，正式启动中国工程院咨询项目“中国工业与自然环境腐蚀问题调查与对策”，历时 3 年，于 2001 年末完成，调查涉及自然环境、化工、交通运输、基础设施、电力系统、能源系统、机械制造行业、军事装备等领域的腐蚀调查。从世界范围来看，各国腐蚀损失占国民经济总产值的比例是不尽相同的，其中日本占国民经济总产值的 2%~3%，英国占 3.5%，美国达 4%~5%，而中国腐蚀损失占国民经济总产值的 5%~6%。2016 年中国工程院发布腐蚀调查报告：2014 年，我国全行业腐蚀总成本约占国内生产总值（GDP）的 3.34%，达到 21278.2 亿元人民币，相当于每位公民承担 1555 元多的腐蚀成本。

腐蚀的发生，耗费了大量宝贵的资源和能源。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 可通过再制造等方法循环利用，而 1/3 的金属材料被腐蚀而无法回收。若我国目前每年产钢以 1 亿 t 计，则每年因腐蚀而消耗的钢材达近千万吨。全世界每 90s 就有 1t 钢

铁变为铁锈,而炼制 1t 钢铁所需的能源足够一个家庭使用 3 个月。因此,腐蚀对自然资源是极大的浪费,同时也浪费了大量的人力和物力。如果能将当代防腐技术完全应用,那么腐蚀造成的国民经济损失可以降低 25%~30%。以我国 2014 年的腐蚀造成的经济损失 21278.2 亿元人民币为例,则可以挽回 6383.46 亿元人民币。

由腐蚀引起的环境污染问题也是相当严重的。腐蚀增加了工业废水、废渣、废气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质,造成自然环境的污染,破坏生态平衡,危害人类的健康,阻碍国民经济的可持续发展。

除直接经济损失外,腐蚀还引起设备损坏,从而导致停产、产品质量下降,生产效率降低,有毒有害物质的跑、冒、滴、漏损失,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,但很显然,它们是腐蚀导致经济损失的一个重要组成部分。此外,当输气管道、储罐或化学设备因腐蚀意外破裂爆炸及桥梁腐蚀断裂、坍塌等恶性事件发生时,将严重危害人类健康及生命,这些损失更是不可估量的,而且已经超出用金钱概念来衡量的范围。

因此,金属腐蚀防护的重要意义是多方面的。一是经济方面,立足有限的资源与能源,通过一系列先进的再制造关键技术解决腐蚀问题,可以减少由于腐蚀而造成的大量浪费;二是保障并提高设备及装备运行的安全性,减少恶性事故发生的可能性;三是保护资源,主要是指金属资源,因为金属资源在全球的储量有限,且可开采的年限已经不多。通过有效的腐蚀与防护技术延长现有设备的使用年限,同时对濒临报废的设备实施再制造,提升原有设备的防腐效果,将使腐蚀给人类带来的危害降到最低。

1.2 装备腐蚀防护措施

军用装备自身的复杂性,致使其腐蚀行为也是多样的。以装甲装备为例,其中动力舱部位的腐蚀更显突出。装甲装备从冷启动到正常运转,再到实施各项战技要求,最后到熄火,整个周期是一个动态、连续的过程。其工作温度区间在环

境温度—中温—高温(800℃)—环境温度这个区域内循环变化,腐蚀的介质环境包括氯化、氧化、硫化、氢化、碳化等几种腐蚀气氛。同时,装甲装备属于重载、高速的机动武器,零部件摩擦、磨损不可避免,单一地研究腐蚀问题是片面的。因此,应同时考虑腐蚀与摩擦磨损的综合影响。

装甲零部件的腐蚀行为主要包括均匀腐蚀和局部腐蚀两大类。其中局部腐蚀又分为点蚀、接触腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳和热腐蚀等几种类型。因此,只有按照不同部件所处不同腐蚀条件,采取有针对性的防腐措施,才能有效地解决装甲装备的腐蚀问题,从而保障装备的服役质量,延长装备的使用寿命,保障部队的战斗力。

采用表面防护及再制造关键技术可以很好地防止或延缓腐蚀,是一种行之有效的防腐技术措施。十几年来,装备再制造技术国防科技重点实验室在防腐表面工程技术领域开展了深入、系统的研究、开发和推广工作,并取得了显著的军事效益和经济效益。目前,所采取的腐蚀防护主要方法包括以下三种。

(1) 正确选用金属材料,合理设计金属构件结构,减少金属发生腐蚀的机会。例如,选用耐腐蚀的合金材料,同时,在装备结构设计时应避免产生积水,减少腐蚀性介质残存。

(2) 电化学防蚀方法,分为阴极保护法和阳极保护法两大类。其中,阳极保护法是将被保护金属作为阳极,在一定介质和温度下,阳极金属发生钝化,使之由活化状态转变为钝化状态的保护方法,但该方法一般不适合海水腐蚀的防护。在海水中广泛采用阴极保护法,其主要分为以下几种方法。

牺牲阳极的阴极保护法:采用比被保护金属具有更低电位的金属与其相连接,在腐蚀介质中,电位较低的金属作为牺牲阳极不断消耗,而被保护的金属作为阴极受到保护。

外加电流的阴极保护法:将直流电源负极直接接到被保护的金属上,使其成为阴极,直流电源的正极接到附加电极上,使其成为阳极发生溶解,从而对阴极金属加以保护。

阳极性金属镀层保护法:在要保护的金属材质表面镀一层比基体金属电位更负的金属层,当镀层金属发生腐蚀时,基体作为阴极受到保护。

(3) 保护性覆盖层法。由于金属腐蚀是在金属与介质接触时发生的, 当用某些物质覆盖在被保护的金属表面, 金属材料与外围介质隔离开, 从而达到防止腐蚀的目的。这种方法分为以下三种。

金属保护层: 如电镀、热镀、化学镀、喷涂、包覆等。

非金属保护层: 如涂油漆、涂塑料、涂树脂等。

非金属膜: 在被保护金属表面发生化学或电化学作用, 以形成非金属保护膜, 如磷酸盐膜、铬酸盐膜、植酸盐膜等。

在以上各种保护方法中, 非金属保护层法和外加电流的阴极保护法应用较多, 对防止海水腐蚀做出了很大贡献。但非金属保护层法的保护效果不够好, 每隔一定时间就需要重新涂敷一次; 外加电流的阴极保护法需昼夜不停地提供电流, 电能消耗较大。选择耐蚀的合金钢和不锈钢是国外目前研究的热点, 但主要研究重点是如何抑制 Cl^- 对钝化膜的破坏作用。此外, 从经济角度来看, 这种方法的制造成本也较高。

装备再制造技术国防科技重点实验室采用再制造关键技术很好地防止或延缓了军用装备的腐蚀问题, 开发了一系列行之有效的防腐蚀新技术。目前, 采用及处于研究阶段的腐蚀防护表面工程技术如下所述。

1.2.1 高速电弧喷涂防腐技术

电弧喷涂防腐技术应用最为广泛的领域之一是长效防腐涂层的制备。电弧喷涂锌、铝及锌铝合金涂层具有优良的防海水、海洋大气、盐雾及土壤腐蚀的能力, 加入稀土元素可以有效地改善涂层的物理化学性能, 提高涂层的耐腐蚀性能。

Zn-Al (质量比为 85:15) 材料防腐效果良好, 是国内广泛应用的防腐蚀材料。涂层中 Al 的质量分数超过 13%~15% 时, Zn-Al 合金涂层既具有纯 Zn 涂层可对钢铁基材进行有效的阳极保护, 对点腐蚀和裂纹不敏感的特点, 又因涂层中含有足够的 Al, 能够形成完整的 Al_2O_3 保护膜而耐环境腐蚀。Zn-Al 合金涂层是替代纯 Zn 和纯 Al 涂层的极具发展前途的耐蚀金属涂层。在高温、高湿、高盐雾环境下使用的猎潜艇钢结构, 原来第 4~5 年就造成腐蚀穿孔, 第 7~8 年中修时换板率达 50%, 采用该技术后防腐蚀寿命延长至 15 年以上。全军装备维