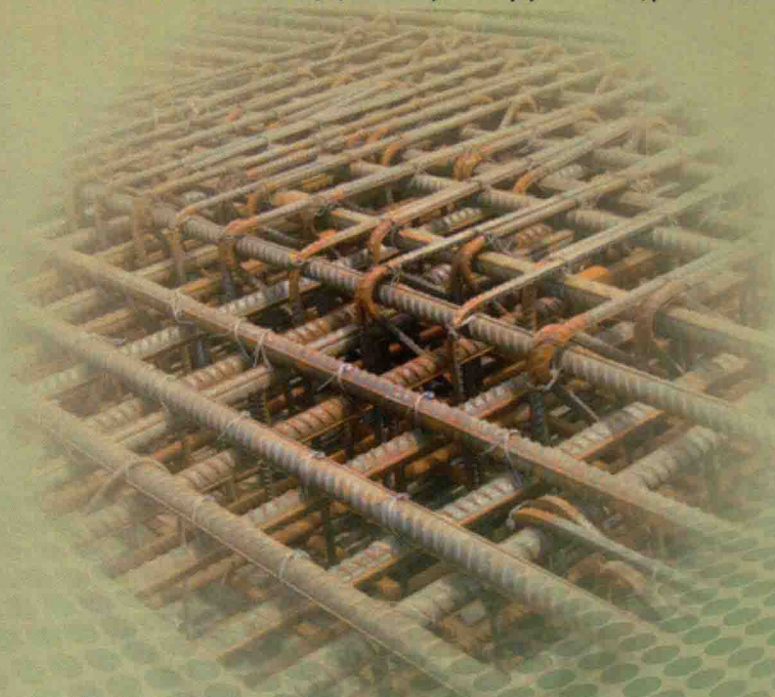


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

混凝土结构钢筋腐蚀控制 ——锌与锌合金的应用

葛 燕 朱锡昶 李 岩 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

混凝土结构钢筋腐蚀控制 ——锌与锌合金的应用

葛 燕 朱锡昶 李 岩 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书全面介绍了锌及其合金在混凝土结构钢筋腐蚀控制方面应用的方法、原理和工程应用实践效果。本书分三篇。第一篇为混凝土结构钢筋腐蚀与锌材料基本知识, 主要介绍混凝土结构和金属腐蚀基本概念、混凝土结构钢筋腐蚀与防腐附加措施及锌材料的基本知识。第二篇为热浸镀锌钢筋——混凝土结构耐蚀钢筋, 主要介绍钢筋热浸镀锌方法、热浸镀锌钢筋的性能和长期耐久性及应用情况。第三篇为锌阳极——混凝土结构阴极保护阳极材料, 主要介绍混凝土结构阴极保护基本知识及各种形式锌阳极的研究和工程应用。

本书可供从事材料科学和土木建筑等相关行业的教学、科研、设计、施工、管理的科技人员和工程技术人员参考。

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 杨 震 李丽娇 / 责任校对: 韩 杨

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: 16 3/4

字数: 338 000

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锈处理。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。

徐卫迪

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”战略的实施,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

钢筋腐蚀是造成混凝土结构过早失效而被破坏的主要原因之一，特别是在恶劣的腐蚀环境中。采取经济有效的措施控制钢筋腐蚀，对确保混凝土结构的长期安全运行具有十分重要的意义。目前，我国的混凝土结构钢筋腐蚀控制技术水平与发达国家有较大的差距。

在改善混凝土密实性、增加保护层厚度和利用防排水措施等常规手段的基础上，采用钢筋阻锈剂、耐腐蚀钢筋、混凝土表面封闭和电化学防腐蚀等措施，是目前国际上先进的混凝土结构钢筋腐蚀控制理念。在这些措施中，锌与锌合金发挥了重要的作用：一是制成热浸镀锌钢筋作为耐腐蚀钢筋的一种，二是在对混凝土结构实施阴极保护时作阳极材料使用。热浸镀锌钢筋和阴极保护在发达国家已得到较为广泛的应用，而目前在我国，尚未有热浸镀锌钢筋工程应用的报道，混凝土结构阴极保护也只在一些新建桥梁得到应用，还没有长期应用效果的研究成果。

《混凝土结构钢筋腐蚀控制——锌与锌合金的应用》是作者在整理分析国内外大量文献资料和所在单位近年来科研成果的基础上编写完成的。全书30余万字，重点介绍了锌及其合金在混凝土结构钢筋腐蚀控制方面应用的方法、原理和工程应用实践效果。该书不仅涵盖基础理论知识，还列举了大量工程应用案例。书中章节结构设计合理、内容全面，读后有一册在手、融会贯通之感。在国内外已出版的同类书籍中，还未见到有专门介绍锌及其合金在混凝土结构钢筋腐蚀控制方面应用的书籍。

该书作者长期从事腐蚀与防护领域的科研与工程设计工作，已经出版《混凝土中钢筋的腐蚀与阴极保护》和《桥梁钢筋混凝土结构防腐蚀——耐腐蚀钢筋及阴极保护》两本专著，对混凝土结构钢筋腐蚀控制技术的国内外发展前沿动态有较深刻的了解和认识，并具有一定的工程应用实践经验。相信该书的出版，将有助于读者掌握热浸镀锌钢筋和阴极保护在混凝土结构应用中的基本知识和工程应用方法，对国内深入开展混凝土结构钢筋腐蚀控制技术的研究和应用有很好的引导和推动作用，对提升我国的混凝土结构钢筋腐蚀控制水平有重要的意义。



2015年10月

前 言

混凝土结构是当今社会广泛应用的建筑结构形式，特别是钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土结构，在现代工程建设中发挥着巨大作用。然而，在腐蚀性环境中，钢筋腐蚀引起的混凝土结构耐久性不足的现象普遍存在，严重影响构筑物的长期安全使用，甚至引发灾难性的事故。在混凝土结构全寿命周期内有效预防和控制钢筋腐蚀，对确保混凝土结构满足耐久性要求具有十分重要的意义。

锌是工业中常用的金属材料，用于金属的防腐蚀保护是其重要的用途之一。在混凝土结构钢筋防腐蚀领域，锌主要有两大方面的应用：一是在碳钢钢筋表面热浸镀锌制成热浸镀锌钢筋，通过热浸镀锌层的物理屏障和牺牲阳极保护作用延缓钢筋的腐蚀；二是在对混凝土结构实施阴极保护时，使用锌或锌合金作阳极材料。

热浸镀锌钢筋作为混凝土结构耐腐蚀钢筋的一种，在发达国家已得到较为广泛的应用，在我国尚未有工程应用的报道，有关试验研究也相对较少。阴极保护是一种经济有效的电化学防腐蚀技术，用于混凝土结构已有四十多年的历史，在国外不仅被广泛用于已建混凝土结构钢筋的腐蚀控制，也被用于新建混凝土结构钢筋的腐蚀预防。我国虽然从 20 世纪 80 年代就开始了混凝土结构阴极保护的试验研究，但工程应用很少，2006 年开始被用于一些新建桥梁混凝土结构钢筋的腐蚀预防。无论是热浸镀锌钢筋还是混凝土结构阴极保护，我国与发达国家都有较大的差距。

本书分三篇。第一篇为混凝土结构钢筋腐蚀与锌材料基本知识，分为四章。主要介绍混凝土结构和金属腐蚀基本概念、混凝土结构钢筋腐蚀与防腐蚀附加措施以及锌材料的基本知识。第二篇为热浸镀锌钢筋——混凝土结构耐腐蚀钢筋，分为五章。主要介绍钢筋热浸镀锌方法、热浸镀锌钢筋的性能和长期耐久性及应用状况。第三篇为锌阳极——混凝土结构阴极保护阳极材料，分为七章。主要介绍混凝土结构阴极保护基本知识及热喷涂锌阳极、锌网阳极、锌箔阳极、预制砂浆活化锌阳极、涂料涂层阳极、棒状和带状锌阳极的研究和工程应用。

本书不仅涵盖相关的基础理论知识，还引用了大量的国际国内先进技术规范 and 工程应用案例，可供从事材料科学、土木建筑等教学、科研、设计、施工、管理的科技人员和工程技术人员参考。

本书在编写和出版过程中,得到了中国工程院重大咨询研究项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”的资助,并列入“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书分册。此外,还得到了水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院出版基金的资助,在此一并感谢!

由于编著者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

葛 燕

2015年10月

目 录

丛书序	
丛书前言	
序	
前言	

第一篇 混凝土结构钢筋腐蚀与锌材料基本知识

第 1 章 混凝土结构基本概念	3
1.1 概述	3
1.2 混凝土结构暴露环境	3
1.3 混凝土结构主要组成材料——钢筋和混凝土	7
1.3.1 钢筋	7
1.3.2 混凝土	17
参考文献	27
第 2 章 金属腐蚀基本概念	29
2.1 金属腐蚀定义和分类	29
2.1.1 金属腐蚀定义	29
2.1.2 金属腐蚀分类	29
2.2 金属电化学腐蚀基本原理	31
2.2.1 电极电位	31
2.2.2 电位-pH 图	32
2.2.3 金属电化学腐蚀过程	34
2.2.4 电极极化和去极化	35
2.3 金属腐蚀程度的评定	36
2.3.1 全面腐蚀程度的评定	36
2.3.2 局部腐蚀程度的评定	37
参考文献	37
第 3 章 混凝土结构钢筋腐蚀与防腐蚀附加措施	38
3.1 钢筋电化学腐蚀过程	38
3.2 混凝土碳化引起的钢筋腐蚀	40

3.3 氯化物引起的钢筋腐蚀	41
3.3.1 氯离子引起的钢筋钝化膜破坏机理	41
3.3.2 混凝土的氯化物污染	41
3.3.3 混凝土中氯化物的形态和氯离子含量检测方法	43
3.3.4 氯离子含量临界值	44
3.4 预应力钢筋的应力腐蚀开裂	53
3.5 钢筋腐蚀引起的混凝土结构耐久性破坏	55
3.6 混凝土结构钢筋腐蚀评价	57
3.6.1 钢筋半电池电位	57
3.6.2 钢筋腐蚀速率	60
3.6.3 混凝土电阻率	63
3.6.4 混凝土碳化深度	65
3.6.5 混凝土中氯离子含量	66
3.7 混凝土结构钢筋防腐蚀附加措施	66
参考文献	68
第4章 锌材料基本知识	71
4.1 锌的矿物资源	71
4.2 锌的生产和规格	72
4.2.1 锌的生产	72
4.2.2 规格和分析方法	74
4.3 锌产量和锌市场	75
4.4 锌的性质	76
4.4.1 锌的物理性质	76
4.4.2 锌的化学性质	77
4.4.3 锌的力学性能	77
4.4.4 锌的电化学特性	78
4.4.5 锌的腐蚀性能	79
4.5 锌的防腐蚀应用	82
4.5.1 覆盖层保护	82
4.5.2 阴极保护	83
参考文献	83

第二篇 热浸镀锌钢筋——混凝土结构耐腐蚀钢筋

第5章 钢铁热浸镀锌技术基础	87
----------------	----

5.1 钢铁热浸镀锌方法	87
5.2 钢铁热浸镀锌涂层结构	88
5.3 钢铁热浸镀锌标准	91
参考文献	92
第6章 钢筋热浸镀锌要求和检测方法	93
6.1 概述	93
6.2 热浸镀锌原材料要求和质量检测方法	94
6.2.1 对钢筋的要求	94
6.2.2 对锌的要求	95
6.3 镀锌层质量要求和检测方法	95
6.3.1 外观	95
6.3.2 镀锌层附着力	96
6.3.3 镀锌层厚度和质量 (重量)	96
6.4 热浸镀锌钢筋的钝化	98
6.5 镀锌层的破损和修补	99
6.5.1 镀锌层破损	99
6.5.2 镀锌层修补	100
参考文献	101
第7章 热浸镀锌钢筋的力学性能及其与混凝土的黏结	102
7.1 热浸镀锌钢筋的力学性能	102
7.2 热浸镀锌钢筋与混凝土的黏结	103
7.2.1 钢筋与混凝土之间黏结力的组成与作用	103
7.2.2 钢筋与混凝土黏结强度试验方法	103
7.2.3 热浸镀锌钢筋与混凝土的黏结强度	109
参考文献	110
第8章 混凝土结构热浸镀锌钢筋的腐蚀	112
8.1 混凝土中热浸镀锌钢筋钝化膜的形成	112
8.2 混凝土结构热浸镀锌钢筋的腐蚀	113
8.2.1 热浸镀锌钢筋在碳化混凝土中的腐蚀	113
8.2.2 热浸镀锌钢筋在氯化物污染混凝土中的腐蚀	113
8.3 混凝土结构碳钢筋和热浸镀锌钢筋腐蚀破坏模型比较	115
参考文献	116
第9章 混凝土结构热浸镀锌钢筋长期耐久性及其应用状况	118
9.1 混凝土结构热浸镀锌钢筋长期耐久性	118

9.1.1 LIZRO 调查成果	118
9.1.2 美国 Wyoming 桥和 Michigan 桥热浸镀锌钢筋评价	121
9.1.3 南非 Algoa 海滨人行桥使用热浸镀锌钢筋效果	126
9.1.4 百慕大群岛 Longbird 桥热浸镀锌钢筋评价	129
9.1.5 加拿大三座桥梁桥面板热浸镀锌钢筋评价	131
9.2 混凝土结构热浸镀锌钢筋应用状况	140
参考文献	147

第三篇 锌阳极——混凝土结构阴极保护阳极材料

第 10 章 混凝土结构阴极保护技术	151
10.1 阴极保护基本概念	151
10.1.1 阴极保护定义和实施办法	151
10.1.2 阴极保护基本原理	151
10.1.3 阴极保护应用范围	153
10.2 混凝土结构阴极保护实施办法	153
10.3 混凝土结构阴极保护必要性和应用条件	155
10.3.1 混凝土结构阴极保护必要性	155
10.3.2 混凝土结构阴极保护的应用条件	156
10.4 混凝土结构阴极保护阳极材料	157
10.4.1 用于土壤环境混凝土结构阴极保护的阳极材料	158
10.4.2 用于大气环境混凝土结构阴极保护的阳极材料	158
10.5 混凝土结构阴极保护期间的电化学反应	159
10.6 混凝土结构阴极保护准则	160
10.7 混凝土结构阴极保护电流密度	162
10.8 混凝土结构阴极保护监控系统	163
10.8.1 参比电极	163
10.8.2 电位衰减探头	164
10.8.3 电流密度探头和宏电池探头	165
10.8.4 鲁金探头	165
10.8.5 数字万用表	165
10.8.6 零电阻安培仪	165
10.8.7 数据记录仪	165
参考文献	165
第 11 章 热喷涂锌阳极	167

11.1	概述	167
11.2	金属热喷涂技术概述	170
11.3	混凝土表面热喷涂锌方法	172
11.4	混凝土表面热喷涂锌质量要求和检测	173
11.4.1	锌的性能要求和检测	173
11.4.2	锌涂层要求和检测	175
11.5	混凝土表面热喷涂锌阳极的电化学老化	177
11.6	工程案例	178
11.6.1	美国得克萨斯州 Queen Isabella 堤道桥强制电流阴极保护	178
11.6.2	加拿大蒙特利尔 Yves Prevost 高架桥牺牲阳极保护	179
	参考文献	182
第 12 章	锌网阳极	184
12.1	概述	184
12.2	美国切萨皮克海湾桥隧工程混凝土桩牺牲阳极保护	184
12.3	墨西哥 La Unidad 桥混凝土桩牺牲阳极保护	186
12.4	奥地利 Apline 公路桥牺牲阳极保护试验	187
12.5	美国两座自然通风海水冷却塔牺牲阳极保护	191
12.5.1	概述	191
12.5.2	美国佛罗里达 St. John's 电厂海水冷却塔牺牲阳极保护	193
12.5.3	美国佛罗里达 Crystal River 自然通风海水冷却塔牺牲阳极保护	195
12.6	我国某海港码头预应力混凝土桩牺牲阳极保护应用试验	196
12.6.1	概述	196
12.6.2	试验概况	197
12.6.3	测量结果与分析	198
	参考文献	200
第 13 章	锌箔阳极	201
13.1	概述	201
13.2	美国俄勒冈州高架桥桥面板牺牲阳极保护试验	201
13.3	美国弗吉尼亚桥梁下部结构牺牲阳极保护试验	202
	参考文献	204
第 14 章	预制砂浆活化锌阳极	205
14.1	概述	205
14.2	美国弗吉尼亚 Route 29/Route 250 桥梁柱子牺牲阳极保护	210
14.3	英国 Leicester 桥梁现场试验	218

14.4 美国俄亥俄州混凝土桥梁桥台牺牲阳极保护	224
14.5 美国纽约州 Robert Moses 堤道混凝土方桩牺牲阳极保护	226
参考文献	227
第 15 章 涂料涂层阳极	229
15.1 概述	229
15.2 美国明尼苏达州圣保罗一座桥梁桥面板现场应用试验	229
15.3 美国明尼苏达州乔丹一座桥梁现场试验	230
参考文献	232
第 16 章 棒状和带状锌阳极	233
16.1 概述	233
16.2 预应力钢筒混凝土管的基本概念	233
16.3 埋地 PCCP 管的失效破坏和阴极保护必要性	235
16.4 埋地 PCCP 管牺牲阳极保护实施方法	238
16.4.1 电连接	238
16.4.2 电绝缘	240
16.4.3 牺牲阳极选用	240
16.4.4 牺牲阳极安装	243
16.4.5 保护效果测量	243
16.5 工程案例	243
16.5.1 美国得克萨斯州 Richland Chambers 和 Cedar Creek PCCP 供水管道 牺牲阳极保护	244
16.5.2 我国南水北调中线工程 PCCP 管工程	247
参考文献	249