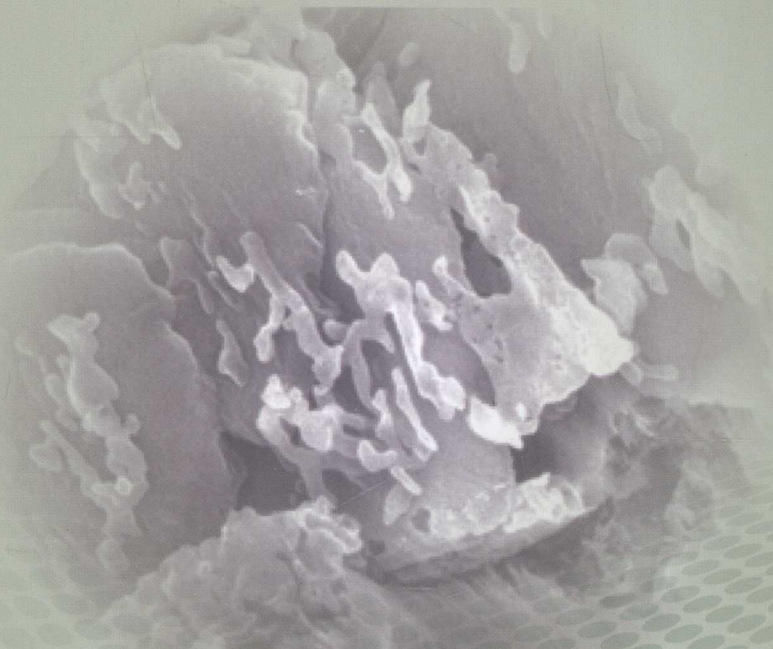


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书  
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 金属腐蚀的光电化学 阴极保护机理

陈卓元 著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书  
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 金属腐蚀的光电化学 阴极保护机理

陈卓元 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书围绕近年来著者在光电化学阴极保护领域的研究成果,结合光电化学阴极保护理论、半导体理论、电化学/光电化学原理,对石墨相氮化碳材料、改性材料、复合材料及储电子材料的光电化学阴极保护性能和机理进行了论述。同时,本书还结合国内外同行在相关方面的研究工作,对光电化学阴极保护材料的设计及理论研究做了较为详细的阐述。撰写本书的初衷是将绿色环保的光电化学阴极保护技术推向实际工程应用,促进该技术的快速发展。

本书可为腐蚀科学研究人员提供参考。此外,本书还可供光电材料、光催化材料研究设计领域的科研工作者和工程技术人员阅读,也可以作为材料、化工专业研究生参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属腐蚀的光电化学阴极保护机理/陈卓元著. —北京: 科学出版社, 2017.1

(中国腐蚀状况及控制战略研究丛书)

ISBN 978-7-03-051626-8

I. ①金… II. ①陈… III. ①腐蚀—电化学保护—阴极保护  
IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 010172 号

责任编辑: 李明楠 孙静惠 / 责任校对: 杜子昂  
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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 237 000

定价: 88.00 元

(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	孟 伟
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”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,更好地了解和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

海洋蕴藏着丰富的资源，发展海洋经济，保护海洋生态环境，成为我国重点支持优先开发的研究领域。然而长期以来，海洋环境中服役的金属工程材料遭受着严重的腐蚀破坏，特别是我国南海海洋大气环境中光照强度大、紫外辐射量高，加上高温、高湿、高盐雾的特点，在该海洋环境条件下服役的金属材料遭受着更为严重的腐蚀破坏。从而，减缓海洋工程材料的腐蚀已成为众所关注的焦点。

海洋环境中太阳能资源丰富，利用绿色、清洁的太阳能，通过半导体功能涂层的光电转换技术，为涉海金属构筑物提供光电化学阴极保护的防腐新方法受到科学家们的特别关注。这种方法具有环境友好、成本低等优点，能同时解决能源与环境问题，在金属腐蚀防护领域有着广泛的应用前景。然而，光电化学阴极保护技术发展至今仍存在诸多问题，如可见光光电转换率低、量子效率低、暗处持续保护时间不够长等，因此通过研发新型、特殊结构、可见光响应的光电极材料，优化调控光电极的微观结构，有望进一步提高光电化学阴极保护的效能。

《金属腐蚀的光电化学阴极保护机理》是作者基于多年从事光电化学阴极保护、金属大气腐蚀研究及光催化研究工作的经验，整理分析国内外大量文献资料，结合作者所在单位课题组近年来科研成果的基础上撰写而成。该书不仅涵盖了新型复合光电化学阴极保护材料研究的新进展，还介绍了光电化学阴极保护材料物性表征的各种手段，以及光电化学阴极保护的机理和性能表征的技术和方法。该书章节结构设计合理、内容翔实，期望能够开拓广大读者的思维和视野。

该书是作者在紧跟国际前沿热点材料和结构基础上，对择优构筑的多种不同类型光电化学阴极保护材料体系进行广泛而深入的研究后，对研究成果进行归纳、整合及提炼而成。该书的出版将有助于读者掌握光电化学阴极保护薄膜材料的合理构筑及应用的基本知识，为设计高效光电化学阴极保护材料提供理论基础和实践依据，对调控及提升光电化学阴极保护效能具有重要参考价值。期望该书的出版能为进一步解决光电化学阴极保护技术的瓶颈问题起到很好的引导作用，同时能够为光电化学阴极保护材料在金属腐蚀防护领域的应用起到推动作用。

侯保荣

2016年12月

# 前 言

海洋环境中服役的金属材料经受着极其严酷的腐蚀，腐蚀导致了巨大的经济损失、严重的环境污染甚至灾难性的事故。为减少金属材料腐蚀造成的各种损失，腐蚀与防护领域的科学家们殚精竭虑地研发新型环境友好的抗腐蚀保护技术。1994年 Fujishima 等报道二氧化钛薄膜可应用于金属的抗腐蚀保护中，其在紫外光照激发下产生的光生电子可为金属提供光电化学阴极保护。由此，光电化学阴极保护受到了特别关注。这种技术可直接利用清洁、绿色环保、可持续发展的太阳能资源，为金属提供光生电流进行阴极保护，可同时解决能源和环境两方面问题，在腐蚀防护领域表现出了深远的应用前景。

本书主要介绍了一些新型、复合、改性半导体材料的光电化学阴极保护性能及作用机理。结合半导体理论、电化学/光电化学原理就半导体微观结构对光电化学阴极保护性能的影响机制进行了系统阐述，并提出了机理模型。研究表明，构建异质结体系、改性结构可以驱动光生载流子快速分离形成自由的光生电子和空穴，从而提高光电转换材料的量子产率，有效提高半导体薄膜的光电化学阴极保护性能。本书是作者在多年光电化学阴极保护研究工作的基础上，结合自己的研究成果及在该领域多年的研究经验，经过不断总结、修改和创新撰写而成的。全书共8章，主要包括：光电化学阴极保护的理论基础、光电化学阴极保护研究现状及石墨相氮化碳系列新型光电材料、改性材料、复合材料、储电子材料在紫外光和可见光辐射条件下对各种金属的光电化学阴极保护性能及机理，以及光照结束后的暗态延时保护机理，探讨了异质结结构的构筑、缺陷结构、能级电位、生长形貌对半导体材料的光电化学阴极保护性能的影响机制。本书首先简单地介绍了半导体基础及光电化学阴极保护原理，之后结合作者多年的研究结果，系统地介绍了几类新型、复合、改性体系的热点材料及其结构。希望本书对想进入光电化学阴极保护领域学习的研究生有所帮助，也希望本书为今后研究人员更好地设计及研发更高效的金属防腐涂层材料提供理论指导。

本书根据作者在青岛市创业创新领军人才项目（项目编号：15-10-3-15-(39)-zch）和国家自然科学基金面上项目（项目批准号：41376126和41576114）中进行的研究工作撰写而成。作者谨向提供这些项目经费支持的相关部门表示感谢！同时，本书作者的学生孙萌萌博士、补钰煜博士、孙晓英博士、荆江平博士和李亨特硕士参与了本书涉及的部分研究工作，并参与了本书撰写过程中的文字整理与修改

工作，在此对他们的贡献致以诚挚的谢意！青岛科技大学李卫兵教授对参与本书研究工作的博士后和研究生进行了指导和帮助，作者一并表示感谢！

感谢中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目对本书出版的资助！

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，如蒙指正，不胜感激。

陈卓元

2016年12月

# 目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 腐蚀的危害及调查概况	1
1.2 腐蚀防护措施简介	2
1.3 本书撰写的主要目的	4
参考文献	5
第 2 章 金属腐蚀的光电化学阴极保护理论基础	7
2.1 半导体简介	7
2.2 光催化过程	9
2.3 光电化学阴极保护原理	10
2.4 光电化学阴极保护的影响因素	11
2.4.1 半导体能级结构对光电化学阴极保护效应的影响	11
2.4.2 半导体涂层的特性对光电化学阴极保护效应的影响	12
2.4.3 光生电子-空穴界面转移/反应过程对光电化学阴极保护效应的影响	14
2.5 光电化学阴极保护过程	14
参考文献	17
第 3 章 光电化学阴极保护研究现状	19
3.1 引言	19
3.2 金属光电化学阴极保护研究的起源与发展现状	20
3.2.1 光电极涂层的制备方法	20
3.2.2 导带电位对金属材料光电化学阴极保护的重要影响	26
3.2.3 太阳光利用效率的提高及可见光响应的光电化学阴极保护涂层材料的开发	26
3.2.4 光电储能材料暗态持续保护性能的研究	44
3.2.5 高保护性材料与光电材料的复合对金属抗腐蚀保护性能的改善	49
参考文献	50

<b>第 4 章 石墨相氮化碳系列材料的光电化学阴极保护性能研究</b> .....	54
4.1 类石墨结构氮化碳材料 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 的光电化学阴极保护性能 .....	54
4.1.1 引言 .....	54
4.1.2 石墨相氮化碳材料的制备及表征 .....	58
4.1.3 石墨相氮化碳材料的光电化学阴极保护性能 .....	62
4.1.4 石墨相氮化碳光电极的光电化学阴极保护机理分析 .....	64
4.1.5 小结 .....	65
4.2 超薄介孔氮化碳包覆氧化锌复合材料的光电化学阴极保护性能研究 .....	66
4.2.1 引言 .....	66
4.2.2 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的表面形貌与微观结构分析 .....	69
4.2.3 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的晶体结构与化学组成分析 .....	71
4.2.4 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的光学吸收性能分析 .....	73
4.2.5 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的光电化学阴极保护性能分析 .....	73
4.2.6 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的光电化学和电化学性能分析 .....	76
4.2.7 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @ZnO 纳米壳核结构复合材料的光电化学阴极保护机理分析 .....	79
4.2.8 小结 .....	80
4.3 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合物的光电化学阴极保护性能研究 .....	81
4.3.1 引言 .....	81
4.3.2 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的晶相结构和形貌 .....	83
4.3.3 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的化学组成 .....	85
4.3.4 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的光吸收性能 .....	86
4.3.5 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的光电化学阴极保护性能 .....	87
4.3.6 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的光电化学性能 .....	88
4.3.7 C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 壳核结构复合材料的光电化学阴极保护机理 .....	90
4.3.8 小结 .....	92
参考文献 .....	93
<b>第 5 章 改性半导体材料的光电化学阴极保护性能研究</b> .....	97
5.1 Ni 掺杂二氧化钛的光电化学阴极保护性能 .....	97
5.1.1 引言 .....	97
5.1.2 Ni 掺杂二氧化钛样品的物理表征 .....	99
5.1.3 Ni 掺杂二氧化钛样品的光学吸收性能分析 .....	102
5.1.4 Ni 掺杂二氧化钛样品的光电化学阴极保护性能分析 .....	103
5.1.5 Ni 掺杂二氧化钛样品的光电化学阴极保护机理分析 .....	106
5.1.6 小结 .....	106
5.2 过氧化氢处理氧化铟的光电化学阴极保护性能 .....	107

5.2.1 引言	107
5.2.2 制备的氧化铟样品的晶相结构和形貌分析	109
5.2.3 制备的氧化铟样品的表面组分状态分析	111
5.2.4 制备的氧化铟样品的光学吸收性能分析	112
5.2.5 制备的氧化铟样品的光电化学阴极保护性能分析	113
5.2.6 制备的氧化铟样品的电化学/光电化学性能	114
5.2.7 制备的氧化铟样品的光电化学阴极保护机理分析	116
5.2.8 小结	118
参考文献	118
<b>第 6 章 复合材料的光电化学阴极保护性能研究</b>	<b>122</b>
6.1 氧化铟/二氧化钛复合材料的光电化学阴极保护性能	122
6.1.1 引言	122
6.1.2 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合物的晶体结构和表面形貌分析	124
6.1.3 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合物的光吸收性能分析	125
6.1.4 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 复合物的光电化学阴极保护性能	125
6.1.5 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 的光电化学性能分析	131
6.1.6 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 的光电化学阴极保护性能的提升机理	132
6.1.7 小结	134
6.2 硫化铟敏化氧化锌纳米棒阵列的光电化学阴极保护性能研究	135
6.2.1 引言	135
6.2.2 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的晶体结构分析	137
6.2.3 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的表面形貌分析	137
6.2.4 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的微观结构和化学组成分析	138
6.2.5 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的光吸收性能分析	141
6.2.6 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的光电化学阴极保护性能分析	142
6.2.7 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ NRA 复合物的光电化学阴极保护机理分析	145
6.2.8 小结	146
参考文献	147
<b>第 7 章 储电子材料氧化钨的光电化学阴极保护性能研究</b>	<b>151</b>
7.1 硫化镉敏化纳米花状氧化钨的光电化学阴极保护性能	151
7.1.1 引言	151
7.1.2 硫化镉敏化纳米花状氧化钨薄膜材料的表面形貌分析	153
7.1.3 硫化镉敏化纳米花状氧化钨薄膜材料的成分分析	155
7.1.4 硫化镉敏化纳米花状氧化钨材料的光吸收性能分析	156
7.1.5 硫化镉敏化纳米花状氧化钨材料的光电化学阴极保护性能分析	157

---

7.1.6	硫化镉敏化纳米花状氧化钨材料的电子存储性能分析 .....	160
7.1.7	硫化镉敏化纳米花状氧化钨材料的电化学性能分析 .....	164
7.1.8	硫化镉敏化纳米花状氧化钨材料的光电化学阴极保护机理分析 .....	167
7.1.9	小结 .....	169
7.2	二氧化钛-氧化钨/还原氧化石墨烯体系的光电化学阴极保护性能研究 .....	169
7.2.1	引言 .....	169
7.2.2	WO <sub>3</sub> /rGO 复合物的形貌及结构分析 .....	173
7.2.3	TiO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub> /rGO 复合物的光电化学阴极保护性能 .....	177
7.2.4	制备的 WO <sub>3</sub> /rGO 复合物的电化学性能 .....	180
7.2.5	TiO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub> /rGO 体系光电化学阴极保护性能提升的机制 .....	182
7.2.6	小结 .....	183
	参考文献 .....	183
第 8 章	结语 .....	187

# 第1章 绪 论

## 1.1 腐蚀的危害及调查概况

腐蚀是自然界中所有材料都要面对的失效与破坏现象。材料腐蚀过程是一个吉布斯自由能下降的过程，因此，材料的腐蚀破坏是一个自发进行的过程，它具有普遍性、隐蔽性、渐进性和突发性的特点。它给人类社会造成了巨大的损失，消耗资源、污染环境，严重的会造成大量工业事故，危及人类健康和生命，并造成经济巨损。

腐蚀是世界各国共同面临的问题，据有关统计，每年腐蚀损失约占各国国内生产总值（GDP）的3%~5%，远远大于自然灾害和其他各类事故损失的总和<sup>[1]</sup>。腐蚀问题已经成为影响国民经济和社会可持续发展的重要因素之一。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%，其中的2/3是可再生的，而1/3的金属材料则会因腐蚀而无法回收。可见，腐蚀是对自然资源的极大浪费。此外，腐蚀还会造成严重的环境污染。腐蚀产物会直接排放到大气、土壤和水体环境中，直接污染人类的生存环境。同时，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质，对自然环境带来极其严重的影响，其中极具毒性的腐蚀产物通过人类食用的植物和动物呈指数倍聚集后，严重影响人类的身体健康，对生态平衡产生极大的破坏。

2016年6月1日，由中国科学院海洋研究所侯保荣院士任首席科学家的中国工程院重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”在北京召开新闻发布会。发布会指出，2014年我国的腐蚀总成本约占当年GDP的3.34%，总额超过21000亿元人民币，相当于每个中国人当年承担1500多元的腐蚀成本。该项目组重点围绕我国基础设施、交通运输、能源、水环境、生产制造及公共事业等领域腐蚀状况开展调查研究，在广泛深入的调查研究基础上获取全国腐蚀成本数据，并揭示我国腐蚀控制领域存在的问题与制约其发展的主要因素，提出解决我国腐蚀控制领域所存在的问题的战略建议和对策。项目组希望通过一系列的调查数据，引发全社会对腐蚀问题及使用防腐技术的高度关注，构建腐蚀控制投资回报经济模型，建立全国腐蚀损失及其控制数据库，推动中国防腐产业的快速与科学发展。侯保荣院士指出，腐蚀是安全问题、是经济问题、是生态文明问题，腐蚀防护是



发展“一带一路”战略的重要内容，腐蚀防控力度是国家文明和繁荣程度的反映。该项目组呼吁加快推动我国腐蚀防护技术水平的全面提高，科学降低腐蚀损失。

## 1.2 腐蚀防护措施简介

众所周知，腐蚀过程是一个不可避免的自发过程，然而，材料的腐蚀破坏速率却是可控制的。通过对材料腐蚀行为与机理的了解与认识水平的提高，人们可以对暴露在自然环境中的材料施加合理的腐蚀防护措施，以提高材料的服役寿命。

当前，在国民经济中广泛应用的防腐蚀措施主要有以下几种：

(1) 合理选材，即针对具体使用的工况和环境条件选用相对耐蚀的结构材料；

(2) 涂镀层技术和表面改性技术，即根据防腐蚀设计的要求，选用有机涂层、无机涂层、化学转化膜处理等非金属涂层，电镀、化学镀、热浸镀、喷镀、扩散镀等金属镀层及离子注入和金属、非金属衬里等改变材料的腐蚀防护性能；

(3) 环境（介质）处理，即通过干燥除湿、脱气、脱盐等措施除去环境介质中的腐蚀性组分，或者向环境介质中添加有机、无机类缓蚀剂等；

(4) 电化学防护技术，即可根据环境介质和工况要求分别采用外加电流阴极保护技术、牺牲阳极的阴极保护或电化学阳极保护技术等；

(5) 防腐蚀设计，主要包括防腐蚀结构设计、异种金属材料直接电偶连接的防腐蚀设计、防腐蚀强度设计、防腐蚀方法选择、耐蚀材料选择及符合防腐要求的制造工艺确定等。

上述的腐蚀防护技术各有优缺点。涂料是一种可以用不同的施工工艺涂覆在构件表面，形成黏附牢固、具有一定强度、连续的固态薄膜材料。这样形成的膜通称为涂膜，又称漆膜或涂层。涂料保护法是将耐蚀性较强的涂料，涂覆在金属等材料表面，将主体金属等材料与腐蚀性介质隔离以达到防腐蚀目的的方法。涂料可以分为油基漆（成膜物质为干性油类）和树脂基漆（成膜物质为合成树脂）两类，它是通过一定的涂覆方法涂在金属表面，固化后形成薄膜涂层，从而保护金属等材料免于腐蚀破坏。涂层的使用可以避免材料遭受外界环境（如大气、化学品、紫外线灯）侵蚀，可以掩盖材料表面的缺陷（凹凸不平、斑疤或色斑等）及赋予材料表面丰富的色彩，改善外观。然而，为了提高防腐性能，通常需要涂覆多层涂料，同时对涂装过程的工况条件（如相对湿度、温度等）有严格的要求，并且对涂层的厚度及涂装的工艺（尽可能降低气孔、气泡等）都需要进行严格的控制。防腐涂料能在苛刻条件下使用，并具有长效防腐寿命，防腐涂料在化工大气和海洋环境里，一般可使用 10 年甚至 15 年以上，即使在酸、碱、盐和溶剂介质里，并在一定温度条件下，也能使用 5 年以上。涂料保护法具有耐蚀性能的前