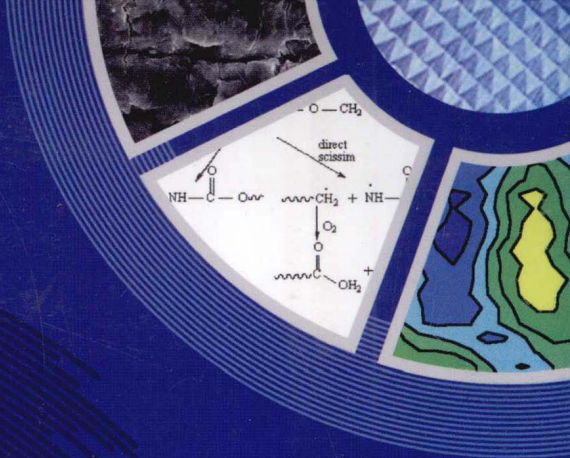




材料腐蚀丛书



高分子材料自然环境 老化规律与机理

李晓刚 高瑾 张三平 杜翠薇 卢琳 著



科学出版社

材料腐蚀丛书

高分子材料自然环境 老化规律与机理

李晓刚 高 瑾 张三平 著
杜翠薇 卢 琳

科学出版社

北 京

《材料腐蚀丛书》编委会

顾 问:曹楚南 侯保荣

主 编:李晓刚

编 委:(按姓氏汉语拼音字母顺序排列)

董超芳 郭兴蓬 韩 冰 何业东

林昌健 齐慧滨 乔利杰 曲良山

王福会 张鉴清 张伦武 张三平

郑玉贵 左 禹

《材料腐蚀丛书》序

材料是人类社会可接受的、能经济地制造有用器件(或物品)的物质。腐蚀是材料受环境介质的化学作用(包括电化学作用)而破坏的现象。腐蚀不仅在金属材料中发生,也存在于陶瓷、高分子材料、复合材料、功能材料等各种材料中。腐蚀是“静悄悄”地发生在所有的服役材料中的一种不可避免的过程,因此,认识材料腐蚀过程的基本规律和机理非常重要。

材料腐蚀学是一门认识材料腐蚀过程的基本规律和机理的学科,其理论与材料科学、化学、电化学、物理学、表面科学、力学、生物学、环境科学和医学等学科密切相关;其研究手段包括各种现代电化学测试分析设备、先进的材料微观分析设备、现代物理学的物相表征技术和先进的环境因素测量装备等;其防护技术应用范围涉及各种工业领域,以及大气、土壤、水环境甚至太空环境等自然环境。

对材料腐蚀过程的机理和规律的探索是材料腐蚀学科的灵魂。多学科理论的交叉,即材料科学、化学、电化学、物理学、表面科学和环境科学等学科的进一步发展,与渗透促进了材料腐蚀学科基础理论的发展。其另外一个特点是理论研究与工程实际应用的结合,工程实际应用的需求是其理论研究发展的最大推动力。

由统计与调查结果发现,各工业发达国家的材料腐蚀年损失是国民经济总产值的 2%~4%,我国 2000 年的材料腐蚀总损失是 5000 亿元人民币。利用材料的环境腐蚀数据和腐蚀规律与机理的研究成果,在设计中指导材料的科学使用,并采取相应的防护措施,有利于节约材料、节省能源消耗。若减少腐蚀经济损失的 25%~30%,可对我国产生每年约 1000 亿元人民币的效益。同时,避免和减少腐蚀事故的发生,可延长设备与构件的使用寿命,有很好的社会效益和经济效益。特别是近 20 年来我国冶金、化工、能源、交通、造纸等工业的发展,带来了对于自然环境的污染,不仅导致生态环境的破坏,还使材料的腐蚀速率迅速增加,设备、构件、建筑物等的使用寿命大大缩短。我国局部地区雨水 pH 已降低到 3.2,导致普碳钢的腐蚀速率增大 5~10 倍,混凝土建筑物的腐蚀破坏也大大加速。只有充分认识材料在不同污染自然环境中的腐蚀规律,才能为国家制定材料保护政策和环境污染控制标准提供依据和对策。

因此,发展材料腐蚀与防护学科是国家经济建设和国防建设、科技进步和经济社会可持续发展的迫切需要。持续深入开展本学科的基础性研究工作,有利于提高我国的材料与基础设施的整体水平,促进我国材料腐蚀基础理论体系和防护技术工程体系的形成与发展,对国家建设、科技进步、技术创新,以及学科的进一步

发展具有重要意义。

1949年后,我国的材料腐蚀理论研究和防护技术受到高度重视并迅速发展。随着经济的高速增长和工业体系的日渐完备,目前,我国有关腐蚀学科理论和各种防护技术的研究成果不但完全可以解决自身出现的各种材料腐蚀问题,而且已经成为世界上该学科的重要组成部分,焕发出朝气蓬勃的活力。我国正逐渐由材料腐蚀研究与防护技术大国向材料腐蚀研究与防护技术强国转变。

值此科学出版社推出《材料腐蚀丛书》之际,本人很高兴以此序抒发感想并表示祝愿与感谢之意:祝愿这套丛书能充分反映我国在材料腐蚀学科基础性研究成果方面的进展与水平;感谢我国材料腐蚀学科研究者的辛勤劳动;感谢科学出版社对材料腐蚀学科的支持。相信随着我国经济水平的日益提高,我国的材料腐蚀理论研究和防护技术的发展一定会再上一个新台阶!

曹楚南

中国科学院院士、浙江大学教授

2009年8月28日

前 言

高分子材料是既“古老”又“年轻”的材料,说“古老”是指它几乎伴随着人类社会的发展,说“年轻”是指高分子的科学概念体系诞生于 20 世纪 20 年代。虽然现代高分子材料的发展历史很短,但其在世界上的年产量已经超过金属,成为最重要的材料品种之一。高分子材料及其复合材料在海陆空运输工具、工业装置、建筑材料、医用材料、科研特种装备、航天设备和仪器、体育运动和休闲娱乐用品等诸多方面都有出色表现。另外,高分子材料在新能源开发、节能环保等方面也发挥着不可替代的作用。

回顾历史,1920 年,Staudinger 提出了高分子科学的概念,预测出聚氯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯等聚合物的结构,使得一系列烯烃类加聚物被合成出来并工业化,如尼龙、PVC、PMMA、PS 和 LDPE。随后,Flory 建立了高分子溶液理论,成功测定了聚合物的相对分子质量,且因此获得诺贝尔奖。第二次世界大战促进了高分子材料的发展,一大批重要的橡胶和塑料被人工合成出来,如丁苯橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶、有机氟材料、ABS 和涤纶树脂。1956 年,Szwarc 开了高分子结构设计的先河,促使大量高分子工程材料(如聚甲醛、聚碳酸酯、聚砒、聚苯醚和聚酰亚胺)问世。60 年代以后,特种高分子和功能高分子得到发展。特种高分子是指具有高强度、耐高温、耐辐射、高频绝缘和半导体等特性的高分子材料。功能高分子包括分离材料、导电高分子、感光高分子、高分子催化剂、高吸水性树脂、医用高分子、药用高分子、高分子液晶等。当今是高分子材料大发展、大扩展时期,其使用渗透到人类社会的各个方面;人类对高分子材料的使用将更加合理和廉价,理论研究也将更加深入。

高分子材料不仅会像金属材料一样,在服役中与环境发生化学反应而“腐蚀”失效,在使用过程中还不可避免地与环境发生能量交换导致“老化”失效。随着高分子材料种类、用量的增加和极端使用条件的扩大以及环境污染日益严重,高分子材料的环境老化问题变得越来越严重。对高分子材料环境老化机理与规律的研究,与其合成方法研究一样,也变得日益重要。

作者所在课题组开展“高分子材料环境老化数据积累与规律”研究工作已近十年了,本书是本课题组在有关“高分子材料环境老化数据积累与规律”研究方向上阶段性成果的系统总结与报道。在学科研究上,有关高分子材料环境老化试验研究方法正处于快速发展中,本书各篇均采用研究报告的形式,重点叙述试验研究方法 with 结果,以期为完善研究方法提供研究基础;尽量给出试验数据,以期为全社会

所共享,为国家建设和学科发展提供依据。先后参加本书研究工作的还有赵泉林博士、胡建文博士、倪晓雪博士以及王玲、钱晓龙、耿舒、杜翠、田建永等硕士研究生。

本书的相关系列工作是在科学技术部和国家自然科学基金委员会的资助下完成的,在此一并致谢!近年来,作者所在研究团队先后承担的与本书内容有关的科学技术部和国家自然科学基金委员会项目有:

(1)国家材料环境腐蚀野外台站建设与资源共享(2005DKA10400),科学技术部基础条件平台建设重大项目,2005~2010年。

(2)高分子材料在西部典型大气环境中老化规律及机理研究(50499334),国家自然科学基金“十五”重大项目二级课题,2005~2008年。

(3)我国西部典型环境中有机高分子材料快速老化失效的机理与防护研究(50533060),国家自然科学基金重点资助项目,2006~2009年。

(4)涂膜光老化对膜下金属腐蚀行为的影响与规律(50571013),国家自然科学基金项目,2006~2008年。

全国材料环境腐蚀站网的同事对本书研究工作给予了大力支持,萧以德研究员、林安教授、王笃金教授、阳明书教授、陆启凯研究员等的支持令作者深受启发,向他们表示衷心的感谢!师昌绪院士、王光雍教授和徐金堃教授等前辈和老师长期给予了大力支持,深表感谢!

书中难免存在不妥之处,若读者及时发现,请及时赐教与指正。

目 录

《材料腐蚀丛书》序

前言

第一篇 高分子材料自然环境老化研究概况

第 1 章 高分子材料环境老化特征与机理	3
1.1 高分子材料的基本结构	3
1.2 高分子材料自然环境老化特征	7
1.3 高分子材料的老化机理	9
1.4 高分子材料老化的主要环境影响因素	10
第 2 章 高分子材料的环境老化试验与表征方法	15
2.1 高分子材料的环境老化试验方法	15
2.2 高分子材料的环境老化常用的表征方法	16
参考文献	18

第二篇 典型塑料的环境老化行为与规律

第 3 章 聚碳酸酯的环境老化机理研究进展	21
3.1 PC 的热氧老化机理	21
3.2 PC 的湿热老化机理	23
3.3 PC 的光氧老化机理	24
3.4 PC 的室外大气暴晒与室内人工加速老化的寿命评估	27
第 4 章 典型室外大气环境下 PC 的老化行为与规律	28
4.1 老化后的表观性能对比分析	29
4.2 老化后的力学性能对比分析	32
4.3 老化后的红外测试结果对比分析	34
小结	40
第 5 章 室内环境试验下 PC 的老化行为与规律	42
5.1 不同加速老化条件下 PC 老化后的表观性能对比分析	42
5.2 不同加速老化条件下 PC 老化后的力学性能对比分析	44

5.3 不同加速老化条件下 PC 老化后的红外谱图对比分析	47
小结	50
第 6 章 PC 室内外环境老化试验相关性分析	52
6.1 PC 室内外老化的表观性能相关性分析	52
6.2 PC 室内外老化的力学性能相关性分析	56
6.3 PC 室内外老化的化学结构相关性分析	60
小结	64
第 7 章 典型塑料在西沙海洋大气环境中的老化行为	65
7.1 典型塑料西沙暴晒后的表观性能	65
7.1.1 外观形貌	65
7.1.2 扫描电镜下的微观形貌	66
7.1.3 色差	69
7.1.4 光泽度	70
7.2 典型塑料西沙暴晒后的力学性能	71
7.2.1 硬度	71
7.2.2 拉伸性能	73
7.2.3 弯曲性能	76
7.2.4 简支梁冲击性能	78
7.3 典型塑料西沙暴晒后的红外谱图分析	79
7.3.1 MDPE 红外谱图分析	79
7.3.2 PP 红外谱图分析	80
7.3.3 PVC 红外谱图分析	82
7.3.4 ABS 红外谱图分析	83
7.3.5 PS 红外谱图分析	83
7.3.6 PA 红外谱图分析	84
小结	85
第 8 章 基于西沙环境的 MDPE 室内氙灯加速老化行为研究	87
8.1 氙灯老化后的表观性能	87
8.2 氙灯老化后的力学性能	88
8.2.1 拉伸强度	88
8.2.2 断裂伸长率	88
8.2.3 弯曲强度	88
8.3 老化后的红外谱图分析	90
8.4 室内氙灯老化与西沙大气环境暴晒试验的相关性	90
小结	93

第 9 章 基于西沙环境的 ABS 室内氙灯老化试验研究	94
9.1 氙灯老化后的表观性能	94
9.2 老化后的力学性能	96
9.2.1 拉伸性能	96
9.2.2 弯曲性能	97
9.2.3 冲击性能	97
9.2.4 硬度	98
9.3 老化后的红外谱图分析	98
9.4 西沙大气环境暴晒与氙灯加速老化性能相关性分析	99
9.4.1 拉伸性能	99
9.4.2 冲击性能	100
9.4.3 色差	101
9.4.4 黄色指数	102
小结	103
参考文献	104

第三篇 三元乙丙橡胶的环境老化行为与规律

第 10 章 EPDM 环境老化机理研究进展	107
10.1 EPDM 的热氧老化机理	107
10.2 EPDM 的光氧老化机理	113
10.3 EPDM 的臭氧老化机理	114
10.4 EPDM 的化学介质老化机理	114
10.5 EPDM 的超声波老化机理	116
10.6 EPDM 的辐照老化机理	117
10.7 EPDM 的人工气候老化机理	118
第 11 章 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的老化行为与机理	120
11.1 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的老化行为	120
11.1.1 表面性能	120
11.1.2 微观形貌	124
11.1.3 交联密度	131
11.1.4 力学性能	131
11.1.5 交联反应动力学分析	135
11.1.6 TGA 分析	136
11.1.7 红外谱图分析	137

11.1.8 拉曼光谱分析	139
11.1.9 XPS 分析	139
11.2 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的老化机理	145
小结	148
第 12 章 EPDM 在氙灯人工气候环境中的老化行为及老化机理	149
12.1 EPDM 在氙灯人工气候环境中的老化行为	149
12.1.1 表面性能	149
12.1.2 微观形貌	152
12.1.3 交联密度	158
12.1.4 力学性能	158
12.1.5 交联反应动力学分析	161
12.1.6 TGA 分析	162
12.1.7 红外谱图分析	163
12.1.8 拉曼光谱分析	165
12.1.9 XPS 分析	166
12.2 EPDM 在氙灯人工气候环境中的老化机理	173
小结	177
第 13 章 EPDM 在两种人工气候环境中老化行为的综合评价及相关性	178
13.1 主成分分析法	178
13.1.1 主成分分析简介	178
13.1.2 主成分分析的运算步骤	179
13.2 结果与讨论	181
13.2.1 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的老化性能评价	181
13.2.2 EPDM 在氙灯人工气候环境中的老化性能评价	187
13.2.3 EPDM 在两种人工气候环境中老化行为的相关性	191
小结	193
第 14 章 EPDM 在人工气候环境中的寿命预测	194
14.1 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的寿命预测	194
14.2 EPDM 在氙灯人工气候环境中的寿命预测	196
小结	199
第 15 章 应力状态下 EPDM 在荧光紫外人工气候环境中的老化行为	200
15.1 应力对 EPDM 溶胀指数和交联密度的影响	200
15.2 应力对 EPDM 老化性能的影响	202
15.2.1 拉伸强度	202
15.2.2 断裂伸长率	203

15.2.3 断裂永久变形	204
15.2.4 定伸应力	205
15.2.5 撕裂强度	207
15.2.6 硬度	208
15.3 应力对 EPDM 老化形貌的影响	209
15.3.1 表观形貌	209
15.3.2 SEM 微观形貌	211
小结	217
第 16 章 EPDM 在氙灯和荧光紫外加速老化环境下的黏弹行为	219
16.1 氙灯和荧光紫外加速老化对 EPDM 的应力松弛特性的影响	219
16.2 等时线图分析	223
16.2.1 等时线的做法	223
16.2.2 等时线图分析	223
16.3 三元黏弹模型的建立及分析	224
16.3.1 三元件模型的建立	224
16.3.2 三元件模型分析	225
16.4 四元黏弹模型的建立与分析	228
16.4.1 四元件模型的建立	228
16.4.2 四元件模型分析	228
小结	231
参考文献	232

第四篇 环氧和聚氨酯胶黏剂的环境老化行为与规律

第 17 章 环氧和聚氨酯胶黏剂环境老化行为与机理研究进展	239
17.1 高分子胶黏剂老化机理	239
17.2 高分子胶黏剂老化的表征	242
第 18 章 环氧胶黏剂在武汉、万宁和漠河地区的老化行为	245
18.1 暴晒后的力学性能	245
18.1.1 黏结强度	245
18.1.2 本体拉伸强度	245
18.2 暴晒后的表观性能	246
18.2.1 环氧胶黏剂本体失光率	246
18.2.2 微观形貌	247
18.2.3 界面分析	248

18.3	暴晒后的红外谱图分析	249
18.3.1	武汉地区	249
18.3.2	漠河地区	249
18.3.3	万宁地区	250
18.4	环氧胶黏剂老化性能与暴晒周期、气象因素的相关性	250
	小结	253
第19章	环境温度对环氧胶黏剂老化行为的影响	254
19.1	老化试验后的力学性能	254
19.1.1	老化时间对环氧胶黏剂黏结性能影响	254
19.1.2	老化温度对环氧胶黏剂的黏结性能影响	256
19.2	老化试验后的表观形貌变化与热重分析	259
19.3	老化试验后的红外谱图分析	261
19.3.1	60℃环氧胶黏剂热老化前后红外谱图分析	261
19.3.2	80℃环氧胶黏剂热老化前后红外谱图分析	262
19.3.3	100℃环氧胶黏剂热老化前后微观分析	263
19.4	老化机理讨论	264
	小结	265
第20章	水浸泡环境下环氧胶黏剂和聚氨酯胶黏剂的老化行为	266
20.1	老化试验后力学性能的变化	266
20.1.1	环氧胶黏剂	266
20.1.2	聚氨酯胶黏剂	268
20.2	老化试验后表观形貌的变化	269
20.2.1	胶黏剂试样的表层形貌	269
20.2.2	胶黏剂黏结面上的破坏形式	270
20.2.3	黏结面金属底材的形貌	271
20.3	老化试验后红外谱图分析	271
20.3.1	环氧胶黏剂	271
20.3.2	聚氨酯胶黏剂	271
20.4	老化机理讨论	272
20.4.1	环氧胶黏剂	272
20.4.2	聚氨酯胶黏剂	272
	小结	272
第21章	湿热环境下环氧胶黏剂和聚氨酯胶黏剂的老化行为	274
21.1	老化试验后力学性能的变化	274
21.1.1	环氧胶黏剂	274

21.1.2 聚氨酯胶黏剂	276
21.2 老化试验后表观形貌的变化	278
21.2.1 胶黏剂黏结试样表层 SEM 形貌	278
21.2.2 黏结界面破坏形式	279
21.3 老化试验后红外谱图分析	280
21.3.1 环氧胶黏剂	280
21.3.2 聚氨酯胶黏剂	280
小结	280
第 22 章 紫外光辐照下环氧胶黏剂和聚氨酯胶黏剂的老化行为	281
22.1 老化试验后力学性能的变化	281
22.1.1 环氧胶黏剂	281
22.1.2 聚氨酯胶黏剂	282
22.2 老化试验后表观形貌的变化	283
22.2.1 环氧胶黏剂	283
22.2.2 聚氨酯胶黏剂	283
22.3 老化试验后红外谱图分析与老化机理探讨	285
22.3.1 环氧胶黏剂	285
22.3.2 聚氨酯胶黏剂	286
小结	286
第 23 章 NaCl 水溶液中胶黏剂的老化行为及其环境相关性分析	287
23.1 老化试验后的力学性能	287
23.1.1 NaCl 水溶液的作用	287
23.1.2 NaCl 浓度的影响	288
23.1.3 温度的影响	289
23.2 老化试验后的表观形貌	289
23.2.1 黏结界面形貌	289
23.2.2 胶黏剂与金属基体截面 SEM 形貌	290
23.2.3 黏结试样表层 SEM 形貌	290
23.3 老化试验后红外谱图分析	291
23.3.1 介质的影响	291
23.3.2 温度的影响	292
23.4 高分子胶黏剂性能老化与环境因素的相关性	292
23.4.1 环氧胶黏剂性能老化与环境的相关性	292
23.4.2 聚氨酯胶黏剂性能老化与环境的相关性	294
小结	296
参考文献	298

第五篇 有机高分子涂层的环境老化规律 及对金属基体腐蚀的影响

第 24 章 有机高分子涂层老化机理及对金属基体腐蚀影响研究进展	303
24.1 与高分子涂层材料老化相关的中国典型气候特性	303
24.2 高分子涂层的老化机理	304
24.3 高分子涂层室内外老化相关性的研究现状	305
24.4 高分子涂层防护性能的电化学阻抗谱评价	307
24.5 涂层下金属腐蚀行为与失效机理	309
24.6 涂层金属腐蚀的研究方法与进展	315
24.6.1 电化学方法	315
24.6.2 非电化学方法	319
24.6.3 新型复合方法	320
第 25 章 丙烯酸聚氨酯清漆涂层在拉萨与武汉地区的环境老化行为	322
25.1 暴晒期间气象数据	322
25.2 膜厚损失分析	324
25.3 失光率分析	325
25.4 黄色指数分析	325
25.5 接触角分析	326
25.6 附着力分析	327
25.7 红外谱图分析	328
25.8 XPS 分析	330
25.9 表面微观形貌分析	335
25.10 完整涂层的电化学分析	336
小结	340
第 26 章 环氧清漆涂层在拉萨与武汉地区的环境老化行为	341
26.1 膜厚分析	341
26.2 失光率分析	342
26.3 黄色指数分析	342
26.4 接触角分析	343
26.5 附着力分析	344
26.6 红外谱图分析	344
26.7 表面微观形貌分析	346
26.8 完整涂层的电化学分析	347

小结	349
第 27 章 丙烯酸聚氨酯和环氧树脂两种清漆涂层在荧光紫外人工气候环境 中的老化行为	350
27.1 膜厚分析	350
27.2 失光率分析	351
27.3 黄色指数分析	353
27.4 接触角分析	354
27.5 附着力分析	355
27.6 表面微观形貌分析	356
27.7 红外谱图分析	357
27.8 XPS 分析	359
27.9 电化学分析	362
小结	369
第 28 章 丙烯酸聚氨酯和环氧树脂两种清漆涂层在氙灯人工气候环境中的 老化行为	371
28.1 膜厚分析	371
28.2 失光率分析	372
28.3 黄色指数分析	374
28.4 接触角分析	375
28.5 附着力分析	376
28.6 表面微观形貌分析	377
28.7 红外谱图分析	378
28.8 XPS 分析	380
28.9 电化学分析	382
小结	386
第 29 章 丙烯酸聚氨酯和环氧树脂两种清漆涂层荧光紫外老化与氙灯老化 行为的对比	388
29.1 两种加速试验下涂层物理性能的对比	388
29.2 两种加速试验下涂层表面化学成分及降解机理的对比	391
29.3 两种加速试验下涂层微观形貌的对比	394
29.4 两种加速试验的涂层破损区腐蚀行为的对比	395
小结	397
第 30 章 丙烯酸聚氨酯清漆室内外老化性能的相关性	398
30.1 室内外老化性能对比分析	398
30.1.1 红外谱图和 XPS 对比分析	398

30.1.2 物理性能对比分析	400
30.2 相关性数学模型的建立与讨论	404
小结	408
第 31 章 涂层老化程度对涂层界面附着及金属基体腐蚀行为的影响	409
31.1 带人工缺陷老化涂层的 EIS 研究	409
31.1.1 试验方法	409
31.1.2 室内加速的带人工缺陷涂层的 EIS	410
31.1.3 户外暴露的带人工缺陷涂层的 EIS	412
31.1.4 涂层下金属腐蚀机理的讨论	413
31.2 采用 SKP 技术研究涂层-基体界面微区的腐蚀行为	414
31.2.1 试验方法	414
31.2.2 SKP 结果分析	414
31.2.3 涂层体系在 0.1mol/L HCl 溶液中的膜下腐蚀机理讨论	415
小结	417
第 32 章 紫外加速老化对丙烯酸聚氨酯与氟碳涂膜水蒸气透过性能的影响	418
32.1 试验材料与方法	418
32.2 丙烯酸聚氨酯紫外老化涂膜体系水蒸气透过性能	419
32.2.1 丙烯酸聚氨酯涂膜体系水蒸气透过性能	419
32.2.2 紫外老化对丙烯酸聚氨酯涂膜体系水蒸气透过性能的影响	421
32.3 氟碳紫外老化涂膜体系水蒸气透过性能	421
32.3.1 氟碳涂膜体系水蒸气透过性能	421
32.3.2 紫外老化对氟碳涂膜体系水蒸气透过性能的影响	422
32.4 紫外加速老化后丙烯酸聚氨酯涂膜与氟碳涂膜水蒸气透过性能对比分析	423
32.5 紫外加速老化后涂层的 EIS	425
32.5.1 紫外加速老化丙烯酸涂层体系的 EIS	426
32.5.3 紫外加速老化丙烯酸聚氨酯面漆环氧底漆涂层体系的 EIS	427
32.6 紫外加速老化涂层 EIS 抗渗透性能分析	430
小结	433
第 33 章 氟碳涂层在典型大气环境中的老化行为	434
33.1 户外暴晒氟碳涂层后表面性能	434
33.1.1 膜厚损失	434
33.1.2 附着力	435
33.1.3 失光率	436
33.1.4 微观形貌	437