

理论与实验研究

铝在红沿河核电厂地区的初期大气腐蚀表征

谢陈平¹, 王振尧², 魏伟¹, 汪川²

(1. 深圳中广核工程设计有限公司 红沿河核电项目部, 辽宁 大连 116319;

2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: 目的 研究铝在辽宁红沿河核电厂地区的初期大气腐蚀行为。方法 按 GB/T 6464—1997, 将制备好的试样在红沿河核电厂进行大气暴露试验, 利用 XRD, FTIR, SEM 分析技术, 对试验 6 个月和 10 个月的试样进行腐蚀产物观察与分析。结果 铝在红沿河大气暴露腐蚀 6 个月和 10 个月样品表面均布满了点蚀坑、腐蚀产物及沉积物, 腐蚀产物主要为 Al_2O_3 , AlOOH 以及一些含氯和含硫的铝盐。腐蚀产物都较疏松, 上下表面均有龟裂纹, 相邻较近的点蚀坑已相互连接。随腐蚀时间延长, 点蚀坑变深变大, 朝地面点蚀坑深度已达上百微米。结论 铝在红沿河核电厂大气环境中腐蚀以点蚀为主要特征, 其腐蚀比普通大气环境中的严重, 朝地面的腐蚀比朝天面严重, 大气中氯离子及 SO_2 参与铝的腐蚀过程并起促进作用。

关键词: 大气腐蚀; 铝; 核电厂; SO_2 ; Cl^-

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.016

中图分类号: TJ04; TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0087-05

Characterization on Early Atmospheric Corrosion of Aluminium in Hongyanhe Nuclear Power Plant

XIE Chen-ping¹, WANG Zhen-yao², WEI Wei¹, WANG Chuan²

(1. Hongyanhe NPP Site, China Nuclear Power Design Co. Ltd., Dalian 116319, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: Objective To study the characterization of early corrosion products of aluminium exposed to the atmosphere in the Hongyanhe nuclear power plant. **Methods** The samples were prepared and exposed to the atmosphere in Hongyanhe nuclear power plant according to the GB/T6464—1997. The corrosion products on the samples tested at 6 months and 10 months were observed and analyzed by means of SEM, XRD and FTIR techniques. **Results** There were corrosion pits and corrosion products and aggradations on the surface of the samples exposed for 6 and 10 months. The corrosion products were mainly Al_2O_3 , AlOOH and aluminium salts containing chlorine and sulphur. The products were loosened with cracks on the upper and lower surfaces and pits near to each other were connected. The

收稿日期: 2015-01-06; 修订日期: 2015-03-27

Received: 2015-01-06; Revised: 2015-03-27

作者简介: 谢陈平(1983—), 男, 河南人, 主要研究方向为核电设计与管理。

Biography: XIE Chen-ping(1983—), Male, from Henan, Research focus: nuclear power design and management.

通讯作者: 王振尧(1962—), 男, 辽宁人, 博导, 研究员, 主要研究方向为大气腐蚀。

Corresponding author: WANG Zhen-yao(1962—), Male, from Liaoning, Doctoral tutor, Researcher, Research focus: atmospheric corrosion.

corrosion pits became larger and deeper over testing time, and the depth on the earthward (downward) surface reached up to hundreds of microns. **Conclusion** Corrosion of aluminium in the atmosphere in the Hongheyan nuclear power plant was mainly characterized by corrosion pits which was severer than in the normal atmosphere and the corrosion on the earthward surface was severer than on the upward surface. The synergic effect of SO_2 and Cl^- played an important role in promoting corrosion process of aluminium.

KEY WORDS: atmospheric corrosion; aluminium; nuclear power plant; SO_2 ; Cl^-

铝具有密度轻、比强度大等性能,在交通、能源、食品、电子、特别是航空工业都有广泛的应用^[1-2]。铝的电极电位较低,其耐蚀性在很大程度上取决于氧化膜的特性,凡能改善氧化膜致密性、增加氧化膜厚度、提高氧化膜绝缘性的因素都有助于铝及其合金抗蚀性能的提高^[3-5]。虽然从热力学方面来看,铝是最活泼的金属之一,但在许多氧化性介质、水、大气、部分中性溶液和许多弱酸性介质中,铝表面能形成一层连续致密的氧化膜,当它遭到破坏后又会很快修复,故能对铝基体起到较好的保护作用^[6-8]。在一般大气环境中^[9-14],铝具有良好的抗大气腐蚀性能,通常可以在没有保护的情况下长期地使用。初始阶段铝腐蚀速度较快,大致经过6个月到2年后,其腐蚀速度趋于平稳。铝在不同环境或不同地区的大气腐蚀行为相差很大^[15-16],在乡村大气中,铝的腐蚀不明显,仅表面发暗;在海洋大气中会很快失去光泽变得暗淡无光,氯离子等活性阴离子对促进铝腐蚀具有独特的作用;在大多数工业地区,铝表面会很快变暗发生腐蚀。

红沿河核电厂位于辽宁省瓦房店市西端渤海辽东湾,北、西、南三面临海,东侧与陆地接壤,属季风性大陆性气候,同时具有海洋性气候特点。从前期的现场大气环境监测结果了解到,红沿河核电厂地区大气中 SO_2 、 Cl^- 离子浓度较高,而且空气湿度比较大,金属材料的腐蚀相对比较严重^[17-18]。目前关于红沿河核电厂这种特有大气环境及其对铝腐蚀影响研究还十分缺乏,因此开展这方面研究是现实发展的迫切需求。

1 实验

试样由L4铝板材加工而成,其化学组成(质量分数,%)为:Fe 0.35, Si 0.40, Cu 0.05, 其余为Al。测失重样品尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 锈层分析样品尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 所有样品经丙酮除油,酒精脱水后置于干燥器中。24 h后用分析天平对失重试样进行称量,精确至0.1 mg。按GB/T 6464—1997,将制备好的试样在红沿河核电厂进行大气暴露试验,如图1所示。按不同试验周期进行取样分析,每组取3片试样测定腐蚀质量损失值。采用50 mL磷酸 H_3PO_4

和20 g三氧化铬再加入蒸馏水配成1000 mL溶液,加热至80℃浸泡试样3~5 min,去除腐蚀产物,然后用蒸馏水清洗,酒精脱水,吹干。



图1 红沿河核电厂大气暴露实验现场

Fig.1 Atmospheric exposure test site in the Hongyanhe nuclear power plant

使用FEI Company Model XL30 ESEM FEG环境扫描电子显微镜、Magna-560型傅里叶红外变换光谱仪(测量范围为 $400 \sim 4000\text{ cm}^{-1}$, 精度为 8 cm^{-1})以及PW1700型X射线衍射仪(扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$, 扫描范围 2θ 角为 $15^\circ \sim 85^\circ$)对腐蚀产物进行观察与分析。

2 实验结果与讨论

2.1 表面腐蚀形貌

铝在红沿河大气暴露腐蚀6个月和10个月的宏观形貌如图2所示。可以看到,样品表面均分布了很多点蚀坑、腐蚀产物及沉积物。暴露6个月的试样表出现少量絮状灰白斑,但大部分区域还保持一定的金属光亮。延长至10个月,样品表面絮状灰白斑增多、发黄,而同一周期试样的朝天面颜色相对明亮,朝地面暗淡。这与朝天面润湿时间短、腐蚀产物及沉积物容易被雨水冲刷等有关。

铝在红沿河大气暴露腐蚀6个月和10个月的微观形貌分别如图3和图4所示。从微观形貌看,腐蚀产物都较疏松,上下表面均有龟裂纹,并发现相邻较近的点蚀坑已相互连接,成为一个整体,而且下表面裂纹较上表面更多。说明下表面因为缺少光照,润湿时间更长,

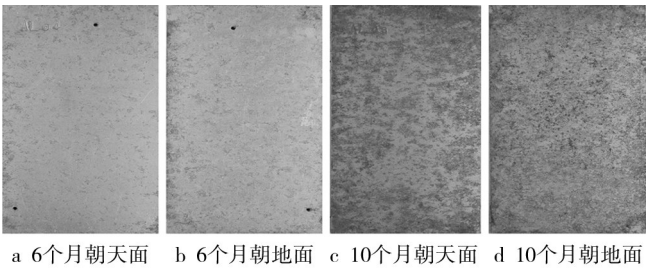


图2 铝在红沿河大气腐蚀6和10个月的朝天面与朝地面的宏观形貌

Fig.2 Macro morphology on upward (a,c) and downward surfaces (b, d) of the samples exposed to the Hongyanhe atmosphere for 6 months (a,b) and 10 months (c,d)

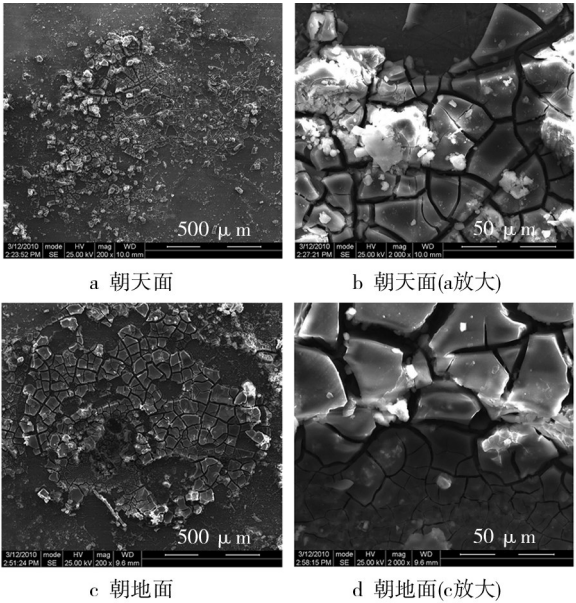


图3 铝在红沿河大气暴露6个月朝天面(a,b)与朝地面(c,d)的微观形貌

Fig.3 SEM morphology on upward (a,b) and downward surfaces (c, d) of the samples exposed to the Hongyanhe atmosphere for 6 months

从而腐蚀更严重,但尚未出现腐蚀产物剥落。

2.2 锈层截面形貌

铝在红沿河大气中暴露不同周期的截面形貌如图5所示,左侧是铝基体,右侧是腐蚀产物层。从图5可见明显的腐蚀坑,随时间延长,点蚀坑变深变大,朝地面点蚀坑深度可达上百微米,并且还有进一步扩展的趋势。点蚀作为铝的主要腐蚀形式,严重影响了铝的使用寿命。一般情况下,点蚀坑直径等于或小于它的深度,只有几十微米,分散或密集分布在金属表面上,孔口多被腐蚀产物所覆盖。点蚀形貌也分多种,

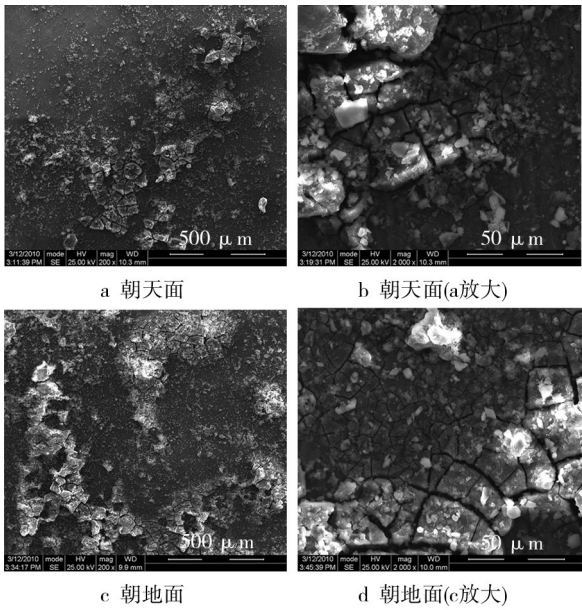


图4 铝在红沿河大气暴露10个月朝天面(a,b)与朝地面(c,d)的微观形貌

Fig.4 SEM morphology on upward (a,b) and downward surfaces (c, d) of the samples exposed to the Hongyanhe atmosphere for 10 months

有窄深形、椭圆形、宽浅形、水平型和垂直形等。关于蚀孔成核的原因现有以下两种说法。

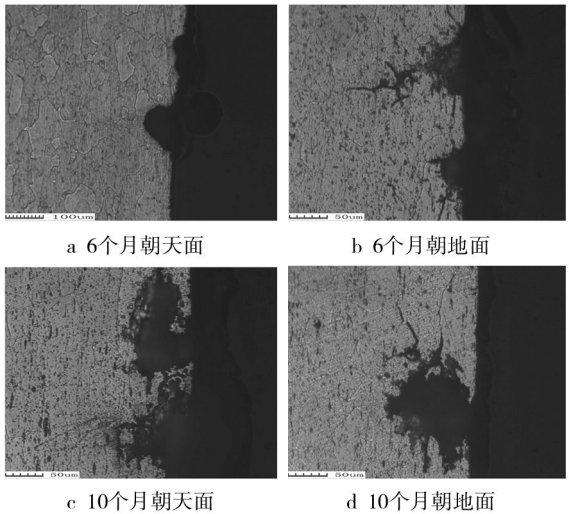


图5 铝在红沿河大气中暴露不同周期的截面形貌

Fig.5 Cross-section SEM morphology of the samples exposed to the Hongyanhe atmosphere for 6 months (a,b) and 10 months (c,d)

1) 点蚀发生是由于氯离子和氧竞争吸附所造成的,当金属表面上氧的吸附点被氯离子所替代时,点蚀就发生了。其原因是氯离子选择性吸附在氧化膜表面阴离子晶格周围,置换了水分子,氯离子就有一定几率和氧化膜中的阳离子形成络合物(可溶性氯化

物),促使金属离子溶入溶液中,在新露出的金属特定点上生成小蚀坑,成为点蚀核。

2) 氯离子半径小,可穿过钝化膜进入膜内,产生强烈的导电感应离子,使膜在特定点上维持高的电流密度并使阳离子杂乱移动,当膜-溶液界面的电场达到某一临界值时,就发生点蚀。

点蚀的发展机理则是蚀孔内发生的自催化过程:在蚀孔内部,孔蚀不断向金属深处腐蚀,氯离子向孔内迁移而富集,铝离子的水化使孔内溶液酸化,使致钝电位升高,并使再钝化过程受到抑制。由于点蚀一旦发生,点蚀孔底部金属铝便发生溶解,如果是在含氯离子的水溶液中,则阴极为吸氧反应(蚀孔外表面),孔内氧浓度下降而孔外富氧形成氧浓差电池。孔内金属不断增加,在孔蚀电池产生的电场作用下,蚀孔外阴离子(Cl^-)不断向孔内迁移、富集,孔内氯离子浓度升高。同时由于孔内金属离子浓度的升高并发生水解: $\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{AlOHCl}^+$,结果使孔内溶液氢离子浓度升高,pH值降低,溶液酸化,相当于使蚀孔内金属处于HCl介质中,处于活化溶解状态。水解产生的氢离子和孔内的氯离子又促使蚀孔侧壁的铝继续溶解,发生自催化反应: $\text{Al} + 3\text{H}^+ + 2\text{Cl}^- \rightarrow 3/2\text{H}_2 + \text{AlCl}_2^+$ 。

孔内盐溶液的高导电性,使闭塞电池的内阻很低,腐蚀不断发展。由于孔内浓盐溶液中氧的溶解度很低,又加上扩散困难,使得闭塞电池局部供氧收到限制。所有这些,阻碍了孔内金属的再钝化,使孔内金属处于活化状态。蚀孔口形成了氢氧化铝腐蚀产物沉积层,阻碍了扩散和对流,使孔内溶液得不到稀释,从而造成了上述电池效应。

2.3 腐蚀产物分析

对铝在红沿河大气中10个月的腐蚀产物进行XRD衍射分析如图6所示,结果表明:腐蚀产物主要为 Al_2O_3 , AlOOH 以及一些含氯和含硫酸根的盐。在含硫污染的海洋大气中,海盐粒子和 SO_2 参与了腐蚀反应。由于试样表面腐蚀以点蚀为主要特征,附着的腐蚀产物较少,并且表面还沉积较多的沙土(检测到 SiO_2)。铝在红沿河大气中暴露10个月的朝天和朝地面的腐蚀产物红外光谱(FTIR)如图7所示,结果表明:朝天和朝地面的腐蚀产物基本是相同的,主要是 Al_2O_3 , AlOOH 以及一些含氯和含硫酸根的盐,进一步证明了红沿河大气中的氯和硫参与了铝的大气腐蚀过程。

2.4 大气腐蚀机理

从上述铝大气腐蚀的表面与截面形貌分析可

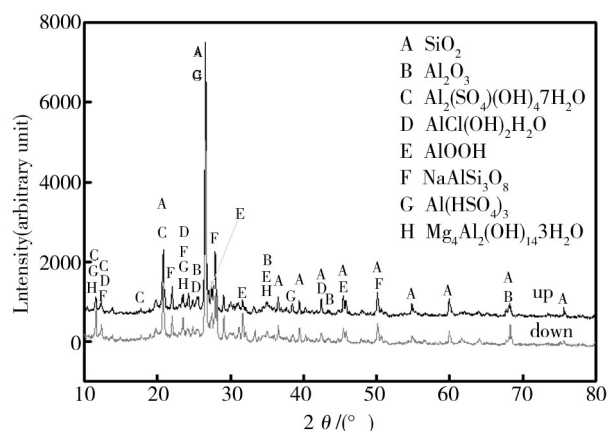


图6 铝在红沿河地区大气中暴露10个月的朝天面与朝地面腐蚀产物的XRD谱

Fig.6 XRD patterns of the corrosion products on upward and downward surfaces of the samples exposed to the Hongyanhe atmosphere for 10 months

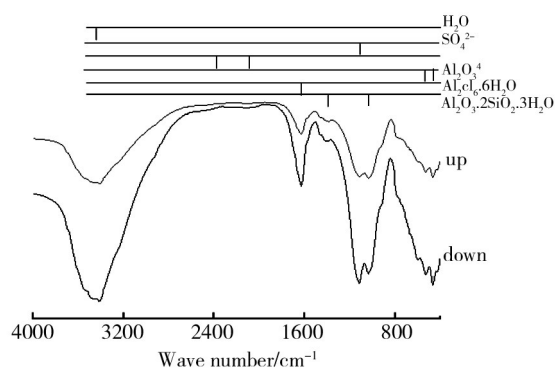


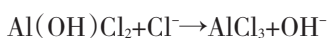
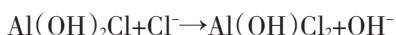
图7 铝在红沿河地区大气中暴露10个月的朝天面与朝地面腐蚀产物的FTIR谱

Fig.7 FTIR patterns of the rust on upward and downward surface of the specimens exposed to Hongyanhe atmosphere for 10 months

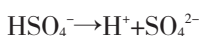
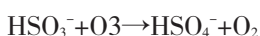
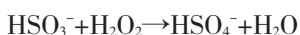
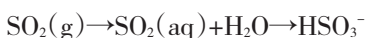
知,在红沿河核电厂铝的初期大气腐蚀是严重的,其10个月实测腐蚀率达到 $1.6 \mu\text{m/a}$,还表现为突出的点蚀特征,其点蚀最大深度超过 $100 \mu\text{m}$ 。通常情况,铝的表面氧化膜是其具有耐大气腐蚀性的主要原因,致密氧化膜在室温的大气中就可以迅速生成,厚度为 $2.5\sim 5 \text{ nm}$ 。在湿环境中,铝表面上的氧化膜是复式的,靠铝基体的一面为纯氧化物,而外层则为羟基化合物。氧化膜在大气环境中具有自修复功能,若有水存在或者暴露在大气中几个月以后,最初形成的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的外层转变为薄层 $\gamma\text{-AlOOH}$,随后在 $\gamma\text{-AlOOH}$ 上又会覆盖上一层 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。从铝-水体系的电位-pH图可知, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在较大的pH范围内都会保持稳定, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 从 $\text{pH}=4$ 开始溶解。当 $\text{pH}=$

2.4时,认为其会完全溶解。铝的大气腐蚀与环境大气的相对湿度、温度、降水量(酸度)以及污染物(如 SO_2 , Cl^-)浓度密切相关。暴露在大气中的铝表面可分为三层:铝及其氧化物,腐蚀产物层和大气污染物形成的污染层或薄液膜。

在海洋大气环境中,氯离子是引起铝大气腐蚀的重要原因,由于铝的氯化物具有可溶性,在户外暴露的铝表面上没有大量的氯化物层存在,只有少量的氯离子进入腐蚀产物层。 Cl^- 通过竞争吸附,逐渐取代 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 表面上的 OH^- 生成 AlCl_3 。



在含硫污染的大气环境中, SO_2 对铝的大气腐蚀历程大致分为三个阶段: SO_2 吸附在铝表面和在液膜下的溶解和水化,生成 HSO_3^- , HSO_3^- 被进一步氧化成 SO_4^{2-} ,最后 SO_4^{2-} 同 Al^{3+} 生成非晶态的硫酸铝化合物。



可见, HSO_3^- 和 Cl^- 都可促进铝合金的腐蚀,在受到 SO_2 污染的海洋大气环境中,当两者同时存在时,会产生协同作用。点蚀的产生与腐蚀介质中活性阴离子(尤其是 Cl^-)的存在密切相关。当介质中存在活性阴离子时,平衡被破坏,使溶解占优势。 Al^{3+} 从金属晶格溶解下来,与液层中的阴离子形成离子对,达到饱和后析出形成固体产物。固体产物的形核和长大一般首先在界面的各种缺陷处,然后扩展到整个表面,直至最后覆盖整个界面。此后,腐蚀产物层的物理性质对反应物和产物的传质产生较大的影响,一定条件下会部分溶解于液膜中,同时新的腐蚀产物也会不断生成。因为腐蚀产物和基体金属不同,可能是具有晶格结构的化合物,或者是无定形的混合物。在距界面层的距离不同,腐蚀产物的成分和结构也会存在差异,当腐蚀产物达到一定厚度,经历多次的干湿交替和温度变化后,在界面处会产生应力,从而导致韧性较差的腐蚀产物剥落下来。在红沿河的含硫污染海洋大气环境下,由于大气中氯离子及 SO_2 含量相对较高,对纯铝的协同加速腐蚀作用更为明显,从而造成了纯铝的腐蚀率远高于普通大气环境。

3 结论

铝在红沿河核电厂大气环境中腐蚀以点蚀为主要特征,其腐蚀比普通大气环境中的严重,朝地面的腐蚀比朝天面严重。铝在红沿河核电厂大气环境中的主要腐蚀产物含有氯及硫元素,说明大气中氯离子及 SO_2 参与铝的腐蚀过程并起促进作用。

参考文献:

- [1] 刘静安,谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
LIU Jing-an, XIE Shui-sheng. Exploitation and Application of Aluminium Alloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [2] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
CAO Chun-nan. Material Natural Environmental Corrosion of China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] 王光雍,王海江,李兴廉. 自然环境的腐蚀与防护[M]. 北京:化学工业出版社,1997.
WANG Guang-yong, WANG Hai-jiang, LI Xing-lian. Natural Environmental Corrosion and Protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997.
- [4] BLUCHER D B, SVENSSON J E, JOHANSSON L G. The Influence of CO_2 , $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 and NaCl on the Atmospheric Corrosion of Aluminum[J]. Corrosion Science, 2006, 48: 1848—1866.
- [5] 郑弃非,孙霜青,温国军,等. 沙漠浮土中可溶性盐对铝的大气腐蚀影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 72—77.
ZHENG Qi-fei, SUN Shuang-qing, WEN Guo-jun, et al. Effects of the Soluble Salts in Desert Dust on Atmospheric Corrosion of Aluminium[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 72—77.
- [6] 蔡健平,刘明,罗振华,等. 航空铝合金大气腐蚀加速试验研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(5): 262—266.
CAI Jian-ping, LIU Ming, LUO Zhen-hua, et al. Study on Accelerated Tests for Aluminum Alloy Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(5): 262—266.
- [7] 安百刚,张学元,宋诗哲,等. LY12铝合金在模拟酸雨溶液中的阻抗谱研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(3): 167—170.
AN Bai-gang, ZHANG Xue-yuan, SONG Shi-ze, et al. A Study of Electrochemical Impedance Spectrum for Corrosion

(下转第101页)

- UV Durability Predictions of Polymer Coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 1996, 27: 95—106.
- [12] 石巍, 张军. 聚氯乙烯的紫外光降解机理及影响因素[J]. *合成树脂与塑料*, 2006, 23(4): 80—83.
- SHI Wei, ZHANG Jun. Photo Degradation Mechanism and its Influential Factors of PVC[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2006, 23(4): 80—83.
- [13] 龙俊元, 李光吉, 李超, 等. PA6在紫外光老化中的变色与结构变化[J]. *塑料工业*, 2010, 38(12): 47—51.
- LONG Jun-yuan, LI Guang-ji, LI Chao, et al. Changes in the Discoloration and Structures of PA6 during the Course of Ultraviolet Aging[J]. *China Plastics Industry*, 2010, 38(12): 47—51.
- [14] 杨希峰, 刘涛, 赵友博, 等. 太阳光和天空光的光谱测量分析[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2004, 37(4): 69—74.
- YANG Xi-feng, LIU Tao, ZHAO You-bo, et al. Measurement and Analyses of Sunlight and Skylight Spectra[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2004, 37(4): 69—74.
- [15] 胡行俊. 紫外光与合成材料的光老化[J]. *合成材料老化与应用*, 2006, 35(2): 10—13.
- HU Xing-jun. UV-irradiation and Photo-aging of Synthetic Materials[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2006, 35(2): 10—13.
- [16] DEF STAN 00-35, Environmental Handbook for Defence Materiel, Part 4 Natural Environments[S].

(上接第 91 页)

- Behavior of LY12 Aluminum Alloy in Simulated Acid Rain[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2003, 23(3): 167—170.
- [8] 孙霜青, 赵予兵, 郑弃非, 等. 包铝的 7075 和 2024 合金在海洋大气环境中点蚀演化机制[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2012, 32(3): 195—202.
- SUN Shuang-qing, ZHAO Yu-bing, ZHENG Qi-fei, et al. Evolution Mechanism of Pitting of Al Clad 7075 and 2024 Aluminum Alloy in Coastal Environment[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2012, 32(3): 195—202.
- [9] WANG Zhen-yao, MA Teng, HAN Wei, et al. Corrosion Behavior on Aluminum Alloy LY12 in Simulated Atmospheric Corrosion Process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17: 326—334.
- [10] SUN Shuang-qing, ZHENG Qi-fei, LI De-fu, et al. Long-term Atmospheric Corrosion Behaviour of Aluminium Alloys 2024 and 7075 in Urban, Coastal and Industrial Environments[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 719—727.
- [11] SUN Shuang-qing, ZHENG Qi-fei, LI De-fu, et al. Exfoliation Corrosion of Extruded 2024-T4 in the Coastal Environments in China[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53: 2527—2538.
- [12] CHENG Y L, ZHANG Z, CAO F H, et al. A Study of the Corrosion of Aluminium Alloy 2024-T3 under Thin Electrolyte Layers[J]. *Corrosion Science*, 2004, 46: 1649—1667.
- [13] SHI Y Y, ZHANG Z, SU J X, et al. Electrochemical Noise Study on 2024-T3 Aluminium Alloy Corrosion in Simulated Acid Rain under Cyclic Wet-Dry Condition[J]. *Electrochimical Acta*, 2006, 51: 4977—4986.
- [14] 王振尧, 马腾, 韩薇, 等. LC4 铝合金在模拟污染大气环境中的腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2005, 25(6): 321—326.
- WANG Zhen-yao, MA Teng, HAN Wei, et al. Corrosion Behaviors of Al Alloy LC4 in Simulated Polluted Atmospheric Environments[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2005, 25(6): 321—326.
- [15] LIU Yan-jie, WANG Zhen-yao, KE Wei. Study on Influence of Native Oxide and Corrosion Products on Atmospheric Corrosion of Pure Al[J]. *Corrosion Science*, 2014, 80: 169—176.
- [16] 刘艳洁, 王振尧, 柯伟. 薄液膜下铝合金与不锈钢电偶腐蚀研究[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(1): 1—5.
- LIU Yan-jie, WANG Zhen-yao, KE Wei. Study on the Galvanic Corrosion of Aluminium Alloy and Stainless Steel under a thin Electrolyte Film[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(1): 1—5.
- [17] 王振尧, 于全成, 汪川, 等. 在含硫污染的海洋环境中核电用钢的腐蚀行为[J]. *科学通报*, 2012, 57(31): 2991.
- WANG Zhen-yao, YU Quan-cheng, WANG Chuan, et al. Corrosion Behaviors of Steels in Marine Atmospheric Environment with SO₂ Pollution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(31): 2991.
- [18] 郝显赫, 王振尧, 汪川. 锌在辽宁红沿河核电站的大气腐蚀研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(3): 108—111.
- HAO Xian-he, WANG Zhen-yao, WANG Chuan. Atmospheric Corrosion of Zinc at Hongyanhe Nuclear Power Station[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(3): 108—111.