

不同表面状态对6061铝合金耐蚀性能的影响研究

冯驰^{1,2,3}, 黄运华^{1,2}, 申玉芳³, 肖葵^{1,2}, 孟凡彰^{1,2}, 李晓刚^{1,2}

(1. 北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083;

2. 腐蚀与防护教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 桂林理工大学 材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 目的 研究在温度和表面粗糙度不同的情况下, 6061 铝合金的耐蚀性能变化, 并研究表面硫酸、硼酸硫酸阳极氧化对提高 6061 铝合金耐蚀性能的作用。方法 对试样进行中性盐雾试验和电化学实验。结果 随着表面粗糙度的下降, 6061 铝合金的耐蚀性有所提高, 且表面经过阳极氧化后, 试样表面盐粒沉积量大幅下降, 腐蚀面积有所减少。随着温度升高, 6061 铝合金的耐蚀性下降, 而当温度达到 55 ℃ 时, 试样表面出现了一定的钝化现象, 当温度继续升高, 钝化现象消失, 腐蚀速率重新上升。结论 随温度和表面粗糙度的提高, 6061 铝合金的耐蚀性能下降, 而 55 ℃ 为 6061 铝合金较好的钝化温度。

关键词: 6061 铝合金; 阳极氧化; 表面粗糙度; 温度; 耐蚀性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.019

中图分类号: TJ01; TG133+.4 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0100-05

Effect of Surface Status on the Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy

FENG Chi^{1,2,3}, HUANG Yun-hua^{1,2}, SHEN Yu-fang³, XIAO Kui^{1,2}, MENG Fan-zhang^{1,2},
LI Xiao-gang^{1,2}

(1. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory for Corrosion and Protection (MOE), Beijing 100083, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the corrosion behaviour of 6061 aluminum alloy in conditions of different temperatures and surface roughness and the enhancement of corrosion resistance of the alloy by using surface sulphuric acid anodizing and boracic-sulphuric acid anodizing. **Methods** The salt spray tests and the electrochemical experiments

收稿日期: 2015-05-20; 修订日期: 2015-06-13

Received: 2015-05-20; Revised: 2015-06-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB643300); 国家自然科学基金项目(51471033); 国家材料自然环境腐蚀实验台网建设(2005DKA104000)

Fund: Supported by the National Program on Key Basic Research Project(2014CB643300); the National Natural Science Foundation of China(51471033); National Materials Natural Environmental Corrosion Experimental Network(2005DKA104000)

作者简介: 冯驰(1990—),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Biography: FENG Chi(1990—), Male, from Beijing, Master graduate student, Research focus: metal corrosion and protection.

were conducted on samples. **Results** The corrosion resistance of the alloy increased along with the decrease of the surface roughness, the deposited salt particles on the alloy surface reduced remarkably and the corrosion area decreased as the surface anodized. In addition, the alloy corrosion resistance decreased as the temperature raised, but the samples were passivated when the temperature reached 55 °C, and the passivation resolved and the corrosion rate raised again as the temperature raised continuously. **Conclusion** The results show that the corrosion resistance of 6061 aluminum alloy decreases as the surface roughness and the temperature rise, and 55 °C is a proper passivation temperature for 6061 aluminum alloy.

KEY WORDS: 6061 aluminum alloy; anodizing; surface roughness; temperature; corrosion resistance

铝及其合金作为工业当中应用量仅次于钢铁的第二大金属材料,以其优异的物理、化学综合性能,在各个领域中都得到了广泛的应用^[1-2]。其中,6系铝合金由于它镁和硅的含量都较高,兼有了4XXX系和5XXX系铝合金的优点,具有良好的综合性能,在航空、航天领域中得到了广泛的应用。6061铝合金作为6系铝合金中应用较多的一种,主要用于要求有一定强度和耐腐蚀性的各种结构件中^[3]。

近年来,一些科研工作者也对6061铝合金的耐蚀性能进行了研究,多数集中于研究诸如Cl⁻等腐蚀性离子对其的影响。Zaid B等^[4]研究了不同的Cl⁻浓度和pH对6061铝合金点蚀的影响,发现了6061铝合金在碱性介质中的腐蚀程度大于中性和酸性介质,同时也发现随Cl⁻浓度的增大,6061铝合金点蚀越明显。对于温度 and 不同表面状态对6061铝合金耐蚀性能的影响则研究较少。

由于近年来关于铝合金阳极氧化的研究主要集中在阳极氧化的工艺及一些力学性能的应用上^[5-11],而对于铝合金阳极氧化膜的耐蚀性能、腐蚀行为及机理则研究较少,这一点在文中将着重进行讨论。在已有的研究成果中,陈朝铁等^[12]研究了6063铝合金经硫酸阳极氧化后腐蚀性能的变化,并与未经阳极氧化的试样对比,发现经硫酸阳极氧化后的试样在盐雾条件下耐蚀性能可提高2.2倍,而在真实大气环境中可提高4.5倍。Saeedikhani M等^[13]研究了采取不同阳极氧化方式对2024-T3铝合金耐蚀性能的影响,通过电化学实验和盐雾实验发现硼酸-硫酸-磷酸阳极氧化膜的耐蚀性能较好,并认为其制备工艺可以代替制备时有毒的铬酸阳极氧化工艺。关于6061铝合金表面阳极氧化对其耐蚀性的影响还未见相关文献报道。

目前关于金属表面粗糙度对耐蚀性影响的研究,主要集中于金属基体的粗糙度对其表面镀层耐蚀性的影响。张云霞^[14]通过电化学测试和SEM观察,研究了不同粗糙度Q345钢对表面镀镍层耐蚀性的影响,发现Q345钢表面越光滑,镀层表面胞状物的越均一,镀层平整度也越好,其自腐蚀电流下降,耐蚀性增

强。包信方^[15]研究了不同表面粗糙度的低碳钢表面镀锡后其耐蚀性的变化,通过电化学实验和盐雾实验发现,表面越粗糙的低碳钢,其镀锡层的均匀沉积面积越小,耐蚀性越差。对于6061铝合金表面粗糙度对其耐蚀性的影响还未见相关文献报道。

文中主要以某新型号飞机用蒙皮材料航空铝合金6061为研究对象,研究温度和表面粗糙度对6061铝合金耐蚀性能的影响,并探究对6061铝合金表面分别进行硫酸阳极氧化和硼酸-硫酸阳极氧化处理后,其耐蚀性的变化。通过中性盐雾试验和电化学实验,揭示该材料的腐蚀规律,为实际应用提供腐蚀防护技术的试验基础。

1 实验

1.1 实验材料及预处理

实验所用6061铝合金,其主要成分(以质量分数计)为:Mg 0.8%~1.2%,Si 0.4%~0.8%,Cu 0.15%~0.4%,Cr 0.04%~0.35%,Fe 0.7%,Mn 0.15%,Zn 0.25%,Ti 0.15%,Al为余量。中性盐雾试验的试样尺寸为60 mm×30 mm×4 mm,电化学实验的试样尺寸为10 mm×10 mm×4 mm。

首先将线切割后的试样放入丙酮溶液中进行超声处理,以去除表面油污,再用砂纸将试样逐级水磨至粗糙度为600,120,80,60 nm,最后将试样烘干准备实验。再将打磨至粗糙度为60 nm的试样进行表面阳极氧化处理,在此之前需要再次将试样进行预处理,目的是为了除去自然氧化膜和进行化学抛光。其中,除自然氧化膜在30% HNO₃(质量分数,下同)溶液中进行,化学抛光在30% H₃PO₄和30% HNO₃的混合溶液中进行。预处理过后,方可进行阳极氧化,具体处理工艺如下所述。

硫酸阳极氧化处理工艺流程:20%硫酸,20 g/L铝离子, $\theta=20$ °C, $J_a=2$ A/dm², $U=15$ V, $t=30$ min。阳极氧化之后,立即将试样从电解槽中取出,用温热的蒸馏水

仔细清洗后,再将氧化膜在 100 ℃热水中封闭 30 min。

硼酸硫酸阳极氧化处理工艺流程: (3% ~ 5%) H_2SO_4 + (0.5% ~ 1%) H_3BO_3 , $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 20\text{ min}$, $J_a = 0.8\text{ A/dm}^2$, $U = 15\text{ V}$ 。阳极氧化之后,立即将试样从电解槽中取出,用温热的蒸馏水仔细清洗后,再将氧化膜在 100 ℃热水中封闭 30 min。

1.2 实验方法

1) 中性盐雾实验。将分别用砂纸逐级打磨成不同表面粗糙度的试样和表面进行硫酸、硼酸硫酸阳极氧化后的 6061 铝合金试样(每个不同的表面状态设置 3 个平行试样),放入盐雾试验箱进行 15 天的中性盐雾试验。

2) 电化学实验。电化学实验采用的是美国 PAR 公司所生产的 VMP3 多通道电化学设备,采用三电极系统进行电化学测试,以 6061 铝合金试样为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极(SCE),纯净的铂片为辅助电极。

将预处理后的 6061 铝合金试样背面用铜导线焊接,并以环氧树脂进行密封,然后静置 24 h。待环氧树脂干燥后,将试样的工作面再用砂纸逐级水磨至 1500#,最后用 704 硅胶将试样工作面边缘的微小缝隙密封,再静置 24 h 待硅胶完全干燥后进行实验。

极化曲线测试参数:采用动电位扫描方法,扫描速率为 0.5 mV/s,扫描范围从 -0.4 V(vs.OCP)到阳极方向,并对曲线于 EC-Lab 软件中用 Tafel 公式进行拟合。

2 结果与分析

2.1 不同表面粗糙度的影响

2.1.1 电化学试验分析。

图 1 为不同表面粗糙度的 6061 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中的开路电位。可以看出,表面越粗糙的试样开路电位越低。由此可间接地表明,粗糙的表面会使 6061 铝合金抗点蚀能力降低。

为了进一步研究 6061 铝合金表面阳极氧化对其耐蚀性的影响,对阳极氧化前后的铝合金试样进行动电位极化曲线测试(如图 2 所示)。可以看出,6061 铝合金经表面阳极氧化后,腐蚀电位虽无太大变化,但其阳极极化电流较表面未阳极氧化的试样有明显降低。可见表面阳极化处理后 6061 铝合金的腐蚀速率降低,说明表面硫酸、硼酸硫酸阳极氧化可提高 6061 铝合金的耐蚀性能。

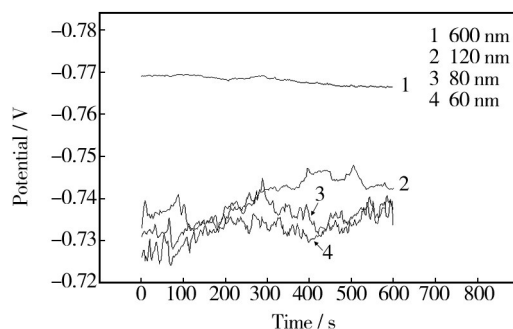


图 1 不同表面粗糙度的 6061 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中的 OCP

Fig.1 The OCP of 6061 aluminium alloy with different surface roughness in 3.5%wt NaCl solution

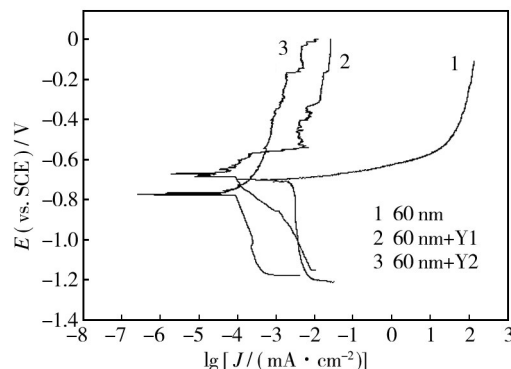


图 2 6061 铝合金阳极氧化前后在 3.5%NaCl 中的极化曲线 (Y1: 表面硫酸阳极氧化; Y2: 表面硼硫酸阳极氧化)

Fig.2 Polarization curves of 6061 aluminium alloy in 3.5% NaCl solution before and after anodizing (Y1: surface after sulphuric acid anodizing; Y2: surface after boracic acid and sulphuric acid anodizing)

图 3 为不同表面粗糙度 6061 铝合金试样的极化电阻。可见,随着试样表面越来越光滑,极化电阻也在逐步提高,而 6061 铝合金表面经过硫酸、硼酸硫酸阳极氧化之后,其极化电阻大幅提高,分别为 14.6, 15.7 $\text{k}\Omega/\text{cm}^2$ 。由此可见,6061 铝合金表面经阳极氧化

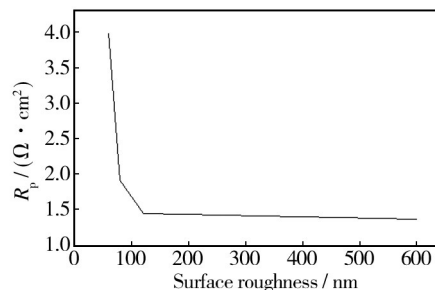


图 3 不同表面粗糙度的 6061 铝合金在 3.5%NaCl 中的极化电阻

Fig.3 The polarization resistance of 6061 aluminium alloy with different surface roughness in 3.5% NaCl solution

后极化电阻大幅提高,说明经阳极氧化后 6061 铝合金的表面电阻大幅提高,耐蚀性也随之提高。

2.1.2 盐雾实验分析

图4为不同表面粗糙度和表面阳极氧化处理前后的 6061 铝合金试样在 15 天中性盐雾实验后的腐蚀形貌,可以明显看出,6061 铝合金在中性盐雾环境下的腐蚀以点蚀为主。随表面粗糙度的降低,6061 铝合金表面的盐粒沉积量只有微量减少,表面基本没有金属光泽。经过硫酸、硼酸硫酸阳极氧化后的试样表面基本没有盐粒沉积,仍可展现出一定的金属光泽,进一步证明了表面阳极氧化对 6061 铝合金耐蚀性能有提高作用。

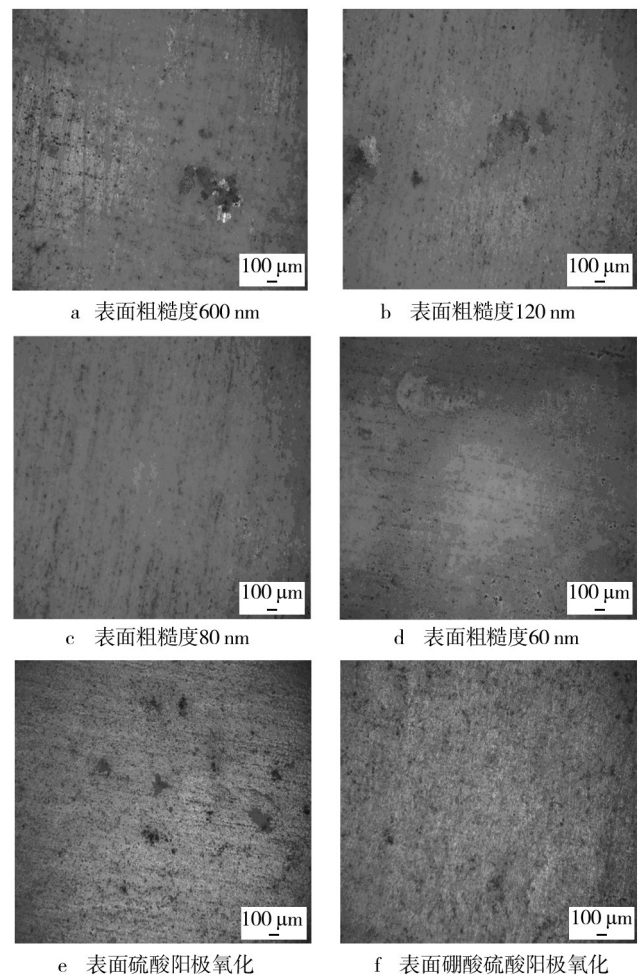
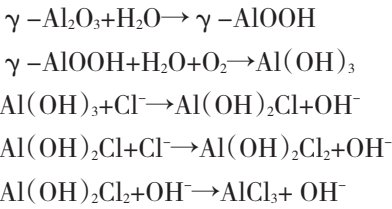


图4 6061 铝合金不同表面状态盐雾 15 天后的腐蚀形貌
Fig.4 Corrosion morphology of different surface status of 6061 aluminium alloy after 15 days of salt spray test

从点蚀的程度来看,表面粗糙度为 600 nm 和 120 nm 的试样点蚀范围较大,且一部分点蚀区域已连成一片,形成较大范围的腐蚀区,说明表面较粗糙的试样耐蚀性低。

6061 铝合金在盐雾环境下发生点蚀主要是由于

在腐蚀介质 Cl⁻ 的作用下,使铝合金表面的氧化膜较薄的部位先发生破裂。这些破裂部位与其他膜覆盖的部位就会形成大阴极小阳极的腐蚀微电池,促进点蚀的形成,具体反应过程为:



铝合金表面经阳极氧化处理后,生成的氧化膜比自然形成的氧化膜更加稳定,且厚度更大,所以对 Cl⁻ 的抵抗作用较强,因而在腐蚀初期具有较强的耐蚀性能。在图 4e,f 中仍可见到点蚀的发生,这是因为随着腐蚀时间的延长,在 Cl⁻ 的作用下阳极氧化膜的厚度逐渐减薄,使得部分铝合金基体露出,从而发生点蚀。

2.2 不同温度的影响

首先将测试所需的电化学试样工作面用砂纸逐级水磨至 1500#,再进行电化学测试。图 5 为不同温度下在 3.5%NaCl 中 6061 铝合金的极化曲线,采用塔菲尔外推法对极化曲线进行拟合,见表 1。

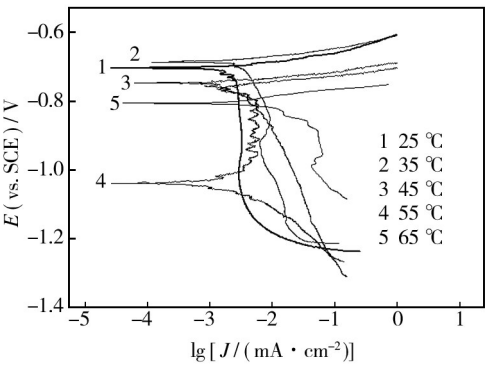


图5 不同温度下在 3.5%NaCl 中 6061 铝合金的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of 6061 aluminium alloy in 3.5%wt NaCl solution at different temperatures

表 1 不同温度下在 3.5%NaCl 中 6061 铝合金极化曲线的拟合结果

Table 1 The fitting result of polarization curves of 6061 aluminium alloy in 3.5%wt NaCl solution at different temperatures

温度/ ℃	E_{corr} (vs. SCE)/V	J_{corr} ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	b_a ($\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$)	b_c ($\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$)
25	-0.685	0.698	20.6	12.9
35	-0.683	0.728	25.3	10.3
45	-0.744	0.875	69.5	9.1
55	-1.035	0.192	20.3	9.2
65	-0.798	0.769	72.1	10.6

由图5的极化曲线和表1所拟合得到的腐蚀电流发现,6061铝合金在25~45℃时腐蚀电流逐渐升高。这主要是因为随温度的升高,电化学反应活性提高,而且随着温度升高,电解质溶液的电阻也会降低。基于以上两点可见,6061铝合金的腐蚀在25~45℃时腐蚀速率随温度的升高而升高。在55℃时,出现了不太稳定的钝化现象,可见6061铝合金在较高温度下钝化能力增强,钝化膜更为致密。这主要是因为Al在较高温度下易与电解质溶液中的溶解氧结合,则更易钝化;且在较高温度时,阳极表面的析氢腐蚀反应($2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^-\rightarrow\text{H}_2\uparrow+\text{OH}^-$)会加剧,所生成的 OH^- 会使6061铝合金表面附近的pH值升高,有利于钝化膜稳定性的增强^[16-17]。与此同时,温度达到55℃后,电化学反应活性会进一步提高,只是在55℃时,其影响程度不如引起6061铝合金钝化的因素作用强,所以出现了钝化现象。当温度升高到65℃后,由温度升高所带来的腐蚀电化学反应活性增强又成为了主导因素,从而导致6061铝合金钝化现象消失,腐蚀速率增大。

3 结论

1) 随着表面粗糙度的下降,6061铝合金的耐蚀性有所提高,且表面经过硫酸、硼酸硫酸阳极氧化后,试样表面盐粒沉积量大幅下降,腐蚀面积有所减少,说明硫酸、硼酸硫酸阳极氧化可提高6061铝合金的耐蚀性能。

2) 在25~45℃时,而随着温度的升高,6061铝合金的耐蚀性下降;当温度达到55℃时,由于受到温度升高所带来的阳极析氢反应增强等因素影响,使得6061铝合金表面出现了一定的钝化现象;当温度升高到65℃后,由温度升高所带来的腐蚀电化学反应活性增强又成为了主导因素,导致6061铝合金钝化现象消失,腐蚀速率重新增大。说明55℃为使6061铝合金钝化较为有利的温度。

参考文献:

- [1] 孙飞龙,李晓刚,卢琳,等. 5052和6061铝合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2013,49(10):1219—1226.
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion Behavior of 5052 and 6061 Aluminum Alloys in Deep Ocean Environment of South China Sea[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1219—1226.
- [2] VARMA SK, ANDREWS S, VASQUEZ G. Corrosive Wear Behavior of 2014 and 6061 Aluminum Alloy Composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999, 8(1): 98—102.
- [3] 周涛,黄伯云,周科朝,等. 快速凝固耐热铝合金耐蚀性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2004,33(2):187—189.
ZHOU Tao, HUANG Bo-yun, ZHOU Ke-chao, et al. Research on Corrosion-Resistance of Rapidly Solidified Aluminum Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(2): 187—189.
- [4] ZAID B, SAIDI D, BENZAID A, et al. Effect of PH and Chloride Concentration on Pitting Corrosion of 6061 Aluminum alloy[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1841—1847.
- [5] 黄燕滨,仲流石,宋高伟,等. 阳极氧化在铝合金表面粘接技术中的应用综述[J]. 装备环境工程,2012,9(3):71—74.
HUANG Yan-bin, ZHONG Liu-shi, SONG Gao-wei, et al. Application of Anodic Oxidation in Surface Bonding Technology of Aluminum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 71—74.
- [6] 杨钊,周隆先. 铝合金微弧氧化技术应用研究[J]. 装备环境工程,2013,10(6):131—135.
YANG Tian, ZHOU Long-xian. Study of Application of Aluminum Alloy with Micro Arc Oxidation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 131—135.
- [7] 韩东锐,张波,欧家才,等. 微弧氧化6061铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2010,7(2):29—35.
HAN Dong-rui, ZHANG Bo, OU Jia-cai, et al. Study of Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy with Microarc Oxidation Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 29—35.
- [8] THEOHARI S, KONTOGEORGOU C. Effect of Temperature on the Anodizing Process of Aluminium Alloy AA5052[J]. Applied Surface Science, 2013, 284: 611—618.
- [9] LIU Wen-yong, LUO Yu-ting, SUN Lin-yu, et al. Fabrication of the Superhydrophobic Surface on Aluminum Alloy by Anodizing and Polymeric Coating[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 872—878.
- [10] MA Y, ZHOU X. Anodizing of AA6063 Aluminium Alloy Profiles: Generation of Dark Appearance[J]. Surface and Interface Analysis, 2013, 45(10): 1479—1484.
- [11] SAENZ De Miera M, CURIONI M, SKELDON P, et al. The Behaviour of Second Phase Particles during Anodizing of Aluminium Alloys[J]. Corrosion Science, 2010, 52(7): 2489—2497.
- [12] 陈朝铁,张鹏,刘静,等. 6063铝合金阳极氧化膜腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺,2013,42(16):38—40.
CHEN Chao-yi, ZHANG Peng, LIU Jing, et al. Research on Corrosion Behavior of Anodizing-oxide Film of 6063 Al Alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(16): 38—40.

(下转第128页)

- [11] 郝文魁,刘智勇,王显宗,等. 海洋平台用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 50—58.
HAO Wen-kui, LIU Zhi-yong, WANG Xian-zong, et al. Current Situation and Prospect of Studies on Strength and Corrosion Resistance of High Strength Steel for Ocean Platform[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 50—58.
- [12] 曹宏涛,李雪亭. 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及采取措施[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 105—108.
CAO Hong-tao, LI Xue-ting. Corrosion Protection Requirements and Technical Measures of Fasteners Based on the Marine Environment[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 105—108.
- [13] 王彬,苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 64—68.
WANG Bin, SU Yan. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 64—68.
- [14] 屈庆,严川伟,万晔,等. NaCl沉积对Zn的大气腐蚀产物影响的FTIR光谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 16—18.
QU Qing, YAN Chuan-wei, WAN Ye, et al. Analysis of Atmospheric Corrosion Products of NaCl-Deposited Zinc Surface by FT-IR Spectroscopy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(1): 16—18.
- [15] 邹妍,王佳,郑莹莹. 锈层下碳钢的腐蚀电化学行为特征[J]. 物理化学学报, 2010, 26(9): 2361—2368.
ZOU Yan, WANG Jia, ZHENG Ying-ying. Electrochemical Corrosion Behaviors of Rusted Carbon Steel[J]. Acta Phys Chim Sin, 2010, 26(9): 2361—2368.
- [16] 徐秀清,魏丹,俞莹滢,等. Cl⁻浓度对含盐污水中10#碳钢腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 59—61.
XU Xiu-qing, WEI Dan, YU Ying-ying, et al. Influence of Cl⁻ Concentration on the Corrosion Behavior of 10# Carbon Steel in Saline Wastewater[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 59—61.

(上接第104页)

- [13] SAEEDIKHANI M, JAVIDI M, YAZDANI A. Anodizing of 2024-T3 Aluminum Alloy in Sulfuric-Boric-Phosphoric Acids and Its Corrosion Behavior[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2551—2559.
- [14] 张云霞. 基体表面粗糙度对化学镀镍层耐蚀性的影响[J]. 电镀与环保, 2014, 34(6): 18—20.
ZHANG Yun-xia. Effects of Substrate Surface Roughness on Corrosion Resistance of Electroless Nickel Coating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2014, 34(6): 18—20.
- [15] 包信方. 基板粗糙度对镀锡板耐蚀性的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(2): 5—7.
BAO Xin-fang. Effects of Substrate Surface Roughness on Corrosion Resistance of Stannum Coating[J]. Materials Protection, 2014, 47(2): 5—7.
- [16] 韩东锐,韩冰,隋景堂,等. 6061铝合金在高温流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 1—4.
HAN Dong-rui, HAN Bing, SUI Jing-tang, et al. Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy in High Temperature Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 1—4.
- [17] 陈庆,时黎霞,腾玉华. 介质的成分、浓度和温度对金属材料电化学腐蚀的影响[J]. 吉林化工学院学报, 2000, 17(1): 63—66.
CHEN Qing, SHI Li-xia, TENG Yu-hua. The Influences of Composition, Concentration and Temperature on the Electrochemical Corrosion of Metal Materials[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2000, 17(1): 63—66.

(上接第99页)

- [10] ABBOTT R, KOLARIK A L. Strength Substantiation of the All-composite Airframe (a Materials Database Approach) [C]// Proceedings of the 33rd International SAMPE Symposium, 1989.
- [11] ASHTON H R. Damage Tolerance and Durability Testing for F/A-18 E/F Composite Materials Structures[C]// AIAA Paper 96-1320, 1996.
- [12] 沈真,张晓晶. 复合材料飞机结构强度设计与验证概论[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2011.
SHEN Zhen, ZHANG Xiao-jing, et al. An Introduction to Design and Verification for Composite Aircraft Structures[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2011.
- [13] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
ZHAO Qu-sen. Advanced Composite Materials Handbook[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003.
- [14] JAMES Giancaspro, WINSON Taam, RAYMOND Wong. Modified Joint Weibull approach to determine load enhancement factors[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 3: 787—790.
- [15] MIL-HDBK-17, 结构材料表征指南 第一卷: 聚合物基复合材料[S].
MIL-HDBK-17-3F, Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites[S].