



6061 铝合金与 30CrMnSiA 结构钢在模拟工业-海洋大气环境下的电偶腐蚀防护

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. 北京科技大学 腐蚀与防护教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 桂林理工大学 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室 材料科学与工程学院, 桂林 541004)

摘 要: 重点研究 6061 铝合金和 30CrMnSiA 结构钢在模拟工业-海洋环境下的电偶腐蚀防护。以表面阳极氧化及有机涂层处理的 6061 铝合金、表面镀镉及涂层处理的 30CrMnSiA 结构钢为实验材料, 将试样装配成标准电偶试样, 对其进行氙灯老化和周期浸润实验, 并对腐蚀后的试样进行分析。结果表明: 仅采用表面阳极氧化处理的 6061 铝合金的强度 σ_b 和塑性 δ 损失较大, σ_b 和 δ 分别下降了约 24.2% 和 13.4%。而采用环氧聚酰胺底漆和丙烯酸聚氨酯面漆的复合防护涂层的 6061 铝合金强度和塑性损失较小, σ_b 和 δ 分别下降约 4% 和 5%。且无涂层试样的平均点蚀坑深度明显大于有涂层试样的, 最高相差 32 μm , 表明此涂层可减弱电偶腐蚀。

关键词: 6061 铝合金; 30CrMnSiA 结构钢; 大气腐蚀; 电偶腐蚀; 有机涂层; 力学性能

中图分类号: TG172.2; TG172.3

文献标志码: A

Galvanic corrosion and protection of 6061 aluminum alloy coupled with 30CrMnSiA steel in simulative industry-marine atmospheric environment

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, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Processing Technology for Nonferrous Metals and Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The galvanic corrosion and protection of 6061 aluminum alloy coupled with 30CrMnSiA steel in simulative industry-marine atmospheric environment was studied. The anodized and organic coated 6061 aluminum alloy and cadmium-plated and organic coated 30CrMnSiA steel were assembled into standard galvanic samples. After xenon lamp aging and alternate immersion, the mechanical properties and microstructures of the samples were investigated. The results show that the strength (σ_b) and toughness (δ) of the anodized 6061 aluminum alloy decrease obviously, σ_b and δ decrease by about 24.2% and 13.4%, respectively. However, σ_b and δ of 6061 aluminum alloy coated with acrylic polyurethane and epoxy polyamide resin composite decrease slightly, only about 4% and 5%, respectively. In addition, the average pitting corrosion depth of the uncoated samples is significantly greater than that of samples with coating, and the maximum difference of the depth is about 32 μm . Therefore, the galvanic corrosion can be reduced by organic coating.

Key words: 6061 aluminum alloy; 30CrMnSiA steel; atmospheric corrosion; galvanic corrosion; organic coating; mechanical property

铝合金具有密度低、抗疲劳性能好的特点,且具有较高的比强度、比刚度和较好的耐腐蚀性能^[1]。其中,6061 铝合金属于 Al-Mg-Si 系铝合金,是主要的航空系列铝合金,以 Mg₂Si 为主要强化相,并与 Al 组成二元共晶相。6061 铝合金是一种典型的可变形热处理的铝合金,并具有很好的综合性能,可以广泛地应用于飞机、轮船等大型交通工具上^[2-3]。30CrMnSiA 结构钢是航空工业中使用最为广泛的一种高强钢,在淬火高温回火状态下仍具有较高的强度和塑韧性,且切削加工性能良好,适用于制造航空工业重要的锻件、机械加工件和焊接件等^[4-6]。在这两种材料接触组成电偶对时,由于 6061 铝合金的电位低于 30CrMnSiA 结构钢的,在电偶腐蚀中作为阳极,腐蚀会被加剧^[7-12],从而降低了铝合金的使用寿命。因此,研究如何减弱电偶腐蚀具有了重大的实际意义。

如今,我国沿海工业发展迅速,伴随的工业污染也随之而来。工业-海洋环境的大气腐蚀以潮大气腐蚀(相对湿度为 70%~85%左右)和湿大气腐蚀(相对湿度接近 100%)为主,在金属表面的电解液膜层中进行电化学腐蚀。膜层的形成主要是通过毛细凝聚、吸附凝聚和化学凝聚形成,金属表面的缝隙、腐蚀产物、灰尘等都会使膜层的凝聚加速,尤其是当金属表面落有钠盐等易溶于水的盐类时,还会增加膜层的导电性,使腐蚀加剧。因此,航空材料在实际应用中面临的腐蚀环境,很多都是工业-海洋大气环境。

随着铝合金表面阳极氧化技术的发展,近年来,关于铝合金阳极氧化的研究多集中于阳极氧化的工艺及一些力学性能的应用上^[13-14],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。对于大气腐蚀研究,室外暴晒是最常用的研究手段,它的优点在于精确度高,能准确反映材料在实际应用中的腐蚀情况,但缺点在于试验周期较长,且所需的专业实验场地较大等。目前,室内加速腐蚀由于具有效率高、与室外暴晒实验有较好的相关性等优点,逐渐成为

为材料腐蚀研究的热点^[15]。因此,本文作者以某新型号飞机用蒙皮材料航空铝合金 6061 和 30CrMnSiA 高级优质钢为研究对象,通过在模拟工业-海洋大气环境下进行的室内周期浸润腐蚀及老化加速试验,揭示该材料在工业-海洋大气环境中的电偶腐蚀规律。

1 实验

1.1 实验材料

表 1 所列为本实验所用 6061 铝合金的主要成分。对 6061 铝合金表面分别进行硼酸硫酸阳极氧化处理,以及环氧聚酰胺和丙烯酸聚氨酯的复合涂层处理。表 2 所列实验所用 30CrMnSiA 结构钢的主要成分。对 30CrMnSiA 结构钢表面分别进行低氢脆镀镉处理,以及环氧聚酰胺和丙烯酸聚氨酯的复合涂层处理。

6061 铝合金形状和尺寸按标准 HB 5143—1996 中带孔板形试样进行加工,30CrMnSiA 结构钢尺寸为 70 mm×25 mm×3 mm。将试样通过紧固件连接,并在紧固件和试样间用橡胶垫圈绝缘。

对 6061 铝合金进行的硼硫酸阳极氧化处理的目的是为了增加 6061 铝合金表面的电阻,从而降低电偶效应。对 30CrMnSiA 结构钢进行的低氢脆镀镉处理的目的是为了降低阴阳两极电位差,从而减弱电偶腐蚀的驱动力,同时增强涂层底漆与基体的结合。

有涂层的试样则先涂涂层后连接,以研究涂层对电偶腐蚀的影响。由于试样在连接处所发生的电偶腐蚀最严重,故最后在试样连接边缘四周涂胶,从而减弱电偶腐蚀对 6061 铝合金的影响,同时也可以防止试样发生缝隙腐蚀。

将本实验所采用的电偶连接件试样分为 4 组,每组编号分别为 1、2、3、4,每组分别有 3 个平行对比试样,具体材料组成如表 3 所列。

表 1 6061 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy (mass fraction, %)

Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Zn	Ti	Al
0.8~1.2	0.4~0.8	0.15~0.4	0.04~0.35	≤0.7	≤0.15	≤0.25	≤0.15	Bal.

表 2 30CrMnSiA 结构钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of 30CrMnSiA steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S	Fe
0.27~0.34	0.9~1.2	0.8~1.1	0.8~1.1	≤0.20	≤0.025	≤0.025	Bal.

表 3 电偶连接件材料组成

Table 3 Composition of coupled materials

Sample No.	Anode	Cathode
1	6061 aluminum alloy (boracic-sulphuric acid anodizing)	30CrMnSiA steel (cadmium-plated)
2	6061 aluminum alloy (boracic-sulphuric acid anodizing)	30CrMnSiA steel (cadmium-plated+ acrylic polyurethane and epoxy polyamide coatings)
3	6061 aluminum alloy (boracic-sulphuric acid anodizing + acrylic polyurethane and epoxy polyamide coatings)	30CrMnSiA steel (cadmium-plated)
4	6061 aluminum alloy (boracic-sulphuric acid anodizing + acrylic polyurethane and epoxy polyamide coatings)	30CrMnSiA steel (cadmium-plated+ acrylic polyurethane and epoxy polyamide coatings)

1.2 实验方法

对电偶连接件进行模拟工业-海洋环境的加速腐蚀实验。通过氙灯辐射实验和周期浸润腐蚀实验来模拟工业-海洋大气环境。

以 1 次氙灯辐射实验和 1 次周期浸润实验为 1 个周期, 将所有电偶连接件进行 8 周期的实验, 并对每个周期之后的样品进行拍照, 具体实验时间和限定条件如下:

1) 氙灯照射试验: 照射时间为 59 h; 环境条件为辐照强度 $Q=(60\pm10)\text{ W/m}^2$, 温度 $\theta=(55\pm10)\text{ }^\circ\text{C}$; 2) 周期浸润试验: 实验时间为 48 h; 环境条件为温度 $\theta=40\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 $R_H=90\%$; 腐蚀溶液为 5%NaCl+0.25%Na₂S₂O₈(质量分数)的混合溶液(稀硫酸调整 pH≈4); 浸润周期为 30 min, 其中浸润 7.5 min, 烘烤 22.5 min。

最后将经历 8 个周期的实验后试样进行三维体视学显微镜、XRD、SEM、EDS 和力学性能分析。

由于在金属材料的大气腐蚀中, 大气污染物 SO₂ 会使得金属表面的液膜呈酸性, 会加速金属的腐蚀, 故利用稀硫酸调节腐蚀溶液至 pH=4, 以模拟大气中

SO₂ 等硫化物的存在。且由于工业大气中污染物较多, 并以各类硫化物为主, 故加入少量具有非常强氧化性的 Na₂S₂O₈。因此, 该腐蚀介质的本质为具有强氧化性的酸性溶液。

在加速腐蚀试验后, 将有涂层的试样先在丙酮溶液中超声浸泡, 再轻刮掉涂层进行腐蚀形貌观察。同时, 在体视学显微镜下观察腐蚀且除锈后的试样, 在试样的表面处随机选取一定数量的点蚀坑进行深度测量, 并统计其平均值。

将经过 8 个腐蚀周期后的 6061 铝合金试样按金属室温拉伸试验方法 HB 5143—1996 进行力学性能分析。

2 结果与分析

2.1 试样宏观形貌及腐蚀产物成分分析

图 1~4 所示分别为试样 1~4 在不同周期的加速腐蚀实验过程中的宏观形貌变化(其中标准拉伸件为 6061 铝合金, 较短的长方体试样为 30CrMnSiA 结构

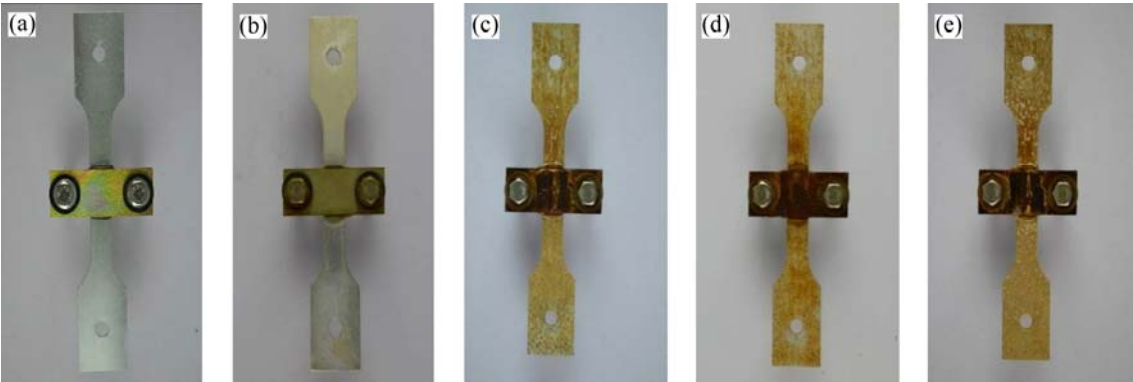


图 1 试样 1 在不同周期加速腐蚀实验中的宏观形貌

Fig. 1 Morphologies of Sample 1 in accelerated corrosion test with different cycles: (a) Initial state; (b) Two cycles; (c) Four cycles; (d) Six cycles; (e) Eight cycles

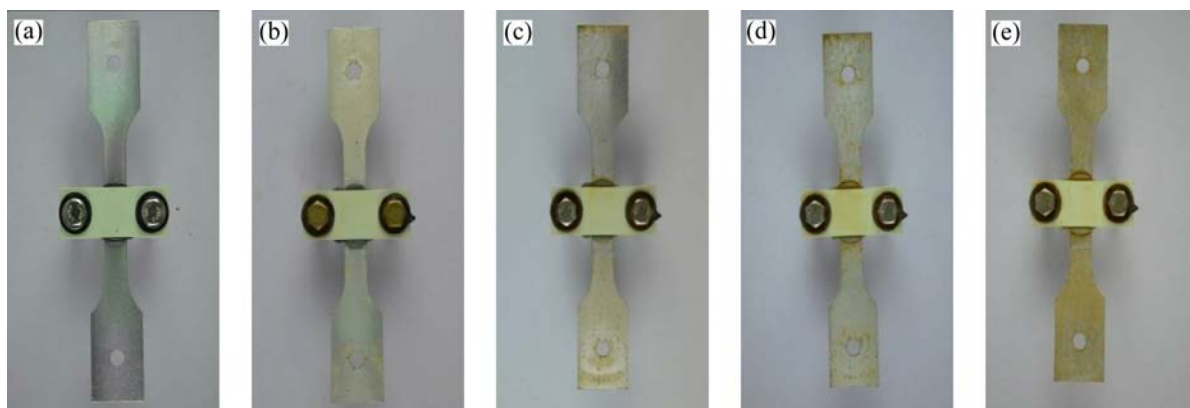


图 2 试样 2 在不同周期的加速腐蚀实验中的宏观形貌

Fig. 2 Morphologies of Sample 2 in accelerated corrosion test with different cycles: (a) Initial state; (b) Two cycles; (c) Four cycles; (d) Six cycles; (e) Eight cycles

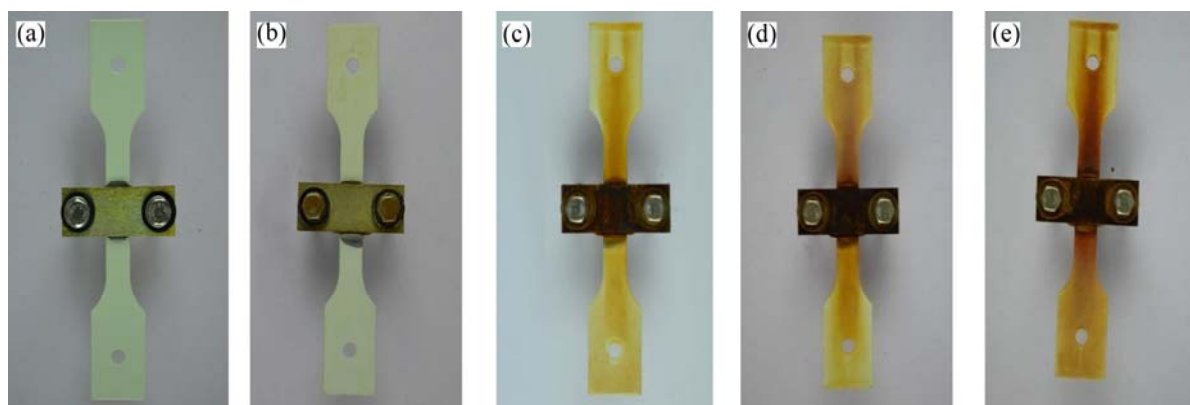


图 3 试样 3 在不同周期的加速腐蚀实验中的宏观形貌

Fig. 3 Morphologies of Sample 3 in accelerated corrosion test with different cycles: (a) Initial state; (b) Two cycles; (c) Four cycles; (d) Six cycles; (e) Eight cycles

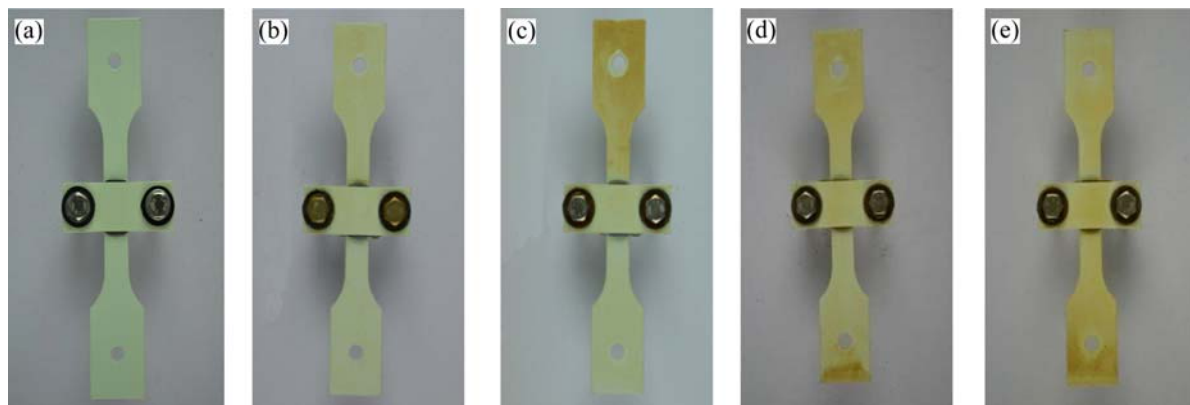


图 4 试样 4 在不同周期的加速腐蚀实验中的宏观形貌

Fig. 4 Morphologies of Sample 4 in accelerated corrosion test with different cycles: (a) Initial state; (b) Two cycles; (c) Four cycles; (d) Six cycles; (e) Eight cycles

钢)。由图 1~4 可见, 4 组试样的腐蚀程度均随着实验周期的延长而增大。对于阴极没有防护涂层的 30CrMnSiA 结构钢, 首先是表面的镀锡层逐渐变色发黄, 第四周期开始出现局部的溃疡状腐蚀, 随腐蚀时间的延长越来越严重。而阳极没有防护涂层的 6061 铝合金, 首先是表面的金属光泽逐渐暗淡消失, 并开始产生点蚀坑和腐蚀产物, 并逐渐增多, 且可以看到离偶接处越近, 腐蚀程度越高, 这主要是因为溶液电阻较大, 使得离偶接处较远的地方受电偶腐蚀影响较轻。对有涂层的试样而言, 涂层逐渐变暗、变黄。

由图 1~4 也可以看出, 即使电偶腐蚀对

30CrMnSiA 结构钢有保护作用, 但其仍会发生一定程度的腐蚀, 同时也由于表面处理和涂层使得电偶腐蚀效应减弱, 故电偶效应对 30CrMnSiA 结构钢的保护作用也随之减弱。图 5 所示为表面无涂层的 30CrMnSiA 结构钢的腐蚀产物的 XRD 谱, 通过比对 PDF 卡片可知其腐蚀产物成分主要为 Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 。

2.2 试样显微组织分析

2.2.1 阳极微观腐蚀形貌分析

图 6 所示为经过 8 个周期腐蚀且除锈后的阳极试样 1~4 的体视学显微像。其中, 图 6(a)与(b)中出现裂

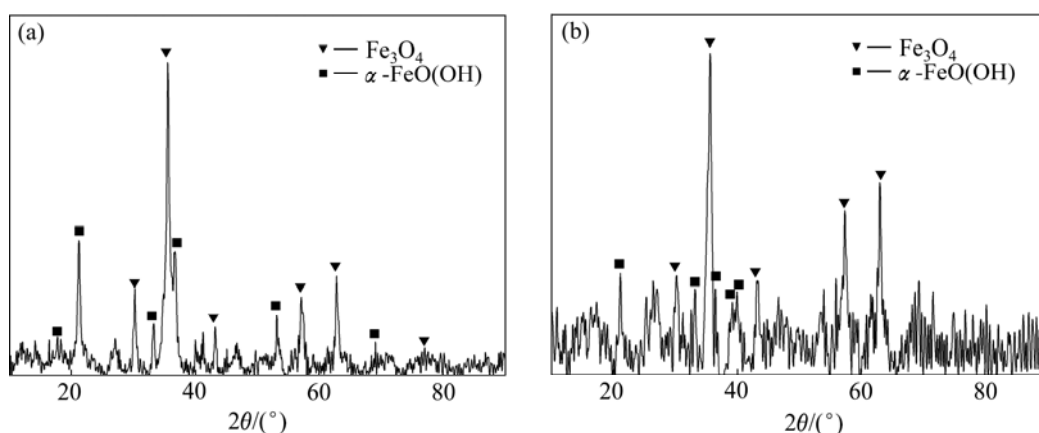


图 5 30CrMnSiA 结构钢腐蚀产物的 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of corrosion products of 30CrMnSiA steel: (a) Sample 1; (b) Sample 3

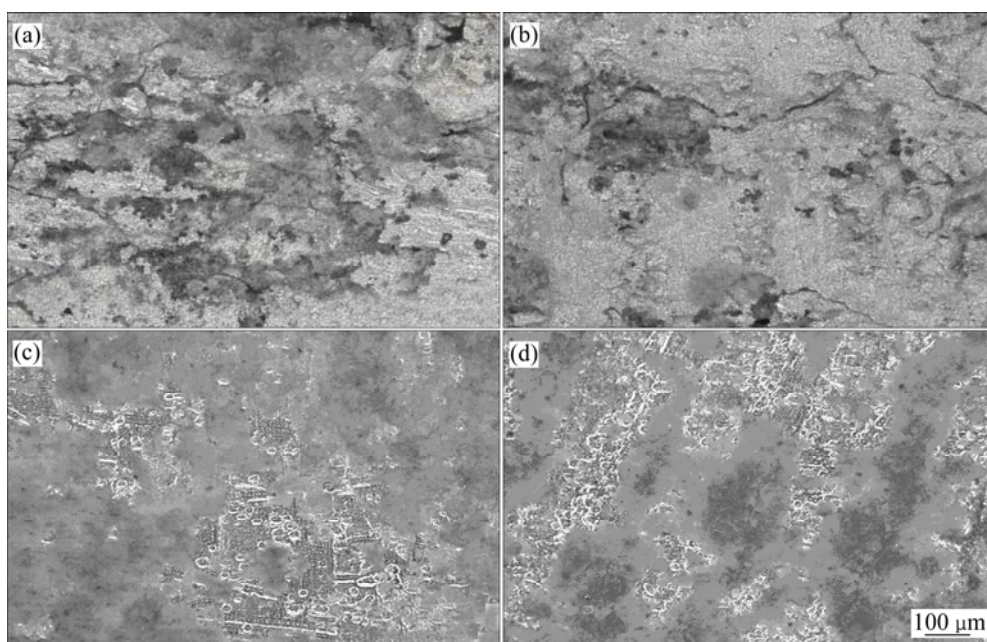


图 6 不同 6061 铝合金试样去除腐蚀产物后的体视学显微像

Fig. 6 Stereology microscopy images of different 6061 aluminum alloy samples after removing corrosion products: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

纹,说明腐蚀较为严重;而图 6(c)与(d)中呈黄绿色的区域为环氧聚酰胺底漆,很难刮掉,说明底漆与试样结合力仍很强。图 7 所示为 6061 铝合金腐蚀后的平均点蚀坑深度。由图 7 可知,由于涂层的高电阻,所以涂层对减弱电偶腐蚀有显著作用,尤其是当作为阳极的 6061 铝合金表面有涂层时,其点蚀坑深度明显降低。

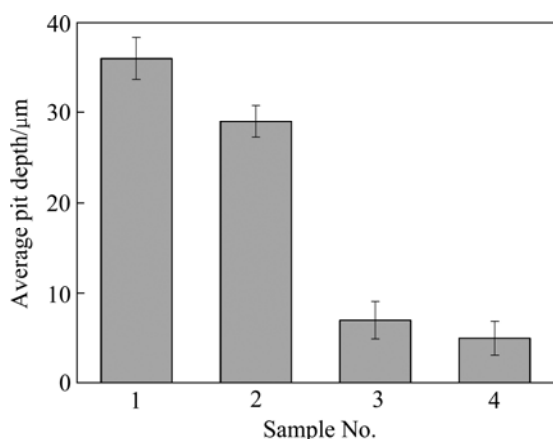


图 7 不同 6061 铝合金试样腐蚀后的平均点蚀坑深度

Fig. 7 Average pit depths of different 6061 aluminum alloy samples after etching

2.2.2 阴极微观腐蚀形貌分析

图 8 所示为经过 8 个周期腐蚀且除锈后的 30CrMnSiA 结构钢的体视学显微像(有涂层的试样同样在丙酮溶液中超声浸泡,再轻刮掉涂层进行观察)。其中,图 8(b)与(d)中呈黄绿色的区域为环氧聚酰胺底漆,呈白色的为丙烯酸聚氨酯面漆,对比图 6(c)与(d)可以看出,30CrMnSiA 结构钢表面的涂层经过腐蚀后与基体结合较 6061 铝合金的更好。图 9 所示为 30CrMnSiA 结构钢腐蚀后的平均点蚀坑深度。由图 9 可知,作为阴极的 30CrMnSiA 结构钢点蚀坑深度整体上小于阳极 6061 铝合金的,可见电偶腐蚀效应对阴极起到了一定的保护作用。

2.3 6061 铝合金试样的力学性能分析

在室温下 6061 铝合金腐蚀前的抗拉强度(σ_b)、屈服强度($\sigma_{0.2}$)、断后伸长率(δ)、弹性模量(E)分别为 310 MPa、276 MPa、17%、68.3 GPa。

图 10 所示为试样腐蚀后的应力-应变曲线,表 4 所列试样腐蚀后的相关力学性能参数,每组分别有 3 个平行对比试样。由图 10 可知,6061 铝合金在腐蚀后的拉伸实验中没有出现屈服阶段,故将其屈服应力

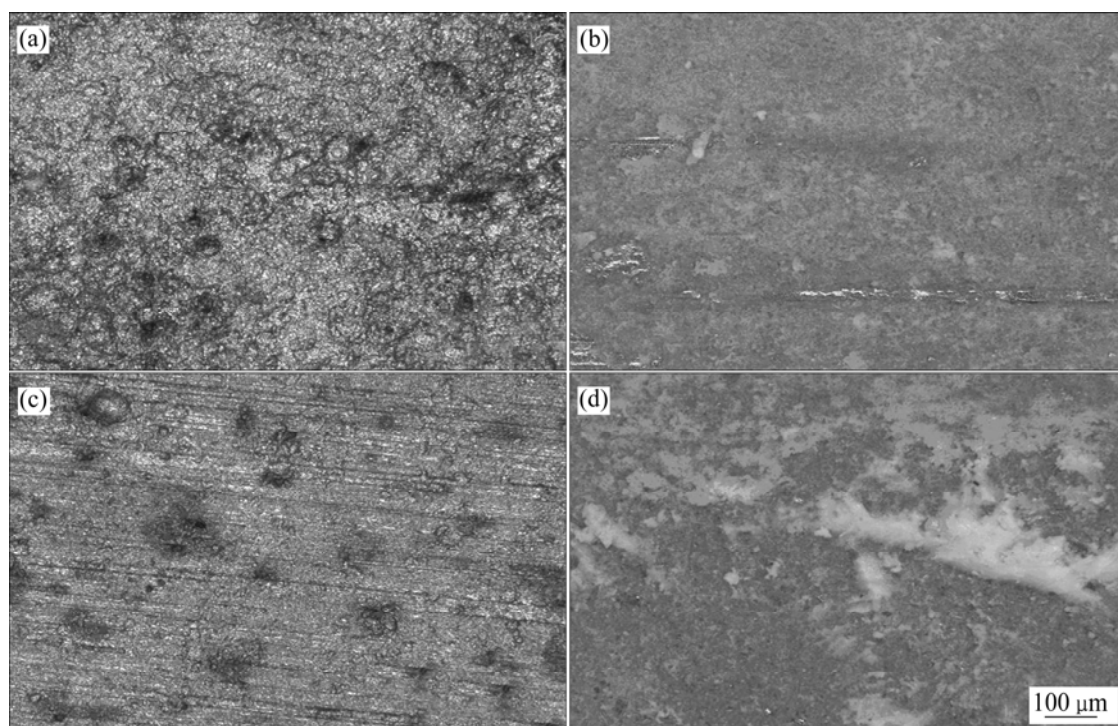


图 8 不同 30CrMnSiA 结构钢试样去除腐蚀产物后的体视学显微像

Fig. 8 Stereology microscopy images of different 30CrMnSiA steel samples after removing corrosion products: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

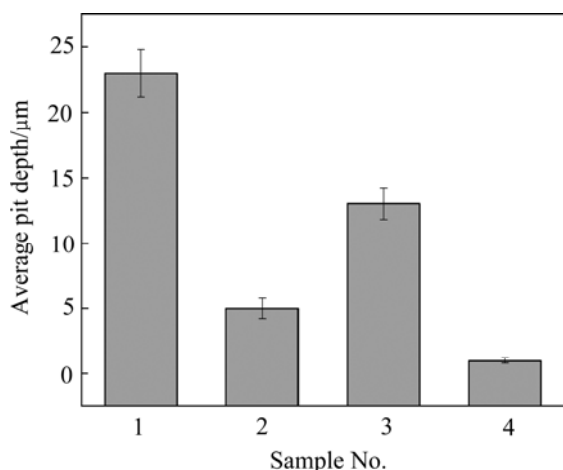


图 9 不同 30CrMnSiA 结构钢试样腐蚀后的平均点蚀坑深度

Fig. 9 Average pit depths of different 30CrMnSiA steel samples after etching

定义为产生 0.2% 的塑性应变时的应力值 $\sigma_{0.2}$, 即条件屈服应力。由表 4 可知, 阴阳两极均无涂层的试样 1 的力学性能下降最为严重, 强度极限 σ_b 下降了 24.2%。而试样 2~4 的 σ_b 在 4% 之内, 且下降幅度均不明显。条件屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 的变化与强度极限 σ_b 的变化基本相同。断后伸长率 δ 则受阳极涂层影响较大, 阳极无涂层的试样 1 和 2 的平均下降高达约 13.4%, 而有涂层的试样 3 和 4 的平均下降只有大约 5%, 因此, 有涂层的铝合金塑性仍然保持较好。其中, 试样 2 虽然在铝合金上没有涂层, 但阴极 30CrMnSiA 结构钢则有涂层, 由 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 的变化可以看出, 涂层减弱了电偶腐蚀对 6061 铝合金的影响, 使得铝合金受到的腐蚀减轻。但试样 2 的断后伸长率 δ 仍然较阳极有涂层的试样 3 和 4 的减少很多, 说明其塑性下降明显, 这主要是由于试样 2 的阳极无涂层保护, 易发生点蚀, 随着腐蚀的进行, 点蚀坑不断增多, 对铝合金的塑性会造成

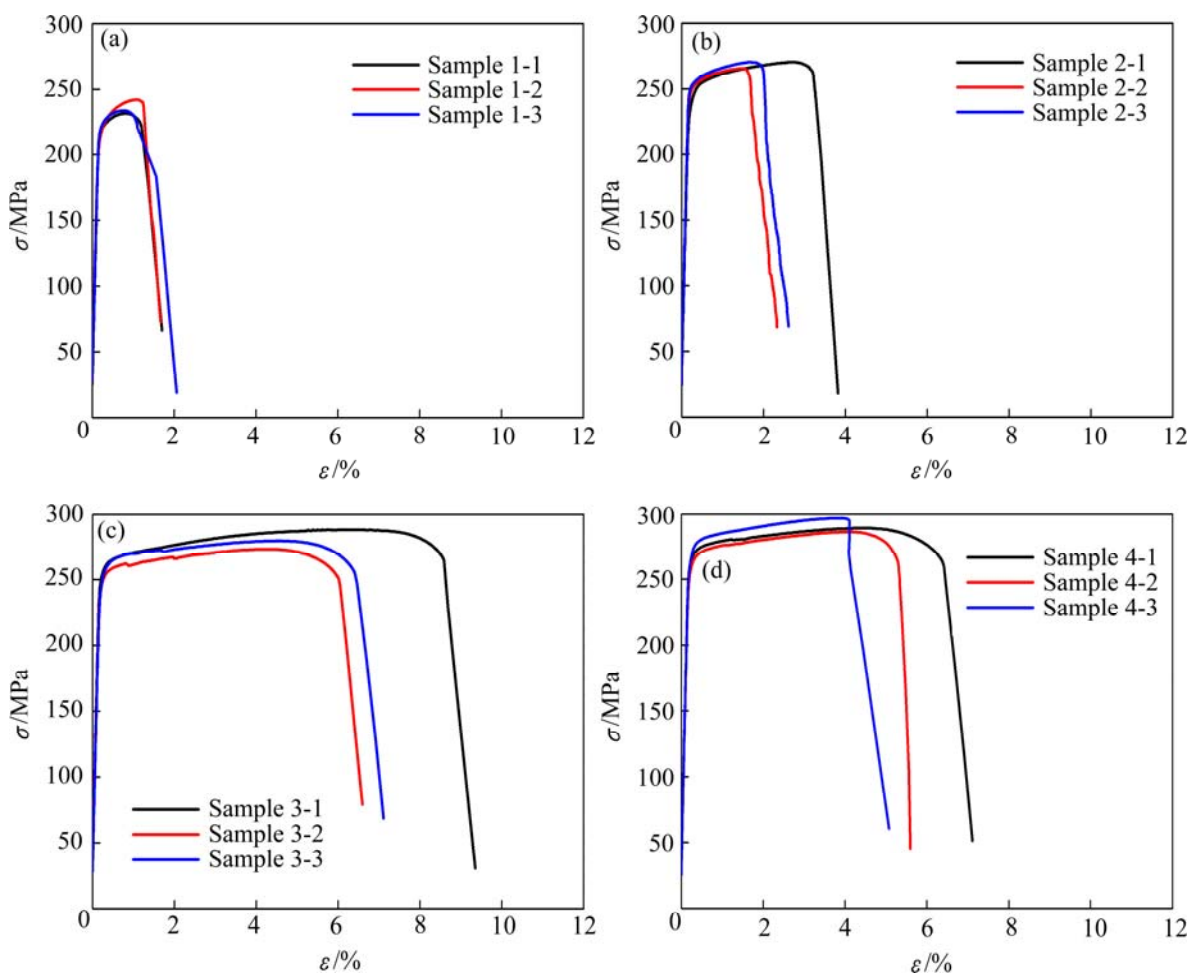


图 10 不同试样腐蚀后的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of different samples after etching: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

表 4 不同试样腐蚀后的相关力学性能参数

Table 4 Mechanical property parameters of different 6061 aluminum alloy samples after etching

Sample No.	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	E /GPa
1-1	220	230	2.0	61.5
1-2	220	240	2.6	62.5
1-3	220	235	2.7	61.1
2-1	245	270	6.0	62.3
2-2	250	265	3.9	64.8
2-3	250	270	4.2	65.7
3-1	255	290	17	64.6
3-2	250	275	12	63.1
3-3	255	280	12	62.9
4-1	270	290	12	66.2
4-2	260	285	10	66.4
4-3	270	300	8.0	68.3

成了较大影响。而表征材料刚度的弹性模量 E 则相对于 6061 铝合金的初始弹性模量无明显变化。

2.4 6061 铝合金断口形貌的 SEM 和 EDS 分析

图 11(a)~(d)所示分别为拉伸实验后的试样 1~4 的

断口形貌。由图 11 可以看出,经过 8 个周期的腐蚀之后,6061 铝合金内部组织并未发生明显改变,而试样断口边缘处则与内部组织不同,对于无涂层的试样则更为明显,说明腐蚀作用只作用于材料表层,造成 6061 铝合金有效厚度的减小,从而使其承载能力降低。对图 11 进行 EDS 线扫描分析(沿白色直线,扫描方向自上而下),图 12 所示为试样断口 EDS 线扫描图。由图 12 可以看出,有涂层的试样 3 和 4 的 O 元素和腐蚀性 S、Cl 元素的含量明显低于无涂层试样 1 和 2 的,说明涂层对溶液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 这些腐蚀性较强离子的渗入有很好的阻挡作用,可有效减缓铝合金基体的腐蚀。

2.5 涂层的老化程度分析

本实验所用复合涂层体系为丙烯酸聚氨酯面漆和环氧聚酰胺树脂底漆。环氧树脂由于含有大量不易水解且极性高的羟基和醚键,使其在水环境下附着力仍能保持较高水平,但其耐候性差、抗冲击性也较差,故只能用于底漆。而丙烯酸聚氨酯面漆则具有良好的力学性能,且漆膜光亮,是面漆的主要材料。对于金属材料的防腐,表面涂层仍是最简便的方法之一^[16-17]。涂层的最主要作用就是对水、氧气、腐蚀性离子起到有效地屏蔽作用,并会加大阴阳两极间的电

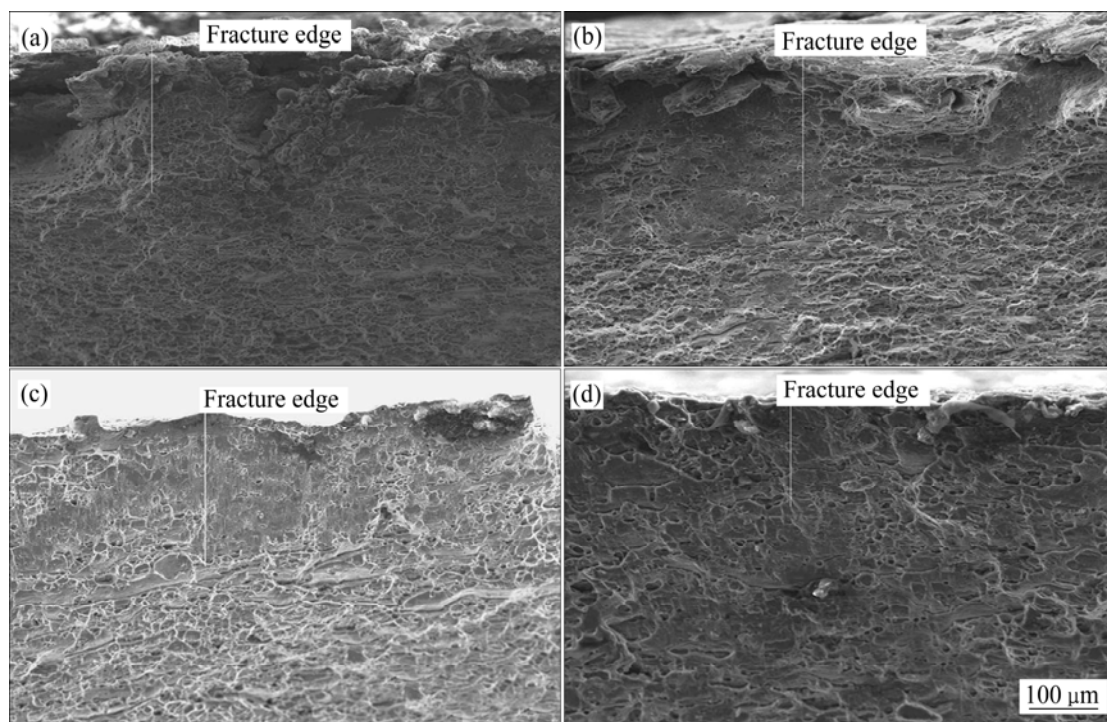


图 11 不同试样的断口 SEM 像

Fig. 11 Fracture SEM images of different samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

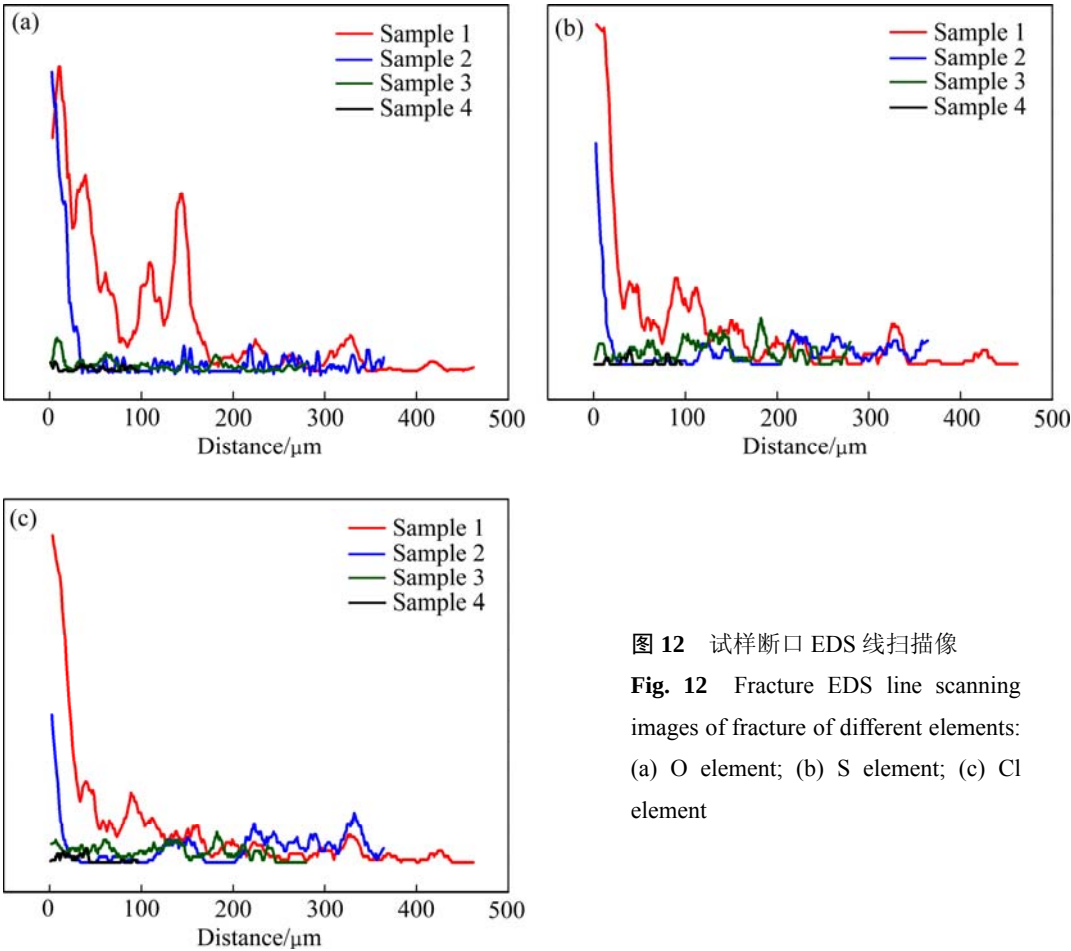


图 12 试样断口 EDS 线扫描像
Fig. 12 Fracture EDS line scanning images of fracture of different elements: (a) O element; (b) S element; (c) Cl element

阻,对减缓电偶腐蚀效果明显。

综上所述,有涂层的试样也发生了腐蚀,其主要原因是随着氙灯照射实验的进行,涂层会产生一定程度的老化失效。随着氙灯照射时间的延长,作为面漆的丙烯酸聚氨酯涂层首先老化,其老化机理主要为C—N键和O—CH键的断裂^[18],使其发生降解,表面变粗糙,从而对腐蚀介质的屏蔽作用下降。表5所列涂层性能变化参数。由表5可以看出,涂层的失光率和色差都很大,平均失光率高达85.2%,平均色差达到18.53,说明丙烯酸聚氨酯面漆老化较为严重。其中试样3的失光率和色差最大,分别约为98.0%和33.8,这主要是因为试样3阴极无涂层,腐蚀较严重,腐蚀产物落到铝合金上使得涂层变色严重。同时,涂层的附着力仍保持较高的水平,平均为8.72 MPa,且各组差别不大,说明环氧聚酰胺树脂底漆并未遭到破坏,与基材仍有较好的结合力。由图7和9可以看出,有涂层的试样点蚀坑深度较无涂层试样显著减少,说明涂层有效地阻止了试样的腐蚀。

表 5 不同试样涂层的性能参数

Table 5 Properties parameters of coatings of different samples				
Sample No.	Electrode	Adhesion force/MPa	Light loss rate/%	Color difference
2-1	Cathode	8.12	88.5	11.88
2-2	Cathode	8.08	84.3	14.65
2-3	Cathode	7.92	84.6	10.59
3-1	Anode	8.92	97.8	44.56
3-2	Anode	8.84	97.6	25.29
3-3	Anode	8.97	98.7	31.57
4-1	Anode	8.51	72.1	16.11
4-2	Anode	8.68	73.2	17.83
4-3	Anode	8.43	72.2	17.35
4-1	Cathode	9.43	84.9	11.35
4-2	Cathode	9.36	83.8	9.29
4-3	Cathode	9.38	84.7	11.85

3 结论

1) 将表面阳极氧化及有机涂层处理的 6061 铝合金与表面镀镉及涂层处理的 30CrMnSiA 结构钢偶接后, 置于实验室模拟工业-海洋大气环境的加速腐蚀条件下进行腐蚀, 其力学性能除刚度外均出现不同程度的下降。其中, 无涂层的试样强度和塑性损失较大, 分别下降约 24.2%和 13.4%; 而有涂层的试样强度和塑性损失较小, 分别下降约 4%和 5%。因此, 涂层对试样的塑性保护较好。

2) 从腐蚀后试样的平均点蚀坑深度可以看出, 对于有涂层的试样, 无论是作为阳极的 6061 铝合金还是作为阴极的 30CrMnSiA 结构钢, 点蚀坑深度均较无涂层试样的小。其中, 阴阳极均有涂层的试样较阴阳极均无涂层的试样的点蚀坑深度分别下降 32 μm (阳极)和 22.6 μm (阴极)。

3) 环氧聚酰胺(H06-D 底漆)+丙烯酸聚氨酯(13-2 磁漆)涂层的防护体系虽然在氙灯照射过程中发生老化, 使其平均失光率高达 85.2%、平均色差达到 18.53, 但涂层的存在会增大阴阳两极间的电阻, 从而仍对减弱 6061 铝合金的电偶腐蚀起着重要作用。

REFERENCES

- [1] ZAID B, SAIDI D, BENZAID A, HADJI S. Effect of pH and chloride concentration on pitting corrosion of 6061 aluminum alloy[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(7): 1841-1847.
- [2] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 程学群, 董超芳, 高瑾. 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, CHENG Xue-qun, DONG Chao-fang, GAO Jin. 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.
- [3] VARMA S, 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.
- [4] 殷傲宇, 邓畅光, 张吉阜, 肖来荣, 戴红亮. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层对 30CrMnSiA 钢防护性能的影响[J]. *热喷涂技术*, 2011, 3(3): 60-64.
YIN Ao-yu, DENG Chang-guang, ZHANG Ji-fu, XIAO Lai-rong, DAI Hong-liang. Preparation of WC-10Co4Cr coating on 30CrMnSiA steel by HOVF and its protective properties[J]. *Thermal Spray Technology*, 2011, 3(3): 60-64.
- [5] 韩舒展, 惠卫军, 刘荣佩, 邵成伟. 回火温度对 30CrMnSiA 钢氢致延迟断裂行为的影响[J]. *材料热处理学报*, 2013, 35(7): 115-119.
HAN Shu-zhan, HUI Wei-jun, LIU Rong-pei, SHAO Cheng-wei. Effect of tempering temperature on hydrogen-induced delayed fracture behavior of 30CrMnSiA steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 35(7): 115-119.
- [6] 刘明, 汤智慧, 蔡建平, 蔡建飞, 孙志华, 张晓云, 陆锋. 30CrMnSiA 高强钢在北京地区的大气腐蚀研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(4): 17-21.
LIU Ming, TANG Zhi-hui, CAI Jian-ping, CAI Jian-fei, SUN Zhi-hua, ZHANG Xiao-yun, LU Feng. Study on atmospheric corrosion of 30CrMnSiA high strength steel in Beijing area[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(4): 17-21.
- [7] FOVET Y, POURREYRON L, GAL J Y. Corrosion by galvanic coupling between carbon fiber posts and different alloys[J]. *Dental Materials*, 2000, 16(5): 364-373.
- [8] SUBRAMANIAN G, PALRAI S, PALANICHAMY S. Galvanic corrosion behaviour of aluminium 3004 and copper in tropical marine atmosphere[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2014, 13(2): 230-236.
- [9] DU Xiao-qing, YANG Qing-song, CHEN Yu, YANG Yang, ZHANG Zhao. Galvanic corrosion behavior of copper/titanium galvanic couple in artificial seawater[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(2): 570-581.
- [10] FASUBA O A, YEROKHIN A, MATTHEWS A, LEYLAND A. Corrosion behaviour and galvanic coupling with steel of Al-based coating alternatives to electroplated cadmium[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 141(1): 128-137.
- [11] 裴和中, 尹作升, 张国亮, 刘远勇. 2024 与 2124 铝合金电偶腐蚀行为的对比研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2012, 32(2): 133-136.
PEI He-zhong, YIN Zuo-sheng, ZHANG Guo-liang, LIU Yuan-yong. Comparative research of galvanic corrosion of 2024 and 2124 aluminum alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2012, 32(2): 133-136.
- [12] ZHANG Da-lei, WANG Wei, LI Yan. An electrode array study of electrochemical inhomogeneity of zinc in zinc/steel couple during galvanic corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(4): 1277-1284.
- [13] 刘建华, 李永星, 于美, 李松梅, 孙玉静. 乙二酸铵对 7075-T6 铝合金硫酸阳极氧化的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(1): 324-330.
LIU Jian-hua, LI Yong-xing, YU Mei, LI Song-mei, SUN Yu-jing. Effects of ammonium adipate on sulphuric acid anodizing of 7075-T6 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of*

- Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 324-330.
- [14] 王帅星, 赵 晴, 杜 楠, 邵志松, 舒伟发, 陈庆龙. 铈盐对铝合金硼酸-硫酸阳极氧化膜的封闭效应[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1132-1141.
- WANG Shuai-xing, ZHAO Qing, DU Nan, SHAO Zhi-song, SHU Wei-fa, CHEN Qing-long. Sealing effect of cerium salt on boric-sulfuric acid anodic film of aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1132-1141.
- [15] 孙志华, 章 妮, 蔡健平, 刘 明, 陆 峰. 航空铝合金涂层体系加速老化试验前后电化学阻抗变化[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 746-751.
- SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, LIU Ming, LU Feng. Electrochemical impedance varieties of zine yellow polypropylene coated aluminum alloy used on aircraft during the accelerated degradation test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 746-751.
- [16] 薛玉华, 黄志勇, 步明升, 阮润琦, 汪 威, 刘 志, 刘玉鹏, 王 黎, 郭年华. 聚氨酯涂料与环氧底漆配套性研究[J]. 材料导报, 2013, 27(22): 234-236.
- XUE Yu-hua, HUANG Zhi-yong, BU Ming-sheng, RUAN Run-qi, WANG Wei, LIU Zhi, LIU Yu-peng, WANG Li, GUO Nian-hua. Study on matching between polyurethane paint and epoxy primer[J]. Materials Review, 2013, 27(22): 234-236.
- [17] 罗振华, 姚 珩, 蔡建平, 张晓云, 陆 锋. 有机涂层性能评价技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(5): 313-317.
- LUO Zheng-hua, YAO Pei, CAI Jian-ping, ZHANG Xiao-yun, LU Feng. Progress of evaluation techniques for organic coatings performance[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(5): 313-317.
- [18] 耿 舒, 高 瑾, 李晓刚, 赵泉林. 丙烯酸聚氨酯涂层的紫外老化行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 752-757.
- GENG Shu, GAO Jin, LI Xiao-gang, ZHAO Quan-lin. Aging behaviors of acrylic polyurethane coatings during UV irradiation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(6): 752-757.

(编辑 王 超)