

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.05.014

# 磷酸盐浓度对5083铝合金微弧氧化膜组织与耐腐蚀性能的影响\*

王红美, 尹艳丽, 杜军, 邱骥, 马世宁

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 为研究电解液浓度对微弧氧化的影响规律, 在磷酸钠电解液中采用恒压模式对5083铝合金进行微弧氧化, 采用场发射扫描电镜、划痕仪以及电化学工作站等研究了电解质浓度对膜层生长速率、组织成分、膜基结合强度以及耐腐蚀性能的影响。结果表明: 随着磷酸钠浓度的增大, 氧化膜厚度线性增加, 膜层表面的“火山堆积”状形貌特征愈发明显, 但浓度过大时氧化膜出现局部不均匀堆积及较大孔洞, 其对氧化膜成分影响不明显; 氧化膜与基体结合良好, 且随着浓度增加结合强度出现先增后减的趋势。当磷酸钠浓度为10 g/L时, 氧化膜的自腐蚀电流最低, 为 $2.96 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, 比铝合金基体降低了1个数量级, 表现出良好的耐腐蚀性能。

**关键词:** 微弧氧化; 5083铝合金; 陶瓷膜; 磷酸钠

中图分类号: TG174.44; TG113.23

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)05-0109-07

## Effects of $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ Concentration on Microstructure and Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Coating on 5083 Aluminum Alloy

WANG Hong-mei, YIN Yan-li, DU Jun, QIU Ji, MA Shi-ning

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** In order to study the effects of electrolyte on micro-arc oxidation (MAO), 5083 alloy was treated by MAO in a solution containing phosphate at a constant applied voltage. The effects of phosphate concentration on thickness, microstructure and element content, bonding strength between matrix and MAO coatings, as well as corrosion resistance were investigated by field emission scan electron microscope (FESEM), scratch tester and electrochemical workshop. The results show that: the coating thickness increases linearly with increasing phosphate concentration, while “volcano deposit” characteristic is gradually significant. However, excess piles and unclosed pores are observed in the coating at phosphate concentration of beyond 20 g/L, and the element content has rather obvious difference. Additionally the bonding strength between the matrix and the MAO coatings first increases and then decreases with increasing phosphate concentration. The corrosion current density of the ceramic coating is  $2.96 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, lower one order of magnitude compared with the matrix, when the phosphate concentration is 10 g/L.

**Keywords:** micro-arc oxidation(MAO); 5083 aluminum alloy; ceramic coating; phosphate concentration

## 0 引言

5083铝合金由于具有良好的耐蚀性、切削性、焊接性以及较高的强度, 在舰船结构材料中广泛应用。在大气环境中, 5083铝合金表面可以

生成致密的钝化膜, 耐磨耐蚀性优良。但在海洋服役环境下, 钝化膜极易破损, 使铝合金出现点蚀<sup>[1-2]</sup>、缝隙腐蚀<sup>[3]</sup>、应力腐蚀<sup>[4]</sup>等, 这些局部损伤会形成应力集中, 萌生裂纹, 严重影响结构材料

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-09-06; 基金项目: \*北京市自然科学基金(3132024); “十二五”装备预研基金(51327040101)

通讯作者: 王红美(1977—), 女(汉), 讲师, 博士生; 研究方向: 材料表面改性; Tel: (010) 6671 8580; E-mail: whmspj@163.com

网络出版日期: 2016-09-30 13:52; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160930.1352.008.html>

引文格式: 王红美, 尹艳丽, 杜军, 等. 磷酸盐浓度对5083铝合金微弧氧化膜组织与耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 109-115.  
WANG H M, YIN Y L, DU J, et al. Effects of  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  concentration on microstructure and corrosion resistance of micro-arc oxidation coating on 5083 aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 109-115.

的强度和装备使用安全。因此对铝合金材料进行表面处理,是提高其性能和延长寿命的有效措施。目前,针对5083铝合金表面技术的研究主要有化学沉积Ni-P非晶镀层<sup>[5]</sup>、溶胶-凝胶法制备复合膜<sup>[6]</sup>、化学转移膜<sup>[7]</sup>、喷涂钛铝基涂层<sup>[8]</sup>、激光刻蚀制备超疏水微结构表面<sup>[9]</sup>、阳极氧化<sup>[10]</sup>和微弧氧化陶瓷膜<sup>[11-12]</sup>等,这些方法都一定程度上提高了铝合金的力学性能、耐磨性及耐蚀性。其中,通过提高传统阳极氧化电压发展而来的微弧氧化技术,由于具有更快的生长效率、更高的硬度、更好的耐磨性和耐蚀性等优点得到了迅速的发展,成为改善铝合金材料表面性能的重要技术。

微弧氧化技术,以前也被称作等离子体微弧氧化,是在金属表面原位制备陶瓷膜的方法。将铝合金或者其他阀金属及其合金接电源正极,并放入某种成分的电解液中,升高电压使金属表面产生火花放电,金属与溶液中的氧及其他成分剧烈反应共同生成陶瓷膜<sup>[13]</sup>。采用微弧氧化技术在铝合金表面制备陶瓷膜以提高其性能的研究,主要集中在2XXX<sup>[14-15]</sup>、6XXX<sup>[16]</sup>、7XXX<sup>[17]</sup>以及铸铝系列<sup>[18]</sup>,5XXX铝合金由于耐腐蚀性能较好而未受关注,研究较少。鲁亮<sup>[11]</sup>等采用Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>电解液在

5083铝合金焊接接头制备了厚度为80 μm的氧化膜,电化学试验证明其提高了接头处的耐腐蚀性能和腐蚀均匀性。Tseng<sup>[19]</sup>等研究了Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>电解质对于5052铝合金微弧氧化膜结构与性能的影响,发现Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>可以提高氧化膜的厚度、硬度和α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量,但氧化层微孔数量增多、表面粗糙度增大,无法满足耐腐蚀性能的要求。因此有必要对微弧氧化工艺进行深入研究,为制备更加致密、耐腐蚀性能更加优良的氧化膜奠定基础。

文中采用磷酸盐电解液体系在5083铝合金表面制备陶瓷膜,系统研究电解液浓度对氧化膜生长速率、表面形貌及成分的影响,分析与膜层防护性能密切相关的膜基结合强度和耐腐蚀性能。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验材料

材料为某型装备用进口5083铝合金板材,成分如表1所示,经线切割加工成尺寸为60 mm×24 mm×3 mm的样片,在样片一端加工一个Φ2.5 mm圆孔,将试样用砂纸依次打磨至均匀光滑,并在酒精中进行超声波清洗吹干后待用。

表1 5083铝合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the 5083 aluminum alloy (w / %)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Content	0.40	0.40	0.10	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	Bal.

### 1.2 试验方法

电解液由分析纯磷酸钠(Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)和去离子水配制,浓度分别为5、10、15、20和25 g/L。微弧氧化采用JHMAO-220V/10A电源,将铝合金样片用铝丝连接悬挂放置在电解液中,并接电源正极,盛装电解液的不锈钢容器接电源负极,通过循环水冷使电解液保持在≤45℃。微弧氧化采用恒压模式,参数分别是电压550 V,频率500 Hz,占空比10%。调节电压使其经3 min从零增加至终值,试验时间共33 min。

### 1.3 表征与分析

采用DDS-307A型电导率仪测试电解液电导率;用BT224S型电子天平(*d*=0.1 mg)测试微弧氧化前后样品的重量;用TT3100S型电涡流测厚仪测量氧化膜的厚度,试样正反两面各测量6个点取

平均值;利用Nanosem450型扫描电镜及其自带能谱对陶瓷膜的形貌和成分进行分析;采用Olympus显微镜图像处理系统对氧化膜电镜照片进行二值化转变,利用软件定量分析孔隙率的百分比;采用Revetest型划痕仪测试膜基结合强度,所用金刚石圆锥形针尖半径为0.1 mm,划痕长度5 mm;采用Nano indenter G200纳米压痕仪测试膜层的硬度,压痕深度300 nm,在膜层截面中间厚度处测试5个点取平均值。

采用Zennium型电化学工作站进行动电位极化曲线测试,试验采用三电极体系,工作电极为环氧树脂封装的试样(暴露面积为1 cm<sup>2</sup>),参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂丝。腐蚀液是质量分数为3.5%的NaCl溶液,电化学测试在室温(25℃)下进行,扫描速度为1 mV/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磷酸钠浓度对电解液导电性的影响

电解质溶液提供了微弧氧化过程所需要的电场和磁场环境, 因此电解液的导电能力对微弧氧化过程有重要影响。图1给出了磷酸钠浓度与电解液电导率的关系曲线。由图可见随着磷酸钠浓度的增加, 溶液电导率呈线性增长, 即当体系电压一定时, 样品表面的电流将逐渐增大, 这将直接影响氧化膜的生长速率及其表面质量。

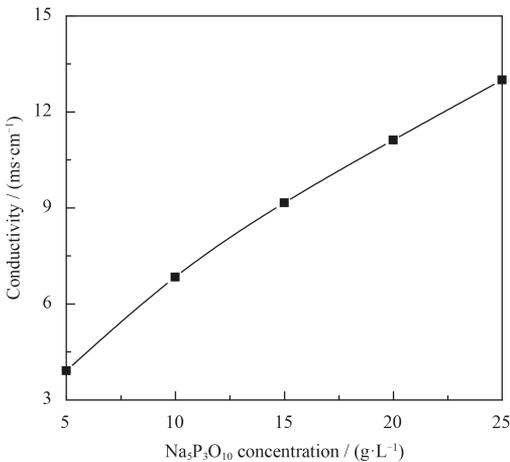
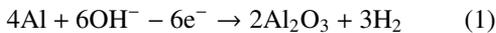


图1 磷酸钠浓度对电解液电导率的影响

Fig. 1 Effects of the Na<sub>3</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub> concentration on electrolyte conductivity

### 2.2 磷酸钠浓度对微弧氧化膜生长速率的影响

图2给出了微弧氧化膜厚度和增重随电解液浓度的变化曲线。由图可见随着磷酸钠浓度的增加, 氧化膜的厚度呈近似线性生长。根据微弧氧化反应原理:



可知电解液中的OH<sup>-</sup>首先要移动并吸附在试样表面, 然后与试样中的Al发生反应。而反应过程中Al始终足量, 所以反应速度取决于OH<sup>-</sup>的量。由电导率结果可知, 随着磷酸钠浓度增加, 体系电流增加, 即单位时间内到达试样表面的OH<sup>-</sup>离子增加, 反应速度加快, 因此氧化膜的厚度逐渐增加。进入膜层的氧会使试样增重, 因此微弧氧化前后样品的增重能够反映进入膜层的氧的量, 即氧化膜的生长速度。由图2可知: 微弧氧化膜的增重与厚度增加趋势一致, 表明增重法可以克服测厚法需要多点采样、数据分散等缺点。

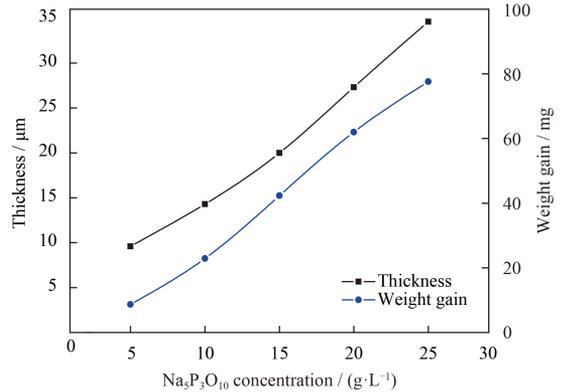


图2 磷酸钠浓度对微弧氧化膜重量和厚度的影响

Fig. 2 Effects of the Na<sub>3</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub> concentration on the weight and thickness of the MAO coating

### 2.3 磷酸钠浓度对微弧氧化膜形貌与成分的影响

图3为不同磷酸钠浓度下微弧氧化膜的表面和截面形貌。由图可知微弧氧化陶瓷膜表面呈现“火山堆积”状的形貌特征, 其截面呈现“波浪起伏”状结构, 表面和截面都可以看到放电产生的微孔, 这些孔隙及微弧氧化过程产生的微裂纹等缺陷对膜层性能有直接影响, 孔隙率统计结果见图4。

当磷酸钠浓度较低时(5 g/L), 电解液导电性较差, 电流较小, 单次火花放电产生的能量较少, 生成的少量熔融物在放电通道周围凝固形成小的“火山堆积”, 此时膜层较薄, 表面留下大量没有被填充的火山口, 膜层孔隙率达5.3%; 随着磷酸钠浓度增加, 溶液导电性增强, 微弧氧化反应剧烈, 放电能量增加不仅使生成的熔融物增多, 并且使熔融物从放电通道喷出后能够充分铺展形成平坦的“火山堆积”, 同时放电通道内壁被熔融物填充使微孔数量减少、孔径变小, 当浓度达10 g/L和15 g/L时逐渐形成平整致密的氧化层, 孔隙率减少至2.6%; 随着浓度增加至25 g/L, 击穿能量过大使熔融物喷出时产生飞溅, 凝固形成不规则的堆积物, 膜层表面粗糙度增加; 同时, 击穿产生的微孔不能被飞溅的产物覆盖愈合而留下较大孔洞, 虽然膜层增厚但组织疏松多孔, 使孔隙率又增加至4%。

对图3所示表面区域进行EDS分析, 典型的能谱如图5所示, 各浓度下膜层元素成分及原子分数见表2。陶瓷层中含量最多的是O和Al, 以及少量Na、Mg和P。由5083铝合金和电解液成分可知, Al和Mg来自铝合金基体, 而O、Na和P来自电解液。随着磷酸钠浓度的增加, O和Al含量都出

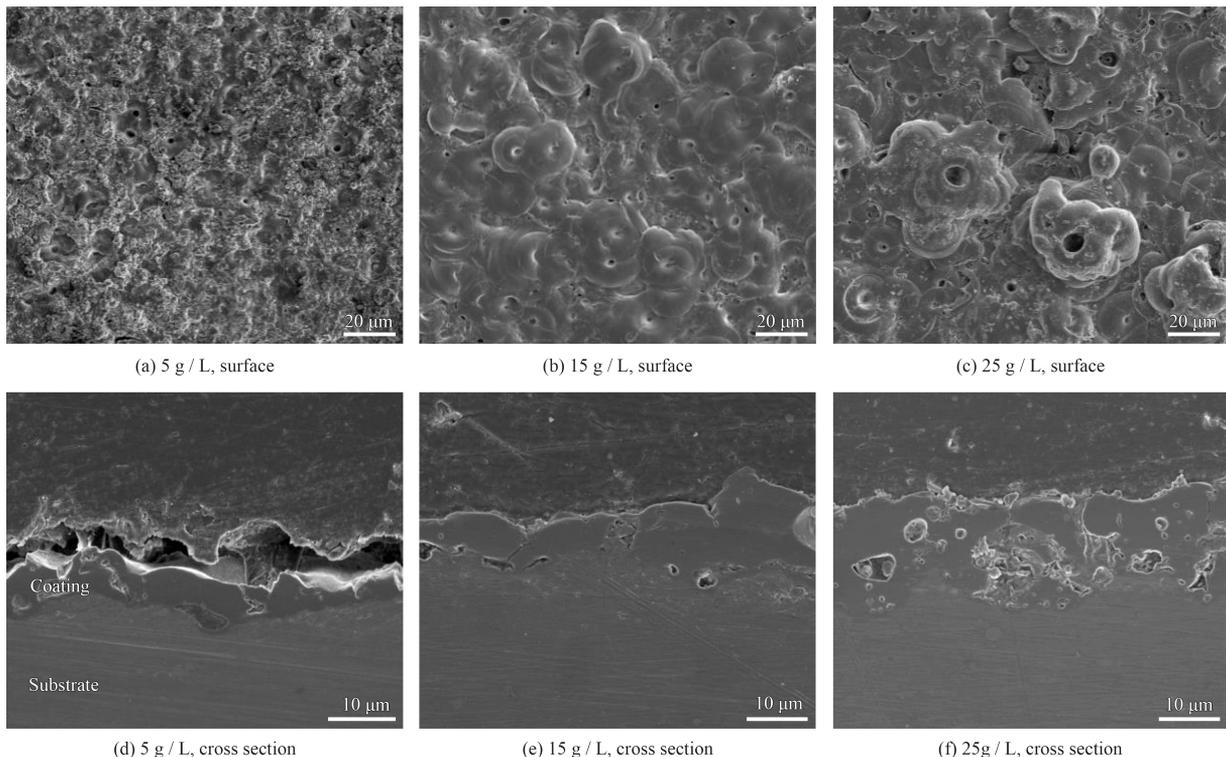


图3 不同磷酸钠浓度下的微弧氧化膜表面和截面形貌

Fig. 3 Surface and cross section morphologies of the MAO coatings formed in different  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  concentration

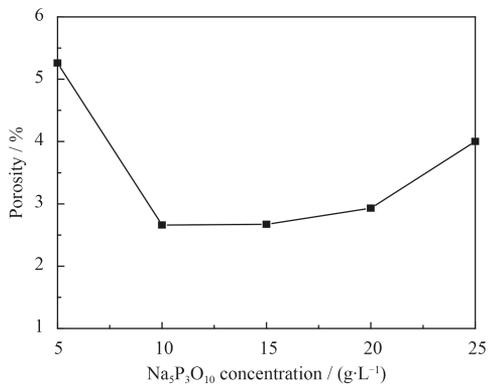


图4 不同磷酸钠浓度下微弧氧化膜的表面孔隙率

Fig. 4 Porosity of the MAO coatings formed in different  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  concentration

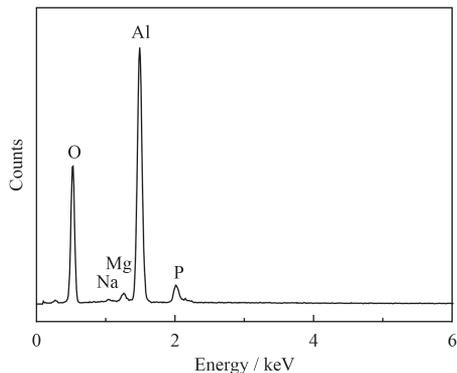


图5 图3(b)中氧化膜的能谱分析

Fig. 5 EDS spectra of the MAO coating in Fig. 3(b)

表2 不同磷酸盐浓度下微弧氧化膜的表面EDS成分

$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ concentration / (g·L <sup>-1</sup> )	O	Na	Mg	Al	P
5	56.11	0.27	0.82	26.16	1.38
10	61.17	0.29	0.85	28.14	2.90
15	60.70	0.23	0.85	30.92	0.60
20	61.27	0.21	0.88	31.61	0.44
25	59.83	0.21	0.77	29.34	0.39

现微量增加然后降低的变化趋势, 说明磷酸钠浓度在10~20 g/L时更有益于陶瓷膜的生成。

### 2.4 磷酸钠浓度对微弧氧化膜硬度的影响

图6是磷酸钠浓度对氧化膜硬度的影响规律。由图可见: 氧化膜硬度均高于13 GPa, 最高值约20 GPa。且随着磷酸钠浓度增加, 氧化膜硬度出现先增加后降低的趋势。陶瓷类材料的硬度主要取决于结合键类型、晶体结构和化学组成, 另外微观组织、裂纹和杂质等也会影响硬度。由此分析电解液浓度改变对陶瓷膜硬度的影响因素主要是微观组织、缺陷以及厚度等。当磷酸钠浓度较低时, 生成的氧化膜厚度较小, 由于软基体的影响和微孔的存在, 硬度较低; 随着磷酸钠浓度增

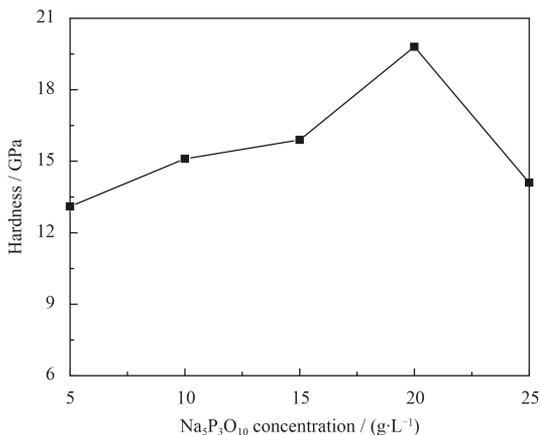
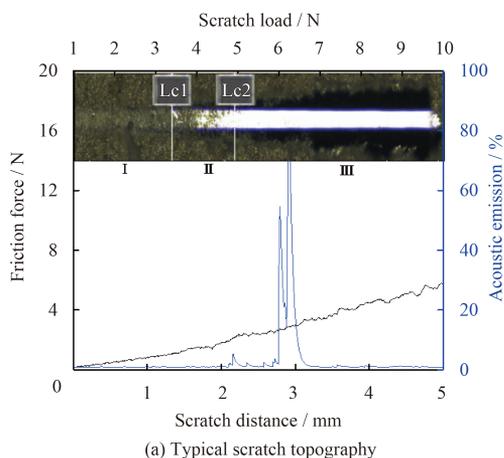


图6 磷酸钠浓度对氧化膜硬度的影响

Fig. 6 Effects of the Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub> concentration on the MAO coating hardness

加, 氧化膜厚度不断增加, 组织更加平整致密, 基体影响逐渐消失, 硬度也逐渐升高。而浓度超过20 g/L后膜层生长速度过快, 表面孔隙率增加,

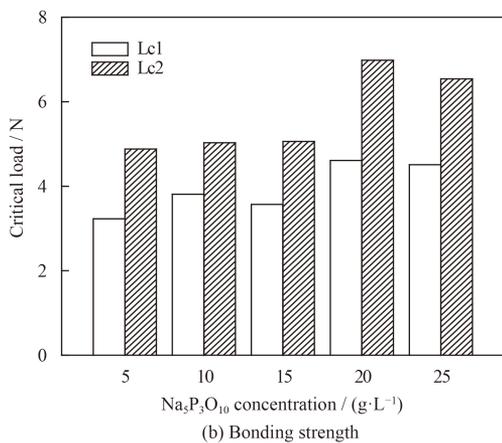


(a) Typical scratch topography

膜层粗糙疏松致使硬度大幅度下降。

## 2.5 磷酸钠浓度对微弧氧化膜结合强度的影响

氧化膜与基体的结合强度直接关系到膜基体系的使用性能和可靠性。在滑动速度为5 mm/min时, 载荷从1 N增加至10 N, 测试了氧化膜的结合力, 其划痕过程及结合力如图7所示。由图可见微弧氧化膜的划痕过程分为3个阶段: 膜层完好、出现局部损伤、膜层完全剥离失效。将膜层首次出现局部损伤时的力记为Lc1, 此时摩擦力和声发射信号未发生明显变化。将膜层完全破坏时对应的力记为Lc2, 此时摩擦力和声发射信号出现明显变化。随着磷酸钠浓度的增加, 膜层结合力与硬度表现出一致的先增后减的变化趋势。划痕法测试结合强度的影响因素除了试验参数和基体材料外, 主要有薄膜厚度、硬度、粗糙度、内应力以及膜基界面键和状态等<sup>[20]</sup>。由前面的试验结果可



(b) Bonding strength

图7 微弧氧化膜的划痕过程及结合强度

Fig. 7 Typical scratch topography and bonding strength of the MAO coatings

知: 随着磷酸钠浓度的增加, 氧化膜厚度和硬度增大, 表面更平整致密, 界面结合良好, 因此结合力逐渐增大; 而浓度超过20 g/L后膜层硬度下降, 表面粗糙度变大, 界面缺陷增多, 导致了结合力的下降。

## 2.6 磷酸钠浓度对微弧氧化膜耐腐蚀性能的影响

图8给出了不同磷酸钠浓度下制备的微弧氧化膜和铝合金基体在3.5%NaCl溶液中的极化曲线, 拟合参数如表3所示。可以看出磷酸钠浓度对微弧氧化膜的电化学腐蚀性能有显著地影响。随着磷酸钠浓度的增加, 微弧氧化膜的自腐蚀电位先升高然后又降低, 当浓度超过20 g/L时, 氧化膜的腐

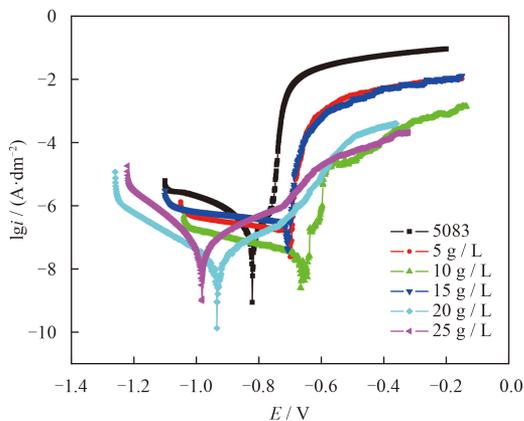


图8 微弧氧化膜和铝合金基体在3.5%NaCl溶液中的极化曲线  
Fig. 8 Polarization curves of the matrix and MAO coatings in 3.5% NaCl

表3 不同磷酸钠浓度下微弧氧化膜和铝合金基体的极化曲线参数

Table 3 Polarization data of the matrix and MAO coatings in different  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  concentration

Parameters	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
5083	-0.821	$2.36 \times 10^{-7}$
5 g/L	-0.699	$1.60 \times 10^{-7}$
10 g/L	-0.665	$2.96 \times 10^{-8}$
15 g/L	-0.708	$2.98 \times 10^{-7}$
20 g/L	-0.934	$1.65 \times 10^{-8}$
25 g/L	-0.982	$4.87 \times 10^{-8}$

蚀电位甚至低于铝合金基体, 分析原因为铝合金在空气中生成了钝化膜, 虽然较薄但其表面平整致密在浸入腐蚀液的初始阶段能够帮助抵御腐蚀介质, 其自腐蚀电位表现出较高值(-0.821 V), 而磷酸钠浓度较高时获得的氧化膜疏松多孔, 表面粗糙, 腐蚀介质很容易由此进入氧化膜内部, 其表面抵抗腐蚀介质的能力不及钝化膜, 因此电极表面的自腐蚀电位负移。对于自腐蚀电位升高的膜层(5、10和15 g/L), 随着磷酸钠浓度的增加, 氧化膜厚度不断增加, 但膜层耐腐蚀性能并未一直提高, 而是当浓度为10 g/L时, 微弧氧化膜的耐腐蚀性能最好, 其自腐蚀电流为 $2.96 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , 比铝合金基体降低了1个数量级, 自腐蚀电位比基体提高了156 mV, 表现出良好的耐腐蚀性能。郭洪飞等<sup>[21]</sup>在研究硅酸钠浓度对微弧氧化层耐腐蚀性的影响中也发现了相同规律。

在腐蚀介质和膜层成分一定的情况下, 保护膜层的耐腐蚀性能与膜层的厚度和表面质量密切相关。结合形貌和孔隙率的分析可知, 当磷酸钠浓度超过20 g/L时, 熔融物飞溅使氧化膜无法均匀铺展而是在局部堆积, 导致氧化膜表面粗糙度增加, 致密度降低, 加上表面微孔无法被愈合而降低了膜层的有效防护厚度, 从而耐腐蚀性能下降。当浓度为10 g/L时, 微弧氧化层不仅具有足够的厚度, 且表面平整致密, 孔隙率最低, 能够阻止腐蚀介质的浸入, 具有良好的耐腐蚀性能。

### 3 结论

(1) 在磷酸钠电解液中, 采用微弧氧化技术(电压550 V, 频率500 Hz, 占空比10%)在5083铝合金表面制得氧化陶瓷膜。随着磷酸钠浓度从5 g/L增加到25 g/L时, 溶液电导率呈线性增加, 膜层厚度从10  $\mu\text{m}$ 增加至33  $\mu\text{m}$ 。

(2) 磷酸钠浓度对膜层形貌具有显著影响。随着磷酸钠浓度从5 g/L增加到15 g/L时, 氧化膜表面更加平整致密, 粗糙度降低, 而浓度超过20 g/L时, 氧化膜出现局部堆积和较大孔洞, 组织疏松。浓度对氧化膜成分影响不显著。

(3) 微弧氧化膜硬度均超过13 GPa, 最高约20 GPa, 与铝合金基体结合良好, 且随着浓度的增加, 其硬度和结合强度出现先增加后降低的变化规律。

(4) 磷酸钠浓度通过影响氧化膜的厚度和表面质量而影响其耐腐蚀性能。当浓度为10 g/L时, 氧化膜的自腐蚀电位正移156 mV, 自腐蚀电流为 $2.96 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , 比铝合金基体降低了1个数量级, 表现出良好的耐腐蚀性能。

### 参考文献

- [1] 沈长斌, 李朝辉, 葛继平. 水溶液中钼酸钠和5083铝合金搅拌摩擦焊缝的交互作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 254-257.  
SHEN C B, LI Z H, GE J P. Interaction between sodium molybdate and friction stir welding weld of 5083 aluminum alloy in the corrosive aqueous solution[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 254-257 (in Chinese).
- [2] 杨铁军, 李国明, 陈珊, 等. 船用铝合金点蚀及阴极保护研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 88-91.  
YANG T J, LI G M, CHEN S, et al. Study of hull aluminum alloy pitting and its protection potential[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 88-91 (in Chinese).
- [3] 张晋, 张涛, 邵亚薇, 等. 5083和6061铝合金缝隙腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(2): 125-131.  
ZHANG J, ZHANG T, SHAO Y W, et al. Crevice corrosion behavior of 5083 and 6061 aluminum alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(2): 125-131 (in Chinese).
- [4] 刘宇, 石勇, 李宁, 等. 5083铝合金与2205不锈钢在天然海水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(6): 532-534.  
LIU Y, SHI Y, LI N, et al. Galvanic corrosion behavior between 5083 aluminum alloy and 2205 stainless steel[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(6): 532-534 (in Chinese).
- [5] 任桂华, 张滨. 5083铝合金表面化学镀Ni-P镀层的力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 383-387.  
REN G H, ZHANG B. Mechanical properties of Ni-P coatings prepared by electroless plating on surface of 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(3): 383-387 (in Chinese).

- [6] HAMED RAHIMI, REZA MOZAFFARINIA, AKBAR HOJJATI NAJAFABADI. Corrosion and wear resistance characterization of environmentally friendly sol-gel hybrid nanocomposite coating on AA5083[J]. *Journal of Science and Technology*, 2013, 29(7): 603-608.
- [7] BRUNELLI K, MAGRINI M, DABALA M. Method to improve corrosion resistance of AA5083 by cerium based conversion coating and anodic polarization in molybdate solution[J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2012, 47(3): 223-232.
- [8] 韩国峰, 朱胜, 王晓明, 等. 5083铝合金表面钛铝基耐蚀涂层与TA2钛合金接触腐蚀[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(6): 44-49.  
HAN G F, ZHU S, WANG X M, et al. Galvanic corrosion between TiAl-based corrosion-resistance coating on 5083 aluminum alloy and TA2 Titanium alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(6): 44-49 (in Chinese).
- [9] 连峰, 王增勇, 张会臣. 超疏水船用铝合金表面微结构对耐海水腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(12): 179-183.  
LIAN F, WANG Z Y, ZHANG H C. Effect of micro-structure of super-hydrophobic warship aluminum alloy surface on its corrosion resistance in seawater[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(12): 179-183 (in Chinese).
- [10] WANG J Y, LI C, ZHANG S L, et al. Growth and corrosion behaviors of thin anodic alumina membrane on AA5083 Al-Mg alloy in incandescent medium[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24: 3023-3030.
- [11] 鲁亮, 薛文斌, 金小越, 等. 5083铝合金搅拌摩擦焊接头微弧氧化膜电化学腐蚀行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(9): 1597-1602.  
LU L, XUE W B, JIN X Y, et al. Electrochemical corrosion behavior of microarc oxidation coatings on friction stir weld joints of 5083 aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(9): 1597-1602 (in Chinese).
- [12] 邱骥, 帅刚, 马世宁, 等. 5083铝合金喷漆式微弧氧化局部膜层的制备及性能[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(5): 105-110.  
QIU J, SHUAI G, MA S N, et al. Preparation and properties of local coatings on 5083 aluminum alloy by spraying micro-arc oxidation[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(5): 105-110 (in Chinese).
- [13] GORDIENKO P S, SKOROBOGATOVA T M, KHRISAN-FOVA O A, et al. Protection from bimetal corrosion in a steel titanium pair by microarc oxidation[J]. *Protection Metals*, 1992, 28: 92-96.
- [14] LI J M, CAI H, XUE X N, et al. The outward-inward growth behavior of microarc oxidation coating in phosphate and silicate solution[J]. *Materials Letters*, 2010, 64: 2102-2104.
- [15] MELHEM A, HENRION G, CZERWIEC T, et al. Changes induced by process parameters in oxide layers grown by the PEO process on Al alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(S2): S133-S136.
- [16] LI H X, RUDNEV V S, ZHENG X H, et al. Characterization of  $Al_2O_3$  ceramic coatings on 6063 aluminum alloy prepared in borate electrolytes by micro-arc oxidation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 462: 99-102.
- [17] 索相波, 邱骥, 刘吉延. 电解液中添加纳米 $SiO_2$ 对7A52铝合表面微弧氧化陶瓷层生长过程及性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(3): 42-45.  
SUO X B, QIU J, LIU J Y. Effects of  $SiO_2$  nanoparticles in electrolytes on growth process and surface properties of alumina coatings formed on 7A52 aluminium alloy by micro-arc oxidation[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(3): 42-45 (in Chinese).
- [18] GUO Q Q, JIANG B L, LI J P, et al. Corrosion resistance of micro-arc oxidized ceramic coating on cast hypereutectic alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20: 2204-2207.
- [19] TSENG C C, LEE J L, KUO T H, et al. The influence of sodium tungstate concentration and anodizing conditions on microarc oxidation (MAO) coatings for aluminum alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206: 3437-3443.
- [20] 冯爱新, 张永康, 谢华琨, 等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(2): 15-19.  
FENG A X, ZHANG Y K, XIE H K, et al. Characterization of interfacial adhesion and bond strength between thin film coating and substrate by scratch testing[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2003, 24(2): 15-19.
- [21] 郭洪飞, 安茂忠, 徐莘, 等. 镁合金微弧氧化工艺条件对陶瓷膜耐蚀性的影响[J]. *材料工程*, 2006(3): 29-32.  
GUO H F, AN M Z, XU S, et al. Effect of operating condition on corrosion resistance of ceramic coatings formed on magnesium alloys by micro-arc oxidation[J]. *Material Engineering*, 2006(3): 29-32 (in Chinese).