

## 铝合金阳极氧化膜的勃姆石溶胶封闭

周琦<sup>1,2</sup>, 贺春林<sup>3</sup>, 才庆魁<sup>3</sup>, 邵忠宝<sup>1</sup>, 朱学松<sup>2</sup>

- (1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;
2. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 沈阳 110168;
3. 沈阳大学 表面工程研究所, 沈阳 110044)

**摘要:** 将铝合金阳极氧化膜浸入勃姆石(AIOOH)溶胶中进行封闭。以溶胶封闭膜表面密度、磷-铬酸质量损失、酸性点滴实验、染色实验为评价标准, 对溶胶封闭进行了正交实验, 然后研究溶胶的 pH 值、试片浸入溶胶时间对封闭膜表面密度和磷-铬酸质量损失的影响, 获得如下的较优工艺条件: 溶胶 pH 值为 4.5~5.5, 试片浸入溶胶时间为 30 min, 烘干封闭膜的温度为 80 °C, 烘干时间为 6 h。溶胶法封闭后膜的点滴试液变色时间可达 33 min, 磷-铬酸质量损失低于 3 g·m<sup>-2</sup>。极化曲线显示溶胶封闭膜的腐蚀电流密度比重铬酸盐封闭膜的降低 2 个数量级, 其原因是溶胶不仅封闭了氧化膜的孔隙, 而且在氧化膜的表面形成溶胶凝胶涂层。

**关键词:** 铝合金; 阳极氧化膜; AIOOH; 封闭

中图分类号: TQ 153.6

文献标识码: A

## Sealing of anodized films on Al alloy with boehmite sol

ZHOU Qi<sup>1,2</sup>, HE Chun-lin<sup>3</sup>, CAI Qing-kui<sup>3</sup>, SHAO Zhong-bao<sup>1</sup>, ZHU Xue-song<sup>2</sup>

- (1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. School of Environment and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China;
3. Institute of Surface Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** The anodised film on Al alloy was dipped in boehmite sol so as to replace dichromate salt sealing used in common. The orthogonal experiment evaluation criterions for sol sealing include mass density of sealed film, mass loss in solution of phosphoric acid mixed with chromic acid, acidic dropping test and dyeing test. The effects of pH of sol and dipping time in the sol on the surface density and mass loss of sealed films were investigated. The films exhibit good properties under conditions of dipping in sol with pH value maintained at 4.5~5.5 for 30 min, and then dried at 80 °C for 6 h. The time of dropping test of sealed films is up to 33 min. The mass loss rate is lower than 3 g·m<sup>-2</sup>. The polarization curves show that the corrosion current density of sol sealed film is about 2 orders of magnitude lower than that of the film sealed by sodium bichromate, the reason is that sol particles can not only seal pores of anodized film, but also form sol-gel coating on anodized film.

**Key words:** aluminum alloy; anodized film; AIOOH; sealing

溶胶-凝胶法可以用来制备耐蚀涂层, 该类涂层对提高基材的化学耐久性、防止氧化、控制腐蚀有显著的效果<sup>[1]</sup>, 有可能完全替代传统表面处理使用的毒性物质铬酸盐处理工艺<sup>[2-5]</sup>。

Voievodin 等<sup>[6]</sup>在铝合金表面制备了乙烯基硅酸盐和环氧硅酸盐溶胶凝胶膜, 测试膜在 3%~5%NaCl, 0.5 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 及 0.1 mol/L HCl 溶液中的点蚀性能, 并进行铜加速醋酸盐雾实验(Copper accelerated salt spray,

基金项目: 辽宁省科技攻关计划资助项目(2004221010); 辽宁省自然科学基金资助项目(20052003)

收稿日期: 2006-11-01; 修订日期: 2007-03-02

通讯作者: 贺春林, 教授, 博士; 电话: 024-62266139; Email: chunlinhe@hotmail.com

CASS), 结果表明, 裸铝表面发生严重的腐蚀, 而涂敷溶胶-凝胶膜的铝合金表面没有出现点蚀。Furukawa 等<sup>[7]</sup>将聚硅氮烷溶液用于阳极氧化的铝材表面, 干燥后烘烤, 发现铝材表面的阳极氧化膜上存在硅酸盐膜。Shi 等<sup>[8]</sup>在 60℃将多孔的氧化铝膜放入锌丁醇盐水溶液中, 取出后在 200℃下烘烤 4 h, 研究了有序的氧化铝孔隙中 ZnO 纳米颗粒的光致发光谱。Kamada 等<sup>[9]</sup>在 SiO<sub>2</sub> 溶胶水溶液采用溶胶-凝胶电泳沉积技术在铝基阳极氧化膜的纳米孔隙中沉积了 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒。研究发现, 无需施加电场, 悬浮液中的 SiO<sub>2</sub> 颗粒也能进入膜孔, 这是因为颗粒所带电荷与阳极氧化膜的表面电荷不同。李澄等<sup>[10]</sup>将 SiO<sub>2</sub> 溶胶用于铝阳极氧化膜的封闭, 发现当 SiO<sub>2</sub> 溶胶颗粒与氧化膜骨架尺寸匹配时可获得优良的封闭效果, 并指出 SiO<sub>2</sub> 溶胶是通过填充膜孔来实现封闭的。而用勃姆石(AIOOH)溶胶对阳极氧化膜进行封闭的研究尚未见报道。铝及铝合金的阳极氧化膜由定向排列的水合氧化铝凝胶微骨架构成<sup>[11]</sup>, 与制备纳米氧化铝的前驱体 AIOOH 溶胶的主要化学成分相同<sup>[12]</sup>, 二者有很好的相容性。因此, 本文作者尝试将铝阳极氧化膜浸入勃姆石溶胶来封闭氧化膜的孔隙, 以实现铝及铝合金阳极氧化膜的无铬高耐蚀性封闭。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及实验工艺

实验材料为 2024 铝合金(尺寸为 4.5 cm×2.5 cm×0.2 cm), 工艺流程如下: 前处理→硫酸阳极氧化→流动冷水清洗→封闭→蒸馏水轻轻冲洗→吹干。阳极氧化工艺规范为: 电解液 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 180 g/L, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 12 g/L; 温度 18~22℃, 电流密度 10 mA/cm<sup>2</sup>, 时间 30 min。

溶胶制备方法如下: 将含有机磺酸盐的分散剂溶液加入 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(分析纯)溶液中, 以氨水(分析纯)滴定 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 溶液, 边滴定边搅拌, 同时调节溶液的 pH 值得到勃姆石溶胶, 反应式为 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>+3NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O→Al(OOH)+3NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O。将 2024 铝合金硫酸阳极氧化后的试片垂直放入上述溶胶系统中、静置、取出、用蒸馏水轻轻冲洗后、干燥。

重铬酸钠封孔工艺参数如下<sup>[13]</sup>: 二水合重铬酸钠 50~65 g·L<sup>-1</sup>, pH 值 5~6, 温度 90~99℃, 时间 15~25 min。

### 1.2 阳极氧化封闭膜的性能测试

封闭膜的表面密度( $\rho$ )可表示为

$$\rho=(m_2-m_1)/A$$

式中  $m_1$  和  $m_2$  分别为封闭前后试片的质量,  $A$  为试片表面积。

按照我国国标 GB/T14952.1—94 标准用磷-铬酸失重法检测阳极氧化膜的封孔质量。我国国标 GB/T5237.2—2000 规定: 磷-铬酸质量损失  $\Delta m \geq 3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  为封闭不合格,  $\Delta m < 3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  为封闭合格。按照 SJ1276—77 标准进行酸性点滴实验。点滴实验溶液为盐酸( $\rho=1.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )25 mL、重铬酸钾 3 g、蒸馏水 75 mL, 用彩色蜡笔在试片上画一个面积为 1.0 cm<sup>2</sup> 的圆, 在圆中滴 2~4 滴实验溶液, 记录封闭膜上染色液由橙色开始变为绿色所需的时间(min)。取一定量的茜素红(5~10 g·L<sup>-1</sup>)及冰醋酸(18%, 质量分数)配制成红色染色液, 将已经封闭干燥的阳极氧化 2024 铝合金试片, 用水冲洗后, 放入温度为 60~70℃的红色染色液中染色 10~15 min。染色后取出试片, 用水洗净、干燥, 观察试片表面颜色。用 PARSTAT 2273 电化学测试系统测定阳极氧化封闭膜在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱和腐蚀极化曲线, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为铂电极, 试样面积为 1 cm<sup>2</sup>。电化学测试之前试样先浸入 NaCl 溶液约 0.5 h, 使开路电位达到稳定。极化测试时的电位扫描速度为 0.333 mV/s, 电化学阻抗谱测试时的外加激励信号幅值为 10 mV, 频率范围为 100 kHz~10 mHz。

## 2 结果与讨论

### 2.1 溶胶封闭法的正交实验

对 2024Al 表面阳极氧化膜勃姆石溶胶封闭工艺进行正交实验, 浸入溶胶时间的三水平为: 10、20 和 30 min; 溶胶 pH 值的三水平为: 4.5~5.5、6.5~7.5 和 8.5~9.5; 封闭膜的烘干温度三水平为: 60、80 和 100℃; 烘干时间的三水平为: 2、6 和 10 h。

表 1 所列磷-铬酸质量损失、表面密度、酸性点滴实验、染色实验的正交实验的结果, 综合 4 种性能的分析结果, 对封闭膜性能的影响由强到弱的顺序为: 烘干温度>烘干时间>pH 值>封闭时间。

烘干温度为 80℃的正交实验为 2、4 和 9 号, 2、4 和 9 号实验的试片做染色实验、酸性点滴实验的效果都很好, 磷-铬酸质量损失满足国家标准要求, 封闭膜的表面密度较大, 进一步说明烘干温度这个因素对封闭膜的影响最大。酸性点滴实验变色时间为 33~45 min, 满足 2024Al 合金的实际生产要求。

表 1 封闭工艺正交实验结果

Table 1 Results of orthogonal test for sealing process

Number of orthogonal experiment	Mass loss/(g·m <sup>-2</sup> )	Mass density of sealed film/(g·m <sup>-2</sup> )	Time of changing color in dropping test/min	Appearance of dyeing sample
1	12.7	0.70	13	Bright red
2	0.65	2.95	45	Reddish
3	9.45	0.40	17	Red
4	1.15	2.75	38	Reddish
5	12.25	0.60	13	Vermeil
6	10.25	0.65	20	Red
7	1.60	1.50	21	Vermeil
8	11.20	1.00	27	Red
9	0.85	2.40	33	Reddish

综合阳极氧化膜的酸浸质量损失量、表面密度、酸性点滴实验和染色实验的正交实验分析结果, 得到溶胶封闭氧化膜的较佳工艺条件如下: 氧化膜浸入溶胶的时间为 30 min, 溶胶封孔液的 pH 值为 4.5~5.5, 封闭后膜的烘干温度为 80 °C, 烘干时间为 6 h。

2.2 浸入溶胶时间对封闭膜性能的影响

图 1 所示为在溶胶 pH 值为 4~5, 烘干温度为 80 °C, 烘干时间为 6 h 的条件下, 研究试片浸入时间对封闭膜的表面密度和酸浸质量损失量的影响。

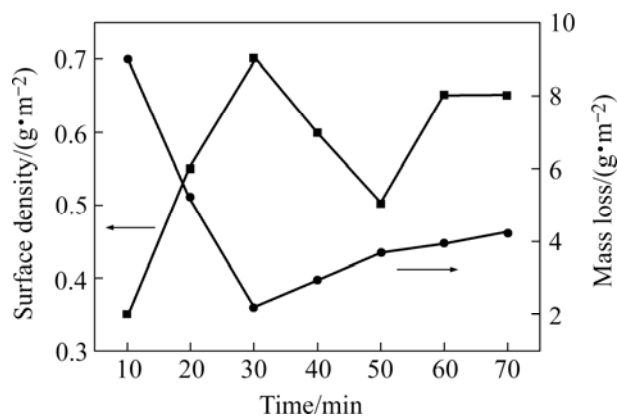


图 1 浸泡时间对封闭膜性能的影响  
Fig.1 Effects of dipping time on properties of sealed films

从图 1 可以看出, 浸泡时间由 10 min 延长到 30 min 后, 封闭膜的表面密度明显增加, 酸浸质量损失量明显降低, 说明勃姆石胶粒渗入铝阳极氧化膜多孔层中的速度高于氧化膜溶解的速度。浸泡时间由 30 min 延长到 70 min 后, 封闭膜的表面密度开始下降, 酸浸质量损失量略微升高, 这是由于试片浸泡到 30 min 时, 溶胶往阳极氧化膜的微孔中渗透达到饱和,

充满多孔层的孔隙, 此时继续延长浸泡时间, 由于溶液呈弱酸性会溶解阳极氧化膜, 所以膜开始变得疏松, 导致封闭膜的表面密度下降。因此应在浸泡 30 min 时取出氧化膜。

2.3 溶胶 pH 值对封闭膜性能的影响

图 2 所示为在试片浸入溶胶时间为 30 min、膜烘干温度为 80 °C、烘干时间为 6 h 的条件下, 溶胶的 pH 值对封闭膜的表面密度和酸浸质量损失量的影响。

由图 2 可知, pH 值在 4.5~5.5 之间封闭膜的表面密度最大, 酸浸质量损失量最小。当溶胶 pH 在 2.5~4.5 范围时, 随 pH 降低, 酸度变大, 则溶胶对氧化膜的溶解作用增强, 导致膜的表面密度下降, 酸浸质量损失量升高。pH 值在 6.5 时, 封闭膜的表面密度急剧降低, 膜的质量损失急剧升高, 这是由于 pH 值在 4.5~5.5 之间形成的溶胶具有流动性, 当 pH 值在 6.5 时溶胶转变成不能流动的凝胶, 凝胶状的胶体粒子不容易往阳极氧化膜的微孔里渗透。pH 值高于 6.5 以后, 凝胶开

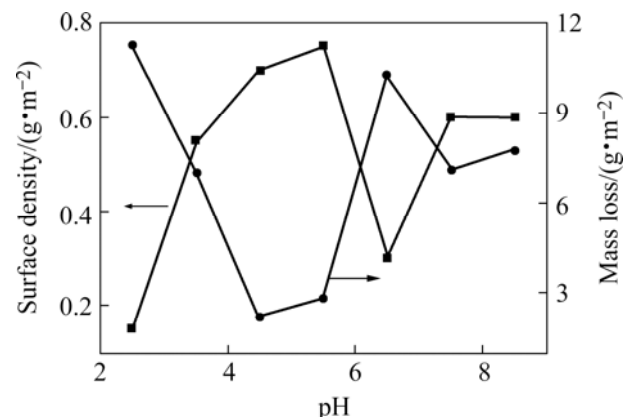


图 2 pH 值对封闭膜性能的影响  
Fig.2 Effects of pH value on properties of sealed films

始变稀, 随 pH 值升高逐渐变为溶胶<sup>[14]</sup>, 胶体粒子的渗入速度又开始加快, 所以封闭膜的表面密度开始上升, 膜的质量损失下降。由图 2 可见, 封闭氧化膜多孔层时溶胶的 pH 值应保持在 4.5~5.5 的范围。

### 2.4 封闭膜的极化曲线和电化学阻抗谱

图 3(a)所示为溶胶封闭和传统重铬酸钠封闭的 2024Al 阳极氧化膜腐蚀极化曲线, 以阴极极化曲线的塔菲尔区外推到与自腐蚀电位的水平线相交, 该交点对应的电流密度为金属的腐蚀电流密度。按照上述方法计算得到重铬酸钠封闭膜的腐蚀电流密度为  $5.0 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 腐蚀电位为  $-0.57 \text{ V}$ ; 溶胶封闭膜的腐蚀电流密度为  $3.7 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ , 腐蚀电位为  $-0.52 \text{ V}$ 。溶胶封闭膜的腐蚀电位较重铬酸钠封闭膜的腐蚀电位稍有提高, 但其腐蚀电流密度却比重铬酸钠封闭膜的大约降低 2 个数量级。这表明溶胶封闭膜的耐蚀性显著

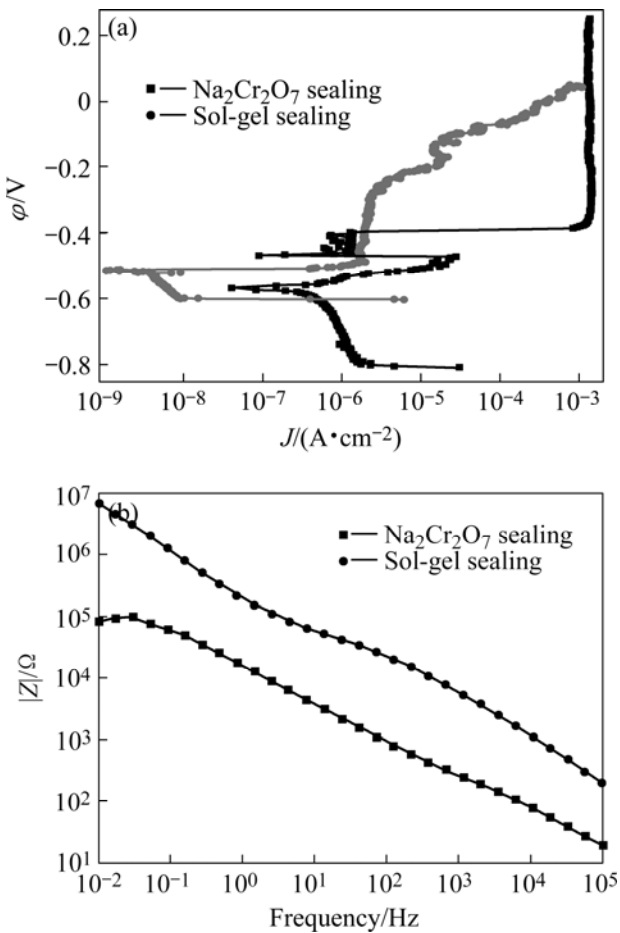


图 3 溶胶和重铬酸钠封闭膜的极化曲线(a)与电化学阻抗谱(b)

Fig.3 Polarization curves(a) and electrochemical impedance spectra(b) of anodized films sealed by sol and sodium bichromate

高于重铬酸钠封闭膜的。图 3(b)所示为上述封闭膜的电化学阻抗谱。由图可见, 在整个频率范围内, 溶胶封闭膜的阻抗值均明显高于重铬酸盐封闭膜的; 在最低频处, 重铬酸盐封闭膜的阻抗已达到极大值, 而溶胶封闭膜的阻抗值仍在继续增加; 如在 0.01 Hz 处, 重铬酸钠封闭膜的  $|Z|=8.4 \times 10^4 \Omega$ , 溶胶封闭膜的  $|Z|=6.9 \times 10^6 \Omega$ ; 阻抗测试结果进一步表明溶胶封闭膜的耐蚀性远高于重铬酸钠封闭膜的。

### 2.5 溶胶封闭膜的耐蚀机理

图 4(a)和(b)所示分别为未封孔和溶胶封闭铝阳极氧化膜的表面形貌。铝的阳极氧化膜由定向排列的水合氧化铝凝胶微骨架构成。微胞直径约为 300 nm, 微胞间存在垂直于表面的孔隙, 2024 铝合金氧化膜的孔隙近似为圆形, 直径约为 10~30 nm<sup>[15-16]</sup>。采用勃姆石溶胶封闭氧化膜时, 主要是利用勃姆石溶胶渗入铝阳极氧化膜的孔隙中, 其中的胶粒堵塞孔洞和覆盖孔口来实现的, 封闭后的氧化膜经过烘干能达到较好的耐蚀效果。溶胶中的较小颗粒可进入膜孔层内部, 而由小颗粒聚集而成的大颗粒则覆盖于氧化膜表面上, 形

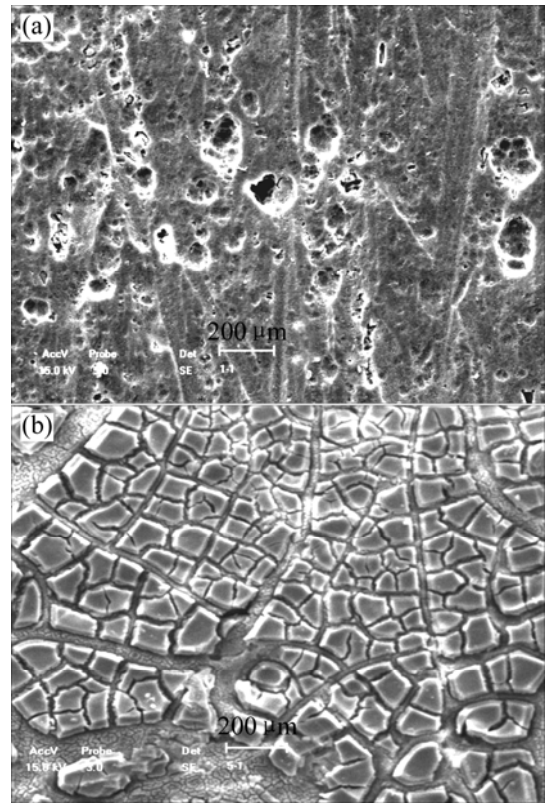


图 4 阳极氧化后未封闭的膜(a)和溶胶封闭的阳极氧化膜(b)的表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of unsealed film of anodized aluminum(a) and sealed film of anodized aluminum with sol(b)

成耐蚀性较强的溶胶-凝胶涂层(见图 4(b))。小颗粒形成的凝胶层较薄, 大颗粒形成的凝胶层较厚, 由于溶胶中液体量大, 干燥时产生收缩, 所以溶胶凝胶涂层表面呈现龟裂状。铝阳极氧化膜表面上的溶胶-凝胶涂层能谱分析表明, 涂层的组成如下(质量分数): C 12.890%, N 10.495%, O 46.841%, Al 26.439%和 S 3.335%。这说明涂层中有溶胶中  $\text{AlOOH}$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和起分散剂作用的有机磺酸盐表面活性剂  $\text{R-SO}_3\text{Na}$  化合物中的元素存在, 证实溶胶在氧化膜表面形成凝胶涂层。

由于氧化膜的成分和溶胶的主要成分相同, 所以二者相容性好, 很容易融为一个整体, 牢固地结合在一起, 经过烘干固化后可进一步提高膜层的耐蚀性, 并且铝氧化膜和溶胶烘干后的干凝胶的热膨胀系数基本相似, 封孔物质不会发生脱落。阳极氧化膜的多孔层不仅被溶胶封闭而且在氧化膜的表面覆盖有溶胶凝胶涂层, 这两种效果极大地促进了溶胶封孔膜的耐蚀性。

### 3 结论

1) 正交实验得出溶胶封闭 2024 铝合金氧化膜的较优工艺条件为: 试片浸入溶胶时间 30 min, 溶胶 pH 值 4.5~5.5, 封闭膜烘干温度 80 °C, 烘干时间 6 h。

2) 勃姆石溶胶在渗入阳极氧化膜多孔层中的同时, 膜层也发生化学溶解。当试片浸入时间为 30 min 时膜表面密度最高, 磷-铬酸质量损失最小。

3) 勃姆石溶胶在 pH 值 4.5~5.5 之间时封闭膜的表面密度较大, 封闭质量达到合格。若 pH 值提高到 6.5 时, 溶胶发生凝胶化, 封闭质量下降。

4) 溶胶法封闭膜的耐蚀性高于传统的重铬酸钠封闭膜的耐蚀性。耐蚀性的提高是由于勃姆石溶胶不仅封闭了多孔层的孔隙, 而且在氧化膜上形成溶胶凝胶涂层。

### REFERENCES

[1] 黄剑锋. 溶胶-凝胶原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-2.  
HUANG Jian-feng. Theory and technology of sol-gel[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-2.

[2] 张勤俭, 张建华, 李 敏, 张勤河, 毕进子. 用溶胶-凝胶法制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层工程陶瓷的表面改性研究[J]. 硅酸盐学报,

2001, 29(5): 416-421.  
ZHANG Qing-jian, ZHANG Jian-hua, LI Min, Zhang Qing-he, Bi Jin-zi. Study of modification of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -coated engineering ceramics by sol-gel process[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(5): 416-421.

[3] Voevodin N N, Kurdziel J W, Mantz R. Corrosion protection for aerospace aluminum alloys by modified self-assembled nanophase particle(MSNAP) sol-gel[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 1080-1084.

[4] 赵景茂, 王禹慧, 张晓丰, 左 禹. 利用溶胶-凝胶法制备铝合金耐蚀亲水性涂膜[J]. 材料保护, 2005, 38(3): 6-8.  
ZHAO Jing-mao, WANG Yu-hui, ZHANG Xiao-feng, ZUO Yu. Preparation of resistance-corrosion hydrophile coatings on Al alloy by sol-gel[J]. Materials Protection, 2005, 38(3): 6-8.

[5] 王禹慧, 赵景茂, 左 禹. 铝合金耐蚀膜的制备及其性能研究[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(10): 432-435.  
WANG Yu-hui, ZHAO Jing-mao, ZUO Yu. Preparation of corrosion resistant film of aluminium[J]. Corrosion & Protection, 2005, 26(10): 432-435.

[6] Voevodin N, Jeffcoate C, Simon L, Khobaib M, Donley M. Characterization of pitting corrosion in bare and sol-gel coated aluminum 2024-T3 alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 140: 29-34.

[7] Furukawa K, Uchimura N. Aluminum composite and method for surface-treating aluminum composite. JP 2001172795 A1[P]. 2001, 06, 26

[8] Shi G, Mo C M, Cai W L, Zhang L D. Photoluminescence of ZnO nanoparticles in alumina membrane with ordered pore arrays[J]. Solid State Communications, 2000, 115(5): 253-256.

[9] Kamada K, Fukuda H, Maehara K, Yoshida Y, Nakai M, Hasuo S, Matsumoto Y. Insertion of  $\text{SiO}_2$  nanoparticles into pores of anodized aluminum by electrophoretic deposition in aqueous system[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2004, 7(8): 25-28.

[10] 李 澄, 黄明珠, 周一杨, 杨海平, 丁 峰. 铝阳极氧化薄膜的溶胶-凝胶法封闭研究[J]. 材料保护, 1995, 28(9): 4-6.  
LI Cheng, HUANG Ming-zhu, ZHOU Yi-yang, YANG Hai-ping, DING Feng. Anodized aluminium thin films sealed by sol-gel technology[J]. Materials Protection, 1995, 28(9): 4-6.

[11] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 100-110.  
ZHU Zu-fang. Anodized and surface treatment technology on Al alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 100-110.

[12] 谢五喜, 刘有智, 张 芳, 李 裕, 郭 雨. 溶胶-凝胶法制备勃姆石溶胶的实验研究[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(4): 71-73.  
XIE Wu-xi, LIU You-zhi, ZHANG Fang, LI Yu, GUO Yu. Preparation of boehmite sol by sol-gel method[J]. Membrane

- Science and Technology, 2005, 25(4): 71-73.
- [13] 任广军. 电镀原理与工艺[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001: 256.
- REN Guang-jun. Electroplating theory and process[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2001: 256.
- [14] ZHOU Qi, SHAO Zhong-bao, HE Chun-lin, SHAO Zhong-cai, CAI Qing-kui, FU Guang-xu. Preparation of nanoscale alumina particles by chemical method[C]//LI Xin-guang, WANG Yu-tao, YANG Gang. The 7th International Conference on Measurement and Control of Granular Materials. Shenyang: Northeastern University, 2006: 121-125.
- [15] 贺春林, 王建明, 才庆魁. SiC<sub>p</sub>/2024Al 基复合材料的点蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 711-715.
- HE Chun-lin, WANG Jian-ming, CAI Qing-kui. Pitting behavior of SiC<sub>p</sub>/2024Al metal matrix composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 711-715.
- [16] 贺春林, 于文馨, 王建明, 才庆魁. 2024 铝合金阳极氧化膜的结构和耐蚀性能[J]. 材料保护, 2006, 39(2): 45-48.
- HE Chun-lin, YU Wen-xin, WANG Jian-ming, CAI Qing-kui. Microstructures and anticorrosion behavior of anodic oxidized coating on Al alloy[J]. Materials Protection, 2006, 39(2): 45-48.

(编辑 龙怀中)