

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.08.013

建筑铝材表面复合阳极氧化膜的制备及其性能研究

刘艳芬¹, 陈昭怡^{2*}

(1. 山西工程科技职业大学, 山西 晋中 030619; 2. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为进一步提高建筑铝材表面性能, 以满足苛刻的应用要求, 采用添加 PTFE (Polytetrafluoroethylene, 简称为 PTFE) 乳液的电解液在铝材表面制备复合阳极氧化膜, 研究了 PTFE 乳液体积分数对复合阳极氧化膜的微观形貌、成分、厚度、耐腐蚀与抗磨损性能的影响。结果表明, 复合阳极氧化膜表面吸附一些白色 PTFE 颗粒, 孔洞和凹坑的数量与常规阳极氧化膜相比有所减少, 但 PTFE 乳液体积分数变化会对复合阳极氧化膜的形貌特征、吸附的 PTFE 颗粒的分布状况、成分、厚度、耐腐蚀与抗磨损性能造成一定影响。添加 12 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜致密性较好, 并且表面吸附较多 PTFE 颗粒 (含量接近 3%), 其厚度约为 20 μm , 腐蚀电流密度仅为 $9.07 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 并且在相同腐蚀介质中浸泡 14 d 后整体腐蚀程度最轻, 耐腐蚀性能明显好于常规阳极氧化膜和其它复合阳极氧化膜。该复合阳极氧化膜还具有良好的抗磨损性能, 磨损量和摩擦系数仅为 8.4 mg 和 0.52, 与常规阳极氧化膜相比分别降低 45% 和 29%。

关键词: 复合阳极氧化膜; 建筑铝材; PTFE 乳液体积分数; 耐腐蚀性能; 抗磨损性能

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Study on preparation and properties of composite anodized film on surface of construction aluminum

Liu Yanfen¹, Chen Zhaoyi^{2*}(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China;
2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to further improve the surface properties of construction aluminum to meet the demanding application requirements, a composite anodized film was prepared on the surface of aluminum from the electrolyte containing PTFE (Polytetrafluoroethylene, abbreviated as PTFE) emulsion, and the effect of volume fraction of PTFE emulsion on the microstructure, composition, thickness, corrosion resistance and wear resistance of the composite anodized film was studied. The results show that some white PTFE particle is adsorbed on the surface of composite anodized film, and the number of holes and pits is decreased compared with that of conventional anodized film. However, the variation of volume fraction of PTFE emulsion has certain effect on the morphology characteristics, distribution of adsorbed PTFE particle, composition, thickness, corrosion resistance and wear resistance of composite anodized film. The composite anodized film prepared from the electrolyte containing 12 mL/L PTFE emulsion has good compactness and more PTFE particle adsorbed on the

收稿日期: 2023-12-06

修回日期: 2024-01-13

作者简介: 刘艳芬 (1984—), 讲师, 研究方向为建筑结构材料, email: Liuyfen123@163.com

*通信作者: 陈昭怡 (1956—), 教授, 研究方向机械材料、特种加工技术等, email: Edu_030619@163.com

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (2019011007)

surface (the content of particle is close to 3%), its thickness is about 20 μm , the corrosion current density is only $9.07 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, and the overall corrosion degree is the lowest after soaking in the same corrosive medium for 14 days, indicating that the corrosion resistance of the composite anodized film is obviously better than that of conventional anodized film and other composite anodized films. Moreover, the composite anodized film also has good wear resistance, and the abrasion loss and friction coefficient are only 8.4 mg and 0.52, which are 45% and 29% lower than that of conventional anodized film, respectively.

Keywords: composite anodized film; construction aluminum; volume fraction of PTFE emulsion; corrosion resistance; wear resistance

铝材在建筑行业应用广泛,用于制造幕墙、门框、屋顶和隔断等装饰性和承重构件^[1-3]。通常利用阳极氧化技术对铝材进行表面处理,通过制备一层结合牢固并且性能较好的阳极氧化膜可提高铝材外观品质,同时增强铝材的耐腐蚀与抗磨损性能。然而,随着铝材在建筑行业中应用要求越来越苛刻,比如要求铝材耐受磨损能长期保持良好的外观品质,并且具有更好的耐腐蚀性能可以在较为恶劣环境中长期使用,常规阳极氧化膜的性能难以满足要求。为此,一些科研工作者尝试改进阳极氧化技术,比如向电解液中添加某几种不溶性颗粒(MoS_2 颗粒、 Al_2O_3 颗粒、 SiC 颗粒等)以制备复合阳极氧化膜^[4-8]。

与复合电沉积的原理类似,在铝材阳极氧化过程中通过机械、物理或电化学作用使不溶性颗粒吸附在阳极氧化膜表面或被包覆在阳极氧化膜中从而获得复合阳极氧化膜。已有研究表明,复合阳极氧化膜的外观品质与常规阳极氧化膜相比无明显差异,但表现出更好的耐腐蚀与抗磨损性能,更具应用价值^[9-10]。目前,以铝材为基体制备复合阳极氧化膜处于实验探索阶段,相关文献很少,尚未形成系统的理论及可供参考的工艺。因此,有必要继续开展这方面研究。本文以常用建筑铝材 6061 铝合金为实验基体,采用添加 PTFE (polytetrafluoroethylene, 简称为 PTFE) 乳液的电解液制备复合阳极氧化膜,并研究 PTFE 乳液体积分数对复合阳极氧化膜性能的影响,以期获得综合性能良好的复合阳极氧化膜。

1 实验

1.1 基体与试剂

建筑行业常用的 6061 铝合金作为实验基体,其主要组成为: Si 0.60%~1.20%、Mg 0.25%~0.60%、

Cu 0.15%~0.40%、Cr 0.04%~0.35%、Fe 0.70%、Zn 0.25%、Mn 0.15%、Al 余量。实验过程中使用的试剂名称、品级及生产厂家如表 1 所示。实验中使用的 PTFE 乳液购于杜邦集团上海分公司,系单体 PTFE 颗粒在含有分散剂的水中聚合得到的乳状分散液,其中 PTFE 颗粒含量约为 60%。

表 1 实验使用的试剂名称、品级及生产厂家

Tab.1 Name, grade and manufacturer of the reagents used in the experiment

名称	品级	生产厂家
丙酮	分析纯	国药集团
硝酸	分析纯	国药集团
硫酸(98 wt.%)	分析纯	国药集团
氯化钠	分析纯	国药集团

1.2 制备复合阳极氧化膜

第一步:基体预处理。将 6061 铝合金板裁剪成若干相同尺寸的片状试样,然后打磨去除试样表面自然形成的氧化膜,接着浸入丙酮中并用辅助超声波振荡去除试样表面油污。随后用蒸馏水冲洗试样,接着浸入硝酸(30 vol.%)中活化 30 s。再次用蒸馏水冲洗试样,冷风吹干后备用。

第二步:制备复合阳极氧化膜。使用硫酸(98 wt.%)和蒸馏水配制 3000 mL 电解液,主要成分为:硫酸(98 wt.%)200 g/L。然后等分成 6 份,同时进行 6 组实验。前 5 组实验采用添加 PTFE 乳液的电解液,PTFE 乳液的体积分数依次为 4 mL/L、8 mL/L、12 mL/L、16 mL/L 和 20 mL/L,制备 5 种复合阳极氧化膜。第 6 组实验采用不添加 PTFE 乳液的电解液,制备常规阳极氧化膜作对比。

第三步:后处理。使用蒸馏水冲洗试样然后迅速吹干,裁剪成符合要求的试样进行性能测试。

1.3 复合阳极氧化膜性能测试

1.3.1 微观形貌与成分

采用JSM-7500型扫描电镜观察喷金处理后复合阳极氧化膜的微观形貌,并用扫描电镜配备的能谱仪通过对选取区域进行面扫描分析复合阳极氧化膜的成分。

在此之前,将试样浸入无水乙醇中超声波振荡5 min,随后用流动水反复冲洗,彻底去除物理吸附在试样表面的PTFE颗粒,避免造成干扰。

1.3.2 厚度

采用ED400型涡流测厚仪测量复合阳极氧化膜表面标记位置的厚度,每个位置重复测3次,结果取平均值。

1.3.3 耐腐蚀性能

使用氯化钠和蒸馏水配制腐蚀介质,主要成分为:氯化钠3.5 g/L,在室温条件下进行电化学腐蚀实验和浸泡腐蚀实验。电化学腐蚀实验采用仪器为Parstat 2273型电化学工作站,三电极体系分别为:饱和甘汞电极—参比电极、铂电极—辅助电极、复合阳极氧化膜试样—工作电极。通过浸泡待开路电位稳定后进行极化曲线测试,扫描速度为1 mV/s。采用电化学工作站配备的PowerSuite软件拟合极化曲

线测试数据,根据得到的电化学腐蚀参数分析复合阳极氧化膜的耐腐蚀性能。

浸泡腐蚀实验采用挂片法,将复合阳极氧化膜试样放入腐蚀介质中,浸泡14 d后取出。试样经过冲洗、吹干和称重,得到复合阳极氧化膜的腐蚀速率。另外,采用扫描电镜观察复合阳极氧化膜腐蚀14 d后的腐蚀形貌。结合腐蚀速率与腐蚀后的微观形貌,进一步分析复合阳极氧化膜的耐腐蚀性能。

1.3.4 抗磨损性能

将复合阳极氧化膜试样固定在UMT-3型摩擦试验机的工作台上,GCr15钢球作为对磨件,两者之间发生往复摩擦磨损,每个周期的行程为10 mm。施加恒定载荷3 N作用于GCr15钢球上,频率2 Hz,实验持续8 min。实验过程中在电脑端显示动态摩擦系数,自动取平均值获得不同复合阳极氧化膜的摩擦系数。另外,试样经过冲洗、吹干和称重得到复合阳极氧化膜的磨损量。

2 结果与讨论

2.1 复合阳极氧化膜的微观形貌与成分

图1(a)为常规阳极氧化膜的微观形貌,而图1(b)~1(f)为不同复合阳极氧化膜的微观形貌。

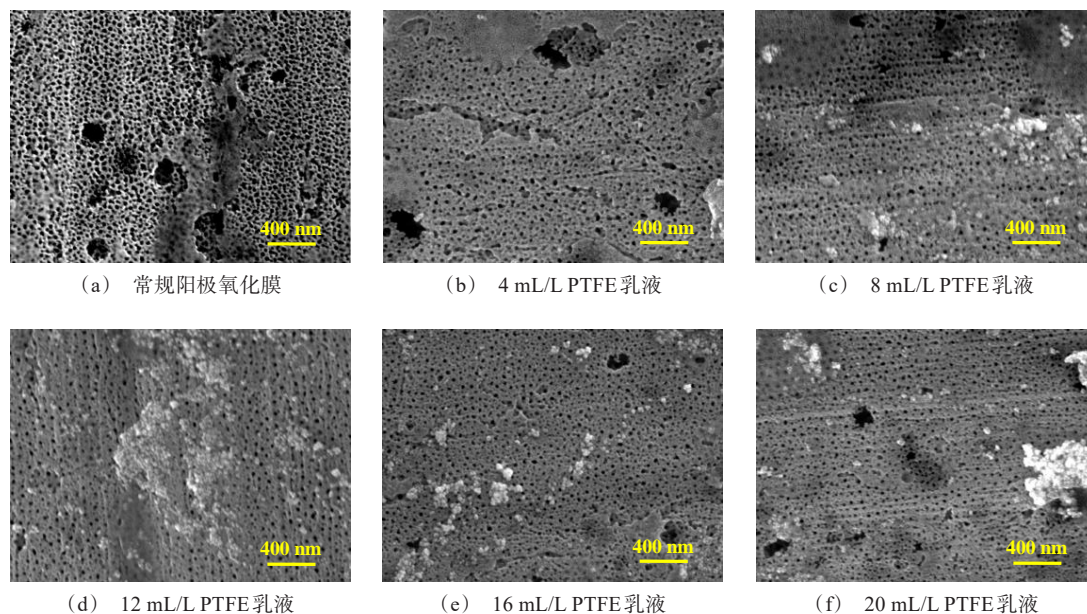


图1 常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的微观形貌

Fig.1 Microstructure of conventional anodized film and different composite anodized films

由图1(a)可见,常规阳极氧化膜具有多孔状形貌,表面分布着若干直径约30 nm的规则微小孔洞,局部还出现由微小孔洞连通形成的不规则凹坑(尺寸超过100 nm)。由图1(b)~1(f)可见,不同复合阳极氧化膜表面都吸附白色PTFE颗粒,但复合阳极氧化膜的形貌特征以及颗粒分布状况不同。结合相关研究报道分析^[11],PTFE颗粒以乳液形式添加到电解液中,由于比表面积大具有很强的吸附能力,能吸附电解液中的带点粒子并在阳极氧化过程中发生电迁移,逐步吸附在阳极氧化膜表面。由于PTFE颗粒的电阻率极高,表现出电绝缘特性,因此吸附在阳极氧化膜表面的PTFE颗粒起到了减轻局部溶解程度的作用,还可能起到填充作用,从而使不同复合阳极氧化膜的形貌特征表现出差异。

添加4 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜表面吸附少量PTFE颗粒,虽然该复合阳极氧化膜中孔洞数量与常规阳极氧化膜相比有所减少,但局部仍出现由微小孔洞连通形成的不规则凹坑。其原因是当PTFE乳液体积分数较低时,电解液中只有少量PTFE颗粒通过电迁移最终吸附在阳极氧化膜表面,由于少量颗粒吸附不足以减轻阳极氧化膜局部溶解程度,即使被包覆也难以有效填充使复合阳极氧化膜中孔洞减少。添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜表面吸附较多PTFE颗粒,并且孔洞数量减少,几乎未出现由微小孔洞连通形成

的不规则凹坑。一方面,由于较多PTFE颗粒吸附在阳极氧化膜表面明显减轻局部溶解程度,另一方面,一部分PTFE颗粒可能被包覆,起到了填充的作用,也使复合阳极氧化膜中孔洞减少。然而,添加了20 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜表面吸附一些PTFE颗粒团聚体。该复合阳极氧化膜中孔洞数量与添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜相比增多,局部也出现一些由微小孔洞连通形成的不规则凹坑。其原因是PTFE乳液体积分数过高时,电解液中PTFE颗粒的分散效果变差,颗粒团聚现象显著容易形成团聚体,并通过电迁移吸附在阳极氧化膜表面。PTFE颗粒团聚体吸附难以有效减轻复合阳极氧化膜局部溶解程度,填充孔洞作用也不明显。

图2(a)为常规阳极氧化膜的EDS图谱,图2(b)为添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜的EDS图谱。由图2(a)可见Al、O和S元素的特征衍射峰,表明常规阳极氧化膜的主要成分为Al、O和S元素。由图2(b)可见Al、O、S、F和C元素的特征衍射峰,表明复合阳极氧化膜的主要成分为Al、O、S、F和C元素。与常规阳极氧化膜相比,复合阳极氧化膜的成分多出F和C元素。鉴于在测试过程中消除了外界元素干扰,因此F和C元素全部来源于电解液,可以证实有一定量PTFE颗粒参与阳极氧化过程从而形成复合阳极氧化膜。

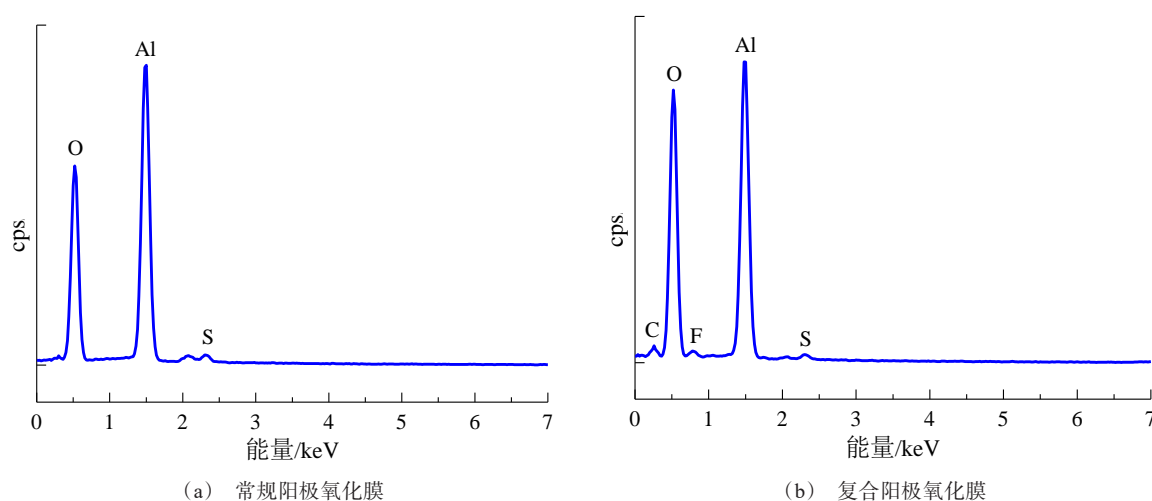


图2 常规阳极氧化膜和复合阳极氧化膜的EDS图谱

Fig.2 EDS spectra of conventional anodized film and composite anodized film

图3为不同复合阳极氧化膜中各元素的质量分数。根据F元素的质量分数可以推算出复合阳极氧化膜中PTFE颗粒含量。由图3可知,PTFE乳液体积分数变化对复合阳极氧化膜中F和C元素的质量分数造成一定影响,这表明参与阳极氧化过程的PTFE颗粒量存在差异。随着PTFE乳液体积分数从4 mL/L增加到12 mL/L,F元素的质量分数从0.78%逐渐升高到2.93%。但随着PTFE乳液体积分数从12 mL/L继续增加到20 mL/L,F元素的质量分数从2.93%转而降低到1.31%。这是由于PTFE乳液体积分数过高的情况下,由于颗粒团聚现象显著容易形成团聚体导致参与阳极氧化过程的PTFE颗粒量少,所以复合阳极氧化膜中F元素的质量分数呈降低趋势。添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜中F元素的质量分数最高,推算出复合阳极氧化膜中PTFE颗粒含量接近3%。

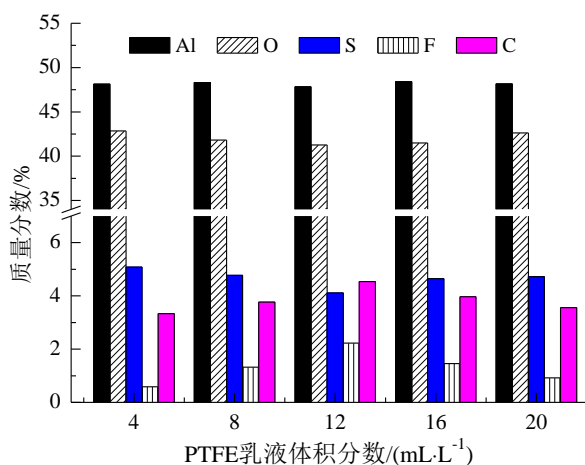


图3 不同复合阳极氧化膜中各元素的质量分数

Fig.3 Mass fraction of each element in different composite anodized films

2.2 复合阳极氧化膜的厚度

由图4可知,PTFE乳液体积分数变化对复合阳极氧化膜的厚度造成一定影响。当PTFE乳液体积分数在4~16 mL/L范围内变化时,制备的复合阳极氧化膜的厚度均为20 μm左右,与常规阳极氧化膜的厚度相近。但当PTFE乳液的体积分数增加到了20 mL/L,制备的复合阳极氧化膜厚度有所降低,为18.6 μm。其原因可能是一些PTFE颗粒团聚体通过电迁移在局部区域吸附导致阳极氧化成膜效率降低并且氧化膜生长速度减慢,所以复合阳极氧化膜变薄。

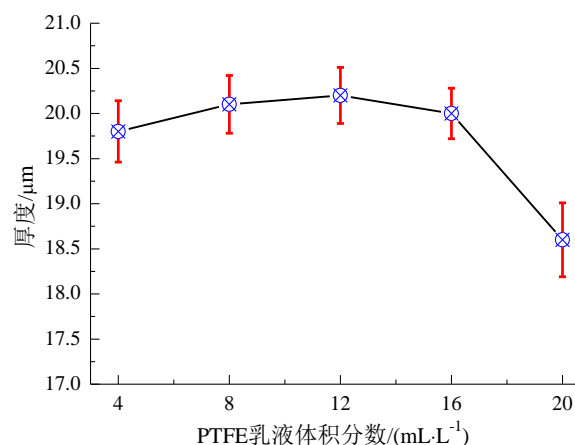


图4 不同复合阳极氧化膜的厚度

Fig.4 Thickness of different composite anodized films

2.3 复合阳极氧化膜的耐腐蚀性能

图5为常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的极化曲线,表2为根据极化曲线得到的电化学腐蚀参数。

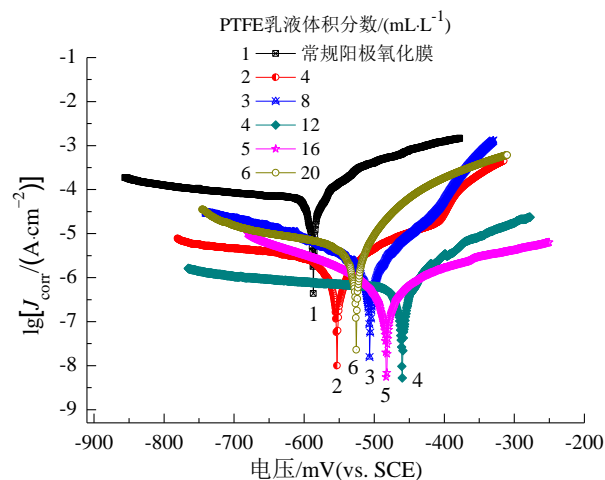


图5 常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of conventional anodized film and different composite anodized films

由图5可见,不同复合阳极氧化膜的极化曲线阳极分支和阴极分支与常规阳极氧化膜相比都朝右下方偏移,即腐蚀电位(E_{corr})正移,腐蚀电流密度(J_{corr})降低。其中,添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜具有最正的腐蚀电位-460.1 mV,较常规阳极氧化膜的腐蚀电位正移了接近130 mV。该复合阳极氧化膜还具有最低的腐蚀电流密度 $9.07 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,较常规阳极氧化膜的腐蚀电流密度($1.16 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$)降低超过一个数量级。但添加

20 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜的腐蚀电位较常规阳极氧化膜的腐蚀电位正移幅度仅为 65 mV, 另外, 该复合阳极氧化膜的腐蚀电流密度相比于常规阳极氧化膜降低不到一个数量级。

表 2 根据极化曲线得到的电化学腐蚀参数

Tab.2 Electrochemical corrosion parameters obtained according to polarization curves

PTFE 乳液体积分数/(mL·L ⁻¹)	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
常规阳极氧化膜	-586.5	1.16×10^{-5}
4	-552.9	7.52×10^{-6}
8	-506.0	2.35×10^{-6}
12	-460.1	9.07×10^{-7}
16	-482.4	1.65×10^{-6}
20	-525.6	6.13×10^{-6}

虽然不同复合阳极氧化膜的耐腐蚀性能都好于常规阳极氧化膜, 但是添加 PTFE 乳液体积分数较

低或过高时制备的复合阳极氧化膜的耐腐蚀性能明显不如添加 12 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜。PTFE 颗粒除了电绝缘特性, 还具有优异的化学稳定性和耐腐蚀性能^[12-14]。因此, 吸附在阳极氧化膜表面的 PTFE 颗粒能阻隔腐蚀介质, 从而延缓腐蚀过程发展。理论上, 复合阳极氧化膜表面吸附的 PTFE 颗粒越多, 对腐蚀介质的阻碍效果越显著, 能有效减少与腐蚀介质的接触面积。添加 12 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜表面吸附较多 PTFE 颗粒, 并且颗粒分散性较好, 能有效阻隔腐蚀介质从而降低复合阳极氧化膜的腐蚀倾向。另外, 该复合阳极氧化膜中孔洞数量少孔隙率较低, 由于腐蚀介质渗透路径被封堵导致腐蚀过程被抑制, 所以表现出更好的耐腐蚀性能。

图 6 为常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜腐蚀 14 d 后的微观形貌。

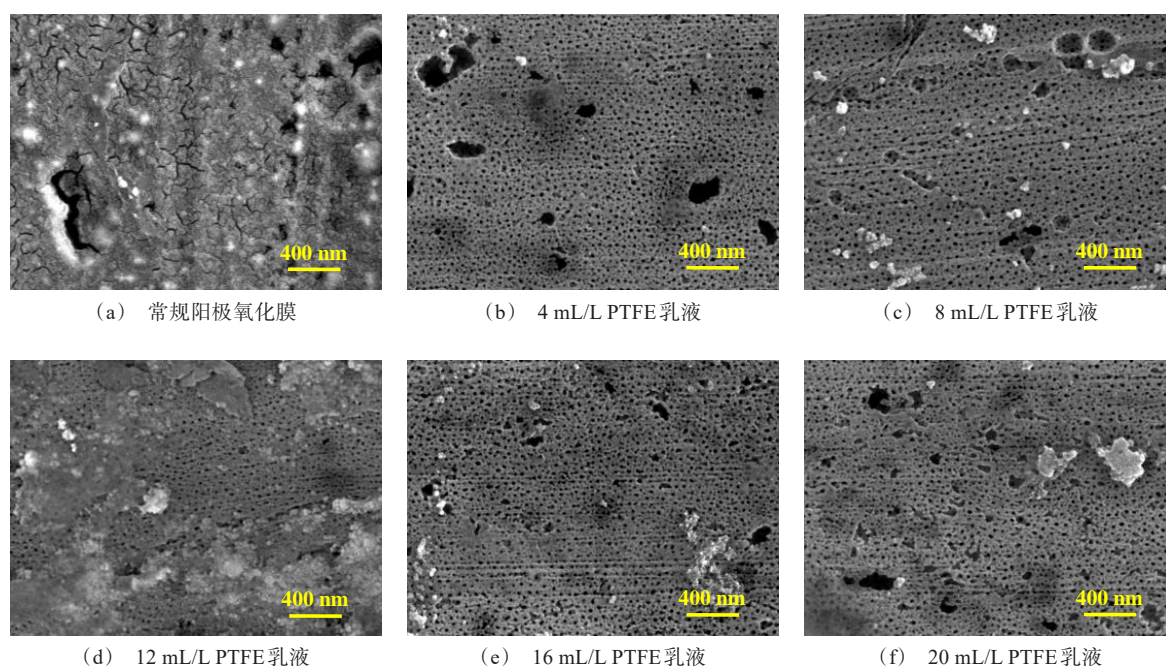


图 6 常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜腐蚀 7 d 后的微观形貌

Fig.6 Microstructure of conventional anodized film and different composite anodized films after 7 days of corrosion

由图 6(a) 可见, 常规阳极氧化膜腐蚀 14 d 后原有的微小孔洞遭到不同程度破坏, 表面出现更大的不规则凹坑, 还出现一些微裂纹。由图 6(b) 和 6(c) 可见, 添加 4 mL/L 和 8 mL/L PTFE 乳液制备的两种复合阳极氧化膜腐蚀 14 d 后表面也出现更大的不规

则凹坑, 并且凹坑数量增多, 局部腐蚀程度较为严重。由图 6(d) 可见, 添加 12 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜腐蚀 14 d 后虽然原有的微小孔洞直径有所增大, 但是尺寸超过 100 nm 的凹坑很少, 整体腐蚀程度最轻, 进一步证实其耐腐蚀性能明显好

于常规阳极氧化膜。由图6(e)和6(f)可以看出,添加16 mL/L和20 mL/L PTFE乳液制备的两种复合阳极氧化膜腐蚀14 d后表面的凹坑数量均增多,局部腐蚀程度同样较为严重。这是由于添加的PTFE乳液体积分数过高导致复合阳极氧化膜局部溶解程度加重,而表面原本存在的孔洞和凹坑处会积聚腐蚀介质导致腐蚀过程发展较快,使微小孔洞遭到不同程度破坏,从而加重复合阳极氧化膜腐蚀程度。

2.4 复合阳极氧化膜的抗磨损性能

图7为常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的磨损量。由图7可以看出,添加4 mL/L PTFE乳液、20 mL/L PTFE乳液制备的两种复合阳极氧化膜的磨损量分别为13.6 mg、13.2 mg,与常规阳极氧化膜的磨损量(15.2 mg)相差不大。但添加8 mL/L PTFE乳液、12 mL/L PTFE乳液或16 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜的磨损量明显低于常规阳极氧化膜,添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜的磨损量最低,仅为8.4 mg。

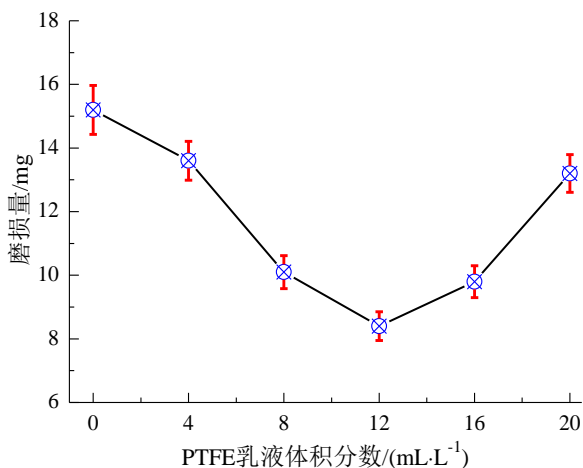


图7 常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的磨损量
Fig.7 Abrasion loss of conventional anodized film and different composite anodized films

研究发现,PTFE颗粒的分子结构特殊,具有低的表面能和低的摩擦系数,表现出自润滑特性^[15-20]。因此,吸附在复合阳极氧化膜表面的PTFE颗粒转移到摩擦副接触面能够起到减轻复合阳极氧化膜表面磨损程度的作用,从而提高其抗磨损性能。添加4 mL/L和20 mL/L PTFE乳液制备的两种复合阳极氧化膜表面吸附少量PTFE颗粒,即使转移到摩擦副接触面,却不足以有效减轻复合阳极氧化膜表面磨损程度。另外,由于这两种复合阳极氧化膜中孔

洞多,致密性较差,受载时抵抗局部变形能力弱,也导致表面磨损程度相对严重。而添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜表面吸附较多PTFE颗粒,在往复摩擦过程中较多颗粒转移到摩擦副接触面,起到良好的自润滑效果,有效减轻复合阳极氧化膜表面磨损程度。另外,该复合阳极氧化膜中孔洞少,致密性较好,受载时抵抗局部变形能力强,因此表面磨损程度轻,具有良好的抗磨损性能。

图8为常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的摩擦系数。

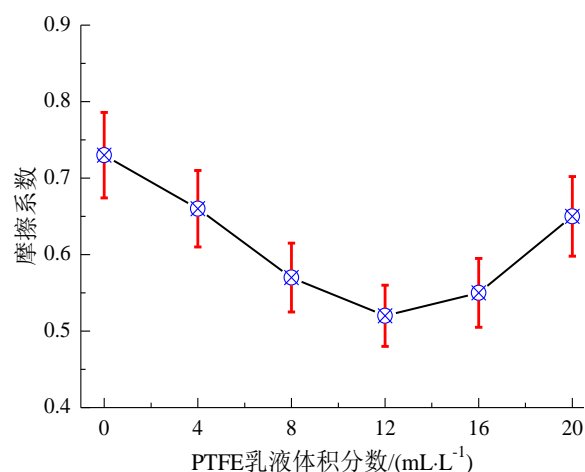


图8 常规阳极氧化膜和不同复合阳极氧化膜的摩擦系数
Fig.8 Friction coefficient of conventional anodized film and different composite anodized films

由图8可见,常规阳极氧化膜的摩擦系数最高,达到0.73,表明其抗磨损性能较差。添加4 mL/L和20 mL/L PTFE乳液制备的两种复合阳极氧化膜的摩擦系数分别为0.66和0.65,与常规阳极氧化膜相比降低幅度约为10%,进一步表明这两种复合阳极氧化膜的抗磨损性能也不太理想。但添加8、12和16 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜的摩擦系数明显低于常规阳极氧化膜,降低幅度分别为22%、29%和25%。尤其是添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜,摩擦系数仅为0.52,表现出良好的抗磨损性能,与图7分析结果一致。其原因是添加12 mL/L PTFE乳液制备的复合阳极氧化膜致密性较好,受载时抵抗局部变形能力强,加之该复合阳极氧化膜表面吸附较多PTFE颗粒,在往复摩擦过程中较多颗粒与磨屑相混合降低了由于复合阳极氧化膜与对磨GCr15钢球接触所造成的磨粒磨损程度,从而表现出良好的抗磨损性能。

3 结论

(1)复合阳极氧化膜的形貌特征不同于常规阳极氧化膜,表面吸附一些白色 PTFE 颗粒并且孔洞和凹坑减少。PTFE 乳液体积分数变化会对复合阳极氧化膜的成分、厚度、耐腐蚀与抗磨损性能造成一定影响,较多 PTFE 颗粒吸附能减轻复合阳极氧化膜局部溶解程度,并且被包覆还能起到填充作用使复合阳极氧化膜具有较好的致密性,耐腐蚀性能明显提高。此外,较多 PTFE 颗粒转移到摩擦副接触面还能起到自润滑效果,有效减轻复合阳极氧化膜表面磨损程度。

(2)添加 12 mL/L PTFE 乳液制备的复合阳极氧化膜致密性较好,并且表面吸附较多 PTFE 颗粒,含量接近 3%,其厚度约 20 μm 。该复合阳极氧化膜具有最正的腐蚀电位-460.1 mV 和最低的腐蚀电位密度 $9.07 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,较常规阳极氧化膜的腐蚀电流密度降低了超过一个数量级,表现出良好的耐腐蚀性能。该复合阳极氧化膜还具有良好的抗磨损性能,磨损量和摩擦系数与常规阳极氧化膜相比分别降低 45% 和 29%。

参考文献

- [1] 李建英,姜奎,罗志东,等. 变形与预时效对建筑铝型材显微组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2022, 47(10): 265-271.
- [2] 雷小洪. 节能环保型建筑铝型材粉末涂装技术与应用研究[J]. 世界有色金属, 2022(20): 229-231.
- [3] 朱金海,蒋发正,王柯淇. 添加剂对建筑 6063 铝型材表面转化膜耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(10): 17-23.
- [4] Wu J H, Wu H S, Wu L, et al. Preparation technology and properties of a thin anodic oxide composite film on the surface of an aluminum alloy foil[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 447(15): 128825.
- [5] Ban C L, Hou J L, Zhu S Q. Formation and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ composite anodic oxide film on etched aluminum foil by electrodeposition and anodization[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(2): 1547-1552.
- [6] 王静. 铝合金表面复合阳极氧化膜的制备与机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [7] 张丽伟,陈际达,夏柯,等. 耐温性铝合金阳极氧化复合膜制备及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 132-135.
- [8] 陈岁元,王静,梁京,等. LC4 表面纳米 SiC 和 PTFE 双颗粒复合阳极氧化膜的制备[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(3): 352-355.
- [9] Ban C L, Liu Z Q, Chen J H, et al. Preparation of $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite anodic oxide film for an aluminum electrolytic capacitor by electrodeposition-annealing and anodization[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(2): 1051-1058.
- [10] 马骏,苏冬云,邹栋林. 添加 $n\text{-SiC}$ 铝合金复合阳极氧化膜与硬质阳极氧化膜的摩擦磨损性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(9): 784-786, 791.
- [11] 廖重重. 铝合金多相复合硬质阳极氧化膜的制备及机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [12] 张尚文. PTFE 颗粒的表面改性及其在复合镀层中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [13] Haji-Savameri M, Irannejad A, Norouzi-Apourvari S, et al. Evaluation of corrosion performance of superhydrophobic PTFE and nanosilica coatings[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 17059.
- [14] 高虹,王超,姜波,等. $\text{TiO}_2\text{-PTFE}$ 对 6063 铝合金微弧氧化膜层的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(6): 128-136.
- [15] Li Z J, Qi X W, Liu C X, et al. Particle size effect of PTFE on friction and wear properties of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Wear, 2023, 532: 205104.
- [16] Guan T Y, Gilchrist M D, Fang F Z, et al. Study on mechanical and tribological properties of electroformed nickel composite mould co-deposited with nano-sized PTFE particles[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3688-3703.
- [17] 李颂华,隋阳宏,孙健,等. 干摩擦工况下 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{/PTFE}$ 配副材料摩擦磨损特性与转移膜形成分析[J]. 润滑与密封, 2022, 47(1): 53-59.
- [18] Wang B, Wang T J. Preparation of PTFE particles-doped manganese phosphating coatings on 20Cr steel and their wear and corrosion resistance[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(4): 100087.
- [19] 张博超,叶向东,郝长青,等. PTFE 增强氟碳复合涂层在多环境下的摩擦学和耐腐蚀性能[J]. 功能材料, 2022, 53(7): 7096-7101.
- [20] 付建伟,蔡醇洋,白鲸,等. PTFE 基复合材料在不同工况下的摩擦磨损性能研究进展[J]. 有机氟工业, 2023(2): 53-56.