

含石墨烯纳米片电解液中电流密度对 2024 铝合金微弧氧化膜性能的影响

唐誉豪¹, 向东¹, 李东豪¹, 王雷¹, 王平¹, 韩培冬²

(1.西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500; 2.西南电子电信技术研究所, 成都 610041)

摘 要: **目的** 研究电流密度对陶瓷膜层厚度、硬度及耐磨、耐腐蚀性能的影响。**方法** 在含有氢氧化钠和硅酸钠的电解液中添加石墨烯纳米片 (GNPs), 采用脉冲直流模式实现不同电流密度条件下 2024 铝合金的微弧氧化 (MAO) 处理。采用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对膜层形貌和成分进行了分析, 借助电化学极化曲线测试了膜层的耐腐蚀性能, 使用 X 射线衍射仪 (XRD) 表征了试样的相组成, 利用多功能材料表面性能试验机测定了陶瓷膜表面力学性能。**结果** 电流密度从 1 A/dm² 增加到 5 A/dm² 时, 含 GNPs 的陶瓷膜层厚度由 4.2 μm 增加到 5.8 μm, 不含 GNPs 的膜层厚度由 2.7 μm 增加到 4.5 μm。电流密度为 1 A/dm² 时, 含 GNPs 的膜层硬度达到 163 HV, 比同电流密度下不含 GNPs 的膜层硬度提高 63%。电流密度为 1 A/dm² 时, 摩擦系数约为 0.5; 电流密度达到 5 A/dm² 时, 摩擦系数降低为 0.3, 膜层的耐磨性能提高。电流密度为 3 A/dm² 时, 自腐蚀电位开始逐渐升高, 而自腐蚀电流呈下降趋势, 生成的陶瓷膜的耐蚀性最好。电流密度对陶瓷膜成分的影响不明显。**结论** 试样致密层的摩擦系数随电流密度的增大而显著降低, 耐磨性能提高。提高电流密度可有效减少膜层上放电孔洞的数量和尺寸, 改善膜层的耐蚀性, 电流密度达到 3 A/dm² 时, 膜层的耐蚀性能最佳。引入 GNPs 可提高膜层的厚度、硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能。

关键词: 2024 铝合金; 微弧氧化; 电流密度; 石墨烯; 硬度; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号: TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0203-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.029

Effects of Current Density in Electrolyte Containing Graphene on Properties of 2024 Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation Coating

TANG Yu-hao¹, XIANG Dong¹, LI Dong-hao¹, WANG Lei¹, WANG Ping¹, HAN Pei-dong²

(1.School of Material Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.Southwest Institute of Electronic Telecommunication Technology, Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of current density on thickness, hardness and wear resistance, corrosion resistance of MAO coating. Graphene nanoplatelets (GNPs) was added to the electrolyte containing sodium hydroxide and sodium silicate, micro-arc oxidation (MAO) treatment of 2024 aluminum alloy was completed at different current density in the mode of pulsed direct current. Morphology and composition of the coating were analyzed using scanning electron microscope (SEM) and ener-

收稿日期: 2018-03-18; 修订日期: 2018-04-21

Received: 2018-03-18; Revised: 2018-04-21

基金项目: 四川省国际科技合作与交流研发项目 (2017HH0086); 西南石油大学第 17 期开放实验重点项目 (KSZ17121)

Fund: Sichuan International Scientific and Technological Cooperation and Exchange Research and Development Project (2017HH0086); the Seventeenth Phase Open Experiment Major Project of Southwest Petroleum University (KSZ17121)

通讯作者: 向东 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为复合材料。

Corresponding author: XIANG Dong (1987—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: composite materials.

gy dispersive spectrometer (EDS); corrosion resistance of the coating was tested using polarization curve; phase composition of the sample was characterized with X-ray diffractometer (XRD); surface mechanical property of the ceramic coating was determined with multi-functional material surface performance testing machine. Current density increased from 1 A/dm² to 5 A/dm², thickness of coating containing GNPs increased from 4.2 μm to 5.8 μm, thickness of GNPs-free coating increased from 2.7 μm to 4.5 μm. After MAO treatment at initial current density of 1 A/dm², the hardness of the coating containing GNPs was up to 163HV, 63% higher than that of GNPs-free coating. Friction coefficient was about 0.5 when current density was 1 A/dm², and it decreased to 0.3 as current density reached 5 A/dm², which improved wear resistance of coatings. At the current density of 3 A/dm², self-corrosion potential increased gradually, and corrosion current tended to decrease, and corrosion resistance of the ceramic coating was the best. Current density had no obvious effects on composition of the ceramic coating. Friction coefficient of compact layer in the sample significantly decreases and wear resistance improves as current density increases. Higher current density can effectively reduce number and size of discharge holes on the coating, and improve corrosion resistance of the coating. The coating exhibits the best corrosion resistance at the current density of 3 A/dm². Thickness, hardness, abrasive resistance and corrosion resistance of the coating can be improved by adding GNPs.

KEY WORDS: 2024 aluminum alloy; micro-arc oxidation; current density; graphene; hardness; abrasive resistance; corrosion resistance

2024 铝合金具有密度小、比强度高、加工性能好、耐腐蚀性强等优越性能,在机械工业,尤其在航空航天、汽车、军用装备和交通运输工业等领域具有广阔应用前景^[1]。但是 2024 铝合金硬度较低,耐磨损和耐腐蚀性能较差,刚度小,在一定范围内限制了其应用,对其进行表面处理以提高其综合性能显得尤为重要。在普通阳极氧化基础上发展起来的微弧氧化,是用等离子体化学和电化学原理在 Al 等有色金属及其合金表面原位生长陶瓷氧化膜的表面处理技术,可在铝合金表面生成由 γ -Al₂O₃ 和 α -Al₂O₃ 组成的高硬度陶瓷氧化膜层,改善铝合金表面综合性能^[2]。微弧氧化膜的生长受多种因素影响,其中电流密度因素的影响较大^[3]。

目前,针对微弧氧化改善铝合金表面性能的研究已有报道^[3-4]。但是多数研究仅针对电流密度,对电解液掺杂石墨烯纳米片的研究还较少。石墨烯是一种由 sp² 杂化形成的单层碳原子结构,其六边形紧密排列的二维网状晶体结构具有较高的强度,其抗拉强度可达 1060 GPa^[5],因而可将石墨烯作为添加剂,来增强陶瓷膜表面致密度,同时提升陶瓷膜的耐磨耐蚀性能^[6-8]。文中通过改变微弧氧化电流密度这一因素,研究在掺杂石墨烯纳米片的电解液环境中,2024 铝合金氧化膜层的生成效果和性能,为 2024 铝合金在具体应用中提供理论参考。

1 试验

1.1 材料

将 2024 铝合金基板手工切割成尺寸为 10 mm × 10 mm × 1 mm 样片,成分如表 1 所示。本文电解液中添加的石墨烯纳米片(德阳烯碳科技有限公司)片

层尺寸为 5~10 μm,单片平均厚度 < 3 nm,平均层数为 5~6。

表 1 2024 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical compositions of 2024 aluminum alloy wt%

Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
3.80~4.90	0.30~1.00	1.20~1.80	0.10	0.25	Bal.

1.2 微弧氧化膜制备

进行微弧氧化前,对试样进行前处理:将试样依次经 600[#]、1200[#]、2000[#]水磨砂纸打磨,抛光至均匀光滑,丙酮除油,蒸馏水清洗,无水乙醇清洗,吹干处理后备用。微弧氧化电解溶液采用硅酸钠体系(硅酸钠有利于铝合金氧化成膜),用去离子水配制,均匀搅拌待用。其组成为 10 g/L Na₂SiO₃+2 g/L NaOH,添加剂为 0.5 g/L 石墨烯纳米片。

以 2024 铝合金样片为阳极,盛装电解液的不锈钢容器为阴极,在脉冲微弧氧化设备(WDL20-L)上进行微弧氧化,固定频率为 100 Hz,占空比为 80%,电压 800 V,控制电流密度为 1、2、3、5 A/dm²,恒流氧化 40 min。通过循环水冷却使电解液保持在 ≤ 45℃。

1.3 性能测试及组织观察

使用数字式显微硬度计(HXD-10007MB)测量试样的维氏硬度,载荷为 100 N,每个试样采集 20 个数据。采用数字式覆层测厚仪(时代集团公司,TT230)测量微弧氧化陶瓷膜的厚度,每个试样正反两面各测量 5 次。使用多功能材料表面性能试验机(华汇,MFT-4000)通过划痕法测试不同电流密度下的微弧氧化膜层膜基结合情况,将金刚石圆锥压头垂直放在微弧氧化试样薄膜表面上,逐渐加大垂直载

荷, 并沿膜面运动, 加载力为 20 N, 加载速度为 30 N/min, 取性能试验机随划痕测试自动计算的摩擦系数进行绘图分析。采用电化学综合测试系统 (万通 PGSTAT 302N), 使用恒电流法, 控制研究电极的电流密度而使其呈现出不同的数值, 同时测定相应的稳定电极电势值, 记录数据并且对图像进行拟合, 研究分析金属试样表面氧化膜的腐蚀速率。采用 X 射线衍射仪 (丹东, DX-2700) 对样片上的氧化膜层进行 XRD 试验, 对微弧氧化膜进行成分分析。使用扫描电子显微镜 (ZEISS EV0 MA15) 观察膜层的微观形貌, 并用能谱仪 (EDS) 分析试样氧化膜层的主要元素种类与含量。

2 结果与分析

2.1 电流密度对膜层厚度的影响

图 1 为氧化陶瓷膜层厚度随电流密度的变化曲线。由图 1 可见, 随着电流密度的增加, 氧化膜的厚度逐渐增加, 且膜层厚度与电流密度基本呈线性关系。电流密度最小 (1 A/dm^2) 时, 含 GNP 的膜层厚度为 $4.2 \mu\text{m}$, 不含 GNP 的膜层厚度仅为 $2.7 \mu\text{m}$; 电流密度最大 (5 A/dm^2) 时, 含 GNP 的膜层厚度达到 $5.8 \mu\text{m}$, 不含 GNP 的膜层厚度为 $4.5 \mu\text{m}$ 。这可能是

由于电流密度增大, 促进表面快速放电, 导致成膜速率增快, 膜层厚度相应增加, 同时少量石墨烯纳米片随着放电而同步沉积于微弧氧化膜层中, 和熔融的 Al_2O_3 一起冷凝, 增加了膜层厚度^[9]。

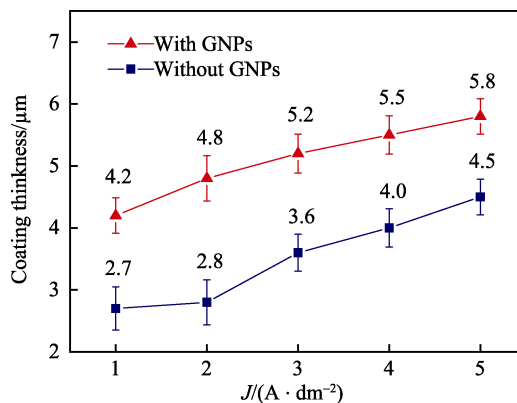


图 1 微弧氧化膜层厚度与电流密度的关系

Fig.1 Thickness of MAO coating at different current density

2.2 膜层表面形貌及元素成分

为了确定铝合金微弧氧化膜的形貌和组成, 分别对在电流密度为 $1, 3 \text{ A/dm}^2$ 完成微弧氧化的铝合金进行扫描电镜观察 (图 2) 和 EDS 能谱分析 (图 3), 同时将未做微弧氧化处理的铝合金试样作为空白对照。

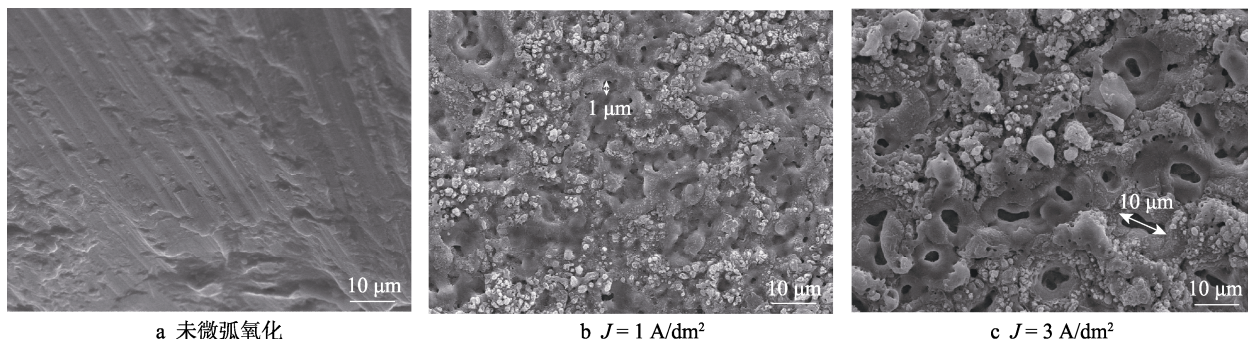


图 2 微弧氧化铝合金表面形貌

Fig.2 SEM image of MAO Al alloy surface: (a) pure 2024 Al alloy; (b) MAO Al alloy at current density of 1 A/dm^2 ; (c) MAO Al alloy at current density of 3 A/dm^2

从图 2a 可以看出, 未经微弧氧化处理过的铝合金表面致密均匀, 而处理过的铝合金表面较疏松, 熔融特征明显, 出现典型的“火山口”结构与微孔, 这些微孔为等离子体放电通道, 直径差异较大^[10]。比较图 2b 与图 2c 发现, 随着电流密度的增大, 表面微孔尺寸增大, 数量减少。图 2b 中, 微孔数量较多, 分布不均匀, 有些部位没有形成放电通道, 而图 2c 的微孔数量明显减小, 这可能是由于石墨烯的加入提高了电解液的电导率。当电流密度为 1 A/dm^2 时, 氧化膜表面的熔融颗粒基本孤立, 尺寸只有 $1 \mu\text{m}$ 左右; 电流密度为 3 A/dm^2 时, 表面微孔搭桥连接, 尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 左右。随着电流密度的增加, 在熔融氧化膜尺寸增大

的同时, 激冷过程中产生的热应力也增大, 易形成贯穿整个熔融膜表面的裂纹, 这种裂纹的出现会对陶瓷膜的耐蚀性能产生影响, 应该尽量控制^[11]。

图 3 和表 2 反映了不同电流密度下陶瓷膜的主要成分及相对含量。可以看出, 电流密度对陶瓷膜元素成分 Na、Al 和 Si 没有明显影响, 但随着电流密度的提高, C 在陶瓷膜中的相对含量略有提高, 说明石墨烯纳米片通过微弧氧化过程扩散和渗透到陶瓷膜中, 且电流密度越大, 扩散量越多。

2.3 膜层物相构成

图 4 是在不同电流密度下得到的 2024 铝合金微

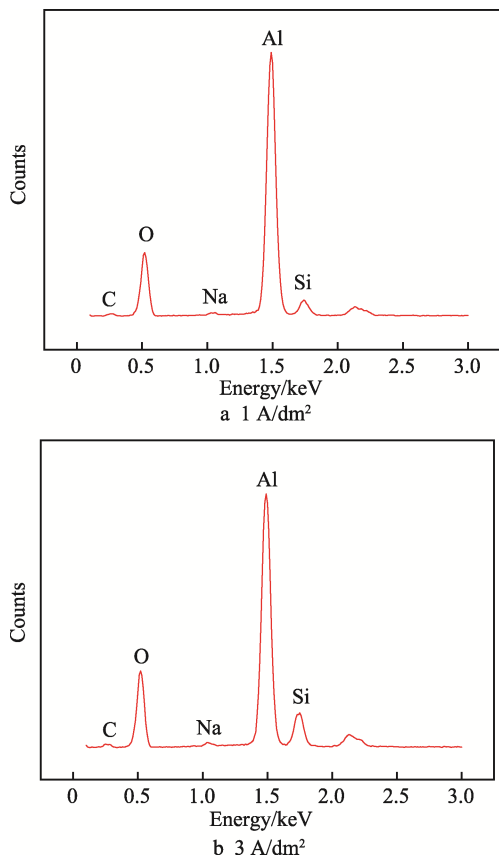


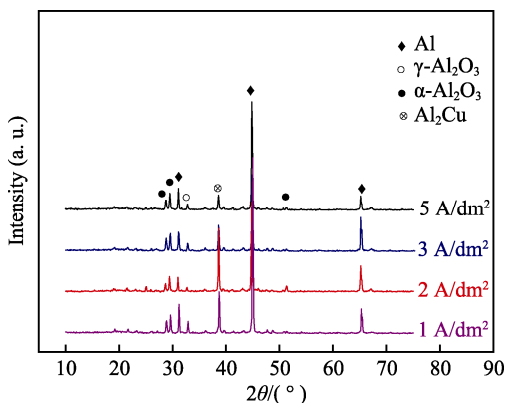
图3 不同电流密度下微弧氧化膜 EDS 分析

Fig.3 EDS analysis of MAO coating at different current density

表2 不同电流密度下微弧氧化膜的表面元素及其相对含量

Tab.2 Surface elements and relative content of MAO coating at different current density

Coating elements	Content/at%	
	1 A/dm ²	3 A/dm ²
C	5.14	7.23
O	35.85	36.38
Na	0.37	0.48
Al	44.40	45.38
Si	3.19	4.89

图4 不同电流密度下的 2024 铝合金
微弧氧化膜层 XRD 衍射图谱Fig.4 XRD diffraction patterns of MAO coatings
on 2024 Al alloy at different current density

弧氧化膜层 XRD 衍射谱,可以看出,不同电流密度对陶瓷膜相的组成没有明显影响。陶瓷膜层主要由基体 Al、 α -Al₂O₃ 与 γ -Al₂O₃ 相组成,其中 α -Al₂O₃ 为主要物相。由于微弧氧化形成的膜层厚度薄,能检测出 2024 铝合金基体中的 Al₂Cu 相^[12-13]。石墨烯纳米片的特征衍射峰 $2\theta=26.6^\circ$ 并未出现,表明石墨烯纳米片分散在陶瓷膜体里,在微弧氧化过程中没有发生团聚,依然保持分散状态。

2.4 电流密度对膜层硬度的影响

图 5 反应了氧化陶瓷膜层的硬度 (HV) 随电流密度的变化情况,可以看出,铝合金在电流密度为 1 A/dm² 的条件下,经过微弧氧化处理后,含 GNP 的膜层硬度达到了 163HV,且电流密度增加,膜层硬度也增大。这是由于铝合金在微弧氧化作用后,其表面形成了 γ -Al₂O₃ 和 α -Al₂O₃ 组成的高硬度陶瓷氧化膜层,从而明显提高了铝合金的表面硬度。在 1 A/dm² 的条件下,含 GNP 的膜层硬度 (163 HV) 比不含 GNP 的膜层硬度 (100 HV) 提高了 63%,这可能是 GNP 导电促进微弧氧化膜层致密,亦或是与 Al 反应生成高硬度的 Al₄C₃ 所致^[14]。

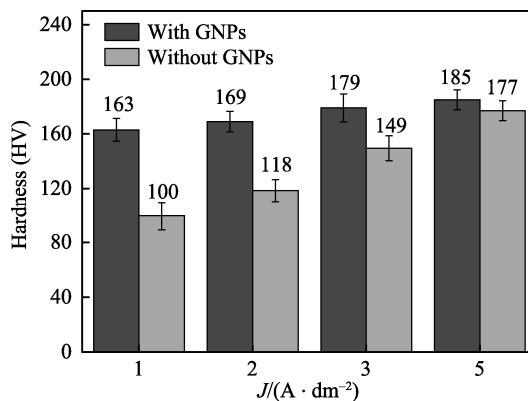


图5 微弧氧化膜层硬度与电流密度的关系

Fig.5 Hardness of MAO coating at different current density

2.5 膜层的耐磨性能

图 6 为不同电流密度下制备的陶瓷膜层的摩擦系数曲线,可以看出,实验初始阶段,膜层的摩擦系数较低,随着加载力的增大,摩擦系数不断增大,这说明膜层从外到里为疏松层和致密层。随着电流密度的增大,致密层的摩擦系数有降低趋势,说明增大电流密度能够有效提高陶瓷膜层的耐磨性能。石墨烯纳米片进入膜层中能够起到一定的润滑作用,通过在微弧氧化过程中制备含石墨的复合膜层,进一步优化了膜层的摩擦学性能^[15]。

2.6 膜层的耐腐蚀性能

图 7 为不同电流密度下制备的微弧氧化膜在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线。表 3 为相应腐蚀电位

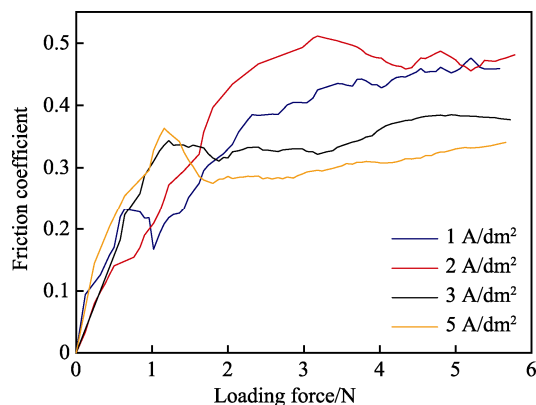


图 6 不同电流密度下制备的陶瓷膜层的摩擦系数曲线

Fig.6 Friction coefficient curves of MAO coating at different current density

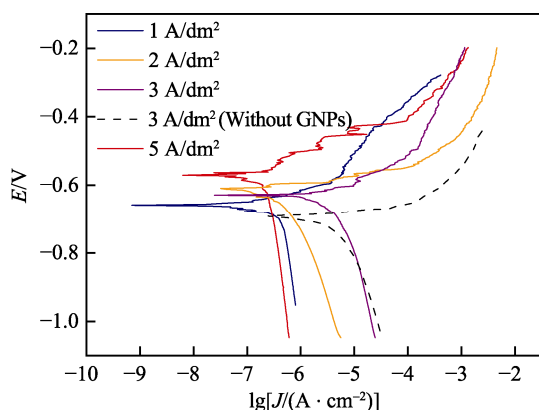


图 7 微弧氧化膜在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线
Fig.7 Polarization curves of MAO coating in 3.5% NaCl solution

表 3 极化曲线拟合数据
Tab.3 Fitting data of polarization curves

Current density/(A·dm ⁻²)	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
1 (With GNPs)	-0.68	1.55
2 (With GNPs)	-0.61	2.51
3 (With GNPs)	-0.63	1.48
3 (Without GNPs)	-0.69	4.69
5 (With GNPs)	-0.58	1.50

E_{corr} 与腐蚀电流密度 J_{corr} 。由图 7 和表 3 可见, 电流密度达到 3 A/dm² 之前, 腐蚀电位由 -0.68 V 到 -0.61 V, 再到 -0.63 V, 而腐蚀电流密度增大后减小, 说明电流密度较小时, 生成的氧化膜致密; 电流密度较大时, 生成的氧化膜表面微孔较大, 同时有裂纹存在, 氯离子通过裂纹渗透到基体, 虽然膜厚增加了, 但能抵抗氯离子腐蚀的有效厚度减小了, 故耐腐蚀能力较弱且不稳定。只有生成的陶瓷膜致密, 同时膜厚又达到一定程度, 膜层的耐蚀性才最好。当电流密度为 3 A/dm² 时, 自腐蚀电位开始逐渐升高, 而自腐蚀电流密度最低, 只有 $1.48 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 生成的陶瓷膜的耐蚀性最

好^[16]。对比 3 A/dm² 条件下的膜层耐腐蚀性能, 发现不含 GNPs 的膜层自腐蚀电流密度最大, 达到 $4.69 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 腐蚀速率最快, 因此含 GNPs 的膜层耐腐蚀性能更佳。这可能是因为 GNPs 的导电作用, 将电化学腐蚀的阴极、阳极分开, 增大了铝合金腐蚀的反应阻力^[17]。

3 结论

- 1) 随着电流密度的增大, 氧化膜的厚度逐渐增加, 且膜层厚度呈近似线性生长, 但膜层生长幅度较小。
- 2) 电流密度增大会导致致密层的摩擦系数降低, 增大电流密度能够提高陶瓷膜层的耐磨性能。
- 3) 氧化膜的耐蚀性并不是简单随电流密度的增加而提高, 而是电流密度达到特定值时, 膜层厚度和表面致密度的共同作用决定陶瓷膜耐蚀性能。当电流密度为 3 A/dm² 时, 实验生成的陶瓷膜的耐蚀性能最好。
- 4) 石墨烯纳米片的引入可以提高膜层的厚度、硬度、耐磨性能、耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] NAZARIAN H, KROL M, PAWLYTA M, et al. Effect of Sub-zero Treatment on Fatigue Strength of Aluminum 2024[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 65: 38-46.
- [2] 黄丹, 张晓燕, 吴德凤. 纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 添加剂对铝合金微弧氧化膜层性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 43-47.
- [3] HUANG Dan, ZHANG Xiao-yan, WU De-feng. Effect of Nano $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Additive on the Properties of Micro-arc Oxidation Coating of Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 43-47.
- [3] LI H X, LI W J, SONG R G, et al. Effects of Different Current Densities on Properties of MAO Coatings Embedded with and without $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Nano Additives[J]. Materials Science and Technology, 2013, 28(5): 565-568.
- [4] 陈喜娣, 蔡启舟, 尹荔松, 等. 电流密度对海水淡化用铝合金微弧氧化陶瓷膜层耐蚀性的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(6): 103-107.
- [5] CHEN Xi-di, CAI Qi-zhou, YIN Li-song, et al. Effect of Current Density on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation Ceramic Coating for Seawater Desalination[J]. Journal of Metal Heating, 2012, 37(6): 103-107.
- [5] LEE C G, WEI X D, KYSAR W, et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [6] 张玉林, 于佩航, 韦银河. 石墨烯添加剂对铝合金表面微弧氧化膜耐磨耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(8): 103-109.
- ZHANG Yu-lin, YU Pei-hang, WEI Yin-he. Effect of

- Graphene Additive on Wear Resistance of Micro-arc Oxidation Coating on Aluminum Alloy Surface[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2017, 38(8): 103-109.
- [7] BOOSTANI A, YAZDANI S, MOUSAVIAN R, et al. Strengthening Mechanisms of Graphene Sheets in Aluminum Matrix Nanocomposites[J]. Materials and Design, 2015, 88: 938-989.
- [8] TIAN W M, LI S M, WANG B, et al. Graphene-reinforced Aluminum Matrix Composites Prepared by Spark Plasma Sintering[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2016, 23(6): 723-729.
- [9] MAHMOOD K, MAHAM A, ANSA K, et al. Microstructural Evolution, Mechanical Profile, and Fracture Morphology of Aluminum Matrix Composites Containing Graphene Nanoplatelets[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32: 1-12.
- [10] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 94-99.
MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Research Progress on Aluminum Alloy Ceramic Coating with Micro-arc Oxidation[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 94-99.
- [11] 王平, 郭小阳, 王春华, 等. 电流密度对 ZL108 铝合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 174-177.
WANG Ping, GUO Xiao-yang, WANG Chun-hua, et al. Effect of Current Density on the Properties of ZL108 Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation Coating [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 174-177.
- [12] 王祝堂. 2024 型铝合金的热处理[J]. 金属世界, 2009(2): 43-48.
WANG Zhu-tang. Heat Treatment of 2024 Aluminum Alloy[J]. The Metal World, 2009(2): 43-48.
- [13] WEN L, WANG Y M, ZHOU Y, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Modified 2024 Al Alloy Using Surface Mechanical Attrition Treatment Combined with Microarc Oxidation Process[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 473-480.
- [14] BARTOLUCCI S, PARAS J, RAFIEE M, et al. Graphene-Aluminum Nanocomposites[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 7933-7937.
- [15] YILBAS B, IBRAHIM A, ALI H, et al. Effect of Graphene Film on Laser Textured Alumina Surface Characteristics[J]. Ceramics International, 2017, 43(2): 2012-2021.
- [16] 熊仁章, 盛磊, 郭洪光. 铝合金微弧氧化陶瓷层的性能研究[J]. 材料保护, 2000, 33(7): 13-14.
XIONG Ren-zhang, SHENG Lei, GUO Hong-guang. Study on the Properties of Ceramic Coating of Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation[J]. Material Protection, 2000, 33(7): 13-14.
- [17] LIU S, JIANG X, ZHAO H C, et al. Corrosion Resistance and Wear Property of Graphene-epoxy Coatings[J]. Tribology, 2015, 35(5): 598-605.