

引文格式: 李文, 张笑尘, 李少杰, 等. 石墨烯对2A12铝合金微弧氧化膜层结构和性能的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(17): 99-105.
LI Wen, ZHANG Xiaochen, LI Shaojie, et al. Effect of doping graphene on structure and properties of micro-arc oxidation film on 2A12 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(17): 99-105.

石墨烯对2A12铝合金微弧氧化膜层结构和性能的影响*

李文¹, 张笑尘¹, 李少杰¹, 闫德志², 邢雅兰²

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 北京航空航天大学, 北京 100083)

[摘要] 为进一步提升2A12铝合金微弧氧化膜耐蚀性和耐磨性, 在六偏磷酸钠体系的微弧氧化工艺基础上, 加入不同浓度石墨烯分散液, 研究了石墨烯分散液对微弧氧化膜层的表面形貌、厚度、耐磨性、耐蚀性和硬度的影响。结果表明, 当加入0.4 g/L石墨烯时, 微弧氧化膜层性能最佳, 膜层中的微孔和微裂纹等缺陷显著减少, 膜层厚度增加。相对于未添加石墨烯分散液制备的微弧氧化膜, 石墨烯掺杂的微弧氧化膜层硬度提高了73%, 磨损量减少8.2 mg, 自腐蚀电位提高0.294 V, 自腐蚀电流密度下降2个数量级。

关键词: 2A12 铝合金; 微弧氧化; 石墨烯; 耐磨性; 硬度; 耐蚀性

中图分类号: V252; TG17

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.17.099

Effect of Doping Graphene on Structure and Properties of Micro-Arc Oxidation Film on 2A12 Aluminum Alloy

LI Wen¹, ZHANG Xiaochen¹, LI Shaojie¹, YAN Dezhi², XING Yalan²

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Beihang University, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] To further enhance the wear resistance and corrosion resistance of micro-arc oxidation (MAO) film on 2A12 aluminum alloy, MAO process based on sodium hexametaphosphate solution system was carried out. The effects of doping graphene on the properties (such as morphology, thickness, wear resistance, corrosion resistance and hardness) of MAO film were studied by adding different concentrations of graphene dispersions. The results show that the MAO film with the best properties is obtained when the mass concentration of graphene is 0.4 g/L. Micro-pores and micro-cracks in the MAO film are significantly reduced, and the thickness of film is also increased. Compared to the MAO film prepared without doping graphene, the hardness of the graphene-doped MAO film is increased by 73%, the wear amount is decreased by 8.2 mg, the self-corrosion potential is increased by 0.294 V and the self-corrosion current density is decreased by 2 orders of magnitude.

Keywords: 2A12 aluminum alloy; Micro-arc oxidation; Graphene; Wear resistance; Hardness; Corrosion resistance

2A12 铝合金具有密度小、强度高、加工性能好等特点, 是重要的高强度、轻量化结构部件材料, 被广泛应用于航空航天领域^[1]。然而, 铝合金在使用过程中易发生腐蚀, 尤其在高温高湿环境中, 表面氧化膜易受到卤素

离子破坏, 进而发生点蚀、电偶腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等, 严重降低了其服役寿命和安全可靠性^[2]。工业生产中常采用各种表面处理技术来提升铝合金的耐蚀性, 包括阳极氧化、微弧氧化、电沉积和激光加工等技术^[3-6]。

* 基金项目: 科工局稳定支持项目(KZ562308)。

其中,微弧氧化(MAO),又称等离子体电解氧化,是在普通阳极氧化基础上发展而来的一种表面处理技术,通过产生火花放电在金属表面原位形成陶瓷膜层,可极大地提高金属的耐蚀性和耐磨性,被广泛应用于铝、镁、钛等阀金属及其合金表面处理技术。MAO技术具有生产效率高、生态友好、经济效益高、膜层与基体结合力好等特点^[7-8]。传统MAO膜层表面存在疏松的多孔层,降低了膜层对环境腐蚀介质的屏蔽效果,难以满足航空航天领域严苛的耐蚀性要求。为获得性能更好的MAO膜层,研究人员常在微弧氧化电解液中添加具有特殊功能的添加剂(如ZrO₂、CeO₂等纳米颗粒),制备纳米粒子掺杂的微弧氧化膜,来进一步提高膜层的致密性和耐磨性^[9-10]。

石墨烯具有优异的疏水性和抗渗性,是优良的抗腐蚀材料之一^[11]。在铝合金微弧氧化工艺中添加石墨烯分散液,有望提高MAO膜层性能。Kirkland等^[12]采用化学气相沉积技术在Ni、Cu基底沉积石墨烯颗粒涂层,该涂层在水中表现出较强的耐腐蚀性。Prasai等^[13]研究发现,在Na₂SO₄溶液中,石墨烯膜涂覆的铜的腐蚀速率仅为裸铜的14.3%。同时,石墨烯还具有良好的导电性^[14],电解液中添加石墨烯可影响微弧氧化的放电行为,促进火花放电和膜层生长。Chen等^[15]研究发现,氧化石墨烯的加入能够有效促进MAO反应,提高氧化膜层的厚度与耐蚀性。付肖肖^[16]通过在电解液中掺杂氧化石墨烯,提高了膜层致密性,并使腐蚀电位进一步正移。由于分子间 $\pi-\pi$ 共轭结构和范德华力的存在,石墨烯在水性基体中溶解性很差,易团聚。若电解液中石墨烯团聚,MAO过程中石墨烯无法均匀参与成膜,团聚的石墨烯沉积后会阻挡其他阴离子参与成膜反应,导致局部膜层变薄,从而造成膜层厚度不均,降低膜层整体耐蚀性。因此,构建均匀稳定的石墨烯分散液是制备石墨烯掺杂MAO膜层的关键。

本研究中引入羧甲基纤维素钠(CMC),配制了稳定的石墨烯分散液,将该分散液作为添加剂引入电解液中,通过调控石墨烯浓度来探究其对2A12铝合金MAO膜层组织与性能的影响,借助SEM、XRD、磨损试验机和电化学工作站等测试手段或设备分析了膜层微观形貌、物相、厚度、硬度、耐蚀性及耐磨性的变化。

1 试验材料及方法

1.1 材料准备

(1) 铝合金试样: 本试验采用2A12铝合金(GB/T 3191—2010),组成成分如表1所示,试样为直径10 cm的圆盘,每次试验前需对铝合金表面抛光清洗。

(2) 石墨烯分散液配制: 将石墨烯固体粉末按2 g/L

的浓度分散在去离子水中,加入质量分数50%的CMC表面活性剂,超声1 h获得稳定均匀的石墨烯分散液。

(3) 电解液配制: 基础成分为25 g/L六偏磷酸钠溶液、8 g/L偏硅酸钠溶液、5 g/L钨酸钠溶液和1 g/L氢氧化钾溶液。向电解液中加入不同量的石墨烯分散液,使得石墨烯质量浓度分别为0 g/L、0.2 g/L、0.4 g/L、0.6 g/L和0.8 g/L,配置完成后持续搅拌30 min。

1.2 微弧氧化工艺

本试验采用双极性MAO脉冲电源,型号为T-MAO-B50,电参数设定为终止电压500 V、频率400 Hz和占空比30%,表面处理时间45 min。前期采用恒流模式,正向电流密度为5 A/dm²,负向电流密度为2.5 A/dm²,电压升到终止电压后采用恒压模式。MAO装置示意图如图1所示,铝合金为阳极,不锈钢板为阴极,在电解过程中采用机械搅拌保证电解液的均匀分散,通过冷却液使电解液温度保持在(25±2)℃,电解结束后用去离子水多次冲洗试样并自然晾干。

1.3 表征及测试

本研究中采用Zetasizer Nano ZS90电位仪测量石墨烯分散液Zeta电位值。采用X射线衍射仪D/MAX-2400(Rigaku)对MAO膜层进行物相分析。通过扫描电子显微镜(Hitachi S-4800)观察膜层微观形貌与元素分布。通过TABER磨损试验机测试氧化膜的耐磨性能,具体测试方法:在一块直径100 mm、长度2~4 mm、中心孔 $\Phi 6.5\sim 10.8$ mm的圆形平板试样上制备MAO膜层,用1000 g载荷,以70 r/min转速的CS-17磨轮旋转1000 r后测试试样磨损试验前、后的质量变化,其差值

表1 2A12铝合金的主要成分(质量分数)

Table 1 Main components of 2A12 aluminum alloy (mass fraction) %

Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Fe	Si	Al
1.40	4.40	0.60	0.048	0.022	0.180	0.076	余量

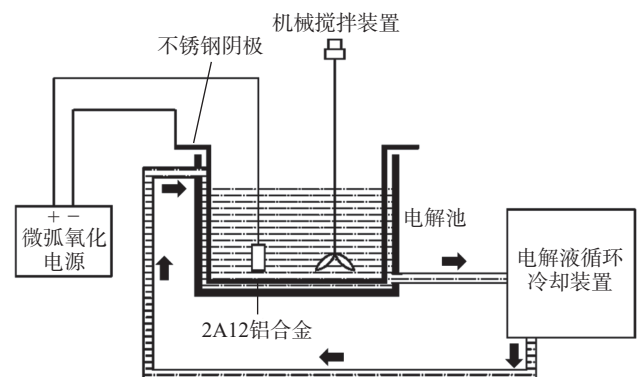


图1 MAO装置示意图

Fig.1 Diagram of MAO device

为磨损损失量。采用数字式显微硬度仪 HVS-1000TM/LCD 测试膜层的维氏硬度,载荷为 100 N,每个试样采集 20 个数据。通过电化学工作站测量膜层极化曲线,电压扫描范围为 $-1.4\sim 0\text{ V}$ 。

2 结果与讨论

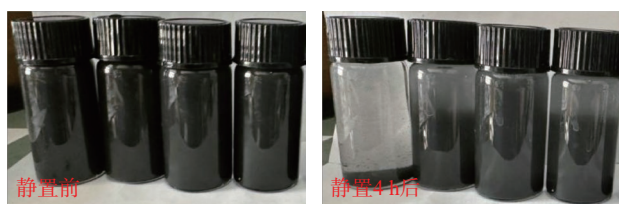
2.1 CMC 对石墨烯分散性的影响

为了获得均匀稳定的石墨烯分散液,在超声分散石墨烯时加入一定量的 CMC,配置不同 CMC 质量分数的石墨烯分散液,并进行静置试验,结果如图 2 (a) 所示。静置前,不同 CMC 浓度的石墨烯分散液均呈现均匀的黑色悬浊液。静置 4 h 后,未添加 CMC 的石墨烯分散液出现明显沉淀,添加 CMC 质量分数为 50% 的石墨烯分散液仍然保持黑色悬浊液形态,没有出现沉淀分层现象,表明该浓度下石墨烯能够稳定、均匀地分散。

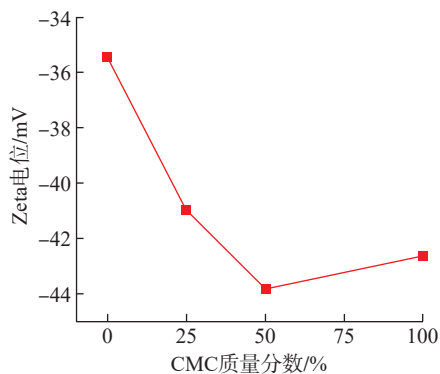
Zeta 电位是评估石墨烯分散液稳定性的重要参数之一,石墨烯分散液中的 CMC 的含量对分散液的 Zeta 的影响如图 2 (b) 所示。随着 CMC 浓度的提升,Zeta 电位呈现先下降后增加的趋势。当 CMC 质量分数为 50% 时,Zeta 电位最小,达到 -43.83 mV ,超过了胶体稳定性的理论值 -30 mV ,表明该分散体系最稳定,后续按照该比例配制石墨烯分散液。

2.2 石墨烯对铝合金 MAO 膜层相组成影响

通过在电解液中掺杂不同含量的石墨烯,在 2A12



(a) 石墨烯分散液静置前后照片
(从左到右比例依次为0、0.25、0.5、1)



(b) 石墨烯分散液的Zeta电位值
图2 不同质量分数的 CMC 改性的石墨烯分散液静置前后照片及 Zeta 电位值

Fig.2 Photos and Zeta potential values of modified graphene dispersions with different CMC mass fraction before and after standing

铝合金表面制备得到石墨烯改性的 MAO 膜层,其 XRD 图谱如图 3 所示。通过比较各相组成峰值的大小和位置可以看出,在不同石墨烯浓度下,所获得膜层主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成,而 Al 晶体衍射峰代表膜层底下的铝合金基材。微弧氧化过程中,铝合金在微区放电产生的瞬间高温高压下发生微区熔融,Al 原子通过放电通道进行扩散,同时在电解液的“激冷”作用下与吸附在铝合金表面的 O 原子迅速结合,生成氧化铝 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) 并沉积,其中具有高硬度的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的峰强随着石墨烯的掺入有所提高,表明石墨烯的掺入有利于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的形成,提高 MAO 膜层的硬度。在 XRD 图谱中未发现 C 物相的峰,可能是基体的衍射峰太强,而膜层中石墨烯含量较少,衍射峰强度过低而无法分辨^[15,17],也有学者认为石墨烯的衍射峰的出现很容易受到氧化物的干扰,微弧氧化过程中 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的形成会影响石墨烯相的检测^[15,18]。膜层表面能谱分析表明(表 2),膜层的主要组成元素为 C、O、Al 以及微量的 Si, Al 元素主要来自基体的氧化, O 元素主要来自电解液中 OH^- 和 SiO_3^{2-} 以及反应所生成的 O_2 , C 元素主要

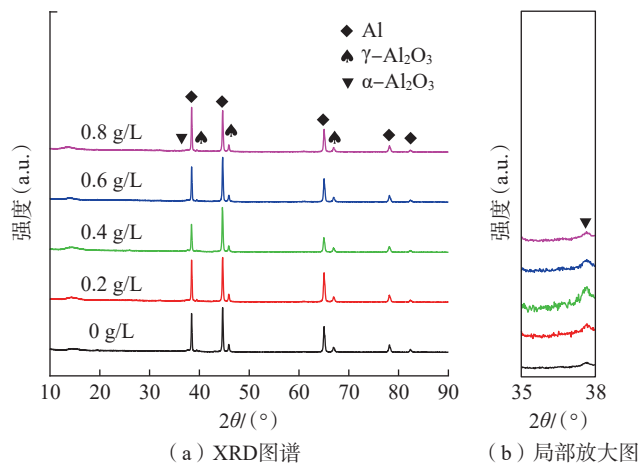


图3 不同浓度石墨烯的电解液中所制得试样的 XRD 图谱和局部放大图

Fig.3 XRD pattern and local amplification diagram of samples prepared in electrolyte with different concentrations of graphene

表2 MAO 膜层表面的元素含量
Table 2 Element content of MAO film surface

石墨烯质量浓度	C	O	Al	Si
0 g/L	0	0.670	0.316	0.014
0.2 g/L	0.061	0.576	0.336	0.027
0.4g/L	0.067	0.609	0.286	0.038
0.6 g/L	0.099	0.586	0.273	0.042
0.8 g/L	0.122	0.582	0.253	0.043

来自于石墨烯, Si 元素主要来自于电解液中的 Na_2SiO_3 。随着石墨烯浓度提高, 膜层中 C、Si 含量明显提高, 表明石墨烯已进入 MAO 膜层且石墨烯的加入使膜层在微弧氧化处理过程中更充分地与电解液反应, 即电解液更好地参与到膜层的生长。

2.3 石墨烯浓度对铝合金 MAO 膜层微观形貌的影响

在不同浓度石墨烯电解液中制得的 MAO 膜层形貌及能谱面扫结果如图 4 所示。未添加石墨烯的试样, 膜层表面存在不规则的“结节”状组织以及较多的微孔和微裂纹(图 4 (a))。结节状组织一般分布在薄饼状结构的周围, 微孔结构多为火山口状的“圆状孔”结构, 一般处于薄饼结构的中间, 以上形态均为硅酸盐电解液中形成 MAO 陶瓷膜层的典型形态。熔融氧化物和气泡在火花放电产生的压力下被迫喷出, 接触到电解液快速冷却, 最终形成微孔结构, 而微裂纹的形成主要归因于频繁放电产生的热冲击或者膜层自身热应力的释放^[17]。

在电解液中添加石墨烯后, 试样表面仍呈现典型的结节状组织及微孔结构(图 4 (b)~(e))。但是相对

于未添加石墨烯的试样, 膜层表面所形成的“圆状孔”数量相对减少, 尺寸减小, 结节状组织变得更细小, 强介电击穿时引起的微裂纹明显减少。这说明石墨烯的加入能够有效缩小膜层表面的微孔尺寸, 减少微裂纹, 提高膜层致密性, 这有利于提高膜层的耐蚀性^[17]。对比不同石墨烯浓度的试样, 可以发现, 当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时, 膜层微孔和结节状组织最小, 膜层均匀性最好(图 4 (c)), C、Al、O 元素在该膜层表面均匀分散(图 4 (f)~(h))。当石墨烯浓度进一步提高时, 膜层表面的微孔孔径增大, 表明石墨烯浓度应该在一个合理的范围内。过高浓度的石墨烯可能会导致石墨烯分散不均匀或过量沉积, 大量的石墨烯颗粒经 CMC 吸附后带负电荷, 在电场作用下向阳极移动, 使得阳极附近负离子浓度增加, 阳极反应更加剧烈, 生成气体增多, 氧化层的薄弱部位容易被击穿^[19]。

不同石墨烯浓度下制备的 MAO 膜层截面微观形貌如图 5 所示。总体上, 膜层内部均存在分布不均匀的微孔, 但加入石墨烯的试样膜层微孔数量和尺寸相对更

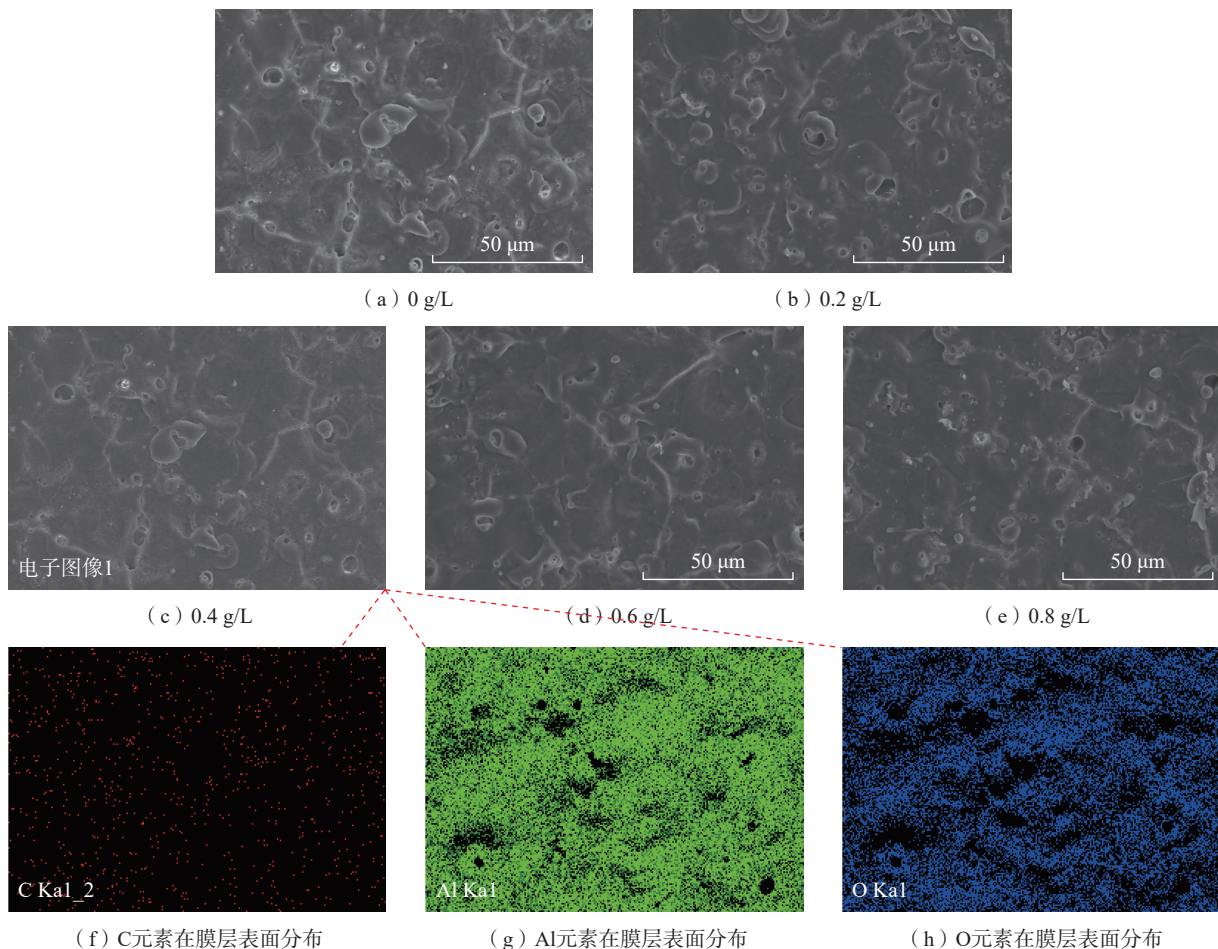


图 4 不同石墨烯浓度制得 MAO 膜层的表面微观形貌及 0.4 g/L 石墨烯制备得到的试样表面形貌及元素分布

Fig.4 Surface morphology of MAO film obtained by different concentrations of graphene and surface element distribution of 0.4 g/L graphene treated specimens

小。这是由于石墨烯的加入使得膜层表面放电火花数量大幅增加,但单火花能量降低。因此放电通道内部大量熔融态氧化物凝固于通道内壁处,进而提高了膜层的致密度。当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时,膜层中微孔数量最少。

测量 MAO 膜层厚度可以发现,膜层厚度随着石墨烯浓度的增加先升高后趋于稳定。MAO 膜层生长过程是击穿、熔融、凝固和再击穿的过程,即高压下试样表面膜层被击穿,熔融的金属化合物以放电通道为中心向外喷射,遇到较冷的电解液迅速凝固,使得膜层厚度增加。石墨烯纳米片具有超高电导率 (10^6 S/m),其中的 C 原子为 sp^2 杂化,在碳环内形成大 π 键,使得石墨烯纳米片表面电子可以自由移动^[20]。石墨烯的加入显著提高了电解液的电导率,降低了整体电路的电阻,促使阳极反应试样表面膜层更容易被击穿,使得膜层厚度增加。随着石墨烯的增加,在发生放电时,由于单次放电强度逐渐减弱,对膜层增厚速度有所影响^[17]。

2.4 石墨烯浓度对铝合金 MAO 膜层耐磨性及硬度的影响

在火花放电的高密度能量下,铝合金表面形成熔融区,膜层与基体结合界面处形成的微冶金结合,氧化膜层与铝合金基体的结合力较强,使得 MAO 膜层本身具

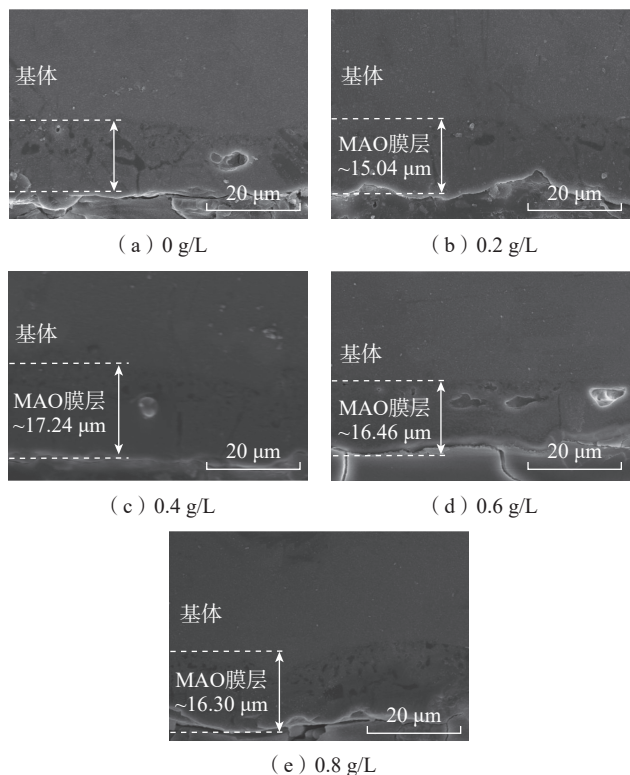


图 5 不同石墨烯浓度下制得的 MAO 膜层截面的微观形貌

Fig.5 Cross section morphology of MAO film obtained in electrolyte with different concentrations of graphene

有较好的耐磨性。另一方面,石墨烯具有的二维片状结构,片层内机械强度高,片层之间剪切强度低,可以作为减磨润滑材料,因此石墨烯的加入可以进一步提高膜层耐磨性能^[21]。

对膜层进行磨削试验和硬度试验,结果如图 6 所示。电解液中未添加石墨烯时微弧氧化处理的 2A12 铝合金试样的磨损量可以达到 30.8 mg,掺杂石墨烯后试样的磨损量明显降低。结合试样在磨削试验后的光学照片(图 7)可以发现,当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时,磨损量仅为 22.6 mg,10000 r 之后未露出基体,结合 SEM 图(图 8)可以发现,此时 MAO 膜层的致密层依旧完整无缺,但是其他样品或多或少均露出部分基体,且出现微小坑洞,可能是致密层被磨削殆尽,露出微弧氧化之前的基体形貌,说明适宜浓度的石墨烯掺杂可大幅

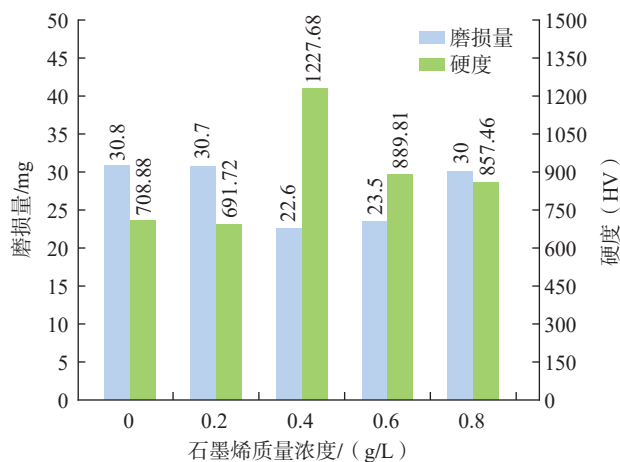


图 6 不同石墨烯浓度下铝合金 MAO 膜层耐磨性及硬度的变化

Fig.6 Changes of wear resistances and hardness of aluminum alloy MAO films with different graphene concentrations

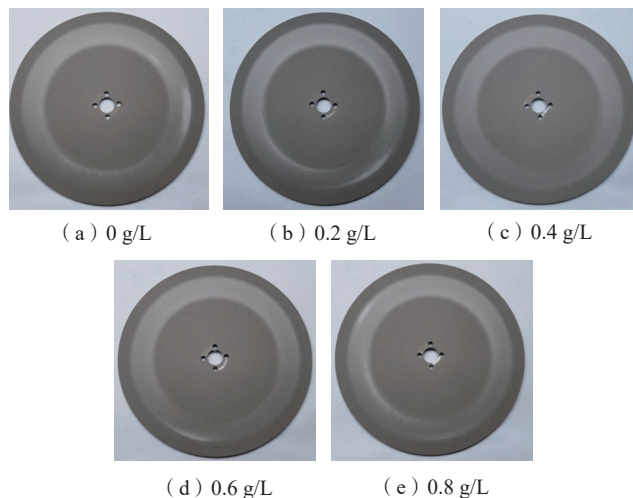


图 7 不同石墨烯浓度下制得的 MAO 膜层磨削试验后光学照片

Fig.7 Optical photos of MAO film prepared with different graphene concentrations after grinding tests

提高铝合金 MAO 膜层与基体的结合力及耐磨性。同时, 石墨烯的加入显著提高了膜层硬度, 这是由于石墨烯具有良好的力学性能, 且在电解氧化过程中会掺入膜层空隙中, 改善膜层初始形貌, 并与熔融态金属氧化物结合以提高膜层致密度, 从而促进膜层硬度增加^[22]。当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时, 膜层硬度达到 1227.68HV, 相比于未掺杂石墨烯的膜层 (708.88HV) 提高约 73%。

2.5 石墨烯浓度对铝合金 MAO 膜层耐蚀性的影响

为了考察 MAO 膜层的耐蚀性, 测试了试样在质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液中的极化曲线和交流阻抗谱, 相关数据如表 3 和图 9、10 所示。随着石墨烯浓

度的提高, 试样的自腐蚀电位 E 逐渐升高, 当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时, 自腐蚀电位 E 达到最大值 -0.414 V, 比空白样提高了 0.294 V, 自腐蚀电流密度 i 由 2.78×10^{-7} A/cm² 下降到 1.14×10^{-9} A/cm², 降低了两个数量级。此外, 结合电化学阻抗谱可以看出, 当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时, MAO 膜层的阻值达到最大, 为 $3.20 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 阻值越大说明发生腐蚀所受的阻力越大, 腐蚀速率越低。通过极化曲线和交流阻抗谱分析可以说明, 电解液中添加石墨烯在降低起弧电压的同时, 能够降低单脉冲击穿膜层的能量, 减小放电通道尺寸, 使得腐蚀液离子渗入膜层的阻力变大, 进而明显提高膜层耐蚀性; 其次, 放电结束之前, 在熔融物从孔道喷出之后, 弥散分布于电解液中的石墨烯随电解液进入放电通道, 石墨烯填充孔道对于阻碍腐蚀液离子的渗入起到了一定的作用^[23-24]。

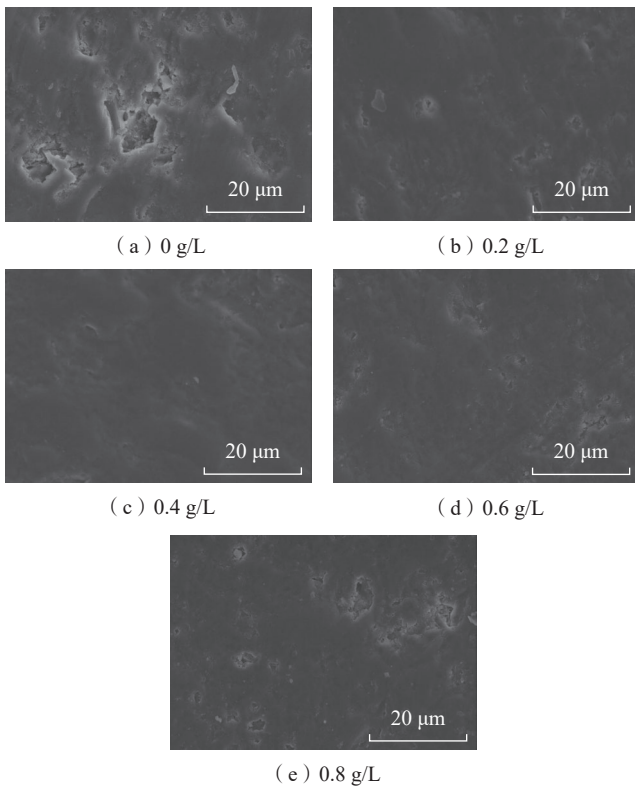


图 8 不同石墨烯浓度下制得的 MAO 膜层磨削试验后 SEM 照片
Fig.8 SEM photos of MAO film prepared with different graphene concentrations after grinding tests

表 3 试样在 3.5% 氯化钠溶液中的电化学测试数据

Table 3 Electrochemical data of samples in 3.5% sodium chloride solution

石墨烯质量浓度 / (g/L)	平衡电位 / V	腐蚀电流密度 $i / (\text{A}/\text{cm}^2)$	膜层电阻 R_f / Ω
0	-0.708	2.78×10^{-7}	1.27×10^4
0.2	-0.581	1.69×10^{-8}	1.15×10^5
0.4	-0.414	1.14×10^{-9}	3.20×10^5
0.6	-0.424	9.67×10^{-8}	2.56×10^5
0.8	-0.588	2.00×10^{-9}	9.87×10^4

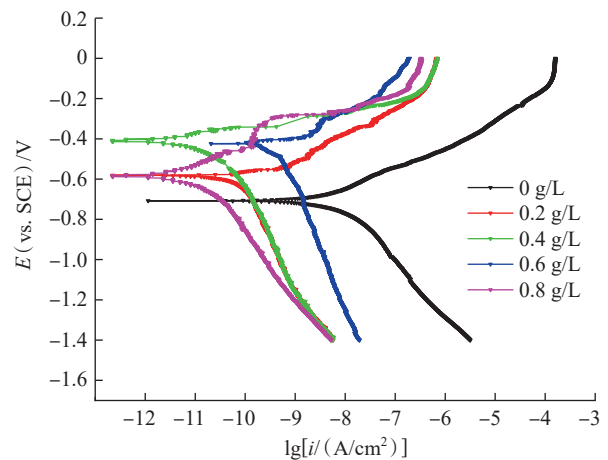


图 9 铝合金 MAO 膜层的极化曲线随石墨烯浓度的变化
Fig.9 Variations of polarization curves of aluminum alloy MAO films with different graphene concentrations

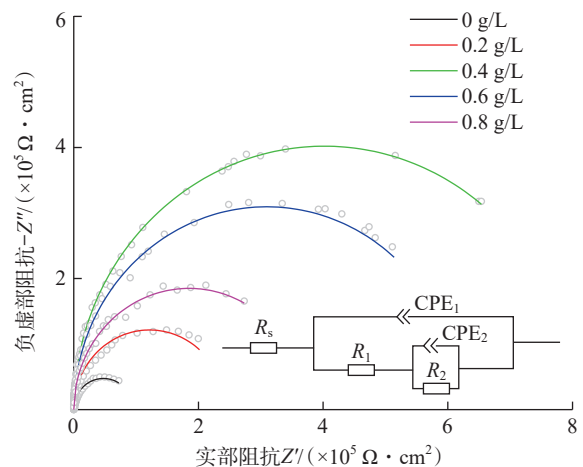


图 10 铝合金 MAO 膜层的电化学阻抗谱随石墨烯浓度的变化
Fig.10 Electrochemical impedance spectra of aluminum alloy MAO film with different graphene concentrations

3 结论

本研究通过在 MAO 电解液中加入 CMC 改性的石墨烯分散液,在 2A12 铝合金表面制备出石墨烯掺杂的 MAO 膜层,探讨了不同浓度石墨烯对铝合金微弧氧化膜层质量的影响,结论如下。

(1) 当 CMC 质量分数为 50% 时, Zeta 电位最负,达到 -43.83 mV,超过了胶体稳定性的理论值 -30 mV,石墨烯分散体系最稳定。

(2) 相比于未添加石墨烯的空白样, MAO 膜层中的微孔和微裂纹等缺陷得到显著改善,膜层致密平整,与基体结合紧密。

(3) 随着石墨烯浓度的增加, MAO 膜层的耐磨性、硬度和厚度得到了显著提高。当石墨烯质量浓度为 0.4 g/L 时,膜层的磨损量仅为 22.6 mg (减少了 8.2 mg),硬度达 1227.68 HV (提高约 73%),自腐蚀电位达到 -0.414 V (提高了 0.294 V),自腐蚀电流密度下降 2 个数量级。

参考文献

- [1] KITAGAWA K, AKITA T, KITA K, et al. Structure and mechanical properties of severely deformed Cu-Cr-Zr alloys produced by accumulative roll-bonding process[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 584-586: 791-796.
- [2] TIRINGER U, KOVAČ J, MILOŠEV I. Effects of mechanical and chemical pre-treatments on the morphology and composition of surfaces of aluminium alloys 7075-T6 and 2024-T3[J]. *Corrosion Science*, 2017, 119: 46-59.
- [3] WANG J H, DU M H, HAN F Z, et al. Effects of the ratio of anodic and cathodic currents on the characteristics of micro-arc oxidation ceramic coatings on Al alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 292: 658-664.
- [4] BAHRAMIAN A, HAKIMIZAD. et al. An investigation of the characteristics of Al_2O_3/TiO_2 PEO nanocomposite coating[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 13-26.
- [5] BANBUR-PAWLOWSKA S, MECH K, KOWALIK R, et al. Analysis of electrodeposition parameters influence on cobalt deposit roughness[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 388: 805-808.
- [6] ARIAS-GONZÁLEZ F, DEL VAL J, COMESAÑA R, et al. Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 374: 197-205.
- [7] KONG D J, LIU H, WANG J C. Effects of micro arc oxidation on fatigue limits and fracture morphologies of 7475 high strength aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 650: 393-398.
- [8] HE D L, LI G L, SHEN D J, et al. Effect mechanism of ultrasound on growth of micro-arc oxidation coatings on A96061 aluminum alloy[J]. *Vacuum*, 2014, 107: 99-102.
- [9] LI H, Y Z SUN, ZHANG J. Effect of ZrO_2 particle on the performance of micro-arc oxidation coatings on Ti6Al4V[J]. *Applied Surface Science: A Journal Devoted to the Properties of Interfaces in Relation to the Synthesis and Behaviour of Materials*, 2015, 342: 183-190.
- [10] DI S C, GUO Y P, LV H W, et al. Microstructure and properties of rare earth CeO_2 -doped TiO_2 nanostructured composite coatings through

micro-arc oxidation[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(5): 6178-6186.

- [11] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. *Nat Mater*, 2009, 6: 11-9.
- [12] KIRKLAND N T, SCHILLER T, MEDHEKAR N, et al. Exploring graphene as a corrosion protection barrier[J]. *Corrosion Science*, 2012, 56: 1-4.
- [13] PRASAI D, TUBERQUIA J C, HARL R R, et al. Graphene: Corrosion-inhibiting coating[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1102-1108.
- [14] YAZDANI B, XIA Y D, AHMAD I, et al. Graphene and carbon nanotube (GNT)-reinforced alumina nanocomposites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(1): 179-186.
- [15] CHEN Q Z, JIANG Z Q, TANG S G, et al. Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 423: 939-950.
- [16] 付肖肖. 镁合金表面氧化石墨烯复合涂层的构建及其耐腐蚀性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
- FU Xiaoxiao. Effect of graphene on microstructure and corrosion resistance of micro arc oxidation layer of magnesium alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2018.
- [17] YÜREKTÜRK Y, MUHAFFEL F, BAYDOĞAN M. Characterization of micro arc oxidized 6082 aluminum alloy in an electrolyte containing carbon nanotubes[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 269: 83-90.
- [18] CHANG L M. Growth regularity of ceramic coating on magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 468(1-2): 462-465.
- [19] 陈宏, 李佩, 朱晓宇, 等. 石墨烯浓度对镁基陶瓷膜生长及耐蚀性的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 285-292, 307.
- CHEN Hong, LI Pei, ZHU Xiaoyu, et al. Effect of graphene concentration on growth and corrosion resistance of magnesium based ceramic coating[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 285-292, 307.
- [20] SAH S P, TSUJI E, AOKI Y, et al. Cathodic pulse breakdown of anodic films on aluminium in alkaline silicate electrolyte-Understanding the role of cathodic half-cycle in AC plasma electrolytic oxidation[J]. *Corrosion Science*, 2012, 55: 90-96.
- [21] 胡海峰, 李晓, 王连海, 等. 石墨烯添加剂对 ZL109 铝合金活塞微弧氧化复合膜层摩擦性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(2): 231-235.
- HU Haifeng, LI Xiao, WANG Lianhai, et al. Effect of graphene on friction properties of micro-arc oxidation films produced on ZL109 aluminum alloy piston[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(2): 231-235.
- [22] 李兴明, 赵盖, 胡清元, 等. 氧化石墨烯对铝合金微弧氧化膜层力学和摩擦学性能的影响[J]. *材料保护*, 2023, 56(7): 1-9.
- LI Xingming, ZHAO Gai, HU Qingyuan, et al. Effects of graphene oxide on the mechanical and tribological properties of micro-arc oxidation coatings on aluminum alloy[J]. *Materials Protection*, 2023, 56(7): 1-9.
- [23] BARTOLUCCI S F, PARAS J, RAFIEE M A, et al. Graphene-aluminum nanocomposites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(27): 7933-7937.
- [24] YANG S L, DUAN Y F, WANG P, et al. Effect of $NdCl_3$ on characteristics of micro-arc oxidation coating formed on TC4 alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(18): 7931-7944.

通信作者: 李文, 高级工程师, 研究方向为航空装备腐蚀与防护、表面处理技术、电镀、阳极氧化、化学铣切、离子镀铝等。

(责编 阳光)