

恒压时间对 ADC12 合金恒流-恒压微弧氧化膜层组织与性能的影响

张广生¹, 韦利², 李军¹, 姜波¹, 王超¹, 宋仁国¹

(1.常州大学 a.材料科学与工程学院 b.江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏 常州 213164; 2.江苏省盐城技师学院, 江苏 盐城 224001)

摘要: **目的** 探究先恒流一定时间再恒压不同时间对 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响, 并从中选择较优的氧化时间组合。**方法** 选择双极性脉冲电源, 在先恒流 (11 A/dm^2) 35 min 后, 再恒压 (550 V) 不同时间 (5、15、25、35 min), 制备微弧氧化陶瓷膜层。通过采用扫描电子显微镜 (SEM)、金相显微镜、X 射线衍射仪 (XRD)、HT-600 摩擦磨损试验机、电化学工作站 (极化曲线、阻抗谱) 等设备来表征表面形貌、膜层厚度、物相组成、磨损率以及耐腐蚀性。**结果** 在先恒流再恒压下制备的微弧氧化膜层, 其厚度随着氧化时间的延长呈现先增长后下降的趋势。先恒流 35 min 再恒压 25 min 所制备的膜层厚度最厚, 为 $25 \mu\text{m}$; 微弧氧化膜层中都存在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y-Al}_2\text{O}_3$ 和 Al_2SiO_5 相; 随着氧化时间的延长, 微弧氧化膜层的磨损率出现先增长后下降的趋势。在先恒流 35 min 再恒压 5 min 所制备膜层的摩擦系数最小, 仅为 0.78。氧化时间的变化对 ADC12 铝合金 MAO 膜层耐蚀性的影响较大, 腐蚀电位随着氧化时间的延长呈现先上升后下降的趋势, 同时腐蚀电流的变化趋势也与腐蚀电位相同。综合考虑, 在先恒流 35 min 再恒压 25 min 所制备的膜层, 其耐腐蚀性较好。**结论** 先恒流 (11 A/dm^2) 35 min 再恒压 (550 V) 25 min 时所制备的微弧氧化膜层较厚, 致密性较好, 耐蚀性最佳。

关键词: ADC12 铝合金; 微弧氧化; 恒流; 恒压; 氧化时间; 膜层

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0356-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.035

Effect of Constant Pressure Time on Microstructure and Properties of Constant Current and Constant Pressure MAO Coatings on ADC12 Alloy

ZHANG Guang-sheng¹, WEI Li², LI Jun¹, JIANG Bo¹, WANG Chao¹, SONG Ren-guo¹

(1. a. School of Materials Science and Engineering, b. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Yancheng Technician College, Yancheng 224001, China)

收稿日期: 2020-12-11; 修订日期: 2021-05-14

Received: 2020-12-11; Revised: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51871031)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51871031)

作者简介: 张广生 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Guang-sheng (1995—), Male, Master, Research focus: metal corrosion and protection.

通讯作者: 宋仁国 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护、表面工程、计算材料科学等。

Corresponding author: SONG Ren-guo (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material corrosion and protection, surface engineering, computational materials science etc.

引文格式: 张广生, 韦利, 李军, 等. 恒压时间对 ADC12 合金恒流-恒压微弧氧化膜层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 356-363.

ZHANG Guang-sheng, WEI Li, LI Jun, et al. Effect of constant pressure time on microstructure and properties of constant current and constant pressure MAO coatings on ADC12 alloy[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 356-363.

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of the combination of the constant current first and then plus constant voltage on the microstructure and properties of ADC12 high Si-Al alloy micro-arc oxide coating and select the optimal oxidation time combination. The MAO coatings were prepared under constant current of 11 A/dm² for 35 min first and then plus constant voltage of 550 V for different oxidation time (5 min, 15 min, 25 min, 35 min) by bipolar pulse power, and they were studied by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), HT-600 friction and wear testing machine and electrochemical work station. The results showed the thickness of the coating first increased and then decreased as the oxidation time increases under the method of first constant current and then constant voltage, and When the oxidation time was the constant current for 35 min first and then plus constant voltage for 25 min, the thickness of the coating was 25 μm. α-Al₂O₃, γ-Al₂O₃ and Al₂SiO₅ phases existed in the MAO coating; with the increase of oxidation time, the wear rate of coating increases first and then decreases. And when the oxidation time was the constant current for 35 min first and then plus constant voltage for 5 min, the friction coefficient of the coating was the smallest, only 0.78; Different oxidation time had a significant effect on the corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy MAO coating. The corrosion potential increases first and then decreases with the increase of oxidation time. Meanwhile, the change trend of corrosion current is the same as that of corrosion potential. Hence, when the oxidation time was the constant current of 11 A/dm² for 35 min first and then plus constant voltage of 550 V for 25 min, the coating is of thicker coating, better density and better corrosion resistance.

KEY WORDS: ADC12 aluminum alloy; micro-arc oxidation; constant current; constant voltage; oxidation time; coating

ADC12 高硅铝合金，是一种 Al-Si-Cu 压铸铝合金，其中，硅含量（以质量分数计）为 12%，具有廉价、机械性能优异、压铸性能良好、轻质和刚度高等特点，适用于纺织、航天航空、空间技术和便携式电子器件等领域^[1-3]。然而，ADC12 铝合金本身的化学性质也会导致其表面发生腐蚀，这种现象会限制其在行业内的发展^[4]。随着铝合金工业的发展，对于高硅铝合金的需求也越来越多，用途也越来越广泛，因此对 ADC12 高硅铝合金进行表面处理和改性的研究也越来越多^[5]。

微弧氧化（micro-arc oxidation, MAO）是将 Al、Mg 等金属或者其合金放入电解液中作为阳极，放电过程中，在材料表面生成基体金属氧化物的陶瓷膜层的一种新型技术^[6-8]。这种氧化物陶瓷膜层改变了材料表面原有的性能，使其表面具有强度高、耐磨性好、耐高温能力强、耐腐蚀性好等特点。目前，许多学者^[9-11]只研究了单独的恒定电流或者电压对材料表面膜层结构和性能的影响，发现从微孔的孔径和分布的角度考虑时，恒流模式下，膜层表面的微孔孔径之间大小相差不大且微孔所在位置分布较为均匀；但在恒压模式下制备的氧化膜层，其表面的孔洞孔径之间大小差距较大且位置分布没有规律，较为混乱，这两种表面的微观结构在一定程度上也影响了膜层的耐腐蚀性。当从能耗角度考虑时，制备同一种金属氧化物膜层时，恒流下的单位能耗比恒压下的单位能耗多一倍，此时，采用恒压模式较为合适，可以节约成本。恒流与恒压的交互分为两种：先恒流再恒压和先恒压再恒流。根据恒流和恒压的优缺点，在能够节约能耗的前提下，考虑先恒流一定时间再恒压不同时间的条件下，研究其对膜层组织与性能的影响。同时，根据王

泽鑫等人^[11]的研究，先恒流再恒压的模式制备的 MAO 膜层致密性均匀，并且膜层具有较好的耐腐蚀性。

大部分纺织企业里使用的纺杯材料是 ADC12 高硅铝合金，为了延长纺杯的使用寿命、降低成本，现有的部分企业使用单一模式在 ADC12 高硅铝合金上制备 MAO 涂层，但这依然无法满足市场需求，因此使用混合模式进行微弧氧化的优势就显得尤为突出。本文研究了先在 11 A/dm² 下恒流 35 min，再在 550 V 恒压下处理不同时间，对 ADC12 铝合金 MAO 涂层组织和性能的影响。

1 实验

1.1 材料

ADC12 高硅铝合金的化学成分见表 1。使用 ADC12 高硅铝合金作为实验的基体，将其放在电解液中作为阳极。使用线切割机将 ADC12 铝合金切割成 30 mm×30 mm×4 mm 规格的试样，用三种规格的砂纸（600#、800#、1000#）将切割好的试样从粗到细打磨，直至试样表面光滑，最后超声清洗。实验使用的硅酸盐电解液是由 10 g/L Na₂SiO₃、1.5 g/L KOH、5 g/L (NaPO₃)₆、2 g/L Na₂WO₄ 以及 1 g/L EDTA 组成^[10]。在 30 ℃ 下，测得电解液的电导率为 11.25 S/cm，pH 值为 11.59。

表 1 ADC12 高硅铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ADC12 high silicon aluminum alloy

wt%								
Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Ni	Zn	Sn	Al
9.6~12.0	1.5~3.5	≤0.5	≤0.3	≤0.9	≤0.5	≤1.0	≤0.3	Bal.

1.2 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层的制备与表征

通过双脉冲脉冲电源^[12]对 ADC12 铝合金进行微弧氧化, 先在 11 A/dm^2 下恒流 35 min, 再在 550 V 下恒压处理不同时间 (5、15、25、35 min), 得到 4 种微弧氧化陶瓷膜层。在整个过程中, 如果开启机器, 立即达到预设的高压或者高电流, 这会对机器造成巨大的损害, 减少机器的使用寿命, 因此在时间设置上需要一个过渡期, 使机器在达到高压或高电流前, 存在一个缓冲期。在恒流 35 min 过程中, 双极性脉冲的正电压和负电压都是呈现上升趋势, 到 35 min 时, 正电压达到 546 V, 负电压达到 48 V; 当进入恒压阶段时, 正向电流达到 33 A, 负向电流达到 49 A。

使用 JSM-6510 扫描电子显微镜 (SEM) 在倍镜为 500 的条件下观察 ADC12 高硅铝合金陶瓷膜层表面的微观形貌。将试样镶嵌后, 使用金相显微镜来观察 ADC12 高硅铝合金膜层的截面特征以及膜层的厚度。使用 Rigaku D/max-2500 型 X 射线粉末衍射仪 (XRD), 在射线为 $\text{K}\alpha\text{-Cu}$ 射线, 2θ 角为 $10^\circ\sim 30^\circ$ 的条件下测试 ADC12 高硅铝合金膜层的相组成。通过电化学工作站来测试膜层在模拟海水 ($3.5\%\text{NaCl}$ 溶液) 中的耐腐蚀性能。采用 TH-240 膜厚仪测量每个样品的同一个区域, 分别测试 5 次, 取平均值。使用 HT-600 摩擦磨损试验机 (磨损半径 3 mm, 对磨材料为 SiC 球, 时间 30 min, 载荷 300 g) 对 ADC12 铝合金陶瓷膜层的耐磨性进行测试。

2 结果与讨论

2.1 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层的表面形貌

图 1 为先在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间所制备膜层的微观形貌。从图中可以看出, 膜层都呈现“火山口”形貌, 这种形貌是因为在微弧氧化过程中, 与基底接触的表面存在“放电通道”, 熔融氧化铝“喷射”出来, 到达最外层表面, 接触到电解液, 而由于电解液的冷却作用 (18°C), 熔融氧化铝会因为低温迅速凝固^[13], 导致其在“放电通道”口向四周扩散堆积。在恒流过程中, 瞬时功率迅速升高到一定程度时, 在出现短暂的波动之后, 便处于平稳状态, 这个阶段会使一些大孔径的微孔慢慢缩小, 使得整个表面的微孔孔径相差不大。但到了恒压阶段, 电流会出现先迅速增大后迅速减小的变化趋势, 这种变化趋势导致氧化膜被大电流高能击穿, 这样使更多的熔融物质在电解液的“冷却”作用下迅速析出和冷却, 并沉积在负载微孔周围, 但随着时间的延长, 电阻的增大会使部分能量无法二次击穿熔融氧化铝, 最后导致膜层的孔径大小差距较大。图 1a 和图 1b 中, 膜层的微孔数量较多且孔径大小不一致, 孔隙率较高, 致密性较差; 而图 1c 和图 1d 中, 膜层的微孔较少且孔径大小依旧不一致, 但是都出现了微裂纹且图 1d 中的微裂纹较多, 这说明氧化时间增加到一定时间后, 表面容易出现微裂纹, 微裂纹的存在

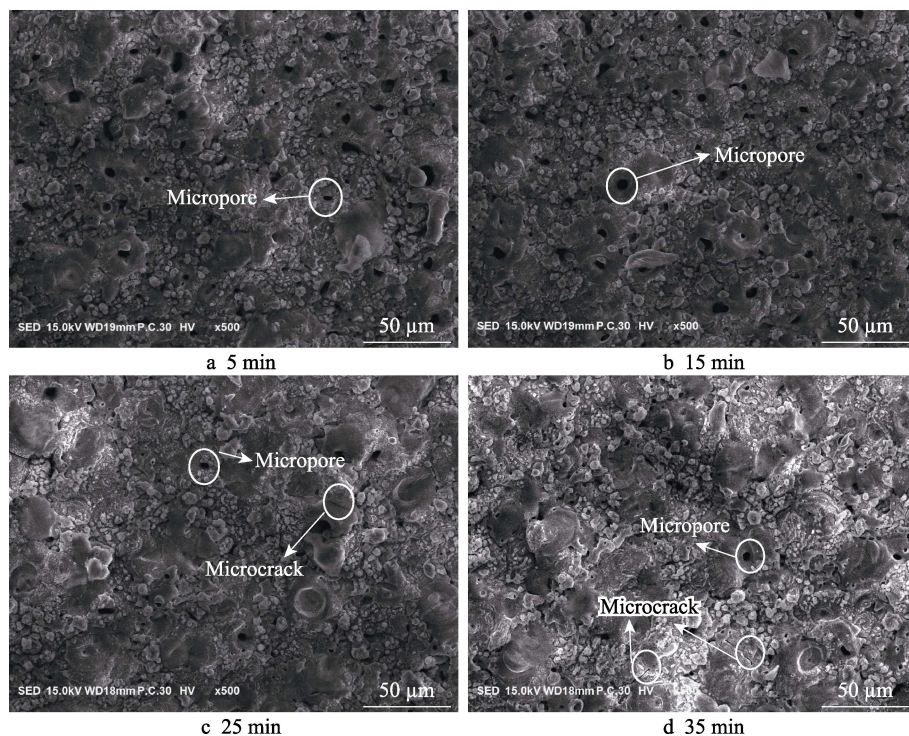


图 1 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层的微观形貌

Fig.1 Microstructure of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

在一定程度上不利于膜层表面的耐磨损和耐腐蚀性能。图 2 是先在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间下,微弧氧化膜层的厚度大小。图 3 是先在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间的微弧氧化膜层的截面形貌。结合图 2 和图 3,随着氧化时间的延长,膜层的厚度出现先增长后下降的趋势,这与氧化时间增长到 25 min 后,膜层表面出现微裂纹有关^[14](图 1d)。由于膜层中各个组成成分之间的热膨胀系数不同,随着温度的变化,会产生不同的热应力,这种现象会导致微裂纹的形成。当时间达到 25 min 后,这些微裂纹开始穿过表面,导致表面部分的膜层开始脱落,当时间达到 35 min 时,膜层厚度有所下降。先在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压 25 min 时所制得膜层的厚度最大(25 μm),膜层的孔隙率较少且致密度较高。

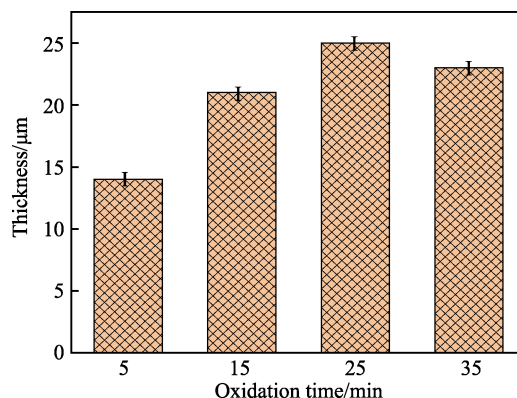


图 2 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层的厚度

Fig.2 The thickness of of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

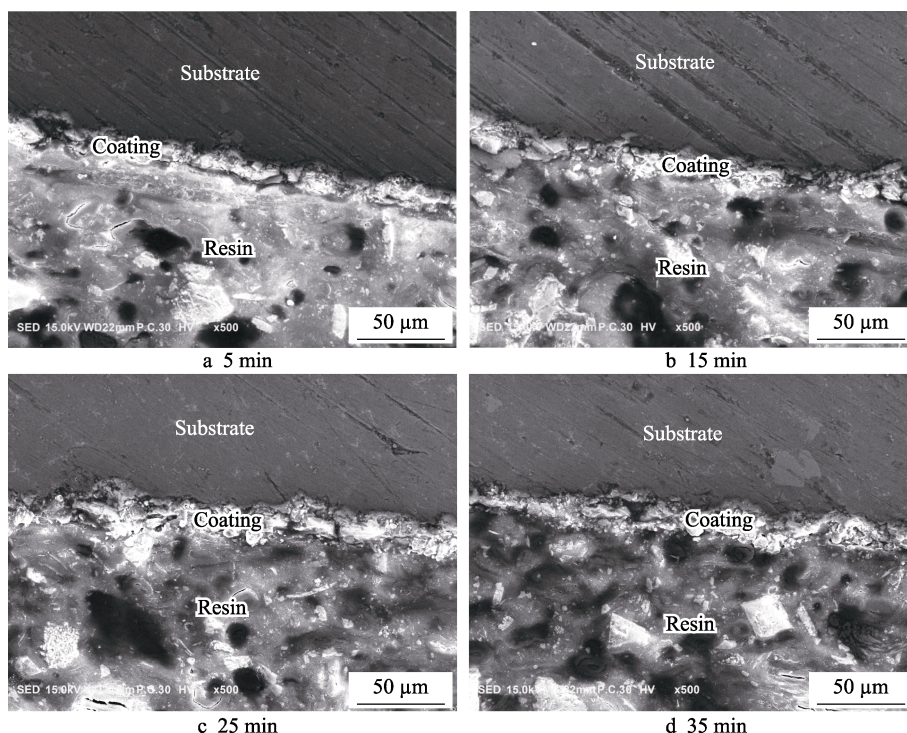


图 3 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层的微观截面形貌

Fig.3 Metallographic micrograph of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

2.2 物相分析

图 4 为在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间下,ADC12 铝合金 MAO 膜层微弧氧化膜层的 XRD 衍射图谱。从图中可以看出,微弧氧化膜层中都存在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 Al_2SiO_5 相。由于膜层较薄加上 X 射线的强度较高,射线穿过膜层,甚至可能穿过基底,从而检测出 Al 相^[15]。在微弧氧化过程中,放电通道中会形成等离子体热化学反应,这种反应与材料表面的 Al 发生化学反应,产生氧化铝($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$),其中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相可以使膜层

变硬,这有利于提高膜层的综合性能。然后 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相会软化膜层,降低膜层的综合性能^[16-19]。同时基底 ADC12 铝合金中的 Si 含量(以质量分数计)较高(12%),在放电状态下,部分 Si 和氧化铝反应生成 Al_2SiO_5 ^[20]。

2.3 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层的摩擦磨损性能

图 5 是在 11 A/dm^2 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间的微弧氧化膜层的摩擦系数-时间曲线。从图中可以看出,摩擦系数随着氧化时间的增长

而增长。当恒流 35 min 再恒压 5 min 时, ADC12 铝合金微弧氧化膜层的摩擦系数最小, 仅为 0.78, 膜层的磨损率低, 为 1.47×10^{-5} g/min。结合表 2, 可以看出, 氧化时间增长, 磨损率持续增大; 但先恒流 35 min 再恒压 35 min 时, 摩擦系数上下波动较大, 且磨损速率 (3.3×10^{-5} g/min) 略有下降, 这与膜层微观形貌和膜层厚度的变化趋势有一定的联系^[21-23], 此时膜层的厚度为 23 μm (图 2), 并且膜层表面出现较多微裂纹 (图 1d), 导致膜层表面不光滑, 微裂纹的存在使得对磨材料更容易磨损膜层, 同时从图 4 中看出, 该时间下的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相较多, 降低了材料的耐磨性能, 这几个因素使摩擦系数产生较大的波动^[24-26]。从图 5 中可以看出, 氧化 25 min 后, 样品在摩擦初期出现摩擦系数突然升高的现象。结合图 1, 当恒压时间为 25 min 时, 出现了微裂纹, 因此在摩擦初期, 对磨材料与试样表面的微裂纹接触, 使得摩擦系数突然升高, 一段时间后, 对磨材料与试样表面的接触相对平滑, 在摩擦后期, 摩擦系数波动相对平缓。

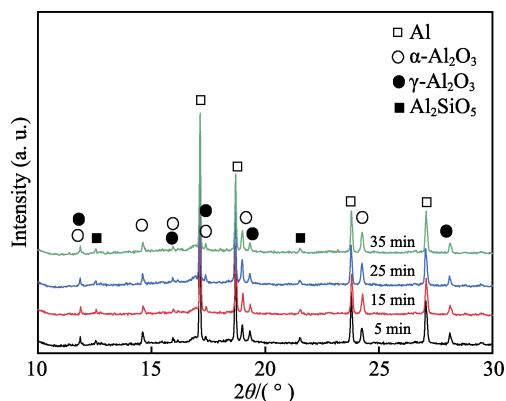


图4 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层微弧氧化膜层的 XRD 分析

Fig.4 XRD pattern of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

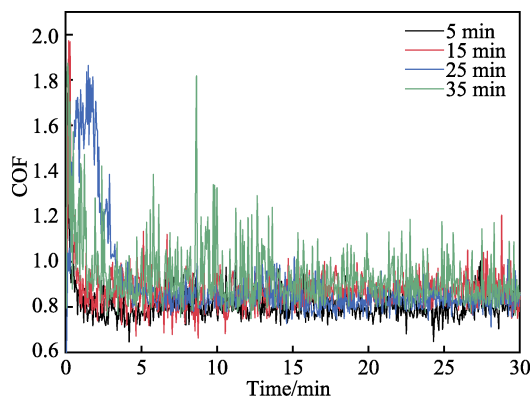


图5 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层摩擦系数随着时间的变化曲线

Fig.5 The wear resistance of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

表2 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层的磨损质量及磨损速率

Tab.2 Wear loss weight and wear rate of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

The oxidation time/min	Wear loss weight/g	Wear time/min	Wear rate/(g·min ⁻¹)
5	0.44×10^{-3}	30	1.47×10^{-5}
15	0.83×10^{-3}	30	2.77×10^{-5}
25	1.04×10^{-3}	30	3.47×10^{-5}
35	0.99×10^{-3}	30	3.3×10^{-5}

2.4 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层的耐腐蚀性能

图 6 为在 11 A/dm² 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间的微弧氧化膜层的动电位极化曲线。表 3 为对应的电化学参数。根据 Stern-Geary 方程^[27], 铝合金暴露在 NaCl 溶液中会迅速发生腐蚀, 然后在涂层表面产生 Al(OH)₃, 氧化物涂层起到阻挡层的作用, 提高耐蚀性, 因此腐蚀电位 (E_{corr})、 R_p 越高, 腐蚀电流密度 (J_{corr}) 越低, 膜层的耐腐蚀性

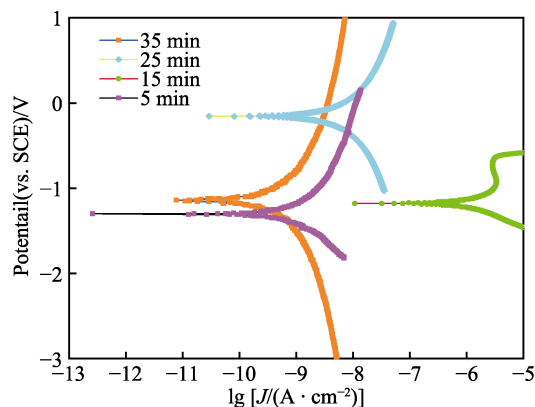


图6 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层的动电位极化曲线

Fig.6 Dynamic potential polarization curves of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time.

表3 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层电化学测试参数

Tab.3 Electrochemical measurement parameters of MAO coating on ADC12 aluminum alloy under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

The oxidation time/min	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	β_a/mV	β_c/mV	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
5	-1.3	3.42×10^{-6}	12	5.7	4.9×10^5
15	-1.18	3.45×10^{-4}	9.5	3.2	3.0×10^3
25	-0.15	2.65×10^{-5}	10.6	2.8	3.6×10^4
35	-1.14	1.49×10^{-5}	13	1.3	3.4×10^4

越好。结合图 6 和表 3，在恒流一定时间后，随着恒压时间的延长，腐蚀电位呈现先上升后下降的趋势，这可能与上述的孔隙率、致密性、相组成以及耐磨性等随着时间的变化趋势有关^[28-29]，同时，腐蚀电流的变化趋势与腐蚀电位的变化趋势相同。所以，当在 11 A/dm² 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压 25 min 时，腐蚀电位达到最高，为 -0.15 V，腐蚀电流密度为 2.65×10⁻⁵ A/cm²，电阻 R_p 达到 3.6×10⁴ Ω·cm²，同时

其膜层厚度较厚（图 2），孔隙率较低，致密度得到提高，膜层表面的微裂纹（图 1c）较少。

图 7 为在 11 A/dm² 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压不同时间的微弧氧化膜层的电化学阻抗谱。从图中可以看出，随着氧化时间的延长，电容出现回路现象，此时，存在电荷转移并且膜层的耐腐蚀性能与电容回路半径成正比^[30]。由此可以看出，恒压 25 min 时所制备的微弧氧化膜层的耐腐蚀性最好。

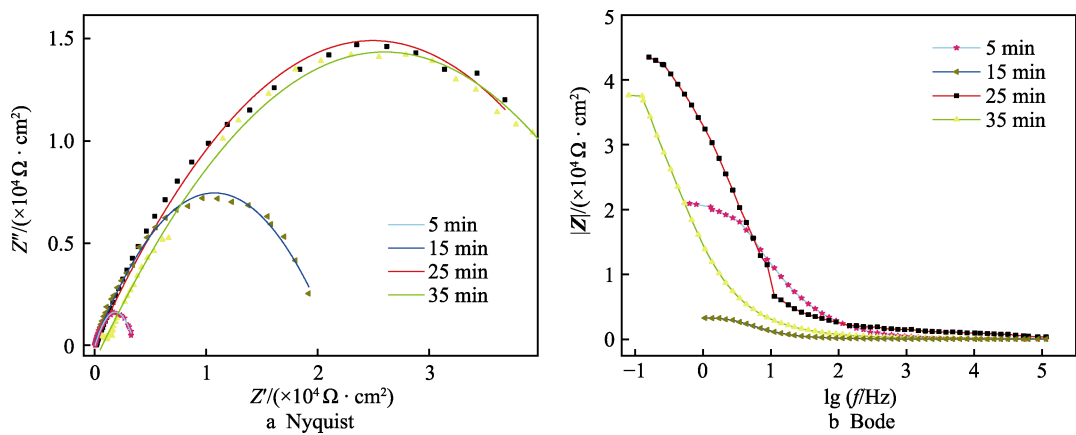


图 7 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层实验的 EIS 图和拟合结果

Fig.7 EIS Diagram and fitting results of ADC12 aluminum alloy on MAO coatings under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

根据交流阻抗测试的结果，建立不同氧化时间下膜层的等效电路图，如图 8 所示，相应的参数见表 4。其中， R_s 代表 3.5%NaCl 溶液的电阻， R_p 表征膜层最外层疏松层的电阻， R_b 表征膜层内部致密层以及膜层内部和基体结合部分的电阻。结合图 8 和表 4，可以发现，当恒压 25 min 时，电容达到最低，致密层的电阻最大，为 50 190 Ω·cm²，这个氧化时间（先恒流 35 min 再恒压 25 min）与动电位极化曲线分析得出的最佳氧化时间组合相吻合。综合以上因素，发现膜层的耐腐蚀性能与膜层厚度、微观形貌、相组成以及耐磨性都有一定的关联性^[31]。在 11 A/dm² 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压 25 min 制备膜层的厚度最大，为 25 μm，膜层表面孔隙率小，致密度高，此时微弧氧

化膜层的耐腐蚀性能达到最佳。

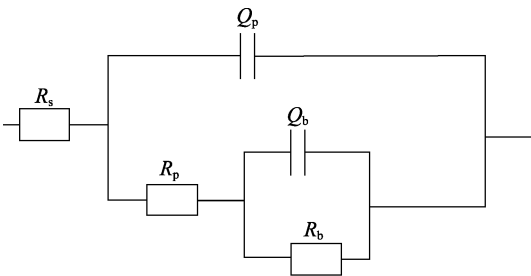


图 8 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层等效电路

Fig.8 Equivalent circuit diagram of ADC12 aluminum alloy on MAO coatings under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

表 4 恒流 35 min 再恒压不同时间下 ADC12 铝合金 MAO 膜层等效电路的具体参数

Tab.4 Fitting results of equivalent circuit of ADC12 aluminum alloy on MAO coatings under constant current for 35 min first and then plus constant voltage for different oxidation time

The oxidation time/min	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_p/(\Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^2)$	n_1	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_b/(\Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^2)$	n_2	$R_b/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
5	8.578	2.296×10^{-6}	0.663	149.3	1.656×10^{-7}	0.85	22 660
15	17.100	2.096×10^{-6}	0.766	28.9	1.332×10^{-5}	0.80	3972
25	0.881×10^{-3}	1.756×10^{-9}	1.000	132.9	1.216×10^{-5}	0.66	50 190
35	1.653×10^{-7}	7.839×10^{-8}	0.736	1306	3.788×10^{-6}	0.71	47 130

3 结论

1) 恒流一定时间后，ADC12 铝合金微弧氧化膜层的厚度随着恒压时间的增长呈现先增长后下降的

趋势。当先在 11 A/dm² 下恒流 35 min 再在 550 V 下恒压 25 min 所制备的膜层的表面致密性较好，膜层厚度最厚。

2) ADC12 铝合金微弧氧化膜层主要由 α-Al₂O₃、

Y-Al₂O₃ 和 Al₂SiO₅ 相组成。

3) 恒流一定时间后, ADC12 铝合金微弧氧化膜层的磨损率随着恒压时间的延长呈现先上升后保持平缓的趋势。

4) 恒流一定时间后再恒压不同时间对 ADC12 铝合金微弧氧化膜层的耐蚀性有显著的影响, 先恒流 35 min 再恒压 25 min 时所制备膜层的耐腐蚀性能最佳。

参考文献:

- [1] 雷欣, 林乃明, 邹娟娟, 等. 铝合金微弧氧化的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 10-22.
LEI Xin, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Research progress of micro-arc oxidation on aluminum alloys[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 10-22.
- [2] 歹利宾. 铝硅合金高效、高性能微弧氧化工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
DAI Li-bin. Study of the micro-arc oxidation process with high efficiency and high performance of aluminum-silicon alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [3] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(2): 159-166.
FAN Zhen-zhong, YUAN Wen-quan, WANG Duan-zhi, et al. Research status and future development trend of die casting aluminum alloys[J]. Foundry, 2020, 69(2): 159-166.
- [4] 李艳霞, 张巨成, 王云霄, 等. 高硅含量铝硅梯度合金制备及其组织、性能研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2017, 27(6): 1-4.
LI Yan-xia, ZHANG Ju-cheng, WANG Yun-xiao, et al. Preparation of Al-Si gradient alloy with high Si content and study of its microstructures and properties[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2017, 27(6): 1-4.
- [5] 温新, 王双成, 邵忠财. 高硅铝合金阳极氧化工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2018, 38(2): 45-47.
WEN Xin, WANG Shuang-cheng, SHAO Zhong-cai. Study on anodic oxidation technology for high silicon aluminum alloy[J]. Electroplating & pollution control, 2018, 38(2): 45-47.
- [6] 庄俊杰, 宋仁国, 项南, 等. 6063 铝合金微弧氧化膜层的腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(5): 492-498.
ZHUANG Jun-jie, SONG Ren-guo, XIANG Nan, et al. Corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 aluminum alloy[J]. Corrosion science and protection technology, 2017, 29(5): 492-498.
- [7] 李小晶, 文帅, 符博洋, 等. 负电压对 2A50 铝合金微弧氧化陶瓷层微观结构和耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 135-141.
LI Xiao-jing, WEN Shuai, FU Bo-yang, et al. Effect of negative voltage on microstructure and wear resistance of MAO ceramic coatings on 2A50 aluminum alloy[J]. Surface technology, 2019, 48(7): 135-141.
- [8] 刘金忠. 不同电源模式下电参数对 AM60B 微弧氧化膜的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
LIU Jin-zhong. Effects of electrical parameters on micro-arc oxidation coatings on AM60B under different power supply modes[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [9] SUN Xue-tong, JIANG Zhao-hua, XIN Shi-gang, et al. Composition and mechanical properties of hard ceramic coating containing α -Al₂O₃ produced by microarc oxidation on Ti-6Al-4V alloy[J]. Thin solid films, 2005, 471(1-2): 194-199.
- [10] 倪尔鑫, 严继康, 吴云峰, 等. 恒流及恒压模式对 TC4 钛合金微弧氧化膜层性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(7): 74-78.
NI Er-xin, YAN Ji-kang, WU Yun-feng, et al. Effects of constant current and voltage on structure and properties of MAO film on TC4 alloy surface[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(7): 74-78.
- [11] 王泽鑫, 张晋玮, 叶飞, 等. 不同电源模式下 ZK60 镁合金微弧氧化生物膜层性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(6): 26-34.
WANG Ze-xin, ZHANG Jin-wei, YE Fei, et al. Properties of bio-coating on ZK60 magnesium alloy by means of micro arc oxidation under different power modes[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2020, 34(6): 26-34.
- [12] YIN Jia-heng, CAO Yong-zhi. Research of laser-induced damage of aluminum alloy 5083 on micro-arc oxidation and composite coatings treatment[J]. Optics express, 2019, 27(13): 18232.
- [13] 张广生, 丁伟国, 姜波, 等. 电源模式对 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 97-103.
ZHANG Guang-sheng, DING Wei-guo, JIANG Bo, et al. Effects of power supply modes on the microstructure and properties of micro-arc oxidation coatings formed on ADC12 high silicon aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(8): 97-103.
- [14] 宋仁国. 微弧氧化技术的发展及其应用[J]. 材料工程, 2019, 47(3): 50-62.
SONG Ren-guo. Development and applications of micro-arc oxidation technology[J]. Journal of materials engineering, 2019, 47(3): 50-62.
- [15] ZONG Y, SONG R G, HUA T S, et al. Effects of current frequency on the MAO coatings on AA7050[J]. Surface engineering, 2020, 36(8): 809-816.
- [16] WANG Ping, GONG Ze-yu, LI Hong-lin, et al. Effect of CoSO₄ on the characteristics of micro-arc oxidation coatings[J]. Surface engineering, 2020, 36(2): 216-224.
- [17] CAGATAY OTER Z, AZAKLI Y, CENGİZ S, et al. Microarc oxidation of pure aluminium in alumina

- containing electrolytes[J]. Surface engineering, 2020, 36(8): 837-846.
- [18] 易奎杨. 不同硅含量铝合金微弧氧化膜层的制备及耐磨耐腐蚀性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- YI Kui-yang. Preparation and wear-resisting and corrosion-resisting property of coatings on different silicon content aluminum alloy by microarc oxidation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [19] 李康, 李文芳, 张果戈, 等. 不同硅含量铝合金的微弧氧化及膜层特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 1-7.
- LI Kang, LI Wen-fang, ZHANG Guo-ge, et al. Micro arc oxidation and layer characteristics of binary Al-Si alloys of different Si contents[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2015, 43(7): 1-7.
- [20] 李康. 铝硅合金微弧氧化工艺及硅的影响机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LI Kang. Micro arc oxidation (MAO) processing of Al-Si alloys and the investigation of the influence of silicon on their MAO layers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [21] YAO Yu-hong, YANG Wei, LIU Dong-jie, et al. Preparation and corrosion behavior in marine environment of MAO coatings on magnesium alloy[J]. Materials, 2020, 13(2): 345.
- [22] 李振伟, 狄士春. 2024 铝合金微弧氧化/TiC 复合膜的制备及耐磨性能[J]. 电加工与模具, 2016(4): 53-57.
- LI Zhen-wei, DI Shi-chun. Preparation and wear resistance of microarc oxidation composite coatings containing TiC particles on 2024 aluminum alloy[J]. Electromachining & mould, 2016(4): 53-57.
- [23] 刘小辉, 王帅星, 杜楠, 等. 电解液中 Na_2WO_4 对 Ti_2AlNb 微弧氧化膜结构及摩擦磨损性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(2): 84-92.
- LIU Xiao-hui, WANG Shuai-xing, DU Nan, et al. Effect of Na_2WO_4 in electrolyte on microstructure and tribological behavior of micro-arc oxidation coatings on Ti_2AlNb alloy[J]. Journal of materials engineering, 2018, 46(2): 84-92.
- [24] WEI Ke-jian, CHEN Lin, QU Yao, et al. Tribological properties of microarc oxidation coatings on zirlo alloy[J]. Surface engineering, 2019, 35(8): 692-700.
- [25] 王亚明, 邹永纯, 王树棋, 等. 金属微弧氧化功能陶瓷涂层设计制备与使役性能研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 20-45.
- WANG Ya-ming, ZOU Yong-chun, WANG Shu-qi, et al. Design, fabrication and performance of multifunctional ceramic coatings formed by microarc oxidation on metals: A critical review[J]. China surface engineering, 2018, 31(4): 20-45.
- [26] ZHU Li-hui, ZHANG Yu-meng, HU Tao, et al. Oxidation resistance and thermal stability of $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ and $\text{Ti}(\text{C}, \text{N}, \text{O})$ coatings deposited by chemical vapor deposition[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2016, 54: 295-303.
- [27] 汪兴汉, 张金龙, 陈迪朋, 等. 微弧氧化对 ZIRLO 合金耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(10): 3484-3489.
- WANG Xing-han, ZHANG Jin-long, CHEN Di-peng, et al. Effect of micro-arc oxidation on corrosion resistance of ZIRLO alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2020, 49(10): 3484-3489.
- [28] MA Chun-sheng, CHENG Dong, ZHU Xin-he, et al. Investigation of a self-lubricating coating for diesel engine pistons, as produced by combined microarc oxidation and electrophoresis[J]. Wear, 2018, 394-395: 109-112.
- [29] ZHANG Yu-lin, CHEN Fei, ZHANG You, et al. Influence of graphene oxide on the antiwear and antifricition performance of MAO coating fabricated on MgLi alloy[J]. Surface and coatings technology, 2019, 364: 144-156.
- [30] ZHANG Dong-ya, GE Yan-feng, LIU Guan-lan, et al. Investigation of tribological properties of micro-arc oxidation ceramic coating on Mg alloy under dry sliding condition[J]. Ceramics international, 2018, 44(14): 16164-16172.
- [31] 花天顺, 宋仁国, 宗玛, 等. 恒载荷下的微弧氧化后 7050 铝合金在不同 pH 值 NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 269-278.
- HUA Tian-shun, SONG Ren-guo, ZONG Yu, et al. Corrosion behavior of 7050 aluminum alloy after micro-arc oxidation under constant load in NaCl solution with different pH values[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 269-278.