

镀镍碳纳米管添加剂作用下的负向电压对 ZL109 铝合金微弧氧化陶瓷层的制备及耐磨性能影响

惠节¹, 孙长飞¹, 马春生^{2,3}

(1.江苏海事职业技术学院 轮机电气与智能工程学院, 南京 211170; 2.大连海事大学深圳研究院, 广东 深圳 518063; 3.大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 目的 提高铸造铝合金关键零部件的可靠性和耐用性, 推动微弧氧化表面处理技术的发展, 探索新型微弧氧化磁性纳米粒子电解液添加剂作用下的电源电压对微弧氧化陶瓷层的影响。方法 采用单因素控制法, 设置微弧氧化电源负向电压为 100、110、120、130、140、150、160 V, 向电解液体系中引入 0.8 g/L 镀镍碳纳米管添加剂, 利用扫描电子显微镜、光学轮廓仪、X 射线光电子能谱、X 射线衍射及自制的往复摩擦磨损试验机等, 对制备得到的微弧氧化陶瓷层的微观形貌、厚度、表面粗糙度、致密性、孔隙率、孔径及耐磨性能进行分析, 主要研究镀镍碳纳米管添加剂作用下的微弧氧化电源负向电压对 ZL109 铝合金微弧氧化陶瓷层的制备及耐磨性能的影响。结果 负向电压 140 V 制备得到的陶瓷层致密性好, 表面粗糙度 R_a 为 0.77 μm , 表面孔隙率为 2.05%, 平均孔径为 0.594 μm , 且具备一定的厚度 (11.5 μm) 和较好的耐磨性能 (磨损量为 0.13 mg)。结论 镀镍碳纳米管添加剂与电源正、负电压对微弧氧化反应过程存在着协同作用关系; 负向电压对微弧氧化反应过程、陶瓷层的微观形貌、厚度、致密性、表面粗糙度等影响显著。

关键词: 铸造铝合金; 微弧氧化; 负向电压; 耐磨性能; 磁性纳米粒子电解液添加剂; 镀镍碳纳米管

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0202-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.017

Effects of Negative Voltage on the Preparation and Wear Resistance of ZL109 Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation Ceramic Layers under the Action of Nickel-coated Carbon Nanotubes Additive

HUI Jie¹, SUN Chang-fei¹, MA Chun-sheng^{2,3}

(1. Department of Marine Electrical and Intelligent Engineering, Jiangsu Maritime Vocational and Technical College, Nanjing 211170, China; 2. Shenzhen Research Institute of Dalian Maritime University, Guangdong Shenzhen 518063, China;

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-08-24

Received: 2022-03-10; Revised: 2022-08-24

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(21KJB580010); 中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目(2021Szzvp015)

Fund: Supported by the Basic Science (Natural Science) Research Project of Jiangsu Province (21KJB580010); the Central Government Guides Local Science and Technology Development Funds to Freely Explore Basic Research Projects (2021Szzvp015)

作者简介: 惠节(1985—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为轮机工程技术。

Biography: HUI Jie (1985-), Male, Master, Lecturer, Research focus: marine engineering.

通讯作者: 马春生(1985—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为金属表面强化处理。

Corresponding author: MA Chun-sheng (1985-), Male, Master, Associate professor, Research focus: surface engineering for metal.

引文格式: 惠节, 孙长飞, 马春生. 镀镍碳纳米管添加剂作用下的负向电压对 ZL109 铝合金微弧氧化陶瓷层的制备及耐磨性能影响[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 202-209.

HUI Jie, SUN Chang-fei, MA Chun-sheng. Effects of Negative Voltage on the Preparation and Wear Resistance of ZL109 Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation Ceramic Layers under the Action of Nickel-coated Carbon Nanotubes Additive[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 202-209.

3. Department of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

ABSTRACT: In order to further improve the reliability and durability of key cast aluminum alloy parts, promote the development of micro-arc oxidation surface treatment technology, and explore the influence of positive and negative voltage of power supply with new micro-arc oxidation magnetic nanoparticles electrolyte additives on micro-arc oxidation ceramic layers. In this work, single factor control method is adopted, the negative voltage of micro-arc oxidation power supply is set as: 100 V, 110 V, 120 V, 130 V, 140 V, 150 V, 160 V, and 0.8 g/L nickel-plated carbon nanotubes additive is introduced into the electrolyte system, the micro-arc oxidation ceramic layers are analyzed by scanning electron microscope, optical profilometer, X-ray photoelectron spectroscopy, X-ray diffraction and a self-made reciprocating friction and wear testing machine in terms of micro morphology, thickness, surface roughness, compactness, porosity and pore size analysis and wear resistance property, the effects of negative voltage of micro-arc oxidation power supply on the preparation and wear resistance of ZL109 aluminum alloy micro-arc oxidation ceramic layers are analyzed.

In this paper, the micro-arc oxidation ceramic layers are prepared by a bipolar pulsed micro arc oxidation power supply. On the basis of the previous research results, the positive voltage varying by stages is good for preparing composite coatings. Therefore, in this work, the positive voltage of power supply is controlled manually in three stages: 360 V for 1-5 min, 400 V for 6-10 min, 440 V for 11-15 min. The total reaction time was 15 min. The composition of the electrolyte is: 4 g/L Na_2SiO_3 , 4 g/L Na_2WO_3 , 2 g/L KOH and 2 g/L EDTA-2Na. When the negative voltage is less than 110 V, large deep holes are unevenly distributed on the surface of the ceramic layers. When the negative voltage reaches 120 V, the porosity of the ceramic layers increases obviously, and relatively small deep pores are evenly distributed on the surface. However, when the negative voltage reaches 130 V and above, the surface of the ceramic layers is replaced by a large number of shallow pores with relatively uniform distribution. The main elements of the prepared ceramic layers are oxygen, aluminum, silicon and carbon, and the main phases are $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. In the reciprocating friction and wear tests, the ceramic layer prepared with negative voltage of 100 V shows overall wear on the surface, and the wear resistance of the ceramic layer is relatively poor, and the actual contact area of the friction pair is increased, so the friction coefficient is high. The friction coefficient of ceramic layers obtained by other negative voltages basically remained at about 0.4, among which, the friction coefficient of ceramic layer prepared by negative voltages 140 V is low, with small fluctuation and low wear. The wear surface morphology shows that the ceramic layer is only slightly worn locally, and the ceramic layer can basically keep the original surface morphology.

The ceramic layer prepared with negative voltage 140 V has good compactness, low surface roughness (R_a , 0.77 μm), the surface porosity is 2.05%, the average pore size is 0.594 μm , a certain thickness (11.5 μm) and good wear resistance (The wear loss is 0.13 mg). The results show that there is a synergistic relationship between nickel-coated carbon nanotubes and the positive and negative voltage of the power supply on the micro-arc oxidation reaction, the negative voltage has a significant effect on the micro-arc oxidation reaction process, the micro morphology, thickness, compactness and surface roughness of the ceramic layers.

KEY WORDS: cast aluminum alloy; micro-arc oxidation; negative voltage; wear-resisting property; magnetic nanoparticles electrolyte additives; nickel-plated carbon nanotubes

铸造铝合金正逐步广泛应用于船舶、汽车等发动机的活塞、气缸套等关键零部件^[1-2]。发动机活塞和气缸套表面常见的磨损形式有黏着磨损、磨粒磨损和腐蚀磨损等。铝合金质量轻、成本低,且易加工。然而,其耐磨性能有限,仅依靠铸造铝合金基体的性能无法满足发动机高功率密度、高可靠性的发展需求^[3-4]。因此,现代表面工程技术对铸造铝合金关键零部件的表面强化和防护领域发挥着巨大的作用。

现有相关表面工程技术,如电镀、热浸镀、磁控溅射、高能束表面改性、喷涂及气相沉积等技术在应用前景、涂层使用寿命、制造成本及承受负载能力等

方面,仍存在着不同程度的不足^[5-9]。电镀、热浸镀工艺中产生的废液、废气会危害环境,而目前其他工艺很难完全替代电镀,工业上对电镀行业的依赖和需求仍然强劲。磁控溅射、高能束表面改性技术设备昂贵、操作复杂,且生产效率较低^[10-12]。喷涂、气相沉积涂层与基体结合力有限,很难适应恶劣工况条件^[13-15]。

自 20 世纪末,铝合金微弧氧化技术引入国内以来,该技术在铸造铝合金表面耐磨强化处理、耐恶劣工况条件、绿色制造等领域受到广大学者的重点关注,且具有较好的应用前景^[16-18]。北京师范大学的薛文斌团队、哈尔滨工业大学的王亚明团队、中国科学

院兰州化学物理研究所的梁军团队近期在相关领域取得了优异的研究成果^[19-20]。为进一步提高微弧氧化陶瓷层的性能,学者们对微弧氧化电参数和电解液参数展开了大量的研究,取得了一定的成果^[21-24]。有学者通过控制微弧氧化电源正向电压、频率和占空比等调控陶瓷层的表面形貌,以此作为陶瓷基自润滑复合涂层的基底,并与电泳沉积技术相复合制备得到了减摩耐磨性能优异的自润滑复合涂层。有学者向 ZL109 微弧氧化电解液中引入碳纳米管添加剂,碳纳米管电解液添加剂显著影响了陶瓷层的生长过程,改变了陶瓷层的基本特征,提高了陶瓷层的耐磨性能。本课题组前期探索了不同浓度磁性纳米粒子添加剂对微弧氧化反应过程和陶瓷层性能的影响,研究得到,在微弧氧化反应电磁场的协同作用下,磁性纳米粒子添加剂的引入及浓度的变化对陶瓷层厚度、表面微观形貌等特征和性能产生了显著的影响。为进一步探索磁性纳米粒子添加剂对微弧氧化反应过程和陶瓷层性能的影响,课题组选择了镀镍碳纳米管作为电解液添加剂。因负向电压对陶瓷层的耐磨性能具有积极的促进作用,故本项目在引入镀镍碳纳米管电解液添加剂的同时,重点研究不同负向电压对 ZL109 铝合金微弧氧化陶瓷层的制备及耐磨性能影响。本工作的成果可为微弧氧化电解液添加剂的拓展提供一定的参考,进而对推动微弧氧化技术的发展进步具有重要的意义。

1 试验

在铸造铝合金 ZL109 (11%~13% Si, 0.5%~1.5% Cu, 0.8%~1.3% Mg, 0.8%~1.5% Ni, 残余 Al) 试样 (40 mm×10 mm×10 mm) 表面 (依次使用粒度为 400#、800#、1000#和 1500#的砂纸对表面进行研磨处理,待表面光滑平整后通过无水乙醇超声清洗 30 min), 利用 WD-20 型双极性脉冲微弧氧化电源制备微弧氧化陶瓷层。以蒸馏水为溶剂配制基础电解液 (4 g/L Na_2SiO_3 , 4 g/L Na_2WO_3 , 2 g/L KOH, 2 g/L EDTA-2Na)。在基础电解液中进一步引入 0.8 g/L 的镀镍碳纳米管 (微观形貌如图 1 所示,直径为 8~15 nm, 长度为 50 μm , 镍质量分数为 60%)。电源基础电参数设置为: 占空比 20%, 正负脉冲比 1:1, 频率 500 Hz。负向电压设置为 100、110、120、130、140、150、160 V。正向电压采用手动分段控制, 即 1~5 min 正向电压 360 V, 6~10 min 正向电压 400 V, 11~15 min 正向电压 440 V。总反应时间为 15 min。

通过 X 射线光电子能谱分析 (XPS, Phi5000 VersaProbe) 和 X 射线衍射仪 (XRD, EMPYREAN) 表征陶瓷层的化学组成。采用光学轮廓仪 (Contour GT-K) 分析陶瓷层的表面粗糙度。利用扫描电镜 (VEGA 3, TESCAN) 表征陶瓷层的厚度、表面和横截面微观形貌及结合状态。采用 Image J 软件表征陶

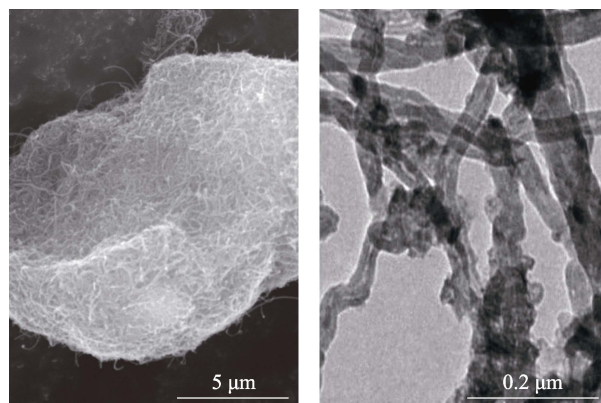


图 1 镀镍碳纳米管微观形貌

Fig.1 Microtopography of nickel-coated carbon nanotubes

瓷层表面孔隙率与平均孔径。利用划痕仪 (WS-2005) 分析涂层与基体间的结合强度, 载荷为 50 N, 加载速率为 50 N/min, 划痕速率为 3 mm/min, 作用时间为 2 min。通过自行研制的往复式摩擦磨损试验机在室温环境的贫油摩擦条件下分析陶瓷层摩擦学性能。摩擦磨损试验中的匹配件为硼铜铸铁气缸套试样 (100 mm×10 mm×2 mm), 载荷为 40 N, 接触面积为 0.1 cm^2 , 接触面的压强值为 4 MPa, 试验行程为 40 mm, 滑动速度为 0.2 m/s, 时间为 30 min。利用电子天平 (JJ224BC, 0.000 1) 测量陶瓷层试样的磨损量, 每个试样做 4 次重复试验, 最终结果为 4 次测量结果的平均值。

2 结果与分析

2.1 微弧氧化陶瓷层的表征

控制电源负向电压制备得到的陶瓷层表面微观形貌如图 2 所示, 横截面形貌如图 3 所示。如图 2 所示, 负向电压对微弧氧化陶瓷层的表面微观形貌影响显著。当负向电压小于 110 V 时, 陶瓷层表面不均匀地分布着尺寸较大的深孔。当负向电压达到 120 V 时, 陶瓷层的孔隙率明显上升, 表面相对均匀地分布着尺寸较小的深孔。然而, 当负向电压达到 130 V 及以上时, 陶瓷层表面被分布相对均匀的大量的浅孔所取代。陶瓷层表面从深孔到浅孔的变化是镀镍碳纳米管电解液添加剂与电源电压协同作用的结果。因为特有的电子结构, 碳纳米管具有优异的存储介电微充电能力, 进而增强了气膜两端的电场, 且凭借良好的导电性和热导率使试样表面电流更加均匀, 从而提高了陶瓷层的成膜质量和致密性^[23]。与此同时, 负向电压的主要作用是增强试样表面的气膜, 加速等离子体形成, 同时提高试样表面的电子密度和电子电流, 最终使微弧氧化反应更加剧烈^[25]。此外, 在微弧氧化反应电磁场的作用下, 梯度磁场与金属镍的相互作用使得镀镍碳纳米管富集于试样表面, 进一步提升了碳纳米

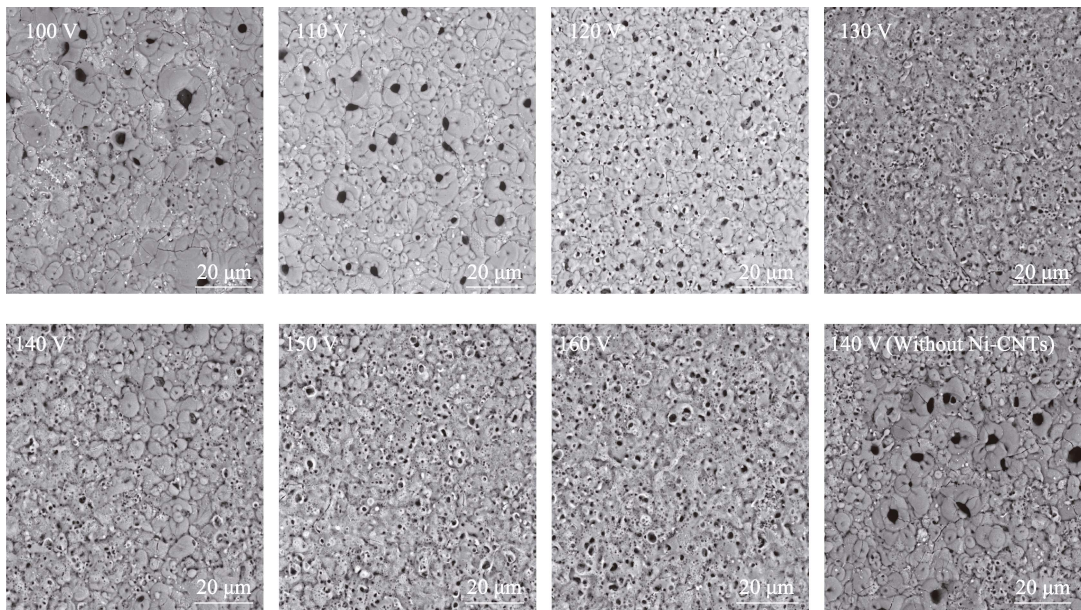


图 2 陶瓷层的表面微观形貌
Fig.2 Surface morphology of micro-arc oxidation ceramic layers

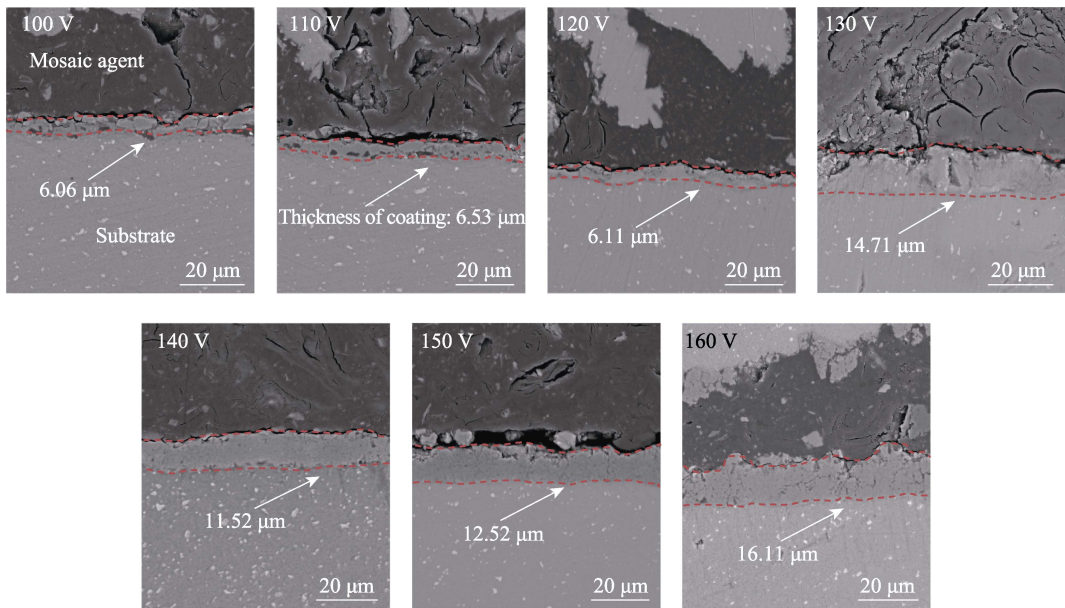


图 3 陶瓷层横截面微观形貌
Fig.3 Cross-section morphology of micro-arc oxidation ceramic layers

管的作用效果。如图 2（140 V 无镀镍碳纳米管）所示，在电解液中不含镀镍碳纳米管的条件下，负向电压 140 V 得到的陶瓷层表面仍呈现一定的不均匀深孔形貌。因此，当负向电压升高时，在镀镍碳纳米管电解液添加剂的协同作用下，陶瓷层表面的微孔呈现由不均匀的深孔至均匀的浅孔的变化趋势。

陶瓷层厚度和表面粗糙度的表征结果如图 4 所示。伴随负向电压的增加，微弧放电通道数量增加，反应更加剧烈，故陶瓷层厚度总体呈上升趋势。然而，当负向电压在 100~120 V 时，陶瓷层厚度的变化并不明显。因此，在一定工艺参数条件下，负向电压需达

到一定的水平时才能够对反应产生显著的影响，这恰与图 2 中 100~120 V 陶瓷层表面形貌的变化形成良好的印证。同时，当负向电压为 140~150 V 时，陶瓷层的厚度出现小幅下降，结合陶瓷层横截面形貌和表面粗糙度数值可得到：此时生成的陶瓷层致密性较好、表面粗糙度最低。通过划痕仪分析得到，负向电压 140 V 和 150 V 制备得到的陶瓷层具有较高的结合强度（60~70 N），高于其他陶瓷层（100~120 V：20~30 N；130 V：40~50 N；160 V：50~60 N）。这是因为电源正向电压与负向电压存在着相互匹配的关系^[25]。正向电压的主要作用是加速膜层内外物质的输送，而负

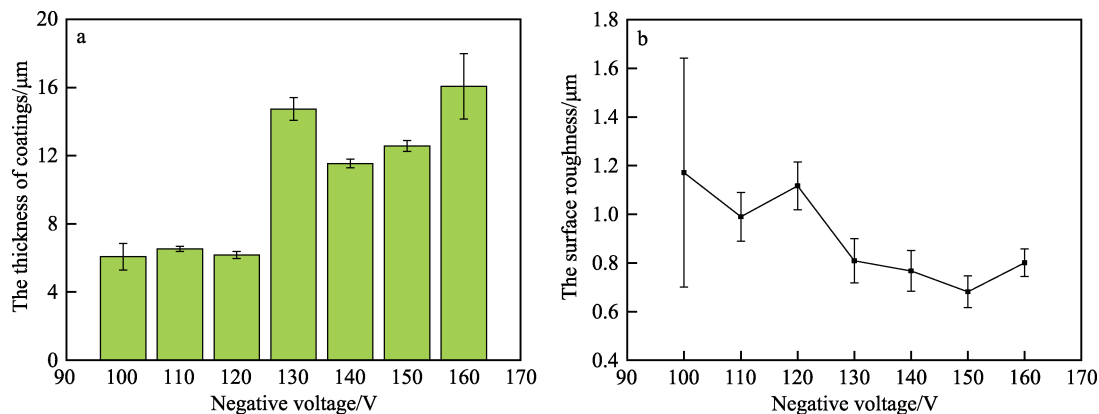


图4 陶瓷层厚度和表面粗糙度
Fig.4 Thickness and surface roughness of the ceramic layers

向电压是增加膜层物质输送的通道,因此,只有当正、负向电压匹配适合时才会生成质量较好的陶瓷层。此外,在以往的试验中,负向电压的提升会提高陶瓷层的表面粗糙度,对陶瓷层的耐磨性能产生不利影响。但本工作中镀镍碳纳米管添加剂的引入,改进了陶瓷层的成膜质量,使得陶瓷层的表面粗糙度随着膜厚的增加总体逐步减小。

随着负向电压的增加,陶瓷层表面的孔隙率、孔径分布变化显著。孔隙率、平均孔径分析结果如图5所示。陶瓷层的孔隙率、平均孔径呈现相似的变化规律。负向电压自100 V增加至120 V时,孔隙率和平均孔径逐步增大;负向电压自120 V增加至140 V时,孔隙率和平均孔径逐步减小;负向电压增加至140 V以上时,孔隙率和平均孔径又急速升高。如上所述,负向电压会加速等离子体形成,提高试样表面电流,从而加剧微弧氧化反应;陶瓷层表面的微孔形成于微弧氧化反应中的击穿放电通道。因此,微弧氧化反应越剧烈,电流越大,陶瓷层表面形成的微孔尺寸越大。当负向电压较低时,微弧氧化反应变化较小,因此孔隙率和平均孔径在初期缓慢升高(100~120 V)。因电源正、负向电压对微弧氧化反应过程的协同作用,并伴随着陶瓷层厚度的增加(击穿更加困难),孔隙率

和孔径在120~140 V呈现出下降的趋势。然而,当负向电压提高至140 V以上时,其所带来的增加膜层物质输送通道的效果更加显著,从而使陶瓷层表面的孔隙率和平均孔径又急速提升。良好的耐磨性能需要陶瓷层具有一定的厚度、优异的致密性和较低的表面粗糙度,同时表面具备适宜的孔隙率有助于进一步制备复合涂层和储存润滑油(如松孔镀铬)^[26]。因此,在本试验条件下,负向电压140~150 V左右制备得到的陶瓷层有望在接续的摩擦磨损试验中取得较好的结果。

2.2 陶瓷层的化学组成

陶瓷层的物相组成如图6所示,化学元素组成如图7所示。根据XRD分析结果,本试验制备得到的陶瓷层主要物相组成为 α - Al_2O_3 和 γ - Al_2O_3 。衍射图谱中显著的Al峰是因为陶瓷层相对较薄,X射线已穿过陶瓷层到达铝合金基体。XRD图谱中无显著碳纳米管衍射峰,故镀镍碳纳米管添加剂未直接参与成膜。 α - Al_2O_3 相较致密,有益于陶瓷层的耐磨性能; γ - Al_2O_3 相疏松多孔,不利于陶瓷层的耐磨性能^[21-22]。因此,依据XRD衍射图谱,负向电压140~150 V左右制备得到的陶瓷层的物相组成有益于陶瓷层耐磨性能的发挥。

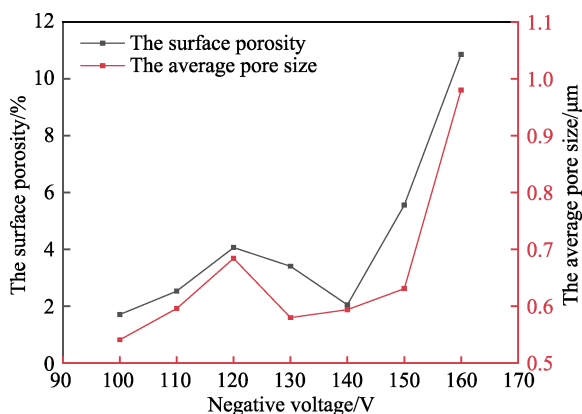


图5 陶瓷层表面孔隙率和平均孔径
Fig.5 Surface porosity and average pore size of the ceramic layers

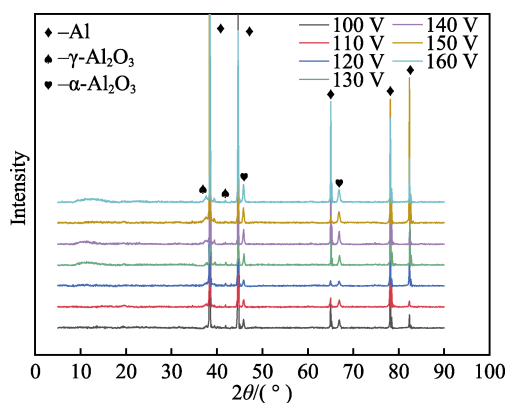


图6 微弧氧化陶瓷层的物相组成
Fig.6 Phase composition of micro-arc oxidation ceramic layers

负向电压 140 V 制备得到的陶瓷层表面 XPS 分析结果如图 7 所示。根据 XPS 图谱, 可得到: 陶瓷层的主要化学元素组成为 C、O、Si、Al, 定量分析结果如图 7 所示。C 1s 分峰拟合结果显示, 碳源主要

来自外部污染, 陶瓷层表面无显著的碳纳米管峰。Ni 元素的含量低于 0.1%, 进一步证明镀镍碳纳米管未显著直接参与成膜。另外, Si 元素来自铸造铝合金基体和电解液。

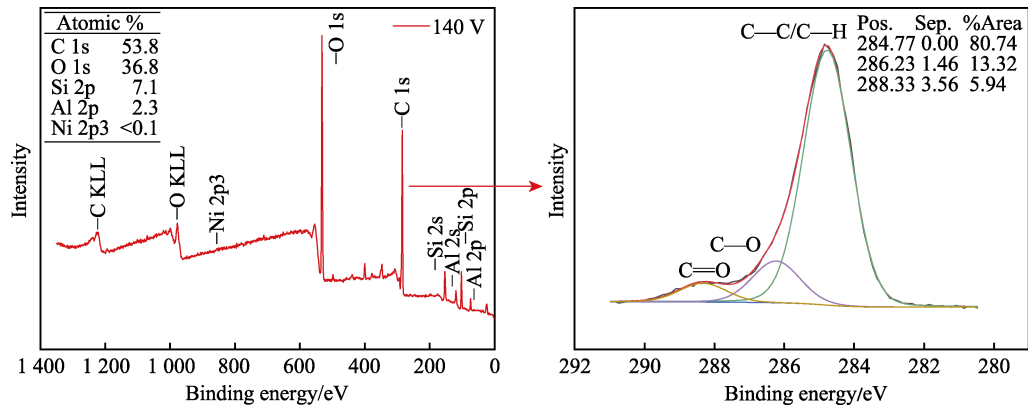


图 7 负向电压 140 V 制备得到的陶瓷层表面 XPS 能谱和 C 1s 分峰拟合结果
Fig.7 XPS spectra of the ceramic surface prepared at negative voltage 140 V and C 1s peak fitting results

2.3 摩擦磨损试验

微弧氧化陶瓷层摩擦因数曲线如图 8 所示。摩擦磨损试验中的对照组为未添加镀镍碳纳米管的普通微弧氧化陶瓷层试样 (负向电压为 120 V, 正向电压为 340、380、420 V, 每阶段反应时间为 4 min, 频率为 500 Hz, 占空比为 20%)。陶瓷层磨损表面形貌如图 9 所示。陶瓷层磨损量如图 10 所示。

如图 9 所示, 微弧氧化陶瓷层表面呈现明显的磨粒磨损。如图 8 所示, 空白件的摩擦因数较低, 摩擦因数波动较大; 这主要是由于空白件表面形成了显著的磨痕, 磨痕的出现减少了摩擦副实际接触面积, 从而使摩擦力较小。负向电压

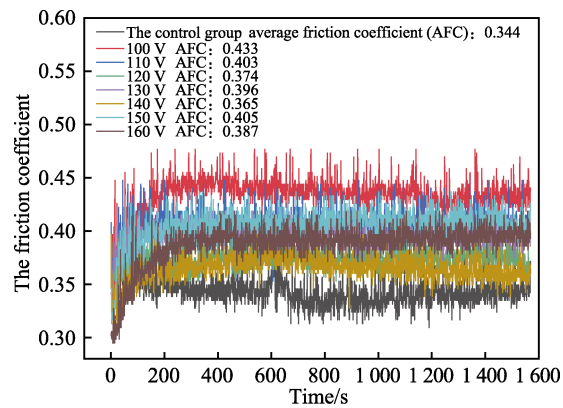


图 8 微弧氧化陶瓷层摩擦因数曲线
Fig.8 Friction coefficient curves of ceramic layers

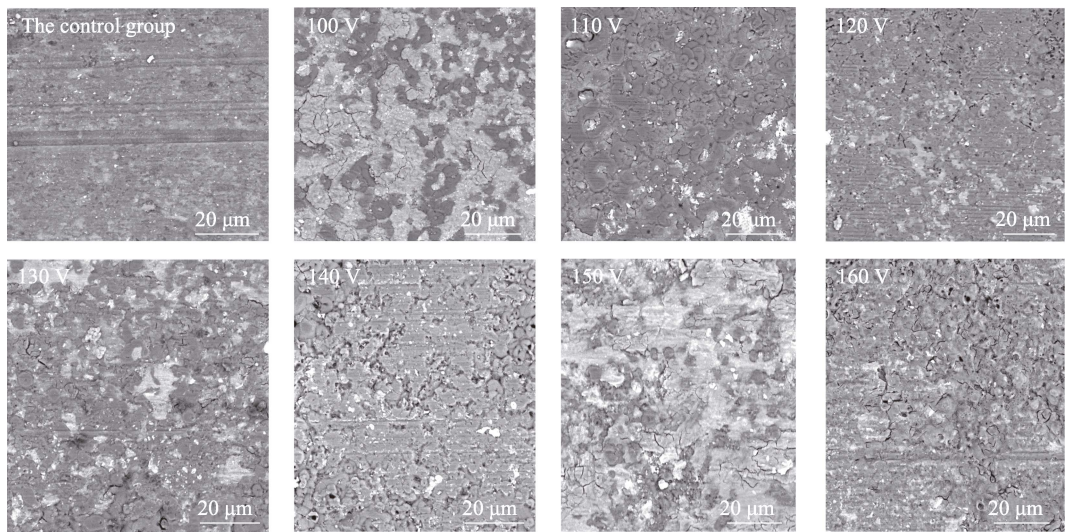


图 9 陶瓷层摩擦磨损表面形貌
Fig.9 Surface morphology of friction and wear of ceramic layers

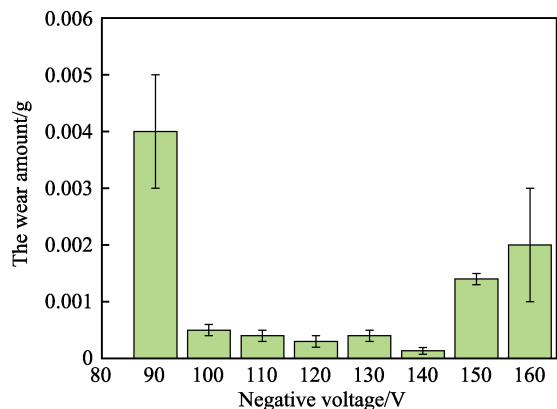


图10 微弧氧化陶瓷层磨损量

Fig.10 Wear amount of micro-arc oxidation ceramic layers

100 V 制备得到的陶瓷层表面出现全面磨损, 陶瓷层的耐磨性相对较差, 并提高了摩擦副的实际接触面积, 故摩擦因数较高(图8红色曲线)。其他负向电压得到的陶瓷层摩擦因数基本保持在0.4左右。如图4所示, 负向电压100~130 V得到的陶瓷层具有较高的表面粗糙度, 且致密性相对较差(图2), 故磨损量略高于负向电压140 V得到的陶瓷层。如图5所示, 当负向电压升高至150~160 V时, 陶瓷层的孔隙率显著提升, 致密性变差。致密性是影响陶瓷层耐磨性能的显著因素。因此, 在摩擦磨损过程中, 150~160 V制备得到的陶瓷层展示出了较高的磨损量。负向电压140 V制备得到的陶瓷层摩擦因数较低, 且波动较小, 磨损量较低(图10, 0.13 mg); 与文献[23]优化结果相对比, 磨损量降低了35%; 磨损表面形貌显示该陶瓷层仅在局部出现轻微磨损; 摩擦磨损后, 陶瓷层能够基本保持原始表面形貌。故在本试验条件下, 负向电压的优化结果为140 V。

3 结论

1) 负向电压与正向电压、镀镍碳纳米管电解液添加剂存在着协同作用关系。通过合理控制负向电压的大小, 可制备得到致密性好、表面粗糙度低, 且具备一定厚度和较好耐磨应用前景的微弧氧化陶瓷层。

2) 在本试验条件下, 镀镍碳纳米管电解液添加剂未显著直接参与陶瓷层的成膜。所制备得到的陶瓷层主要元素组成为氧、铝、硅、碳等, 主要物相组成为 α - Al_2O_3 和 γ - Al_2O_3 。

3) 负向电压140 V制备得到的复合陶瓷层厚度约为11.5 μm , 表面粗糙度 R_a 约为0.77 μm , 表面孔隙率为2.05%, 平均孔径为0.594 μm ; 在摩擦磨损试验中, 摩擦因数较低, 磨损量较小, 磨损表面基本能够保持原始形貌, 故其具有较好的耐磨性能。

参考文献:

[1] 贾海龙, 周文强, 王思清, 等. 高性能挤压铸造铝合金研

究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1187-1194.
JIA Hai-long, ZHOU Wen-qiang, WANG Si-qing, et al. Research Progress in High Performance Squeeze Cast Aluminum Alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1187-1194.

[2] 王波, 许晓东, 赵东宏. 合金化对汽车活塞用铸造铝合金的组织性能影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(5): 68-71.

WANG Bo, XU Xiao-dong, ZHAO Dong-hong. Effect of Alloying on Microstructure and Properties of Cast Aluminum Alloy for Automobile Piston[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(5): 68-71.

[3] 张国伟, 牛经纬. SiC 颗粒增强铸造铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2021, 50(5): 1-6.

ZHANG Guo-wei, NIU Jing-wei. Research Progress of SiC Particles Reinforced Cast Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(5): 1-6.

[4] 王立新, 宋鸿武. 温度对铸造 Al-Si9-Cu3-Fe1 合金缸体力学性能与高周疲劳性能的影响[J]. 上海金属, 2020, 42(4): 56-60, 65.

WANG Li-xin, SONG Hong-wu. Effect of Temperature on Mechanical Properties and High-Cycle Fatigue Property of Cast Al-Si9-Cu3-Fe1 Alloy Cylinder Block[J]. Shanghai Metals, 2020, 42(4): 56-60, 65.

[5] 洪子康, 骆伟岚, 朱巧莲, 等. 热处理温度对窄深槽类零件环保铬镀层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 144-148.

HONG Zi-kang, LUO Yi-lan, ZHU Qiao-lian, et al. Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Properties of Environmentally Friendly Chromium Layer of Narrow and Deep Groove Parts[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(2): 144-148.

[6] 葛玉麟, 赵春玲, 詹中伟, 等. 镍基耐磨复合电镀层的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(22): 1523-1527.

GE Yu-lin, ZHAO Chun-ling, ZHAN Zhong-wei, et al. Research Progress of Wear-Resistant Electrodeposited Nickel-Based Composite Coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(22): 1523-1527.

[7] 崔桂彬, 鞠新华, 尹立新, 等. 热浸镀铝硅镀层微观组织结构表征[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 375-381.

CUI Gui-bin, JU Xin-hua, YIN Li-xin, et al. Characterization of Microstructure of Hot-Dip Al-Si Coating[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 375-381.

[8] 罗朋, 王晓波, 巩春志, 等. 磁控溅射制备高熵合金薄膜研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(5): 53-66.

LUO Peng, WANG Xiao-bo, GONG Chun-zhi, et al. Research Progress of High Entropy Alloy Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(5): 53-66.

[9] 冯力, 王贵平, 李洞亭, 等. 冷喷涂辅助原位合成高铝青铜涂层的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(5): 1720-1726.

FENG Li, WANG Gui-ping, LI Dong-ting, et al. Microstructure and Performance of Cold Spray-Assisted In-Situ

- Synthesized High Aluminum Bronze Coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(5): 1720-1726.
- [10] 刘永, 张凡云, 施国梅, 等. 高能束表面改性技术在航空制造中的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(S1): 41-43, 52.
- LIU Yong, ZHANG Fan-yun, SHI Guo-mei, et al. Application of Power Beam Surface Modification for Aeronautical Manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(S1): 41-43, 52.
- [11] 宋强, 仇性启. 高能束技术在镁合金表面改性中的应用[J]. *材料导报*, 2012, 26(5): 109-112.
- SONG Qiang, QIU Xing-qi. Application of High Energy Beam in Surface Modification of Magnesium Alloys[J]. *Materials Review*, 2012, 26(5): 109-112.
- [12] 王晓倩, 赵晋, 刘建勇. 磁控溅射薄膜生长的模拟方法[J]. *表面技术*, 2022, 51(2): 156-164.
- WANG Xiao-qian, ZHAO Jin, LIU Jian-yong. Simulation Method of Magnetron Sputtering Film Growth[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(2): 156-164.
- [13] 陈永雄, 罗政刚, 梁秀兵, 等. 热喷涂技术的装备应用现状及发展前景[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(4): 12-18.
- CHEN Yong-xiong, LUO Zheng-gang, LIANG Xiu-bing, et al. Development Status and Prospect on Equipment Application of Thermal Spray Technology[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(4): 12-18.
- [14] 黄春杰, 殷硕, 李文亚, 等. 冷喷涂技术及其系统的研究现状与展望[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 1-23.
- HUANG Chun-jie, YIN Shuo, LI Wen-ya, et al. Cold Spray Technology and Its System: Research Status and Prospect[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 1-23.
- [15] 郭秦敏, 秦志辉. 气相沉积技术在原子制造领域的发展与应用[J]. *物理学报*, 2021, 70(2): 199-213.
- GUO Qin-min, QIN Zhi-hui. Development and Application of Vapor Deposition Technology in Atomic Manufacturing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 199-213.
- [16] 赵华星, 孙晓峰, 宋巍, 等. 微弧氧化技术在铝合金腐蚀防护中的应用研究与发展[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21236-21242.
- ZHAO Hua-xing, SUN Xiao-feng, SONG Wei, et al. Application Research and Development of Micro-Arc Oxidation Technology in Corrosion Protection of Aluminum Alloy Equipment[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(21): 21236-21242.
- [17] 雍家惠, 李宏战, 李争显, 等. 微纳米颗粒添加剂在镁合金微弧氧化涂层中的应用研究现状[J]. *稀有金属*, 2021, 45(10): 1230-1240.
- YONG Jia-hui, LI Hong-zhan, LI Zheng-xian, et al. Research Status of Application of Micro-Nano Additives in Micro-Arc Oxidation Coatings Formed on Magnesium Alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(10): 1230-1240.
- [18] 薛文斌. “微弧氧化在腐蚀领域中的应用”专题序言[J]. *表面技术*, 2021, 50(6): 6, 5.
- XUE Wen-bin. Preface of “Application of Micro-Arc Oxidation in Corrosion Field”[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(6): 6, 5.
- [19] 王树棋, 王亚明, 邹永纯, 等. 微弧氧化涂层微纳米孔调控及功能化应用研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(6): 1-22.
- WANG Shu-qi, WANG Ya-ming, ZOU Yong-chun, et al. Generation, Tailoring and Functional Applications of Micro-Nano Pores in Microarc Oxidation Coating: A Critical Review[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(6): 1-22.
- [20] 刘思勤, 齐玉明, 彭振军, 等. 不同电解液中镁合金微弧氧化膜生长过程及腐蚀防护性能[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(6): 1213-1221.
- LIU Si-qin, QI Yu-ming, PENG Zhen-jun, et al. Growth Process and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxide Coatings on Magnesium Alloy in Different Electrolytes[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(6): 1213-1221.
- [21] 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.
- [22] MA Chun-sheng, LIU Jian, ZHU Xin-he, et al. Optimization of Surface Texture Fabricated by Three-Step Microarc Oxidation for Self-Lubricating Composite Coating of Diesel Engine Piston Skirts[J]. *Wear*, 2021, 466-467: 203557.
- [23] 赵春生, 刘正祥, 马春生. 碳纳米管添加剂对 ZL109 铝合金微弧氧化陶瓷层的生长及耐磨性能影响[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(12): 93-98.
- ZHAO Chun-sheng, LIU Zheng-xiang, MA Chun-sheng. Effects of Carbon Nanotube Additive Applied to ZL109 Aluminum Alloy Microarc Oxidation Ceramic Coating on Growth and Wear-Resisting Performance[J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(12): 93-98.
- [24] 孙长飞, 李更天, 马春生. 微弧氧化电源占空比对陶瓷基自润滑复合涂层性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(5): 75-80.
- SUN Chang-fei, LI Geng-tian, MA Chun-sheng. The Influence of Duty Cycle of Micro-Arc Oxidation Power Supply on the Properties of Ceramic Matrix Self-Lubricating Coatings[J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(5): 75-80.
- [25] 马春生, 程东, 刘泽泽, 等. ZL109 铝合金微弧氧化耐磨陶瓷层的工艺优化[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(7): 160-166.
- MA Chun-sheng, CHENG Dong, LIU Ze-ze, et al. Process Optimization of Micro Arc Oxidation Wear Resistant Ceramic Films on ZL109 Aluminum Alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2017, 38(7): 160-166.
- [26] 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.