微弧氧化溶液 pH 值对 ZM5 膜层性能研究

王浩伟，朱培，殷强，刘元海，王媛媛，何卫平

（中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室，湖北 荆门 448035）

摘要：目的 扩大镁合金的应用范围，增强其耐蚀性。**方法** 取镁合金 ZM5 为研究对象，利用微弧氧化技术对其表面进行改性处理。首先，对 ZM5 合金基体进行前处理；然后，在不同 pH 值的电解质溶液中，通过微弧氧化的方式在 ZM5 表面原位生长一层微弧氧化陶瓷膜层；最后，利用扫描电镜、X 射线衍射、电化学测试等表征技术，系统研究微弧氧化处理对 ZM5 合金表面形貌、元素组成、微观结构及性能的影响规律。**结果** 通过调节溶液的 pH，能够有效制备出表面连续而且完整的微弧氧化膜层，在 pH=11 条件下，制备的膜层具有较好的耐蚀性，能显著降低其腐蚀电流密度，膜层的厚度达到 35.1 μm，微弧氧化表面处理技术能够显著提高镁合金的表面硬度，硬度最大为 582HV。**结论** 改变溶液 pH 能够使膜层具有较高的耐蚀性和有效提高表面硬度，为进一步扩大镁合金在军用装备上的应用提供可能性。

关键词：镁合金；微弧氧化；pH 值；耐蚀性；阻抗；硬度

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2023)12-0142-07

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2023.12.018

pH Value of Micro-arc Oxidation Solution on the Properties of ZM5 Film

WANG Hao-wei, *ZHU Pei*, *YIN Qiang*, *LIU Yuan-hai*, *WANG Yuan-yuan*, *HE Wei-ping*

(Key Laboratory of Aviation Science and Technology for Structural Corrosion Protection and Control, China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Magnesium alloys possess high specific strength attributed to their low density, but the inferior corrosion resistance has severely impeded their widespread implementation. In an endeavor to expand the application scope of magnesium alloys in national defense and military apparatus, it is necessary to adopt surface treatment to improve their corrosion resistance. ZM5 magnesium alloy was selected as the research subject, and its surface was altered by micro-arc oxidation technology. Firstly, ZM5 alloy substrate was pretreated. Thereafter, micro-arc oxidation ceramic coating was in-situ engendered on the surface of ZM5 by means of micro-arc oxidation in electrolyte solutions under different pH values. Finally, scanning electron microscope, X-ray diffraction, and electrochemical testing were utilized to systemically study the effect of micro-arc oxidation treatment on the morphology, composition, micro-structure and performance of the ZM5 magnesium alloy substrate. The results demonstrated that adjusting the solution pH effectively produced continuous and complete micro-arc oxidation coatings on the surface. The coating prepared at pH=11 showed superior corrosion resistance and substantially reduced the corrosion current density, with a thickness of 35.1 μm. Micro-arc oxidation surface treatment drastically increased the surface hardness of the magnesium alloy to a maximum of 582HV. The alteration of solution pH enables the ceramic coating to acquire superior corrosion resistance and enhances surface hardness, thus providing feasibility for further expanding the application of magnesium al-

收稿日期：2023-10-09；**修订日期：**2023-11-20

Received：2023-10-09；**Revised：**2023-11-20

引文格式：王浩伟，朱培，殷强，等. 微弧氧化溶液 pH 值对 ZM5 膜层性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 142-148.

WANG Hao-wei, ZHU Pei, YIN Qiang, et al. pH Value of Micro-arc Oxidation Solution on the Properties of ZM5 Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 142-148.

loys in military equipment.

KEY WORDS: magnesium alloy; micro-arc oxidation; pH value;corrosion resistance; impedance; hardness

ZM5 镁合金是以镁为主要成分的合金，添加了铝、锌、锰等元素的轻质合金，具有强度高、密度小、加工性好等特点[1-4]。镁合金的主要用途包括制造飞机结构件、发动机部件，可大幅减轻质量。汽车行业用其制作发动机盖板、座椅框架等，以降低油耗，另外，镁合金也被广泛应用在笔记本电脑、平板电脑、手机等外壳材料[5-7]。

但是镁合金也存在一些问题，如在空气和水分作用下容易氧化、起泡，且表面抗腐蚀性较差，影响外观和使用寿命。常见的表面处理技术有电镀、喷涂、阳极氧化等[8-10]。电镀层厚度难控制，层内易生空洞，容易损伤基材；喷涂所得到的涂层附着力低，且过程中会产生有机废气，严重污染环境；阳极氧化质量不稳定，厚度薄达不到理想的防腐效果。

微弧氧化作为一种新兴的表面处理技术，突破了传统阳极氧化法拉第过程的限制，能够在铝镁钛等阀金属基体表面原位生长出厚度均匀、附着力强的金属陶瓷膜，可有效提高合金的表面硬度和抗腐蚀性[11]。对于金属活性较高的镁合金，经过微弧氧化处理后，不仅外观更佳，而且显著增强了其抗腐蚀和抗磨损的性能[12-14]，同时制造工艺环保，没有二次污染。因此，微弧氧化技术正在成为镁合金表面处理的首选方案。

镁合金微弧氧化膜层性能的影响因素较多。常见的有微弧氧化溶液和设备的电参数。文献[15-18]中对镁合金微弧氧化的研究主要集中在溶液的成分、浓度以及电参数中的电流密度、频率以及占空比等，而研究镁合金溶液 pH 大小对膜层的影响较少报道。因此，本文在不同溶液 pH 值下制备了 ZM5 镁合金微弧氧化膜层，研究其对镁合金微弧氧化膜层的形貌、结构、厚度、粗糙度、硬度以及电化学性能等的影响。

1　试验

1.1　材料及设备

试验材料采用 ZM5 镁合金，成分的质量分数分别为：Zn 4.2%~5.5%，Mn 0.45%~0.9%，Al 0.05%~0.25%，其余为 Mg。样品尺寸大小为 50 mm×50 mm×3 mm。

试验设备：FL7-MAO50A 双极性微弧氧化电源，其中样件为阳极，不锈钢板为阴极。

1.2　试验件制备

首先，采用化学除油、有机除油等方式对 ZM5 清洗除油。然后，用无水乙醇清洗 ZM5 表面。最后将试验件放入微弧氧化槽中反应，在溶液 pH 为 9、10、11、12 下制备的试验件分别记为 C1、C2、C3 和 C4。溶液主盐成分 Na_2SiO_3 的质量浓度为 5~20 g/L，另外少量的添加剂等。电参数设置为正向电流密度 5 A/dm^2，负向电流密度 2 A/dm^2，正负向占空比分别为 20%，氧化时间为 30.0 min，频率为 1 000 Hz。

1.3　性能测试

分别利用 DR-280 涂层测厚仪、TR-200 粗糙度仪、维氏硬度仪对 ZM5 生长膜层的厚度、粗糙度、硬度进行测试，选取样件上 3 个点，取其平均值。其中，硬度仪测试过程中，加载负荷的大小为 100 g。膜层的致密度计算采用微弧氧化膜层质量与膜层体积的比值，微弧膜层体积是根据原位生长时膜层面积（s）与膜层厚度（d）的乘积（sd），而膜层的质量为试验前 ZM5 基材的初始质量（m_1）和微弧氧化后的质量（m_2）后的差值（m_2–m_1），膜层致密度为 $(m_2-m_1)/(sd)$。中性盐雾试验条件：温度为(35±5) ℃，采用 5%的 NaCl 中性盐雾，盐雾沉降量为 (1.0~2.0) mL/(80 cm^2·h)，试验时间为 960 h。样品的形貌和元素分布采用中科科仪的扫描电镜进行分析。样件的晶体结构通过 XRD 衍射仪进行表征，工作电压为 40 kV，工作电流为 40 mA，实验使用的 Cu 靶所对应的 X 射线波长为 λ=0.154 054 nm。利用电化学工作站对样件的阻抗和动电位极化曲线进行测试，其中采用铂丝网为对电极，Ag/AgCl 电极为参比电极，工作电极面积为 1 cm^2，腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液。电化学阻抗测量：在开路电位条件下，振幅为 10 mV，频率范围为 10^{-2}~10^5 Hz。动电位极化曲线测量：相对开路电位为–0.25 V，扫至相对开路电位 0.75 V，扫描速度为 0.5 mV/s。

2　结果与讨论

2.1　微观形貌

为了分析 ZM5 镁合金微弧氧化膜层的微观形貌，通过 SEM 对其进行表征。ZM5 镁合金在溶液 pH 分别为 9、10、11、12 中制备的微弧氧化膜层的表面形貌如图 1 所示。可以看出，表面呈现疏松多孔的结构，主要是由微弧放电通道的痕迹和产生的氧气泡嵌入在溶融态的氧化物中并迅速固化而产生[19]。由图 1a 可知，当溶液 pH=9 时，微弧氧化膜层表面不够平整，存在较多的烧蚀和微孔。当溶液 pH=10 时，表面微孔数量更多。随着 pH 值增加到 11 和 12，微弧氧化膜层表面的塌陷与孔洞明显减小，表面连续而且完整，没有过多散落的烧结颗粒，以及明显的缺陷和

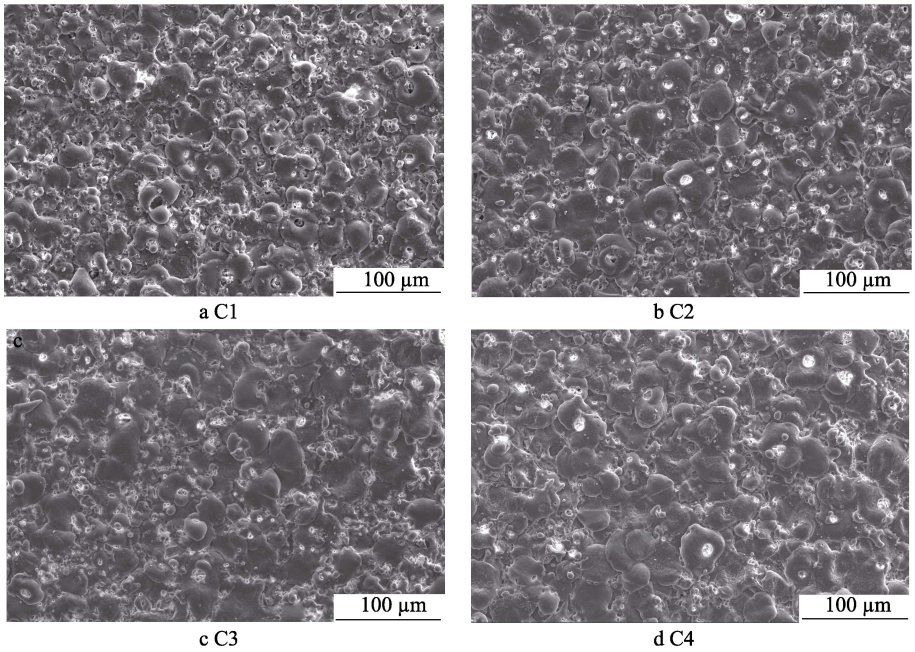

图 1　膜层的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of the film layer

微裂纹。表明在一定范围内，提高溶液的 pH 能够有效制备完整的微弧氧化膜层。可能是因为，在溶液 pH 较高时，更容易生成 MgO。

在pH值为11条件下制备的膜层的能谱扫描结果如图 2 所示。由图 2 可知，膜层表面的主要元素为 Mg、O 和 Si，以及少量由镀液引进的 Na、K 和 F 等元素[20]。由表 1 所列的 EDS 面扫描元素原子百分数可知，pH 值增加使得微弧氧化膜表面的 Mg 和 O 含量同时增加，表明膜层中 MgO 的含量可能会增大，当 pH 增大到 11 以上时，F 元素的含量明显减少。

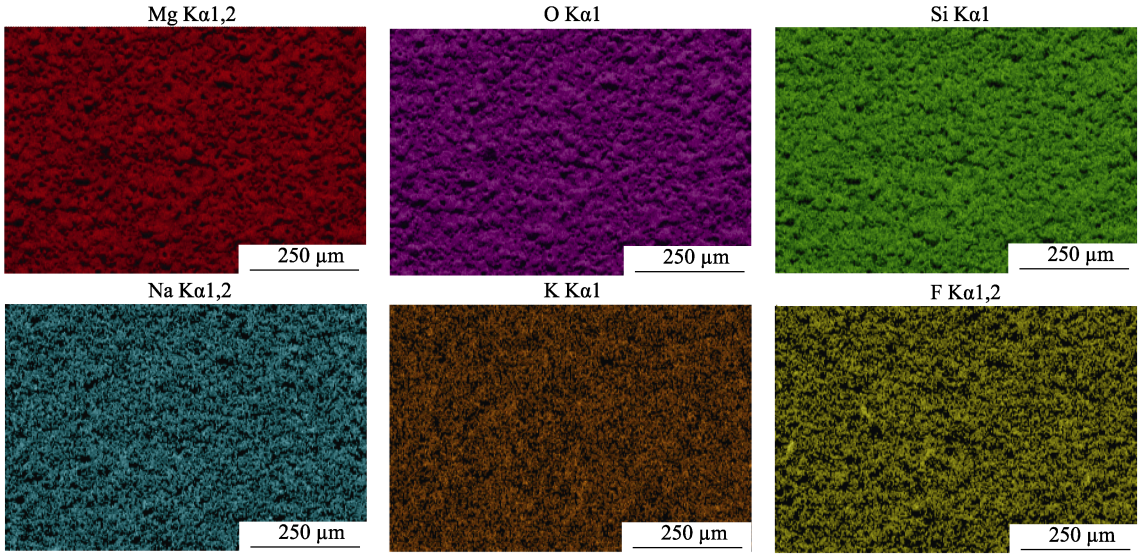

图 2　ZM5 膜层元素分布谱图

Fig.2 Elemental distribution spectrum of ZM5 film

表 1　EDS 面扫描元素原子百分数

Tab.1 EDS surface scanning elemental atomic percentages

%

	O	Mg	Si	F	Na	K
C1	49.1	36.5	9.2	3.9	0.8	0.4
C2	49.5	36.7	8.3	4.2	1.0	0.4
C3	50.6	37.4	8.4	2.5	0.5	0.6
C4	51.5	38.3	7.9	2.0	0.4	0.4

2.2　晶体结构表征

为了研究不同溶液条件下制备的微弧氧化膜的相组成，采用 X 射线衍射仪进行物相分析。采用 XRD 对 ZM5 镁合金在不同 pH 条件溶液中制备的微弧氧化膜层相结构的分析结果如图 3 所示。其中，40.01°处的衍射峰对应于 MgF_2（JCPDS 41-1443）的(111)；34.63°、48.10°处的衍射峰分别对应于 K_2MgF_4（JCPDS

76-0038）的(112)和(202)；43.12°、62.49°处的衍射峰分别对应于 MgO（JCPDS 45-0946）的(200)和(220)；23.01°、25.54°、35.90°、52.40°处的衍射峰分别对应于 Mg_2SiO_4（JCPDS 85-1364）的(012)、(102)、(113)和(222)；32.41、36.95°、57.85°、63.50°和 69.22°处的衍射峰分别对应于 Mg 的(100)、(101)、(110)、(103)和(112)。

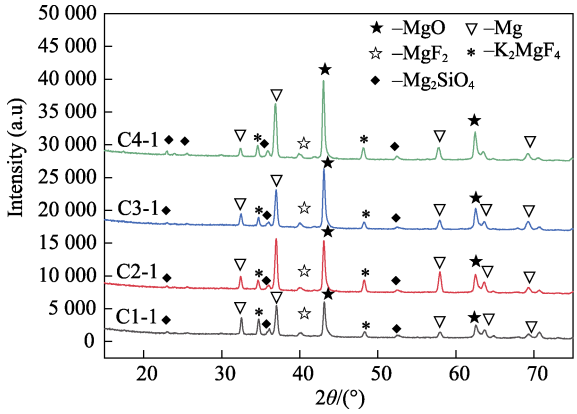

图 3　在不同溶液中制备的微弧氧化膜层 XRD

Fig.3 XRD of micro-arc oxidized film prepared in different solutions

不同 pH 溶液中制备的微弧氧化膜层中均出现了 Mg、MgO、Mg_2SiO_4、MgF_2 和 K_2MgF_4 的衍射峰，意味着微弧氧化过程是一个非常复杂的过程，它们是由 ZM5 基体的主要合金元素与溶液中的组分共同参与成膜反应而生成[21]。图 3 表明，随着 pH 从 9 增加到 12，微弧氧化膜层中 MgO 的峰值强度明显增加，表明膜层中 MgO 含量有所增加。XRD 之所以能够检测出 Mg，是由于微弧氧化膜层的厚度不足 50 μm，X 射线可穿透膜层，捕捉到基体中 Mg 的信号。

2.3　电化学性能研究

2.3.1　交流阻抗分析

不同 pH 溶液中制备的微弧氧化膜层的电化学阻抗谱图如图 4 所示。图 4a 为膜层的 Nyquist 图，其中半圆与实轴相交的第 1 个点 R_s 为电极的等效串联电阻，半圆的直径 R_{ct} 表示固液界面的电荷转移电阻，R_{ct} 越大，电荷转移难度越高。在溶液 pH=9 中制备的膜层有着最小的电荷转移电阻，其 R_{ct} 为 88.0 kΩ，表明膜层的耐蚀性最差；当 pH 增加到 10 时，电荷转移电阻 R_{ct} 增大，pH 为 11 的电荷转移电阻 R_{ct} 最大为 501.0 kΩ；当 pH=12 时，电荷转移电阻 R_{ct} 略有缩小，但其仍然高于 pH=9 的电荷转移电阻 R_{ct}。图 4b 对应的频率-相角图上出现了 2 个时间常数，表明在碱性溶液中制备的微弧氧化膜层阻抗谱的上出现了 2 个容抗弧，分别对应的多层保护性膜的层特征[11]。图 4c 为 ZM5 镁合金在不同 pH 微弧氧化膜层电化学阻抗谱的 Bode-|Z|图，其中微弧氧化阻抗模值|Z|的大小差别更加明显，但是变化规律与 Nyquist 图的容抗弧大小关系一致。通过阻抗谱图可知，在 pH=11 条件下制备的膜层有着最大的阻抗，耐蚀性最优。

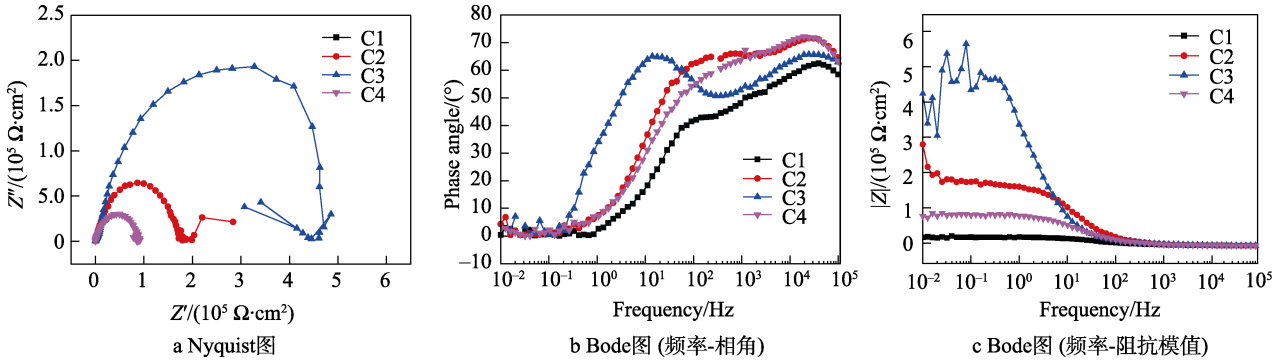

图 4　电化学阻抗谱

Fig.4 Electrochemical impedance spectra:a) Nyquist plot; b) Bode plot (frequency-phase angle); c) Bode plot (frequency-impedance modulus)

2.3.2　动电位极化曲线分析

进一步对 ZM5 微弧氧化膜层的动电位极化曲线进行分析。电极电位的测定在研究金属的腐蚀行为以及分析腐蚀过程时具有重大意义。尽管电极电位的大小与金属的腐蚀速度之间没有直接的对应关系，但是电极电位随时间的变化曲线是一种判断腐蚀过程的重要方法，可以解释腐蚀现象和研究腐蚀行为。自腐蚀电位和自腐蚀电流密度均为动电位极化技术评价材料耐蚀性能优劣的重要参数，自腐蚀电位越正，材料越不容易发生腐蚀。对于活性较高的镁合金来说，自腐蚀电流密度是评价其耐蚀性能的重要参数，用来表征镁合金在腐蚀介质中腐蚀速度的快慢，自腐蚀电流密度的数值越小，代表镁合金的腐蚀速度越慢[22-24]。

不同溶液中制备的微弧氧化膜层的动电位极化曲线如图 5 所示。可以看出，所有微弧氧化膜层的自腐蚀电位在–1.2~–1.5 V 波动，难以通过自腐蚀电位的高低来区分出每一种膜层的耐蚀性好坏。pH 为 10、11 和 12 的溶液中制备的微弧氧化膜层的自腐蚀电位

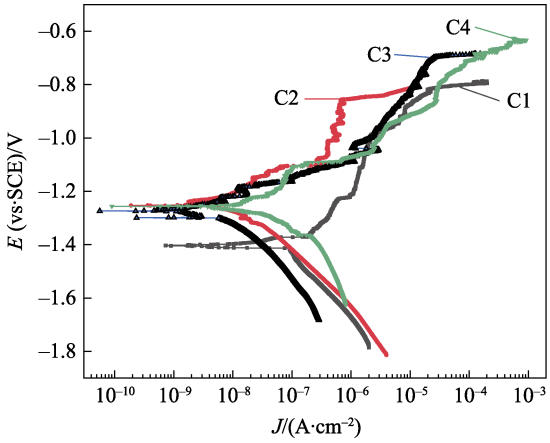

图 5　动电位极化曲线
Fig.5 Kinetic potential polarization curves

在–1.3V 左右，而在 pH 值为 9 的溶液中制备的微弧氧化膜层的自腐蚀电位降低至–1.46 V。拟合得到的腐蚀电流密度 J_{corr} 结果显示，在 pH 值为 10、11、12 的溶液中制备的膜层的 J_{corr} 在数量级 10^{-8} 上，且溶液 pH 为 11 时，制备的膜层 J_{corr} 最小，为 1.41×10^{-8}A/cm^2。J_{corr} 的数值越大，表明膜层的腐蚀速率越快[25-28]。结合电化学阻抗结果可知，在 pH 值为 11 的溶液中制备的膜层的耐蚀性能更好。

2.4　膜层性能研究

为了研究溶液的 pH 对镁合金微弧氧化膜层性能影响，对膜层的厚度、粗糙度、致密度以及硬度进行了分析。其中，致密度为膜层单位体积下膜层质量的比值，结果如图 6 和 7 所示。

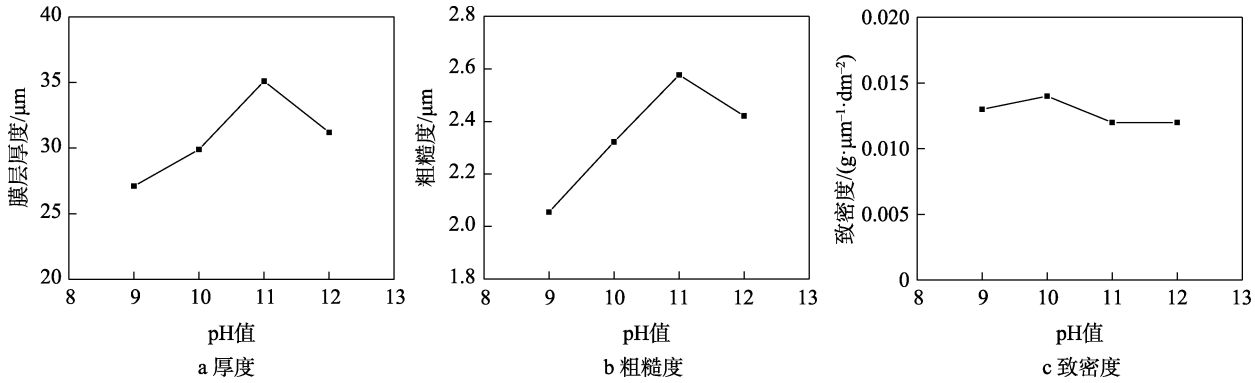

图 6　膜层厚度、粗糙度及致密度
Fig.6 Thickness, roughness and density of film

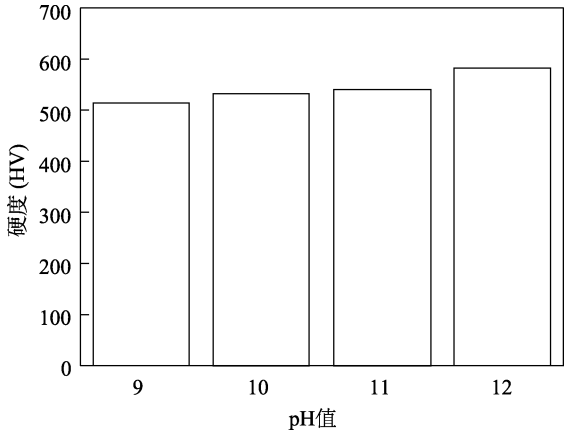

图 7　ZM5 膜层的硬度
Fig.7 Hardness of ZM5 film

从图 6 可知，随着溶液 pH 值的增加，ZM5 微弧氧化膜层厚度从 27.1 μm 增加到最大值 35.1 μm 后开始下降，而粗糙度逐渐增加到 2.577 μm 后开始下降。溶液 pH 升高，会引起局部 pH 值迅速上升，从而提高氧化反应的反应速率，组织中的缺陷点更容易被侵蚀，膜层生长更趋向于向基体表面延伸，而非向表面方向演化，从而增大了膜层厚度。生成的 MgO 颗粒沉积在组织表面，增加了表面粗糙度。因此，在 pH=11 下制备的膜层具有较好的性能。致密度随着溶液 pH 的增加无明显变化，约为 0.013 g/(μm·dm^2)。

从图 7 可知，随着溶液 pH 值增加，ZM5 微弧氧化膜层的硬度逐渐增加，在 pH=12 时最大，为 582HV。即使在低 pH 条件下制备的膜层，硬度也高于 500HV，而未经处理的 ZM5，硬度低于 100HV，意味着通过微弧氧化技术能够有效增加膜层的硬度。

2.5　pH 对 ZM5 微弧氧化膜层耐蚀性研究

进一步研究不同溶液 pH 对 ZM5 微弧氧化膜层耐蚀性的影响。其中，表面没有任何处理的 ZM5 基材在中性盐雾 24 h 的试验结果如图 8a 所示。不同溶液 pH 下，ZM5 微弧氧化膜层中性盐雾 960 h 后试验结果如图 8b~8e 所示。可以看出，在溶液 pH=11 条件下，膜层的耐蚀性最优，表面的腐蚀产物最少；在溶液 pH=9 条件下，膜层的腐蚀产物明显高于其他膜层，耐蚀性较差。这与交流阻抗分析和动电位极化曲线分析的结果一致，表明通过在 ZM5 镁合金表面原位生长微弧氧化膜层能够有效增加膜层的耐蚀性。

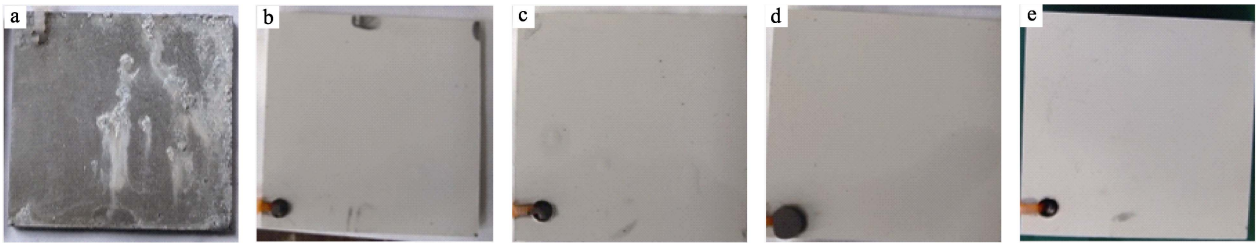

图 8　中性盐雾试验结果
Fig.8 Neutral salt spray test results

3　结论

1）通过对 ZM5 表面进行微弧氧化处理，基材表面原位生长出连续而且完整的微弧氧化膜层。XRD 测试表明，膜层主要由 MgO 以及 Mg_2SiO_4 晶相物质组成。

2）交流阻抗、动电位极化曲线和中性盐雾试验表明，在 pH=11 条件下，制备的膜层有着最大的阻抗和最小的腐蚀电流密度，以及最少的腐蚀产物，膜层具有较好的耐蚀性。

3）通过增加溶液 pH 值，能够有效提高膜层的厚度，并且显著提升镁合金的表面硬度，硬度最高达 582HV。

参考文献：

[1] MA C, LIU J Y, ZHANG Z Y, et al. Preparation and Properties of Micro-Arc Oxidation/Self-Assembly Coatings with Different Hydrophobicities on Magnesium Alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(12): 2200741.

[2] CHEN H, ZHANG J G, FAN Z Y, et al. In Situ Micro-Arc Oxidation-Induced Growth of Black Ceramic ZrO_2 and CuO Coatings on Magnesium Alloys and Their Electrochemical Analysis[J]. ChemistrySelect, 2023, 8(14): e202204545.

[3] ZHU J C, LI H Z, LI Z X, et al. Effect of Oxidation Time on the Structure and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating of AZ91D Magnesium Alloy in $(NH4)_2ZrF6$ Electrolyte System[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1538.

[4] 章欧, 胡红军, 胡刚, 等. 镁合金复合细晶强化研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 98-105.
ZHANG O, HU H J, HU G, et al. Research Progress on Composite Refinement Strengthening of Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 98-105.

[5] CHEN L X, ZHAO R F, QI H Y, et al. Influence of Voltage Modes on Microstructure and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating on Magnesium Alloy[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(15): 2232-2246.

[6] GUAN K X, YAO J T, WANG L S, et al. Large-Arc Discharge Mechanism and Avoidance in Micro-Arc Oxidation of Magnesium Alloy[J]. Metals, 2022, 12(6): 949.

[7] 张先锋, 蒋百灵. 能量参数对镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(3): 141-143.
ZHANG X F, JIANG B L. Effect of Energy Parameters on Corrosion Resistance of micro-Arc Oxidation Coatings on Magnesium Alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(3): 141-143.

[8] ZHU J Y, JIA H J, LIAO K J, et al. Improvement on Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidized AZ91D Magnesium Alloy by a Pore-Sealing Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 889: 161460.

[9] LIN Z S, WANG T L, YU X M, et al. Functionalization Treatment of Micro-Arc Oxidation Coatings on Magnesium Alloys: A Review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 879: 160453.

[10] YAO W H, WU L, WANG J F, et al. Micro - Arc Oxidation of Magnesium Alloys: A Review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 118: 158-180.

[11] GOLUBKOV P E, PECHERSKAYA E A, ARTAMONOV D V, et al. Electrophysical Model of the Micro-Arc Oxidation Process[J]. Russian Physics Journal, 2020, 62(11): 2137-2144.

[12] LIU C C, YUAN J W, LI H T, et al. Role of Substrates in the Corrosion Behaviors of Micro-Arc Oxidation Coatings on Magnesium Alloys[J]. Metals, 2019, 9(10): 1100.

[13] LI L H, NARAYANAN T S N S, KIM Y K, et al. Coloring and Corrosion Resistance of Pure Mg Modified by Micro-Arc Oxidation Method[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1625-1630.

[14] JIN J, LI H, LI X H. Friction and Wear Behavior of Micro Arc Oxidation Coatings on Magnesium Alloy at High Temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(5): 1202-1206.

[15] BAI L J, DONG B X, CHEN G T, et al. Effect of Positive Pulse Voltage on Color Value and Corrosion Property of Magnesium Alloy Black Micro-Arc Oxidation Ceramic Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 374: 402-408.

[16] ZHANG R F, ZHANG S F, SHEN Y L, et al. Influence of Sodium Borate Concentration on Properties of Anodic Coatings Obtained by Micro Arc Oxidation on Magnesium Alloys[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(17): 6602-6610.

6602-6610.

[17] WANG C J, JIANG B L, LIU M, et al. Corrosion Characterization of Micro-Arc Oxidization Composite Electrophoretic Coating on AZ31B Magnesium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 621: 53-61.

[18] YONG J H, LI H Z, LI Z X, et al. Effect of $(NH_4)_2ZrF_6$, Voltage and Treating Time on Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coatings Applied on ZK61M Magnesium Alloys[J]. Materials, 2021, 14(23): 7410.

[19] YEROKHIN A L, SNIZHKO L O, GUREVINA N L, et al. Discharge Characterization in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(17): 2110-2120.

[20] 李慕勤, 姚海涛, 魏方红, 等. 医用纯 Mg 表面多种复合处理膜层的组织结构和体内外性能[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1337-1346.
LI M Q, YAO H T, WEI F H, et al. The Microstructure and in Vivo and in Vitro Property of Multi-Component Composite Films on the Biomedical Pure Magnesium Surface[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(10): 1337-1346.

[21] BAGHERI H R, ALIOFKHAZRAEI M, GHEYTANI M, et al. Growth and Internal Microstructure of Micro-Arc Oxidized MgO-Based Nanocomposite Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 1-9.

[22] ZHAO H, LIU Z, CHEN L J, et al. Wear Resistance of Ceramic Coating on AZ91 Magnesium Alloy by Micro-Arc Oxidation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S3): 1814-1818.

[23] RAKOCH A G, MONAKHOVA E P, KHABIBULLINA Z V, et al. Plasma Electrolytic Oxidation of AZ31 and AZ91 Magnesium Alloys: Comparison of Coatings Formation Mechanism[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(3): 587-600.

[24] 郭剑, 刘聘, 邵忠财. 镁合金微弧氧化工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2017, 37(1): 47-49.
GUO J, LIU P, SHAO Z C. Study on Micro-Arc Oxidation Process of Magnesium Alloy[J]. Electroplating & Pollution Control, 2017, 37(1): 47-49.

[25] 刘雪辰, 穆耀钊, 王伟, 等. AZ91 镁合金不同厚度微弧氧化膜层耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 170-172.
LIU X C, MU Y Z, WANG W, et al. Research on Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating with Different Thickness on AZ91 Mg Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 170-172.

[26] 宾远红, 刘英, 李卫, 等. ZE10 镁合金微弧氧化膜层的制备及耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(5): 35-38.
BIN Y H, LIU Y, LI W, et al. Study on Preparation and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating on ZE10 Magnesium Alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2011, 30(5): 35-38.

[27] 章志友, 赵晴, 刘月娥. 不同体系中镁合金微弧氧化膜层的耐蚀性研究[J]. 材料保护, 2008, 41(5): 19-22.
ZHANG Z Y, ZHAO Q, LIU Y E. Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating on MB8 Mg Alloy Prepared from Different Electrolyte Systems[J]. Materials Protection, 2008, 41(5): 19-22.

[28] 杨培霞, 郭洪飞, 安茂忠, 等. 镁合金表面微弧氧化陶瓷膜耐蚀性能评价[J]. 航空材料学报, 2007, 27(3): 33-37.
YANG P X, GUO H F, AN M Z, et al. Evaluation on Corrosion Resistance of Ceramic Coated Magnesium Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(3): 33-37.

责任编辑：刘世忠