

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.08.003

# 硝酸铈添加剂对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜组织与性能的影响

张雨露<sup>1,2</sup>, 祁星<sup>3</sup>, 姜波<sup>1,2</sup>, 宋仁国<sup>1,2\*</sup>

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏 常州 213164; 3. 常州工学院 航空与机械工程学院, 江苏 常州 213032)

**摘要:** 为了进一步提高 AZ91D 镁合金表面的耐蚀性与耐磨性, 在硅酸盐电解液体系中加入不同浓度的硝酸铈添加剂, 利用微弧氧化(MAO)技术在其表面原位生长出陶瓷膜层。通过 X 射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)对陶瓷膜层物相组成和表面微观形貌进行了表征, 并通过电化学测试与摩擦磨损试验, 评估了陶瓷膜层的耐蚀与耐磨性能。结果表明: 硝酸铈添加剂的添加对膜层相组成影响较小, 随着硝酸铈浓度的增加, 膜层表面先出现较大孔径的孔洞, 之后孔洞数量逐渐减少, 且孔径也缩小。与无添加剂的膜层相比, 硝酸铈的添加量为 0.4 g/L 时, 其被磨穿时长从 1 min 增加到 8 min, 耐磨性有所改善; 腐蚀电位从 -1.69 V 增加到 -1.26 V, 腐蚀电流密度从  $8.56 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  降到  $2.49 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 耐蚀性显著提高。

**关键词:** AZ91D 镁合金; 微弧氧化; 硝酸铈添加剂; 组织; 性能

中图分类号: TG174.41

文献标识码: A

## Effects of cerous nitrate additive on microstructure and properties of MAO coatings on AZ91D magnesium alloy

Zhang Yulu<sup>1,2</sup>, Qi Xing<sup>3</sup>, Jiang Bo<sup>1,2</sup>, Song Renguo<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Material Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. School of Aeronautical and Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

**Abstract:** In order to further improve the wear resistance and corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy, the ceramic coating was in-situ formed on AZ91D magnesium alloy by applying micro-arc oxidation (MAO) technique in the silicate electrolytic liquid system with different concentrations of cerous nitrate additive. The phase composition and surface microstructure of the coatings were characterized by X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The corrosion resistance and wear resistance of the ceramic coatings were evaluated by electrochemical tests and friction and wear tests. The results show that the addition of cerous nitrate is of little effect on the phase composition of the ceramic film. With the increase of the concentration of cerous nitrate, the surface of the coating first appeared larger pores, and then the number of pores decreased, and the pore size became smaller. Compared with the MAO coating without additive, when the concentration of cerous nitrate is 0.4 g/L, the wear time increases from 1 min to 8 min, and the wear resistance is improved. Its

收稿日期: 2024-01-29

修回日期: 2024-03-04

作者简介: 张雨露(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为金属腐蚀与防护, email: 1498213417@qq.com

\*通信作者: 宋仁国(1965—), 男, 博士, 教授, email: songrg@cczu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51871031)

corrosion potential increases from  $-1.69\text{ V}$  to  $-1.26\text{ V}$ , and the corrosion current density is reduced from  $8.56 \times 10^{-6}\text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  to  $2.49 \times 10^{-7}\text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , thus the corrosion resistance is significantly increased.

**Keywords:** AZ91D magnesium alloy; micro-arc oxidation; sodium molybdate additive; microstructure; properties

镁及其合金具有低密度、高比强度、良好的切削性能和铸塑性能,在医疗卫生、汽车制造、航空航天等领域得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。然而,在大气环境或有一定湿度的服役环境中,镁及其合金由于其疏松多孔的氧化膜、高电化学活性及较低的标准电极电位,因而很容易受到大气腐蚀或电偶腐蚀。此外,当微凸体或硬粒子在镁及其合金表面滑动时产生摩擦磨损,会在一定程度上改变材料的尺寸与物理特性,从而缩短零件的使用寿命。为了拓宽受限的应用范围、延长使用寿命,对镁合金基体进行表面处理以形成一层保护性的氧化膜至关重要<sup>[6-9]</sup>。

微弧氧化(MAO)工艺步骤简捷、高效率且绿色环保,形成的陶瓷膜层结构更加致密、硬度更高、韧性更好,与基体结合紧密不易剥落,具有较高的耐磨、耐蚀、抗高温冲击性能及优良的电绝缘性等<sup>[10-14]</sup>。电解液组成及浓度在微弧氧化过程中起着关键作用,决定了参与成膜的阴离子类别与数量,对膜层表面颜色、成膜速率、粗糙度、相组成及微观结构等特征参量具有较大的影响。研究表明,添加剂的引入是优化电解液配方的重要途径,促进膜层生成的同时改变其组织结构,进一步提升陶瓷膜的综合性能<sup>[15-16]</sup>。电解液中加入微量的稀土元素,使陶

瓷膜层表面愈加光滑平整,致密性进一步提高。不仅如此,掺杂稀土化合物后,材料的韧性、烧结性能、高温性能等均能得到提升<sup>[17-20]</sup>。

近年来,关于稀土盐硝酸铈的添加已有少量研究,但是同时研究其添加量对膜层耐蚀性能与耐磨性能影响的报道较少。基于此,本文借助扫描电子显微镜(SEM)、激光共聚焦显微镜、X射线衍射仪(XRD)、摩擦磨损实验机以及电化学工作站对膜层的表面及截面微观形貌、粗糙度、物相组成、耐磨性能和耐蚀性能进行测试,系统地研究了硝酸铈添加剂对AZ91D镁合金微弧氧化膜层组织与性能的影响。

## 1 材料与试验

### 1.1 材料

试验选用的基体材料为AZ91D镁合金,其化学组成如表1所示。首先,使用线切割机将板材切割成 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的试样,用台式钻床在试样边缘开 $\phi 3\text{ mm}$ 的小圆孔,以便后续的固定和安装。之后,依次使用400、800、1000和1200目的水磨砂纸对试样进行打磨,以去除试样表面的氧化物和污渍。最后,用无水乙醇超声洗净,干燥备用。

表1 AZ91D镁合金基材的化学组成

Tab.1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy substrate

组成	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
含量/(wt.%)	8.30~9.70	0.35~1.00	0.17~0.27	$\leq 0.05$	$\leq 0.025$	$\leq 0.001$	$\leq 0.004$	Bal.

### 1.2 微弧氧化陶瓷膜的制备

先配置基础微弧氧化电解液,称量45 g的 $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ 、9 g的KOH,加入3 L的去离子水溶解。共制备六组试样,一组不加入添加剂,其他五组依次加入质量浓度为0.1~0.5 g/L的 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ,将配置好的溶液机械搅拌20 min。分别以镁合金试样和不锈钢棒为工作阳极和阴极,并用铝丝垂挂样品没入电解液内。选用恒流模式(通电时间10 min,占空比20%,脉冲频率500 Hz,电流密度 $5\text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ )进行制样。微弧氧化完成后,取出试样用去离子水洗净后

烘干,将干燥试样放入贴好相应标签的自封袋中并备用。

### 1.3 试样表征

使用JMS-6510扫描电子显微镜(SEM)观测陶瓷膜层断面与表面的微观形貌。通过激光扫描共聚焦荧光显微镜(LSCM)观察AZ91D镁合金微弧氧化膜层的表面三维轮廓形貌,并对试样表面的粗糙度进行表征。

采用涡流测厚仪(时代集团公司)测量膜层厚度。测试前利用未处理的镁合金基体进行较零,测

量在处理后的试样平面上随机进行,依次选取3个点,然后取平均值作为试样的膜层厚度值。

采用 RigakuD/max-2500 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析膜层的物相组成。激发源为 Cu-K $\alpha$  射线,波长为 0.154 nm,工作电压和电流分别为 40 kV 和 100 mA,扫描速度为 1 °/min,步长为 0.02 °,扫描范围为 0~90 °。

采用 TD7300 型电化学工作站评估试样的耐蚀性能。在此次的电化学试验中,以试样为工作电极,其测试面积约为 1 cm<sup>2</sup>,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为 Pt 电极。测试开始前,选择 3.5 wt.% 的 NaCl 溶液为腐蚀介质,对每个试样进行 0.5 h 的浸泡,以确保试验结果精确。在电压为  $\pm 0.3$  V 的范围内,扫描速率为 5 mV/s 的条件下进行动电位扫描,通过 CVIEW 软件对得到的极化曲线进行拟合。此外,交流阻抗测试前 10 min 建立稳定的开路电位,振幅设置为 10 mV,扫描范围设置为 10<sup>-1</sup>~10<sup>5</sup> Hz。

在常温条件下,采用 HT-600 高温摩擦磨损试验机进行时长 30 min 的摩擦磨损试验。其中,载荷为 300 g,对磨材料选择直径 4.5 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球,调节球磨的旋转半径为 5 mm,电机转速为 200 r/min。试验前后均采用 MST-5000 电子天平称量试样质量,并计算出磨损质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 膜层表面微观形貌

图 1 是放大 1000 倍后各试样的 SEM 图。没有添加硝酸铈时,膜层表面呈现出明显的物质堆叠现象,同时存在大量类似火山喷发口形状的微孔,孔径较大且分布不均。从图 1(a) 中可以看出,孔洞四周有明显的熔融且互相咬合的烧结印迹,这是因为在微弧氧化过程中产生了熔融态氧化物喷涌的通道;从图 1(b)~(f) 可以看出,有少量熔融状白色点状附着颗粒聚集在凹陷处,随着硝酸铈添加量的增加,附着物增多且颗粒尺寸变大,有附着物的区域在击穿重塑过程中逐渐平滑,微孔数减少且孔径逐渐缩小。

由于稀土铈盐的加入,电解液导电性能减弱,使起弧电压增加,终止电压与起弧电压之间的压差降低,促进了微弧氧化过程,吸附颗粒在电弧作用下发生重熔、相变和结晶,结晶体逐步长大,膜层致密性进一步提高;此外,电弧的击穿能力降低,反应物不易转移,随着微弧氧化放电通道中的物质增多,通道

孔径逐渐缩小<sup>[21]</sup>。

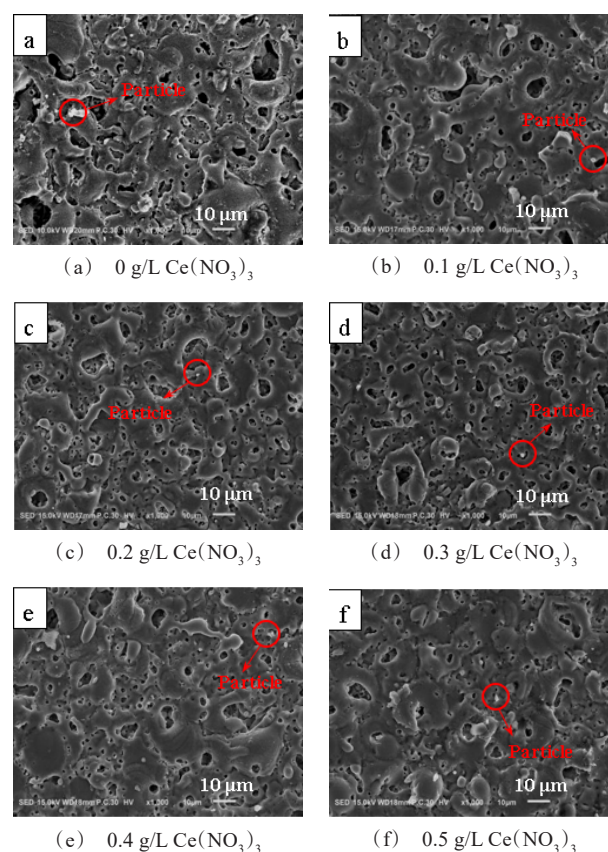


图1 不同硝酸铈添加量下制备的膜层的SEM照片

Fig.1 SEM images of coatings prepared with different amounts of cerous nitrate additive

### 2.2 膜层粗糙度

图 2 为膜层的表面三维轮廓形貌及粗糙度。在图 2(a) 中,深蓝色的部分表明形成的膜层表面存在一部分凹陷的区域,因为膜层表面布满微孔且有孔洞连通造成表面高低落差大,即未添加 Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 时膜层表面的平均粗糙度最大 ( $S_a=2.319 \mu\text{m}$ );由图 2 (b)~(e) 可见,随着添加剂浓度不断增加,图像色差逐渐降低,表明膜层表面的光滑度有所增加,硝酸铈的添加量达到 0.4 g/L 时,膜层较致密,表面粗糙度最小 ( $S_a=1.350 \mu\text{m}$ );由图 2(f) 可见,当硝酸铈的添加量高于 0.4 g/L 时,铈盐与铈氧化物的颗粒尺寸增大,在膜层中形成大颗粒,膜层粗糙度也随之增加。

### 2.3 膜层厚度

经涡流测厚仪所测得的膜层厚度数据如表 2 所示。图 3 为不同质量浓度硝酸铈条件下制备的 AZ91D 镁合金微弧氧化膜层截面形貌图。



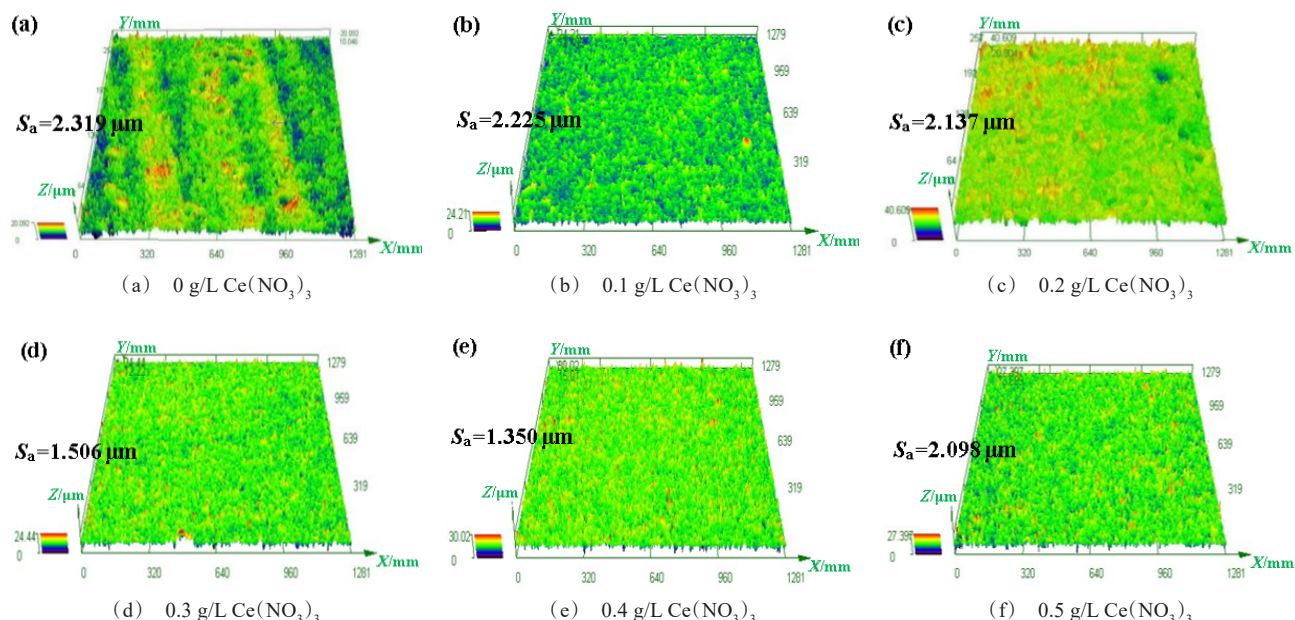


图 2 不同硝酸铈添加量下制备的膜层表面三维轮廓形貌

Fig.2 Three dimensional surface morphologies of MAO coatings prepared with different amounts of cerous nitrate additive

表 2 不同硝酸铈添加量下制备的膜层厚度

Tab.2 Thickness of MAO coatings prepared with different amounts of cerous nitrate additive

浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	膜层厚度/μm			
	1	2	3	平均
0	5.601	8.500	8.006	7.369
0.1	10.002	8.000	7.403	8.468
0.2	11.300	11.500	8.205	10.335
0.3	9.400	11.200	12.530	11.043
0.4	10.002	10.700	12.800	11.167
0.5	12.100	9.500	10.102	10.567

由表 2 和图 3 可以看出,当添加剂的浓度低于 0.4 g/L 时,金属表面氧化效率较高,已形成的膜层更易被攻破,膜层内外物质的反应和迁移速率较快,膜层的平均生长速率较大,Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 添加量达到 0.4 g/L 时,膜层平均厚度最厚,为 11.167 μm;当添加剂浓度高于 0.4 g/L 时,膜层表面附着物的增多,阻滞了离子的移动及电压击穿薄弱部位再形成优质膜的过程,致使成膜速率降低,影响了膜的生成,因此膜厚减小,即随着硝酸铈质量浓度的增加,膜层厚度先增加后降低。

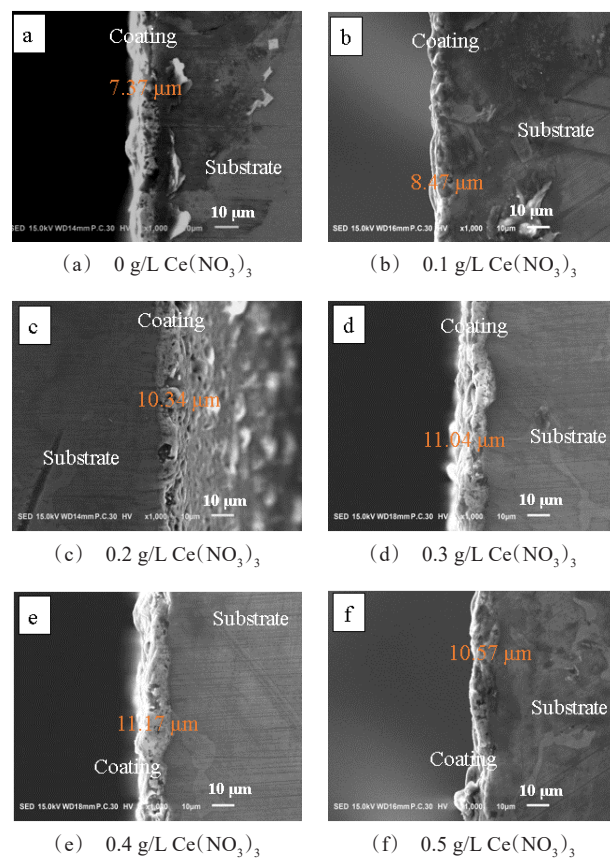


图 3 不同试样的断面 SEM 照片

Fig.3 SEM images of cross-section for different samples

## 2.4 膜层物相组成

图4为制得的AZ91D镁合金微弧氧化膜层的X射线衍射图谱。从图4中能够看出,  $\text{MgO}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (尖晶石) 与  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  (镁橄榄石) 是组成膜层的主要物相。凭借微弧放电迸发能量所产生的瞬时高温作用, 电解液中的硅与基体中的镁发生了局部熔融, 并与附着在AZ91D表面的氧原子迅速嵌合, 电化学沉积后得到这些物相。此外, 透过具有多孔结构且相对较薄的微弧氧化陶瓷膜层, X射线能够直接击中镁合金基体, 被融解的镁成为夹杂相, 形成Mg的衍射峰。在图中未能找到铈化合物的衍射峰, 证明试验加入的硝酸铈添加剂质量浓度较小, 稀土Ce含量偏少, X射线未能检测到微弧氧化膜层中有新相生成, 即膜层组成相并没有发生变化。由图4能够观察到, 在含有硝酸铈的溶液中制备的陶瓷膜层的Mg峰的相对强度在减弱, 而  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  与  $\text{MgO}$  两相衍射峰有所增强, 表明MAO膜层表面愈加光滑平整, 致密性提高, 同时膜层厚度增加。

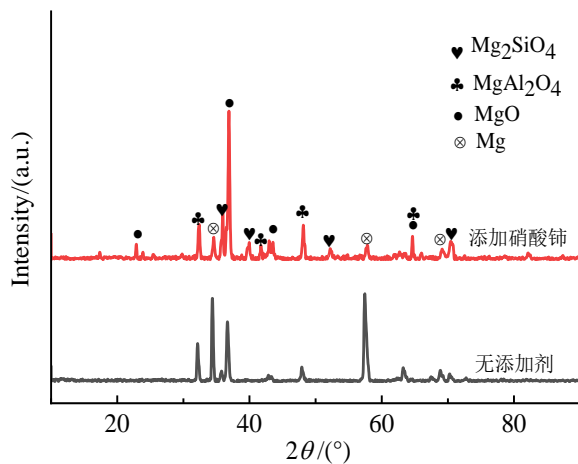


图4 不同电解液组成时MAO膜层的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of MAO coatings formed in the electrolytes with different compositions

## 2.5 膜层耐蚀性

不同硝酸铈添加量条件下制备的膜层的动电位极化曲线如图5所示。通过软件拟合后, 将每个试样腐蚀电流密度、腐蚀电位与腐蚀速率的变化列入表3中。可以看到, 随着  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  添加量的增加, 样品的腐蚀电流密度先减小再增大, 而腐蚀电位则呈现相反变化趋势。试验过程中, 微孔较大的膜层表面更易被腐蚀介质浸透进镁合金基体内部, 造成合

金腐蚀<sup>[22]</sup>。结合图1和表2的结果可知, 当硝酸铈添加量达到0.4 g/L时, 该试样的平均膜厚最大, 且微孔孔径较小, 腐蚀介质很难浸入膜层, 此时膜层具有最正的腐蚀电位-1.26 V以及最小的腐蚀电流密度  $2.49 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 耐蚀性能最佳。当硝酸铈的添加量大于0.4 g/L时, 膜层表面高低错落的区域更易汇聚腐蚀介质, 发生微区破坏, 导致膜层耐蚀性有所下降, 但依然比不含有添加剂的陶瓷膜层耐蚀性能好。

从图6的Nyquist曲线可以看出, 在中高频范围内, 由于电荷的转移出现容抗弧, 容抗弧的半径越大, 试样的腐蚀速率越小<sup>[23-25]</sup>。其中, 硝酸铈添加量为0.4 g/L时制备的样品的容抗弧半径最大, 表明该试样的耐蚀性能最佳。

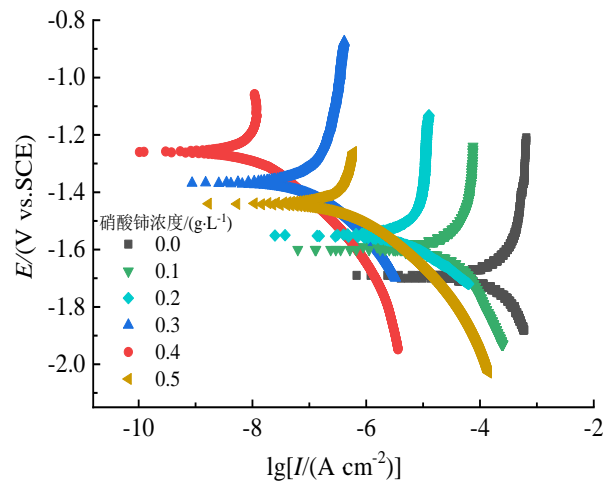


图5 在不同硝酸铈添加量下所制备的MAO膜层的塔菲尔曲线

Fig.5 Tafel curves of MAO coatings prepared with different amounts of cerous nitrate additive

表3 各试样动电位极化曲线的拟合结果

Tab.3 The fitting results of the potentiodynamic polarization curves of each sample

$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 浓度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	腐蚀电位/ V	腐蚀电流密度/ ( $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	腐蚀速率/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )
0	-1.69	$8.56 \times 10^{-6}$	0.85
0.1	-1.60	$4.60 \times 10^{-6}$	0.57
0.2	-1.55	$3.16 \times 10^{-6}$	0.44
0.3	-1.37	$9.92 \times 10^{-7}$	0.16
0.4	-1.26	$2.49 \times 10^{-7}$	0.09
0.5	-1.45	$1.88 \times 10^{-6}$	0.25

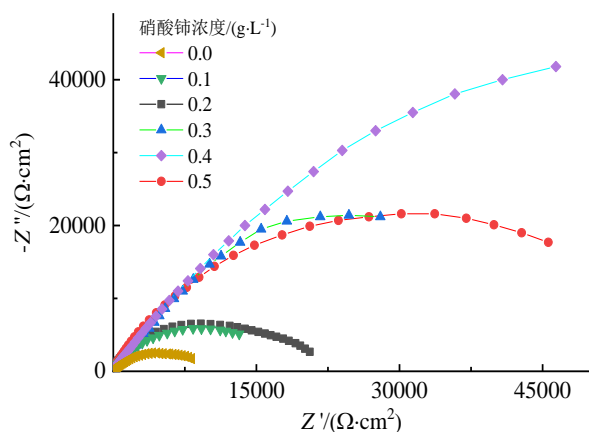


图 6 各试样在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的 Nyquist 图

Fig.6 Nyquist diagrams of samples in 3.5 wt.% NaCl solution

## 2.6 膜层耐磨性

表 4 所示为不同硝酸铈添加量条件下各试样摩擦磨损测试前后的质量及磨损量。图 7 所示为不同硝酸铈添加量条件下各试样摩擦系数随时间变化的示意图。

表 4 试样摩擦磨损前后的质量

Tab.4 Quality of samples before and after friction-wear test

$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 浓度/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	试验前质量/g	试验后质量/g	磨损质量/g
0	3.2810	3.2783	0.0027
0.1	3.4914	3.4891	0.0023
0.2	3.5514	3.5495	0.0019
0.3	3.2855	3.2840	0.0015
0.4	3.4077	3.4067	0.0010
0.5	3.2587	3.2571	0.0016

从图 7 中可以看出,由于不添加硝酸铈时制备的试样膜层厚度较低、粗糙度较高,疏松层很容易被破坏,产生大量磨屑,摩擦系数在不到 1 min 的时间内快速升高至 1.18,含有坚硬相的内层被  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球划破后直接与镁合金基材接触,摩擦系数稳定在 0.7 附近;当  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  的添加量达到 0.4 g/L 时,试样粗糙度最低,摩擦系数缓慢上升,在接近 8 min 时膜层才被划破,摩擦系数保持在 0.2 左右。结合表 4 和图 7 的结果可知,当硝酸铈添加量为 0.4 g/L 时,膜层被磨穿时间最长,摩擦因数达到最低,此时膜层表面损耗程度降低,磨损量减少,具有良好的耐磨性能。

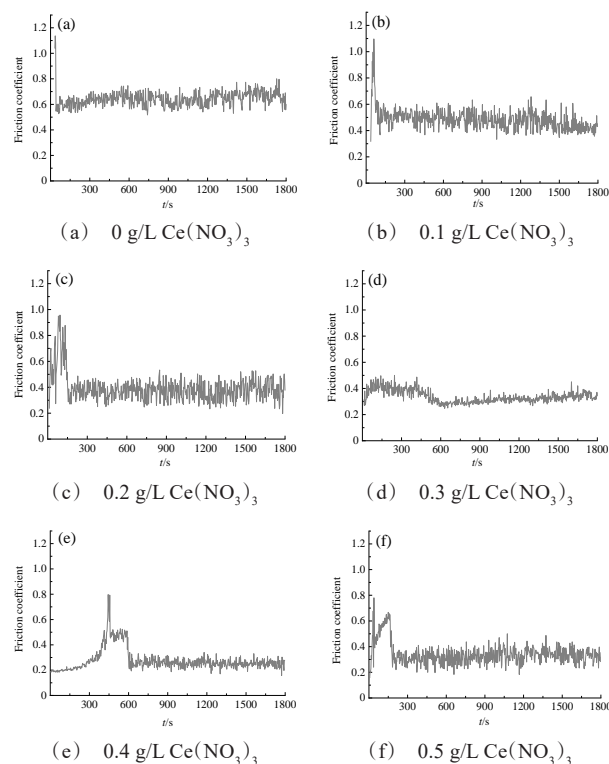


图 7 试样摩擦系数随时间变化示意图

Fig.7 Schematic diagrams of the variation of friction coefficient of the samples over time

## 3 结论

(1) 稀土铈盐的加入,使电解液导电能力减弱,终止电压与起弧电压之间的压差降低,促进了微弧氧化过程。膜层表面微孔数量减少且孔径变小,膜层厚度先增大后减小。但过多的添加剂会导致表面局部区域不平整,随着硝酸铈添加量的增加,粗糙度先降低后增加,质量浓度为 0.4 g/L 时,膜层表面粗糙度最低。

(2) 陶瓷膜层主要由  $\text{MgO}$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  及  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  三个物相组成,添加剂的加入使  $\text{Mg}$  峰的相对强度减弱,而  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{MgO}$  两峰增强,这说明 MAO 膜层表面愈加光滑平整,致密性提高,同时膜层厚度增加。

(3) 电化学测试表明,硝酸铈的加入使得 MAO 膜层的耐蚀性显著提高。当  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  的添加量为 0.4 g/L 时,陶瓷膜层具有最正的腐蚀电位与最小的腐蚀电流密度,且容抗弧的半径最大,即此时获得的膜层耐蚀性能最佳。



(4)摩擦磨损实验表明,当 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 的质量浓度达到0.4 g/L时,膜层被磨穿时间最长,表面受损程度降低,磨损量减少,具有良好的耐磨性能。

## 参考文献

- [1] 贾秋荣,崔红卫,张甜甜,等. 镁合金微弧氧化技术的研究概况[J]. 材料保护, 2018, 51(8): 108-113.
- [2] Song G, Atrens A. Understanding magnesium corrosion-A framework for improved alloy performance[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2003, 5(12): 837-858.
- [3] Zhang C Y, Zeng R C, Liu C L, et al. Comparison of calcium phosphate coatings on Mg-Al and Mg-Ca alloys and their corrosion behavior in Hank's solution[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(21/22): 3636-3640.
- [4] 苗树庭,李伟健. AZ91D 镁合金表面钙系磷酸盐膜层的制备及其耐蚀性[J]. 材料保护, 2017, 50(5): 50-53, 84.
- [5] 万天,宋述鹏,王今朝,等. 生物医用镁合金腐蚀行为的研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(1): 19-26.
- [6] 宗琦,宋仁国,花天顺,等. 稀土铈掺杂石墨烯对 7050 铝合金微弧氧化膜层结构与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(4): 782-792.
- [7] 冀盛亚,常成,常帅兵,等. 医用镁合金微弧氧化/有机复合涂层的研究现状及演进方向[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 315-334.
- [8] 殷强,朱利敏,王媛媛,等. 硅酸盐体系中的钨酸钠含量对 ZM5 镁合金微弧氧化膜层的影响[J]. 环境技术, 2023, 41(11): 53-59.
- [9] Lei L, Shi J, Wang X, et al. Microstructure and electrochemical behavior of cerium conversion coating modified with silane agent on magnesium substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 376: 161-171.
- [10] 宾远红,刘英,李卫,等. 铈对镁合金微弧氧化膜微观结构和耐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(11): 42-45.
- [11] 曹国平,宋若希,卢俊鹏,等. 电流密度对 7075 铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(8): 77-80.
- [12] 卓子寒,王超,姜波,等. AZ80 镁合金微弧氧化膜复合封孔工艺及其性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(6): 106-112, 194.
- [13] Kaseem M, Hussain T, Rehman Z U, et al. Stabilization of AZ31 Mg alloy in sea water via dual incorporation of  $\text{MgO}$  and  $\text{WO}_3$  during micro-arc oxidation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157036.
- [14] Wang S Y, Xia Y P, Liu L, et al. Preparation and performance of MAO coatings obtained on AZ91D Mg alloy under unipolar and bipolar modes in a novel dual electrolyte[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(1): 93-99.
- [15] 刘建,朱新河,马春生,等. 稀土添加剂对微弧氧化膜层影响的研究进展[J]. 稀有金属, 2022, 46(8): 1073-1082.
- [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.
- [17] Shen D J, Ma H J, Guo C H, et al. Effect of cerium and lanthanum additives on plasma electrolytic oxidation of AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(12): 1208-1213.
- [18] 洪尚坤,黎清宁,屈婧婧,等. 硝酸铈添加剂对 7075 铝合金微弧氧化陶瓷膜特性的影响[J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 116-121.
- [19] 陈宁宇,强新发,沈佳杰,等. 电解液中稀土 Ce 对镁合金微弧氧化膜的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 134-136, 140.
- [20] 蔡景顺,曹发和,常林荣,等. Ce 改性 AZ91 的微弧氧化膜制备及其耐蚀性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 2055-2062.
- [21] 李海滨,张瑞霞,李成海,等.  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  与  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  比例对 AZ31 镁合金微弧氧化涂层显微硬度与耐磨性能的影响[J]. 轻金属, 2020, (3): 31-35.
- [22] Singh D, Mehtani H K, Grandhi S, et al. Effect of ultrafine-grained structure and chromium addition on corrosion resistance of Ni-Cr-Al alloys[J]. *Materials Characterization*, 2024, 209: 113774.
- [23] Pu J, Zhang Y L, Zhang X G, et al. Mapping the fretting corrosion behaviors of 6082 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution[J]. *Wear*, 2021, 482: 203975.
- [24] Huang Y W, Sun X L, Song J L, et al. Study on corrosion protection behavior of magnesium alloy/micro-arc oxidation coating in neutral salt spray environment[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2023, 18(7): 100179.
- [25] Lakshminarayanan A K, Vishwa S, Selvam S. Unraveling the role of micro-arc oxidation process factors on the corrosion resistance of magnesium alloy microtubes[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72 (4): 2450-2455.