

Na_2WO_4 浓度对 ZM6 镁合金微弧氧化膜层性能的影响

郭佳奇, 郭二军, 冯义成, 王丽萍, 姜文勇

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 试验采用 ZM6 镁合金作为实验材料, 微弧氧化电源采用恒压模式, 通过扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、维氏硬度计和电化学工作站对微弧氧化膜层进行性能表征, 研究 ZM6 镁合金在硅酸盐体系下电解液中不同浓度 Na_2WO_4 添加剂对 ZM6 镁合金微弧氧化膜层表面形貌、物相组成及耐蚀性的影响。试验结果表明: Na_2WO_4 的添加可有效改善膜层的表面形貌及性能。随着 Na_2WO_4 浓度的增加, 耐蚀性呈先升高后降低的趋势。当 Na_2WO_4 浓度为 1 g/L 时, 膜层质量和耐蚀性能达到最好; 膜层物相主要由 MgO , Mg_2SiO_4 和少量 WO_3 组成; 自腐蚀电位为 $-1.482\ 247\ \text{V}$, 腐蚀电流为 $0.146\ \mu\text{A}$ 。

关键词: ZM6 镁合金; 微弧氧化; Na_2WO_4 添加剂; 耐蚀性

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.03.017

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)03-0115-06

Effect of Na_2WO_4 Concentration on the Properties of Micro-arc Oxidation Coating of ZM6 Magnesium Alloy

GUO Jia-qi, GUO Er-jun, FENG Yi-cheng, WANG Li-ping, JIANG Wen-yong

(School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: The test uses ZM6 magnesium alloy as the experimental material, the micro-arc oxidation power supply uses a constant pressure mode, and the performance of the micro-arc oxidation film layer is performed by a scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), Vickers hardness tester and electrochemical workstation. The effect of different concentration of Na_2WO_4 additive in silicic acid system on the surface morphology, phase composition and corrosion resistance of micro arc oxidation layer of ZM6 magnesium alloy was studied. The experimental results show that the addition of Na_2WO_4 can effectively improve the surface morphology and properties of the films. With the increase of Na_2WO_4 concentration, the corrosion resistance first increased and then decreased. When the Na_2WO_4 concentration is 1 g/L, the film quality and corrosion resistance are the best; the film phase is mainly composed of MgO , Mg_2SiO_4 and a small amount of WO_3 ; the self-corrosion potential is $-1.482\ 247\ \text{V}$, and the corrosion current is $0.146\ \mu\text{A}$.

Keywords: ZM6 magnesium alloy; micro arc oxidation; Na_2WO_4 additive; corrosion resistance

收稿日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(51804090) .

作者简介: 郭佳奇(1994—), 男, 硕士研究生;

冯义成(1978—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师.

通信作者: 郭二军(1963—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, E-mail: guoerjun@126.com.

0 引言

镁是继钢铁、铝之后的第三大金属工程材料^[1-3]。镁合金因其良好的尺寸稳定性和电磁屏蔽性等优点,在汽车、航空航天、3C 产品等领域有广泛应用^[4-6]。但因镁及其合金化学性质较为活泼,长时间暴露在空气中极易氧化,表面生成疏松多孔的氧化膜^[7-10],从而限制了镁合金的应用范围。

为改善镁及其合金在耐蚀性能方面的缺点,扩大其应用范围并延长其使用寿命,所以出现许多镁合金表面改性技术。微弧氧化技术是 Mg、Al 等金属及其合金在电解液中产生火花放电而在合金表面原位自生的一种陶瓷膜的方法^[11,12],并且微弧氧化反应是一种多因素参与控制的反应过程,其中包含电参数和添加剂等因素都参与调控微弧氧化反应进行。在电解液中加入钨元素一方面可以提高电解液的离子浓度,另一方面可以在微弧氧化膜层中形成多种钨氧化物,从而提高膜层表面形貌质量和耐蚀性能^[13-17]。

本文主要研究在硅酸盐体系电解液中加入不同浓度(0、1、2、3、4、5 g/L)的 Na_2WO_4 添加剂,研究其对 ZM6 镁合金微弧氧化表面形貌、物相组成及耐蚀性能的影响,通过对比总结出 Na_2WO_4 添加剂的最佳浓度。

1 试验材料及方法

本实验采用 ZM6 镁合金作为实验材料,成分组成详见表 1。初始材料为棒状,经线切割操作,裁剪为直径 25 mm,厚 5 mm 的圆片。实验设备采用的是哈尔滨理工大学研制的微弧氧化设备,此设备由双极性脉冲氧化电源,双层不锈钢电解槽,冷却装置,控制系统等部分组成。本实验采用恒压模式,实验基础电解液为: 10 g/L Na_2SiO_3 , 2 g/L NaOH , 1 g/L EDTA-Na , 13 g/L KF 。电压为 350 V, 占空比为 30%, 频率为 200 Hz, 反应时间 5 min, 后处理采用沸水封孔。试验过程中导线与实验材料连接处用溶胶处理,使导线与试样连接处和电解液绝缘。

表 1 ZM6 镁合金元素含量(%)

Tab. 1 ZM6 magnesium alloy element content (%)

Nd	Zn	Zr	Cu	Ni	Mg
2.76	0.36	0.46	0.016	0.023	余量

操作流程如下: (600#, 800#, 1000#, 1200#) 砂纸进行表面打磨, 去除 ZM6 镁合金表面氧化膜→超声清洗 15 min, 对试验材料进行除油处理→去离子水清洗→吹干备用。微弧氧化试样的制备在恒压条件下进行, 阳极为通过铝导线连接的试样, 阴极为不锈钢电解槽。微弧氧化结束后, 关闭电源待电压降至 0 V 后, 取出试样。

采用 thermo scientific 生产的 Apreo C 扫描电子显微镜对微弧氧化膜层的表面形貌进行观察; 采用荷兰 Panalytical 分析仪器公司生产的 X' Pert PRO 型 X 射线衍射仪对微弧氧化膜层进行物相分析, 测量参数分别为: 2θ 测量范围为 $10 \sim 100^\circ$, 扫描速率为 $0.334(^\circ)/\text{s}$, 靶材为 Cu 靶, 输出电压为 40 kV, 输出电流为 40 mA; 采用法国 BIO-LOGIC 公司生产的 VMP3 型电化学工作站对微弧氧化膜层的耐腐蚀性能进行测试, 腐蚀介质为 3.5% 的 NaCl 溶液, 饱和甘汞电极作为参比电极, 铂电极作为辅助电极。

2 试验结果与分析

2.1 不同浓度 Na_2WO_4 添加剂对微弧氧化膜层形貌的影响

Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层表面形貌的影响如图 1 所示。

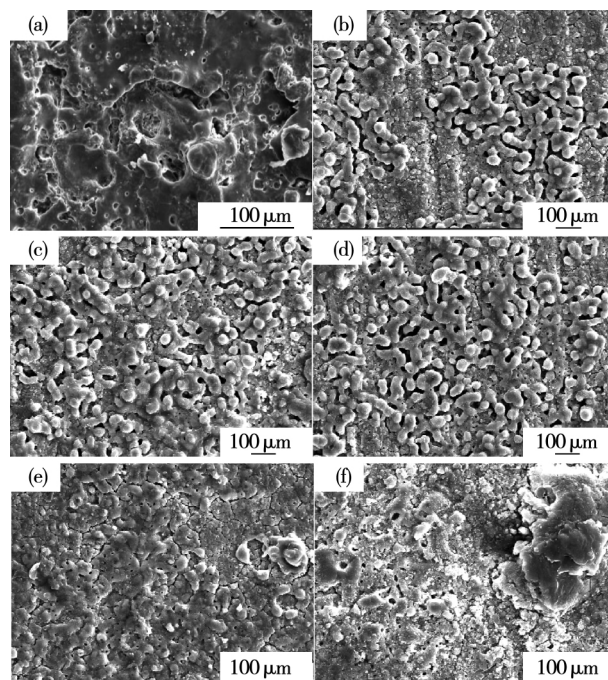


图 1 Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层表面形貌的影响

Fig. 1 Effect of Na_2WO_4 concentration on the surface morphology of MAO film

可以看出随着 Na_2WO_4 浓度的增加,膜层表面粗糙度降低,膜层表面平整度逐渐降低。当浓度为 $1 \sim 2 \text{ g/L}$ 时,此时膜层表面形貌较好,这是因为在初始电解液中加入 Na_2WO_4 后,溶液电导率上升,膜层表面放电效果增强,膜层表面温度较高,膜层表面的熔融物流动性好,所以膜层表面形貌较好。由图 1 (d) 可以看出,当 Na_2WO_4 浓度达到 3 g/L 时,膜层表面孔洞数量开始增加,并出现较大孔径孔洞和裂纹,膜层致密性下降,这是由于加入 Na_2WO_4 超过一定浓度后,溶液电导率虽然提高,加快了微弧氧化反应进行,但膜层表面击穿效果过于剧烈,膜层表面小孔径孔洞相互连接形成大孔径孔洞。当 Na_2WO_4 浓度达到 $4 \sim 5 \text{ g/L}$ 时,膜层的表面形貌变化较为明显,膜层表面出现山状形貌,并出现大孔径孔洞,表面裂纹数量增加,严重影响膜层形貌,这是因为此时 Na_2WO_4 浓度过大,反应过程剧烈,在微弧氧化反应初期膜层便已大量形成,随着反应进行到后期时在膜层的薄弱处形成微弧氧化通道,起弧集中,导致同

一位置反复击穿形成大孔径孔洞,并在反应过程中膜层内部存在较大内应力,引起膜层开裂。并且由图 1 (f) 可以看出 Na_2WO_4 浓度为 5 g/L 时,膜层表面粗糙^[18-19],这是因为此浓度下电解液中离子浓度过高,氧化物烧结过程不稳定,弧光放电强烈并且时间较长,从而膜层表面发生烧蚀现象。随着 Na_2WO_4 添加剂浓度增加,膜层表面孔洞数量逐渐减少,孔洞尺寸逐渐增大,裂纹数量增加。

2.2 不同浓度 Na_2WO_4 添加剂对微弧氧化膜层截面形貌表面元素的影响

在图 1 中选取富有代表性的包状膜层结构,分别在孔洞中心处、膜层表面、孔洞边缘进行 EDS 点分析,分别以 (a)、(b)、(c) 标记。点分析选取点及各点的 EDS 图谱如图 2 及表 2。从图 2 中可以看出膜层中主要元素分别为 Mg、W、O、Si。Mg 元素主要来自 MgO 、 Mg_2SiO_4 和镁合金基体,W 元素来自于 Na_2WO_4 添加剂。Si、O 元素来自于电解液。

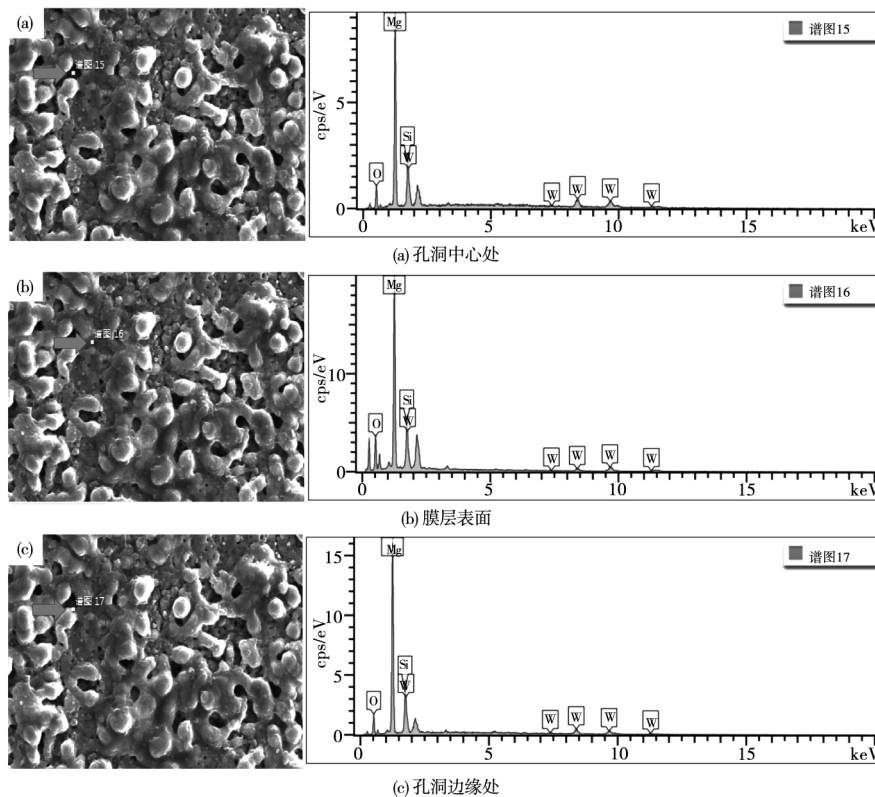


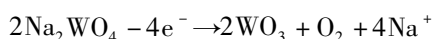
图2 EDS 分析 (添加剂浓度为 3 g/L)

Fig. 2 EDS analysis (additive concentration is 3 g/L)

Na_2WO_4 浓度对不同位置元素原子百分比的影响见表 2,膜中元素分布没有规律性,4 种元素在膜层的各位置均有出现,只是百分含量有所不同。从

图 2 的 EDS 图谱中明显看出膜层孔洞中心及孔洞边缘处的 W 元素含量较高,O 元素则相反,这是因为镁合金基体表面富集大量的 WO_4^{2-} ,在镁合金基

体表面形成放电中心, WO_4^{2-} 在高温下被氧化形成 WO_3 , 在膜层的外生长作用下, WO_3 、 MgO 和 Mg_2SiO_4 从放电通道中喷出, 在电解液冷却下沉积于基体表面增加膜厚, 这也证明了钨氧化物是在空洞内进行反应合成, 所以孔洞中心及孔洞边缘处 W 元素含量较高。王平^[2]通过热力学角度分析 Na_2WO_4 反应过程, 验证了 WO_3 是由 Na_2WO_4 产生的可能性。该反应方程式:



该反应进行的自发温度 $T > 443.1 \text{ K}$, 而微弧氧化过程中放电通道处的温度高于 3000 K , 热影响区温度也高于 2000 K , 满足该反应自发进行的热力学条件。

表2 同一 Na_2WO_4 浓度不同位置元素原子百分比
(Na_2WO_4 浓度为 3 g/L) / %

Tab. 2 Percent atomic content of elements in different positions of the same Na_2WO_4 concentration
(Na_2WO_4 concentration is 3 g/L) / %

Atom / %	Mg	O	W	Si
(a)	28.71	10.18	25.13	4.50
(b)	33.02	18.39	8.80	6.20
(c)	39.03	11.89	18.14	5.52

表3 Na_2WO_4 浓度对(a)位置处元素原子百分比的影响 / %

Tab. 3 Effect of Na_2WO_4 concentration on elemental atomic content ratio at (a) position / %

浓度 / (g/L)	Mg	O	W	Si
1	20.22	4.27	6.77	0.51
2	35.78	4.94	3.82	3.09
3	28.71	10.18	15.13	4.50
4	51.57	12.59	5.56	3.72
5	9.87	14.92	10.00	1.32

Na_2WO_4 浓度对(a)位置处元素原子百分比的影响见表3。随着 Na_2WO_4 添加量的增加 Mg、O 元素在膜层中的含量均有一定的波动, Mg 元素在呈现出上升趋势, 在 Na_2WO_4 浓度为 5 g/L 时, 出现大幅度降低是因为此浓度下膜层厚度大, 贯穿孔洞数量较少, X 射线不能穿过膜层到达镁合金基体, 导致 Mg 元素含量大幅度降低。W 元素随添加剂浓度增加呈现先上升后下降的趋势, 而在 2 g/L 及 4 g/L 时有所下降是有两方面原因, 一是因为放电通道内产生的 WO_3 未扩散到测试点所在的区域, 所以 W 元

素含量较少, 二是因为随着 Na_2WO_4 添加量的增加, 对膜层中 Mg 的氧化反应起促进作用。 WO_3 的熔点只有 1743 K , 在膜层中高温微区附近的 WO_3 与 Mg 发生反应, 使熔点进一步下降, 加快放电通道内氧化反应速率。膜层中 O 元素的含量一直增加, 这是因为电解液中 O_2 与 Mg 结合形成 MgO 和 Mg_2SiO_4 , 所以膜层中 O 元素的含量呈上升趋势。

2.3 不同浓度 Na_2WO_4 添加剂对微弧氧化膜层物相组成的影响

Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层物相的影响如图3所示。由图可见, 膜层中主要组成相为 Mg、 MgO 和 Mg_2SiO_4 , 与基础电解液中形成的膜层的物相组成基本相同。并且可以看出电解液中加入 Na_2WO_4 后, 衍射图谱中出现了 WO_3 相, 证明了 Na_2WO_4 参与了微弧氧化反应, 生成新的相并促进膜层生长。由图3可以看出随着 Na_2WO_4 浓度的增加, WO_3 峰值逐渐增加, 说明 WO_3 在膜层中的含量随 Na_2WO_4 浓度增加而上升。

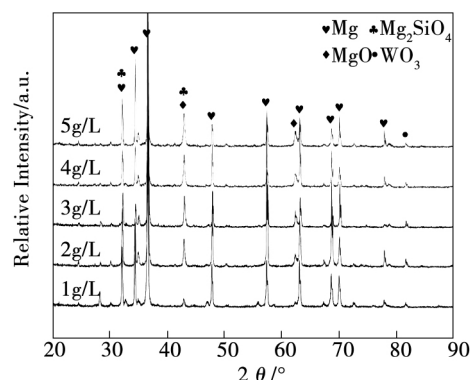


图3 Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层物相的影响

Fig. 3 Effect of Na_2WO_4 concentration on the phase of MAO film

2.4 不同浓度 Na_2WO_4 添加剂对微弧氧化膜层耐蚀性的影响

Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层极化曲线的影响如图4所示。由图可见, 在初始电解液中加入不同浓度的 Na_2WO_4 , 经微弧氧化反应后得到的膜层的自腐蚀电位较电参数条件下得到的膜层有所提升, 说明改变 Na_2WO_4 浓度对膜层耐蚀性能有提升作用。

Na_2WO_4 浓度的改变使膜层耐腐蚀性增加有两方面原因, 第一是因为膜层中耐蚀产物的含量升高, 电解液中加入 Na_2WO_4 后, 溶液导电性提高, 放电通道内反应加剧, 形成了大量的 MgO 和 Mg_2SiO_4 相并

附着在膜层表面,从而提高了膜层耐蚀性能。另一方面由图 1 可以看出,相对于电参数条件下的膜层形貌,加入 Na_2WO_4 添加剂后的膜层中孔洞数目减少,对膜层耐蚀性能起到提升作用,这些因素的共同作用导致膜层的自腐蚀电位增加,腐蚀电流减小,膜层耐蚀性能得到改善。可以看出 Na_2WO_4 添加量为 1 g/L 时自腐蚀电位最高,说明此浓度下膜层腐蚀倾向最小,膜层耐蚀性能最好,而随着 Na_2WO_4 添加量增加,膜层的自腐蚀电位反而有所降低,这是因为随着电解液中 Na_2WO_4 浓度升高,微弧氧化过程中大量的 WO_4^{2-} 吸附于膜层表面,形成集中的放电中心,放电通道变大,膜层中的孔洞尺寸增大并出现微裂纹,破坏了致密层的致密性,为 Cl^- 的进入提供通道。

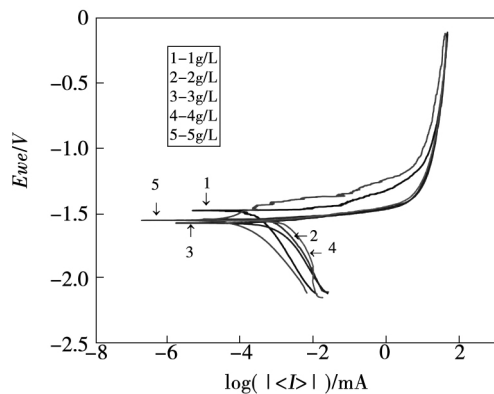


图 4 Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜腐蚀电位极化曲线的影响

Fig. 4 Effect of Na_2WO_4 concentration on corrosion potential polarization curve of MAO film

表 4 Tafel 拟合数据

Tab. 4 Tafel fitting data

浓度/(g/L)	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/\mu\text{A}$
1	-1.482 247	0.146
2	-1.544 089	0.450
3	-1.575 716	0.568
4	-1.553 094	1.351
5	-1.558 991	0.238

Na_2WO_4 浓度对微弧氧化膜层自腐蚀电位与腐蚀电流的影响见表 4,可以看出微弧氧化膜层的耐蚀性能最好的是 Na_2WO_4 添加量为 1 g/L,最小腐蚀电流为 0.146 μA ,而电参数条件下的腐蚀电流为 0.468 μA ,较电参数条件下的腐蚀电流降低了 68.81%。并且在 Na_2WO_4 添加量为 1 g/L 时的自腐

蚀电位最高,代表 1 g/L 浓度下的膜层腐蚀速度最小,综上所述 Na_2WO_4 添加量为 1 g/L 时,膜层的耐蚀性能最好。随着 Na_2WO_4 浓度的增加,膜层的腐蚀电流升高主要有两方面原因,一是与膜层独特的多孔性结构有关,二是因为膜层中形成的多个物相之间形成共晶组织,在微观内形成微小的电化学原电池,膜层表面电流的运动加快,导致膜层的腐蚀速率增加。

3 结 论

1) Na_2WO_4 添加剂在微弧氧化试验过程中加快 MgO 和 Mg_2SiO_4 的生成,并形成多种钨氧化物存在于膜层中,使微弧氧化膜层的表面变得光滑平整。 Na_2WO_4 添加剂的加入显著的改变膜层的微观组织形貌,使膜层表面的孔洞变得小而少。

2) 添加剂 Na_2WO_4 显著的增加了膜层的耐腐蚀性能,自腐蚀电位与腐蚀电流均有较大提升,膜层耐腐蚀性显著提高。 Na_2WO_4 添加量为 1 g/L,自腐蚀电为 -1.482 247 V,腐蚀电流为 0.146 μA ,膜层耐蚀性能最好。

参 考 文 献:

- [1] 董海荣,马颖,王晟,等. 氟化钾对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜的生长及微观结构的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1): 249.
- [2] DONG Hairong, MA Ying, WANG Sheng, et al. Effect of Potassium Fluoride on Growth and Microstructure of MAO Coating of AZ91D Magnesium Alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(1): 249.
- [3] 陈宏,郭亚欣,官月,等. 镁合金微弧氧化工艺参数研究 [J]. 表面技术, 2017, 46(5): 34.
- [4] CHEN Hong, GUO Yaxin, GONG Yue, et al. Process Parameters of Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation [J]. Surface Technology, 2017, 46(5): 34.
- [5] CHEN Yongjun, XU Zhigang, SMITH Christopher, et al. Recent Advances on the Development of Magnesium Alloys for Biodegradable Implants [J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(11): 4561.
- [6] 吕文泉,王锦程,杨跃双,等. 高强镁合金的研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2012, 26(3): 105.
- [7] LV Wenquan, WANG Jincheng, YANG Yueshuang, et al. Situation and Development Trend of High Strength Magnesium Alloy Research [J]. Materials Reports, 2012, 26(3): 105.
- [8] EASTON M, BEER A, BARNETT M, et al. Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures [J]. Journal of Metals, 2008, 60(11): 57.
- [9] 康鸿跃,陈善华,马永平,等. 镁合金在军事装备中的应用 [J]. 金属世界, 2008(1): 61.

- KANG Hongyue, CHEN Shanhua, MA Yongping et al. Application of Magnesium Alloy in Military Equipment [J]. Metal World, 2008(1): 61.
- [7] 黄建余, 冯洲鹏, 李京, 等. 提高 AZ91D 镁合金耐蚀性的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(16): 63.
HUANG Jianyu, FENG Zhoupeng, LI Jing, et al. Research Progress in Improving Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(16): 63.
- [8] 李连平, 郝建民, 安永太, 等. AZ91D 镁合金双脉冲微弧氧化参数确定及耐蚀性研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(6): 205.
LI Lianping, HAO Jianming, AN Yongtai, et al. Study on Properties and Optimization Process Parameters on Bipolar Micro-arc Oxidation of AZ91D Mg Alloy [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(6): 205.
- [9] 匡书珍, 于彦东, 李杰. 电压及成膜时间对 Mg-Zn-Zr-Ca 合金陶瓷膜微观组织影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(4): 21.
KUANG Shujie, YU Yandong, LI Jie. Effects of Applied Voltage and Film-formation Time on Microstructure of Films Formed on Mg-Zn-Zr-Ca Alloy [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2015, 20(4): 21.
- [10] 刘斌, 张普亮, 王金清, 等. AZ91D 镁合金在不同电解液体系中的微弧氧化行为 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(1): 16.
LIU Bin, ZHANG Puliang, WANG Jinqing, et al. Micro Arc Oxidation Behavior of AZ91D Magnesium Alloy in Different Electrolyte [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(1): 16.
- [11] ZHANG Lei, ZHANG Jun-qing, CHEN Cheng-fu, et al. Advances in Microarc Oxidation Coated AZ31 Mg Alloys for Biomedical Applications [J]. Corrosion Science, 2015, 91: 7.
- [12] BARATI Darband G, ALIOFKHAZRAEI M, HAMGHALAM P, et al. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium and Its Alloys: Mechanism, Properties and Applications [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2017: S2213956717300075.
- [13] 李光岩, 王从曾, 张连宝. 添加 Na_2WO_4 对镁合金微弧氧化陶瓷层成分及结构的影响 [J]. 金属热处理, 2007, 32(4): 58.
- LI Guangyan, WANG Congceng, ZHANG Lianbao. Influence of Addition Na_2WO_4 on the Phase Constituent and Structure of Magnesium Alloy Micro-arc Oxidated Ceramic Layer [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(4): 58.
- [14] GARY J, LUAN B. Protective Coatings on Magnesium and Its—a Critical Review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 33(26): 88.
- [15] APELFELD A, KRIT B, LUDIN V, et al. The Characterization of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on AZ41 Magnesium Alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 322: 127.
- [16] 黄建余, 付永红, 穆耀钊, 等. ZL205A 铝合金微弧氧化研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 131.
HUANG Jianyu, FU Yonghong, MO Yaozhao, et al. Research on Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Coating on ZL205A [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(2): 131.
- [17] 肖峰, 杜东方, 陈辉, 等. 基于微弧氧化的钛合金复合涂层技术研究现状 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 7.
XIAO Feng, DU Dongfang, CHEN Hui, et al. Research Status of Titanium Alloy Composite Coating Technology Based on Micro-arc Oxidation [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(10): 7.
- [18] 闫凤英, 石玉龙, 莫伟言. 氧化时间对钛表面微弧氧化膜层的影响 [J]. 表面技术, 2010, 39(4): 42.
YAN Fengying, SHI Yulong, MO Weiyan. Influence of Oxidation Time on Micro Arc Oxidation Coating on Titanium Surface [J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 42.
- [19] 吕维玲, 马颖, 陈体军, 等. 氧化时间对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜层微观组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1385.
LV Weiling, MA Ying, CHEN Tijun, et al. Effect of Oxidation Time on Microstructure and Properties of Micro Arc Oxidation Coating of AZ91D Magnesium Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1385.
- [20] 王平. 铝合金表面 MOXY-改性微弧氧化膜制备及机理研究 [J]. 成都: 西南石油大学, 2017: 1.

(编辑: 温泽宇)