

TiN 颗粒对镁合金微弧氧化过程及膜层性能的影响

张瑞珠¹, 贾新杰¹, 唐明奇¹, 任洋洋¹, 蔡会苹²

(1.华北水利水电大学, 郑州 450011; 2.渤海大学, 辽宁 锦州 121000)

摘要: **目的** 分析 TiN 颗粒在镁合金微弧氧化过程中的作用, 并研究其在膜层中对镁合金硬度、耐磨和耐蚀等性能的影响。**方法** 通过在微弧氧化电解液中添加 2.7 μm TiN 颗粒, 并使其充分分散于电解液中, 使电解液中 TiN 颗粒的质量浓度分别为 0、2、4、6 g/L, 并控制其他实验参数(如电流密度、频率、占空比和氧化时间)一样的情况下进行实验, 通过电子显微镜、涂层厚度测厚仪、显微维氏硬度计、X 射线衍射和电化学工作站, 分别从膜层的表面形貌、厚度、硬度、相组成及耐蚀性等方面, 研究了 TiN 颗粒对镁合金微弧氧化膜层性能的影响。**结果** 在微弧氧化电解液中添加 TiN 颗粒后, 相同电化学参数下制得的微弧氧化膜层变得致密, 厚度、硬度有所增加, 氧化膜层主要由 Mg、MgO、Mg₂Zr₅O₁₂、TiN 组成。极化曲线显示, 加入 TiN 颗粒, 制备的微弧氧化膜层比未加入 TiN 颗粒制得的膜层的腐蚀电流下降了 2 个数量级。阻抗图谱表明, 电阻值增加了 1 个数量级。**结论** TiN 颗粒能够随镁合金的微弧氧化过程进入制得的氧化膜层中, 并且能够增加膜层厚度和硬度, 使膜层的耐磨、耐蚀性得到提高。

关键词: AZ91D 镁合金; 微弧氧化; TiN 颗粒; 膜层硬度; 物相组成; 耐蚀性

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0081-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.013

Effect of TiN Particles on Micro-arc Oxidation Process and Film Properties of Magnesium Alloy

ZHANG Rui-zhu¹, JIA Xin-jie¹, TANG Ming-qi¹, REN Yang-yang¹, CAI Hui-ping²

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2.Bohai University, Jinzhou 121000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the effect of TiN particles during micro-arc oxidation of magnesium alloy, and study the effect of TiN particles on hardness, wear resistance and corrosion resistance of magnesium alloy in the film. The experiment was completed by adding 2.7 μm TiN particles to the micro-arc oxidation electrolyte and fully dispersing it in the electrolyte, the concentration of TiN particles in electrolyte was set to 0 g/L, 2 g/L, 4 g/L, 6 g/L, respectively, and other experimental parameters (such as current density, frequency, duty cycle and oxidation time) were controlled identical to the same experiment. The effect of TiN particles on properties of micro-arc oxidation coatings on magnesium alloys was studied by measuring surface morphology, film thickness, film hardness, phase composition and corrosion resistance using electron microscope, coating thickness gauge, micro-Vickers hardness tester, X-ray diffractometer and electrochemical workstation. After TiN particles were

收稿日期: 2017-03-15; 修订日期: 2017-05-05

Received: 2017-03-15; Revised: 2017-05-05

基金项目: 河南省创新型科技团队(C20150017); 河南省工程技术研究中心(豫科 2016-221 号-高新 35); 郑州市重点实验室(郑科技[2014]3 号-10)

Fund: Supported by the Henan Province Innovative Technology Team(C20150017), Henan Province Engineering Technology Research Center(Yuke2016-221-High-tech35), Key Laboratory of Zhengzhou City (Zheng Technology[2014]3-10)

作者简介: 张瑞珠(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事材料表面防护的研发工作。

Biography: ZHANG Rui-zhu (1963—), Female, Ph.D., Professor, Research focus: material surface protection.

added to the micro-arc oxidation electrolyte, the micro-arc oxidation film obtained under the identical electrochemical parameters became denser, thicker and harder. The oxide film was mainly composed of Mg, MgO, Mg₂Zr₃O₁₂ and TiN. Polarization curves showed that compared with TiN particle-free micro-arc oxidation film, corrosion current of the film containing TiN particles decreased by two orders of magnitude. Impedance graph showed that the resistance value increased by one order of magnitude. TiN particles can enter the prepared oxide film along with micro-arc oxidation process of magnesium alloy, and can increase the film thickness and hardness, and thereby improving wear and corrosion resistance of the film.

KEY WORDS: AZ91D magnesium alloy; micro-arc oxidation; TiN particles; film hardness; phase composition; corrosion resistance

在汽车“轻量化”发展、电子元器件趋于高度集成化和小型化的今天,镁合金作为结构金属材料中最轻的金属,因其具有导热性、阻尼性能和电磁屏蔽性能好而广泛应用于许多领域,而且镁合金压铸件在使用完毕后,可以直接进行回收再利用。

镁合金的密度小、比强度大等优点,使其具有很强的竞争力^[1]。镁合金有弹性模量小、塑性差等缺点,最主要的缺点是较差的耐磨性和耐蚀性能。微弧氧化是利用单位面积高能量密度,把物质的阳极氧化由法拉第工作区引到高压放电区,通过电化学、热化学及等离子体化学等的共同作用,在 Al、Mg、Ti 等有色

金属表面原位形成陶瓷质氧化膜^[2-4],这极大地提高了金属表面的硬度、致密性和耐磨、耐蚀性。

1 微弧氧化膜试样制备

1.1 材料、设备

实验采用 AZ91D 镁合金作为研究的基体材料,尺寸为 20 mm×20 mm×7 mm,其主要成分见表 1。镁合金微弧氧化膜层的结构与性能的测试方法如表 2 所示。镁合金微弧氧化设备主要包括氧化电源、机械搅拌器、水冷循环系统以及电解槽,如图 1 所示。

表 1 AZ91D 镁合金试样的主要成分

Tab.1 AZ91D magnesium alloy sample of the main components

化学元素	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
质量分数/%	8.3~9.7	0.35~1.0	0.15~0.5	0.1	0.036	0.002	0.005	余量

表 2 镁合金微弧氧化膜层结构与性能的测试方法
Tab.2 Standard test method for structure and properties of micro-arc oxidation coatings

设备名称	结构与性能分析
电子显微镜	表面形貌特征
涂镀层测厚仪	微弧氧化膜层厚度
电脑数显显微维氏硬度计	微弧氧化膜层硬度
电化学工作站	微弧氧化膜耐蚀性
X 射线衍射仪	膜层物相分析

1.2 试样的制备

1) 基材处理。把镁合金块切成 20 mm×20 mm×7 mm 的试样,用水磨砂纸打磨,去除表面毛刺,在表面上钻一个直径为 2 mm、深为 4 mm 的盲孔,用于连接铝导线,并采用绝缘膜把铝导线表面密封好。

2) 确定微弧氧化电解液^[5-8]。微弧氧化电解液的成分及其浓度,对微弧氧化制得的陶瓷氧化膜的结构及性能有重要影响。本实验采用的电解液为验证过的电解液配方,其组成为:8 g/L 氟锆酸钾,10 mL/L 三乙醇胺,8 g/L 六偏磷酸钠,3 g/L 氢氧化钠。

3) 电参数的确定^[6-12]。脉冲频率为 0.30 kHz,脉冲占空比为 25%,负脉冲输出电压为 0 V,氧化时间为 20 min,电解液温度保持在 25~40 °C。

4) 添加物 TiN 颗粒。电解液中添加的 TiN 颗粒尺寸为 2.7 μm。

5) 进行实验。首先开启微弧氧化电源,按照事先设计好的实验工艺参数进行设置,实验过程中,每隔 1 min 记录正脉冲输出电压。实验成功做出几块镁合金微弧氧化试样后,依次使溶液中的 TiN 颗粒质量浓度为 2、4、6 g/L,再进行试样制备。

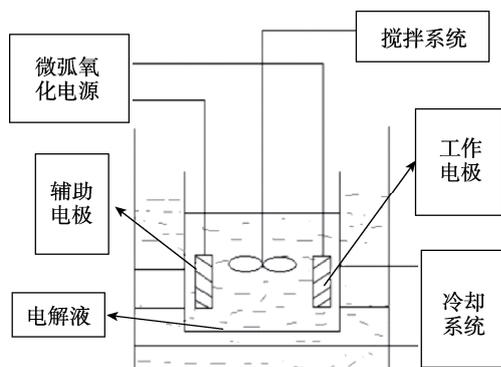


图 1 微弧氧化设备系统

Fig.1 Micro-arc oxidation equipment system

2 微弧氧化膜性能检测与分析

2.1 膜层表面形貌分析

采用 COXEM 公司生产的 EM-30 电子显微镜来观察镁合金微弧氧化陶瓷膜层的表面微观形貌,如图 2 所示。微弧氧化膜层都呈现多孔特征^[13],从照片上来看,膜层表面都粗糙不平。这是因为微弧氧化膜主要由众多大小不一的熔融物烧结而成,在微弧氧化膜层的生长阶段,微弧氧化电压击穿膜层形成的放电通

道,并且氧化过程中产生的气泡来不及溢出而进入膜层,形成多孔特征。膜层表面的微孔分布不均匀,形状也不规则,膜层上有明显的熔融烧结痕迹,并且有少量微裂纹存在。这是因为微弧氧化过程中,高温高压使熔融物的温度升到很高,在熔融物沿着放电通道向外喷出并到达表面后,在极短的时间内骤冷至电解液温度而形成微裂纹^[14]。从 SEM 照片可以看出,随着电解液中 TiN 浓度的增加,微弧氧化膜层的微孔数量减少,致密性增加。

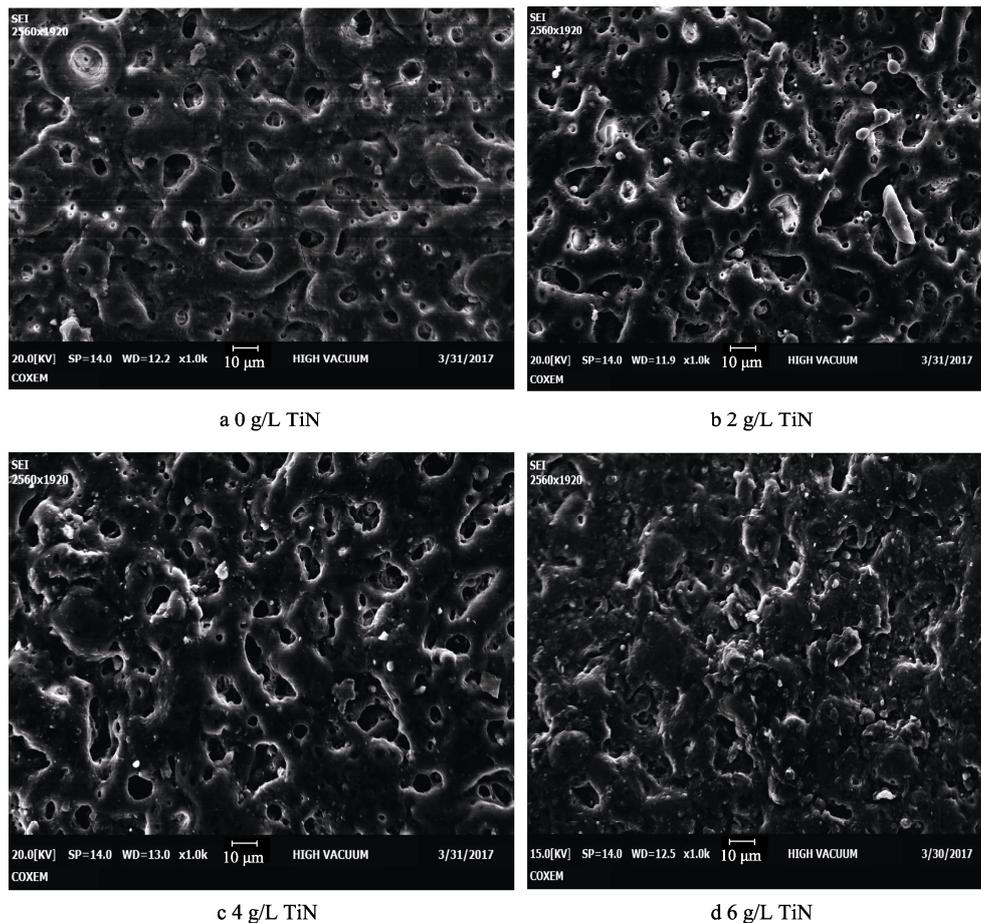


图 2 微弧氧化膜的 SEM 照片

Fig.2 SEM photograph of micro-arc oxidation film

2.2 微弧氧化膜层 XRD 物相分析

在恒流条件下,工艺参数选定频率为 330 Hz,脉冲占空比为 25%,微弧氧化时间为 20 min,对镁合金通过微弧氧化实验所得到的陶瓷氧化膜层进行 X 射线分析,结果见图 3,可知氧化膜层主要由 Mg、MgO、 $Mg_2Zr_5O_{12}$ 和 TiN 组成。物相中 Mg 的出现是因为基体材料的主要成分含镁。在微弧氧化过程中,有部分镁和氧结合生成了 MgO,所以 XRD 物相分析中也有 MgO 的出现。 $Mg_2Zr_5O_{12}$ 是 MgO 和 ZrO_2 发生化学反应而生成的。因为在电解液中,氟锆酸钾 K_2ZrF_6 会发生电离, K_2ZrF_6 电离出 K^+ 和 ZrF_6^- ,而 ZrF_6^- 在含

有 OH^- 的溶液中会吸附 OH^- 生成 $Zr(OH)_4$ 。在微弧氧化电解液通电的情况下,阴离子在磁场作用下会向阳极移动,并会在阳极发生化学反应,其中会反应生成 ZrO_2 ,镁合金也会反应生成 MgO,所以膜层 XRD 物相分析中会出现 $Mg_2Zr_5O_{12}$ 。通过向电解液中添加 TiN 颗粒, TiN 颗粒随微弧氧化过程进入陶瓷膜层,故 XRD 物相分析中有 TiN 出现,这也进一步证明了电解液中添加的 TiN 颗粒进入了氧化膜中。

2.3 膜层厚度分析

采用 DT-156 涂镀层测厚仪对含 TiN 颗粒膜层和不含 TiN 颗粒膜层的厚度进行测量分析。图 4 给出了

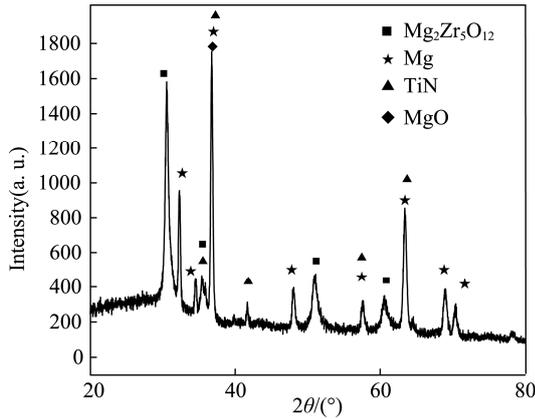


图3 微弧氧化液中添加 TiN 颗粒的氧化膜层的 XRD 物相图

Fig.3 XRD phase diagram of oxidized coating layer of tin particles added to microarc oxidation

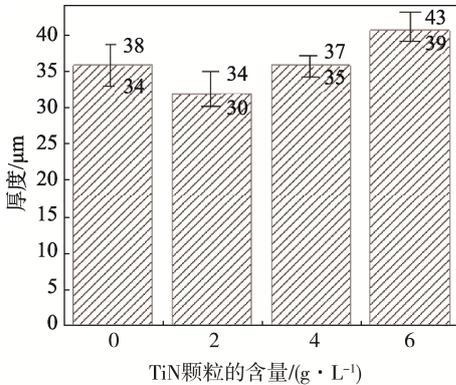


图4 膜层的厚度值与 TiN 颗粒浓度之间的关系

Fig.4 The relationship between the thickness of the film and the concentration of TiN particles

膜层厚度值与溶液中 TiN 颗粒浓度之间的关系。含 TiN 颗粒 2 g/L 的膜层平均厚度比不含 TiN 颗粒膜层的薄,其主要原因是随着 TiN 颗粒的加入,成膜生长周期变长,膜层的致密性相对较好,在相同时间内形成的氧化膜较薄。随着电解液中 TiN 颗粒的浓度增加,在进行微弧氧化过程中,加入的 TiN 颗粒将不断熔化,并和 AZ91D 镁合金基体产生的熔融物结合在一起,使单位时间内产生的熔融物的量相对增多,使在相同时间内氧化膜的厚度慢慢增加。

2.4 微弧氧化膜层硬度分析

采用 WD-1000JMT2 电脑数显显微维氏硬度计测量微弧氧化膜层的显微硬度,如图 5 所示。微弧氧化膜层的硬度高于镁合金基体的硬度,添加 TiN 颗粒后,制得的微弧氧化膜层的硬度比不加 TiN 颗粒的膜层硬度高,并且随着 TiN 颗粒浓度的增加,膜层硬度也会增加,但增加速率逐渐变缓。其主要原因是在制备微弧氧化膜层时,经过微弧氧化作用的膜层中含有 MgO、TiN 等硬质相,其中 MgO 是在微弧氧化过程中镁基体于高温下反应生成的,而 TiN 则是添加的 TiN 颗粒随着微弧氧化过程进入到膜层

中。硬质相的存在使膜层硬度比镁合金基体高,并且因为添加颗粒 TiN 的熔化,使制得的陶瓷膜层表面的微孔直径减小,其致密性相对提高,随着 TiN 颗粒的加入,膜层中 TiN 的含量也会增加,而 TiN 的硬度比较高,所以随着膜层中 TiN 含量的增加,膜层硬度也会上升。

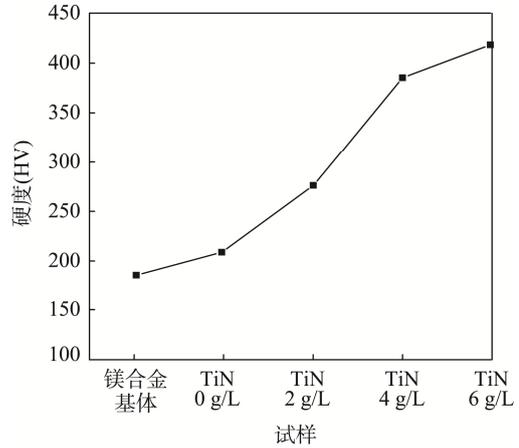


图5 镁合金基体和不同 TiN 质量浓度下的膜层硬度 Fig.5 Magnesium alloy matrix and different TiN concentration of the film hardness

2.5 电化学腐蚀分析

采用 CHI660E 电化学工作站对制得的微弧氧化膜层试样在 3.5%NaCl 溶液中进行耐蚀性测试,实验用的参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极^[15]。利用 CHI660E 电化学工作站测量 I/E 曲线,并且对 I/E 曲线分析塔菲尔方程的斜率,可以得到腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流 I_{corr} 。通过得到的腐蚀电流 I_{corr} ,分析得到相应陶瓷膜的耐蚀性,并且微弧氧化膜层的腐蚀电流是主要参考指标。

图 6 是镁合金及其微弧氧化膜试样在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线。由图 6 可知,与 AZ91D 镁合金基体相比,通过微弧氧化后的镁合金试样的自腐蚀电位明显上移,腐蚀电流密度降低。极化曲线所得的电

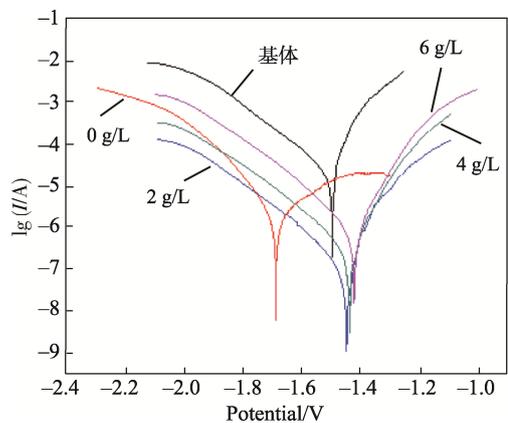


图6 镁合金试样在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线 Fig.6 Polarization curves of magnesium alloy samples in 3.5% NaCl solution

化学参数如表 3, 可知镁合金在电解液中经过微弧氧化处理后, 腐蚀电流密度降低了两个数量级, 添加 TiN 颗粒后, 微弧氧化陶瓷膜层的耐蚀性能有了很大的提高。其主要原因可分为两方面: 第一, 添加 TiN 颗粒后, TiN 颗粒能够通过微弧氧化作用进入到一定深度的氧化膜层中, 并在成膜过程中与镁合金基体反应, 在一定程度上填充了放电通道遇凝固后留下的微孔, 所得膜层的耐蚀性稍有下降, 并且由于 TiN 颗粒的加入使膜层的孔隙率减小, 致密性增加, 从而阻止了腐蚀性 Cl^- 进入膜层而产生腐蚀, 与没添加 TiN 颗粒制得的陶瓷层相比, 添加 TiN 颗粒后, 可使其在氧化膜表面形成化学性质稳定的氧化层, 从而使得腐蚀电流降低; 第二, 在电解液中加入 TiN 颗粒后进行微弧氧化, 使陶瓷层的生长速度加快, 陶瓷层增厚, 腐蚀电流密度降低, 所以制得的微弧氧化膜层的耐蚀性能得到提高。

表 3 镁合金基体及不同浓度 TiN 微弧氧化试样在 3.5%NaCl 溶液中电化学参数

Tab.3 Magnesium alloy matrix and different concentrations of TiN micro-arc oxidation test in 3.5% NaCl solution electrochemical parameters

试样	腐蚀电压 E_{corr}/V	腐蚀电流 I_{corr}/A
镁合金基体	-1.495	2.9×10^{-5}
TiN 0 g/L 试样	-1.465	4.203×10^{-7}
TiN 2 g/L 试样	-1.468	9.585×10^{-8}
TiN 4 g/L 试样	-1.521	2.249×10^{-7}
TiN 6 g/L 试样	-1.458	6.939×10^{-7}

从热力学角度分析^[16-18], 物质的腐蚀电位主要由金属材料本身的性质决定, 金属的腐蚀电位越正, 腐蚀倾向越低, 而复合陶瓷层的腐蚀电位与陶瓷层及镁合金基体相比较低, 说明复合膜层的耐蚀性优于陶瓷层和镁合金基体。所以添加了 TiN 颗粒后, 明显提高了镁合金微弧氧化膜层抵抗外界腐蚀的能力, 但材料的腐蚀电位只能说明其腐蚀倾向, 并不能说明其在具体使用环境中的实际耐蚀性, 因此要判断材料的耐蚀性能还要看其在具体腐蚀环境中的腐蚀电流密度。

图 7 是 AZ91D 镁合金及其微弧氧化试样在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱图。由图 7 可知, 经过微弧氧化的镁合金试样的电阻比镁合金基体增加了 1~2 个数量级, 随着 TiN 颗粒的增加, 试样的电阻增加, 表明微弧氧化提高了 AZ91D 镁合金基体的耐蚀性。微弧氧化陶瓷膜层的耐蚀性主要由膜层的内部致密性决定, 随着微弧氧化电解液中 TiN 颗粒浓度的增加, 微弧氧化膜层的孔隙率降低, 致密性提高, 这与极化曲线测试的结果一致。

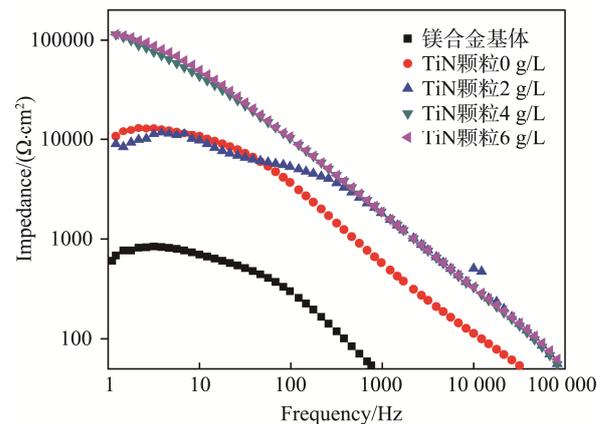


图 7 镁合金及其微弧氧化试样在 3.5%NaCl 溶液中的 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of magnesium alloy and its micro-arc oxidation sample in 3.5% NaCl solution

3 结论

1) 通过在电解液中加入 TiN 颗粒制得的微弧氧化膜层中出现了 Mg、MgO、 $\text{Mg}_2\text{Zr}_5\text{O}_{12}$ 和 TiN 相, 比未加 TiN 颗粒制得的膜层多了 TiN 相, 这说明 TiN 颗粒会进入膜层。由于 TiN 颗粒的强度和硬度高, 提高了膜层的硬度和耐蚀性。

2) 从 SEM 照片分析可以看出, 加入 TiN 颗粒后, 制得的微弧氧化膜层的表面微孔减少且变得致密。

3) 和未加入 TiN 颗粒所制备的膜层相比, 加入 TiN 颗粒后制备的微弧氧化膜层的腐蚀电流下降了 2 个数量级, 电阻值增加了 1 个数量级, 因而添加 TiN 颗粒后的膜层具有更好的耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 魏世丞, 徐滨士, 付东兴. 军用装备镁合金表面防腐蚀技术研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20(6): 79-83. WEI Shi-cheng, XU Bin-shi, FU Dong-xing. Study on Anti-corrosion Technology of Magnesium Alloy on Military Equipment[J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2006, 20(6): 79-83.
- [2] 蒋百灵, 李均明, 时惠英. 微弧氧化技术在镁合金防护处理中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2003(5): 24. JIANG Bai-ling, LI Jun-ming, SHI Hui-ying. Application of Micro-arc Oxidation Technology in Protection of Magnesium Alloy[J]. Automotive Process and Materials, 2003(5): 24.
- [3] 薛文彬, 邓志威, 来永春. ZM5 镁合金微弧氧化膜的生长规律[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(3): 42. XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun. Growth Law of ZM5 Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Film[J]. Heat Treat of Metal, 1998, 19(3): 42.
- [4] 尹延红, 佟国栋, 刘海峰. 压铸镁合金表面处理工艺研

- 究[J]. 特种铸造及有色合金, 2004(1): 53.
YIN Yan-hong, TONG Guo-dong, LIU Hai-feng. Study on Surface Treatment Technology of Die Casting Magnesium Alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2004(1): 53.
- [5] GUO Hong-fei, AN Mao-zhong, XU Shen, et al. Micro-arc Oxidation of Corrosion Resistant Ceramic Coating on a Magnesium Alloy[J]. Materials Letters, 2005, 11: 1-4.
- [6] 王立世, 蔡启舟, 魏伯康. 国外镁合金微弧氧化研究现状[J]. 材料保护, 2004, 37(7): 61.
WANG Li-shi, CAI Qi-zhou, WEI Bo-kang. Research Status of Micro-arc Oxidation of Magnesium Alloys Abroad[J]. Material Protection, 2004, 37(7): 61.
- [7] 邓志威, 薛文斌, 汪新福. 铝合金表面微弧氧化技术[J]. 材料保护, 1996, 29(2): 15-16.
DENG Zhi-wei, XUE Wen-bin, WANG Xin-fu. Micro-arc Oxidation Technology on Aluminum Alloy Surface[J]. Material Protection, 1996, 29(2): 15-16.
- [8] 薛文斌, 来永春, 邓志威. 镁合金微等离子体氧化膜的特性[J]. 材料科学与工程, 1997, 5(2): 89-92.
XUE Wen-bin, LAI Yong-chun, DENG Zhi-wei. Characteristics of Micro-plasma Oxide Films for Magnesium Alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1997, 5(2): 89-92.
- [9] 郭洪飞, 安茂忠, 徐莘. 镁合金微弧氧化配方的优化及膜层耐蚀性能评价[J]. 电镀与涂饰, 2004, 23(6): 1-4.
GUO Hong-fei, AN Mao-zhong, XU Shen. Optimization of Micro-arc Oxidation Formula for Magnesium Alloy and Evaluation of Corrosion Resistance of Membrane[J]. Electroplating & Finishing, 2004, 23(6): 1-4.
- [10] 陈显明, 罗承萍, 刘江文. 镁合金微弧氧化膜层形成过程探讨[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 16.
CHEN Xian-ming, LUO Cheng-ping, LIU Jing-wen. Discussion on Formation Process of Micro-arc Oxidation Film on Magnesium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 16.
- [11] 卢立红, 沈德久, 王玉林. 微弧氧化陶瓷膜层的性能及其应用[J]. 材料保护, 2001, 34(1): 17.
LU Li-hong, SHEN Deng-jiu, WANG Yu-lin. Performance and Application of Micro-arc Oxidation Ceramic Coating[J]. Material Protection, 2001, 34(1): 17.
郝建民, 陈宏, 张荣军. 电参数对镁合金微弧氧化陶瓷层致密性和电化学阻抗的影响[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(6): 249.
HAO Jian-min, CHEN Hong, ZHANG Rong-jun. Effect of Electrical Parameters on Denseness and Electrochemical Impedance of Micro-arc Oxidation Ceramic Coating on Magnesium Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2003, 24(6): 249.
- [12] 崔联合, 彭桂枝, 张迎涛. 氧化时间对 ZA43 合金微弧氧化膜摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 32-41.
CUI Lian-he, PENG Gui-zhi, ZHANG Ying-tao. Effect of Oxidation Time on Friction and Wear Properties of ZA43 Alloy Micro-arc Oxidation Film[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 32-41.
- [13] 卫中领, 陈秋蓉, 郭歆聪. 镁合金微弧氧化膜的微观结构及耐蚀性研究[J]. 材料保护, 2003, 36(10): 21.
WEI Zhong-ling, CHEN Qiu-rong, GUO Xin-cong. Study on Microstructure and Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Film for Magnesium Alloy[J]. Materials Protection, 2003, 36(10): 21.
- [14] LIANG J, SRINIVASAN B P, BLAWERT C. Comparison of Electrochemical Corrosion Behaviour of MgO and ZrO₂ Coatings on AM50 Magnesium Alloy Formed by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Corrosion Science, 2009(51): 2483-2492.
- [15] LIM T S, RYU H S, HONG S H. Electrochemical Corrosion Properties of CeO₂ Containing Coating on AZ31 Magnesium Alloys Prepared by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Corrosion Science, 2012(62): 104-111.
- [16] 杨志成, 吴向清, 谢发勤. 纳米石墨改性 ZM5 镁合金微弧氧化陶瓷层摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 45-50.
YANG Zhi-cheng, WU Xiang-qing, XIE Fa-qin. Friction and Wear Properties of ZM5 Magnesium Alloy Modified by Graphite[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(2): 45-50.
- [17] 王小龙, 阎峰云, 王财栋. SiC 颗粒增强的 AZ91D 镁合金微弧氧化膜层的结构与性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12): 140-142.
WANG Xiao-long, YAN Feng-yun, WANG Cai-dong. Structure and Properties of Micro-arc Oxidation Coating on SiC Particles Reinforced AZ91D Magnesium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(12): 140-142.