

# 镁锂合金腐蚀行为及干法镀膜防护工艺研究

姚彦<sup>1,2</sup>, 丁雪峰<sup>2</sup>, 杨丽景<sup>2</sup>, 鞠鹏飞<sup>3</sup>, 何燕霖<sup>1</sup>, 宋振纶<sup>2</sup>

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072; 2. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室、浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201; 3. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

**摘要:** 目的 利用 PVD 磁控溅射技术, 在样品上沉积纯铝膜, 以提高镁锂合金的耐腐蚀性能。方法 采用动态极化曲线、交流阻抗方法研究镁锂合金在去离子水和 3.5%NaCl 溶液两种介质中的电化学反应, 并利用感应耦合等离子体发射光谱仪技术和荧光金相显微镜, 分别测定合金的成分, 分析微观组织结构。采用扫描电子显微镜和 EDS 能谱仪分析镁锂合金纯铝膜的组织形貌与结构成分。此外, 采用电化学技术测试纯铝膜的保护行为。结果 在 3.5%NaCl 溶液中, 镁锂合金的腐蚀电流密度比去离子水介质中的高约两个数量级, 且腐蚀电位较负; 交流阻抗结果显示, 比去离子水中的阻抗模值低一个数量级, 说明镁锂合金抗 Cl<sup>-</sup> 侵蚀的能力较差。通过磁控溅射技术, 获得了厚度为 4 μm 致密的纯铝膜。镀铝后, 镁锂合金的腐蚀电流密度降低了约一个数量级, 腐蚀电位正移, 耐蚀性提高。结论 致密的纯铝膜在 3.5%NaCl 溶液介质中容易发生钝化, 阻碍 Cl<sup>-</sup> 的扩散, 进而提高了镁锂合金耐 Cl<sup>-</sup> 侵蚀性。

**关键词:** 镁锂合金; 腐蚀行为; PVD; 纯铝膜; 组织形貌

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)12-0056-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.009

## Corrosion Behavior and Dry Coating Protection of Magnesium Lithium Alloy

YAO Yan<sup>1,2</sup>, DING Xue-feng<sup>2</sup>, YANG Li-jing<sup>2</sup>, JU Peng-fei<sup>3</sup>, HE Yan-lin<sup>1</sup>, SONG Zhen-lun<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 3. Shanghai Spaceflight Manufacture (Group) Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve corrosion resistance of Mg-Li alloy by depositing pure Al film on a sample by means of PVD magnetron sputtering technology. The electrochemical behavior of Mg-Li alloy in deionized water and 3.5% NaCl solution was studied by virtue of dynamic polarization curve and AC impedance spectrum. The alloy composition was determined and microstructure was analyzed by virtue of inductively coupled plasma emission spectrometer (inductively coupled plas-

收稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-04-17

Received: 2016-03-04; Revised: 2016-04-17

基金项目: 浙江省公益项目 (2015C31031)

Fund: Public Projects of Zhejiang Province (2015C31031)

作者简介: 姚彦 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Biography: YAO Yan (1988—), Female, Master, Research focus: corrosion and protection of metal.

通讯作者: 杨丽景 (1982—), 女, 博士, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Corresponding author: YANG Li-jing (1982—), Female, Ph.D., Research focus: corrosion and protection of metal.

ma-AES) and fluorescence metallographic microscope. The morphology and composition of pure Al film on Mg-Li alloy were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy. The electrochemical behavior of the sample with pure Al film was also tested on electrochemical workstation. For uncoated Mg-Li alloy, the corrosion current density was two orders of magnitude higher than that in deionized water when tested in 3.5% NaCl solution, the corrosion potential was more negative. According to alternating-current impedance results, the impedance modulus value obtained in 3.5% NaCl solution was about one order of magnitude lower than that in deionized water. Compared with uncoated alloy, resistance of Mg-Li alloy to  $\text{Cl}^-$  corrosion was weaker. A 4  $\mu\text{m}$  dense pure Al film was obtained by virtue of magnetron sputtering technology. After being aluminized, corrosion current density of the Mg-Li alloy reduced by nearly one order of magnitude, the corrosion potential moved positively and corrosion resistance increased. Dense pure Al film is susceptible to passivation in 3.5% NaCl solution, hindering the diffusion of  $\text{Cl}^-$  and further improving the erosion resistance of Mg-Li alloy to  $\text{Cl}^-$ .

**KEY WORDS:** Mg-Li alloy; corrosion behavior; PVD; pure aluminium film; microstructure morphology

镁锂合金是目前最轻的金属结构材料(密度  $1.30 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ ),它不仅具有良好的阻尼减震性、导热性、电磁屏蔽性、抗高能粒子穿透能力等特点,而且拥有高的比强度和比刚度、优良的切削加工性能、高的回收率,在国防军事、交通运输、电子产品、医疗器械等领域有着巨大的发展潜力<sup>[1]</sup>。在镁锂二元合金中,当 Li 含量(质量分数,全文同) $< 5.7\%$ 时,合金为单相  $\alpha$  组织(Li 在 Mg 中的固溶体);当 Li 含量 $> 10.3\%$ 时,合金为单相  $\beta$  组织(Mg 在 Li 中的固溶体);当 Li 含量在  $5.7\% \sim 10.3\%$ 之间时,形成  $\alpha+\beta$  两相组织<sup>[2-4]</sup>。由于锂是最轻的金属元素(密度仅为  $0.53 \text{ g/cm}^3$ ),因此镁锂合金比一般镁合金的密度要轻得多。在一般镁合金中,由于镁具有密排六方晶格,因此镁合金的变形能力均较差。而在镁锂合金中, $\alpha$  相具有密排六方结构, $\beta$  相具有体心立方结构。相对于密排六方晶格,体心立方晶格具有较多的滑移系,因此,镁合金中引入锂元素将提高合金的变形加工能力。在镁合金中添加锂元素,虽然降低了密度、提高了塑性,但耐腐蚀性能却大大降低了。镁锂合金化学活性高,容易被氧气、水、 $\text{Cl}^-$  等介质腐蚀,这一缺点使其不能被广泛应用<sup>[5]</sup>。近年来,对镁锂合金腐蚀性能的研究,已有文献报道过<sup>[6-7]</sup>。Song 等<sup>[8]</sup>采用化学浸泡与电化学测量相结合的方法,研究了 AZ21、AZ501、AZ91 合金在 NaCl 溶液中的腐蚀行为。镁锂合金在含  $\text{Cl}^-$  的介质中容易发生以点蚀形式为主的严重腐蚀,而碱性介质中,其表面易形成氧化沉淀膜。黄晓梅等<sup>[9]</sup>利用电化学阻抗谱来研究  $\text{Cl}^-$  的浓度与碱性的强弱对镁锂合金耐蚀性能的影响。通过在不同介质中对镁锂合金腐蚀行为的研究,为寻

求新型表面防护技术奠定了基础。

为了改善镁合金的耐腐蚀性能,已经发展了一些成熟的表面处理技术<sup>[10]</sup>,杨黎晖<sup>[11]</sup>详细总结了近几年国内外镁锂合金表面防护技术的发展状况,包括化学转化膜、化学镀与电镀、阳极氧化、PVD/CVD 等。由于镁合金化学活性高,电极电位较低,传统的表面处理工艺,化学镀和电镀很难直接实施。化学转化膜又称金属转化膜,是通过化学或电化学手段在金属表面形成稳定的化合物膜。阳极氧化是指金属或合金的电化学氧化。阳极氧化膜的防护功效优于化学转化膜,但阳极氧化膜疏松多孔,须进行封闭后处理<sup>[12]</sup>。物理气相沉积是在真空条件下,采用各种物理方法,将固态的镀料转化为原子、分子或离子态的气相物质后,再沉积于基体表面从而形成固体薄膜。磁控溅射是一种提高溅射薄膜质量和沉积速率的重要方法。PVD 基本方法有真空蒸发、溅射、离子镀<sup>[13]</sup>。目前 PVD 膜分为陶瓷型和金属型两大类。采用 PVD 技术制备的薄膜具有高硬度、低摩擦系数、很好的耐磨性和化学稳定性等优点<sup>[14]</sup>。高福毅等<sup>[15]</sup>采用直流磁控溅射法在 Mg-Li 合金表面沉积 TiN 膜,提高了镁锂合金的抗腐蚀性。但利用 PVD 技术在镁锂合金表面镀金属膜薄的研究较少且尚未成熟,还需不断改进制备方法与工艺。需要深入研究膜层成型的机制及膜层的性能,为 PVD 膜层改性设计提供理论依据。

本文针对镁锂合金,采用电化学技术研究其在去离子水和 3.5%NaCl 介质中的腐蚀行为,并利用 PVD 磁控溅射技术在镁锂合金表面制备 Al 防护性膜层。

## 1 实验

### 1.1 材料

实验材料为 Mg-Li 系合金板材, 尺寸为 30 mm×12 mm×3 mm。利用感应耦合等离子体发射光谱仪 (Inductively Coupled Plasma-AES) 技术测定镁锂合金的成分, 其中 Li 4.13%, Al 3.05%, Zn 3.05%, Si 0.05%, Mg 为余量。根据成分结果可知, 本试验所使用的锂含量为 4.13% 的镁锂合金, 其具有单相  $\alpha$  组织结构。图 1 为镁锂合金用硝酸酒精溶液蚀蚀后在荧光金相显微镜下的金相组织照片, 可以看出, 本试验所使用的镁锂合金由白色、无规则的  $\alpha$  单相组成。

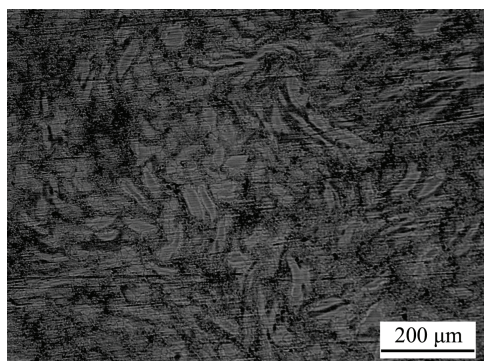


图 1 镁锂合金的金相组织照片

Fig.1 Metallographic structure photos of magnesium lithium alloy

### 1.2 前处理与 PVD 薄膜的制备

基底样品表面首先经过 600<sup>#</sup>、1200<sup>#</sup>、1500<sup>#</sup>、2000<sup>#</sup> 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  砂纸依次打磨, 然后在机械磨抛机上对试样进行抛光, 以便除去试样表面的氧化物, 并用蒸馏水清洗, 而后用丙酮超声处理 3 min, 清除表面剩余杂质及污染物, 吹干放入干燥箱中待用。

薄膜沉积设备采用自行设计的稀土永磁材料磁控溅射系统, 试验用靶材尺寸为  $\phi 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  高纯 Al, 溅射使用气体为高纯 Ar (纯度 99.999%)。将前处理后的镁合金板放入真空室, 背底抽真空, 向腔室内通入高纯 Ar。待抽真空完毕后, 使用 2 个 end-Hall 离子源提供  $\text{Ar}^+$  离子束清洗样品表面的氧化物和杂质, 以增强膜与基体的结合力, 离子束能量为 120 V×0.8 A, 并且在转盘上施

加负偏压以提高  $\text{Ar}^+$  的轰击能量。 $\text{Ar}^+$  清洗后, 在靶前挡板关闭状态下, 进行靶表面清洗。打开挡板, 以特定的功率在样品上沉积 Al 膜。

### 1.3 测试方法

利用感应耦合等离子体发射光谱仪 (Inductively Coupled Plasma-AES) 技术测定试样的准确成分, 并采用荧光金相显微镜分析试样基体的微观组织结构。与此同时, 利用 Autolab 电化学工作站 (PGSTAT302, Ecochimie) 研究基体的电化学行为, 采用三电极系统, 其中参比电极 (R) 为 Ag/AgCl (饱和 KCl), 对电极 (C) 为 Pt 片 (20 mm×10 mm), 工作电极 (W) 为测试试样, 有效测试面积为 10 mm×10 mm, 其余部位使用树脂密封。测试溶液介质分别为去离子水和 3.5% NaCl 溶液, 测试温度为 (24±1) °C。结合基体的组织成分分析镁锂合金的腐蚀行为。采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析镁锂合金纯铝涂层的表面与界面组织, 并用能谱 EDS 分析膜结构和成分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 镁锂合金腐蚀性能

#### 2.1.1 腐蚀电位-时间曲线

电位-时间曲线记录了开路电位随浸泡时间的变化情况, 对研究材料的腐蚀行为和机理具有重要作用, 它是不同介质溶液中试样电极表面成膜过程、化学稳定性、腐蚀速率稳定与否的表征, 反映了试样表面的腐蚀程度<sup>[16]</sup>。一般来讲, 如果在浸泡期间稳定时的电极电位越负, 则表明在腐蚀介质中样品的稳定性越差<sup>[16]</sup>。

图 2 为 Mg-Li 合金在两种腐蚀介质中浸泡 10 h 的电位随时间的变化曲线。由图 2 得知, 在 0~1 h 范围内, Mg-Li 合金在 3.5% NaCl 溶液中的开路电位由 -1.600 V 快速上升到 -1.585 V, 之后电位保持稳定。这与实验测试时, 样品表面瞬时生成大量气泡的现象一致, 说明氧化膜形成的同时也快速溶解, 随浸泡时间的增加, 样品表面形成一层腐蚀产物, 腐蚀溶解达到相对稳定状态。Mg-Li 合金在去离子水中的开路电位, 在 0~2 h 内由 -1.55 V 缓慢上升到 -1.38 V, 说明表面可能形成了一层防护性

薄膜,使其电位提高,浸泡 2 h 后,电位在小范围内波动,腐蚀速度相对平衡。在 3.5%NaCl 溶液中稳定时的开路电位较低,说明该合金在 3.5%NaCl 溶液中的稳定性不高,抗  $\text{Cl}^-$  侵蚀的能力较差。

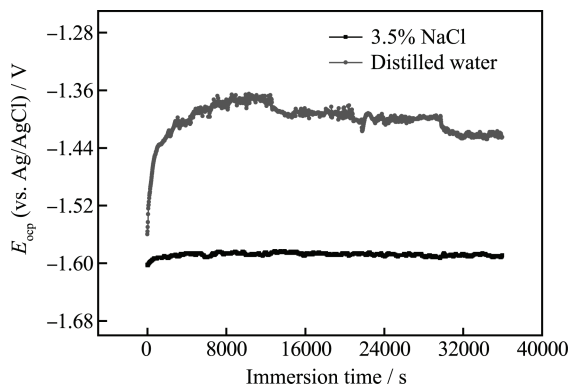


图 2 镁锂合金在 3.5%NaCl 溶液和蒸馏水中的开路电位  
Fig.2 The open circuit potential (OCP) of Mg-Li alloy in different solutions

### 2.1.2 动电位极化曲线

动极化曲线能够反映腐蚀现象,分析腐蚀过程的特征和影响因素,对于判断材料的电化学性能具有重要意义。动电位极化曲线表示电极电位与极化电流或极化电流密度之间的关系曲线,阳极曲线反映了腐蚀重要特征,而阴极曲线对应的是析氢反应<sup>[17-18]</sup>。图 3 为镁锂合金在 3.5%NaCl 溶液和去离子水两种介质中的极化曲线,从两条极化曲线可以看出,在 3.5%NaCl 溶液中的阳极极化曲线,腐蚀电流密度随腐蚀电位的增加而快速增加,没有明显的钝化区,而去离子水中的阳极极化曲线呈现一定的钝化特征,之后腐蚀电流快速增加。Mg-Li 合金在 3.5%NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度比去离子水中的高约 2 个数量级,自腐蚀电流密度越大,表明样品的耐蚀性能越差,说明在含有  $\text{Cl}^-$  的溶液中,该合金很不耐腐蚀。从热力学角度分析,腐蚀

电位越负,样品越容易被腐蚀,该合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位约为 -1.586 V,而在去离子水中的腐蚀电位为 -1.43 V,进一步表明  $\text{Cl}^-$  的加入加速了合金的腐蚀过程。

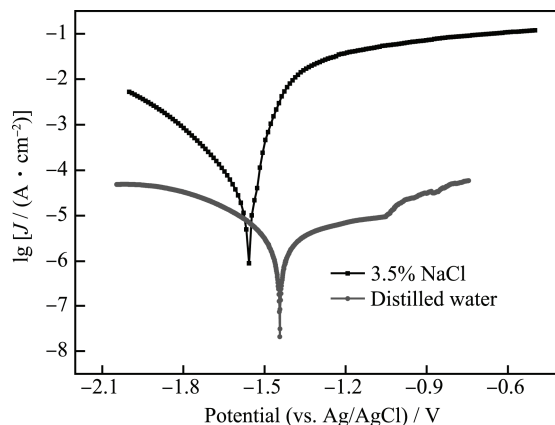


图 3 镁锂合金在不同介质中的动电位极化曲线  
Fig.3 The Potentiodynamic Polarization Curve of Mg-Li alloy in different solutions

### 2.1.3 电化学交流阻抗谱 (EIS)

图 4 为镁锂合金在 3.5%NaCl 溶液 (曲线 1) 和去离子水 (曲线 2) 中的 EIS 图谱,从图 4a 和 b 可以看到,曲线 1 在高频区出现规则的高频容抗弧,对应电荷转移反应,低频区还有一个疑似电荷转移控制的较小的感抗弧。曲线 2 在高频区出现了一个四分之一半圆容抗弧,中频区出现了一个完整的容抗弧,低频区与曲线 1 相吻合,出现了一个小的感抗弧。从图 4c 可以看出,曲线中有一个峰,代表一个时间常数。低频区阻抗值的大小与样品的抗腐蚀性能有关<sup>[18-20]</sup>。3.5%NaCl 溶液中的 EIS 图谱表明,其低频区的阻抗值比去离子水中的低一个数量级,说明在 3.5%NaCl 溶液腐蚀性介质中,镁锂合金耐  $\text{Cl}^-$  的侵蚀能力较差,这与动电位极化曲线的测试结果一致。

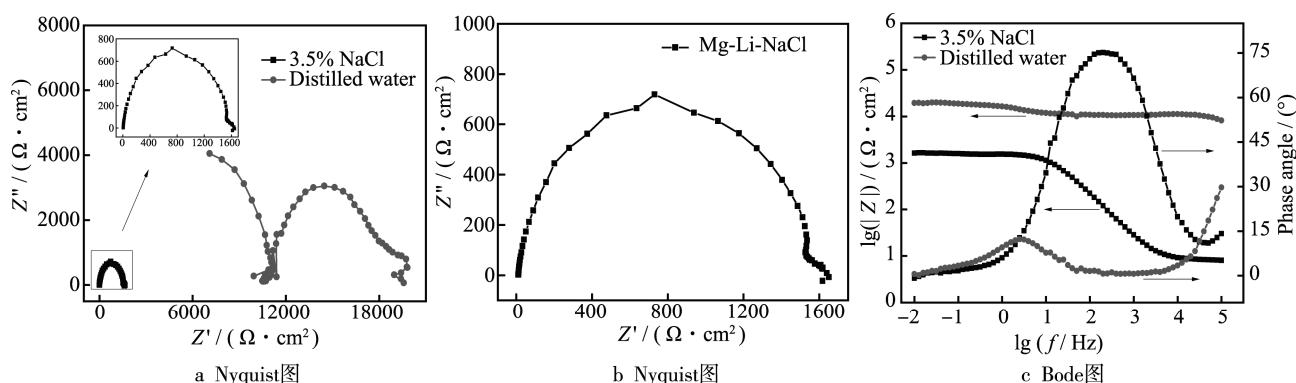


图 4 镁锂合金在 3.5%NaCl 溶液和蒸馏水中的 Nyquist 图与 Bode 图

Fig.4 The electrochemical impedance spectrum of Mg-Li alloy in different solutions, Nyquist (a,b) and Bode (c)



## 2.2 镁锂合金干法镀膜防护工艺

### 2.2.1 镀层的表面形貌

图5为镁锂合金表面镀铝的微观形貌,从图4a可知,PVD的镀铝厚度约为4  $\mu\text{m}$ ,且沉积膜层的厚度均匀致密。从图4b可以看出,铝膜层的颗粒分布均匀、堆积紧凑,可以为镁锂合金基体提供一定的保护性。

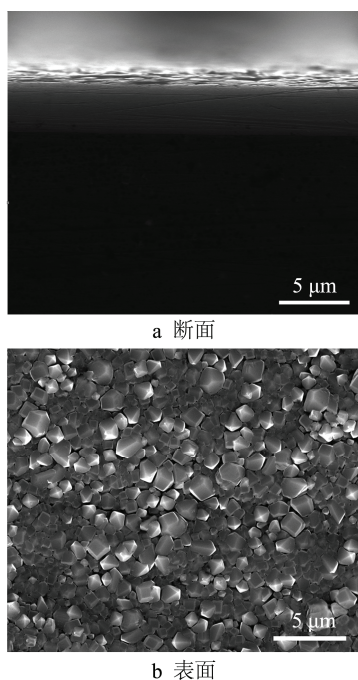


图5 镁锂合金纯铝镀层的表面形貌

Fig.5 SEM of Al coated Mg-Li alloy: cross section (a) and surface (b)

### 2.2.2 镀层耐腐蚀性

图6为镁锂合金基体和纯铝镀层在3.5%NaCl溶液中的塔菲尔极化曲线。由图6可知,镁锂合金基体的腐蚀电位为-1.58 V,镁锂合金镀铝的腐蚀电位约为-1.42 V,提高了0.16 V,且自腐蚀电流密度有所减小,存在一定的钝化区,减缓了腐蚀过程。

图7为镁锂合金基体和纯铝镀层在3.5%NaCl溶液中的交流阻抗谱。从图7a可知,镀铝层的阻抗值约是基体的5倍,图7b也可以看出,最大模值也提高了将近一个数量级。在低频区的阻抗图出现了波动,出现腐蚀现象,这可能是铝膜受损造成的。由图6和图7并结合铝膜的微观组织可知,一定厚度的铝膜可以提高镁锂合金基体的耐腐蚀性能。

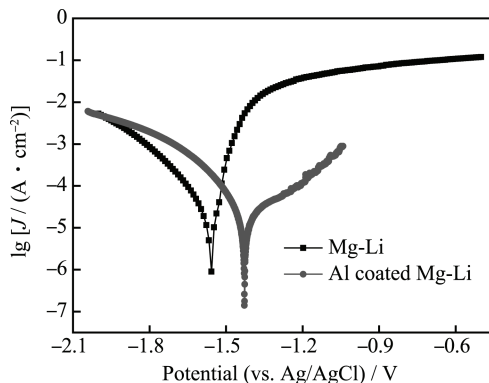


图6 镁锂合金基体和纯铝镀层的塔菲尔极化曲线  
Fig.6 Tafel polarization curve of substrate and Al coated Mg-Li

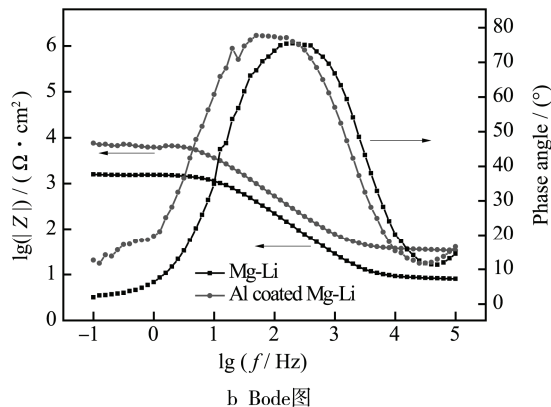
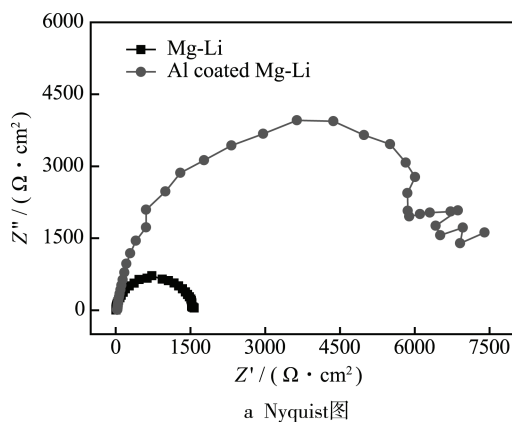


图7 镁锂合金基体和纯铝镀层的交流阻抗图  
Fig.7 The electrochemical impedance spectrum of substrate and Al coated Mg-Li, Nyquist (a) and Bode (b)

## 3 结语

通过对比镁锂合金在3.5%NaCl溶液和去离子水中的电化学行为,结果表明该镁锂合金在3.5%NaCl溶液中的稳定性不高,抗 $\text{Cl}^-$ 侵蚀的能力较差, $\text{Cl}^-$ 的加入会加速合金的腐蚀过程。

用PVD磁控溅射的方法获得了纯铝镀层,铝膜对镁锂合金提供了较好的保护性。

## 参考文献

- [1] 杨光昱, 郝启堂, 介万奇. 镁锂系合金的研究现状[J]. 铸造技术, 2004, 25(1): 19—21.  
YANG Guang-yu, HAO Qi-tang, JIE Wan-qi. Study Status of Mg-Li System Alloys[J]. Foundry Technology, 2004, 25(1): 19—21.
- [2] LIU B, ZHANG M L, WU R Zi. Effects of Nd on Microstructure and Mechanical Properties of As-cast LA141 Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487 (1/2): 347—351.
- [3] WU R Z, QU Z K, ZHANG M L. Effects of the Addition of Y in Mg-8Li-(1,3)Al Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 516(1/2): 96—99.
- [4] CUI C L, WU L B, WU R Z, et al. Influence of Yttrium on Microstructure and Mechanical Properties of As-cast Mg-5Li-3Al-2Zn Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(37): 9045—9049.
- [5] 张华, 姚广春, 王淑兰. 镁锂合金无铬转化膜的制备工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(12): 917—919.  
ZHANG Hua, YAO Guang-chun, WANG Shu-lan. Preparation of Conversion Coating with Cr Free on Mg-Li Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(12): 917—919.
- [6] ZHANG C H, HUANG X M, ZHANG M L, et al. Electrochemical Characterization of the Corrosion of a Mg-Li Alloy [J]. Materials Letters, 2008, 62(14): 2177—2180.
- [7] GAO L L, ZHANG C H, ZHANG M L, et al. The Corrosion of a Novel Mg-11Li-3Al-0.5RE Alloy in Alkaline NaCl Solution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 468(1/2): 285—289.
- [8] SONG G L, ATRENSL A, WU X L, et al. Corrosion Behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1769—1791.
- [9] 黄晓梅, 张密林, 张春红. 镁锂合金碱性条件下腐蚀的 EIS 分析[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(3): 384—388.  
HUANG Xiao-mei, ZHANG Mi-lin, ZHANG Chun-hong. EIS Analysis of Mg-Li Alloy Corrosion in Alkaline Condition[J]. Materials Science & Technology, 2008, 16(3): 384—388.
- [10] GRAY J E, LUAN B. Protective Coating on Magnesium and Its Alloys-a Critical Review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 336(1/2): 88—113.
- [11] 杨黎晖, 李言涛, 蔡国伟, 等. 镁锂合金表面防护的最新研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(7): 302—305.  
YANG Li-hui, LI Yan-tao, CAI Guo-wei, et al. Recent Research Progress of Surface Protection for Magnesium-lithium Alloys[J]. Electroplating & Finishing, 2014, 33(7): 302—305.
- [12] 张永君, 严川伟, 楼翰一, 等. 镁及镁合金阳极氧化工艺综述[J]. 材料保护, 2001, 34(9): 24—26.  
ZHANG Yong-jun, YAN Chuan-wei, LOU Han-yi, et al. A Comprehensive Survey on the Anodizing Process of Magnesium and Its Alloy[J]. Materials Protection, 2001, 34(9): 24—26.
- [13] 吴奎, 叶勤. 射频溅射法和电弧离子镀法制备的纳米 TiO<sub>2</sub> 薄膜性能比较[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2006, 26(3): 393—397.  
WU Kui, YE Qin. Characteristic Comparison of TiO<sub>2</sub> Thin Film Prepared by R. F. Magnetron Sputtering and Arcion Plating[J]. Journal of Jinan University(Natural Science), 2006, 26(3): 393—397.
- [14] 沈杰, 沃松涛, 崔晓莉, 等. 射频磁控溅射制备纳米 TiO<sub>2</sub> 薄膜的光电化学行为[J]. 物理化学学报, 2004, 20(10): 1191—1195.  
SHEN Jie, WO Song-tao, GUI Xiao-li, et al. Photo-electrochemical Characteristics of Nano-Titanium Dioxide Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2004, 20(10): 1191—1195.
- [15] 高福毅, 陈玉强, 彭鸿雁, 等. 直流磁控溅射法在 Mg-Li 合金表面沉积 TiN 薄膜提高合金抗腐性的研究[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2010, 1: 13—16.  
GAO Fu-yi, CHEN Yu-qiang, PENG Hong-yan, et al. Research on Improving Corrosion Resistance of Mg - Li by Deposition TiN Film Using DC Magnetron Sputtering Method[J]. Journal of Mudanjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2010, 1: 13—16.
- [16] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. Beijing: Chemical industry press, 2008.
- [17] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 20—35.  
CAO Chun-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002: 20—35.
- [18] 杨小奎, 张涛, 张世艳, 等. 环氧富锌涂层对 AZ91D 镁合金的腐蚀防护能力研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 18—23.  
YANG Xiao-kui, ZHANG Tao, ZHANG Shi-yan, et al. Research on the Corrosion Protection Properties of Zn-rich Epoxy Coating Provided for AZ91D Magnesium Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 18—23.
- [19] 王新印, 周亚茹, 张鉴清, 等. 镁及其合金腐蚀析氢的研究现状[J]. 装备环境工程, 2015, 141 (4): 129—136.  
WANG Xin-yin, ZHOU Ya-ru, ZHANG Jian-qing et al. Research Status of Hydrogen Evolution during Magnesium Alloy's Corrosion Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 141 (4): 129—136.
- [20] ZHANG W X, HE J G, JIANG Z H, et al. Electroless Ni-P Layer with a Chromium-free Pretreatment on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Surface & Coating Technology, 2007, 201(8): 4594—4600.