

# 镁合金表面非晶涂层的构筑及其腐蚀行为

郭胜锋<sup>1</sup>, 赖利民<sup>1</sup>, 丁凯露<sup>1</sup>, 张红菊<sup>2</sup>, 王敬丰<sup>2</sup>, 潘复生<sup>2</sup>

(1.西南大学, 重庆 400715; 2.重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:** **目的** 提高镁合金的耐腐蚀性能。**方法** 采用超音速火焰喷涂技术, 在 AZ61 镁合金表面引入 NiCrAl 作为中间层, 最终在镁合金表面构筑一层铁基非晶涂层。通过扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、差热分析仪、显微硬度测试仪、开路电位测试仪、动电位极化测试仪、X 射线光电子能谱仪和接触角测量仪, 分别评价了镁合金基体和铁基非晶涂层的形貌特征、微观结构、热稳定性、力学性能、腐蚀行为和表面性质。**结果** 在 AZ61 镁合金表面成功构筑了一层厚度约 200~240  $\mu\text{m}$  的铁基非晶涂层, 该涂层在 XRD 有效分辨率内呈单一非晶结构。热分析结果表明, 该非晶涂层的起始晶化温度可达 657  $^{\circ}\text{C}$ , 具有极高的热稳定性。铁基非晶涂层和 AZ61 镁合金的显微硬度分别为 892HV 和 71HV, 合金表面显微硬度提高了 10 倍以上。在模拟海水中, AZ61 镁合金和铁基非晶防护涂层的稳态开路电位分别为 -0.59 V 和 -1.58 V, 自腐蚀电流密度分别为 80  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  和 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 在酸雨介质中, 镁合金和非晶涂层的稳态开路电位分别为 -0.45 V 和 -1.51 V, 自腐蚀电流密度分别为 7.27  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  和 1.64  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。去离子水在 AZ61 镁合金的表面润湿角为  $(59.8 \pm 1.5)^{\circ}$ , 而铁基非晶涂层的接触角为  $(74.4 \pm 0.6)^{\circ}$ 。**结论** 在镁合金表面构筑铁基非晶涂层, 可以显著提高镁合金的耐蚀性, 同时非晶涂层高的热稳定性和显微硬度, 意味着良好的耐热和耐磨性能。

**关键词:** 镁合金; 超音速火焰喷涂; 铁基非晶涂层; 硬度; 耐蚀性; 模拟海水; 模拟酸雨

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0040-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.006

## Construction and Corrosion Behaviour of Amorphous Coating on Magnesium Alloy

GUO Sheng-feng<sup>1</sup>, LAI Li-min<sup>1</sup>, DING Kai-lu<sup>1</sup>, ZHANG Hong-ju<sup>2</sup>, WANG Jing-feng<sup>2</sup>, PAN Fu-sheng<sup>2</sup>

(1.Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the corrosion resistance of magnesium alloys. AZ61 magnesium alloy coated with NiCrAl by high-velocity oxy-fuel thermally spraying was used as the intermediate layer and a layer of Fe-based amorphous coating was fabricated on magnesium alloy. The morphology characteristics, microstructure, thermal stability, mechanical properties, corrosion behavior and surface properties of the Fe-based amorphous coating and AZ61 magnesium alloy were investigated by scanning electron microscope, X-ray diffractometer, differential thermal analyzer, microhardness tests, open circuit potential measurement, potentiodynamic polarization tests, X-ray photoelectron spectroscopy and contact angle measurement, respectively. A layer of Fe-based amorphous coating with a thickness of about 200~240  $\mu\text{m}$  was successfully formed on the sur-

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-02-01

Received: 2018-12-10; Revised: 2019-02-01

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51671162); 重庆市基础与前沿研究计划 (重点) 项目 (cstc2015jcyjBX0107); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2017B054)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51671162), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (cstc2015jcyjBX0107) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (XDJK2017B054)

**作者简介:** 郭胜锋 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为非晶态合金。邮箱: sfguo@swu.edu.cn

**Biography:** GUO Sheng-feng (1981—), Male, Doctor, Professor, Research focus: amorphous alloy. E-mail: sfguo@swu.edu.cn

face of AZ61 magnesium alloy. The coating exhibited an amorphous structure within the effective resolution of XRD. From the thermal analysis, the crystallization temperature of the coating with extremely high thermal stability was up to 657 °C. The microhardness of amorphous coating and AZ61 magnesium alloy were 892 HV and 71 HV, respectively, which was increased by more than 10 times of hardness. In simulated seawater, the steady-state open circuit potentials and corrosion current densities of the Fe-based amorphous coatings and AZ61 magnesium alloy were -0.59 V and -1.58 V, 80  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  and 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectively. In the simulated acid rain, the open circuit potentials and corrosion current densities of the Fe-based amorphous coatings and AZ61 magnesium alloy were -0.45 V and -1.51 V, 7.27  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  and 1.64  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectively. The surface wetting angle of deionized water in AZ61 magnesium alloy was  $(59.8 \pm 1.5)^\circ$ , while the contact angle of Fe-based amorphous coating was  $(74.4 \pm 0.6)^\circ$ . In-situ formed Fe-based amorphous coating on the surface of magnesium alloy can significantly improve the corrosion resistance of magnesium alloy. In addition, the high thermal stability and microhardness imply the improvement of heat resistance and wear performance of magnesium alloy.

**KEY WORDS:** magnesium alloy; high velocity oxygen fuel; Fe-based amorphous coating; hardness; corrosion resistance; simulated seawater; simulated acid rain

镁合金因其质量轻、比强度高、阻尼性能好、抗电磁辐射且易于加工回收等诸多优点,被广泛应用于汽车制造、航空航天、通讯、光学仪器 and 电子工业等领域中,现已成为 21 世纪最重要的商用轻质材料之一<sup>[1-3]</sup>。然而,镁合金存在绝对强度和断裂韧性较低、成形性能较差、耐腐蚀性能不足等关键技术瓶颈,极大地限制了该类材料的进一步发展和规模化应用。

针对镁合金耐蚀性能较差的难题,研究者们多采用微合金化、工艺调控或表面处理等方式,进一步改善和提高镁合金的耐腐蚀性能。如 Liu 等人<sup>[4]</sup>发现,添加稀土 Ce 和 La 能显著提高 AM60 镁合金的耐腐蚀性能,这主要归因于稀土元素可抑制  $\beta$  相的析出,降低电偶腐蚀的倾向性。然而,稀土元素过多会导致其耐蚀性降低<sup>[5]</sup>。Zhang 等人<sup>[6]</sup>通过快速凝固技术,在提高 ZM61 镁合金强度的同时,提高了合金的耐腐蚀性能。这主要源于快速冷却提高了合金的固溶极限,抑制了微电偶腐蚀的发生。相对于前两种方法,镁合金表面处理则最为直接有效,且不受合金体系的限制,因此展现出更广阔的研究价值和实际意义。如磷酸盐转化膜<sup>[7]</sup>、微弧氧化<sup>[8]</sup>、化学镀<sup>[9]</sup>等技术受到了人们的广泛关注。

与传统涂层材料不同的是,非晶合金因其原子无序排列,而具有超高的强度和硬度、良好的耐蚀性和耐磨性能。如 Zhang 等人<sup>[10]</sup>研究表明,采用热喷涂技术在钢铁的表面制备铁基非晶合金涂层,可显著提高钢铁材料的耐腐蚀性能和摩擦性能。经过进一步处理,该涂层展现出功能性的微观表面结构<sup>[11]</sup>。然而,铁基非晶合金涂层在镁合金表面的应用却鲜见报道。我们前期工作证明了铁基非晶合金涂层可显著提高 AZ61 镁合金在氯化钠溶液中的耐腐蚀性能<sup>[12]</sup>,为了进一步研发更加经济的镁合金表面处理技术,实现低成本、高性能腐蚀防护,本文将致力于构筑新型镁合金用高强耐蚀性铁基非晶合金涂层,为镁合金的工程实际应用提供可借鉴的思路和技术路线。

## 1 试验

### 1.1 涂层制备

所用的喷涂材料是通过高压雾化法获得的近乎规则的球形粉末,其化学成分(原子百分比计)为  $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ , 粉末粒径约 30~50  $\mu\text{m}$ 。基体采用 AZ61 镁合金,尺寸为  $\phi 80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。镁合金表面先经砂纸粗磨,去除氧化皮等杂质,随后用 SiC 颗粒进行喷砂处理,压缩空气压力为 0.6~0.8 MPa,通过加速颗粒冲击基体表面改善 AZ61 镁合金表面粗糙度和活性。由于铁基非晶合金和镁合金基体弹性模量、热膨胀系数等差异较大,为增强非晶涂层与镁合金的结合强度,引入一层厚度约为 40~50  $\mu\text{m}$  的中间层,中间层通过热喷涂商用 NiCrAl 粉末而获得,再喷涂铁基非晶粉末。通过控制喷涂时间来控制中间层和非晶涂层的厚度,具体厚度值通过扫描电镜进行测定。喷涂前对镁合金基材进行预热,使其表面温度达到 100 °C 左右,消除基体表面的水分和湿气,同时降低喷涂粒子与基材接触时的温度差。随后开始送粉,待火焰稳定后即可进行喷涂。喷涂设备采用的是 Oerlikon Metco 公司生产的超音速热喷涂装置,所使用的燃料为航空煤油,助燃剂为氧气,送粉由氮气提供压力。热喷涂(high velocity oxygen fuel, HVOF)所采用的工艺参数为:煤油 24 L/h,氧气 32 L/h,喷涂距离 350 mm,送粉速率 30 g/min<sup>[12]</sup>。

### 1.2 性能测试及组织观察

采用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku D/MAX-2500/PC)对铁基非晶涂层及镁合金基体进行结构表征,扫描速率为 4 ( $^\circ$ )/min,步进为 0.02 $^\circ$ 。所制备涂层的热学行为采用差示扫描量热仪(NETZSCH STA 409 PC/PG)测试,升温速率为 20 K/min,高纯氩气保护。通过扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-6610)

及附带的能谱仪(EDS)分别对涂层及镁合金的微观组织和元素分布特征进行分析。

采用显微硬度计(MHV-2000)研究镁合金基体、NiCrAl中间层及铁基非晶涂层的显微硬度,加载载荷选用100 g,保压15 s。为了精确测量,每组至少选择7个点,去除最高最低值,剩余求平均值。选用模拟海水(3.5%NaCl溶液)和模拟酸雨<sup>[13]</sup>为腐蚀介质,对比研究了AZ61镁合金及铁基非晶防护涂层的腐蚀行为。腐蚀试验是通过电化学工作站(上海辰华,CHI660E)完成的。电化学测试采用标准的三电极体系,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,铂电极作为对电极,试样为工作电极。试样用环氧树脂密封,样品背部连接铜导线引出。试样表面采用水磨砂纸从粗到细打磨至2000#,抛光后用丙酮、无水乙醇超声清洗。在极化测试之前进行1 h的开路电位(OCP)测试,使得体系稳定后,再进行动电位极化测试,扫描速率为0.33 mV/s。测量电化学阻抗谱(EIS)时,控制样品电位为开路电位,测试频率范围为10 kHz到10 MHz,扰动电位为10 mV。每组电化学测试至少重复3次,确保实验结果的可重复性和可靠性。采

用接触角测量仪(OCA25, Dataphysics Instrument, Germany)测试合金表面对去离子水的接触角,每个样品测量3个不同的点,取平均值作为该样品的接触角。通过X射线光电子能谱(XPS, Thermo Scientific K-Alpha)分析合金表面的腐蚀产物。

## 2 结果及分析

### 2.1 NiCrAl 和 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 非晶粉末的形貌特征和微观结构

图1为中间层NiCrAl和外层铁基非晶涂层的粉体形貌特征及其热喷涂后的微观结构。可以看出,两种粉体整体呈现球形,相对而言,铁基非晶粉末更加规则,近乎球形,这主要是通过高压雾化法获得,且铁基非晶形成能力较强,易于获得完全非晶粉末。XRD结果表明,经过在AZ61镁合金基体上热喷涂后,中间层NiCrAl主要由纯Ni相构成,呈现面心立方晶体结构。而铁基非晶粉末经过热喷涂后,合金表面整体呈现非晶的漫散射峰,无明显晶体衍射峰,在XRD有效分辨率内,为单一的非晶结构和非晶相。

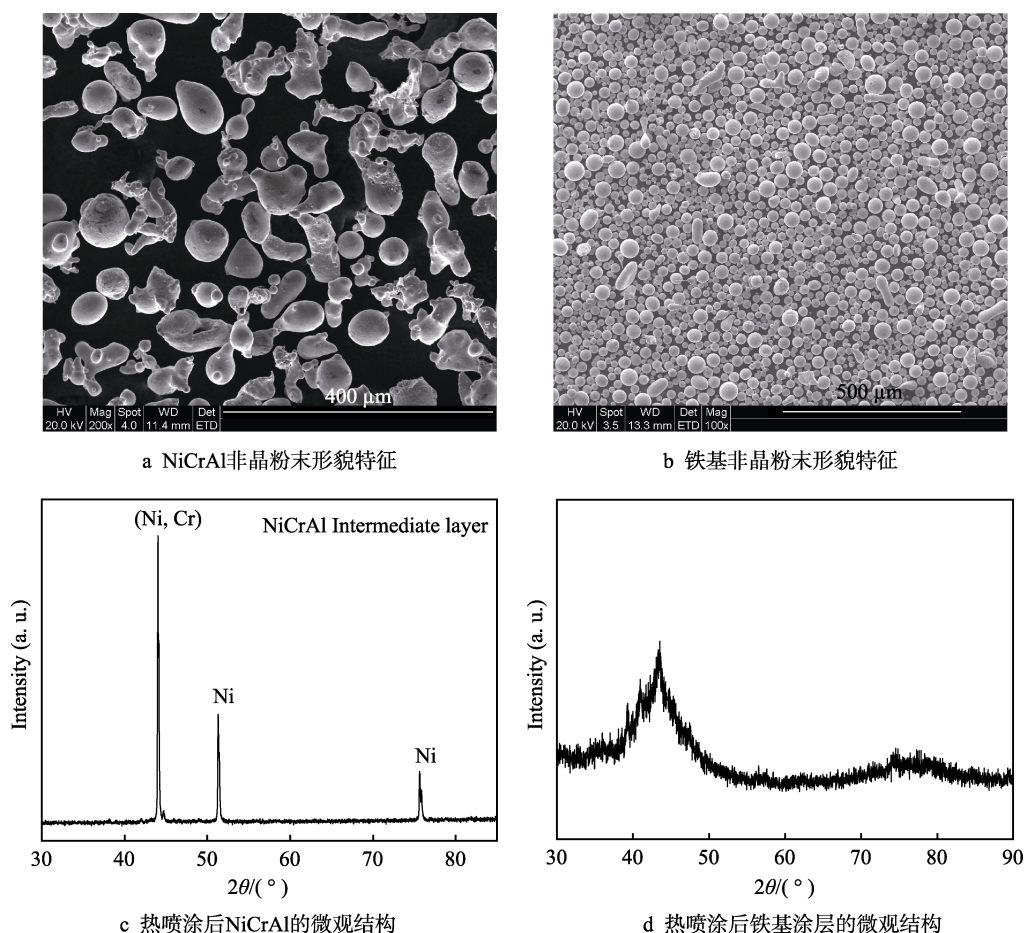


图1 NiCrAl和铁基非晶粉末形貌特征与热喷涂后的微观结构

Fig.1 Morphologies and microstructure of the NiCrAl and Fe-based amorphous powder before and after HVOF:  
a) morphologies of NiCrAl amorphous powder; b) morphologies of Fe-based amorphous powder;  
c) microstructure of NiCrAl after HVOF; d) microstructure of Fe after HVOF

## 2.2 中间层和铁基非晶涂层的形貌特征、热学性质和力学性能

图 2a 为 AZ61 镁合金基体、NiCrAl 中间层和铁基非晶涂层的 SEM 背散射图谱。其中, NiCrAl 中间层厚约 40~50  $\mu\text{m}$ , 铁基非晶涂层厚度约 200~240  $\mu\text{m}$ 。可以发现中间层起到很好的过渡作用, NiCrAl 跟镁合金基体结合良好, 呈现机械式咬合, 且界面无明显孔洞、裂纹等缺陷。这主要得益于在热喷涂 NiCrAl 前, 镁合金表面进行了喷砂处理, 使其产生压应力且增加了表面粗糙度。此外, 铁基非晶涂层和 NiCrAl 中间层界面结合紧密, 非晶涂层孔隙率低于 1%。根据铁基非晶涂层的形貌特征, 可说明其形成过程: 加热导致铁基非晶粉末软化或熔化, 然后粒子加速运动, 接触合金基体发生变形, 最后快速凝固, 形成扁平状涂层。由于热喷涂过程中粒子的氧化不可避免, 最终会在涂层中形成少量的氧化物。同时, 由于喷涂非晶粉末与热源的传导存在不均匀性, 会导致部分粒子处于未熔化状态。因此, 铁基非晶涂层主要含扁平状及少量未熔的颗粒。

图 2b 显示了镁合金基体、中间层和铁基非晶涂层的显微硬度统计分布, 横轴的 0 对应图 2a 中 AZ61 镁合金基体与 NiCrAl 中间层的界面位置。结果表明, AZ61 镁合金基体显微硬度约 71HV, 中间层与镁合金基体界面的显微硬度约 120HV, 硬化的原因主要归于原子扩散或机械式咬合强化界面。NiCrAl 中间层和外层铁基非晶涂层的显微硬度分别约为 400HV 和 892HV。由于铁基非晶涂层具有超高的硬度和较大的弹性模量, 与镁合金基体差异较大, 因此, 有必要选择 NiCrAl 作为中间层, 以避免两者在力学、热学等性能的较大差异而导致涂层开裂。基于拉伸法测试涂层与基体的结合强度 (见标准 ASTM C633—2013), 结果表明, 从最初的(22 $\pm$ 2) MPa (AZ61 镁合金直接热喷涂非晶涂层) 提升至(34 $\pm$ 4) MPa (加 NiCrAl 中间层的三明治结构), 加入 NiCrAl 中间层, 非晶涂层和镁合金间的结合强度提高了约 50%。值得一提的是, 非晶涂层的显微硬度是镁合金基体的 10 倍以上, 意味着该合金可能具备良好的耐磨性能<sup>[14]</sup>。

图 2c 为铁基非晶涂层的热分析曲线, 尽管 XRD 结果表明, 该合金涂层呈现单一非晶结构, 但非晶涂层并未显示出明显的玻璃转变, 意味着该非晶涂层在更高分辨率下, 很可能还伴有部分纳米晶或少量的晶体相, 而少量晶体相或纳米晶增强的铁基非晶涂层依然会展现出优异的耐蚀性能<sup>[15]</sup>。当前铁基非晶涂层表现出明显的晶化现象, 其开始结晶温度  $t_x$  约为 657  $^{\circ}\text{C}$ , 表明铁基非晶涂层具有较高的热稳定性, 意味着铁基非晶涂层的防护可提高 AZ61 镁合金基体的耐热性能。

## 2.3 AZ61 镁合金和非晶涂层的腐蚀行为

开路电位 (OCP) 是在未施加电流时, 工作电极

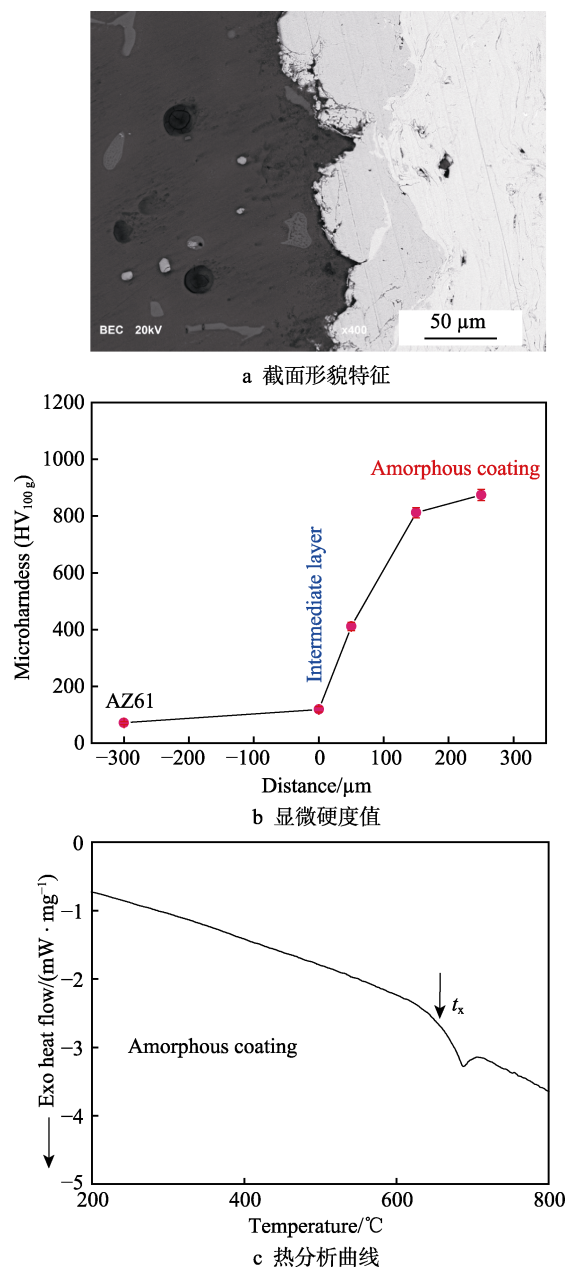


图 2 热喷涂后 AZ61 镁合金截面形貌特征、对应的显微硬度值和热分析曲线

Fig.2 SEM images of the cross section (a), corresponding microhardness (b) and thermal analysis curve (c) of AZ61 Mg alloy

相对于参比电极的电位, 反映了试样在溶液界面处的热力学平衡随时间的变化。AZ61 镁合金和铁基非晶防护涂层在模拟海水中的 OCP 如图 3a 所示, 可以发现, 当铁基非晶涂层试样刚浸入模拟海水时, 开路电位有一个明显下降的过程, 分析认为是由于非晶涂层的腐蚀产物具有更低的腐蚀电位。此外, 非晶涂层的开路电位偶尔波动, 这主要是由非晶涂层制备过程中不可避免地产生氧化物夹杂所致。相对于铁基非晶涂层来说, AZ61 镁合金化学性质活泼, 从 OCP 曲线上也能发现。二者的开路电位稳定时, 分别为 -0.59 V 和 -1.58 V。图 3b 为两种样品在模拟海水中的动电位



极化曲线,结果表明,非晶涂层具有明显的自钝化行为,钝化区间超过 1000 mV,意味着非晶涂层具有十分稳定的钝化膜。通过 Tafel 拟合获得, AZ61 镁合金和铁基非晶涂层的自腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  分别约为  $80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,说明通过铁基非晶涂层的构筑,显著降低了 AZ61 镁合金在模拟海水中的腐蚀速率,提高了镁合金的腐蚀性能。同样地, AZ61 镁合金和铁基非晶涂层在模拟酸雨中的 OCP 曲线如图 3c

所示,二者的开路电位稳定时,分别为  $-0.45 \text{ V}$  和  $-1.51 \text{ V}$ 。图 3d 为两种试样在模拟酸雨中的动电位极化曲线,通过 Tafel 拟合获得 AZ61 镁合金和铁基非晶涂层的自腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  分别约为  $7.27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $1.64 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,涂层明显降低了 AZ61 镁合金在模拟海水中的腐蚀速率。因此,通过铁基非晶涂层的构筑,可显著提高镁合金在模拟海水和模拟酸雨中的耐腐蚀性能。

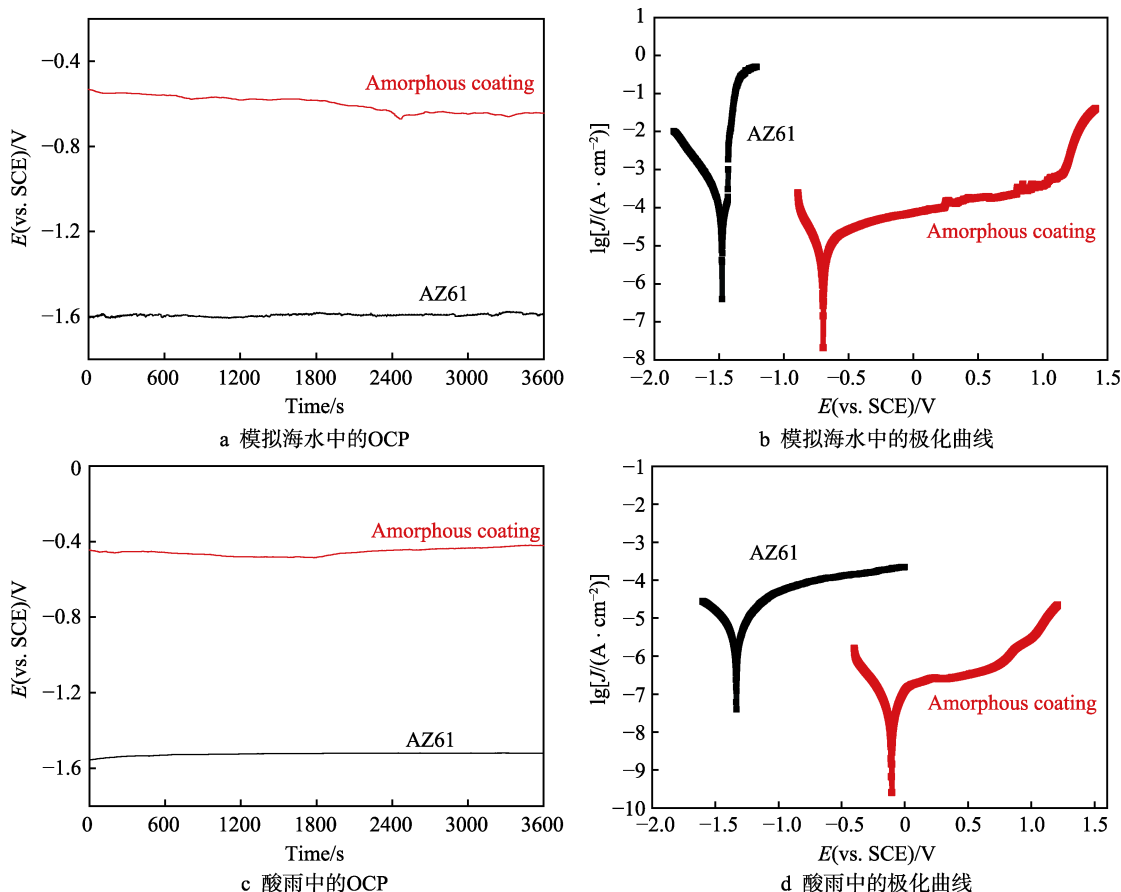


图3 AZ61 镁合金和铁基非晶涂层在模拟海水和酸雨介质中的开路电位和极化曲线

Fig.3 Open-circuit potential and polarization curve of AZ61 Mg alloy and Fe-based amorphous coating in simulated seawater and simulated acid rain: a) OCP in simulated seawater; b) polarization curve in simulated seawater; c) OCP in acid rain; d) polarization curve in acid rain

## 2.4 AZ61 镁合金和非晶涂层的腐蚀形貌

图 4 为 AZ61 镁合金及铁基非晶防护涂层在模拟海水 (a、b 图) 和模拟酸雨 (c、d 图) 中腐蚀后的 SEM 形貌图。在模拟海水中, AZ61 镁合金的腐蚀形式主要以点蚀为主, 如图 4a 箭头所示。而虽然铁基非晶涂层表面有制备过程中导致的微量孔洞存在 (该缺陷也是非晶涂层易腐蚀区域), 但铁基非晶涂层主要以均匀腐蚀为主, 腐蚀产物均匀地覆盖在整个合金表面 (图 4b), 这与动电位极化曲线的表现一致。在模拟酸雨介质中, 镁合金腐蚀极为严重, 如图 4c 所示, 合金表面有相当多的腐蚀坑, 大部分腐蚀产物已从合金表面剥离。而铁基非晶涂层的耐酸性相对较好, 只有局部有少量腐蚀坑出现 (图 4d), 这主要归

因于非晶涂层在制备过程中不可避免地产生了氧化物或碳化物夹杂。

## 2.5 AZ61 镁合金和非晶涂层的表面性质

液体在固体表面的铺展现象即润湿性, 可通过润湿角来表示。当润湿角  $\theta < 90^\circ$ , 属于亲水材料, 润湿角  $\theta$  越小, 越有利于液体在固体表面铺展。反之, 润湿角  $\theta > 90^\circ$ , 称为液体对固体具有疏水性, 润湿角  $\theta$  越大, 液体在表面越容易收缩成圆球状。图 5 显示了去离子水在 AZ61 镁合金 (图 5a) 及铁基非晶防护涂层 (图 5b) 的润湿角, AZ61 镁合金的接触润湿角为  $(59.8 \pm 1.5)^\circ$ , 而铁基非晶涂层的接触润湿角为  $(74.4 \pm 0.6)^\circ$ 。尽管两种合金表面均显示了亲水特性, 但是铁基非晶涂层显著提高了合金表面的接触角, 进一步提

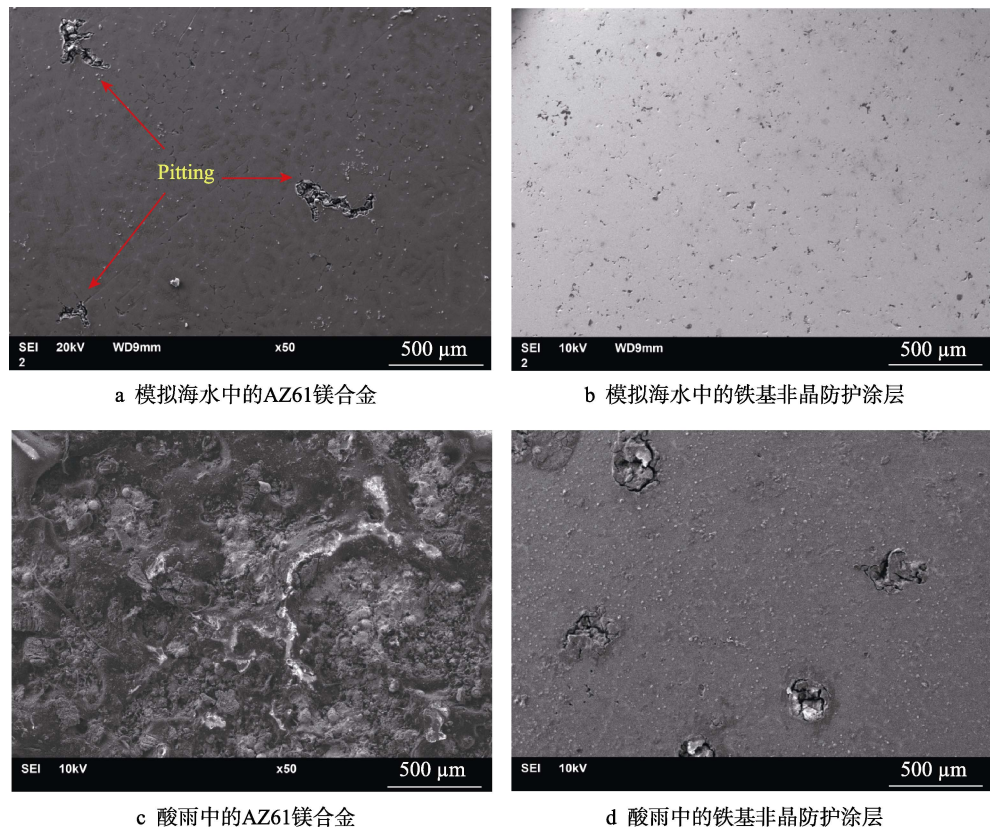


图 4 AZ61 镁合金和铁基非晶涂层在模拟海水和酸雨中腐蚀后的 SEM 形貌图  
Fig.4 SEM morphologies of AZ61 Mg alloy and Fe-based amorphous coating after corrosion in simulated seawater and acid rain: a) AZ61 Mg alloy in simulated seawater; b) Fe-based amorphous protective coating in simulated seawater; c) AZ61 Mg alloy in acid rain; d) Fe-based amorphous protective coating in acid rain

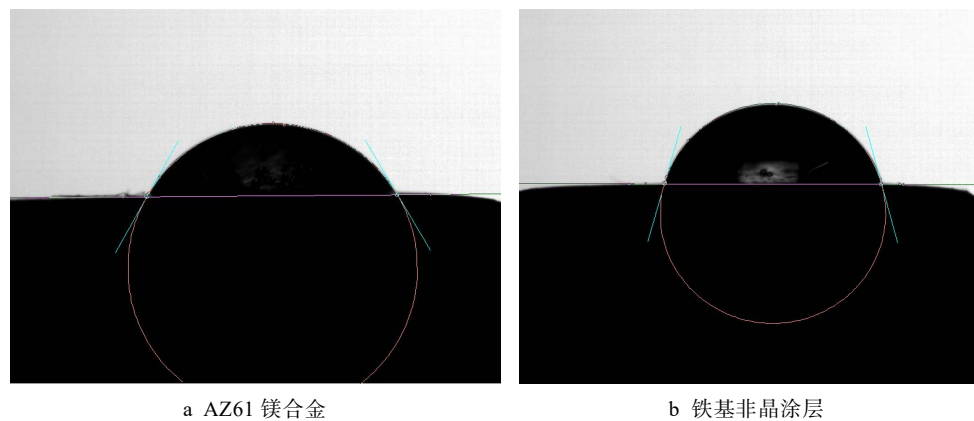


图 5 去离子水对 AZ61 镁合金和铁基非晶涂层的润湿角  
Fig.5 Wetting angle of deionized water to the surface of AZ61 Mg alloy (a) and Fe-based amorphous coating (b)

高了水分子渗入合金内部（向疏水方向）的阻力，这在一定程度上可延缓和减少合金的腐蚀。值得注意的是，当前所示的铁基非晶涂层表面未经任何处理，后续如经简单处理，即可实现超疏水性<sup>[11]</sup>。

铁基非晶涂层能显著提高镁合金的耐蚀性能，其主要原因可归于该涂层原子无序的结构特征。非晶涂层无晶界、位错等缺陷，且化学成分分布均匀，呈单一非晶相，可显著降低合金点蚀或电偶腐蚀的发生。为了进一步解释镁合金用铁基非晶涂层提高耐蚀性

的原因，对铁基非晶涂层样品在模拟酸雨介质中浸泡一天后的表面产物进行了 XPS 分析，如图 6 所示。由 XPS 全谱分析可知，腐蚀产物主要由氧化物和碳化物构成，氧和碳的原子数分数高达 42.2%和 44.5%，其余主要为 Mo 和 Cr 元素。由此可知，铁基非晶涂层在腐蚀介质中最初极易形成氧化钼和氧化铬，与不锈钢中 Mo 和 Cr 的作用类似，可提高合金的耐蚀性能<sup>[13,16]</sup>。此外，大量碳化物主要是在铁基非晶涂层制备过程中形成的。

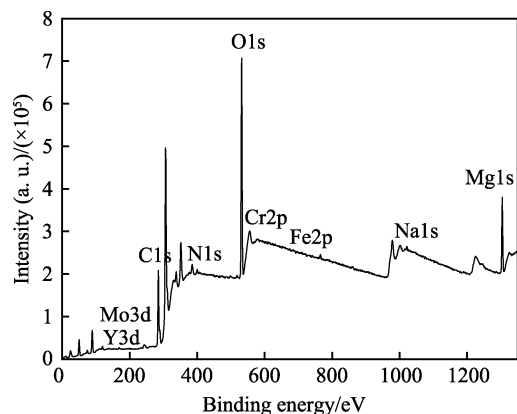


图6 铁基非晶涂层在模拟酸雨介质中腐蚀后的XPS全谱图

Fig.6 Survey X-ray photoelectron spectra of the Fe-based amorphous coating after corrosion in simulated acid rain

### 3 结论

1) 通过引入NiCrAl作为中间层,采用超音速火焰喷涂技术,在AZ61镁合金表面成功构筑了厚度约200~240 μm的铁基非晶涂层。涂层致密,两个界面无明显裂纹、孔洞等缺陷,界面结合良好。

2) 铁基非晶涂层的起始晶化温度高达657℃,具有极高的热稳定性和抗晶化能力。此外,铁基非晶涂层的显微硬度值为892HV,是AZ61镁合金基体硬度的10倍以上,显著提高了镁合金表面的力学性能。

3) 在模拟海水和模拟酸雨腐蚀介质中,相对于AZ61镁合金点蚀为主的失效方式,铁基非晶涂层均展现出明显的钝化能力,主要以均匀腐蚀为主。此外,铁基非晶涂层具有良好的耐蚀性能,这主要归因于非晶涂层原子无序的结构特征以及非晶涂层中化学耐蚀性元素Mo和Cr极易形成氧化物。

#### 参考文献:

- [1] 潘复生, 吴国华. 新型合金材料——镁合金[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
PAN Fu-sheng, WU Guo-hua. Novel metallic materials—Magnesium alloys[M]. Beijing: China railway publishing house, 2017.
- [2] LUO A. Magnesium casting technology for structural applications[J]. Journal of magnesium and alloys, 2013, 1: 2-22.
- [3] EDALATI K, UEHIRO R, IKEDA Y, et al. Design and synthesis of a magnesium alloy for room temperature

- hydrogen storage[J]. Acta materialia, 2018, 149: 88-96.
- [4] LIU W J, CAO F H, CHANG L R, et al. Effect of rare earth element Ce and La on corrosion behavior of AM60 magnesium alloy[J]. Corrosion science, 2009, 51: 1334-1343.
- [5] TAKENAKA T, ONO T, NARAZAKI Y, et al. Improvement of corrosion resistance of magnesium metal by rare earth elements[J]. Electrochimica acta, 2007, 53: 117-121.
- [6] ZHANG H J, ZHANG D F, MA C H, et al. Improving mechanical properties and corrosion resistance of Mg-6Zn-Mn magnesium alloy by rapid solidification[J]. Materials letters, 2013, 92: 45-48.
- [7] ZHOU W Q, SHAN D Y, HAN E H, et al. Structure and formation mechanism of phosphate conversion coating on die-cast AZ91D magnesium alloy[J]. Corrosion science, 2008, 50: 329-337.
- [8] LIU F, SHAN D Y, SONG Y W, et al. Corrosion behavior of the composite ceramic coating containing zirconium oxides on AM30 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation[J]. Corrosion science, 2011, 53: 3845-3852.
- [9] SONG Y W, SHAN D Y, HAN E H. High corrosion resistance of electroless composite plating coatings on AZ91D magnesium alloys[J]. Electrochimica acta, 2008, 53: 2135-2143.
- [10] ZHANG C, LIU L, CHAN K C, et al. Wear behavior of HVOF-sprayed Fe-based amorphous coatings[J]. Intermetallics, 2012, 29: 80-85.
- [11] ZHANG C, WU Y, LIU L. Robust hydrophobic Fe-based amorphous coating by thermal spraying[J]. Applied physics letters, 2012, 101: 121603.
- [12] GUO S F, PAN F S, ZHANG H J, et al. Fe-based amorphous coating for corrosion protection of magnesium alloy[J]. Materials & design, 2016, 108: 624-631.
- [13] GUO S F, CHAN K C, XIE S H, et al. Novel centimeter-sized Fe-based bulk metallic glass with high corrosion resistance in simulated acid rain and seawater[J]. Journal of non-crystalline solids, 2013, 369: 29-33.
- [14] YÜKSEL N, ŞAHİN S. Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hard-facing alloys[J]. Materials & design, 2014, 58: 491-498.
- [15] YANG Y, ZHANG C, PENG Y, et al. Effects of crystallization on the corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings[J]. Corrosion science, 2012, 59: 10-19.
- [16] GARCÍA-RODRÍGUEZ S, LÓPEZ A, TORRES J B, et al. 316L stainless steel coatings on ZE41 magnesium alloy using HVOF thermal spray for corrosion protection[J]. Surface and coatings technology, 2016, 287: 9-19.