

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180307001

投料顺序对镁合金表面层状双金属氢氧化物 涂层性能的影响

谢治辉

(西华师范大学 化学合成与污染控制四川省重点实验室, 四川 南充 637002)

摘要: 为了考察不同投料顺序对镁合金表面层状双金属氢氧化物 (LDHs) 涂层性能的影响, 并得到一种具有较好耐腐蚀能力的镁合金防腐涂层, 通过水热合成法采用不同投料顺序在镁合金表面原位沉积 LDHs 涂层。使用 SEM、XRD、EIS、Tafel 曲线和直接浸泡的方法, 分别对 LDHs 涂层的表面形貌、结构和耐腐蚀性能进行评估。结果发现, 采用不同的投料顺序得到了不同表面形貌、相似结构和不同耐腐蚀能力的 LDHs 涂层。所有 LDHs 涂层的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度和阻抗模量相对于基底都分别发生了明显的正移、下降和增加, 电位正移值约为 0.7 V, 自腐蚀电流密度降低值达到 3~4 个数量级, 阻抗模量增加约 4 个数量级。以上结果表明通过控制投料顺序可以得到具有不同表面形貌的 LDHs 涂层。采用向硝酸铝中添加硝酸镁后调节溶液 pH, 再加入碳酸钠的投料顺序, 得到 LDHs 涂层在 NaCl 溶液中的耐腐蚀能力最好。

关键词: 镁合金; 层状双金属氢氧化物; Tafel 曲线; 电化学阻抗谱

中图分类号: TG174.45; TG178

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)04-0122-08

Effects of Feeding Process on Characteristics of Layered Double Hydroxide Coating on Mg Alloy

XIE Zhi-hui

(Chemical Synthesis and Pollution Control Key Laboratory of Sichuan Province, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan)

Abstract: To study the effects of different feeding processes on the characteristics of layered double hydroxide (LDH), and to obtain a coating with good corrosion protection on Mg alloy, in-situ deposition of LDHs coating on Mg alloy through hydrothermal method with different feeding processes was carried out. The surface morphologies, structures, and corrosion resistance of LDHs coatings were characterized by SEM, XRD, EIS, Tafel curves, and direct immersion measurements. The results show that LDHs coatings with different surface morphologies, different corrosion protection capabilities, and similar structures are obtained using various feeding processes. Compared with Mg alloy substrate, the corrosion potentials, corrosion current densities, and impedance modulus of LDHs coatings respectively shift positively by 0.7 V, decrease obviously by three to four orders of magnitude, and increase evidently by around four orders of magnitude. The surface morphologies of LDHs coatings are tunable by controlling the feeding processes. The coating deposited with a feeding process by adding magnesium nitrate into aluminum nitrate followed by pH adjustment and an addition of sodium carbonate, exhibits the best corrosion resistance in a NaCl solution.

Keywords: magnesium alloy; layered double hydroxide; Tafel curves; electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-05-30

网络出版日期: 2018-07-02 10:48; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180702.1047.014.html>

通信作者: 谢治辉 (1986—), 男 (汉), 博士, 副教授; 研究方向: 镁合金的腐蚀与防护; **E-mail:** zhxie@cwnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51501157); 四川省科学技术厅应用基础研究 (2018JY0483); 西华师范大学留学归校人员科研资助专项 (17B005)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51501157), Applied Basic Research Program of Science and Technology Department of Sichuan Province (2018JY0483) and Fundamental Research Funds of China West Normal University (17B005)

引用格式: 谢治辉. 投料顺序对镁合金表面层状双金属氢氧化物涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 122-129.

XIE Z H. Effects of feeding process on characteristics of layered double hydroxide coating on Mg alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 122-129.

0 引言

镁合金因具有密度小、比强度高、优异的减震和导热导电性能等优点而广泛应用于汽车、航空航天、电子军工等领域^[1-4]。然而, 镁合金固有的不足是电位低、耐腐蚀性能极差, 应用前必须先进行表面处理^[4-6]。目前镁合金常用的表面处理方法比较多, 包括微弧氧化^[7]、化学镀镍^[8-10]、转化膜^[11]等。但这些方法都存在一些显著的缺点, 例如微弧氧化需要消耗大量的电能, 化学镀镍工艺繁琐、成本高、污染严重^[9, 12]。

层状双金属氢氧化物 (Layered Double Hydroxide, LDHs) 是一种新型无机功能材料, 在很多领域尤其是在能源催化等方向得到了广泛研究和应用^[13-14]。近年来, 研究者陆续将 LDHs 作为金属的防护性涂层^[15-16], 其中报道较多的主要是 MgAl-LDHs^[16-18]。Wang 等^[18]使用硝酸镁的铵溶液在铝片表面沉积得到了 MgAl 水滑石转化膜层, 经 8 羟基喹啉处理后, 膜层的耐腐蚀能力得到了进一步增强。Zhang 等^[16]在阳极氧化后的镁合金表面通过沉积 MgAl-LDHs 涂层实现了对多孔阳极转化膜表面孔隙的封闭作用, 从而使得涂层的腐蚀电流密度显著下降。可见, MgAl-LDHs 涂层可以作为一种防护性涂层, 而且其制备步骤简单, 工艺环保, 有望代替传统有毒的含铬类涂层。

已有镁合金表面沉积 LDH 涂层的相关文献报道, 主要致力于对镁合金在沉积 LDH 涂层前的前处理如阳极氧化^[16]、使用对镁合金具有缓蚀作用的缓蚀剂如钒酸根^[17]等对 LDH 涂层进行改性, 以进一步改善 LDH 涂层的耐腐蚀能力。但是, 目前并无有关不同投料顺序对 LDHs 涂层性能影响的研究报道。此类报道的缺失, 极可能造成投料顺序在工业生产中被忽视, 这对于建立严格的工艺流程、获得最优的产品显然是不利的。文中将通过水热合成的方法考察不同的投料顺序对 LDHs 涂层表面形貌、结构及耐腐蚀性能的影响, 从而为 LDH 涂层的应用提供更多的理论参考和数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品制备

试验选用 AZ31 镁合金为基底, 规格为 3 cm×2 cm×0.2 cm, 组成(质量分数)为: 96% Mg、3% Al 和 1% Zn。试样经抛光机使用 1 200 目(10 μm)

耐水砂纸机械打磨, 超声波碱性除油后吹干备用。LDHs 涂层溶 Al(NO₃)₃·9H₂O 液的配制: 先分别称量 0.75 g Al(NO₃)₃·9H₂O、1.54 g Mg(NO₃)₂·6H₂O、0.11 g Na₂CO₃ 和配制 0.05 mol/L NaOH 溶液, 即摩尔比 Mg²⁺: Al³⁺: CO₃²⁻=6: 2: 1。以表 1 的投料顺序配制溶液。以 FP1 为例, 在 96 mL 去离子水中加入 Al(NO₃)₃·9H₂O, 待溶解后, 剧烈搅拌下缓慢加入 Mg(NO₃)₂·6H₂O, 再使用 4 mL NaOH 溶液调节溶液 pH, 最后加入 Na₂CO₃ 溶液。需要说明的是, 虽为不同的添加顺序, 但每一种物质的量在不同的添加顺序中均相同。试验过程中发现不同顺序配制的溶液最终的 pH 并无明显差异, 均约为 12.0, 颜色均为乳白色。将除油后的样品放入反应釜并倒入上述溶液 100 mL, 加盖后置于干燥箱中在温度为 125 °C 下反应 24 h, 冷却后取出冲洗干净并在干燥箱中(65 °C)过夜干燥, 取出即得 LDHs 涂层。

表 1 4 种不同的投料顺序

Table 1 Four types of feeding process

Processes	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
FP1	Al(NO ₃) ₃	Mg(NO ₃) ₂	NaOH	Na ₂ CO ₃
FP2	Al(NO ₃) ₃	Na ₂ CO ₃	NaOH	Mg(NO ₃) ₂
FP3	Mg(NO ₃) ₂	Na ₂ CO ₃	NaOH	Al(NO ₃) ₃
FP4	Na ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	Al(NO ₃) ₃	NaOH

1.2 性能测试及表征

试样性能的测试和表征主要涉及表面形貌、结构和耐腐蚀能力, 分别使用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-6510) 或数码相机和 X 射线粉末衍射仪 (XRD, Ultima IV) 对试样的表面形貌和结构进行表征。接触角采用接触角仪 (JC20001) 进行测量。基底及 LDHs 涂层的耐腐蚀能力通过在 3.5% NaCl 溶液中测试 Tafel 曲线、电化学阻抗谱 (EIS) 和直接浸泡的方法进行评估。电化学测试采用电化学工作站 (CHI660D), 使用三电极体系, 饱和甘汞电极和铂片电极 (表面积大于 1 cm²) 分别为参比电极和对电极, 样品为工作电极, 暴露面积为 1 cm²。

2 结果与讨论

2.1 不同投料顺序下的化学反应分析

采用表 1 中不同的投料顺序将导致溶液在不同时期可能产生不一样的实验现象并发生不一样的化学反应。

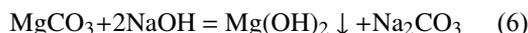
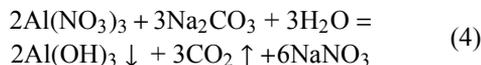
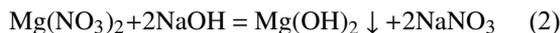
采用 FP1 时, 在加入 NaOH 溶液前, 溶液透明澄清, 加入 NaOH 溶液后, 溶液迅速变浑浊。这主要是因为 NaOH 与 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 反应的结果, 见式 (1) 和式 (2)。由于 NaOH 过量, 部分 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 可能进一步转化为偏铝酸钠, 见式 (3)。加入 Na_2CO_3 后对前一步中生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 影响不大, 因为 MgCO_3 的溶解度高于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 而 $\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$ 在水溶液中不稳定。

当采用 FP2 时, 向铝盐中加入 Na_2CO_3 后可以观察到有少量沉淀生成, 主要是因为生成了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的缘故, 见式 (4)。加入 NaOH 溶液后, 因发生反应 (3) 沉淀消失, 溶液重新变为澄清, 直到加入镁盐后再次变得浑浊。

对于 FP3, 向镁盐中加入 Na_2CO_3 同样会产生沉淀, 主要化学反应方程见式 (5)。由于上一步中镁盐过量且 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的溶解度远低于 MgCO_3 , 随着 NaOH 的加入, 溶液将因发生反应 (6) 和反应 (2) 而变得更加浑浊。铝盐加入后将与上一步剩余的 OH⁻ 反应生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。同时, 因 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解度远小于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 溶解度, 后者可能会慢慢

转化为前者。

对于 FP4, 在未加入 NaOH 溶液前形成的溶液 pH 值低至 3.0, 此时并未观察到沉淀。加入碱液后, 由于 pH 值迅速升至 12.0, 反应 (1)~(6) 都有可能发生。可见, 虽然使用的试剂和质量相同, 但因投料顺序不一样, 溶液在配制过程中经历了不一样的化学反应, 情况比较复杂。



2.2 投料顺序对 LDHs 涂层表面形貌的影响

以不同的投料顺序制备得到的 LDHs 涂层的表面 SEM 形貌如图 1 所示。从图 1(a) 可知, 由

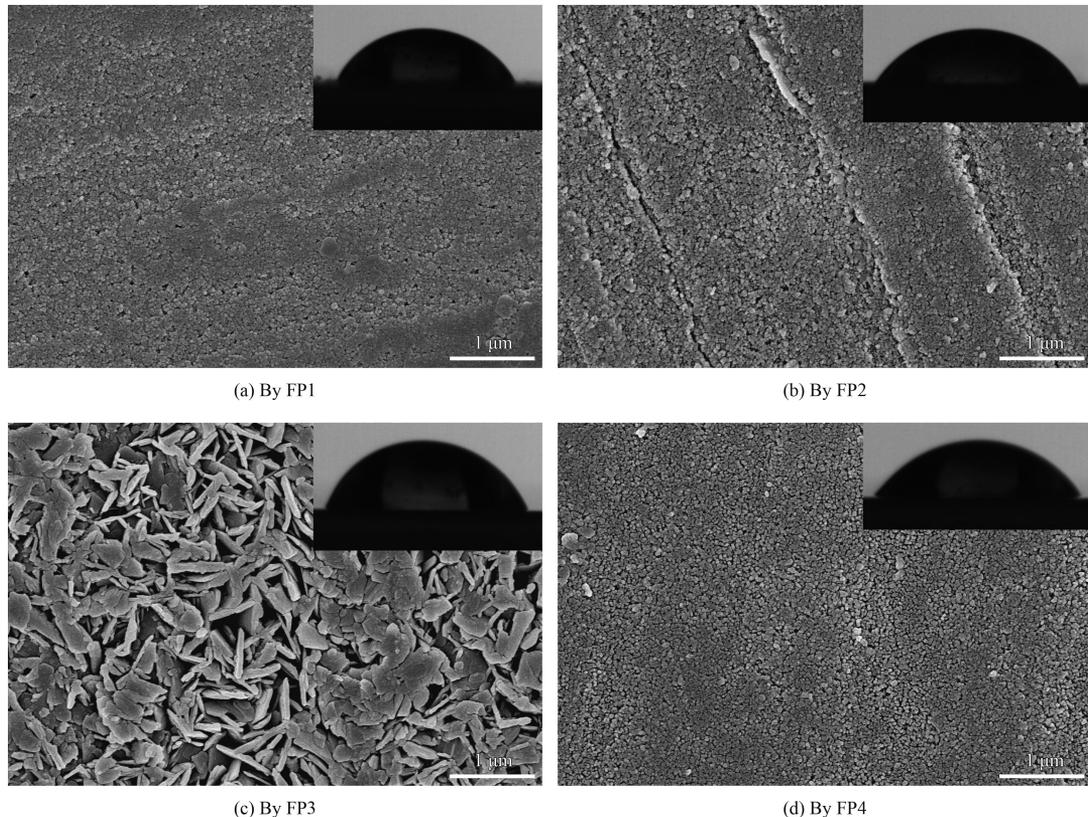


图 1 不同投料顺序所得 LDHs 涂层的表面形貌 (插入图为对应涂层的接触角)

Fig.1 Surface morphologies of LDHs coatings with different feeding processes (Inserts are the corresponding water contact angles of the coating)

FP1 所得涂层表面比较致密。在放大 2 万倍的情况下, 即使在部分区域可以发现非常多的针孔般大的孔隙, 但仍有很多部分因太致密而无法观察到孔隙。图 1(b) 为采用 FP2 所得涂层的表面形貌。与图 1(a) 相比, 可以发现 FP2 方法制备涂层的表层明显更疏松, 而且还有条状的缝隙, 此缝隙将大大削弱 LDHs 涂层外表面的防护能力。采用 FP3 所得涂层表现出明显不一样的表面形貌结构(图 1(c))。该涂层的表面由一些纳米级厚度的片状物垂直于基底交错构成。此结构与文献[16]中制得的 LDHs 涂层的表面形貌比较类似。FP4 所得涂层的表面结构(图 1(d)) 与 FP1 和 FP2 所得涂层的表面结构相似, 但表面孔隙分布更均匀, 几乎所有区域都可明显见孔隙。

研究表明 LDHs 涂层包括两部分, 即内侧的致密层和外层的疏松多孔层^[16]。腐蚀介质虽不能通过多孔层的孔隙直接到达基底, 但过多的孔隙无疑有利于腐蚀介质的渗入, 降低整个涂层的防护能力。对于涂层 FP1、FP2 和 FP4, 因其具有相似的表面形貌, 此时表面的致密程度和均匀性成为影响它们耐腐蚀能力大小的重要因素。因 FP2 涂层具有明显的条纹状缝隙, 有利于腐蚀介质的渗入, 其耐腐蚀能力在三者中最差, 而 FP1 涂层表面最致密, 因而耐腐蚀能力三者中相对最好, FP4 涂层介于 FP1 和 FP2 涂层之间。对于 FP3 涂层, 其表面结构明显异于其它 3 种涂层, 表面的孔隙较其它 3 种涂层要大得多, 但从下文中的 EIS 和 Tafel 测试结果可知, FP3 涂层的耐腐蚀能力却不是最差的。可能的原因是 FP3 涂层的粗糙度较高, 表面孔隙尺寸已达到微米或亚微米级, 这些孔隙有助于锁住一定量的空气, 从而降低溶液对涂层表面的润湿作用^[19], 反而在一定程度上提升涂层的防腐蚀能力。这种推测可以从不同涂层对应的接触角(图 1 插图) 得到印证。根据图 1 中插图可以得到涂层 FP1、FP2、FP3 和 FP4 的接触角分别为 63.2°、60.5°、70.9°和 62.1°。很明显, FP1、FP2 和 FP4 涂层的接触角比较接近, 而 FP3 涂层的接触角明显要大一些。需要注意的是, 由于 FP3 涂层的接触角只是相对其它 3 种涂层明显更高, 但依然低于 90.0°, 其并不具备疏水能力。因而, FP3 涂层的耐腐蚀能力在 4 种涂层中属中等。

2.3 投料顺序对 LDHs 涂层结构的影响

图 2 为镁合金基底和采用几种不同投料顺序所得 LDHs 涂层的 XRD 图谱。由图可知, 镁合金基底在 2θ 为 32.2°, 34.4°, 36.6°和 70.0°附近表现出了明显的衍射峰, 主要为 Mg 的衍射峰(JCPDS No.35-0821)。采用不同的投料顺序在基底表面沉积 LDHs 后, 除了镁合金基底引起的衍射峰外, 所有涂层在 2θ 为 12°和 38°附近表现出明显的衍射峰。对比粉末衍射卡(PDF)可知, 涂层的主要分子式为 $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS No.54-1029, 14-0525), 说明基底表面均形成了镁铝碳酸根羟基水合物涂层。且由于表面涂层的形成, Mg 在 2θ 为 32.2°等处的峰强度明显减弱。从 XRD 图谱上看, 不同投料顺序所得涂层的晶体结构并没有明显的差异。

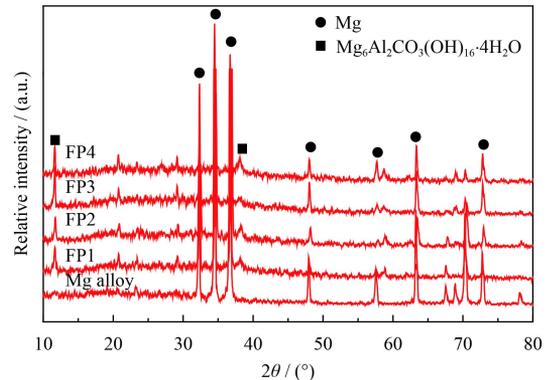
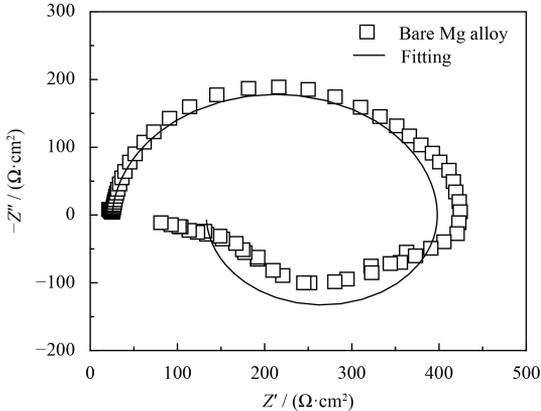


图2 镁合金基底及不同投料顺序所得 LDHs 涂层的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of Mg alloy substrate and LDHs coatings with different feeding processes

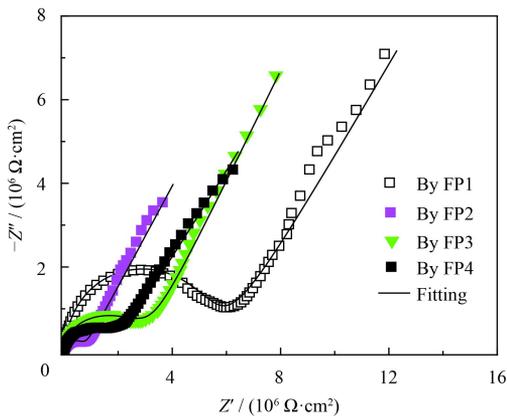
2.4 投料顺序对 LDHs 涂层耐腐蚀能力的影响

为了考察不同投料顺序对 LDHs 涂层耐腐蚀能力的影响, 分别对镁合金基底及 LDHs 涂层采用 EIS 和 Tafel 曲线测试以及直接浸泡测试的方法。根据镁合金基底的 Nyquist 图(图 3(a)), 此时包含 2 个时间常数, 即一个高频区的容抗弧和一个低频区的感抗弧。低频区的感抗弧一般认为由镁合金表面腐蚀产物的吸脱附引起^[5]。在低频($f < 10$ Hz) 时的阻抗模量可以比较直接反映出样品的耐腐蚀能力^[10]。使用等效电路 $R_s(Q_{dl}R_{ct}(LR_L))$ 进行拟合, 得到当 $f=1$ Hz 时, 阻抗模量 $|Z| = 376 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在镁合金表面沉积 LDHs 涂层后, Nyquist 图发生了明显的变化(图 3(b)), 其等效电路图表示为 $R_s(Q_{dl}(R_{ct}(Q_{dl}(R_{ct}W))))$ 。根据拟合结果, 在 $f=1$ Hz

处4种不同投料方式所得涂层的阻抗模量依次为6.1、1.0、3.1和2.2 $M\Omega \cdot cm^2$ 。可见,相对于基底,所有涂层都表现出了比较高的阻抗模量,数值上增加了约4个数量级,所有涂层都具备比较好的耐腐蚀能力。相比较而言,在NaCl溶液中采用FP1方法所得涂层的耐腐蚀能力最好,而FP2过程所得涂层的耐腐蚀能力最差。



(a) Bare Mg alloy



(b) LDHs coatings with different feeding processes

图3 镁合金基底及不同投料顺序所得LDHs涂层的Nyquist图
Fig.3 Nyquist plots of Mg alloy and LDHs coatings with different feeding processes

图4为镁合金基底和采用不同投料顺序所得LDHs涂层的Tafel曲线。由图4可知,镁合金基底表面沉积LDHs涂层后,其自腐蚀电位和自腐蚀电流分别发生了明显的正移和显著下降。基底的自腐蚀电位为 -1.45 V ,自腐蚀电流密度为 $3.24\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。4种涂层的自腐蚀电位依次为 -0.73 、 -0.83 、 0.72 和 0.73 V ,而自腐蚀电流密度依次为 0.64 、 5.90 、 1.57 和 $3.64\ \text{nA}/\text{cm}^2$ 。相对于基底,涂层的自腐蚀电位正移了约 0.7 V ,自腐蚀电流密度则下降了3~4个数量级。Tafel曲线测试结果进一

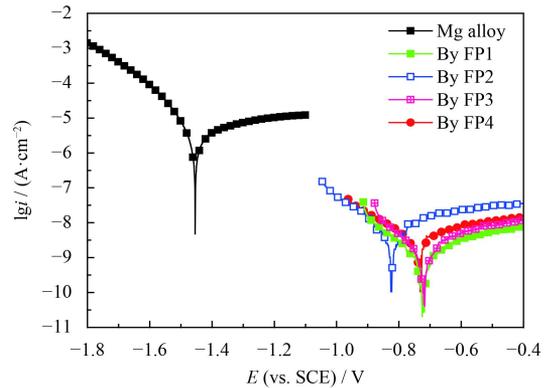


图4 镁合金基底及不同投料顺序所得LDHs涂层的Tafel曲线
Fig.4 Tafel curves of Mg alloy substrate and LDHs coatings with different feeding processes

步表明,在NaCl溶液中采用FP1所得涂层具有最低的自腐蚀电流和最好的耐腐蚀能力,而采用FP2所得涂层相对于其它3种涂层的耐腐蚀能力最弱。

需要说明的是,尽管水热过程中镁合金基底中的Mg、Al和Zn元素也可能参与反应,但是其(特别是Al和Zn)对涂层耐腐蚀能力的影响可以忽略。由于Mg的活泼性较高,即使在潮湿的环境下,镁合金的表面也很容易形成 MgO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的混合物。可以推测,在碱性环境下,Mg会与 OH^- 发生作用。Peng等^[20]发现若直接将镁合金浸入NaOH溶液并进行水热反应,确实可以在镁合金表面形成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 涂层。

文中针对FP3涂层进行XPS测试的结果如图5所示。图5(a)为涂层的全谱扫描结果,可以看出涂层包含的主要金属元素为Mg和Al。全谱中无法看到Zn元素的峰,为此,进一步对Zn 2p进行了窄扫,结果见图5(b)。从图5(b)可知,涂层中含有微量的Zn。由于XPS的测试结果主要反映的表层信息(即涂层信息),说明基底中的元素Zn确实参与了水热反应。但是,根据Peng等^[20]研究结果,直接在pH为12的NaOH溶液中水热反应得到的涂层腐蚀电流密度约为 $1.25\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$,与文中基底的腐蚀电流密度($3.24\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$)相比,前者的值略低但在同一个数量级。在沉积LDHs涂层后,涂层的腐蚀电流密度低至 nA/cm^2 。可见,水热反应过程中,虽然镁合金基底中的元素也会参与反应,但其对提高涂层的耐腐蚀能力的作用可以忽略。

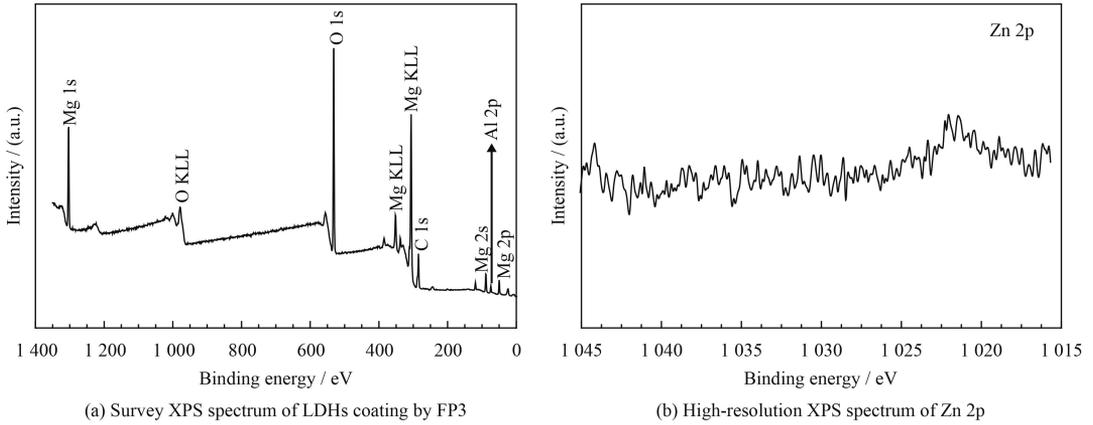


图 5 FP3 投料方式制备涂层的 XPS 图谱

Fig.5 XPS spectra of coating prepared by FP3 feeding process

2.5 浸泡腐蚀试验

为了考察 LDHs 涂层在 NaCl 溶液中真实的防护效果。图 6 为经打磨除油后的镁合金基底和采用 FP1 所得 LDHs 涂层在质量分数 3.5% NaCl 溶液中浸泡前后的 SEM 和宏观形貌。新制备的镁合金基底表面呈光亮的金属色(图 6(a)), SEM 显示表面有细小的因砂纸打磨造成的痕迹。在

NaCl 溶液中仅仅浸泡 1 d 后, SEM 显示表面发生大面积腐蚀, 腐蚀坑清晰可见, 一些灰色或黑色的腐蚀产物清晰可见(图 6(b))。新制备的 LDHs 涂层表面则为带有一定光泽的古铜色(图 6(c)), 表面平整。在 NaCl 溶液中浸泡 28 d 后, SEM 显示涂层微观形貌与浸泡前并无明显差异。宏观实物显示除了涂层色泽变暗, 边角有明显腐蚀外,

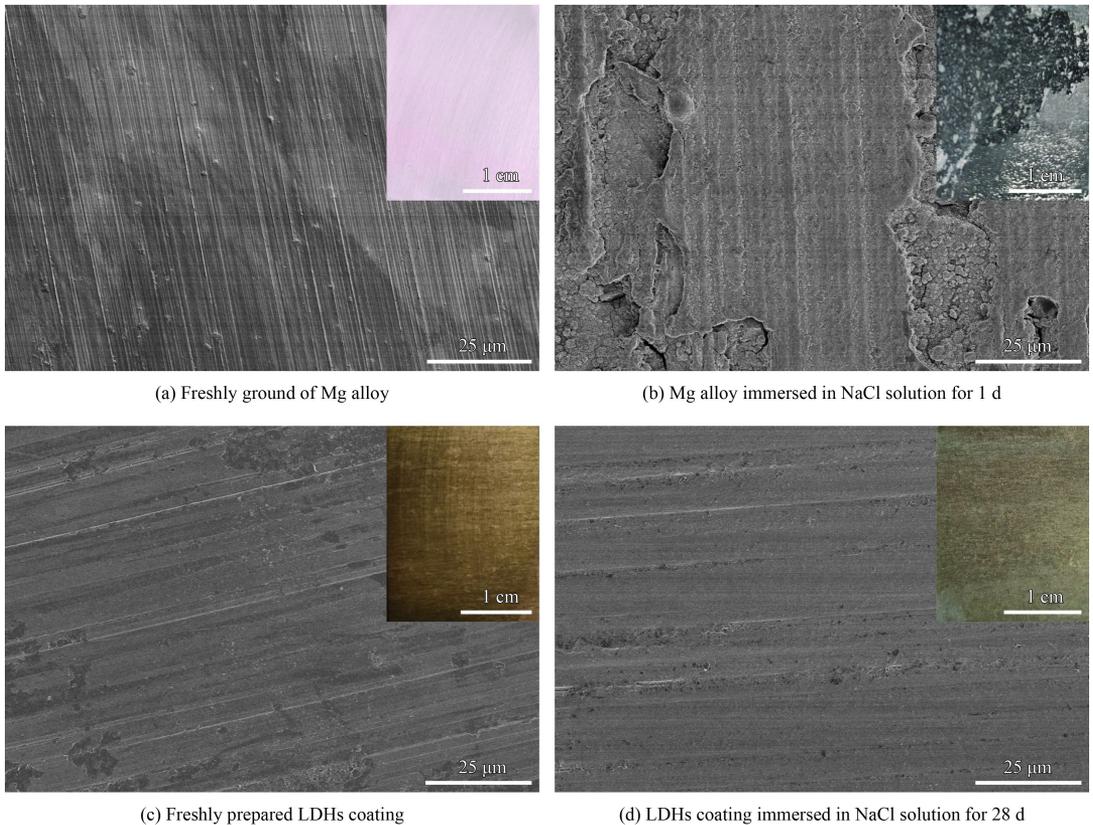


图 6 镁合金基底和新制备的 LDHs 涂层在 NaCl 溶液中浸泡后的 SEM 形貌和宏观形貌

Fig.6 SEM morphologies and macroscopic images of Mg alloy and LDHs coatings before and after immersing in NaCl solution

在样品主体部分并未发现明显腐蚀痕迹,也没有腐蚀点或腐蚀坑(图 6(d))。边角处优先发生腐蚀可能与样品打磨过程中造成的边角太过尖锐而没能形成良好涂层有关。

3 结 论

(1) 采用不同的投料顺序,可以在镁合金表面形成具有不同表面形貌的 LDHs 涂层。虽然采用不同投料顺序所得 LDHs 涂层的 XRD 图谱并无明显区别,但 EIS 和 Tafel 曲线均表明几种不同涂层的耐腐蚀性能存在明显差异。

(2) 采用向硝酸铝中添加硝酸镁后调节溶液 pH,然后再加入碳酸钠的投料顺序,得到的 LDHs 涂层在 NaCl 溶液中的耐腐蚀能力最好。

(3) 直接浸泡试验表明 LDHs 涂层在 NaCl 溶液中浸泡 28 d 后仍未出现腐蚀点或腐蚀坑,而基底仅仅浸泡 1 d 后表面便布满了腐蚀产物,进一步证明了该涂层具备优良的抗腐蚀能力。

参考文献

- [1] 陈杰,马冰,刘光,等. 镁合金表面冷喷涂纳米 WC-17Co 涂层及其性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 74-80.
CHEN J, MA B, LIU G, et al. Preparation and properties of cold sprayed nano WC-17Co coating on magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 74-80 (in Chinese).
- [2] 胡波年,谢治辉,余刚,等. 镁合金直接化学镀镍存在的问题与发展趋势[J]. 材料保护, 2010, 43(4): 19-25.
HU B N, XIE Z H, YU G, et al. Problems and development trend in direct electroless nickel plating of magnesium alloys[J]. Materials Protection, 2010, 43(4): 19-25 (in Chinese).
- [3] XIE Z H, LI D, SKEETE Z, et al. Nanocontainer-enhanced self-healing for corrosion-resistant Ni coating on Mg alloy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 36247-36260.
- [4] 范春,龙威,周小平. AZ31B 镁合金表面火焰喷涂 Al-Mg₂Si 涂层的耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 113-118.
FAN C, LONG W, ZHOU X P. Corrosion resistance of Al-Mg₂Si composite coating on AZ31B magnesium alloy by flame spraying[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 113-118 (in Chinese).
- [5] GAN R, WANG D M, XIE Z H, et al. Improving surface characteristic and corrosion inhibition of coating on Mg alloy by trace stannous (II) chloride[J]. Corrosion Science, 2017, 123: 147-157.
- [6] 郭亚鑫,华帅,陶庆爽,等. 不同催化剂对镁合金表面 SiO₂-ZrO₂ 涂层耐蚀性的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 99-106.
GUO Y X, HUA S, TAO Q S, et al. Effects of different catalysts on corrosion behavior of SiO₂-ZrO₂ layers on magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 99-106 (in Chinese).
- [7] 崔学军,魏劲松,宁闯明,等. 氮气流量对 AZ31B 镁合金表面 MAO/TiN 涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 27-34.
CUI X J, WEI J S, NING C M, et al. Effects of nitrogen volumetric flow rate on properties of MAO/TiN composite coatings on AZ31B magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 27-34 (in Chinese).
- [8] LI D, CHEN F, XIE Z H, et al. Enhancing structure integrity and corrosion resistance of Mg alloy by a two-step deposition to avoid F ions etching to nano-SiO₂ reinforcement[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 705: 70-78.
- [9] 姚妍,张学义,邹松华,等. 主盐及还原剂对 AZ31 镁合金化学镀镍-磷合金的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 62-68.
YAO Y, ZHANG X Y, ZOU S H, et al. Influence of main salt and reducing agent to nickel-phosphorus alloy on AZ31 magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 62-68 (in Chinese).
- [10] XIE Z H, SHAN S Y. Nanocontainers-enhanced self-healing Ni coating for corrosion protection of Mg alloy[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(5): 3744-3755.
- [11] GAN Y W, CHEN D X, KANG Z X. A highly anticorrosive chromium-free conversion coating prepared on electroless Ni-P coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 287: 25-32.
- [12] 胡波年,谢治辉,余刚,等. 镁合金直接化学镀镍存在的问题与发展趋势[J]. 材料保护, 2010, 43(4): 19-25.
HU B N, XIE Z H, YU G, et al. Problems and development trend in direct electroless nickel plating of magnesium alloys[J]. Materials Protection, 2010, 43(4): 19-25 (in Chinese).
- [13] YU L, YANG J F, GUAN B Y, et al. Hierarchical hollow nanoprisms based on ultrathin Ni-Fe layered double hydroxide nanosheets with enhanced electrocatalytic activity towards oxygen evolution[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(1): 172-176.
- [14] WU N S, LOW J X, LIU T, et al. Hierarchical hollow cages of Mn-Co layered double hydroxide as supercapacitor electrode materials[J]. Applied Surface Science, 2017, 413: 35-40.
- [15] ZHANG F Z, ZHAO L L, CHEN H Y, et al. Corrosion resistance of superhydrophobic layered double hydroxide films

- on aluminum[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47(13): 2466-2469.
- [16] ZHANG G, WU L, TANG A T, et al. A novel approach to fabricate protective layered double hydroxide films on the surface of anodized Mg-Al alloy[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(12): 1700163.
- [17] ZHELUDKEVICH M L, POZNYAK S K, RODRIGUES L M, et al. Active protection coatings with layered double hydroxide nanocontainers of corrosion inhibitor[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(2): 602-611.
- [18] WANG L D, ZHANG K Y, HE H R, et al. Enhanced corrosion resistance of MgAl hydrotalcite conversion coating on aluminum by chemical conversion treatment[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 235: 484-488.
- [19] ZHENG Q, LU C. Size effects of surface roughness to superhydrophobicity[J]. *Procedia IUTAM*, 2014, 10: 462-475.
- [20] PENG F, LI H, WANG D, et al. Enhanced corrosion resistance and biocompatibility of magnesium alloy by Mg-Al-layered double hydroxide[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(51): 35033-35044.

(责任编辑: 常青)

• 本刊讯 •

2018 亚太表面精饰大会将于 10 月在上海召开

2018 年 10 月 31 日—11 月 2 日, 由中国表面工程协会主办的 2018 亚太表面精饰大会 (APAC Interfinish 2018) 将在上海新国际博览中心举办, 该会议与 ProSF 2018 国际表面工程展览会暨中国表面工程行业年会同期举行。大会的主题为“绿色表面工程·智能引领未来”, 将邀请国内外知名专家、学者就表面工程领域的热点问题进行交流讨论。展会期间将邀请国内外表面工程领域的知名公司及中国表面工程协会各会员单位参展参会。

会议面向各大专院校、科研院所、公司企业征集表面工程领域的优秀论文 (语言为英文)。大会将推荐高水平论文到 *Coatings* 等 SCI 期刊上发表。征集范围包括: ①表界面科学、表面工程基础理论、腐蚀机理研究等; ②工业镀膜、真空与等离子体技术、气相沉积、有机涂层与涂装、粉末涂料、化学镀/电镀/复合镀/阳极氧化、热喷涂、转化膜、热浸镀、防锈与润滑、特种涂层、前处理、纳米技术以及复合技术等先进表面处理技术; ③表面处理技术在智能制造、清洁生产、环境保护等方面的应用; ④废水/废气/固体废弃物治理、安全生产、行业标准化等其它与表面工程相关的领域。

相关会议信息详见网站: www.apacInterfinish2018.org

(本刊编辑部 供稿)