

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.01.003

## 铝合金表面改性对 ZIF-8 膜层生长行为的影响

杨丹<sup>1</sup>, 孙翠玲<sup>2</sup>, 林修洲<sup>1,3</sup>, 窦宝捷<sup>1,3</sup>, 罗松<sup>1,3\*</sup>

(1. 四川轻化工大学 材料科学与工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 山东重山光电材料股份有限公司, 山东 淄博 255138; 3. 材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 采用多巴胺改性和预制水滑石(LDH)模板两种不同改性方式对铝合金改性, 研究了改性方式对其表面金属有机骨架膜层(MOF)生长性能的影响。通过微观形貌、相组成及能谱对膜层组织结构进行了表征, 并通过电化学阻抗和动电位极化曲线探究膜层的耐蚀性。结果表明: 多巴胺改性后的铝合金表面难以形成连续的沸石咪唑骨架膜层(ZIF-8)膜层, 而采用预制LDH模板的方式可在铝合金表面制备连续致密的ZIF-8膜, 并且采用预制LDH模板得到的膜层其低频阻抗模值较铝合金而言提升了1个数量级, 达到 $8.79 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 可对铝合金起到较好的防护性能。

**关键词:** 铝合金; 多巴胺; 水滑石; 沸石咪唑骨架膜层

**中图分类号:** TQ174.4      **文献标识码:** A

## Effect of modification methods on ZIF-8 film growth behaviors on aluminum alloy

Yang Dan<sup>1</sup>, Sun Cuiling<sup>2</sup>, Lin Xiuzhou<sup>1,3</sup>, Dou Baojie<sup>1,3</sup>, Luo Song<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University of Science &amp; Engineering, Zigong, 643000, China; 2. Shandong Zhongshan Photoelectric Material Co., Ltd., Zibo 255138, China; 3. Key Laboratory for Corrosion and Protection of Materials of Sichuan Province, Zigong 643000, China)

**Abstract:** The aluminum alloy was modified by two different methods: dopamine modification and prefabricated hydrotalcite (LDH) template, and the effect of modification methods on the growth behaviors of metal organic framework film (MOF) was studied. The microstructure of the film was characterized by micro morphology, phase composition and energy spectrum, and the corrosion resistance of the film was investigated by electrochemical impedance and potentiodynamic polarization curve. The results show that it is difficult to form a continuous zeolite imidazole framework film (ZIF-8) on the surface of aluminum alloy modified by dopamine, but a continuous and dense ZIF-8 film can be prepared on the surface of aluminum alloy by prefabricated LDH template, and the low-frequency impedance modulus of the film obtained by prefabricated LDH template is one order of magnitude higher than that of aluminum alloy, reaching  $8.79 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , which can play a good protective performance on aluminum alloy.

**Keywords:** aluminum alloy; dopamine; hydrotalcite; zeolitic imidazolate framework

收稿日期: 2022-05-18

修回日期: 2022-06-13

作者简介: 杨丹(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 从事表面工程技术, email: yangdanbq@163.com

\*通信作者: 罗松, email: stravel@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51901146), 四川省科技厅(No. 2020JDR0098, 2021YFG0246)

铝合金因具有密度低、比强度高、重量轻、导电性好等优点成为当前应用十分广泛的一种金属,其产量和应用居世界第二,仅次于钢铁。但铝合金本身的自腐蚀电位较低,容易发生腐蚀,限制其潜在的很多应用<sup>[1]</sup>。其中,表面处理是铝合金最为常见的防腐方式,包括化学镀<sup>[2]</sup>、MAO<sup>[3]</sup>、化学转化膜<sup>[4]</sup>等。

金属有机骨架是一种近二十年来迅速发展起来的新型多功能材料。它具有大的比表面积、孔径均一且可调、超高的孔隙率等优良特性,被广泛应用于气体的吸附、存储、催化、分离等领域<sup>[5-8]</sup>。近年来,金属有机骨架材料在防腐领域逐渐得到关注<sup>[9-10]</sup>。Ramezanzadeh 等人<sup>[11]</sup>研究发现合成的 ZIF-67 纳米颗粒具有缓蚀性能,主要归因于 ZIF-67 结构释放出的钴离子和 2-甲基咪唑分子,它们可以在阴极区域与 OH 发生化学作用,并分别吸附在阳极区域;段松等人<sup>[12]</sup>制备了 ZIF-8 改性环氧涂层,研究表明:ZIF-8 纳米填料增强了环氧树脂的化学交联和阻隔效果,从而有效改善了涂层的防腐性能和力学性能。

然而,由于金属基体与金属有机骨架材料之间存在异构性,导致金属有机骨架膜层在金属基体表面直接生长很困难。因此,如何在金属基体表面生长一层均匀致密 MOF 膜是一个大的挑战。Kim 等人<sup>[13]</sup>先在阳极氧化铝(AAO)基底涂覆一层硅沸石种子层,以增加膜—基底结合力,再二次生长得到了 ZIF-8 膜;Ma 等人<sup>[14]</sup>采用冷冻辅助原位生长的方法成功在多孔陶瓷基底上制备了纳米 ZIF-8 复合膜。本文采用多巴胺改性和预制 LDH 模板两种不同改性方式对铝合金表面改性,然后通过原位生长法在铝合金表面制备 ZIF-8 膜层,从而探究铝合金表面制备连续的 ZIF-8 膜层的方法以及膜层对铝合金耐腐蚀性能的影响。

1 实验

1.1 材料和试剂

实验采用 2024 铝合金,化学成分如表 1 所示。尺寸:45 mm×35 mm×5 mm。采用 180#、600#、1000#、2000#的耐水砂纸打磨试样,然后丙酮超声清洗并吹干。实验所用试剂如表 2 所示。

1.2 铝合金表面不同改性方法

配制多巴胺溶液,调节 pH 值,将铝合金试样浸置 20 h,取出试样,室温下悬挂固化,即可得到经多巴胺改性的铝合金试样 AP。

表 1 2024 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of 2024 Al alloy

化学成分/(wt.%)								
Cu	Mg	Mn	Fe	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
4.33	1.57	0.61	0.33	0.19	0.14	0.06	0.04	Balance

表 2 实验主要试剂

Tab.2 Reagents used of this work

药品名称	分子式	药品级别	生产厂家
2-甲基咪唑	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>	分析纯	阿拉丁试剂有限公司
无水醋酸锌	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> Zn	分析纯	
甲酸钠	CHNaO <sub>2</sub>	分析纯	
脲(尿素)	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	分析纯	成都市科龙化工试剂厂
多巴胺	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> O <sub>2</sub> N	—	西安泽朗生物科技有限公司
甲醇	CH <sub>4</sub> O	优级纯	国药集团化学试剂有限公司
六水合硝酸锌	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	分析纯	
丙酮	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	分析纯	

分别称取一定量的六水合硝酸锌和尿素,超声搅拌的条件下得到混合溶液。然后将铝合金试样悬挂于配制好的混合溶液中,80 °C 下反应 24 h,最后冲洗并干燥,即可得到表面预制 LDH 模板的铝合金试样 AL。

1.3 ZIF-8 膜生长

称取一定量无水醋酸锌、2-甲基咪唑、甲酸钠溶于一定量甲醇中配制混合溶液,将试样 AP 放入反应釜内,倒入混合溶液淹没试样,110 °C 反应 24 h,冷却后取出试样并用甲醇冲洗,室温下干燥 24 h,即可得到生长着 ZIF-8 膜层的铝合金试样 APZ。

称取一定量的 2-甲基咪唑溶于一定量的甲醇中制成混合溶液,将试样 AL 放入反应釜内,倒入混合溶液淹没试样,140 °C 下反应 24 h,冷却后取出试样并用甲醇冲洗,室温下干燥 24 h,即可得到生长着 ZIF-8 膜层的试样 ALZ。

1.4 结构表征

采用 VEGA-3-SBU 型扫描电子显微镜(SEM)表征样品的微观形貌,结合能谱仪(EDS)表征膜层的成分。采用 DX-2700X 型 X 射线衍射仪(XRD)表征样品的晶间结构。

1.5 电化学测试

采用 AUTOLAB 电化学工作站,在 3.5% NaCl 溶液体系中对膜层的耐蚀性能进行检测。测试采用

参比电极(饱和甘汞电极)、辅助电极(铂片电极)、工作电极(试样)组成的三电极体系进行。极化曲线测试扫描速度为1 mV/s;交流阻抗测试时:初始电位为开路电位,测试频率范围为 $10^2 \sim 10^5$  Hz,扰动电位为10 mV(vs.OCP)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ZIF-8膜的XRD分析

图1是2024铝合金经不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的XRD图谱。图(a)是多巴胺改性后制备APZ膜,该膜层在 $7^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $16^\circ$ 和 $18^\circ$ 左右分别出现了关于ZIF-8的(011)、(112)、(022)、(013)和(222)晶面<sup>[15]</sup>,这表明利用多巴胺处理可以在铝合金表面制备ZIF-8膜层;图(b)是预制LDH模板后制备ALZ膜,其中,铝合金表面预生长LDH模板制备得到的AL膜层分别在 $11.7^\circ$ 左右与 $20^\circ$ 左右出现了关于LDH的(003)晶面和(006)晶面的特征衍射峰,这表明预生长所制备的膜层为LDH膜层;以此膜层为模板制备的ALZ膜层在 $7^\circ$ 左右和 $18^\circ$ 左右分别出现了代表ZIF-8的(011)晶面和(222)晶面<sup>[16-17]</sup>,这表明采用在铝合金表面预生长LDH膜层作为模板可以成功的制备ZIF-8膜层。

### 2.2 ZIF-8膜的FT-IR分析

图2是2024铝合金经不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的FT-IR图谱。图2(a)是多巴胺改性后制备的APZ膜,该膜层在 $2929\text{ cm}^{-1}$ 、 $760\text{ cm}^{-1}$ 两处, $694\text{ cm}^{-1}$ 、 $1584\text{ cm}^{-1}$ 、 $1142\text{ cm}^{-1}$ 三处和 $994\text{ cm}^{-1}$ 处出现特征峰,分别与咪唑环中C-H、C=N和C-N吸收带的振动有关。在 $422\text{ cm}^{-1}$ 处观测到Zn-N的吸收带,说明经多巴胺改性制备的APZ膜层为ZIF-8膜层<sup>[18-20]</sup>。图2(b)是预制LDH模板后制备的ALZ膜,AL与ALZ两膜层均在 $3423\text{ cm}^{-1}$ 左右出现了关于水分子的O-H伸缩振动峰,其中,与AL膜层相比,APZ膜层此峰的峰强降低,且该膜层在 $1584\text{ cm}^{-1}$ 、 $1142\text{ cm}^{-1}$ 和 $422\text{ cm}^{-1}$ 左右分别出现了关于C=N、C-N和Zn-N的特征峰<sup>[18-20]</sup>,这说明所制备的膜层中有ZIF-8的官能团,表明可以利用LDH膜层作为模板在铝合金表面制备ZIF-8膜层,上述结果均与XRD结果是一致的。

### 2.3 ZIF-8膜层的微观形貌和能谱分析

图3是2024铝合金经不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的SEM图。图3(a)为多巴胺改性后制备

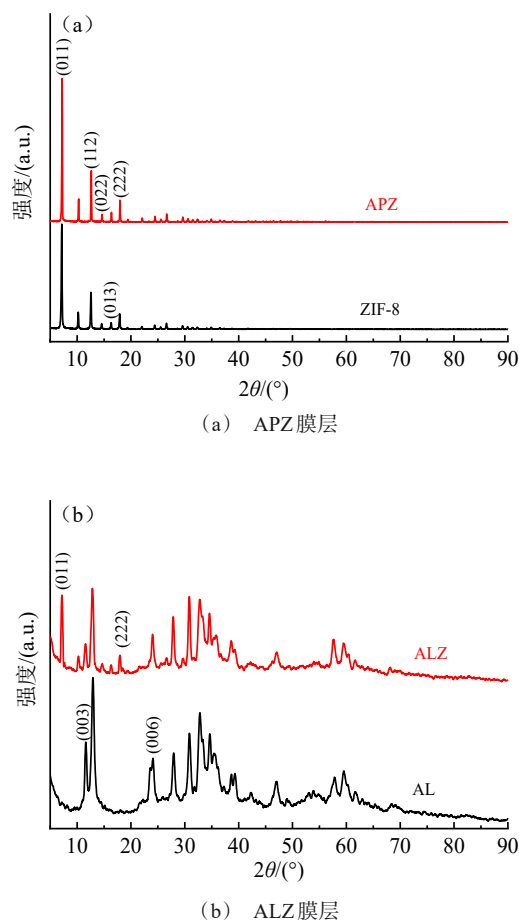
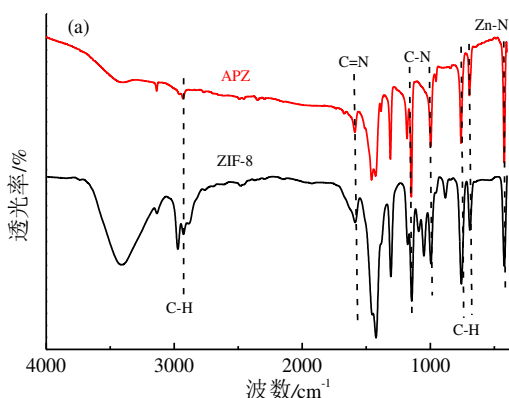


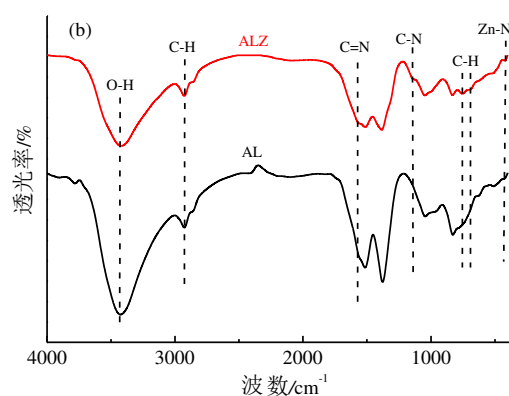
图1 不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的XRD图谱  
Fig.1 XRD patterns of ZIF-8 films prepared after different surface modification

的APZ膜,其膜层表面附着有明显的晶体颗粒,但制备的膜层并不连续,图3(b)为其放大图,表3是分别对附着晶体处(区域A)和未附着有晶体处(区域B)的EDS检测结果,区域B含有较高的C、N、O元素,而Zn含量较低,表明铝合金表面存在多巴胺膜层,而此处较高的Al元素来自于基体铝合金,可能是铝合金表面制备的多巴胺膜层不连续所导致的;区域A处N元素和Zn元素含量明显增高,这说明生长晶体处的晶体为ZIF-8晶体。图3(c)为预制LDH模板制备的AL膜,其膜层存在两种形貌,即平整表面形貌区(区域A)和凸起表面形貌区(区域B),图3(d)、图3(e)分别为该膜层区域A和区域B的放大图,两区域均为片层结构,为LDH膜层的典型形貌特征<sup>[11]</sup>,这表明所制备过渡膜层为LDH膜层,其中膜层的两区域片层结构尺寸各自大小均一,而区域





(a) APZ 膜层

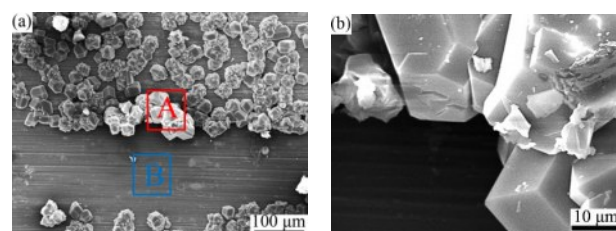


(b) ALZ 膜层

图 2 不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的 FT-IR 图谱  
Fig.2 FT-IR spectra of ZIF-8 films prepared after different surface modifications

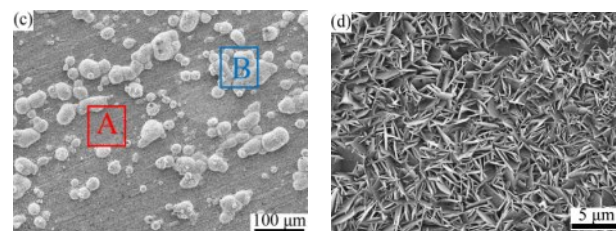
B 的片层结构尺寸与区域 A 相比要小一些,但更加的致密;图 3(f)为利用 LDH 模板制备的 APZ 膜层,其膜层也存在两种形貌,两相貌区域分别为平整表面形貌区(区域 A)和凸起表面形貌区(区域 B),图 3(g)、图 3(h)分别为该膜层区域 A 和区域 B 的放大图,两区域膜层的形貌与 LDH 膜层相比均发生明显变化,由 LDH 的片层结构变为棱镜型结构连接成的膜层,其中区域 B 的膜层更加致密。通过分别对两种膜层的两种形貌处进行 EDS 检测,结果如表 3 所示,研究发现:制备 ZIF-8 膜层后其 N 元素与 C 元素的含量明显增多,O 元素的含量明显降低,这是由于 2-甲基咪唑与锌离子配位形成 ZIF-8 膜层,2-甲基咪唑中的 C 元素与 N 元素为膜层主要组成部分,所以两元素含量增加,而 ZIF-8 膜层的形成是与 LDH 膜

层中的锌离子反应,锌离子参与反应,LDH 的层间阴离子失去 LDH 的阳离子金属板,无法在膜层表面存在,所以 O 元素的含量降低,这进一步表明在铝合金表面预生长 LDH 膜层可以使 ZIF-8 膜层在铝合金表面生长。



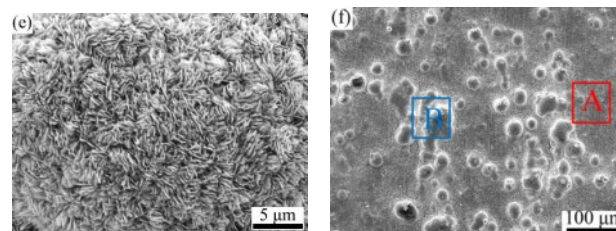
(a) APZ 膜层

(b) APZ 膜层的放大图



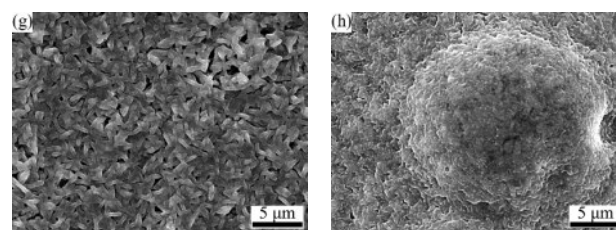
(c) AL 膜层

(d) AL 膜层 A 区域放大图



(e) AL 膜层 B 区域放大图

(f) ALZ 膜层



(g) ALZ 膜层 A 区域放大图

(h) ALZ 膜层 B 区域放大图

图 3 不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的 SEM 图

Fig.3 SEM images of ZIF-8 film prepared after different surface modification

## 2.4 电化学测试

### 2.4.1 动电位极化曲线

图 4 是 2024 铝合金经不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的动电位极化曲线图,表 4 是其拟合数据。图 4(a)是多巴胺改性后制备的 APZ 膜,腐蚀电

表3 不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的不同区域能谱图

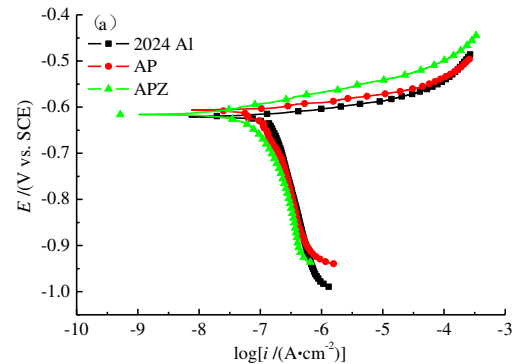
Tab.3 Energy spectra of different regions of ZIF-8 films prepared after different surface modification

试样及测试区域		元素含量/(at.%)				
		C	N	O	Al	Zn
APZ	区域A	64.73	21.74	3.64	0.28	9.62
	区域B	31.5	6.35	14.05	47.37	0.74
AL	区域A	19.63	4.45	51.99	14.12	9.81
	区域B	26.16	6.06	48.84	0.10	18.83
ALZ	区域A	48.63	16.17	20.12	9.42	5.66
	区域B	44.15	13.47	29.58	0.08	12.71

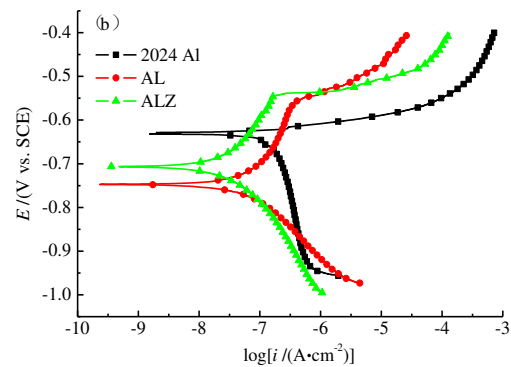
流密度左移,从铝合金的 $1.78 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 减小至 $4.92 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,表明该膜层的腐蚀速度降低,提升了铝合金耐蚀性能;图4(b)是预制LDH模板后制备的ALZ膜,与铝合金相比,预制的LDH膜层制备的AL膜层的腐蚀电流密度左移,达到 $3.27 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,表明预制LDH模板可提升铝合金的防护性能;与预制的LDH膜层相比,制备的ALZ膜层的腐蚀电位正移,腐蚀电流密度左移,达到 $1.32 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,进一步表明在铝合金表面预生长LDH膜层后制备ZIF-8膜层可有效提升铝合金的防护性能。

#### 2.4.2 电化学阻抗图谱

图5是2024铝合金经不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的电化学阻抗谱,表5是不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的低频阻抗模值。其中,图5(a)为经多巴胺改性后制备的APZ膜的Nyquist图,该膜层容抗弧半径明显增大,表明利用多巴胺对基体进行改性后制备APZ膜层可提升铝合金耐蚀性。图5(b)为多巴胺改性后制备的APZ膜层的Bode图,与铝合金相比,制备的APZ膜层的低频阻抗模值 $|Z|_{0.01\text{Hz}}$ 增加,表明制备APZ膜层后铝合金耐蚀性能增加,且与上述极化曲线和Nyquist图的结果是一致的。图5(c)为预制LDH模板后制备的ALZ膜层的Nyquist图,在铝合金表面制备AL膜层和ALZ膜层后与铝合金相比,制备膜层后的容抗弧半径增大,表明采用预制LDH模板制备ZIF-8膜层的方式能有效提高铝合金基体的耐蚀性能。图5(d)为预制LDH模板后制备的ALZ膜层的Bode图,铝合金表面制备LDH膜层后,膜层的低频阻抗模值增大,且采用LDH膜层作为模板制备ZIF-8膜层后,膜层的低频阻抗模值与LDH膜层相比进一步增大,达到 $8.79 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,其低频阻抗模值与AL膜层相比增



(a) APZ膜层



(b) ALZ膜层

图4 不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of ZIF-8 films prepared after different surface modification

表4 不同表面改性后制备的ZIF-8膜层的电化学拟合参数

Tab.4 Electrochemical fitting parameters of ZIF-8 films prepared after different surface modification

试样	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$i_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
2024 Al	-0.63	$1.78 \times 10^{-6}$
AP	-0.61	$4.49 \times 10^{-7}$
APZ	-0.62	$4.92 \times 10^{-7}$
AL	-0.76	$3.27 \times 10^{-7}$
ALZ	-0.69	$1.32 \times 10^{-7}$

大半个数量级,较铝合金基体的低频阻抗模值增加1个数量级,进一步表明采用预制LDH模板制备ZIF-8膜层的方式可以有效提高铝合金的耐蚀性能。

采用多巴胺处理基体后制备的膜层的低频阻抗模值为 $1.29 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,虽然膜层耐蚀性能提高,但膜层生长不连续;采用预制LDH模板后制备的膜层的低频阻抗模值与其相近,制备的膜层连续致密。

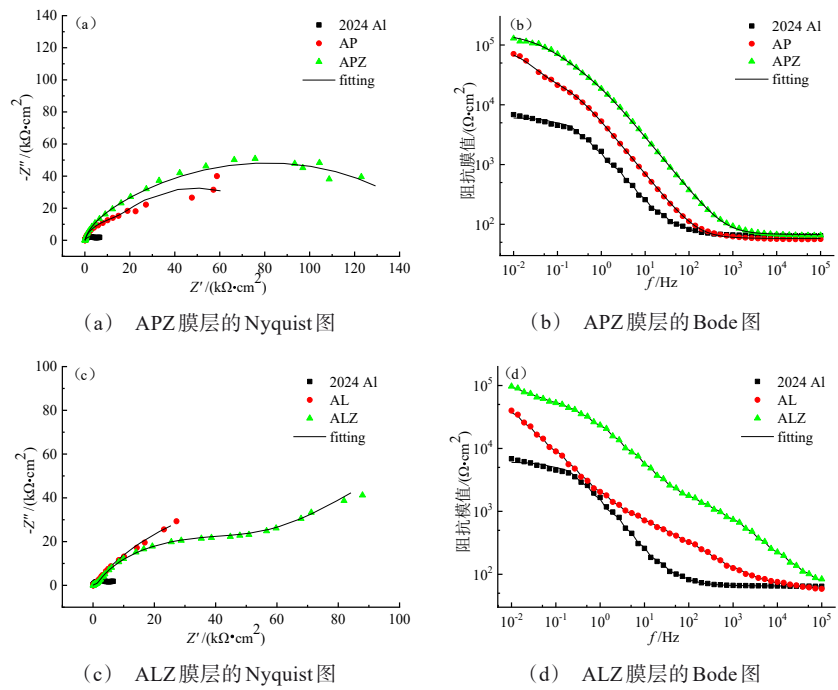


图 5 不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的电化学阻抗图谱

Fig.5 Electrochemical impedance spectra of ZIF-8 films prepared after different surface modification

表 5 不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的低频阻抗膜值  
Tab.5 Low frequency impedance film values of ZIF-8 films prepared after different surface modifications

试样	$ Z _{0.01\text{Hz}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
2024 Al	$5.98 \times 10^3$
AP	$6.04 \times 10^4$
APZ	$1.29 \times 10^5$
AL	$2.54 \times 10^4$
ALZ	$8.79 \times 10^4$

图 6 为交流阻抗图谱的拟合等效电路图,表 6 为其相对应的拟合结果。图 6(a)是铝合金的拟合等效电路图,图 6(b)是不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的拟合等效电路图。其中  $R_s$  为溶液电阻,  $Q_f$  为常相位角元件,  $R_f$  为对应的膜层电阻;  $Q_{dl}$  为膜基界面双电层对应的常相位角元件,  $R_{ct}$  表示膜基界面的电荷转移电阻,而经多巴胺改性和预制 LDH 模板两种方式制备的 ZIF-8 膜层的  $R_{ct}$  较铝合金相比,均有明显提升,表明其发生腐蚀的可能性变小,提升了金属基体的防护性能。

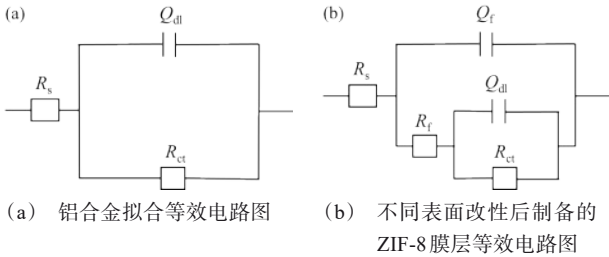


图 6 交流阻抗图谱的拟合等效电路图

Fig.6 Fitting equivalent circuit diagram of electrochemical impedance spectra

表 6 不同表面改性后制备的 ZIF-8 膜层的拟合结果

Tab.6 Fitting results of ZIF-8 films prepared after different surface modification

试样	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
2024 Al	65.14	—	—	$1.26 \times 10^{-4}$	$6.09 \times 10^3$
AP	57.90	$3.51 \times 10^{-5}$	$2.91 \times 10^4$	$1.28 \times 10^{-4}$	$5.67 \times 10^4$
APZ	67.49	$8.43 \times 10^{-6}$	$4.12 \times 10^4$	$1.69 \times 10^{-5}$	$1.18 \times 10^5$
AL	61.01	$5.06 \times 10^{-5}$	$9.08 \times 10^2$	$8.71 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^5$
ALZ	48.04	$3.09 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^3$	$5.83 \times 10^{-6}$	$5.36 \times 10^4$

### 3 结论

(1)采用多巴胺对基体改性后制备 ZIF-8 膜层 (APZ),其中,多巴胺改性有利于 ZIF-8 在铝合金表面形核生长,但制备的 ZIF-8 膜层并不连续,只是 ZIF-8 晶粒在铝合金表面生长。

(2)采用铝合金表面预生长 LDH 模板后制备 ZIF-8 膜层 (ALZ),其中,LDH 膜层可提供锌离子作为 ZIF-8 膜层生长的成核位点,其制备的膜层由 LDH 的片层结构变为棱镜型结构,且存在两种形貌,即平整表面形貌区和凸起表面形貌区,其表面凸起部分制备的膜层更加致密。

(3)采用多巴胺改性制备的 ZIF-8 膜层的低频阻抗模值与铝合金相比,提升了 1 个数量级,达到  $1.29 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,提升了铝合金的耐蚀性能;采用预制 LDH 模板制备的 ZIF-8 膜层的低频阻抗模值达到  $8.79 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,与铝合金相比,也提升了 1 个数量级。相较而言,采用预制 LDH 模板制备 ZIF-8 膜层的方式更可取,其制备的膜层比采用多巴胺改性制备的 ZIF-8 膜更加连续致密,同时此方式也可提升铝合金的防护性能。

### 参考文献

- [1] 林钢,林慧国,赵玉涛. 铝合金应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 杨冠华,王洪涛,张鲲,等. 施镀工艺对铝合金化学镀镍的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(11): 55-61, 93.
- [3] 赵华星,孙晓峰,宋巍,等. 微弧氧化技术在铝合金腐蚀防护中的应用研究与发展[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21236-21242.
- [4] 郭蓓,李冬冬,束俊杰,等. 铝合金表面化学转化膜制备技术的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(9): 106-113.
- [5] 李莹,林雨,孙晓英,等. MOF 复合材料的制备及应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(3): 6-9, 13.
- [6] 秦茜,孙玉绣,王乃鑫,等. 表面修饰在 MOF 薄膜制备中的应用[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1306-1315.
- [7] 丁锐. 纳米 ZIF-8 的尺度调控及其混合基质膜的  $\text{CO}_2$  分离性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [8] 康杰. ZIF-8 的制备及其性能研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2021.
- [9] Li J, Yan M D, Yan Y, et al. Recent advances of metal-organic frameworks in corrosion protection: from synthesis to applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 430: 132823.
- [10] 陈怀银. 金属有机骨架材料在海洋腐蚀检测与防护中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2019.
- [11] Seyed M L, Hossain Y, Mohammad M, et al. Application of nanoporous cobalt-based ZIF-67 metal-organic framework (MOF) for construction of an epoxy-composite coating with superior anti-corrosion properties[J]. Corrosion Science, 2021, 178: 109099.
- [12] Duan S, Dou B J, Lin X Z, et al. Influence of active nanofiller ZIF-8 metal-organic framework (MOF) by microemulsion method on anticorrosion of epoxy coatings [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 624: 126836.
- [13] Dangwal S, Ronte A, Kim S J, et al. ZIF-8 membranes supported on silicalite-seeded substrates for propylene/propane separation[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 626: 119165.
- [14] Ma K, Wang N X, Wang C C, et al. Freezing assisted in situ growth of nano-confined ZIF-8 composite membrane for dye removal from water[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 632: 119352.
- [15] 张玉圣,王友彬,李纯民,等. 6061 铝合金表面 ZnAl-LDHs 层的制备及其耐腐蚀性能[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1417-1427.
- [16] Lai, Zhi P, Wang, et al. ZIF-8 membranes with improved reproducibility fabricated from sputter-coated ZnO/alumina supports[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 141(17): 119-124.
- [17] Xu T, Zhao Y, Hu J M, et al. Composite nanocontainers synthesized by in-situ growth of metal organic frameworks on layered double hydroxides having both passive and active protecting capabilities[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 164: 106695.
- [18] Hiroki K, Yuta N, Kousuke Y, et al. Surfactant-assisted synthesis of nanocrystalline zeolitic imidazolate framework 8 and 67 for adsorptive removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous solution[J]. Catalysis Today, 2020, 352: 220-226.
- [19] 陈凌云. 基于 ZIF-8 新型复合材料的制备、表征及吸附性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2015.
- [20] Jyh J B, Jit K L, Eng P N, et al. Synthesis and size control of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8): From the perspective of reaction kinetics and thermodynamics of nucleation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 216: 393-401.