

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181128.001

聚吡咯/聚多巴胺的电化学合成及其对铝合金耐蚀性的影响

聂铭¹, 黄丰¹, 王珍高², 付如民², 宁成云^{*2}

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510641)

摘要: 为了提高铝合金有机涂层的耐蚀性, 通过电化学方法在 7075 铝合金表面制备了海岛结构的聚吡咯(PPy)/聚多巴胺(PDA)复合涂层, 利用 FE-SEM、原子力显微镜、FTIR 分析了 PPy/PDA 涂层的表面形貌、表面粗糙度和化学成分, 并通过交流阻抗图谱分析了涂层的阻抗特性, 通过极化曲线分析了具有 PPy/PDA 涂层的铝合金的极化电压和极化电流, 研究其耐蚀特性。结果显示, 通过一步法电化学聚合方法, 吡咯和多巴胺在铝合金表面同时发生电化学聚合, 生成 PPy/PDA 复合涂层, PPy/PDA 涂层具有海岛结构, 纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的粗糙度分别是 $(74.582 \pm 7.227) \text{ nm}$ 和 $(73.740 \pm 7.811) \text{ nm}$ 。交流阻抗和极化曲线说明 PPy/PDA 涂层相比于纯 PPy 涂层具有更大的阻抗力, PPy/PDA 涂层的腐蚀电流和腐蚀电压分别是 $4.1825 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 -0.6919 V , 相对于纯 PPy(腐蚀电流和腐蚀电压分别是 $7.618 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 -0.7403 V)具有更好的防腐特性。

关键词: 聚吡咯(PPy); 聚多巴胺(PDA); 涂层; 铝合金; 防腐; 电化学聚合

中图分类号: TB332; O69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)10-2364-07

Electrochemical synthesis of polypyrrole/polydopamine for aluminum alloy corrosion inhibition

NIE ming¹, HUANG Feng¹, WANG Zhen'gao², FU Rumin², NING Chengyun^{*2}

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid CO., LTD. Guangzhou 510080, China;

2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Polypyrrole(PPy)/polydopamine(PDA) coating was prepared on the surface of 7075 aluminum alloy through electrochemical polymerization to improve the corrosion resistance of aluminum alloy organic coatings. FE-SEM, atomic force microscope and FTIR were used to analyze the surface morphology, surface roughness and chemical composition of PPy/PDA coating, respectively. AC impedance spectroscopy was applied to study the impedance characteristics of the coating. The polarization voltage and polarization current of the aluminum alloy coated with PPy/PDA were analyzed by polarization curves to study the corrosion resistance. The research shows that pyrrole and dopamine simultaneously electrochemically polymerize on the aluminum alloy surface by one-step electrochemical polymerization. PPy molecular chains and PDA molecular chains form network interpenetrating structure. PPy/PDA coating has a sea-island structure with a surface roughness of $(73.740 \pm 7.811) \text{ nm}$, which is close to the roughness of the pure PPy coating $(74.582 \pm 7.227) \text{ nm}$. The polarization curves indicate that the corrosion current and corrosion voltages of the coated PPy/PDA coating are $4.1825 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and -0.6919 V , respectively. And the corrosion current and corrosion voltages of the pure PPy are $7.618 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and -0.7403 V , respectively.

收稿日期: 2018-09-11; 录用日期: 2018-10-17; 网络出版时间: 2018-11-30 14:15

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181128.001>

基金项目: 国家自然科学基金(5172106); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM00000017)

通讯作者: 宁成云, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为金属材料表面改性 E-mail: imcnying@scut.edu.cn

引用格式: 聂铭, 黄丰, 王珍高, 等. 聚吡咯/聚多巴胺的电化学合成及其对铝合金耐蚀性的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2364-2370.

NIE Ming, HUANG Feng, WANG Zhen'gao, et al. Electrochemical synthesis of polypyrrole/polydopamine for aluminum alloy corrosion inhibition[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2364-2370 (in Chinese).

Keywords: polypyrrole(PPy); polydopamine(PDA); coating; aluminum alloy; anti-corrosion; electrochemical polymerization

金属腐蚀是导致电力运输、航空航天和汽车行业巨大经济损失的主要问题^[1-2]。Al 及其合金由于其良好的延展性、优异的导电性和催化活性已被广泛用于工业领域^[3-5]。通常,Al 表面可以在干燥的环境中形成薄的自然氧化层,以防止进一步的腐蚀^[6]。但是在恶劣环境下(如含卤化物的溶液),Al 会发生局部腐蚀,氧化膜的防护效果失效^[7]。因此,研究者开发了大量的腐蚀防护措施。其中,有机涂层防腐是最有效的措施之一。研究报道通过沉积聚苯胺/TiO₂ 涂层,AA3105 的耐蚀性得到了增强,这是由于聚苯胺/TiO₂ 涂层致密,阻止了酸碱腐蚀表层,起到防腐的作用^[8]。有报道指出,通过电化学聚合方法,在 Al 表面合成的聚苯胺涂层将腐蚀电流密度降低至少 15 倍,起到保护铝基材的作用^[9]。聚吡咯(PPy)具有易合成、导电率高、稳定性好等优点,被广泛应用于金属的防腐^[10-12]。Martins 等^[13]在酒石酸和吡咯的水溶液中,在铝表面电化学聚合得到 PPy 膜,通过极化曲线研究了 PPy 膜的防腐蚀性能。同时,PPy 广泛应用于其他金属的防腐。Van 等^[14]将纳米硅颗粒掺杂于 PPy 用于碳钢的腐蚀保护。Jaouhari 等^[15]通过调控电化学合成工艺在不锈钢表面合成了 PPy 防腐涂层,该涂层能有效地防护金属基材。

目前的 PPy 复合涂层主要选用无机纳米颗粒或者小分子作为掺杂剂,存在制备工艺较复杂、成本较高和应用困难等缺点。PPy 复合涂层研究的关键之一是掺杂剂的选择。本文选取了多巴胺作为聚合原料之一,在铝合金表面制备了 PPy/聚多巴胺(PDA)复合涂层。多巴胺已被证明是一种有效的黏合剂分子,它可以附着到几乎所有的材料表面,形成稳定的 PDA 涂层,在许多领域具有广泛应用^[16-17]。PDA 交联网络结构可以增强力学性能和稳定性^[18]。多巴胺能发生电化学聚合生成 PDA。因此,在一定条件下,吡咯和多巴胺可以同时进行电化学聚合生成 PPy/PDA 复合物。PPy 分子链和 PDA 分子链之间形成互穿网络结构,其力学强度和致密度得到提高,涂层内部的缺陷减少。

基于研究结果,本文通过电化学沉积方法在铝合金表面制备了 PPy/PDA 复合涂层,通过扫描

电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)研究了涂层的表面形貌,傅里叶红外光谱(FTIR)研究了涂层的化学成分,通过电化学交流阻抗(EIS)和极化曲线分别研究了涂层的阻抗特性和耐蚀特性。结果表明,PPy/PDA 涂层能有效地保护铝合金基材,具有较强的耐蚀特性。本研究将大分子 PDA 分子链掺杂于 PPy,形成网络互穿结构,抑制腐蚀离子渗透涂层,能有效地保护金属基材,为有机耐蚀涂层的制备和研究提供技术和理论依据。

1 实验材料及方法

1.1 PPy/PDA 复合涂层的制备

首先,用 600[#](23 μm)、1000[#](13 μm)和 1500[#](10 μm)砂纸逐级打磨 7075 铝合金(0.5 mm×40 mm×40 mm)表面,除去表面的氧化层,再用乙醇、丙酮超声清洗材料,待用。然后,在铝合金表面喷金,喷金时间 90 s。最后,选用三电极模式,铂电极为对电极、喷金处理的 7075 铝合金为工作电极、饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,电解质为溶解 0.2 mol/L 的吡咯和 0.1 mol/L 的多巴胺的缓冲溶液;采用电化学工作站(Zennium, zahner, 德国)的恒压模式控制电化学反应,反应电压为 0.6 V,反应时间为 20 min,在 7075 铝合金表面沉积 PPy/PDA 复合涂层。同时,以纯吡咯作为对照组。制备方法如下:将 0.2 mol/L 的吡咯溶解于 0.2 mol/L 的盐酸溶液中,该溶液作为电解质,其他条件不变,在喷金的铝合金表面沉积纯聚吡咯(pure PPy)涂层。

1.2 性能表征

分别采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, Merlin, 德国)和原子力显微镜(AFM, Shimadzu SPM-9600, 日本)表征材料的表面形貌和表面粗糙度。通过傅里叶红外光谱(FTIR, Bruker VER-TEX 33, 德国)表征涂层的化学成分。选用三电极模式进行电化学测试,电解质溶液为质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液,SCE 为对参比电极,铂电极为对电极,待测样品为工作电极。通过交流阻抗图谱(EIS)研究涂层的阻抗性质,频率范围为 10⁵~10⁻¹ Hz。通过极化曲线研究涂层的耐蚀性,测试扫描范围为-1.0~0 V,扫描速度为 1.5 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层表面微观形貌

图 1 是纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的 FE-SEM 图像和 AFM 图像。可见，在铝合金表面通过电化学方法构建了纯 PPy 和 PPy/PDA 防腐涂层。纯 PPy 表面形貌是经典的菜花状结构，Bazzaoui 等^[19]也通过电化学方法制备了相似的结构的 PPy 涂层。PPy/PDA 涂层的表面似海岛结构，与纯 PPy 表面相比更致密。AFM 结果与 FE-SEM 结果一致。纯 PPy 涂层粗糙度为 $(74.582 \pm 7.227) \text{ nm}$ ，而 PPy/PDA 复合涂层的粗糙度为 $(73.740 \pm 7.811) \text{ nm}$ ，这两个涂层的粗糙度相近。一般地，表面粗糙度对浸泡初期有一定的影响，而浸泡后期主要受腐蚀产

物的控制。图 2 是纯 PPy 和 PPy/PDA 防腐涂层截面的 FE-SEM 图像。可见，纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层厚度分别为 $(3.37 \pm 0.33) \text{ }\mu\text{m}$ 和 $(3.52 \pm 0.30) \text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 铝合金表面纯 PPy 和 PPy/PDA 的结构

图 3 是纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的红外吸收光谱。可见，PPy/PDA 涂层的位于 $3\,100 \sim 3\,600 \text{ cm}^{-1}$ 的宽吸收峰是 PDA 的 O—H 伸缩振动峰^[20]，位于 $2\,978 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,931 \text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,853 \text{ cm}^{-1}$ 处的 3 个吸收峰对应于吡咯环和苯环上的 C—H 伸缩振动峰，位于 $1\,719 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰归因于 PPy 过氧化生成的 C=O 官能团^[21]，PPy/PDA 涂层在 $1\,576 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰归因于 PDA 分子的部分领

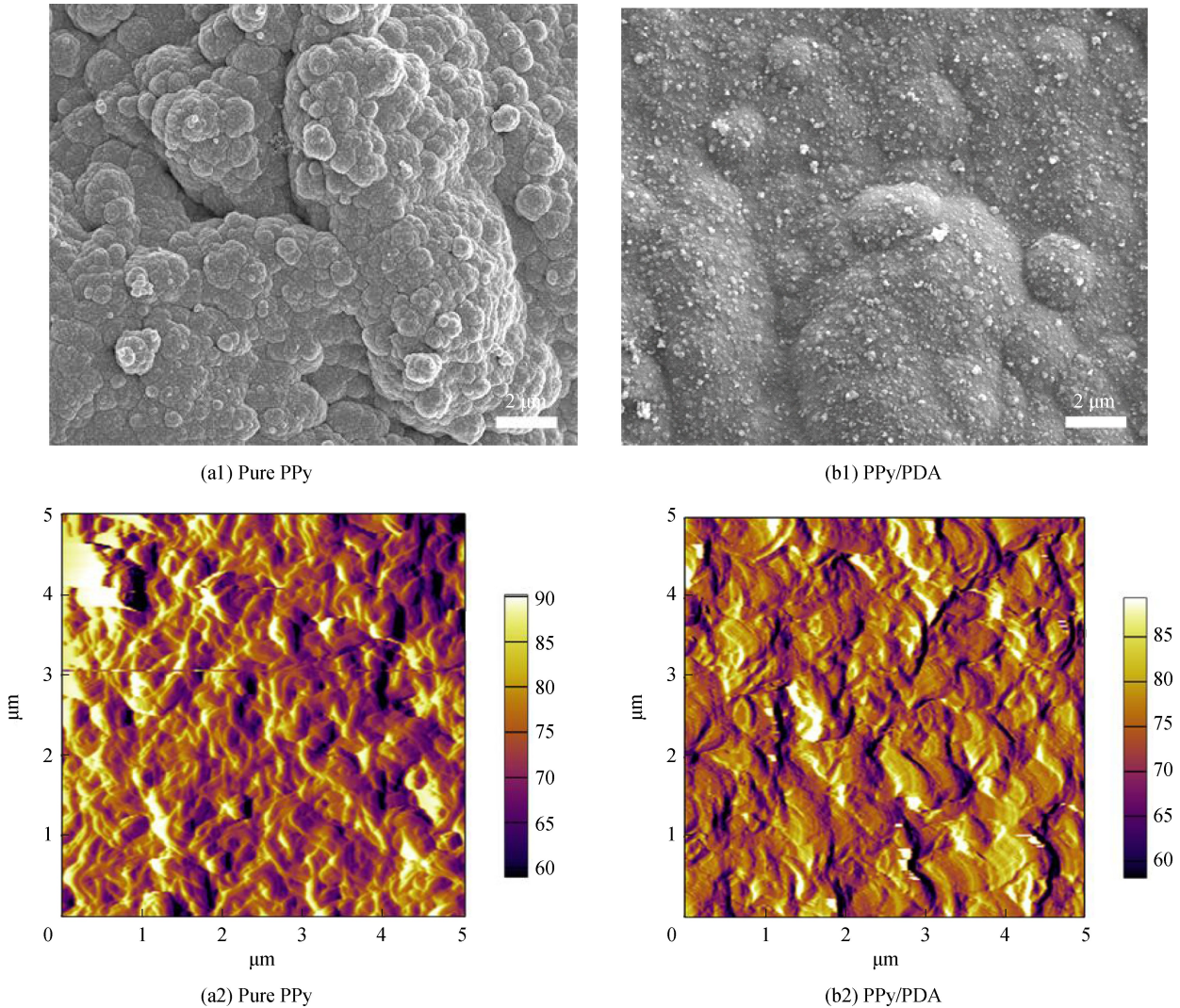


图 1 铝合金表面电化学沉积的聚吡咯(PPy)及其聚吡咯/聚多巴胺(PPy/PDA)防腐涂层的 FE-SEM 图像和 AFM 图像
Fig. 1 FE-SEM images and AFM images of an electrochemically deposited polypyrrole(PPy)
anticorrosive coating on an aluminum alloy surface and polypyrrole/polydopamine(PPy/PDA) coating

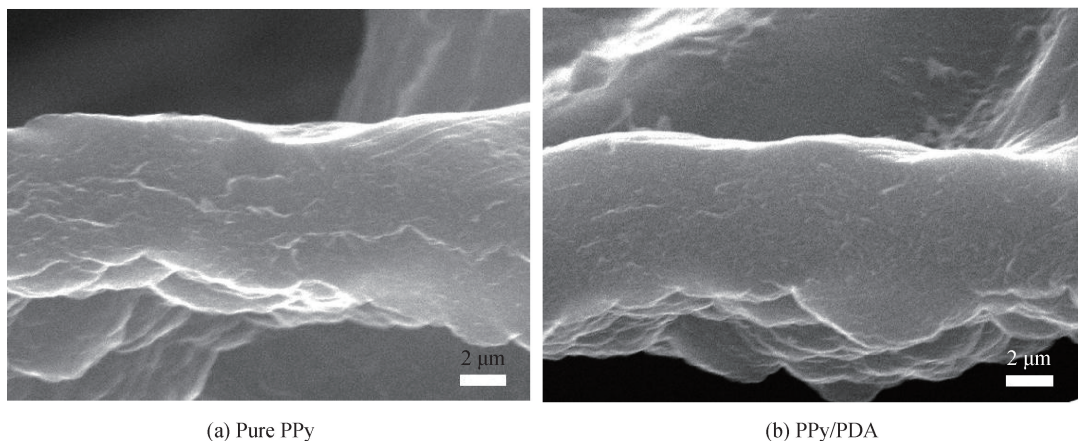


图 2 铝合金表面电化学沉积的 PPy 和 PPy/PDA 防腐涂层截面的 FE-SEM 图像
Fig. 2 FE-SEM images of cross section of electrochemically deposited PPy and PPy/PDA anticorrosive coating on aluminum alloy surface

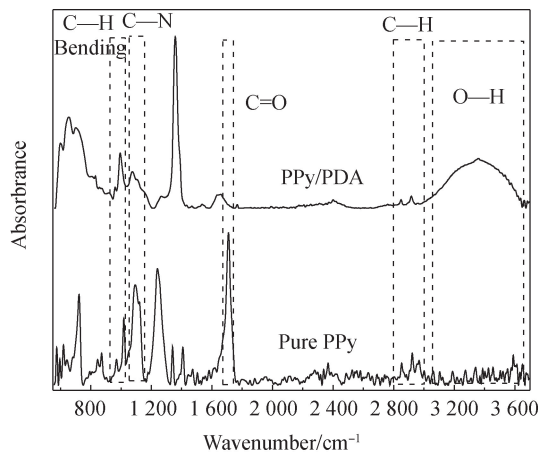


图 3 铝合金表面纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的 FTIR 图谱
Fig. 3 FTIR spectra of pure PPy and PPy/PDA coatings on aluminum alloys

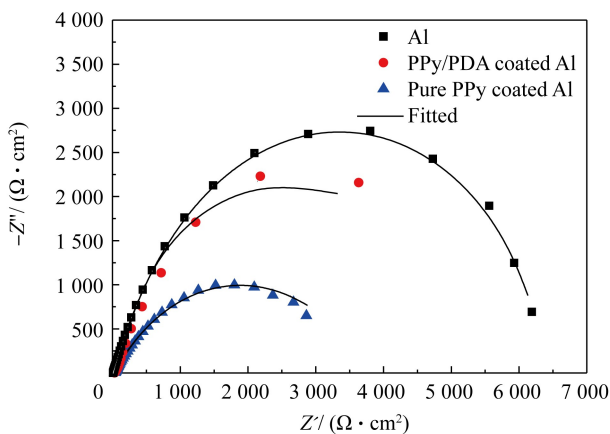


图 4 裸 Al 片、纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的
电化学交流阻抗曲线
Fig. 4 Electrochemical impedance spectroscopy of bare Al pure PPy and PPy/PDA coatings

苯酚羟基氧化生成醌基^[22], 1 080 cm^{-1} 处的吸收峰是吡咯环上的 C—N 振动吸收峰, 975 cm^{-1} 处的吸收峰是 C—H 弯曲振动峰^[23]。化学成分分析结果显示, 吡咯单体和多巴胺单体同时进行电化学聚合生成 PPy/PDA 涂层, 沉积在铝合金表面 PPy 分子链和 PDA 分子链可能形成网络互穿结构。

2.3 PPy/PDA 的交流阻抗

裸铝合金、纯 PPy 涂层的铝合金 (pure PPy coated Al) 和 PPy/PDA 涂层的铝合金 (PPy/PDA coated Al) 材料在 3.5% NaCl 溶液浸泡 48 h 后的电化学交流阻抗图谱如图 4 所示。为了更好地解释涂层的防护作用, 采用 ZsimpWin 软件拟合交流阻抗曲线, 其等效电路图如图 5 所示。具体地, $R(Q$

(WR))模型用于模拟裸 Al 片的电化学交流阻抗曲线, $R(Q(RW))(CR)$ 模型用于模拟 PPy 涂层的电化学交流阻抗曲线。采用标准偏差(χ^2)评估拟合的可靠性, 裸铝合金、纯 PPy 涂层的铝合金和 PPy/PDA 涂层的铝合金模拟的卡方 χ^2 分别是 5.29×10^{-4} 、 4.52×10^{-4} 和 9.6×10^{-4} , 都在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$, 表明该模拟合理。模拟结果见表 1。在 PPy 涂层改性的铝合金涂层的等效电路中, R_s 代表溶液电阻, R_{ct} 是电荷转移阻抗, C_{dl} 代表电解质与基底之间的双电层的容抗, R_f 是保护层的电阻。时间常量($Q_f(R_fW)$)反应扩散过程, 包括腐蚀性反应物或腐蚀产物的半无限扩散过程。没有涂层的铝合金的交流阻抗图谱呈现一个半圆, 表明电荷传递发生在电解质/溶液界面处。PPy/PDA 涂层的电荷转移

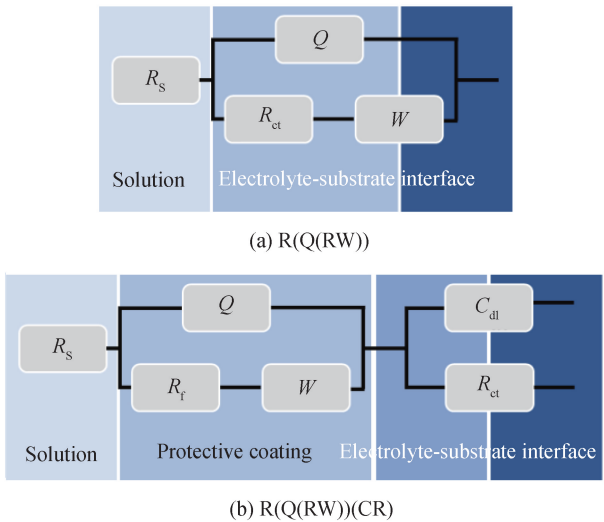


图 5 等效电路图
Fig. 5 Equivalent circuit

阻抗 R_{ct} 是 $3\,975\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，相比于纯 PPy 涂层 ($4.75\,\Omega\cdot\text{cm}^2$) 具有相当大的阻抗，同时，PPy/PDA 涂层的电阻 R_f 比纯 PPy 涂层要高，说明电荷越难通过 PPy/PDA 涂层，其耐蚀性越好。这是由于 PPy 分子链和 PDA 分子链之间形成网络互穿结构，与纯 PPy 涂层比较，PPy/PDA 涂层具有更大阻抗。

2.4 裸 Al 片、纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的极化曲线

图 6 为不同样品在 3.5% NaCl 浸泡 30 min 后的极化曲线。根据极化曲线，采用直线外推法计算出腐蚀电位 (φ_{corr} (vs SCE)/V) 和腐蚀电流 (J_{corr} ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$))，如表 2 所示。结合图 6 和表 2 可知，

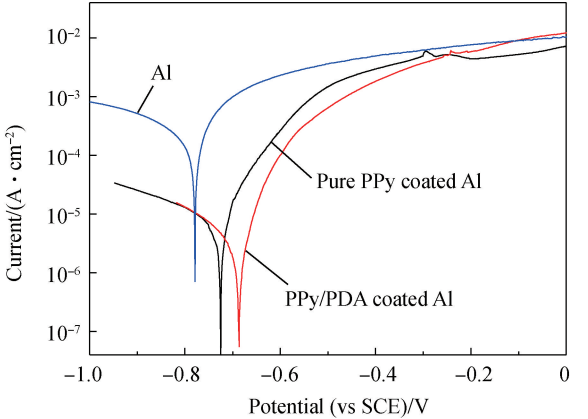


图 6 裸 Al 片、纯 PPY 和 PPY/PDA 涂层的 Tafel 曲线
Fig. 6 Tafel curves of bare Al, pure PPY and PPY/PDA coatings

与裸铝合金相比，具有 PPy 涂层铝合金的腐蚀电位向正移，腐蚀电流减小，因此 PPy 能有限地起到防腐作用。同时 PPy/PDA 涂层的腐蚀电位为 -0.6919 V ，比纯 PPy 涂层的腐蚀电位 (-0.7403 V) 高，正移 0.0484 V 。PPy/PDA 涂层的腐蚀电流为 $4.1825\times10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，比纯 PPy 涂层的腐蚀电流 ($7.618\times10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$) 低，是裸铝合金的 $1/75$ ，具有很强的防腐特性。总之，与纯 PPy 比较，PPy/PDA 涂层具有更强的防腐特性。同时，根据 ASTM 的腐蚀速率和相关信息计算的标准实施规程^[24]，通过以下方程计算每个样品的腐蚀速率 (R_C):

$$R_C = [3272 I_{\text{corr}} (W_E)] / A d \tag{1}$$

其中： R_C 表示腐蚀速率 (mm/y)； I_{corr} 为腐蚀电流 (A/cm^2)； W_E 为氧化元素的当量 (g)； A 为样品的

表 1 裸 Al 片、纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的电化学阻抗参数

Table 1 Electrochemical impedance parameters of bare Al, pure PPY and PPY/PDA coatings						
Simple	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Q\text{-}Y_0/(10^{-4}\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{S}^n)$	$Q\text{-}n$	$C_{dl}/(\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_f/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
Bare Al	18.200	7493	0.2546	0.7853	—	—
Pure PPY	10.201	4.75	0.5877	0.7283	8.89×10^{-8}	3 712
PPY/PDA	9.228	3 975	40.25	0.7807	2.61×10^{-3}	4 471

Notes: R_s , R_f , R_{ct} —Solution resistance, charge transfer resistance and the resistance of the inhibitor-adsorption layer, respectively; C_{dl} —Constant phase element; $Q\text{-}Y_0$, $Q\text{-}n$ —To described Q_f , which is the CPE of the layer.

表 2 Tafel 测试曲线计算的裸 Al 片、纯 PPy 和 PPy/PDA 涂层的极化电压和极化电流

Table 2 Polarization voltage and polarization of bare Al, pure PPY and PPY/PDA coatings current calculated from the Tafel test curve				
Simple	φ_{corr} (vs SCE)/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_C/(\text{mm}\cdot\text{y}^{-1})$	$R_p/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
Bare Al	-0.7929	3.018×10^{-4}	0.336	340.51
Pure PPY	-0.7403	7.618×10^{-6}	0.084	1 250.47
PPY/PDA	-0.6919	4.1825×10^{-6}	0.046	2 494.86

Notes: φ_{corr} , J_{corr} —Corrosion potential and corrosion current; R_C , R_p —Corrosion rate and polarization impedance.

表面积(cm^2); d 为样品密度(g/cm^3)。7075 铝合金的氧化元素当量为 $9.58 \text{ g}^{[24]}$, 密度为 $2.81 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。公式计算得出裸铝合金、电镀纯 PPy 涂层的铝合金和电镀 PPy/PDA 涂层的铝合金的腐蚀速率分别为 0.336 、 0.084 和 $0.046 \text{ mm}/\text{y}$ 。因此, PPy/PDA 能有效地降低铝合金的腐蚀速率。另一方面, 极化阻抗 R_p 可以通过下式计算:

$$R_p = B_a b_c / 2.3 I_{\text{corr}} (b_a + b_c) \quad (2)$$

其中: R_p 表示极化阻抗($\Omega \cdot \text{cm}^2$); I_{corr} 是腐蚀电流密度; b_a 和 b_c 分别是 Tafel 曲线阳极和阴极部分的斜率(V/d_{ec})。公式的计算结果见表 2。纯 PPy 涂层和 PPy/PDA 涂层的极化阻抗分别是裸铝合金的 3.6 倍和 7.3 倍。极化曲线测试的极化阻抗值与电化学交流阻抗曲线模拟结果存在差别, 主要是由于电极反应受到界面扩散、表面离子吸附等变量的影响。PPy 和基材之间的电流相互作用促进了氧化膜的稳定性, 很好地抑制了基材的腐蚀。

3 结 论

(1) 通过电化学方法, 吡咯单体和多巴胺单体在 7075 铝合金表面同时发生聚合反应生成了聚吡咯/聚多巴胺(PPy/PDA)复合涂层。

(2) PPy/PDA 复合涂层表面致密, 其微观形貌类似于海岛结构。PPy/PDA 涂层的表面粗糙度和纯 PPy 的相近。

(3) 由于 PPy 高分子链和 PDA 高分子链之间形成网络互穿结构, PPy/PDA 复合涂层的阻抗相对于纯 PPy 涂层较大, 能很好地阻止氯离子等穿透涂层腐蚀基底。

(4) 极化曲线结果说明, PPy/PDA 涂层相对于纯 PPy 具有更好的耐蚀性, 能更好地防止铝合金腐蚀。

参考文献:

[1] 马厚义, 崔聪颖, 陈婷. 金属腐蚀与防护简谈[J]. 电化学, 2011, 17(3): 288-291.
MA Houyi, CUI Congying, CHEN Ting. Brief introduction to metal corrosion and protection[J]. Electrochemistry, 2011, 17(3): 288-291 (in Chinese).
[2] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 94-99.
MU Weiyi, LI Zhengxian, DU Jihong, et al. Research progress of ceramic coatings formed on aluminum alloys by micro-arc oxidation[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 94-99 (in Chinese).

[3] LEE Woo, PARK Sangjoon. Porous anodic aluminum oxide: Anodization and templated synthesis of functional nanostructures[J]. Chemical Reviews, 2014, 114 (15): 7487-7556.
[4] ZHOU L N, ZHANG C, MCCLAIN M J, et al. Aluminum nanocrystals as a plasmonic photocatalyst for hydrogen dissociation[J]. Nano Letters, 2016, 16 (2): 1478-1484.
[5] ALEZI Dalal, BELMABKHOUT Youssef, SUYETIN Mikhail, et al. MOF crystal chemistry paving the way to gas storage needs: Aluminum-based soc-MOF for CH_4 , O_2 and CO_2 storage[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(41): 13308-13318.
[6] NGAI Sieglind, NGAI Tungwai, VOGEL Florian, et al. Saltwater corrosion behavior of cold sprayed AA7075 aluminum alloy coatings[J]. Corrosion Science, 2018, 130: 231-240.
[7] GABALLAH Soha, SHEHATA Nader, SHAABAN Mohamed, et al. Corrosion inhibition of aluminum in Hydrochloric acid solution using ceria doped polyvinyl chloride nanofiber [J], International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12(2): 1094-1105.
[8] ZUBILLAGA O, CANO F J, AZKARATE I. corrosion performance of anodic films containing polyaniline and TiO_2 nanoparticles on AA3105 aluminium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(24): 5936-5942.
[9] GVOZDENOVIC M M, GRGUR B N. Electrochemical polymerization and initial corrosion properties of polyaniline-benzoate film on aluminum[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 65(3): 401-404.
[10] LEHR I L, SAIDMAN S B. Characterisation and corrosion protection properties of polypyrrole electropolymerised onto aluminium in the presence of molybdate and nitrate[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(16): 3249-3255.
[11] YANG L H, WAN Y X, QIN Z L, et al. Fabrication and corrosion resistance of a graphene-tin oxide composite film on aluminium alloy 6061[J]. Corrosion Science, 2018, 130: 85-94.
[12] HUSSEIN M A, AL-JUAID S S, ABU-ZIED B M, et al. Electrodeposition and corrosion protection performance of polypyrrole composites on aluminum[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11: 3938-3951.
[13] MARTINS J I, COSTA S C, BAZZAOU M, et al. Electrodeposition of polypyrrole on aluminium in aqueous tartaric solution[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51 (26): 5802-5810.
[14] VAN V T H, HANG T T X, NAM P T, et al. Synthesis of silica/polypyrrole nanocomposites and application in corrosion protection of carbon steel[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2018, 18(6): 4189-4195.
[15] ZHANG L, LIU S, HAN H, et al. Studies on the formation process and anti-corrosion performance of polypyrrole film

deposited on the surface of Q235 steel by an electrochemical method[J]. Surface and Coatings Technology Volume, 2018, 341: 95-102.

[16] 徐又一, 蒋金泓, 朱利平, 等. 多巴胺的自聚-附着行为与膜表面功能化[J]. 膜科学与技术, 2010, 31(3): 32-28.

XU Youyi, JIANG Jinhong, ZHU Liping, et al. Self-polymerization-adhesion behavior of dopamine and surface functionalization of membranes[J]. Membrane Science and Technology, 2010, 31(3): 32-28 (in Chinese).

[17] LIU Yanlan, AI Kelong, LU Lehui. Polydopamine and its derivative materials: Synthesis and promising applications in energy, environmental, and biomedical fields[J]. Chemical Reviews, 2014, 114(9): 5057-5115.

[18] OU Junfei, WANG Jinqing, ZHOU Jinfang, et al. Construction and study on corrosion protective property of polydopamine-based 3-layer organic coatings on aluminum substrate[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 68(3): 244-247.

[19] BAZZAoui M, MARTINS J I, BAZZAoui E A, et al. Sweet aqueous solution for electrochemical synthesis of polypyrrole part 1B: On copper and its alloys[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(11): 3568-3581.

[20] ZHANG W, YANG F K, PAN Z H, et al. Bio-inspired dopamine functionalization of polypyrrole for improved adhesion and conductivity[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2014, 35(20): 350-354.

[21] 陈俊祺, 廖景文, 周正难, 等. 导电聚吡咯纳米线的电化学无模板法可控合成与表征[J]. 中国科学: 化学, 2014, 44(10): 1570-1575.

CHEN Junqi, LIAO Jingwen, ZHOU Zhengnan, et al. Template-free electrochemical controllable fabrication and characterization of conducting polypyrrole nanowires[J]. Scientia Sinica Chimica, 2014, 44(10): 1570-1575 (in Chinese).

[22] ZANGMEISTER R A, MORRIS T A, TARLOV M J. Characterization of polydopamine thin films deposited at short times by autoxidation of dopamine[J]. Langmuir, 2013, 29(27): 8619-8628.

[23] WANG Zhen'gao, ZHOU Lei, YU Peng, et al. Polydopamine-assisted electrochemical fabrication of polypyrrole nanofibers on bone implants to improve bioactivity[J]. Macromolecular Materials & Engineering, 2016, 301(11): 1288-1294.

[24] ASTM. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information: ASTM G102—89(2004)[S]. Philadelphia: ASTM, 2004.