

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210628002

聚左旋多巴-SiO₂ 复合材料在 1 M HCl 中的缓蚀作用

魏佳煜^{1,3} 邱诗惠³ 赵海超³ 杨 凤^{1,2}

(1. 沈阳化工大学材料科学与工程学院 沈阳 110142;

2. 沈阳先进涂层材料产业技术研究院有限公司 沈阳 123000;

3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所海洋功能材料实验室 宁波 315201)

摘要: 随着缓蚀剂的广泛应用,传统缓蚀剂对环境和生物的负面影响日益显现,开发高水溶性、健康无毒、绿色环保的高效缓蚀剂成为研究热点。基于纳米胶体 SiO₂ 在水中良好的分散性、无毒等特性,通过左旋多巴(L-DOPA)在纳米胶体 SiO₂ 表面接枝聚合,实现聚左旋多巴(Poly-(L-DOPA))在纳米胶体 SiO₂ 上的负载,制备低细胞毒性、良好分散性的聚左旋多巴-SiO₂ (Poly-(L-DOPA)-SiO₂) 缓蚀剂,并探究 1 M HCl 中 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 对 Q235 碳钢的缓蚀作用。傅里叶红外光谱(FTIR)、紫外可见光吸收光谱(UV-vis)和 X 射线衍射(XRD)结果证实了 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的合成。电化学结果表明,缓蚀效率随 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度的增加而增加,当 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的浓度为 500 mg/L 时,缓蚀效率可以达到 85.9%。添加 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 使极化曲线的阴阳极斜率发生明显改变,说明阳极的金属氧化反应和阴极 O₂/H⁺ 的还原反应均被抑制,是一种混合型抑制剂。扫描电子显微镜(SEM)和激光共聚焦显微镜(CLSM)观察发现, Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 可以在金属表面形成保护膜有效抑制酸性溶液对碳钢的腐蚀。该缓蚀剂以生物质 L-DOPA 为原料,纳米 SiO₂ 为载体,是绿色高效缓蚀剂合成的新思想。

关键词: 纳米胶体 SiO₂; 表面接枝聚合; 聚左旋多巴; 缓蚀剂

中图分类号: TG174

Corrosion Inhibition of Polylevodopa-silica Composite in 1 M HCl

WEI Jiayu^{1,3} QIU Shihui³ ZHAO Haichao³ YANG Feng^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Shenyang Institute of Industrial Technology Co., Ltd for Advanced Coating Materials, Shenyang 123000, China;

3. Marine Functional Materials Laboratory, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: With the wide application of corrosion inhibitors, the negative effects of traditional corrosion inhibitors on environment and biology are becoming more and more obvious. The development of high-efficiency corrosion inhibitors with high water solubility, health, non-toxic and green environmental protection has become a research hotspot. Based on the good dispersibility and non-toxicity of nano colloidal SiO₂ in water, the loading of (Poly-(L-DOPA)) on nanocolloidal SiO₂ is achieved by graft polymerization of levodopa on the surface of nanocolloidal SiO₂. The prepared Poly-(L-DOPA)-SiO₂ corrosion inhibitors have low cytotoxicity and good dispersibility. The corrosion inhibition of Q235 carbon steel is investigated by Poly-(L-DOPA)-SiO₂ in 1 M HCl. Fourier infrared spectroscopy, UV-vis absorption spectroscopy and X-ray diffraction results confirm the synthesis of Poly-(L-DOPA)-SiO₂. The electrochemical results show that the corrosion inhibition efficiency increase with the increase of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ concentration, and the corrosion inhibition efficiency reaches 85.9% when the concentration of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ is 500 mg/L. The addition of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ cause a significant change in the cathodic-anodic slope of the polarization curve, indicating that both the metal oxidation reaction at the anode and the reduction reaction of O₂/H⁺ at the cathode and are

inhibited, which suggests it is a kind of hybrid inhibitor. Scanning electron microscopy and laser confocal microscopy observe that Poly-(L-DOPA)-SiO₂ forms a protective film on the metal surface and effectively inhibits the corrosion of carbon steel by acidic solution. The corrosion inhibitor takes biomass L-DOPA as raw material and nano SiO₂ as carrier, which provides a new idea for the synthesis of green and efficient corrosion inhibitor.

Keywords: nano colloidal silica; surface grafting polymerization; poly-(L-dopa); corrosion inhibitor

0 前言

随着对环境保护问题的日益关注,金属防腐领域研究人员将研究重点放在开发绿色环保型缓蚀剂上。当前,一些天然提取物、药物及氨基酸等因良好的水溶性、高效防腐、健康环保而被广泛用作金属的绿色缓蚀剂,成为缓蚀领域的研究热点^[1]。L-DOPA 作为多巴胺(DA)的前驱体,广泛存在于生物体内,具有良好的生物相容性。目前的研究主要集中于帕金森病的治疗^[2]。L-DOPA 在碱性条件下自聚合形成的 Poly-(L-DOPA)具有比单体更优异的水溶性、低细胞毒性^[3]。如图 1 所示, Poly-(L-DOPA)分子结构中含有电负性原子和极性官能团,具备作为酸性溶液中的缓蚀剂的结构基础。

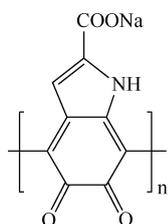


图 1 Poly-(L-DOPA)的分子结构式

Fig. 1 Molecular structure of Poly-(L-DOPA)

近年来,为了降低缓蚀剂用量,进一步改善缓蚀性能,已对多种缓蚀剂负载体系进行了研究。荣威等^[4]在介孔 SiO₂ 纳米颗粒上负载缓蚀剂 2-巯基苯并咪唑(MBI),能够改善复合涂层的耐蚀性能。陈中华等^[5]发现,在原位生成的 SiO₂ 微球表面包覆缓蚀剂苯并三氮唑(BTA),所得微胶囊(SiO₂/BTA)可以显著提高水性防腐涂层的耐蚀性。蔡佳文等^[6]研究了中空 SiO₂ 微球作为缓蚀剂苯并三氮唑的载体,并应用于自修复涂层。SHCHUKINA 等^[7]在介孔 SiO₂ 上负载 8-羟基喹啉缓蚀剂,发现添加 2 wt.% 的缓蚀剂就能抑制点蚀的形成,减少基材的腐蚀。

纳米胶体 SiO₂ 粒子具有良好的水溶性和生物相容性,且比表面积大,容易吸附于金属表面^[8-10]。本文以纳米胶体 SiO₂ 为载体,采用表面接枝聚合,制备了纳米胶体 SiO₂ 负载的聚多巴胺缓蚀体系 Poly-(L-DOPA)-SiO₂, 然后通过电化学极化和阻抗

测试探究 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 在 1 M HCl 溶液中对 Q235 碳钢的缓蚀作用。SEM 和 CLSM 观察缓蚀体系对 Q235 碳钢表面形貌和粗糙度的影响。

1 试验

1.1 材料及药品

所用左旋多巴(L-DOPA)购自阿拉丁化学试剂有限公司;氢氧化钠,乙醇和盐酸(36%~38%)购于国药集团化学试剂有限公司(中国上海);胶体二氧化硅 TM-40 购于西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司,所用试剂均为分析纯。电化学试验材料为晟鑫科技有限公司所生产的 Q235 碳钢,尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm。在整个试验过程中均使用去离子水。

1.2 电极和溶液的制备

Q235 碳钢使用前表面用酒精超声清洗,脱脂后干燥。制作电极时首先在钢材工作面对面的金属基底上焊接铜线,并将其固定于冷镶嵌模具水晶胶膜中,尺寸为 ϕ 3.2 cm×1.9 cm。然后将环氧 A、B 胶注入模具中,室温固化后脱模,得到面积为 100 mm² 的工作电极。测试前工作面用 150、600 和 1200 目的 SiC 依次进行抛光。用无水乙醇对表面进行擦拭清洗,氮气吹干后保存备用。使用去离子水稀释 HCl 制备 1 M HCl 溶液。向其中添加缓蚀剂配置成不同浓度的腐蚀液。

1.3 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的合成

将纳米胶体 SiO₂ 与 L-DOPA 按照摩尔比 5:1 的投料方式溶于 NaOH 中,缓慢搅拌,在室温下反应 24 h。反应液在冷冻干燥机干燥后得到棕色固体。L-DOPA 聚合反应如图 2 所示。

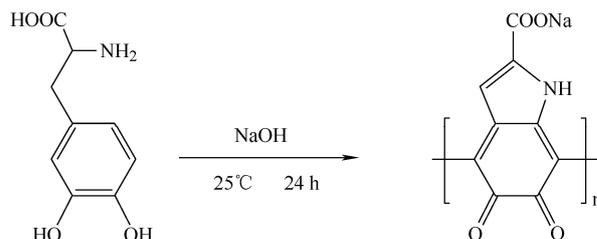


图 2 Poly-(L-DOPA)的聚合反应

Fig. 2 Poly-(L-DOPA) polymerization reaction

1.4 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的表征与性能测试

1.4.1 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的表征

通过日本 Hitachi 公司 S4800 型场发射扫描电子显微镜获得扫描电子图像。使用美国 Thermo Scientific 公司 Nicolet 6700 智能型傅里叶红外光谱仪进行测试, 得到 FT-IR 图。采用 KBr 压片法, 将样品与无水溴化钾研磨后混合均匀, 进行压片。测试范围为 400~4 000 cm⁻¹。使用美国 Perkin-Elmer 公司 Lambda 950 型紫外可见近红外分光光度计在 300~800 nm 记录 UV-vis 光谱。测试样品为液体, 溶液为去离子水。使用德国 BRUKER 公司 D8 ADVANCE DAVINCI 型 X 射线粉末衍射仪进行 XRD 测试。

1.4.2 电化学测试

电化学测试使用上海晨华 CHI-660E 型电化学工作站。在以铂片为对电极、饱和甘汞电极为参比电极, 工作面积为 1 cm² 的 Q235 碳钢为工作电极的经典三电极体系中进行电化学阻抗和极化测试。将 Q235 碳钢在含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中浸泡 2 h 后进行电化学测试。开路电位 (OCP) 稳定后, 电化学阻抗谱 (EIS) 的测量在 100 kHz 到 10 mHz 的频率范围内进行。使用 ZsimpWin 软件对 EIS 数据进行拟合和分析。最后, 在 OCP±300 mV 的扫描范围内进行了电位动力学极化测试, 扫描速率为 0.001 V/s。使用 CHI-660E 软件的 Special Analysis 对极化曲线进行拟合, 得到电化学腐蚀参数。所有测试在室温下进行, 相同测试进行 3 次, 以确保可靠性。

1.4.3 腐蚀碳钢表面形貌分析

将 Q235 碳钢在含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中浸泡 2 h 后, 采用美国 FEI 公司 FEI Quanta FEG 250 型场发射扫描电子显微镜记录碳钢表面形貌, 使用德国蔡司公司 LSM 700 型激光共聚焦显微镜记录碳钢的表面粗糙度 (*R_a*)。

2 结果与讨论

2.1 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的表征

图 3 为 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 SEM 图像。从图中可以看出, Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 粒径较为均匀, 为 50 nm 左右。根据 TM-40 产品说明书, 纳米胶体 SiO₂ 的粒径为 22 nm, 可见, L-DOPA 的聚合反应发生在 SiO₂ 粒子表面, 导致粒径明显增加。

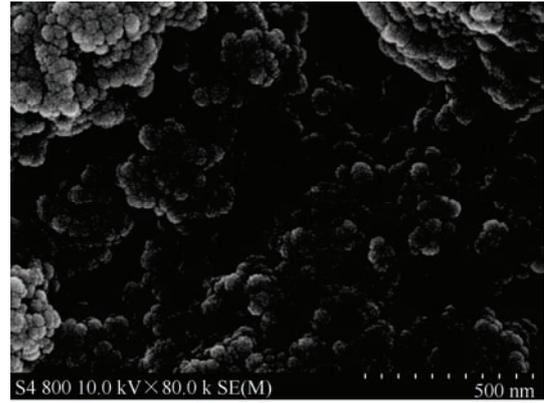


图 3 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 SEM 图像

Fig. 3 SEM of Poly-(L-DOPA)-SiO₂

图 4 为 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 FT-IR 光谱。位于 1 100 cm⁻¹ 和 800 cm⁻¹ 处强的吸收峰是 Si-O-Si 的振动吸收峰^[11]; 960 cm⁻¹ 处的吸收峰为 Si-O 的伸缩振动峰; 470 cm⁻¹ 处为 Si-O 弯曲振动的吸收峰, 这些是纳米 SiO₂ 的特征峰^[12-13]。3 440 cm⁻¹ 处为 O-H 的伸缩振动和 N-H 的伸缩振动吸收峰, 1 630 cm⁻¹ 处是 O-H 的弯曲振动和 N-H 的弯曲振动吸收峰。1 390 cm⁻¹ 处是 C=O 和 C-N-C 的伸缩振动吸收峰^[14]。FT-IR 结果证实 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的成功合成。

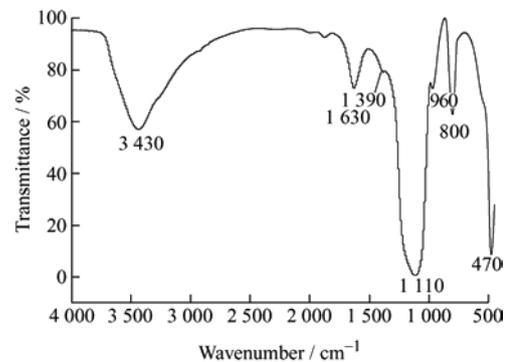
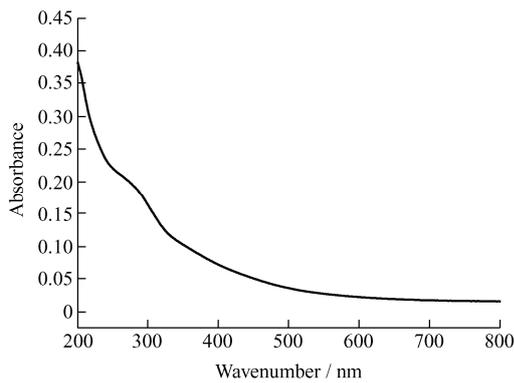
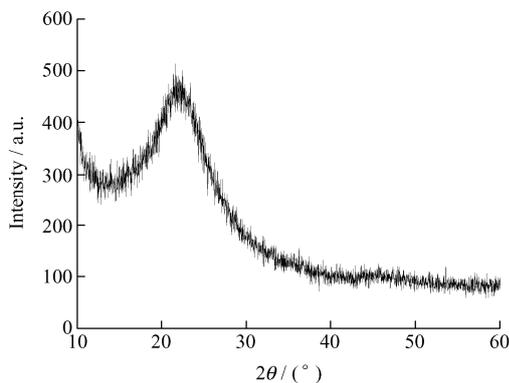


图 4 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 FT-IR 光谱

Fig. 4 FT-IR spectrum of Poly-(L-DOPA)-SiO₂

图 5 给出了 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的紫外吸收光谱。从图中可以看出, 在 280 nm 处存在吸收峰, 吸收带较宽, 说明分子中含有苯环, 并且含有羟基^[3, 15]。UV-vis 吸收光谱也证实了 L-DOPA 在纳米胶体 SiO₂ 表面生长接枝。

图 6 为 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 XRD 光谱图, 在 2 θ =21°处出现了一个强的衍射峰, 其位置和纳米 SiO₂ 的衍射峰位置一致^[12], 说明纳米 SiO₂ 表面接枝 L-DOPA 并没有改变其原有的晶型状态。

图5 Poly-(L-DOPA)-SiO₂的UV-vis吸收光谱Fig. 5 UV-vis spectrum of Poly-(L-DOPA)-SiO₂图6 Poly-(L-DOPA)-SiO₂的XRD光谱Fig. 6 XRD spectrum of Poly-(L-DOPA)-SiO₂表1 Poly-(L-DOPA)-SiO₂的极化曲线拟合参数Table 1 Polarization curve fitting parameters of Poly-(L-DOPA)-SiO₂

Concentration <i>C</i> / (mg / L)	Corrosion potential <i>E</i> _{corr} / mV	Corrosion current density <i>i</i> _{corr} / (μA / cm ²)	Tafel slope of anode <i>β</i> _a	Tafel slope of cathode <i>β</i> _c	Surface coverage <i>θ</i>	Efficiency of corrosion <i>η</i> / %
0	-428	3 306.7	196	-127	-	-
50	-439	2 125.2	146	-100	0.357	35.7
100	-442	2 066.3	147	-110	0.375	37.5
200	-443	1 336.3	142	-101	0.596	59.6
300	-447	742.5	132	-84	0.776	77.6
500	-434	465.4	122	-75	0.859	85.9

根据图7, 与1 M HCl溶液中电极体系相比, 添加了 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 体系的阴阳极斜率值都发生了明显的变化。从表1中可以看出, 随着缓蚀剂浓度增加, *β*_a 值逐步减小, 而 *β*_c 值逐步增大, 说明添加 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 既能抑制阳极的金属氧化反应, 也能抑制阴极的 O₂ / H⁺ 还原反应, 属于混合型缓蚀剂^[16]。根据表1, 随 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度的增加, *i*_{corr} 逐渐降低, *θ* 和 *η* 逐渐增加。以上结果说明, 缓蚀剂在碳钢表面吸附, 形成保护层, 减少了溶解于酸溶液中的氧气与 Q235 碳钢之间的反应^[17]。当 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度为 500 mg / L 时, *i*_{corr} 降低至 465.4 μA / cm², 缓蚀效率为 85.9%。

2.2 电化学分析

2.2.1 动电位极化测试

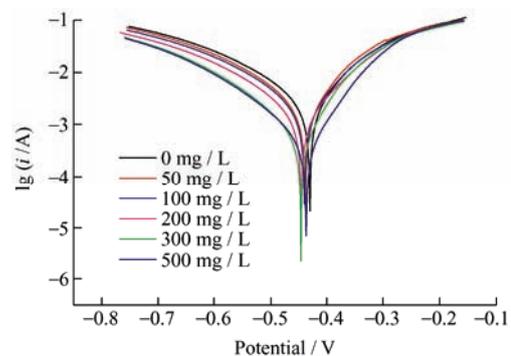
图5给出了在1 M HCl溶液中加入 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 后 Q235 碳钢的电化学极化曲线。采用 Tafel 直线外推法拟合极化曲线得到腐蚀电化学参数, 包括腐蚀电位 (*E*_{corr})、腐蚀电流密度 (*i*_{corr})、阴极 Tafel 斜率 (*β*_c)、阳极 Tafel 斜率 (*β*_a)、表面覆盖度 (*θ*) 和缓蚀效率 (*η*)。拟合结果列于表1。

缓蚀效率 *η* 和表面覆盖度 *θ* 计算公式如下:

$$\eta = \frac{i_{\text{corr}}^0 - i_{\text{corr}}}{i_{\text{corr}}^0} \times 100 \quad (1)$$

$$\theta = \frac{i_{\text{corr}}^0 - i_{\text{corr}}}{i_{\text{corr}}^0} \quad (2)$$

式中, *i*_{corr} 和 *i*_{corr}⁰ 分别表示缓蚀剂存在和不存在情况下的腐蚀电流密度。

图7 Q235 碳钢浸入含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中 2 h 后的极化曲线Fig.7 Polarization curves of Q235 carbon steel immersed in 1 M HCl solution containing different concentrations of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ for 2

2.2.2 电化学阻抗谱

图 8 展示了将 Q235 碳钢浸入含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中 2 h 的电化学阻抗谱。使用 ZSimpwin 软件通过图 7d 中的等效电路将 EIS 数据进行拟合, 拟合参数列于表 3。在等效电路中, R_s 是溶液电阻, Q 是双层电容, R_{ct} 是电荷转移电阻。由于表面粗糙度、缓

蚀剂吸附、多孔层形成等原因而用 Q 代替理想电容器。根据拟合结果用以下公式计算出缓蚀剂效率 $IE\%$ 。

$$IE\% = \frac{R_{ct} - R_{ct}^0}{R_{ct}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, R_{ct} 和 R_{ct}^0 分别表示缓蚀剂存在和不存在情况下的电荷转移电阻。

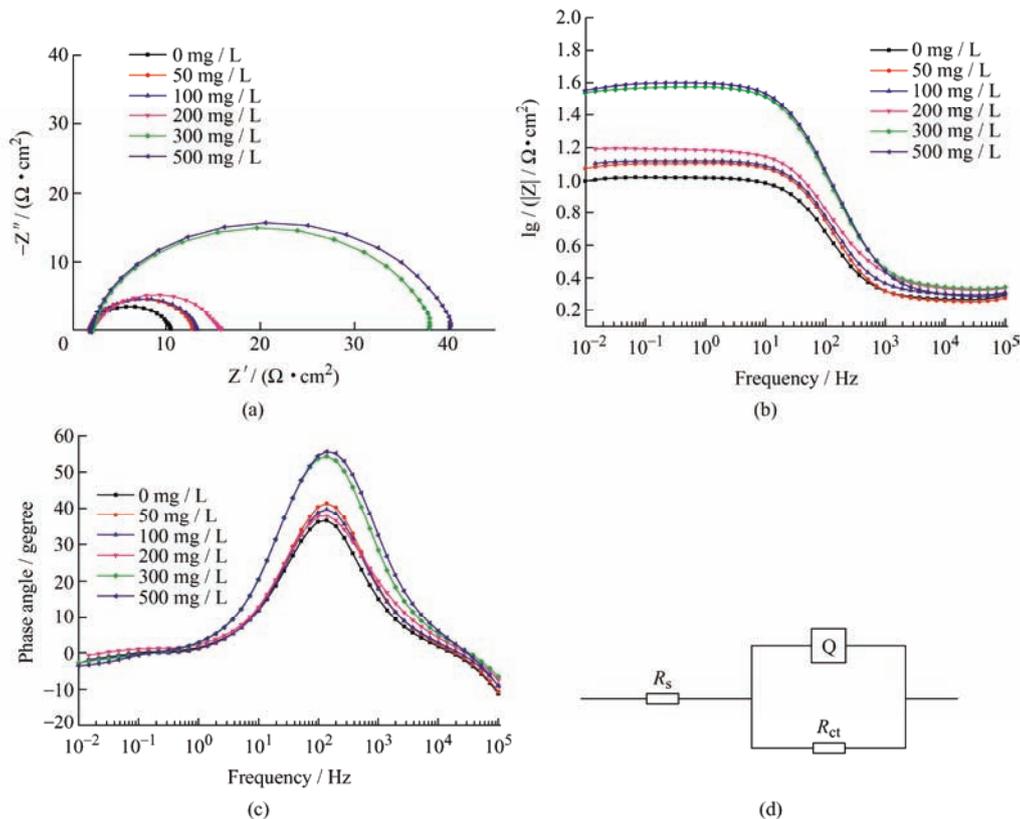


图 8 Q235 碳钢浸入含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中 2 h 后的 Nyquist 和 Bode 图及等效电路

Fig. 8 Nyquist (a) and Bode (b and c) diagrams of Q235 carbon steel immersed in 1 M HCl solution containing different concentrations of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ for 2 h, equivalent circuit (d)

图 8 中所有 EIS 图显示出相似的形状。添加 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 并没有改变溶液的电化学特性。Nyquist 图中的电容性环路略微凹陷, 圆心位于实轴以下, 可能与碳钢表面粗糙度和缓蚀剂的吸附有关^[18]。电容环直径随 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度的增加而增加, 这表明对 Q235 碳钢腐蚀的抑制作用增强^[19]。通常, 低频处的阻抗值可以反映出样品的腐蚀抑制能力^[20]。从图 6b 波特阻抗图中可以看出, 低频处的阻抗值随着 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度的增加而增加, 证实

Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 对碳钢腐蚀的抑制作用逐渐增强。Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度越高, 腐蚀过程越缓慢, 缓蚀效率越高。

从表 2 可以看出, 随着 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的浓度的增加, 电荷转移电阻 R_{ct} 逐渐增加, 电荷转移过程被抑制, 双层电容 C_{dl} 逐渐减小。缓蚀剂在金属表面形成保护层, 通过减少金属表面与电解质之间的电荷转移而减缓了腐蚀的发生^[21]。当 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度为 500 mg / L 时, R_{ct} 为 37.76 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, $IE\%$ 可达到 77.4%。

表2 EIS拟合参数

Table 2 EIS fitting parameters

Concentration $C /$ (mg / L)	Solution resistance $R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Double layer capacitance $C_{dl} / (\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2})$	Charge transfer resistance $R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Efficiency of the corrosion $IE / \%$
0	1.88	0.845	8.55	-
50	1.83	0.602	10.87	21.3
100	2.01	0.633	11.21	23.7
200	2.14	0.818	13.61	37.2
300	2.19	0.301	35.47	75.9
500	1.96	0.290	37.76	77.4

2.3 腐蚀产物表面分析

从图9可以看出,经过抛光后的Q235碳钢表面光滑,存在因抛光而产生的划痕,没有明显的缺陷。1 M HCl 溶液中未添加缓蚀剂的Q235碳钢的表面被严重腐蚀,出现明显的凹陷和裂纹,存在孔洞,遍布腐蚀点,碳钢表面几乎看不到因抛光而引起的划痕。随着Poly-(L-DOPA)-SiO₂浓度的增加,碳钢表面的腐蚀损伤逐步减轻,表面可见因抛光产生的划痕,腐蚀产生的凸起、裂痕、孔洞和腐蚀点位都逐步减少。当Poly-(L-DOPA)-SiO₂浓度为500 mg/L时,碳钢表面的腐蚀情况得到改善,表面可见因抛光产生的划痕,明显可见划痕表面覆盖了一层聚合物膜。

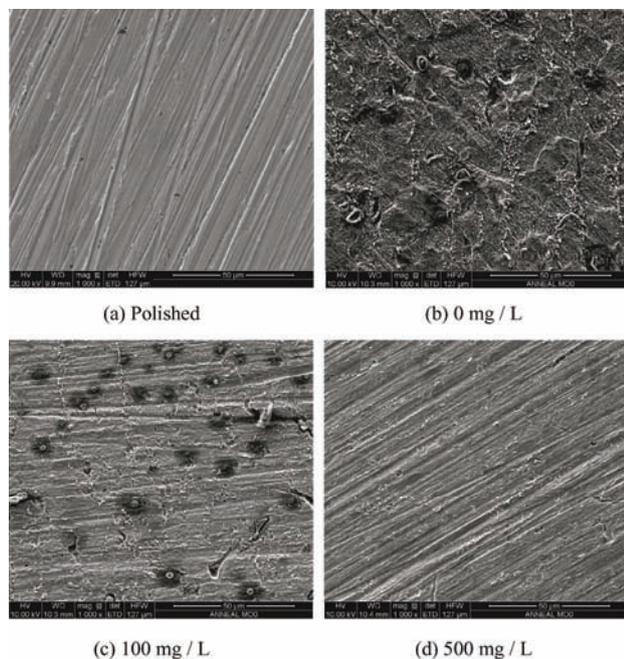


图9 Q235碳钢在含有不同浓度Poly-(L-DOPA)-SiO₂的1 M HCl溶液中浸泡2 h后的SEM图像

Fig. 9 SEM image of Q235 carbon steel immersed in 1 M HCl solution containing different concentrations of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ for 2 h

图10为样品的CLSM图像,相比于抛光后的Q235碳钢,浸在1 M HCl中的Q235碳钢表面非常粗糙,表面明显凹凸不平,碳钢被严重腐蚀。随着Poly-(L-DOPA)-SiO₂的添加,样品表面变得平整,粗糙度明显降低。图11给出了Q235碳钢在不同Poly-(L-DOPA)-SiO₂浓度下碳钢的平均表面粗糙度。抛光后的碳钢表面的 R_a 约为188.3 nm。在1 M HCl中浸泡2 h后,碳钢的平均粗糙度达到910.7 nm。随着Poly-(L-DOPA)-SiO₂浓度的增加,样品的 R_a 值降低至400 nm左右。这些结果表明,Poly-(L-DOPA)-SiO₂可以降低1 M HCl溶液对Q235碳钢的腐蚀,具有有效的腐蚀抑制作用。

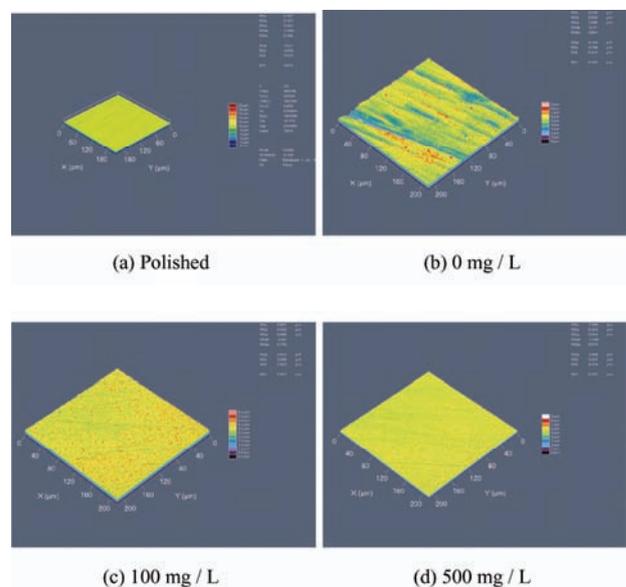


图10 Q235碳钢在含有不同浓度Poly-(L-DOPA)-SiO₂的1 M HCl溶液中浸泡2 h后的CLSM图像

Fig. 10 CLSM image of Q235 carbon steel immersed in 1 M HCl solution containing different concentrations of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ for 2 h

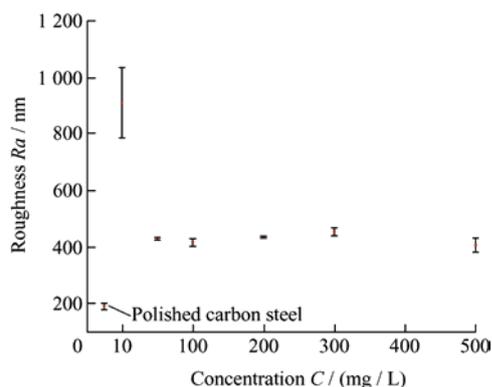


图 11 Q235 碳钢在含有不同浓度 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的 1 M HCl 溶液中浸泡 2 h 后的 *Ra*

Fig. 11 *Ra* of Q235 carbon steel immersed in 1 M HCl solution containing different concentrations of Poly-(L-DOPA)-SiO₂ for 2 h

3 结论

(1) 缓蚀剂 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 以生物质左旋多巴为原料, 以纳米胶体 SiO₂ 为载体, 通过左旋多巴在 SiO₂ 表面聚合而成, 兼具绿色环保、良好水溶性以及高效的优势。

(2) 电化学结果表明, Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 对浸泡在 1 M HCl 中的 Q235 碳钢的腐蚀有明显的抑制作用。当 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度为 500 mg / L 时, 缓蚀效率可以达到 85.9%。添加 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 后, β_c 和 β_a 发生改变, 阳极的金属氧化反应、阴极的 O₂ / H⁺ 还原反应均被抑制, Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 是一种混合型缓蚀剂。

(3) Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 可以在金属表面吸附形成具有较好保护作用的吸附性膜, 有效抑制酸性溶液对碳钢的腐蚀。

参 考 文 献

- [1] RAJA P B, SETHURAMAN M G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—A review[J]. Materials Letters, 2008, 62(1): 113-116.
- [2] 田丹. 诊疗一体化聚左旋多巴纳米颗粒的制备与表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
TIAN Dan. Preparation and characterization of poly-levodopa nanoparticles for integrated diagnosis and treatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [3] 陈跃文. 基于左旋多巴的荧光纳米材料的合成及应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- [4] 荣威, 赵恒, 梁小红. 镁合金表面羟基磷灰石 / 介孔 SiO₂ 自修复耐蚀涂层的研究[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 933-939, 944.
RONG Wei, ZHAO Heng, LIANG Xiaohong. Study on hydroxyapatite/mesoporous SiO₂ self-repairing corrosion resistant coating on magnesium alloy[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(4): 933-939, 944. (in Chinese)
- [5] 陈中华, 梁家妮. 以负载缓蚀剂的二氧化硅微胶囊制备水性智能防腐涂料及其涂层性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(6): 231-235.
CHEN Zhonghua, LIANG Jiani. Preparation of water-based intelligent anticorrosive coatings by silica microcapsules loaded with corrosion inhibitors and study on the coating properties[J]. Electroplating Finish, 2018, 37(6): 231-235. (in Chinese)
- [6] 蔡佳文, 李跃, 吴春春, 等. 缓蚀剂负载中空 SiO₂ 微球的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(4): 126-133.
CAI Jiawen, LI Yue, WU Chunchun, et al. Preparation and performance of corrosion inhibitor supported hollow SiO₂ microspheres[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(4): 126-133. (in Chinese)
- [7] SHCHUKINA E, SHCHUKIN D, GRIGORIEV D. Halloysites and mesoporous silica as inhibitor nanocontainers for feedback active powder coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 123: 384-389.
- [8] 沈思敏, 芦艾, 康明, 等. 二氧化硅的荧光标记及其应用研究进展[J]. 高分子通报, 2020, 259(11): 13-21.
SHEN Simin, LU Ai, KANG Ming, et al. Fluorescent labeling of silica and its application research progress[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2020, 259(11): 13-21. (in Chinese)
- [9] 张剑, 陈文革. 直流磁控溅射制备二氧化硅薄膜及其性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 34-39.
ZHANG Jian, CHEN Wenge. Preparation and properties of silica films by DC magnetron sputtering[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 34-39. (in Chinese)
- [10] 李玉峰, 高文博, 史凌志, 等. 超疏水涂层的制备及其对 Mg-Li 合金的防腐性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(5): 1-9.
LI Yufeng, GAO Wenbo, SHI Lingzhi, et al. Preparation of superhydrophobic coating and its corrosion resistance to Mg-Li alloy[J]. China Surface Engineering, 2020,

- 33(5): 1-9. (in Chinese)
- [11] 刘志雷, 胡孝涛, 周街胜, 等. “点击”化学法聚合物包覆纳米二氧化硅的研究[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 111-116.
LIU Zhilei, HU Xiaotao, ZHAOU Jiesheng, et al. Research on “click” chemical method polymer-coated nano-silica[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 111-116. (in Chinese)
- [12] 吉同超. 三种不同聚合物包覆 SiO₂ 的制备及其在 PVC 中的应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
JI Tongchao. Study on preparation of three different polymers coated SiO₂ and its application in PVC[D]. Kaifeng: Henan University, 2019. (in Chinese)
- [13] 李维. 纳米二氧化硅的表面修饰及其应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
LI Wei. Research on surface modification and application of nano-silica[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] BARRETO W J, BARRETO S, ANDO R A, et al. Raman, IR, UV-vis and EPR characterization of two copper dioxolene complexes derived from L-DOPA and dopamine[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 71(4): 1419-1424.
- [15] 郑祥飞. 化学增幅型光刻胶成膜树脂的合成及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
ZHENG Xiangfei. Study on synthesis and performance of chemically amplified photoresist film-forming resin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. (in Chinese)
- [16] QIANG Y J, ZHANG S T, YAN S, et al. Three indazole derivatives as corrosion inhibitors of copper in a neutral chloride solution[J]. Corrosion Science, 2017, 126: 295-304.
- [17] QIANG Y J, ZHANG S T, GUO L, et al. Experimental and theoretical studies of four allyl imidazolium-based ionic liquids as green inhibitors for copper corrosion in sulfuric acid[J]. Corrosion Science, 2017, 119: 68-78.
- [18] ROTARU I, VARVARA S, GAINA L, et al. Antibacterial drugs as corrosion inhibitors for bronze surfaces in acidic solutions[J]. Applied Surface Science, 2014, 321: 188-196.
- [19] TUKEN T, DEMIR F, KCR N, et al. Inhibition effect of 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide against steel corrosion[J]. Corrosion Science, 2012, 59(6): 110-118.
- [20] CUI M J, REN S M, XUE Q J, et al. Carbon dots as new eco-friendly and effective corrosion inhibitor[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 680-692.
- [21] YANG F, LI X Y, DAI Z D, et al. Corrosion inhibition of polydopamine nanoparticles on mild steel in hydrochloric acid solution[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12: 7469-7480.

作者简介: 魏佳煜, 女, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为盐酸酸洗缓蚀剂、海洋防腐蚀涂层和抗菌涂层。

E-mail: 2631911647@qq.com

杨凤(通信作者), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为绿色高效缓蚀剂的合成及其缓蚀行为、杜仲胶的高性能化与功能化。

E-mail: yangfeng@syuct.edu.cn