

CdS/CeO₂/还原氧化石墨烯复合材料的制备及其光阴极保护材料性能

吴凤芹^{1,2} 左士祥¹ 李霞章¹ 刘文杰¹ 姚超¹

(1.常州大学石油化工学院,常州 213164;2.常州纳欧新材料科技有限公司,常州 213164)

摘要 以水热法合成棒状 CeO₂/石墨烯载体材料,成功在载体上负载 CdS 纳米粒子得到 CdS/CeO₂/还原氧化石墨烯(CdS/CeO₂/RGO)多级结构复合材料。采用透射电镜、X 射线衍射仪和拉曼光谱等手段表征材料的结构,探究了该复合材料对 304SS 的光致阴极保护性能。结果表明:在可见光照射下,与 CdS 和 CdS/RGO 相比,CdS/CeO₂/RGO 复合材料的光生电子与空穴更易分离,有着更好的光致阴极保护效果,且 CeO₂ 具备存储电子能力,可见光光源关闭后,CeO₂ 仍能向 304SS 注入电子,从而在黑暗中对 304SS 起到持续的光阴极保护作用。

关键词 CeO₂,CdS,石墨烯,光致阴极保护

Preparation of CdS/CeO₂/RGO and its photocathodic protection for 304 SS

Wu Fengqin^{1,2} Zuo Shixiang¹ Li Xiazhang¹ Liu Wenjie¹ Yao Chao¹

(1.School of Petrochemical Engineering,Changzhou University,Changzhou 213164;

2.Changzhou Nano-materials S&T Co.,Ltd.,Changzhou 213164)

Abstract CeO₂/RGO was firstly prepared by hydrothermal and then CdS/CeO₂/RGO composite with hierarchical structure was successfully prepared by loading cadmium sulfide nanoparticles. The material was characterized by TEM,XRD and Raman. The photocathodic protection performance of CdS/CeO₂/RGO for 304SS under visible light was also investigated. The results showed that the photo generated electrons and holes of CdS/CeO₂/RGO which showed the best photocathodic protection performance was more easily separated than that of CdS and CdS/RGO materials under visible light. In addition, CeO₂ had the ability to store electrons. CeO₂ still could inject electrons into 304 stainless steel even without visible light. Thus, CdS/CeO₂/RGO could provide continuous cathodic protection to 304 stainless steel in the dark.

Key words CeO₂,CdS,graphene,photocathodic protection

性能优越的 304SS 金属被广泛应用于各个领域,但其局部腐蚀问题极大限制了其应用。近年来,典型的防腐技术已被应用,如在 304SS 表面加保护层,电化学保护以及处理腐蚀介质等方法^[1-3]。上世纪末,光致阴极保护被提出用于金属防腐^[4]。目前,多种半导体被应用于光致阴极保护中,但是在暗态下低防腐性能制约着它们在光致阴极保护中的应用^[5-6]。CeO₂ 是一种常见的半导体,稳定性好、具有比 304SS 自腐蚀电位更负的电势,且具备在光致阴极保护中储存电子的能力^[7]。

石墨烯是一种具有大比表面积和优良导电性的二维片状材料,首先以石墨烯为载体,CeO₂ 纳米棒为骨架,CdS 纳米粒子为窄带隙半导体构建了 CdS/CeO₂/石墨烯多级结构复合材料,CdS/CeO₂ 形成

异质结结构拓宽了可见光响应范围,抑制了光生电子与空穴的复合。均匀分布在石墨烯片层上的 CeO₂ 纳米棒不仅能储存电子,还可有效地减少石墨烯的卷曲与堆叠,增强对腐蚀介质的阻隔。石墨烯高效的电子传输能力可以使光生电子快速转移至 304SS 上,有效地抑制了光生电子与空穴复合。本研究通过水热法首先合成棒状 CeO₂/石墨烯二元材料,然后通过负载 CdS 粒子成功制备 CdS/CeO₂/还原氧化石墨烯(CdS/CeO₂/RGO)多级结构复合材料,并研究了该复合材料对 304SS 的光致阴极保护性能。

1 实验部分

1.1 原料

硫酸、磷酸、高锰酸钾、过氧化氢、硝酸铈、NaOH、

基金项目:国家自然科学基金(51702026);江苏省重点研发计划-社会发展(BE2018649)

作者简介:吴凤芹(1967-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为防腐材料的制备与应用。

氯化镉、硫脲、盐酸,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;石墨,常州第六元素材料科技有限公司。

1.2 氧化石墨烯(GO)的制备

在 1L 三口烧瓶中加入 240mL 浓硫酸和 26.6mL 浓磷酸,搅拌均匀,缓慢加入 2g 鳞片石墨和 12g 高锰酸钾,50℃水浴搅拌 12h 后,自然冷却至室温,再将混合物倒入冰水和 20mL 双氧水(30%)混合液中,静置过夜。用 1mol/L 盐酸溶液和蒸馏水离心、洗涤至中性,自然风干即可制得 GO。

1.3 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的制备

(1)将 8.7mg GO 溶于 25mL 9mol/L NaOH 溶液中,超声分散 30min,边搅拌边滴加 5mL 0.4mol/L 硝酸铈溶液,搅拌 30min 后,140℃下水热 24h,冷却后离心、洗涤,40℃干燥后,N₂ 气氛下 400℃煅烧 4h,即可制得 CeO₂/RGO 复合材料。

(2)取 0.78g CeO₂/RGO 溶于 50mL 0.04mol/L 氯化镉水溶液中,加入 0.091g 硫脲搅拌 30min,用 0.1mol/L 盐酸溶液调节 pH=3,0℃下继续搅拌 1h 后,滴加 30mL 0.08mol/L 硫化钠水溶液,反应 30min 后置于阴暗处老化 24h,过滤、洗涤、40℃干燥后即可制得 CdS 负载量为 30%(wt,质量分数,下同)的 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料。以同样方法制得 CdS 负载量为 10%、20% 和 40% 的 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料。

1.4 防腐性能测试

称取 50mg 复合材料分散于 1mL 蒸馏水中,超声分散 30min,用移液枪移取 50μL 分散液均匀涂覆在面积为 1cm² 的钛电极上,自然晾干后,滴加 5μL Nafion 溶液,晾干后置于含有 0.1mol/L Na₂S 的光电解池中。304SS 作为工作电极置于腐蚀电解池中,并以 Pt 电极为对电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,3.5% NaCl 溶液为电解液,光阳极与不锈钢电极以导线连接,光电解池与腐蚀电解池以盐桥连接。以 300W 氙灯为可见光光源,通过电化学工作站(CHI660D 型)对材料电极的光致阴极保护性能进行测试。

通过塔菲尔曲线测定腐蚀电位(E_{corr})、腐蚀电流密度(I_{corr})、阳极斜率(b_a)和阴极斜率(b_c)等参数,按式(1)~式(3)计算腐蚀速率(CR)、极化电阻(R_p)和保护效率(PE)。

$$CR = \frac{I_{\text{corr}} (\text{A/cm}^2) \cdot M (\text{g})}{D (\text{g/cm}^3) \cdot V} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{b_a \cdot b_c}{2.303 \cdot (b_a + b_c) \cdot I_{\text{corr}}} \quad (2)$$

$$PE = (1 - I_{\text{corr}(2)} / I_{\text{corr}(1)}) \times 100\% \quad (3)$$

式中, M 为 304SS 的相对分子质量; D 为不锈钢的密度,g/cm³; V 为体积,cm³; $I_{\text{corr}(2)}$ 为涂覆复合材料不锈钢电极的腐蚀电流密度,A/cm²; $I_{\text{corr}(1)}$ 为空白不锈钢电极腐蚀电流密度,A/cm²。

1.5 分析表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, SHIMADZUXRD-6000 型,日本岛津公司)对材料的结构和物质组成进行分析,Cu 靶,电压 40kV,电流 30mA, $\lambda = 0.154056$,扫描速率与范围分别是 6°/min 和 5~80°;采用拉曼光谱仪(RL, LabRAM HR Evolution 型,日本 Horiba 公司)对材料的结构进行分析,457nm 氩离子激光,收集时间 10s,扫描范围 1000~3000cm⁻¹;采用紫外-可见漫反射光谱仪(UV-Vis, UV-3600 型,日本岛津公司)测定材料的吸光性能,扫描范围 200~800nm;采用透射电子显微镜(TEM, JEOL-2010 型,日本 JEOL 公司)来观察材料的形貌。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 1 为 GO、RGO、CdS、CeO₂ 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 XRD 谱图。由图可知,10.4°处的尖锐峰对应 GO 的(001)晶面,晶面间距为 0.821nm;RGO 的特征衍射峰移至 26.1°处,晶格间距为 0.368nm,说明 GO 的含氧官能团被基本消除。CdS 在 26.5°、44.4°和 52°处的衍射峰分别对应其(111)、(220)和(311)晶面;CeO₂ 在 28.5°、33.1°、47.5°和 56.3°处的衍射峰对应其(111)、(200)、(220)和(311)晶面^[8]。在 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 XRD 谱图中,RGO 和 CdS 的衍射峰几乎被掩盖,但 27°处的新宽峰表明成功制备了 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料。

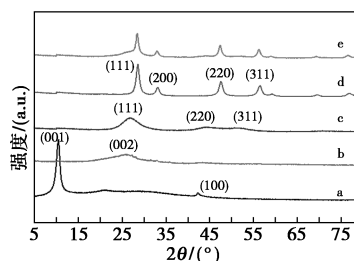


图 1 GO(a)、RGO(b)、CdS(c)、CeO₂(d)和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料(e)的 XRD 谱图

2.2 RL 分析

图 2 为 CdS、CeO₂、RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 RL 谱图。由图可知,CdS 的

RL 谱图中有 2 个 CdS 的纵光学声子模, 1LO 和 2LO 纵光学声子模分别与 292.9cm^{-1} 和 600.2cm^{-1} 相对应^[9-11], 弱对称特征峰表明 CdS 结晶度较低, 尺寸小, 这与 XRD 分析相一致。CeO₂ 的 RL 谱图中在 463cm^{-1} 存在一个强 CeO₂ 特征峰, 证明成功制备了 CeO₂, 在 600cm^{-1} 处存在一个弱宽峰, 可能是 CeO₂ 表面存在少许缺陷氧空缺^[12]。RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料在 1346cm^{-1} 和 1598cm^{-1} 处都出现了石墨烯的 D 峰和 G 峰。与 CdS 和 CeO₂ 相比, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的拉曼特征峰相对较弱, 这因为 CdS/CeO₂ 异质结构存在缺陷, 导致散射损失^[13]。

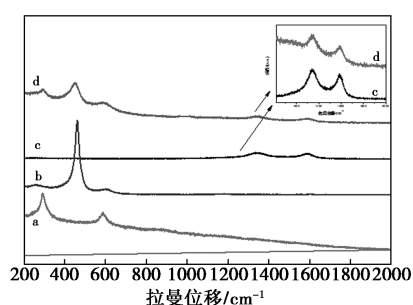


图 2 CdS(a)、CeO₂(b)、RGO(c)和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料(d)的 RL 谱图(插图为局部放大图)

2.3 TEM 分析

图 3 为 RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 TEM 图及 EDS 能谱图。由图 3(a)可知, RGO 薄而透明, 表面卷曲褶皱。由图 3(b)可知, CeO₂ 纳米棒均匀分布在 RGO 上, CdS 纳米粒子均匀分布在 CeO₂ 纳米棒上, 说明成功构筑了 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料, 由高清 TEM 图可知[图 3(c)], CdS 尺寸约为 5nm, 与 XRD 分析一致, CdS 的(111)晶面晶格间距为 0.33nm, CeO₂ 的

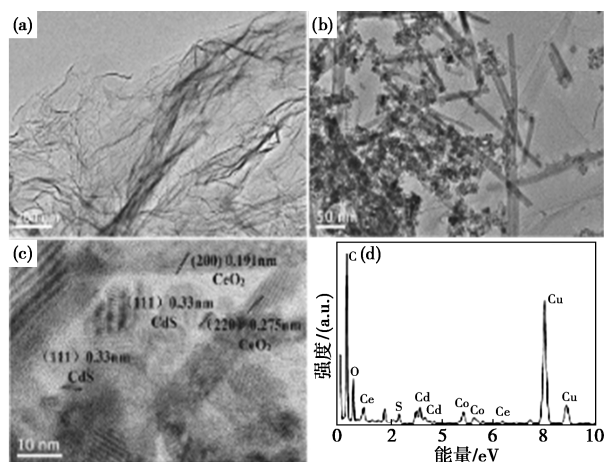


图 3 RGO(a)、CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 TEM 图(b—c)和 EDS 能谱图(d)

(200) 和 (220) 晶面间距分别为 0.191nm 和 0.275nm^[14-15]。图 3(d)清晰显示了 C、O、Ce、S 和 Cd 元素, 进一步证明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的形成。

2.4 UV-Vis 分析

图 4 为 CdS、CeO₂、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 UV-Vis 谱图。由图可知, CdS 和 CeO₂ 的 UV-Vis 谱图与文献[16]报道一致。CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料都有很强的光吸收能力, 相比于 CdS/RGO, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的吸收边在可见光区域都发生了红移, 这主要归因于 CeO₂ 和 CdS 之间形成了 p-n 异质结结构, 降低了分子内电荷传输能量, 表明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料有着较佳的光催化性能^[12]。

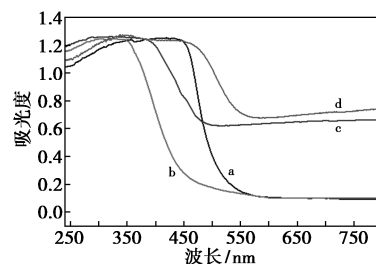


图 4 CdS(a)、CeO₂(b)、CdS/RGO(c)和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料(d)的 UV-Vis 谱图

2.5 塔菲尔曲线

304SS、CdS、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的塔菲尔极化曲线见图 5。由图 5 曲线 a—d 可知, 304SS 电极有着较大的 I_{corr} 和较小的 E_{corr} ; 而涂覆不同材料后 304SS 电极有着更小的 I_{corr} 和更大的 E_{corr} , 涂覆 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 304SS 电极有着最小的 I_{corr} 和最大的 E_{corr} , 表明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料有着最好的防腐性能。

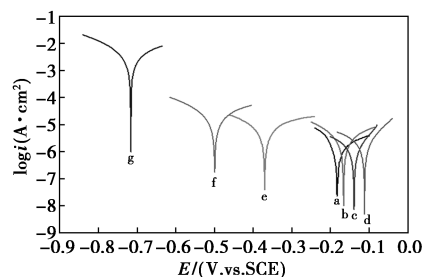


图 5 304SS、CdS、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的塔菲尔极化曲线图

(a: 304SS, 空白; b—d: 暗态下 CdS、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料; e—g: 可见光下 CdS、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料)

不同条件下电极的动电位极化参数见表 1。在暗态下,将空白 304SS 电极和 CdS、CeO₂/RGO 及 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料分别涂覆不锈钢电极,他们的塔菲尔 E_{corr} 和 R_p 越大, I_{corr} 和 CR 越

小,表明暗态下,材料的耐蚀性最佳^[17]。由表可知, CdS 涂覆 304SS 电极后, PE 只有 26.30%,而添加了 RGO 后, PE 大大增加, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 PE 达到 81.18%,有着最佳的防腐效果。

表 1 不同条件下电极的动电位极化参数

样品	光电化学防腐性能测试					CR/	PE/
	b_a/Vdec^{-1}	b_c/Vdec^{-1}	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_p/(\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$(\text{mm}\cdot\text{y}^{-1})$	%
304SS(空白)	7.903	2.054	-0.193	24.75	28.62	8.92×10^{-3}	—
CdS(暗态下)	3.052	6.683	-0.168	18.24	49.88	6.57×10^{-3}	26.30
CdS/RGO(暗态下)	2.824	7.245	-0.141	11.57	76.26	4.17×10^{-3}	53.25
CdS/CeO ₂ /RGO 多级结构复合材料(暗态下)	7.846	1.031	-0.110	4.66	84.91	1.68×10^{-3}	81.18

以不同材料涂覆钛电极作为光电极,与 304SS 电极联结后,在可见光照射下测得的塔菲尔曲线见图 5 曲线 e—g。由图可知,半导体材料在可见光照射下,产生电子和空穴($e^- - h^+$),光生电子迁移至 304SS 电极上,使其电位低于不锈钢的自腐蚀电位,从而达到了阴极保护作用。此外, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料使 304SS 电极电位降低的程度最大,理论上有着最好的阴极保护效果。

2.6 电化学性能

本实验分别研究了 CdS、CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料作为光电极材料的 304SS 电极的电化学性能。

研究发现,未经可见光照射前,不同材料涂覆钛电极的开路电位在 -180mV 左右,与 304SS 的自腐蚀电位(-0.19mV)相近。可见光照射后,与钛电极联结的 304SS 电极电势突然急剧下降后稳定, CdS 和 CdS/RGO 的 304SS 电极电势分别降低至 -320mV 和 -510mV,低于 304SS 的自腐蚀电位,可起到光致阴极保护效果。但经光照后, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 304SS 电极电势降低至 -740mV,远远低于 304SS 的自腐蚀电位,所以 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料有着最好的光致阴极保护性能。当可见光光源关闭后,只有 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 304SS 电极电势是呈缓慢上升趋势,最终稳定在一个相对较负的电势,大约 -600mV,对 304SS 仍有很好的光致阴极保护,这因为 CeO₂ 纳米棒有着储存电子的作用,可见光照射时, CdS 粒子产生的部分光生电子被 CeO₂ 纳米棒储存,关闭光源后, CeO₂ 纳米棒释放电子,通过 RGO 快速转移至 304SS 上,从而达到防腐效果。

实验进一步考察了 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料作为光电极材料的 304SS 电极的长时间

开路电位变化情况,发现当 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料经可见光照射时,304SS 电极电势急剧下降并稳定在一个很负的电势,照射 1h 后,关闭电源,电势缓慢上升后趋于稳定,5h 后,电势仍维持在 -590mV 左右,远低于 304SS 自腐蚀电位,说明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料在光源关闭后也可对不锈钢有良好的保护。

高的光电流意味着更好的光生电荷分离能力^[18]。研究还发现,当可见光照射时,304SS 电极都产生了激磁电流,说明有光生电子的产生。 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 304SS 电极的稳定电流密度达到 0.0007A/cm²,远高于以 CdS(0.00042A/cm²)和 CdS/RGO(0.00031A/cm²)为光电极材料的 304SS 电极,表明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料对于光生电子空穴对($e^- - h^+$)有着较高的分离效率。当光源关闭后,所有 304SS 电极电流密度都急剧降为零,归因于光生电子和空穴的复合。

2.7 防腐性能

本实验还进一步评价了 CdS/RGO 和 CdS/

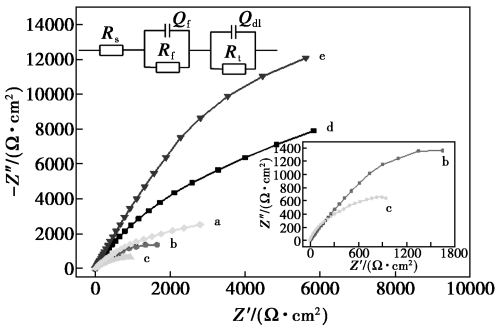


图 6 CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的电化学交流阻抗曲线图(右下角插图为局部放大图)
(a:304SS,空白;b—c:可见光下 CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料;d—e:暗态下 CdS/RGO 和 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料)

CeO₂/RGO 多级结构复合材料的防腐性能,其电化学交流阻抗曲线见图 6,左上方插图为交流阻抗对应的等效电路。等效电路的具体参数见表 2,其中 R_s 为电解液电阻, R_f 和 Q_f 分别为不同材料涂层的电阻和电容, R_t 和 Q_{dl} 分别为电荷转移电阻和双电层电容^[19]。由图表可知,在暗态下,涂覆了 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料后,304SS 电极的交流阻抗曲线半径相比于空白 304SS 电极显著增大,相应的 R_t 和 R_f 值也明显增大,表面电荷

转移电阻大大增加,电化学反应受到抑制,说明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料涂层在暗态下起到了很好的阻隔作用。在可见光照射下,与 CdS/RGO 相比, CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料的 304SS 电极的交流阻抗曲线半径减小显著, R_t 和 R_f 降低的更明显,表明 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料能够更好地使光生电子和空穴对分离和转移,促进电化学反应,从而达到更佳的光致阴极保护效果。

表 2 交流阻抗等效电路参数

电极	R_s/Ω	Q_f		R_f/Ω	Q_{dl}		R_t/Ω
		Y_0	n		Y_0	n	
304 不锈钢(空白)	5.88	7.53×10^{-5}	0.86	4.21×10^4	2.69×10^{-4}	0.75	4.03×10^4
CdS/RGO(暗态下)	6.64	5.38×10^{-5}	0.84	7.22×10^4	6.69×10^{-4}	0.79	1.55×10^5
CdS/CeO ₂ /RGO 多级结构复合材料(暗态下)	9.36	5.47×10^{-5}	0.83	9.16×10^4	9.69×10^{-4}	0.76	1.94×10^5
CdS/RGO(可见光下)	4.64	1.38×10^{-4}	0.86	4.15×10^3	5.69×10^{-4}	0.77	6.56×10^3
CdS/CeO ₂ /RGO 多级结构复合材料(可见光下)	4.79	1.87×10^{-4}	0.87	2.26×10^2	7.69×10^{-4}	0.76	3.25×10^3

3 结论

以 RGO 为载体, CeO₂ 纳米棒为骨架, 制备 CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料, CeO₂ 纳米棒均匀分布在 RGO 上, CdS 纳米粒子负载在 CeO₂ 纳米棒上。CeO₂ 纳米棒不仅有骨架支撑作用, 与 CdS 形成异质结以增加可见光响应和快速分离光生电子空穴对, 还可储存电子。CdS/CeO₂/RGO 多级结构复合材料有着较好的可见光吸收能力和优异的光致阴极保护性能, 对 304SS 起到良好的防腐效果。

参考文献

- [1] Liu W, Wang Y G, Su G, et al. The effect of incorporating carbon nanotubes in titania films used for the photocathode protection of 304 stainless steel[J]. Carbon, 2012, 50(10): 3641-3648.
- [2] Li H, Wang X, Wei Q, et al. Enhanced photocathodic protection performance of Ag/graphene/TiO₂ composite for 304SS under visible light[J]. Nanotechnology, 2017, 28(22): 225701-225709.
- [3] Olad A, Barati M, Shirmohammadi H. Conductivity and anticorrosion performance of polyaniline/zinc composites; investigation of zinc particle size and distribution effect[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 72(4): 599-604.
- [4] Huang J, Shinshara T, Tsujikawa S. Protection of carbon steel from atmospheric corrosion by TiO₂ coating[J]. Corrosion Engineering, 1999, 48: 217-266.
- [5] Sun M, Chen Z, Bu Y, et al. Effect of ZnO on the corrosion of

zinc, Q235 carbon steel and 304 stainless steel under white light illumination[J]. Corrosion Science, 2014, 82(2): 77-84.

- [6] Xu H, Liu W, Cao L, et al. Preparation of porous TiO₂/ZnO composite film and its photocathodic protection properties for 304 stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2014, 301(10): 508-514.
- [7] Bu Y, Ao J P. A review on photoelectrochemical cathodic protection semiconductor thin films for metals[J]. Green Energy & Environment, 2017, 2(3): 331-363.
- [8] Cecilia J, Arango-Diaz A, Marrero-Jerez J, et al. Catalytic behaviour of CuO-CeO₂ systems prepared by different synthetic methodologies in the CO-PROX reaction under CO₂-H₂O feed stream[J]. Catalysts, 2017, 7(6): 160-169.
- [9] Biermann A, Aubert T, Baumeister P, et al. Interface formation during silica encapsulation of colloidal CdSe/CdS quantum dots observed by in situ Raman spectroscopy[J]. Journal of Chemical Physics, 2017, 146(13): 171-327.
- [10] Saleem M F, Zhang H, Deng Y, et al. Resonant Raman scattering in nanocrystalline thin CdS film[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2016, 5(7): 705-713.
- [11] 马丽敏. 硫化镉光电薄膜的制备及表征[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [12] Hattori T, Kobayashi K, Ozawa M. Size effect of Raman scattering on CeO₂ nanocrystal by hydrothermal method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(1S): 01AE06.
- [13] Mani A D, Nandy S, Subrahmanyam C. Synthesis of CdS/CeO₂ nanomaterials for photocatalytic H₂ production and simultaneous removal of phenol and Cr(VI)[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(4): 2350-2357.

(下转第 155 页)