

# 添加不同稀土元素对固体包埋法在304不锈钢表面制备Ti/Cr-RE双层涂层电化学性能的影响

邢学刚<sup>1</sup>, 杨耀军<sup>2</sup>, 卢盼娜<sup>1</sup>, 韩志军<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 力学学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学 表面工程研究所, 太原 030024)

**摘要:** 目的 选择合适的稀土制备Ti/Cr-RE双层涂层, 提高不锈钢的耐腐蚀性能。方法 采用两步粉末包埋法, 先在304不锈钢表面渗Ti, 再制备稀土改性Cr涂层, 获得Ti/Cr-RE双层涂层。通过添加不同的稀土氧化物 $Y_2O_3$ 和 $CeO_2$ , 获得两种双层涂层, 对比分析涂层的表面形貌、断面形貌及物相组成, 利用电化学测试方法测定304不锈钢基体及两种Ti/Cr-RE双层涂层在3.5% (质量分数) NaCl溶液中的电化学腐蚀性能。结果 添加不同稀土元素钇、铈, 都能在渗Ti不锈钢表面形成一层致密、连续的稀土改性渗铬层。在两种稀土元素改性的Cr涂层中, 稀土元素分别与Cr, Fe, Ni, Ti形成了金属间化合物。304不锈钢基体的自腐蚀电位为 $-0.324\text{ V}$ , 腐蚀电流密度为 $0.1363\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 钇改性铬涂层的自腐蚀电位为 $-0.341\text{ V}$ , 腐蚀电流密度为 $0.2058\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 铈改性铬涂层则具有更高的自腐蚀电位( $-0.263\text{ V}$ )及更低的腐蚀电流密度( $0.03086\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )。结论 钇改性铬涂层不能提高304不锈钢基体的耐腐蚀性能, 铈改性铬涂层可以明显提高基体的耐腐蚀性能。

**关键词:** 304不锈钢; 双层涂层; 稀土元素; 电化学腐蚀; 固体包埋法

**中图分类号:** TG174.445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)11-0007-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.002

## Influence of Adding Various Rare Earth Elements on Electrochemical Corrosion Resistance of Ti/Cr-RE Coatings Fabricated on 304 Stainless Steel by Pack Cementation

XING Xue-gang<sup>1</sup>, YANG Yao-jun<sup>2</sup>, LU Pan-na<sup>1</sup>, HAN Zhi-jun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**ABSTRACT: Objective** To prepare Ti/Cr-RE coatings on 304 stainless steel with suitable rare earth elements so as to improve

收稿日期: 2015-08-31; 修订日期: 2015-10-05

Received: 2015-08-31; Revised: 2015-10-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(51171125, 11172195); 国家青年基金(E010101); 山西省高等学校科技创新项目(2014jyt03); 太原理工大学校青年基金(2012L073, 2013T065)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51171125, 11172195), National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (E010101), Shanxi Province Programs for Science and Technology Innovation (2014jyt03), and Youth Foundation of Taiyuan University of Technology (2012L073, 2013T065)

**作者简介:** 邢学刚(1989—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要研究金属材料表面改性。

**Biography:** XING Xue-gang (1989—), Male, from Shanxi, Master graduate student, Research focus: surface modification of metallic materials.

**通讯作者:** 王鹤峰(1978—), 男, 山西人, 副教授, 主要从事医用金属材料表面生物改性等方面的研究。

**Corresponding author:** WANG He-feng (1978—), Male, from Shanxi, Associate professor, Research focus: surface biological modification of biomedical metallic materials.

corrosion resistance of stainless steel. **Methods** The Ti coating and Cr-RE coating were deposited on 304 stainless steel successively via pack cementation. In order to obtain two different Ti/Cr-RE coatings,  $Y_2O_3$  and  $CeO_2$  were used as RE sources. The sample surface and cross-sectional micrographs were investigated by scanning electron microscopy (SEM). The phase composition of sample surface was detected by X-ray diffraction (XRD). Electrochemical experiments were carried out to investigate the corrosion resistance of the 304 stainless steel substrate and the two kinds of Ti/Cr-RE double-layer coating in 3.5% NaCl solution. **Results** It was concluded from all the outcomes that the dense and continuous Cr-RE coatings can be formed on the Ti stainless steel by adding rare earth elements Y and Ce. In the two kinds of Cr coatings modified by rare earth elements, intermetallic compounds were formed from the rare earth elements with Cr, Fe, Ni, and Ti respectively. The corresponding corrosion potential of 304 stainless steel was  $-0.324\text{ V}$ , and the corrosion current density was  $0.1363\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . The corresponding corrosion potential of Cr-Y coating was  $-0.341\text{ V}$  and the corrosion current density was  $0.2058\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , while the Cr-Ce coating presented higher corresponding corrosion potential of  $-0.263\text{ V}$  and lower corrosion current density of  $0.03086\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . **Conclusion** The Cr-Y coating does not show a promotion in electrochemical corrosion resistance compared with 304 stainless steel, while the Cr-Ce coating presents a good performance in electrochemical corrosion resistance in 3.5% NaCl solution.

**KEY WORDS:** 304 stainless steel; duplex coatings; rare earth element; electrochemical corrosion resistance; pack cementation

奥氏体不锈钢是工业中最常见的不锈钢之一,具有良好的机械加工性能、力学性能以及抗氧化性能,大量应用于石油、化学、轻工、食品、医药等行业。其中,304 不锈钢以其优秀的耐腐蚀性能被广泛应用于食品、家具、医疗器材、化工等领域<sup>[1-2]</sup>。

不锈钢基体暴露于盐溶液中时,易发生点蚀或晶间腐蚀,特别是在富含  $Cl^-$  的溶液中极易发生点蚀。点蚀会引起不锈钢整体强度降低,并且蚀孔的存在容易使材料上形成应力集中。因此,不锈钢的应用在诸多领域受到了限制<sup>[3-7]</sup>。针对不锈钢在  $Cl^-$  溶液中的腐蚀防护,前人在研究不锈钢腐蚀机理的基础上,提出各种减缓不锈钢腐蚀的方法,如添加缓蚀剂、阴极保护、表面处理等。郝震等人<sup>[8]</sup>在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中添加钼酸钠、葡萄糖酸钠及其复配物作为缓蚀剂,得到结论:这两种缓蚀剂使得不锈钢在中性 NaCl 溶液中的点蚀电位提高,对不锈钢的点蚀具有良好的抑制作用。吴震弘等人<sup>[9]</sup>用浸渍-提拉法在 304 不锈钢表面制备  $TiO_2$  薄膜,经过  $400\text{ }^\circ\text{C}$  热处理后,得到单一锐钛矿晶型的  $TiO_2$  薄膜,对 304 不锈钢的阴极保护性能较好。高原等人<sup>[10]</sup>对低碳钢表面进行等离子铬镍共渗,并用超高真空磁控溅射及离子镀沉积设备在 4Cr13 不锈钢表面沉积氮化钛薄膜,实验结果表明,与基体材料相比,这两种薄膜的耐腐蚀性能都得到了成倍的提高。在实际生产中,上述方法在某些方面的适用会受到一些限制,针对某些大型工件或者异形工件,人们期望采用一种更为简便、经济的方法来有效抑制  $Cl^-$  对 304 不锈钢的腐蚀。

固体包埋法是一种原位的化学气相沉积技术,一般是在高温、真空或者保护性气氛中,将试样包埋于

固体粉末渗剂中,基于气体卤化物盐的作用,在试样表面沉积镀层<sup>[11-13]</sup>。林乃明等<sup>[14-15]</sup>通过固体包埋法在 P110 不锈钢表面制备了稀土改性 Cr 涂层,有效地改善了涂层的厚度和显微硬度。Min Qiao 等<sup>[16]</sup>用  $NH_4I+NH_4Cl$  作为催化剂,在镍基体上沉积了 Co-Al-Y 涂层,研究表明,涂层中含较多钴元素与少量钇元素时,其抗循环氧化性能最好。因此,有望通过采用适当的包埋工艺对 304 不锈钢进行表面处理,获得均匀的涂层,提高防腐性能。

有研究表明,添加稀土元素或其氧化物能够改善合金的微观组织结构,使晶粒细化,在合金表面析出富稀土相,从而改善合金的耐腐蚀性能及高温抗氧化性能<sup>[17-18]</sup>。此外,经 Ti 处理的基体表面会形成含 Ti 固溶体,使外层镀膜与基体结合更紧密,防止镀膜剥落,同时防止表面腐蚀向内部扩展<sup>[19]</sup>。文中通过固体包埋法对 304 不锈钢先渗 Ti,再制备稀土改性 Cr 涂层,形成双层涂层结构,并比较了添加不同稀土对双层改性涂层电化学性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 制备双层涂层

选用 304 不锈钢作为基材,试样尺寸为  $\phi 16\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,其化学成分(以质量分数计)为:0.08% C, 2.00% Mn, 0.035% P, 0.03% S, 1.0% N, 1.0% Si, 18.00% Cr, 8.00% Ni, Fe 余量。试样表面经 SiC 砂纸逐级打磨至 1500#,金刚石研磨膏研磨至 5000#后,放入丙酮中超声波清洗,烘干备用。

渗 Ti 包埋粉末的组成(以质量分数计)为:49%

海绵钛(被渗物质),50%高温焙烧  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (填充剂),1%  $\text{I}_2$ (催化剂)。将三种粉末放入球磨机中充分研磨,使其混合均匀。在不锈钢坩埚内,将304不锈钢试样包埋于该混合粉末中。为在高温条件下隔绝氧气,防止试样被氧化,在包埋粉末上层放置玻璃粉末,坩埚加盖,实验装置如图1所示。然后将坩埚放入箱式电阻炉中加热至150℃,除水分3h,再升温至900℃,保温6h,最后空冷至室温。将试样取出,放入丙酮中超声清洗,备用。

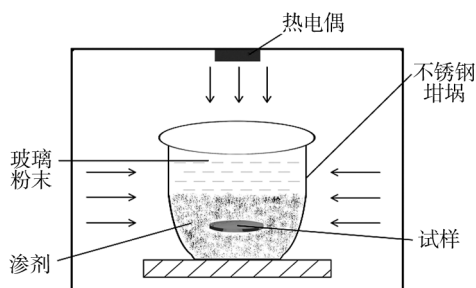


图1 包埋装置示意

Fig.1 Schematic diagram of pack cementation device

制备稀土改性Cr涂层的包埋粉末组成(以质量分数计)为:45%高温焙烧  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (填充剂),45%CrN(供Cr剂),3%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ (催化剂),7%稀土氧化物。选用CrN作为供Cr剂的原因是,CrN在高温条件下会发生分解,从而创造一个具有一定压力的氮氛围,有助于包渗反应的进行。实验中还选用  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  两种稀土氧化物对第二层渗Cr涂层进行改性,在相同的温度、时间条件下对渗Ti不锈钢进行二次包渗反应,得到Ti/Cr-RE双层涂层。

## 1.2 表征及测试

采用DX-2700型X-射线衍射仪(XRD,Cu靶)分析

渗层的相结构,借助TESCAN-MIRA 3型扫描电子显微镜(SEM)观察涂层的表面形貌及截面形貌。观察截面形貌前,先用线切割机将涂层试样沿截面切开,对截面打磨清洗并抛光,再用  $\text{FeCl}_3$  的HCl溶液腐蚀。

采用CHI600E型电化学工作站,测试304不锈钢基体及两种稀土改性Ti/Cr-RE双层涂层在3.5%(质量分数)NaCl溶液中的电化学腐蚀性能。电化学测试采用三电极体系:待测试样作为工作电极(WE),用铜导线连接,预留1  $\text{cm}^2$  反应面积,其余部分用704硅胶涂抹密封;铂片作为辅助电极;甘汞电极作为参比电极(SCE)。将各电极在NaCl溶液中浸泡30min,然后依次测得开路电位以及极化曲线,开路电位的测试时间为1800s,动电位极化曲线的电位测试范围为-1~1V,扫描速率为1  $\text{mV/s}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗层组织形貌

图2为304不锈钢基体及稀土改性后的Ti/Cr-RE涂层试样的表面形貌对比。如图2b所示,渗Ti 304不锈钢经  $\text{Y}_2\text{O}_3$  改性渗Cr处理后,表面形成了不均匀的团簇状突起,突起之间还分布着一些微孔。这是金属材料经化学热处理后的典型表面特征<sup>[20]</sup>。微孔是由空位迁移、铬原子扩散以及CrN分解产生的氮气进入三方面共同作用产生的<sup>[21]</sup>。如图2c所示,渗Ti 304不锈钢经  $\text{CeO}_2$  改性渗Cr处理后,表面分布着均匀的颗粒状突起,未见孔洞与裂纹。对于渗Cr工艺而言,突起物为Cr与C形成的碳化物,这些细小的析出物均匀分布于试样表面,可以显著提高试样的强度和硬度。这与孟君晟等人在Ni基体上通过固体包

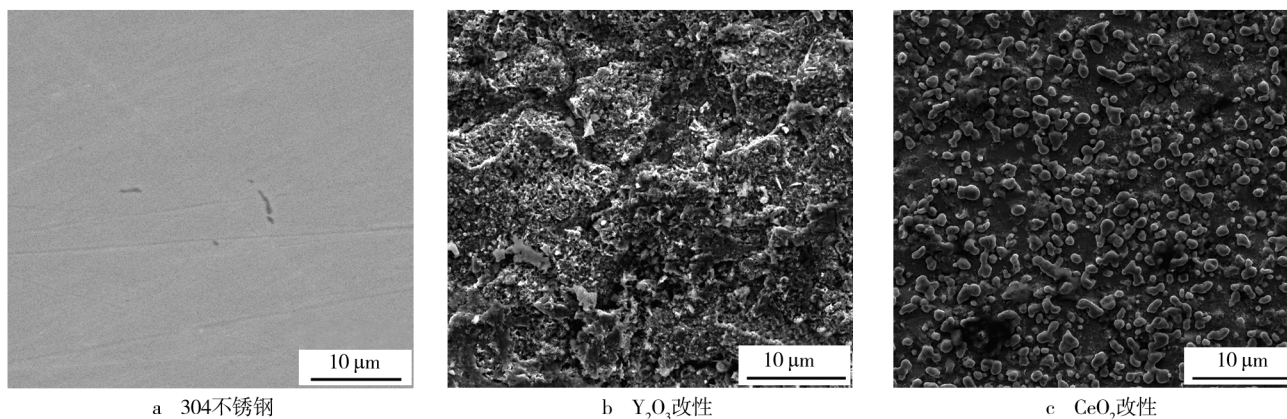


图2 304不锈钢与Ti/Cr-RE双层涂层表面形貌

Fig.2 Surface micrographs of 304 stainless steel and Ti/Cr-RE coatings: a) 304 stainless steel, b)  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{CeO}_2$



埋法渗 Cr 所得到的结果相近<sup>[22]</sup>。

图3为双层涂层的截面形貌。可以看出,添加钇或铈,都在渗 Ti 304 不锈钢表面制得了稀土改性 Cr 涂层,并且渗 Ti 层与 Cr-RE 涂层均匀、连续,界面分明。Cr 原子在试样表面吸附后,在表面层形成巨大的 Cr 浓度梯度,使得 Cr 原子向内部扩散。同时高温条件下,304 不锈钢基体内部的 Fe 原子向外扩散。由于渗 Ti 层的存在,Cr,Ti,Fe 原子在渗 Ti 层形成固溶体,使

得双层涂层与基体的结合强度更高。由图3可得, $Y_2O_3$  改性双层涂层中,渗 Ti 层厚度约为 40  $\mu m$ ,Cr- $Y_2O_3$  涂层厚度约为 30  $\mu m$ ;  $CeO_2$  改性双层涂层中,渗 Ti 层厚度约为 50  $\mu m$ ,Cr- $CeO_2$  涂层厚度约为 20  $\mu m$ 。

图4为304 不锈钢及 Ti/Cr-RE 双层涂层的 XRD 图谱。在稀土元素钇和铈改性的 Cr 涂层中,稀土元素由于与 Cr,Fe,Ni,Ti 的原子半径均比较接近,因此分别与它们形成了金属间化合物。

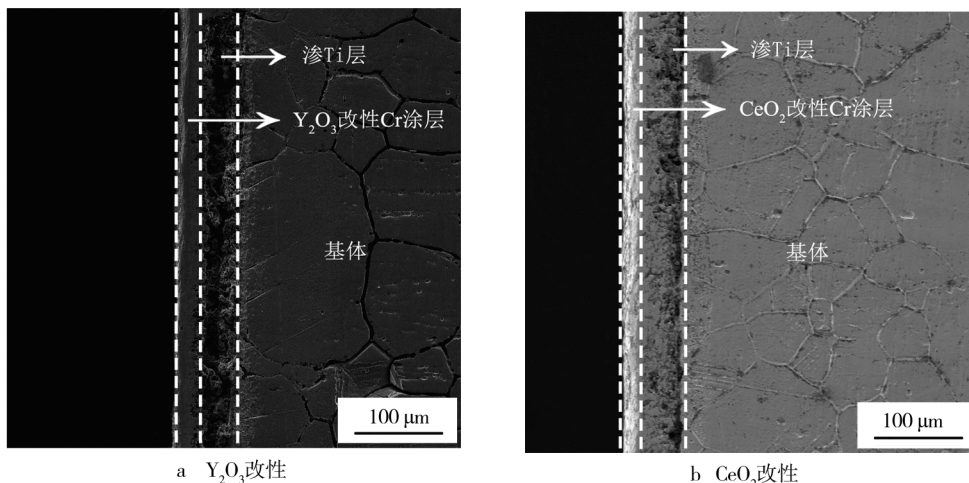


图3 Ti/Cr-RE 双层涂层截面形貌

Fig. 3 SEM cross-sectional micrographs of Ti/Cr-RE coatings: a)  $Y_2O_3$ , b)  $CeO_2$

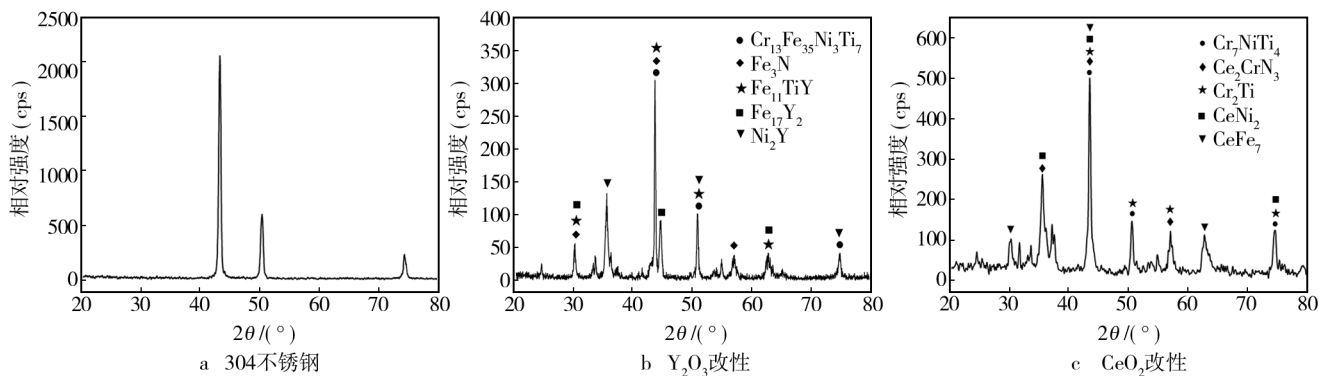


图4 304 不锈钢与 Ti/Cr-RE 双层涂层 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of 304 stainless steel and Ti/Cr-RE coatings: a) 304 stainless steel, b)  $Y_2O_3$ , c)  $CeO_2$

## 2.2 渗层电化学性能

304 不锈钢及 Ti/Cr-RE 双层涂层的开路曲线见图5,曲线反映出试样开路电位随时间的变化。304 不锈钢的开路电位在实验开始便迅速降低,在 800 s 左右达到稳定并保持在 -0.25 V。开路电位由下降逐步趋于平稳,表明 304 不锈钢发生了钝化,逐渐生成了稳定的腐蚀产物膜。 $Y_2O_3$  改性双层涂层的开路电位整体呈现出下降的趋势,但前后差值并不大,整个

测试过程较为平稳,最终开路电位大约为 -0.225 V。 $CeO_2$  改性双层涂层的开路电位相比其他两种试样明显升高,达到了 0 V 左右,曲线开始出现小幅下降,然后缓慢上升,并逐步平稳,表明其腐蚀倾向逐步降低。

在整个测试过程中, $Y_2O_3$  与  $CeO_2$  改性双层涂层的曲线平稳,波动小,并且  $CeO_2$  改性双层涂层的开路电位始终高于其他试样,说明其具有最高的耐腐蚀性。

图6为304 不锈钢及 Ti/Cr-RE 双层涂层的极化曲线。304 不锈钢基体在电极电位达到 0.25 V 之后

开始钝化;在 0.25 ~ 0.3 V 之间,处于钝化—活化—再钝化的动态变化中;当电极电位大于 0.3 V 后完全钝化,腐蚀电流不再随着电极电位的增大而增大。 $\text{Y}_2\text{O}_3$  改性双层涂层试样在电极电位约 -0.25 V 时发

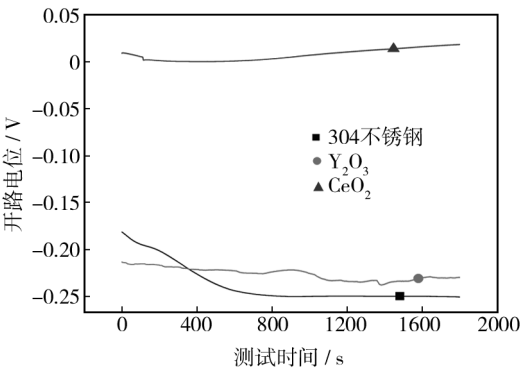


图 5 304 不锈钢与 Ti/Cr-RE 双层涂层的开路电位-时间曲线  
Fig. 5 The curve of open circuit potential (OCP) as a function of time for 304 stainless steel and Ti/Cr-RE coating in 3.5% NaCl solution

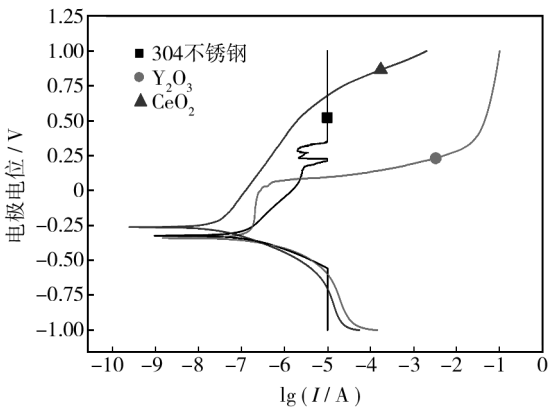


图 6 304 不锈钢与 Ti/Cr-RE 双层涂层的极化曲线  
Fig. 6 Polarization curves of 304 stainless steel and Ti/Cr-RE coating in 3.5% NaCl solution

生钝化;在 0 V 时到达临界电位,渗层表面发生点蚀,此后电流急剧增大,该临界电位即为击穿电位。点蚀的发生说明该体系钝化后,还未达到过钝化电位时,合金表面的钝化膜发生了局部破坏,使得阳极电流密度急剧上升<sup>[23]</sup>。 $\text{CeO}_2$  改性双层涂层试样的极化曲线上未见钝化区,阳极极化曲线较为平缓。在极化过程中,阳极极化曲线表明了电位正向移动快慢和钝化倾向大小,阳极极化曲线平坦说明极化小,阳极性能较好<sup>[24]</sup>。加入稀土  $\text{Y}_2\text{O}_3$  或  $\text{CeO}_2$  时,阴极极化曲线的 Tafel 斜率差别不大,表明了添加这两种不同的稀土,阴极反应是相近的<sup>[25]</sup>。

对阳极和阴极极化曲线分支分别作切线,根据切线交点的横坐标可算得腐蚀电流密度。试样的自腐蚀电位与腐蚀电流密度列于表 1。 $\text{Y}_2\text{O}_3$  改性双层涂层与 304 不锈钢的自腐蚀电位接近,说明 Y 的加入对自腐蚀电位影响较小。由于  $\text{Y}_2\text{O}_3$  改性双层涂层表面钝化膜局部发生了点蚀,因此其腐蚀电流密度大于 304 不锈钢基体。 $\text{CeO}_2$  改性双层涂层试样的自腐蚀电位则明显提高,腐蚀电流密度降低,说明其耐腐蚀性能较好。

304 不锈钢及 Ti/Cr-RE 双层涂层腐蚀后的表面形貌如图 7 所示。可以看到,304 不锈钢基体表面发生

表 1 试样的自腐蚀电位与腐蚀电流密度  
Tab.1 The corresponding corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) and the corrosion current density ( $J_{\text{corr}}$ ) of the samples

试样	$E_{\text{corr}}$ (vs. SCE)/V	$J_{\text{corr}}/$ ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
304 不锈钢	-0.324	0.1363
$\text{Y}_2\text{O}_3$ 改性双层涂层	-0.341	0.2058
$\text{CeO}_2$ 改性双层涂层	-0.263	0.030 86

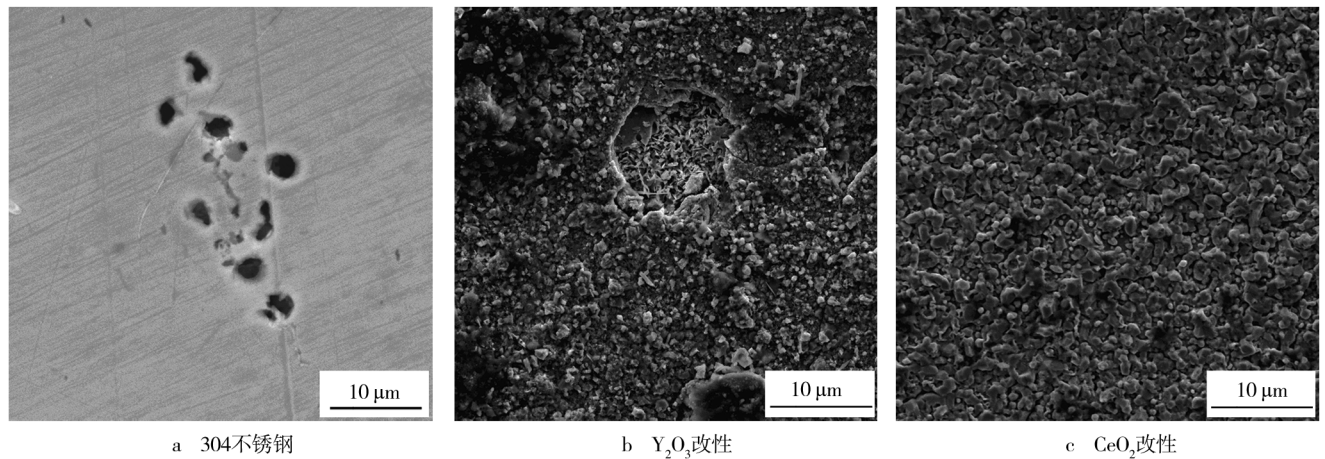


图 7 304 不锈钢与 Ti/Cr-RE 双层涂层腐蚀后的表面形貌  
Fig.7 Surface micrographs of 304 stainless steel and Ti/Cr-RE coating after electrochemical corrosion;a) 304 stainless steel, b)  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{CeO}_2$

了点蚀,形成了孔洞。同样, $Y_2O_3$  改性双层涂层表面也发生了点蚀,并且蚀孔更大。这也是造成极化曲线中电流急剧增大的原因。 $CeO_2$  改性双层涂层表面未见明显的点蚀发生,说明其在 3.5% NaCl 溶液中的耐腐蚀性能最好。

### 3 结论

1) 通过两步固体包埋法在 304 不锈钢表面制得了 Ti/Cr-RE 双层涂层。涂层均匀、连续,外层渗 Cr 层中,稀土元素与 Cr, Fe, Ni, Ti 形成了金属间化合物。

2) 添加不同稀土元素钇、铈,所得涂层的表面组织形貌与厚度存在差异。添加钇元素的涂层表面有不均匀突起,并存在微孔结构;添加铈元素的涂层表面有均匀碳化物析出。

3) 电化学测试结果表明,相比 304 不锈钢基体, $Y_2O_3$  改性双层涂层的击穿电位较低,钝化区短,不能提高材料的耐腐蚀性能。 $CeO_2$  改性双层涂层虽未发生钝化,但自腐蚀电位提高,腐蚀电流密度降低,在含  $Cl^-$  的溶液中表现出良好的耐腐蚀性。

### 参考文献

- [1] 杜存臣. 奥氏体不锈钢在工业中的应用[J]. 化工设备与管道, 2003(2): 54—57.  
DU Cun-chen. Application of Austenitic Stainless Steel in Industry[J]. Process Equipment & Piping, 2003(2): 54—57.
- [2] 丁国清, 杨海洋, 杨万国, 等. 两种不锈钢在冷却塔冷凝酸液中的耐蚀性能[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 13—17. DING Guo-qing, YANG Hai-yang, YANG Wan-guo, et al. Corrosion Resistance Analysis of Two Stainless Steels Exposed in Cooling Tower Condensed Acid[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 13—17.
- [3] SINGH R, CHATTORAJ I, KUMAR A, et al. The Effects of Cold Working on Sensitization and Intergranular Corrosion Behavior of AISI 304 Stainless Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34(11): 2441—2447.
- [4] TIAN W, DU N, LI S, et al. Metastable Pitting Corrosion of 304 Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 85: 372—379.
- [5] 罗宏, 龚敏. 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 357—360.
- [6] LUO Hong, GONG Min. On Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(5): 357—360.
- [6] 张明明, 孟君, 黄晓义, 等. 利用 SECM 技术研究 304 不锈钢的点蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(6): 482—485.
- [7] ZHANG Ming-ming, MENG Jun, HUANG Xiao-yi, et al. Pitting Corrosion Behaviors of 304 Stainless Steel by Studied Spatial Electrochemical Scanning Microscopy[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(6): 482—485.
- [7] ALBRIMI Y A, ADDI A A, DOUCH J, et al. Inhibition of the Pitting Corrosion of 304 Stainless Steel in 0.5 M Hydrochloric Acid Solution by Heptamolybdate Ions[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 522—528.
- [8] 郝震, 戴恒彪, 李广州, 等. 304 不锈钢在氯化钠介质中点蚀缓蚀剂的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 123—131.
- [8] HAO Zhen, DAI Heng-biao, LI Guang-zhou, et al. Study on Inhibitors for the Pitting Corrosion of 304 Stainless Steel in Sodium Chloride Medium[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 123—131.
- [9] 吴震弘, 汪洋, 冯佩, 等.  $TiO_2$  薄膜的制备及其对 304 不锈钢防腐性能的研究[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(2): 179—184.
- [9] WU Zhen-hong, WANG Yang, FENG Pei, et al. Preparation of  $TiO_2$  Thin Films and Study of Its Corrosion Resistance Performance for 304 Stainless Steel[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2014, 31(2): 179—184.
- [10] 高原, 韦文竹, 袁琳, 等. 等离子铬镍共渗层与氮化钛薄膜的耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 129—134.
- [10] GAO Yuan, WEI Wen-zhu, YUAN Lin, et al. Corrosion Resistance of Plasma Cr-Ni Alloyed Layer and TiN Film[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(6): 129—134.
- [11] 李明, 宋力昕, 乐军, 等. 铈表面固体粉末包埋渗硅研究[J]. 无机材料学报, 2005, 20(3): 764—768.
- [11] LI Ming, SONG Li-xin, LE Jun, et al. Microstructure and Mechanism of Pack Siliconizing on Niobium[J]. Journal of Inorganic Materials, 2005, 20(3): 764—768.
- [12] 李凌峰, 沈嘉年, 李谋成, 等. 不锈钢表面粉末包埋渗铝过程及渗铝层表征[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(2): 79—82.
- [12] LI Ling-feng, SHEN Jia-nian, LI Mou-cheng, et al. Pack Aluminizing Process and Characterization of Aluminized Layer on Stainless Steels[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(2): 79—82.
- [13] 赵陆翔, 郭喜平, 姜螭. 铈基合金包埋渗法制备抗氧化



- 硅化物涂层及其组织形成[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 596—601.
- ZHAO Lu-xiang, GUO Xi-ping, JIANG Yuan-yuan. Preparation and Structural Formation of Oxidation-resistant Silicide Coatings on Nb-based Alloy by Pack Cementation Technique [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 596—601.
- [14] LIN N, XIE F, WU X, et al. Influence of Process Parameters on Thickness and Wear Resistance of Rare Earth Modified Chromium Coatings on P110 Steel Synthesized by Pack Cementation[J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(4): 396—400.
- [15] LIN N, XIE F, ZHOU J, et al. Microstructures and Wear Resistance of Chromium Coatings on P110 Steel Fabricated by Pack Cementation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17: 1155—1162.
- [16] QIAO M, ZHOU C. Codeposition of Co-Al-Y on Nickel Base Superalloys by Pack Cementation Process [J]. Corrosion Science, 2013, 75: 454—460.
- [17] 程亮, 李强, 董鲜峰, 等. 稀土元素钇对粉末冶金制备 V-5Cr-5Ti 合金微观组织的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 14—18.
- CHENG Liang, LI Qiang, DONG Xian-feng, et al. Effect of Yttrium on Microstructure of V-5Cr-5Ti Alloys Prepared by Powder Metallurgy [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2015, 20(1): 14—18.
- [18] 杨珍, 鲁金涛, 赵新宝, 等. 稀土元素对合金高温氧化的影响[J]. 中国稀土学报, 2014, 32(6): 641—649.
- YANG Zhen, LU Jin-tao, ZHAO Xin-bao, et al. Effect of Rare Earth Elements on High Temperature Oxidation of Metals [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2014, 32(6): 641—649.
- [19] 卜根涛, 高原, 王成磊, 等. 碳钢渗 Ti 及氮化在硝酸中的耐腐蚀性研究[J]. 热加工工艺, 2010(14): 127—130.
- BU Gen-tao, GAO Yuan, WANG Cheng-lei, et al. Research on Corrosion Resistance of Carbon Steel after Infiltrated Ti and Plasma Nitriding in  $\text{HNO}_3$  Solution [J]. Hot Working Technology, 2010(14): 127—130.
- [20] HOUNGNINOU C, CHEVALIER S, LARPIN J P. Synthesis and Characterisation of Pack Cemented Aluminide Coatings on Metals [J]. Applied Surface Science, 2004, 236(1): 256—269.
- [21] 齐涛, 郭喜平. 钕硅化物基合金  $\text{Si-Y}_2\text{O}_3$  共渗涂层的组织形成[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1822—1828.
- QI Tao, GUO Xi-ping. Structure Formation of  $\text{Si-Y}_2\text{O}_3$  Co-deposition Coatings on Nb-Silicide-based Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1822—1828.
- [22] MENG J, JI Z. Effect of Different Fillers on Oxidation Behavior of Low-temperature Chromizing Coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(6): 1785—1790.
- [23] 陈红梅, 范常有, 柳玉柱, 等. Ce 含量对 Al 在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀行为影响的研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(5): 657—661.
- CHEN Hong-mei, FAN Chang-you, LIU Yu-zhu, et al. Effect of Ce on Corrosion Behaviors of Aluminum in 3.5% NaCl Solution [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(5): 657—661.
- [24] 王紫鹏, 姜丹, 王晓婧, 等. 稀土 Y 对 AZ63 镁牺牲阳极电化性能的影响研究[J]. 陕西电力, 2010, 38(8): 47—49.
- WANG Zi-peng, JIANG Dan, WANG Xiao-jing, et al. Influence of Yttrium Addition on Electrical Properties of AZ63 Magnesium Sacrificial Anode [J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(8): 47—49.
- [25] 李高林, 文九巴, 贺俊光, 等. 稀土 Y 对 AZ80 镁合金组织及耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(3): 52—56.
- LI Gao-lin, WEN Jiu-ba, HE Jun-guang, et al. Effect of Yttrium Addition on Microstructure and Corrosion Resistance of AZ80 Magnesium Alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(3): 52—56.