

电镀锌稀土转化膜在 5%NaCl 溶液中耐蚀性能及耐蚀机理的研究

Study of Corrosion Resistance and Anticorrosion Mechanism of Rare Earth Conversion Coatings on Zinc Plating in 5% NaCl Solution

章江洪¹, 张英杰²

(1 昆明理工大学 理学院, 昆明 650093;

2 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

ZHANG Jiang-hong¹, ZHANG Ying-jie²

(1 Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2 Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

摘要: 通过 SEM, XPS, XRD 分析稀土转化膜形貌、结构及物相, 由浸泡实验、中性盐雾实验、电化学测量电化学参数, 对比镀锌层、稀土转化膜及低铬酸盐转化膜样品的耐蚀性能, 并计算稀土转化膜在 5% NaCl 溶液中的腐蚀动力学参数。结果表明: 稀土转化膜是由微小颗粒堆积而成的完整、细密的锌和铈氧化物及氢氧化物的复合膜层, 该膜层对基体镀锌层的覆盖性较好, 阻碍了 O₂ 的传输和电子的传递, 对腐蚀的阴、阳极反应均有不同程度的抑制, 降低腐蚀动力, 有效地保护了基体不受腐蚀介质的侵蚀, 可有效提高镀锌层的耐蚀性能, 其耐蚀性能优于低铬酸盐转化膜。

关键词: 镀锌层; 稀土转化膜; 耐蚀性能; 耐蚀机理

中图分类号: TG 174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0084-05

Abstract: The morphology, structure and phase of rare earth conversion coating were characterized by SEM, XPS and XRD. The corrosion resistance of rare earth conversion coating, zinc coating and low-chromium conversion coating were compared by immersion experiments, the neutral salt spray tests and electro-chemical testing methods. The corrosion kinetic parameters of rare earth conversion coating were measured in 5% NaCl solution. The results showed that rare earth conversion coating was formed by tiny fine particles without cracks and less defects, which was composed of zinc and cerium oxides and hydroxides, hindered O₂ transmission and electronic transmission, inhibited both reactions of anodic and cathodic of corrosions, decreased corrosion kinetics and protected matrix from corrosion effectively. It improved the corrosion resistance performance of zinc plating, whose corrosion resistance was better than that of low-chromium conversion coating.

Key words: zinc plating; rare earth conversion coating; corrosion resistance; anticorrosion mechanism

对锌及其合金进行钝化处理可有效提高其耐蚀性, 通常采用成本低廉、钝化液稳定、工艺操作简单的铬酸盐的钝化处理工艺。近些年来, 随着人们环境保护意识的增强, 从保护生态环境及人类健康的角度出发, 铬酸盐的使用受到越来越严格的限制, 我国明确指出把发展环境保护技术放在优先位置, 因此铬酸盐钝化技术将面临严峻挑战。稀土转化膜技术无毒无污染, 同时我国是世界稀土资源主要拥有国, 我国稀土资源储量占全球的 30% 左右, 因此开发稀土转化膜技

术, 将有望作为替代传统铬酸盐工艺的无铬钝化技术之一^[1-5]。

目前, 在铝及合金表面制备的稀土转化膜已具有较好的耐蚀性能^[6-10], 而锌及合金稀土转化膜的耐蚀性能仍有较大的提升空间, 本文将在前期工作的基础上, 针对化学浸泡法已开发出的电镀锌稀土转化膜, 对比研究稀土转化膜、镀锌层、低铬转化膜在 5% (质量分数, 下同) NaCl 溶液中耐蚀性能, 并探讨电镀锌稀土转化膜耐蚀机理。

1 实验

1.1 试样的准备

镀锌层的制备: 采用氯化钾体系(ZnCl_2 60~100g $\cdot \text{L}^{-1}$, KCl 180~240g $\cdot \text{L}^{-1}$, 开缸剂 20mL $\cdot \text{L}^{-1}$, 光亮剂 10mL $\cdot \text{L}^{-1}$, 调整剂 10mL $\cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 4.5~5.5, 电流密度 1.5A $\cdot \text{dm}^{-2}$), 在室温下电镀 20min, 镀层厚度采用 HCC-24 涂层测厚仪进行测定, 试样镀层厚度 6~10 μm 。

稀土转化膜的制备: 将锌镀层浸泡于以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为主盐, 30% H_2O_2 为氧化剂, BN (自制) 为成膜促进剂, pH = 2.4 的处理液中 120s, 水洗干燥待用。

低铬转化膜的制备: 将锌镀层浸泡于传统的三价铬兰白钝化液中, 三价铬兰白钝化液配方为: CrCl_3 8~12g $\cdot \text{L}^{-1}$, HNO_3 6mL $\cdot \text{L}^{-1}$, NaF 6g $\cdot \text{L}^{-1}$, 室温下钝化处理 5~10s, 水洗干燥待用。

1.2 实验方法

SEM 检测: S-4300 型冷场发射扫描电子显微镜;

XPS 检测: PH15500 型, $\text{MgK}\alpha$ 射线为激发源, 能谱采用 $\text{Cl}1s$ (284.8eV) 进行校正, 真空度 6.6×10^{-7} Pa, 功率 200W; XRD 检测: D/max-2200 型, Cu 靶, 电压 36kV, 电流 36mA, 扫描速度 $5(^{\circ})/\text{min}$ 。

浸泡实验: 室温下进行, 待测定试样的四周及背部均用环氧树脂密封, 仅露待测表面的面积为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$, 将试样全浸入到 200mL 5% NaCl 溶液的烧杯中。实验前分别称量不同试样的质量, 实验过程中观察并记录试样表面被腐蚀面积及所对应的浸泡时间, 浸泡一段时间后取出, 先用硬毛刷刷掉试样表面疏松的腐蚀产物, 然后用质地较硬的刮刀刮擦以除去表面附着较为牢固的腐蚀产物, 再在室温下用 10% NH_4Cl 溶液浸泡约 5min, 取出后先用水冲洗, 再用无水乙醇擦洗试样表面以除去附着物, 待干燥恒重后用分析天平称量各试样的质量, 测定不同试样在盐水浸泡实验中腐蚀面积随时间变化曲线, 并计算不同试样单位时间内的平均腐蚀速率, 对比不同试样的耐盐腐蚀性能。

中性盐雾实验: 所用盐雾腐蚀试验箱型号为 YWX/F-150, 按照 GB6458-86 标准进行中性盐雾实验, 定期观察试样被腐蚀情况, 记录试样开始出白锈和红锈的时间。

电化学测量: 采用 CHI660C 电化学工作站, 测量镀锌层(无转化膜)、稀土转化膜和低铬转化膜在 5% NaCl 溶液中的 Tafel 曲线, 由计算机拟合并计算出该曲线的动力学参数(腐蚀电位 E_{corr} , 腐蚀电流 I_{corr} , 极化电阻 R_p , 阳极 Tafel 斜率 b_a , 阴极 Tafel 斜率 b_b 等)。

测试使用三电极体系, 其中参比电极为 217 型饱和甘汞电极, 辅助电极为 213 型铂电极, 工作电极裁剪为 $15\text{mm} \times 10\text{mm}$, 暴露出 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 面积进行测试, 其余用环氧树脂密封。

2 结果与讨论

2.1 稀土转化膜的 SEM 分析

图 1 和图 2 分别为稀土转化膜层的表面及断面 SEM 图。从图 1 中可看出, 稀土转化膜是由微小颗粒堆积而成的细密、无裂纹、缺陷较少的紧密完整膜层, 该膜层对基体镀锌层的覆盖性好, 能够起到很好的保护作用。

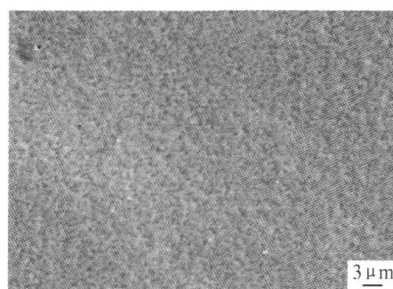


图 1 稀土转化膜层的表面 SEM 图

Fig. 1 SEM surface micrograph of rare earth conversion coatings

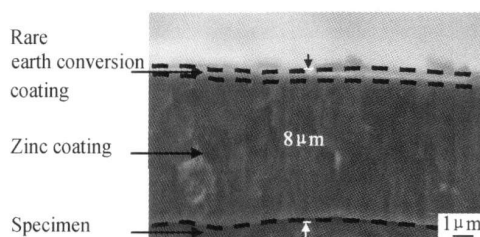


图 2 稀土转化膜的断面 SEM 图

Fig. 2 SEM cross-section micrograph of rare earth conversion coatings

图 3 为转化膜的能谱分析(EDS)谱图, 表 1 为转化膜成分分析表, 从图 3 和表 1 中可知, 稀土转化膜的谱图主要由 Zn, Ce 和 O 的谱峰组成, 除基材 Zn 的峰较明显外, Ce 的含量为 64.68% (原子分数)。

2.2 稀土转化膜 XPS 分析

图 4(a) 是稀土转化膜的全谱图, 从 XPS 检测结果可看出, 稀土转化膜中 Zn2p, Ce3d 及 O1s 具有较强的峰, 说明转化膜中主要包含铈、氧和锌元素; 图 4(b) 为 O1s 谱图, O1s 峰由四个峰叠加而得到, 四个峰的结合能分别为: 529.2, 530.6, 531.6, 533.2eV, 对照标准谱

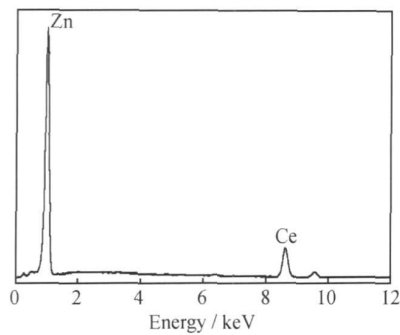


图 3 稀土转化膜的 EDS 能谱图

Fig. 3 EDS spectrum of rare earth conversion coatings

表 1 稀土转化膜成分分析表

Table 1 Elements content of rare earth conversion coating

Element	Mass fraction/ %	Atom fraction/ %
O K	0.57	5.03
Zn K	14.04	30.29
Ce L	85.39	64.68

图, 可知道: 结合能为 529. 2eV 对应的是 Ce—O 键中的氧, 结合能为 530. 6eV 对应的是 Zn—O 键中的氧, 结合能为 533. 2eV 对应的是吸附水中的氧, 而结合能为 531. 6eV^[11] 对应 Ce—OH 键中的氧; 图 4 (c) 为 Zn2p 谱图, 在 Zn2p 高分辨谱图中, 铈转化膜中锌的 Zn2p3 峰出现在 1022. 1eV 处, 对应于 Zn—O 键中的锌, Zn2p1 峰出现在 1045. 24eV, 对应于 Zn—OH 键中的锌; 图 4 (d) 为 Ce3d 谱图, Ce3d 的 XPS 高分辨谱图比较复杂, 根据 Shyu 的报导^[12], 这主要是由于未充满的 4f 轨道, 会与存在的卫星结构和配合基轨道发生杂化而导致的, 对比 Ce⁴⁺ 化合物和 Ce³⁺ 化合物的 Ce3d 谱图, 在结合能为 916. 5eV 所出现的 u''' 仅在 Ce⁴⁺ 化合物中出现, 是 Ce⁴⁺ 的特征峰, 因此转化膜中既存在 Ce³⁺, 又存在着 Ce⁴⁺。故稀土转化膜可能是由锌和铈的氧化物及氢氧化物所构成的复合膜层。

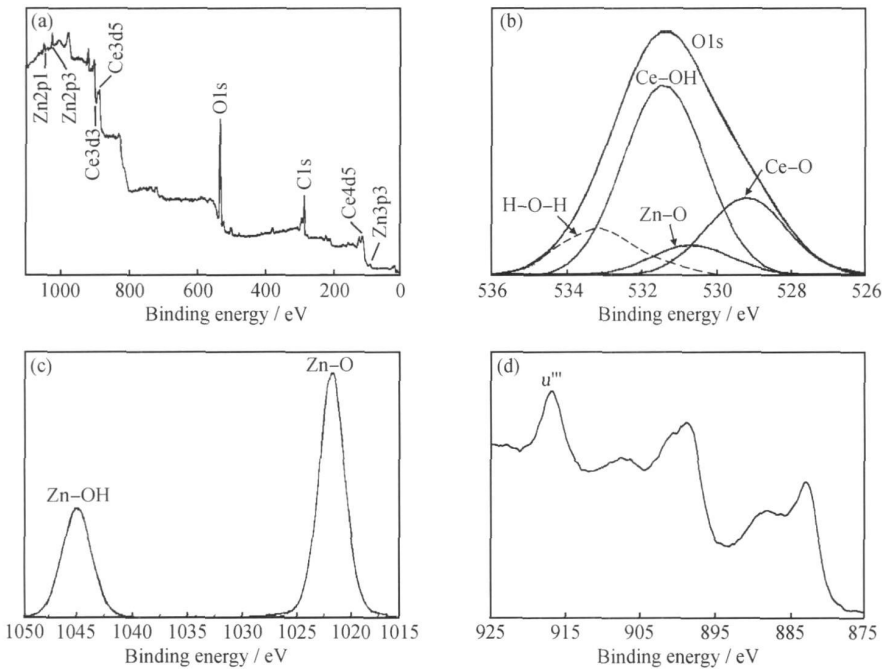


图 4 稀土转化膜 XPS 谱图 (a) 全谱图; (b) O1s 高分辨谱图; (c) Zn2p 高分辨谱图; (d) Ce3d 高分辨谱图

Fig. 4 XPS spectra of rare earth conversion coatings (a) survey XPS spectrum; (b) XPS spectra of O1s region; (c) XPS spectrum of Zn2p region; (d) XPS spectrum of Ce3d region

2.3 稀土转化膜 XRD 分析

稀土转化膜样品的 XRD 图谱如图 5 所示, 图 5 中呈现出非晶态的“馒头峰”, 此外, 图谱中微小尖锐的峰出现, 从而说明转化膜主要为非晶态物质, 局部含有晶态物质, 从物相上看, 主要为 Zn²⁺, Ce³⁺ 及 Ce⁴⁺ 的氧化物及氢氧化物。

2.4 浸泡实验

将纯锌铁合金镀层、锌铁合金镀层稀土转化膜及锌铁合金镀层低铬转化膜样品分别浸泡在 5% NaCl 溶液中, 通过测定不同样品在盐水浸泡实验中腐蚀面积随时间变化曲线, 并计算不同样品单位时间的平均腐蚀速率, 对比三种样品的耐盐水腐蚀性能, 结果如图 6 所示。

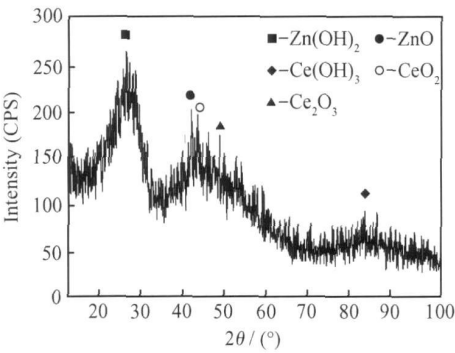


图 5 稀土转化膜的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD spectrum of rare earth conversion coatings

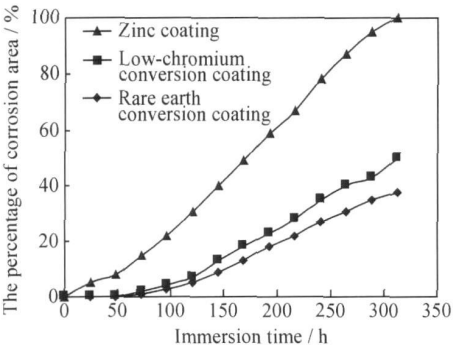


图 6 镀锌层、低铬转化膜及稀土转化膜在 5%NaCl 溶液中浸泡时间与腐蚀面积百分数的关系

Fig. 6 Relationship between immersion time and corrosion area percentage of zinc coating, low-chromium conversion coating and rare earth conversion coating in 5%NaCl

通过计算,无转化膜的镀锌层试样在 5% NaCl 溶液的平均腐蚀速率达 $0.071\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,低铬酸盐转化膜为 $0.026\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,稀土转化膜为 $0.023\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由图 6 可以看出,随着时间的延长三种试样的腐蚀面积均呈上升趋势,其中无转化膜的镀锌层腐蚀面积变化最为明显,而经钝化处理后的镀锌层则有效减少了腐蚀面积,在浸泡的前 100h,转化膜腐蚀面积随时间增加变化缓和,稀土转化膜和低铬转化膜样品具有相同的变化规律;从 120h 开始,低铬转化膜的腐蚀面积开始大于稀土转化膜样品,稀土转化膜表现出比低铬转化膜更优的耐蚀性能。

2.5 中性盐雾实验

考察纯锌铁合金镀层、锌铁合金镀层稀土转化膜

及锌铁合金镀层低铬转化膜样品的耐中性盐雾腐蚀试验的情况。结果发现:镀锌层开始出白锈的时间仅为 2h,开始出红锈的时间为 7h,而转化膜的生成可明显提高镀锌件的耐蚀性能,其中,镀锌层稀土转化膜和镀锌层低铬转化膜出白锈的时间分别为 36h 和 35h,具有相近的出白锈的时间;而镀锌层稀土转化膜出红锈的时间达 73h,比镀锌层低铬转化膜出红锈的时间(62h)长了 9h,具有更佳的耐中性盐雾腐蚀性能。

2.6 电化学测量——Tafel 曲线

金属材料的腐蚀主要是电化学腐蚀,受到阴极过程和阳极过程的共同影响,图 7 是镀锌层、稀土转化膜、低铬转化膜在 5% NaCl 溶液中 Tafel 曲线测试的结果。

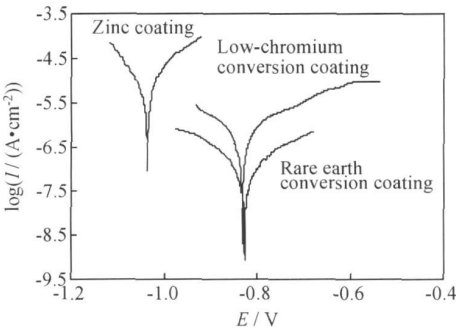


图 7 镀锌层、低铬转化膜及稀土转化膜在 5%NaCl 溶液中的 Tafel 曲线

Fig. 7 Tafel curves of zinc coating, low-chromium conversion coating and rare earth conversion coating in 5%NaCl

由图 7 不同试样 Tafel 曲线的位置关系上可以看出,经稀土盐处理液、低铬酸盐处理液处理后的镀锌层自腐蚀电位比未处理试样的自腐蚀电位都有明显提高,其中稀土转化膜对自腐蚀电位提高的幅度略大于低铬酸盐转化膜,从热力学上讲,说明稀土转化膜同低铬酸盐转化膜一样均较稳定,能更有效地抑制腐蚀的发生。

表 2 是由计算机软件对 Tafel 曲线进行拟合后得出的电化学参数,由数据可以看出,稀土转化膜、低铬转化膜的 Tafel 斜率 b_a 、 b_b 相对于镀锌层都有所增大,转化膜的 Tafel 曲线阴、阳极分支与无转化膜的 Tafel 曲线相比,都向低电流密度方向发生了移动,即成膜后

表 2 Tafel 曲线电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of Tafel curves

	$E_{(I=0)} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	b_a / mV	b_b / mV	$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
Zinc coating	- 1.029	2.378×10^{-4}	2.736	2.874	5.763×10^3
Rare earth conversion coating	- 0.832	1.004×10^{-7}	6.721	7.918	2.274×10^5
Low-chromium conversion coating	- 0.837	4.086×10^{-7}	6.245	7.422	2.105×10^5

阳极的 Tafel 斜率明显比纯锌的要大, 说明阳极电流密度较小, 转化膜的形成有效抑制了阳极的溶解反应; 同样, 成膜后阴极的 Tafel 斜率明显比纯锌的要大, 说明阴极电流密度较小, 转化膜的形成同样有效抑制了阴极的还原反应。正是由于转化膜的存在, 对于腐蚀的阴、阳反应均有不同程度的抑制, 腐蚀动力下降, 故自腐蚀电流密度较镀锌层显著降低, 表明转化膜能显著地提高镀层的耐腐蚀能力。此外, 稀土转化膜的自腐蚀电流密度 I_{corr} 小于低铬酸盐钝化膜, 说明稀土转化膜的耐蚀性要高于低铬酸盐钝化膜, 与中性盐雾实验及浸泡实验结果一致。

2.7 腐蚀动力学参数的测量计算

实验在 18, 28, 38, 48, 58, 68 °C 下测定了稀土转化膜在 5% NaCl 溶液中的 Tafel 曲线, 并拟合相关电化学参数, 如图 8 所示。

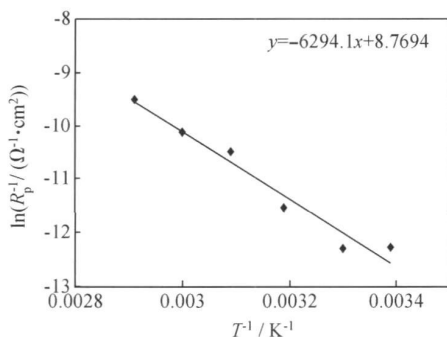


图 8 稀土转化膜在 5% NaCl 溶液中极化电阻与温度的关系

Fig. 8 Relationship between polarization resistance and temperature of rare earth conversion coating in 5% NaCl

由直线的斜率求出稀土转化膜在 5% NaCl 溶液腐蚀的表观活化能 E_a 为 $52329.15 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 由截距求出指前因子 A 为 6434.3, 故腐蚀反应的速率常数 $k = 6434.3 \exp(-52329.15 / RT)$, 其中: R 为摩尔气体常数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$); T 为 5% (质量分数) NaCl 溶液的温度(K)。

根据所求出的速率常数 k , 作 $k-T$ 的关系图, 如图 9 所示。由图 9 可以看出, 腐蚀反应的速率常数随温度的升高而增大, 意味着转化膜腐蚀反应速率随温度的升高而增大。

3 稀土转化膜的耐腐蚀机理

通过以上实验, 可以推测稀土转化膜的耐腐蚀机理: 稀土转化膜是由微小颗粒堆积而成的完整、细密的锌和铈氧化物及氢氧化物的复合膜层, 该膜层对基体镀锌层的覆盖性较好, 阻碍了 O_2 的传输和电子的传

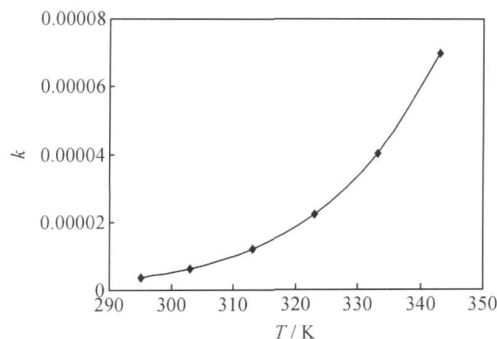


图 9 5% NaCl 溶液中 $k-T$ 关系图

Fig. 9 $k-T$ curve in 5% NaCl solution

递, 对腐蚀的阴、阳极反应均有不同程度的抑制, 降低腐蚀动力, 有效地保护了基体不受腐蚀介质的侵蚀, 可有效提高镀锌层的耐蚀性能, 其耐蚀性能优于低铬酸盐转化膜。

稀土转化膜在 5% NaCl 溶液中的表观活化能为 $52329.15 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 腐蚀反应的速率常数 $k = 6434.3 \exp(-52329.15 / RT)$, 腐蚀反应的速率常数随着温度的升高而增大, 故在较高温度下, 稀土转化膜的耐蚀性能会降低。

4 结论

(1) 稀土转化膜可能是由 Zn^{2+} , Ce^{3+} 及 Ce^{4+} 的氧化物及氢氧化物所构成的致密完整的复合膜层。

(2) 稀土转化膜通过抑制镀锌层在腐蚀液中的阴、阳极反应, 从而有效提高镀锌层的耐蚀性能, 其耐蚀性能略优于低铬酸盐转化膜。

(3) 稀土转化膜在 5% NaCl 溶液中的表观活化能 E_a 为 $52329.15 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 腐蚀反应的速率常数 $k = 6434.3 \exp(-52329.15 / RT)$, 腐蚀反应的速率常数随着温度的升高而增大, 稀土转化膜在较高温度下的耐蚀性能会降低。

参考文献

- [1] MONTERMOR M F, FERREIRA M G S. Analytical characterization of silane films modified with cerium activated nanoparticles and its relation with the corrosion protection of galvanized steel substrates [J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 63(3): 330 - 337.
- [2] BLIN F, KOUTSOUKOS P, KLEPETSIANIS P, et al. The corrosion inhibition mechanism of new rare earth cinnamate compounds: electrochemical studies [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(21): 6212- 6220.

(下转第 93 页)

入深,不易脱落,显微硬度高,既可有效抵抗磨粒压入,又阻碍磨粒的显微切削运动,从而显著改善合金的耐磨粒磨损性能,但初生 M_2B 相过多,共晶组织聚集,断裂韧性下降,裂纹形成和扩展等导致颗粒剥落而造成磨损量增加,微观断裂机制逐渐占主导地位。

3 结论

(1) 高硼堆焊合金(0.1%~1.0% C,4%~13% Cr,2.5%~3.2% V,2.2%~3.8% B)的基体组织由 $\alpha-Fe$ +少量 $\gamma-Fe$ 组成,硬质相则由大量的初生 M_2B 型、少量的共晶 M_2B 型、 $M_3(B,C)$ 型硼化物和 V_2C 构成,其中 M 代表 Fe, Cr, V 等金属元素,碳含量改变,引起初生 M_2B 相尺寸改变而影响其硬度及耐磨性。

(2) 随高硼合金初生 M_2B 相体积分数增加,磨损机制逐渐从显微切削为主,转变为显微断裂和显微切削共存,初生 M_2B 相尺寸对耐磨粒磨损性能影响显著。

参考文献

- [1] 符寒光,蒋志强.耐磨铸造 $Fe-B-C$ 合金的研究[J].金属学报,2006,45(2):545-548.
- [2] FU Hanguang, XIAO Qiang, KUANG Jiacai, et al. Effect of rare earth and titanium additions on the microstructures and properties of low carbon $Fe-B$ cast steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 466(1-2):160-165.
- [3] LIU Zhongli, LI Yanyang, CHEN Xiang, et al. Microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 486(1-2):112-116.

- [4] 徐滨士.纳米表面工程[M].北京:化学工业出版社,2004.10-13.
- [5] JEONG WAN YOO, SEONG HUN LEE, CHONG S YOON, et al. The effect of boron on the wear behavior of iron based hard-facing alloys for nuclear power plants valves[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 352(1-3):90-96.
- [6] BADISCH E, MITTERER C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance[J]. Tribology International, 2003, 36(10):765-770.
- [7] BERGMAN F, HEDENQVIST P, HOGMARK S. The influence of primary carbides and test parameters on abrasive and erosive wear of selected PM high speed steels[J]. Tribology International, 1997, 30(3):183-191.
- [8] 龚建勋,李煌,肖逸锋,等. $Fe-G-Cr-V-B$ 系高铬堆焊合金的显微组织及耐磨性[J].材料工程,2009,(5):22-25.
- [9] 崔崑.钢铁材料及有色金属材料[M].北京:机械工业出版社,1980.83-87.
- [10] GUO Changqing, KELLY P M. Boron solubility in $Fe-Cr-B$ cast irons[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1-2):40-45.

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(10JJ6078);湘潭大学科研启动基金资助项目(06QDZ05;09QDZ16)

收稿日期:2009-08-26;修订日期:2010-07-02

作者简介:龚建勋(1973-),男,博士,副教授,从事材料表面工程与功能薄膜方向的研究工作,联系地址:湖南省湘潭市湘潭大学机械工程学院(411105),E-mail: gong309@tom.com

(上接第88页)

- [3] MONTERMOR M F, SIMOES A M, CARMEZIM M J. Characterization of rare earth conversion films formed on the AZ31 magnesium alloy and its relation with corrosion protection [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(16):6922-6931.
- [4] MOTTE C, MAURY N, OLIVIER M G, et al. Cerium treatments for temporary protection of electroplated steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7):2366-2375.
- [5] FERREIRA M G S, DUARTERR G, MONTEMOR M F, et al. Silanes and rare earth salts as chromate replacers for pre treatments on galvanized steel [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(17):2927-2935.
- [6] ANDRE D, JEAN P. Study of the deposition of cerium oxide by conversion on aluminium alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 194(1):1-9.
- [7] MILLER R. Non-toxic corrosion resistant conversion coating for aluminum and aluminum alloys and the process for making the same[P]. USA Patent: 5221371, 1993-6-22.
- [8] DAVÓB, DAMBORENEA DE J J. Use of rare earth as electro-

chemical corrosion inhibitors for an $Al-Li-Cu$ (8090) alloy in 3.56% $NaCl$ [J]. Electrochimica Acta, 2004, 52(9):4957-4965.

- [9] 李久青,田虹,卢翠英.铝合金稀土转化膜碱性成膜工艺 $T3/T7$ 的研究[J].腐蚀科学与防护技术,1998,10(2):98-102.
- [10] 朱利萍,鲁闽,熊仁章.铝合金稀土盐转化膜耐蚀性能研究[J].兵器材料科学与工程,2007,30(5):60-64.
- [11] AMOTT D R, RYAN N E, HINTON B R W. Auger and XPS studies of cerium corrosion inhibition on 7075 aluminum alloy [J]. Application of Surface Science, 1984, 22(1):236-251.
- [12] SHYU J Z, OTTO K, WATKINS W L H, et al. Characterization of Pd/Y -alumina catalysts containing ceria [J]. Journal of Catalysis, 1988, 114(1):22-23.

收稿日期:2010-06-21;修订日期:2011-01-23

作者简介:章江洪(1973-),女,博士,副教授,主要从事金属腐蚀与防护研究工作,联系地址:昆明市一二一大街文昌路68号昆明理工大学理学院化学系(650093),E-mail: kmzjhrr@163.com