

La³⁺对 Zn-Fe 合金镀层在硫酸溶液中腐蚀行为的影响

鲁道荣,王靓靓

(合肥工业大学化工学院,可控化学与材料化工安徽省重点实验室,安徽合肥 230009)

摘要:电镀液中加入镧盐,在 A3 钢表面电镀 Zn-Fe 合金薄膜,选择酸性腐蚀介质,研究 La³⁺ 对 Zn-Fe 合金镀层腐蚀行为的影响.用线性扫描伏安法和交流阻抗法,研究 Zn-Fe 合金镀层在 30 °C 的 0.20 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 溶液中的腐蚀行为.用 XRD 和 SEM 研究 Zn-Fe 合金镀层在腐蚀前后的微观结构和形貌的变化.结果表明:加入镧盐,不改变 Zn-Fe 合金镀层的晶面择优取向,但影响各晶面衍射峰强度,使镀层结晶粒度变小;当加入 La₂(SO₄)₃ 为 0.90 g · L⁻¹ 时,Zn-Fe 合金镀层变得致密均匀,电结晶生长形态呈现层状;镀层的致钝电流密度(J_{pp})和维钝电流密度(J_p)显著降低,极化电阻 R_p 增大,镀层具有良好的耐蚀性能.

关键词:镧盐;电镀;Zn-Fe 合金镀层;耐蚀性;硫酸溶液

中图分类号:TG174.42 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.009

Effect of La³⁺ on corrosion behavior of Zn-Fe alloy coating in sulfuric acid solution

LU Daorong, WANG Liangliang

(Anhui Key Laboratory of Controllable Chemical Reaction & Material Chemical Engineering,
College of Chemical Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The effects of Lanthanum ions on the corrosion behavior of Zn-Fe alloy coating in acid corrosion solution, which was electroplated on the surface of A3 steel substrate with various electrolytes of Lanthanum salt, were investigated. The corrosion behavior of the Zn-Fe alloy coating was studied by the Linear sweep voltammetry and AC impedance in the 0.20 mol · L⁻¹ sulfuric acid solution at 30 °C. The microstructure and shape of Zn-Fe alloy coating before and after corrosion was studied by XRD and SEM. The results indicate that the addition of lanthanum salt decreases the grain size of Zn-Fe alloy coating and retains the preferred orientation of Zn-Fe alloy coatings, but affects the intensity of diffraction for crystal planes. When 0.90 g · L⁻¹ La₂(SO₄)₃ is added in the electrolytes, the coatings of Zn-Fe alloy are more uniform and compact, and the electrocrystallization appears layered. The J_{pp} and J_p of Zn-Fe alloy coating are reduced evidently, R_p is increased, and the Zn-Fe alloy coating has better corrosion resistance.

Key words: lanthanum salt; electroplating; Zn-Fe alloy coating; corrosion resistance; sulfuric acid solution

0 引言

稀土元素由于其特殊的电子结构,具有许多独特的性能,因而对稀土金属的应用越来越受到人们的关注^[1-5].稀土元素的最外两电子层的结构基本相同,都是 $[ns]^2[(n-1)s]^2[(n-1)p]^6[(n-1)d]^m$ ($m=0$ 或 1),它们与别的元素化合时,通常是失去最外层的2个电子、次外层的一个d电子(无d电子时则失去一个4f电子),所以正常价态为+3价.人们研究稀土金属在碳素钢或合金钢和有色合金中的作用机理时发现,稀土元素能使金属和合金的晶粒急剧细化,是因为稀土元素的原子半径在 $0.174\sim 0.204$ nm之间,比铁原子半径(0.124 nm)大,它很容易填补生长中的铁及其合金的晶粒新相的表面缺陷,生成能阻碍晶粒继续生长的膜,从而使晶粒细化.晶粒细化后不但能提高金属或合金的塑性,消除热脆性,有利于轧制和锻造,而且还能减少表面缺陷、裂纹,提高合金的抗腐蚀性能^[6].目前已有部分文献报道稀土金属在合金中的应用^[7-11].人们研究发现在电镀液中加入很少量的稀土盐能明显增加Zn-Fe合金镀层对NaCl溶液的耐蚀性能^[12-13].由于Zn-Fe合金(铁含量在 $0.4\%\sim 0.7\%$)镀层的优异的耐蚀性能主要表现在对NaCl溶液的耐蚀,因而对于Zn-Fe合金镀层在酸性介质中的腐蚀行为的研究,国内外均报道很少.考虑到酸性介质对金属及其合金材料的腐蚀也是工业生产中常见的腐蚀,作为探索,本文特地选择了稀硫酸溶液作为腐蚀介质,并在镀液中加入少量钨盐,在最优化的电镀条件下进行Zn-Fe合金电镀实验^[14],采用电化学方法和现代表面测试技术,研究了含有不同浓度的La₂(SO₄)₃的电镀液中获得的Zn-Fe合金镀层在稀硫酸溶液中的腐蚀行为,并从理论与实验上加以论述.为了考察Zn-Fe合金镀层的自钝化能力,我们在电镀液中未加入任何添加剂和光亮剂,也未对镀层进行任何钝化处理.

1 实验

1.1 电极制备及电镀工艺

采用 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 的A3钢片作为阴极,纯锌片(含锌99.99%)作为阳极.

为在A3钢表面获得良好的Zn-Fe合金镀层,我们首先对电极表面进行了处理:打磨→水洗→除油→水洗→酸洗→水洗.

电镀工艺中镀液组成见表1,电镀条件见表2.

表1 镀液组成

物质	浓度/(g·L ⁻¹)
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	120
Na ₂ SO ₄	80
FeSO ₄ ·7H ₂ O	12
柠檬酸钠	9
抗坏血酸	1.0
La ₂ (SO ₄) ₃	0.30~1.20
H ₃ BO ₃	12

【注】所用试剂均为分析纯

表2 电镀条件

参数	数值
电镀温度	30℃
镀液pH	2.0~3.0
电流密度	2~3 A·dm ⁻²
电镀时间	30 min

1.2 镀层的性能与结构测试

采用三电极体系,工作电极为具有Zn-Fe合金镀层的A3钢片(面积为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$),辅助电极为铂片(面积为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$),参比电极为饱和甘汞电极.将电极置于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $0.20\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H₂SO₄溶液中,用电化学工作站(CHI660B型,上海辰华公司产)测试镀层的阳极极化曲线(扫描速度为 $0.0005\text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$)和交流阻抗谱(振幅为 5 mV ,频率为 $0.1\sim 100000\text{ Hz}$),研究镀层的耐蚀性能.用XRD(日本理学公司产D/Max-γB型X射线衍射仪,Cu靶,K_α射线,波长为 0.1541 nm ,衍射角范围: $30^{\circ}\sim 85^{\circ}$,扫描速度 $6^{\circ}/\text{min}$)和SEM(荷兰产XT30 ESEM-TMP扫描电镜)研究Zn-Fe合金镀层在稀H₂SO₄溶液中腐蚀前后的微观结构和表面形貌的变化.

2 结果与讨论

2.1 阳极极化曲线的分析

用稳态法研究镀液中加入不同量La₂(SO₄)₃时获得的Zn-Fe合金镀层在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $0.20\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H₂SO₄溶液中的腐蚀行为,测试结果见图1.

由图1可知,在不加钨盐时,Zn-Fe合金镀层的阳极极化曲线的致钝电流密度(J_{pp})为 $103.88\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,维钝电流密度(J_p)为 $20.51\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ (见A线);加入钨盐($0.30\sim 0.90\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)后,阳极极化曲

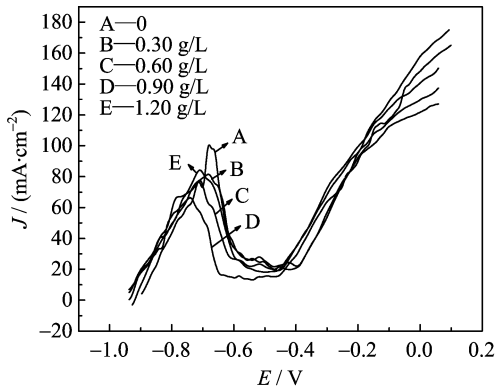


图 1 不同含量 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的电镀液中的 Zn-Fe 合金镀层的阳极极化曲线

Fig. 1 Polarization curves of anode for Zn-Fe alloy deposit in electrolytes with different content of $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$

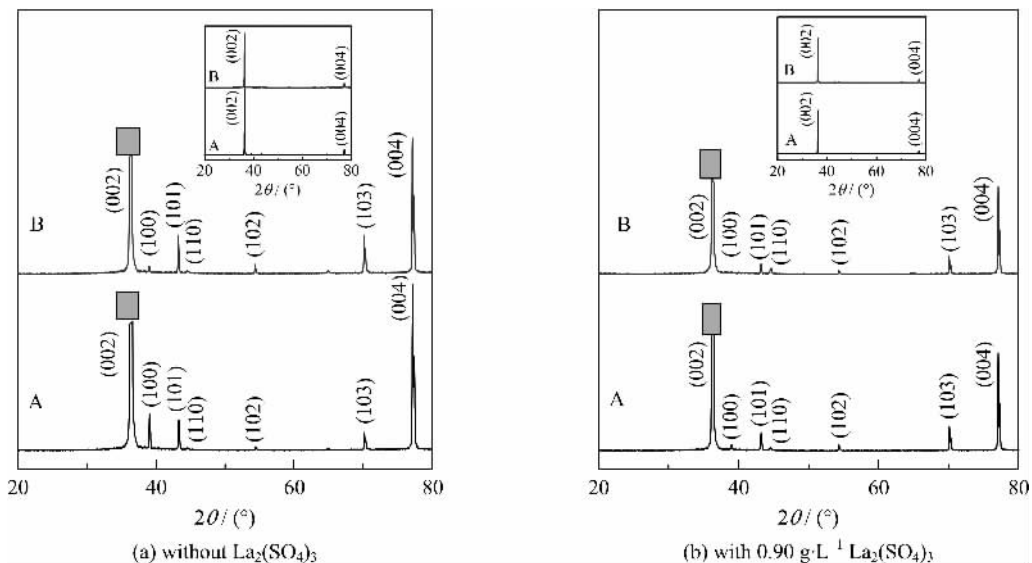
线的 J_{pp} 和 J_p 均降低 (见 B, C, D, E 线). 当 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 加入量为 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 阳极极化曲线的 J_{pp} 和 J_p 下降最多 (见 D 线), J_{pp} 降至 $66.71 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, J_p 降至 $12.45 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 致钝电位 (E_{pp}) 发生明显负移 (见 D 线), 当 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 加入量增加至 $1.20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Zn-Fe 合金的阳极极化曲线的 J_{pp} 和 J_p 反而有所增加 (见 E 线), 说明该体系中 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的最适宜用量为 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 维钝电流密度 (J_p) 减小, 反映了镀层在钝态下的溶解速度减缓, 致钝电位 (E_{pp}) 负移, 致钝电流密度 (J_{pp}) 降低, 说明在镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时, 生成的 Zn-Fe 合金镀层更易钝化. 这可能是适量

的镧盐存在于镀液中, 可以促进铁的沉积, 使得 Zn-Fe 合金镀层中铁含量略有增加, 因而该镀层在稀硫酸溶液中更易钝化, 对稀硫酸腐蚀介质产生一定的耐蚀性能.

2.2 XRD 的分析

将镀液中未加镧盐和加入最适宜用量 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的 Zn-Fe 合金镀层分别放入 30°C $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 溶液中腐蚀 2 min, 取出试样洗净并用氮气吹干, 然后对其表面进行 XRD 测试, 通过分析镀层中相关晶面的衍射峰强度变化和织构系数变化, 来推测腐蚀初期时镀层中相关晶面的腐蚀情况, 测试结果见图 2. 图 2(a), 2(b) 内的方框是 XRD 测试的原图. 由图可知, ① 镀液中加入 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$, 不改变镀层的晶面择优取向, 但影响各晶面的衍射峰强度, 使镀层的择优取向 (002) 晶面的衍射峰强度明显降低, 说明 La^{3+} 存在, 对 (002) 晶面生长有一定抑制作用; ② 镀液中未加入镧盐和加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的 Zn-Fe 合金镀层, 在腐蚀前后的晶面择优取向均为 (002), 腐蚀前其织构系数均为 86.96% , 腐蚀后未加镧盐的镀层的 (002) 晶面的织构系数为 87.16% , 加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的镀层的 (002) 晶面的织构系数为 90.1% , 腐蚀后镀层的 (002) 晶面的织构系数比腐蚀前也有所增加, 说明 (002) 晶面耐蚀性较强, 这是因为低指数晶面原子的结合力较强, 导致金属溶解较慢^[15].

为了观察镀层中铁的 (110) 晶面衍射峰强度在



A: before corrosion; B: after corrosion

图 2 Zn-Fe 合金镀层腐蚀前后 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns for Zn-Fe alloy deposit

腐蚀前后的变化,我们取纵坐标 CPS 在10 000以下部分作图,如图2所示.在图2中,①由A图可知,镀液中存在 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时,镀层的晶面衍射角 $2\theta=44.7^\circ$ 处铁的(110)晶面的衍射峰强度比未加镧盐时有所增加,说明镀液中存在 La^{3+} ,对(110)晶面生长起促进作用,这可能是镧与铁之间存在某种协同效应,诱导该晶面的生长;②由B图可知,无论镀液中是否存在镧盐,腐蚀后镀层的(110)晶面的衍射峰强度均比腐蚀前(A图)略有增加,织构系数也有所增大,说明镀层的(110)晶面不易被腐蚀;③镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的 Zn-Fe 合金镀层在腐蚀后(110)晶面的衍射峰强度比未加镧盐的镀层要强(比较两个B图),这可能是加入镧盐使得镀层更容易钝化,减缓腐蚀所致.

2.3 SEM 的分析

将镀液中未加镧盐和加入最适宜用量 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时获得的 Zn-Fe 合金镀层,分别放入 30°C 的 $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中腐蚀 3 min,取出试样洗净并用氮气吹干,用 SEM 观察腐蚀前后的镀层表面形貌的变化,测试结果见图3.图中(a)和(b)是镀液中未加镧盐的 Zn-Fe 合金镀层在腐蚀前后的 SEM 照片,(c)和(d)是镀液中加镧盐

的 Zn-Fe 合金镀层在腐蚀前后的 SEM 照片.

由图3(a)可知,当镀液中未加镧盐时,镀层结晶粒度较大且不太均匀致密;由图3(b)可以看出,未加入镧盐的 Zn-Fe 合金镀层在 30°C 的 $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中腐蚀得较厉害,晶粒明显被腐蚀,且形成部分孔洞;由图3(c)可知,当镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时,镀层结晶粒度减小,且镀层变得较均匀致密,电结晶形态呈现层状结构^[16];由图3(d)可知,镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ La}_2(\text{SO}_4)_3$ 的 Zn-Fe 合金镀层,在 30°C 的 $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡 3 min,几乎看不出被腐蚀的痕迹,说明镀液中加入镧盐形成的 Zn-Fe 合金镀层对稀硫酸溶液有明显的耐腐蚀性能.这可能是因为部分镧离子优先吸附在晶体生长的活性点上,在基体表面成核快,有效地抑制了晶体的生长,使得结晶细化,镀层变得致密^[17],因而提高了 Zn-Fe 合金的耐蚀性能.

2.4 交流阻抗谱的分析

在 30°C 的 $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中,对镀液中含 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 为 0 和 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Zn-Fe 合金镀层进行交流阻抗测试,结果见图4.

由图4可知:①镀液中不含镧盐的镀层,在稀硫

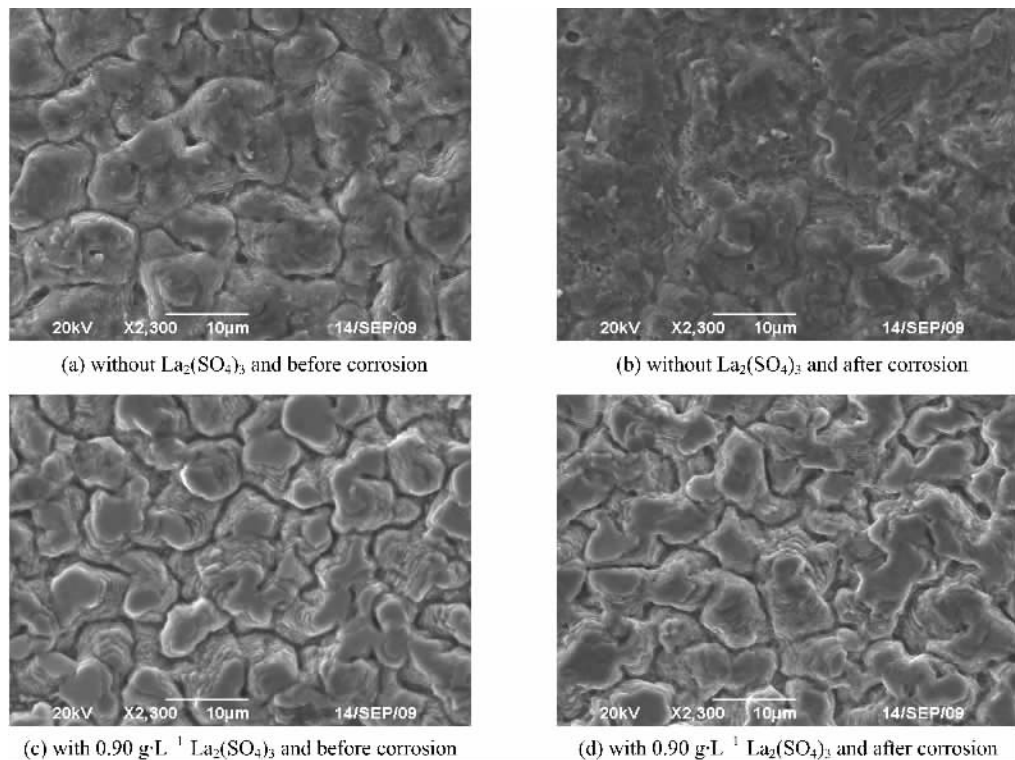


图3 Zn-Fe合金镀层腐蚀前后SEM图

Fig.3 SEM micrograph for Zn-Fe alloy deposit before and after corrosion

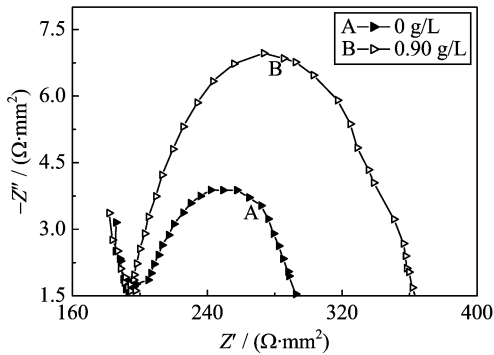


图 4 Zn-Fe 合金镀层交流阻抗图

Fig. 4 Nyquist patterns of the Zn-Fe alloy deposit

酸溶液中的腐蚀反应的极化电阻 R_p 约为 $100 \Omega \cdot \text{mm}^2$, 加入镧盐的镀层的腐蚀反应的极化电阻 R_p 约为 $170 \Omega \cdot \text{mm}^2$. 说明镀液中加入镧盐, 能使镀层在稀硫酸溶液中的腐蚀反应的极化电阻增大, 对镀层腐蚀起着抑制作用, 因而使镀层具有一定的耐蚀性能. ②由图 4, 根据公式^[18]

$$C_d = 1/(\omega R_p)$$

计算得到, 在稀硫酸溶液中, 镀液中未加镧盐的 Zn-Fe 合金镀层的双电层微分电容 $C_d \approx 256.4 \mu\text{F}$, 加入镧盐后的镀层的 $C_d \approx 84.2 \mu\text{F}$, 式中 ω 为图 4 中两条实验线的纵坐标 ($-Z''$) 最大时对应的频率. 说明镀液中加入镧盐, 能使 Zn-Fe 合金镀层的双电层微分电容减小, 这是因为镀层在稀硫酸溶液中的腐蚀反应的极化电阻 R_p 增大所致.

2.5 循环伏安曲线的分析

图 5 为不同镀液中的 Zn-Fe 合金镀层在 30°C 的 $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 腐蚀液中的循环伏安曲线. 由图可知, 无论镀液中是否加入镧盐, 循环伏安曲线均只出现氧化峰电流, 未出现还原峰电流, 说明镀层在硫酸溶液中的腐蚀是不可逆的; 而且当镀

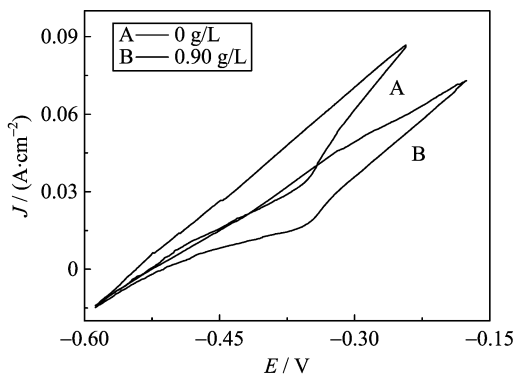


图 5 Zn-Fe 合金镀层循环伏安图

Fig. 5 CV patterns of the Zn-Fe alloy deposit

液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时, 循环伏安曲线 B 中镀层的氧化反应电流密度明显比镀液中不加 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 时循环伏安曲线 A 中镀层的氧化反应电流密度低, 说明镀液中加入镧盐获得的 Zn-Fe 合金镀层对稀硫酸溶液的腐蚀有一定的抑制性, 因而提高了对基体的保护作用.

3 结论

(I) 镀液中加入镧盐, 能降低 Zn-Fe 合金镀层在稀硫酸溶液中的致钝电流密度和维钝电流密度, 提高 Zn-Fe 合金镀层的耐蚀性能.

(II) 镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$, 获得的镀层结晶粒度变小, 且均匀、致密, 该镀层的电结晶形态为层状, 对稀硫酸溶液有较好的耐蚀性能.

(III) 镀液中加入微量的镧盐, 不改变 Zn-Fe 合金镀层的择优取向(002)晶面, 但对(002)晶面生长有一定的抑制, 对(110)晶面生长有一定促进作用.

(IV) 镀液中加入 $0.90 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$, 使 Zn-Fe 合金镀层在 30°C $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中腐蚀反应的极化电阻增大, 抑制腐蚀进行, 提高镀层的耐蚀性能.

参考文献(References)

- [1] Jee S D, Park J K, Lee S H. Photoluminescence properties of Eu^{2+} -activated Sr_3SiO_5 phosphors[J]. J Mater Sci, 2006, 41: 3 139-3 141.
- [2] Liang Ruihong, Dong Xianlin, Chen Ying, et al. Effect of La_2O_3 doping on the tunable and dielectric properties of BST/MgO composite for microwave tunable application [J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 95: 222-228.
- [3] Kohno T, Yoshida H, Kawashima F, et al. Hydrogen storage properties of new ternary system alloys: La_2MgNi_9 , $\text{La}_5\text{Mg}_2\text{Ni}_{23}$, $\text{La}_3\text{MgNi}_{14}$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 311: L5-L7.
- [4] Wang Peng, Li Ning, Lin Lianyi, et al. Effect of rare earth doping on property of $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Catalyst [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2009, 27(2): 213-217.
王鹏, 李凝, 林连义, 等. 稀土氧化物掺杂对 $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂催化性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2009, 27(2): 213-217.
- [5] Zhang Maocai, Zhou Shouzheng, Wang Yizhong, et al. Microstructure and Magnetic Properties of As-Cast RE-Fe-(C, B) Alloy[J]. Journal of the Chinese Rare

- Earth Society, 2001, 19 (5): 411-413.
张茂才, 周寿增, 王亦忠, 等. 铸造RE-Fe-(C, B)合金的组织结构与磁性[J]. 中国稀土学报, 2001, 19 (5): 411-413.
- [6] Cheng Danhong. Application of Rare Earth Elements in Metal Electrodeposition [J]. Electroplating and Finishing, 1995, 14(1): 40-47.
成旦红. 稀土元素在金属电沉积中的应用[J]. 电镀与涂饰, 1995, 14(1): 40-47.
- [7] Zhang Xinming, Wang Wentao, Liu Bo, et al. Effect of Nd addition on microstructures and heat-resisting properties of 2519 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 15-20.
张新明, 王文韬, 刘波, 等. Nd对2519铝合金组织与耐热性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 15-20.
- [8] Chen Yajun, Xu Qingyan, Huang Tianyou. Refining performance and long time efficiency of Al-Ti-B-RE master alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(8): 1 232-1 239.
陈亚军, 许庆彦, 黄天佑. 稀土铝钛硼中间合金的细化能力与长效性[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(8): 1 232-1 239.
- [9] Wang Xiaoqi, Ding Weizhong, Wang Xinguo, et al. Effects of mixed rare earths on structure and performance of casting ZL108 alloys[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(2): 243-246.
王晓秋, 丁伟中, 王新国, 等. 混合稀土对ZL108铝合金组织与性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(2): 243-246.
- [10] Liu Wenjuan, Cao Fahe, Zhang Zhao, et al. Effect of rare earth elements Ce and La alloying on corrosion behavior of AM60 magnesium alloys [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21 (2): 82-84.
刘文娟, 曹发和, 张昭, 等. 稀土元素Ce和La合金化对AM60镁合金腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 82-84.
- [11] Zhou Xuehua, Zhang Ya, Wei Zhongling, et al. Effect of rare earth addition on corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(2): 85-87.
周学华, 张娅, 卫中领, 等. 添加稀土元素对AZ91D镁合金腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 85-87.
- [12] Wang Bing, Liu Qingyou, Wang Xiangdong, et al. Inhibitive corrosion mechanism of Ce-ion and La-ion for carbon steel in NaCl solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27 (3): 151-155.
汪兵, 刘清友, 王向东, 等. 稀土Ce和La对碳钢在NaCl溶液中的缓蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(3): 151-155.
- [13] Zhang Jianghong, Zhang Yingjie, Chen Zhen, et al. Effect of rare earth cerium additive on Zn-Fe Alloy electrodeposition [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2003, 21: 157-159.
章江洪, 张英杰, 陈阵, 等. 稀土铈在锌-铁合金电沉积中的作用[J]. 中国稀土学报, 2003, 21: 157-159.
- [14] Cao Chao, Lu Daorong. Influence of vanadium on corrosion resistance of electroplated Zn-Fe alloy coating [J]. Materials Protection, 2007, 40(8): 12-14.
曹超, 鲁道荣. 钒对Zn-Fe合金镀层耐蚀性的影响[J]. 材料保护, 2007, 40(8): 12-14.
- [15] 查全性. 电极过程动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 318-320.
- [16] 周绍民. 金属电沉积——原理与研究方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 243-244.
- [17] Wang Jihong, Fei Ximing, Long Guangdou, et al. Application of rare earth in Ni-P alloy plating [J]. Materials Protection, 2003, 36(1): 31-33.
汪继红, 费锡明, 龙光斗, 等. 稀土在镀Ni-P合金中的应用[J]. 材料保护, 2003, 36(1): 31-33.
- [18] 田昭武. 电化学研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 270-272.