

稀土 Y 对热浸镀铝镀层组织及耐蚀性的影响

刘艺, 李国喜, 郑毅然

(东北大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110000)

摘要: **目的** 研究稀土 Y 对热浸镀铝层的影响, 提高热浸镀铝件的耐蚀性能。**方法** 通过向热浸镀铝液中添加不同量的铝钇合金, 获得稀土 Y 含量不同的热浸镀铝件。选用 3.5% 的 NaCl 溶液为腐蚀溶液, 利用 SEM、EDS 观测其形貌、成分, 并使用电化学测试和全浸试验研究稀土 Y 对镀层耐蚀性能的影响。**结果** 当添加 0.2%Y 时, 热浸镀铝层表面平整、无孔洞, 针状相细小, 镀铝层减薄, 过渡层由锯齿状转变为连续带状。稀土 Y 的添加使镀铝件的自腐蚀电位正移, 自腐蚀电流密度减小, 添加量为 0.2% 时, 自腐蚀电位最正, 为 -0.7857 V , 自腐蚀电流密度最小, 为 $1.3505 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ 。与添加其他稀土元素相比, 添加 0.2%Y 时, 镀层的破裂电位 E_b 最正, 为 -0.6957 V 。不同稀土含量的热浸镀铝件的交流阻抗谱都为单一的容抗弧, 当稀土 Y 添加量为 0.2% 时, 容抗弧半径最大。全浸试验中, 添加 0.2%Y 的镀件的腐蚀速率最低。**结论** 稀土 Y 的添加可以使热浸铝层光滑、连续, 且具有提高其耐腐蚀性的作用。Y 添加量为 0.2% 时, 镀铝件的耐蚀性最好。

关键词: 热浸镀铝; 微观组织; 耐蚀性; 稀土 Y; 电化学方法; 全浸试验

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)09-0286-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.030

Influence of Rare Earth Yttrium on the Structure and Corrosion Resistance of Hot-dip Aluminum Coating

LIU Yi, LI Guo-xi, ZHENG Yi-ran

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of rare earth Y on the hot-dip aluminum coating and improve its corrosion resistance. By adding different contents of aluminum-yttrium alloy to the hot-dip aluminum coating solution, hot-dip aluminum-coated parts containing different rare earth yttrium content were obtained. In the experiment, the corrosion solution was 3.5% NaCl solution. SEM and EDS were used to observe morphology and composition and electrochemical tests and full immersion tests were used to study the effect of rare earth Y on corrosion resistance of coatings. When the content of Y was 0.2%, the surface of the hot-dip aluminized layer was smooth without holes, the needle-like phase was fine, the aluminized layer was thinner, and the shape of transition layer changed from the sawtooth to the continuous band. The rare earth Y made the corrosion potential shift positively and decreased the self-corrosion current, which the most positive self-corrosion potential was

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2021-01-04

Received: 2020-10-27; Revised: 2021-01-04

作者简介: 刘艺 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: LIU Yi (1996—), Female, Master degree candidate, Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 李国喜 (1961—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Corresponding author: LI Guo-xi (1961—), Male, Master, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

引文格式: 刘艺, 李国喜, 郑毅然. 稀土 Y 对热浸镀铝镀层组织及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 286-292.

LIU Yi, LI Guo-xi, ZHENG Yi-ran. Influence of rare earth yttrium on the structure and corrosion resistance of hot-dip aluminum coating[J]. Surface technology, 2021, 50(9): 286-292.

-0.7857 V and the minimum self-corrosion current was 1.3505×10^{-8} A/cm². Compared with other rare earth elements, the breakthrough potential E_b of the coating, when 0.2% Y was added was, the most positive potential is -0.6957 V. The impedance spectroscopies of hot-dip aluminized parts with different rare earth contents were all single capacitive reactance arcs. The radius of the capacitive reactance arc was the largest when the rare earth content was 0.2% Y and the corrosion rate of coated parts was the lowest when 0.2% Y was added in the full immersion test. The addition of rare earth yttrium can make the surface of the hot-dip aluminum coating smooth and continuous, and the corrosion resistance can be improved. Furthermore, the corrosion resistance of aluminum-coated parts is the best when the addition amount is 0.2% Y.

KEY WORDS: hot-dip aluminum; coating microstructure; corrosion resistance; rare earth yttrium; electrochemical test; full immersion test

钢铁作为如今材料领域使用量最大、应用面最广的工程材料,在其使用过程中,经常因环境因素而发生不同程度的腐蚀,造成直接或间接的经济损失^[1-3]。这些腐蚀都是从材料表面开始,因此对材料进行表面改性研究,以改善其耐蚀性能,增长其使用寿命,可以在一定程度上减少经济损失^[4]。在表面处理技术中,热浸镀铝十分简单高效。热浸镀铝后,钢不仅表面光滑,耐腐蚀性能卓越,抵抗高温时的氧化能力强,而且可以保持钢材原本的韧性和机械强度^[5-7],被大量使用在各个不同领域^[8-9]。但热浸镀纯铝获得的镀件,在外铝层会存在大的细条形相,不完整表面会存在夹杂和微小气孔^[10],在大气环境、酸性土壤或腐蚀性溶液中,在这些表面缺陷处容易发生点蚀^[11],大大降低了热浸镀铝层的耐蚀性。

为进一步提高镀铝层的耐蚀性,延长其使用寿命,研究人员在镀液中添加稀有元素,因其具有不同的原子结构和性质,可以在一定程度上提升镀层的耐蚀性能,使其表面更加完整,厚度适中^[12]。Jiu ba Wen 等^[13]发现,在相同工艺条件下,加入一定量的稀土镧可以增加渗铝层厚度,改变渗铝层组织,使其耐腐蚀性能也得到显著的提高。于升学等^[14]研究了稀土铈的影响,发现只有添加量小于 0.3%时,材料耐蚀性能和高温抗氧化性能才会有所提高,而超过此含量时,则会产生相反的效果。

添加稀土元素对改善热浸镀铝层的耐蚀性能有较好的效果,但现阶段研究主要集中于添加稀土镧、铈及其混合稀土 RE 等价格相对较低的轻稀土元素,缺少对其他稀土元素的研究,尤其对于可以显著改善高温合金防护涂层(MCrAlY)的铝氧化膜粘附性的稀土 Y 没有研究过。因此,本文拟研究添加不同含量的稀土 Y 对镀铝层组织和耐蚀性能的影响,通过试验测试对比得出添加稀土 Y 的最佳含量,并通过分析添加最佳含量的不同稀土元素时热浸镀试样的循环极化曲线、交流阻抗曲线和在盐水中的耐腐蚀能力,进一步证明稀土 Y 对提高镀层耐蚀性的作用,拓展稀土 Y 的应用范围,并为进一步提高热浸镀铝层的耐蚀性能提供参考。

1 试验材料及方法

试验浸镀用铝为 99.7%工业纯铝,稀土为 Al-10%Y、Al-10%Ce 中间合金,基体材料为 Q235B 钢,将基板加工成 50 mm×30 mm×3 mm 的矩形试样。

热浸镀铝的工艺流程为:试样打磨→除油污→水洗→除锈蚀→水洗→助镀→干燥→热浸镀铝^[15]。试样除油污选用丙酮,除锈蚀使用 15% (体积分数) 的稀盐酸,用 $m(\text{NaCl}) : m(\text{KCl}) : m(\text{NaF}) : m(\text{KF}) = 3 : 3 : 2 : 2$ ^[16] 的混合水溶液对试样进行助镀。助镀液温度为 80 °C,助镀时间为 3 min。熔炼纯铝液使用 TCW-32A-5 坩埚电阻炉,计算添加 Al-10%Y 中间合金所需质量。根据文献^[17-18]中 Y 对铝合金性能的影响结果,确定 Y 添加量分别为 0.0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%。以文献中 0.3%Ce^[19-20]试样作为对比试样。待钎铝中间合金充分熔化后,去除熔液表面杂质,加入表面覆盖剂 ($m(\text{KCl}) : m(\text{NaCl}) : m(\text{Na}_3\text{AlF}_6) = 4 : 4 : 2$ ^[16]),待镀温度为 720 °C,浸镀时间为 3 min,拉速为 20 mm/s。

利用奥林巴斯显微镜 GX71、SEM 观察试样的截面形貌和表面形貌,并通过日本电子公司的元素分析仪分析镀层截面的元素分布。

采用 CS300 型电化学工作站测试试样的腐蚀性能。进行电化学试验前,对试样的试验表面积进行测量并记录,温度为室温,以 SCE 为参比电极,铂电极为辅助电极,试样为工作电极^[21]。极化曲线扫描速率为 10 mV/s,开路电位为±500 mV^[22]。阻抗测试频率为 $10^{-2} \sim 10^5$ Hz,方向从高频到低频,扰动电位幅度为 10 mV^[23]。在进行这些测试之前,试样会在试验所用电解质溶液中浸泡 10 min,确保在开始测试前,试样开路电位的变化小于±0.01 V^[24]。

全浸泡腐蚀试验(腐蚀 20 d)中,将尺寸为 50 mm×30 mm×3 mm 的试样用钓鱼线丝吊起并放入盛有 1000 mL 3.5%NaCl 溶液的烧杯中(试样表面积:腐蚀溶液体积=1:66.7),试样上端与液面之间的距离为 4 cm,试样间的间距为 5 cm,试验温度为 25 °C。每 4 d 取出试样称量,每 7 d 更换溶液。试验结束后,用去离子水洗涤,并用无水乙醇擦拭,晾干。用电子

分析天平 (BS223S 型, 精度为 10^{-3} g) 称量, 并计算得到腐蚀前后试样的质量差^[25]。

2 结果及分析

2.1 Y 对镀层组织的影响

2.1.1 对镀层表面形貌的影响

由图 1 可以看出, 热浸镀纯铝镀层表面连续但粗糙, 且有氧化物夹杂, 仍存在一些孔洞漏镀点, 分布

着细长的针条状相, EDS 分析 (图 2) 得出, 该物质成分为 92.22%Al+7.78%Fe, 判断该物质为 FeAl_3 。随着稀土 Y 含量添加至 0.2%, 表面状态更加平整连续, 孔洞逐渐减少至消失, 无氧化物夹杂, 表层中的针状相也不断缩小变短; 而当添加量大于 0.2% 后, 表面再次变得粗糙不平坦, 出现裂痕, 针状相又开始长大, 甚至团聚。出现这种现象是因为, 添加稀土元素可以细化晶粒, 且稀土元素可以起到净化铝液的作用^[26], 而加入超过 0.2% 的稀土 Y 时, 细化晶粒的作用减弱。

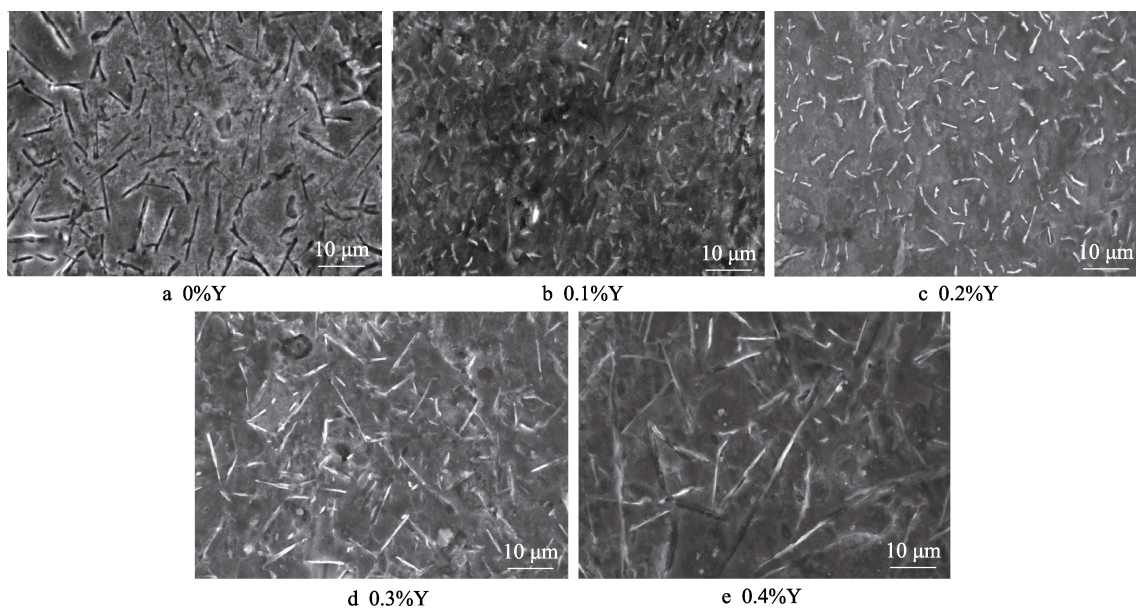


图 1 不同稀土 Y 含量时试样表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of samples with varying added amount of rare earth Y

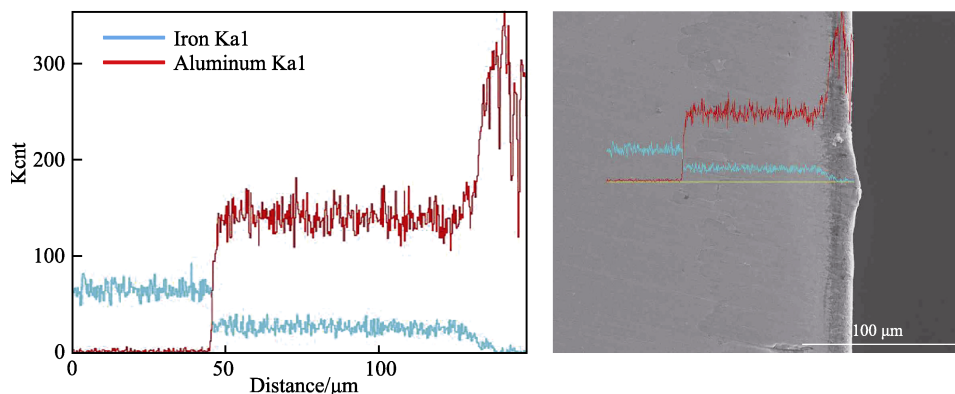


图 2 热浸镀层截面 EDS 分析 (0.2%Y)

Fig.2 EDS spectrums of hot-dipped aluminum coating with 0.2%Y

2.1.2 镀层截面组织及厚度

如图 3a 所示, 热浸镀层截面由外中内三部分组成。结合图 2 分析得出, 深灰色表面层中的主要成分为 Al 元素, 而 Fe 元素含量较少; 在过渡层中, 由于两种元素相互扩散, 使得 Al 元素含量降低, Fe 元素含量增加, 两种元素呈阶梯状分布, 铁铝合金层呈现

为锯齿状结构; 最内层为基体 (Q235B 钢板)。由图 3 和图 4 可知, 随着稀土 Y 添加量从 0.0% 到 0.4%, 过渡层略微增厚, 然后减薄, 形状从锯齿状到趋于平缓, 而后又开始向锯齿状发展; 表面层厚度逐渐减小, 且存在于表面层的针状相逐渐减少。此外, 当添加量达到 0.2% 以上时, 表面层的厚度过薄且镀层不连续完整。

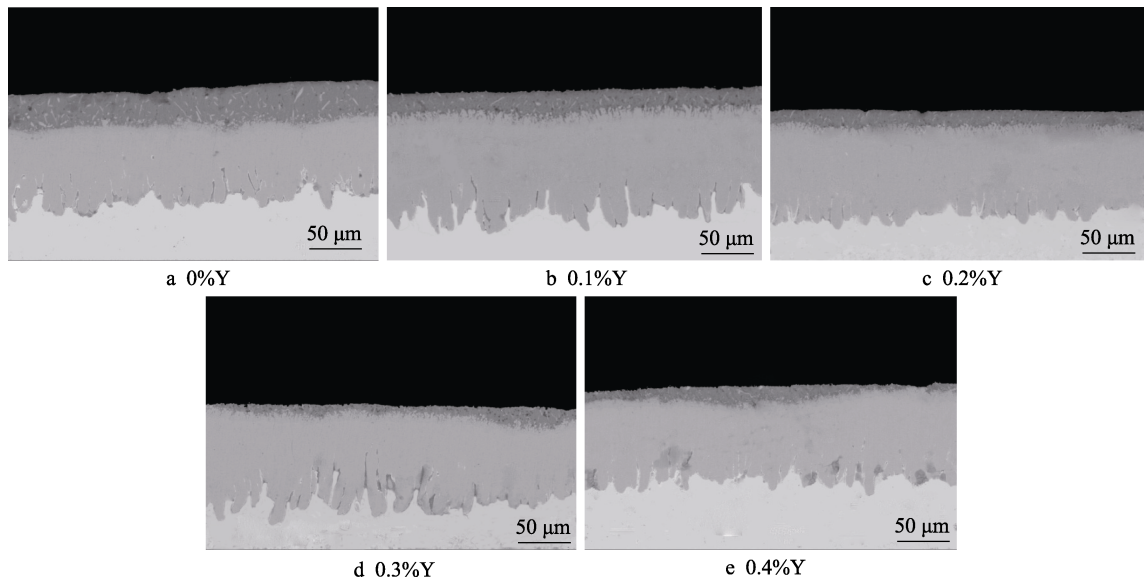


图 3 不同稀土 Y 含量镀层截面组织

Fig.3 Cross-sectional morphologies of hot-dipped aluminum coating with varying added amount of rare earth Y

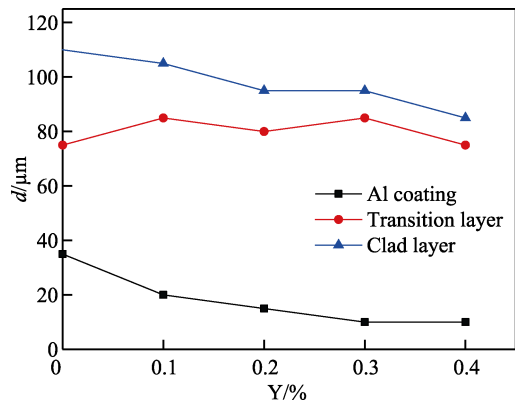


图 4 不同稀土 Y 添加量时试样截面镀层厚度变化曲线

Fig.4 Variation curves of cross section coating thickness of samples with different rare earth Y contents

Y 对镀层截面组织及厚度的影响主要是：对于表面层，Y 的电负性较小，具备较强的化学反应活性和亲和性^[27]，所以向铝液中添加稀土 Y 后，镀液黏性降低，杂质减少，镀液可以更好地浸润基体，铝液的流动性增强，导致表面层厚度降低。对于过渡层，Y 的原子半径比铁的原子半径大，其扩散到合金层时导致晶格畸变，空位数量增多^[28]，促进铝原子扩散，渗铝速度加快，进而增加了过渡层厚度。而 Y 添加量过多时，会有稀土元素扩散至空位，反而阻碍了铝原子向内的扩散过程，使合金过渡层减薄。

2.2 Y 对镀层耐蚀性的影响

2.2.1 动电位极化曲线分析

图 5 是添加不同稀土 Y 添加量时试样动电位极化曲线的最终测试结果。表 1 是对图中各曲线进行传统 Tafel 曲线拟合后得到的数据^[29]。由图 5 和表 1 可以得出，在镀铝液中添加适量稀土 Y 元素，试样得到更正的 E_{corr} ，更低的 J_{corr} ，提高了试样的耐蚀性能，

具体表现为自腐蚀电位 $0.2\%Y > 0.1\%Y > 0.3\%Y > 0.4\%Y > \text{Al}$ ，自腐蚀电流密度 $0.2\%Y < 0.1\%Y < 0.3\%Y < \text{Al} < 0.4\%Y$ 。Y 的添加量为 0.2% 时，试样的耐蚀性能最好，与纯铝相比， J_{corr} 减少了 1 个数量级， E_{corr} 正移了 0.147 V，效果最好。研究得出，向热浸镀铝液中添加稀土 Y 元素的最佳量为 0.2%，而研究添加稀土 Y 元素的意义在于对比于其他稀土元素，它对热浸镀铝耐蚀性能的提高有更好的效果。

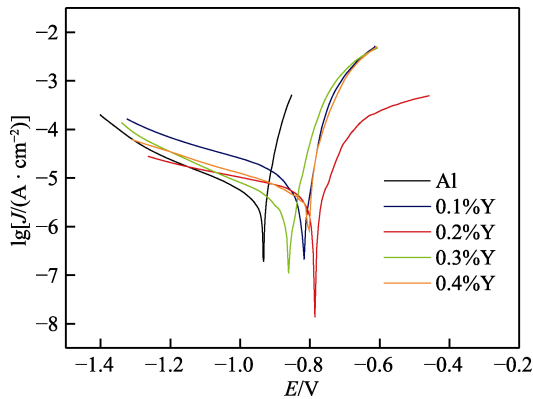


图 5 添加不同含量稀土 Y 时试样的动电位极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves of samples with varying added amount of Y

表 1 不同 Y 含量时试样镀层动电位极化曲线参数值

Tab.1 The parameter values obtained from potentiodynamic polarization curves of sample coatings with varying added amount of Y

Sample	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$	B_a/V	B_c/V
Al	-0.9325	19.179	0.035 53	0.2952
0.1%Y	-0.8165	2.1074	0.048 97	0.1612
0.2%Y	-0.7857	1.3505	0.077 84	0.3237
0.3%Y	-0.8613	10.942	0.043 96	0.1208
0.4%Y	-0.8020	83.938	0.053 27	1.646

2.2.2 交流阻抗谱分析

为验证添加稀土 Y 对提高热浸镀铝的耐蚀性能有更好的效果, 选用纯铝、0.2%Y 和 0.3%Ce 进行对比试验。图 6 是未加稀土和添加不同稀土元素的热浸镀试样在 3.5%NaCl 水溶液中测得的交流阻抗谱图。图中的圆弧直径越大, 代表镀层表面的导电性越差, 镀层表面的缺陷越少, 孔洞越少^[30]。可以看出, 0.2%Y 试样的容抗弧最大; 0.3%Ce 试样的容抗弧形状与其相似, 均为半圆, 但半径变小; 镀纯铝试样的半径最小。这说明 0.2%Y 试样在腐蚀介质溶液中的阻抗最大, 耐蚀性最好。

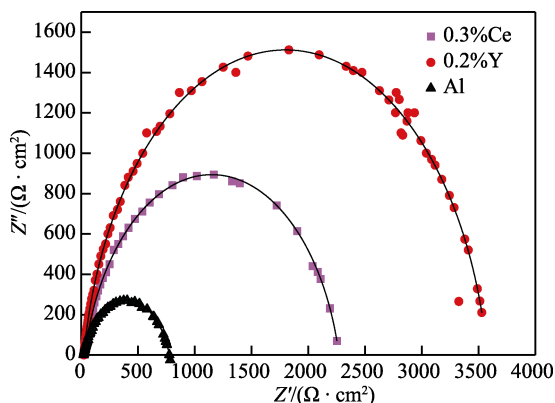


图 6 添加不同最佳量稀土元素镀铝层的交流阻抗图谱
Fig.6 Impedance spectroscopy of hot-dipped aluminum coating with optimum contents of rare earth elements added

图 6 中的容抗弧主要反映表面层的特性。而试样在 3.5%NaCl 溶液中暴露一段时间后, 腐蚀过程主要取决于 C_p (双电层电容) 和 R_p (电荷转移电阻), 根据以上分析, 得出等效电路^[31]如图 7 (R_s 为溶液电阻) 所示。

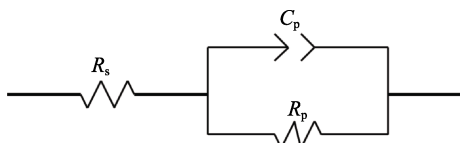


图 7 等效电路图
Fig.7 Equivalent circuit diagram

对图 7 等效电路进行拟合, 所得数据见表 2。添加不同的稀土元素, 电荷转移电阻 R_p 不同, 按阻值大小排列为 0.2%Y>0.3%Ce>Al。与热浸镀纯铝相比,

表 2 不同最佳稀土添加量时热浸镀铝镀层 EIS 参数值
Tab.2 The parameter values obtained from EIS of hot-dipped aluminum coating with optimum contents of rare earth elements added

Sample	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_p/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_1
Al	20.13	750	7.52	0.97
Al+0.2%Y	19.89	3550	9.03	0.96
Al+0.3%Ce	21.01	2250	3.21	0.97

0.2%Y 镀件的电荷转移电阻提高了约 4 倍, 明显提高了镀件的耐点蚀性能。

2.2.3 循环极化曲线分析

在进行循环极化曲线测量时, 若在扫描过程中没有出现明显的还原电流峰, 则表明曲线变化主要由镀层表面的钝化膜在阳极极化时被破坏所致。在扫描方向为正向时, 钝化膜被破坏, 这时极化电流在一瞬间会突然开始增加, 发生该现象时, 对应的极化电位被称为破裂电位 E_b 。而在回扫过程中, 回扫曲线会与正扫曲线交汇形成回滞环, 两曲线的交点为镀件在盐溶液中的保护电位 E_p 。破裂电位和保护电位越正, 说明试样的耐点蚀性越好。

如图 8 和表 3 可以看出, 在同样的测试条件下, 热浸镀纯铝的破裂电位和保护电位最低, 加入不同稀土元素都会在一定程度上使得破裂电位和保护电位正移, 耐点蚀性增强, 按电位大小排序: E_b 为 0.2%Y>0.3%Ce>Al, E_p 为 0.2%Y>0.3%Ce>Al。综合说明, 在 3.5%NaCl 水溶液中, 耐点蚀效果有 0.2%Y>0.3%Ce>Al, 即添加 0.2%Y 使热浸镀铝层具有最好的耐点蚀效果。

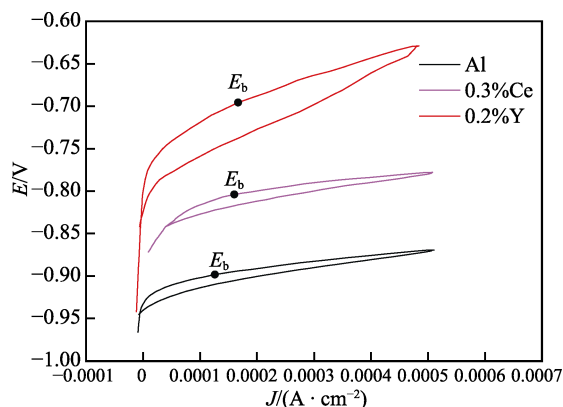


图 8 添加不同最佳含量稀土元素热浸镀铝试样的循环极化曲线图

Fig.8 Cyclic polarization curves of hot-dipped aluminum coating with optimum contents of rare earth elements added

表 3 添加不同最佳含量稀土时热浸镀铝镀层循环极化曲线参数值

Tab.3 The parameter values obtained from cyclic polarization curves of hot-dipped aluminum coating with optimum contents of rare earth elements added

Sample	E_b	E_p	ΔE
Al	-0.8983	-0.9438	0.045 48
0.3%Ce	-0.8039	-0.8422	0.038 29
0.2%Y	-0.6957	-0.8369	0.1412

结合电化学阻抗测试和循环极化曲线的结果可知, 在镀液中添加 0.2%稀土 Y 元素时, 镀件的耐点蚀性能最佳。

2.2.4 全浸试验分析

全浸试验后，试样表面有不同程度的腐蚀发生，最终通过计算样品的失重速率来表征加入不同稀土元素后热浸镀铝样品的耐腐蚀能力，其中腐蚀速率公式为：

$$w = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot t}$$

(1)

式中： W 为单位面积腐蚀失重， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ； m_1 为腐蚀前试样质量， g ； m_2 为腐蚀试验后洁净试样的质量， g ； S 为试样表面积， m^2 ； t 为全浸腐蚀试验进行时间， a 。

表 4 为 3 种热浸镀铝层试样在 3.5%NaCl 溶液中全浸泡 480 h 的结果。由表 4 可以得出，与加入其他元素相比，加入 0.2%Y 的镀件在 3.5%NaCl 腐蚀介质中的耐蚀性能最好，试验结果与电化学试验所得结果一致。

表 4 不同最佳稀土含量全浸试验数据
Tab.4 Full immersion test data of different optimal rare earth contents

Sample	Before the corrosion/g	After the corrosion/g	Average corrosion rate/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$
Al	32.334	32.330	33.458
	31.572	31.570	
	32.160	32.158	
	32.467	32.464	
Al+0.3%Ce	31.576	31.573	24.333
	31.678	31.676	
	31.274	31.272	
	31.389	31.388	
Al+0.2%Y	32.925	32.924	15.208
	32.572	32.571	
	32.789	32.787	
	32.457	32.456	

3 结论

- 1) 当稀土 Y 元素的添加量为 0.2%时，镀件表面最完整，无明显漏镀孔洞，针状相短而细。铝层厚度较薄，过渡层也由锯齿峰状转变为连续紧密的带状。
- 2) 与未添加 Y 的纯铝镀层比较，当稀土 Y 元素的添加量为 0.2%时， J_{corr} 减少了 1 个数量级， E_{corr} 正移了 0.147 V，电荷转移电阻 R_p 提高了大约 4 倍， E_b 比纯铝镀件正移了 0.203 V，提高了镀铝层的耐蚀性能。
- 3) 添加 0.2%Y 镀件的电荷转移电阻 R_p 是添加 0.3%Ce 镀件的 1.5 倍，其 E_b 比添加 0.3%Ce 镀件正移了 0.108 V，说明添加 0.2%Y 元素对提高热浸镀铝层耐蚀性的效果更好。

参考文献：

[1] JEFFREY R, MELCHERS R E. Corrosion of vertical mild steel strips in seawater[J]. Corrosion science, 2009, 51(10): 2291-2297.

[2] 谢瑞珍, 邹娟娟, 林乃明, 等. 熔盐电镀铝技术在钢铁材料腐蚀防护方面的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(8): 619-624, 636.
XIE Rui-zhen, ZOU Jiao-juan, LIN Nai-ming, et al. Research status of molten-salt electroplating aluminum techniques in corrosion protection for iron and steel[J]. Corrosion & protection, 2017, 38(8): 619-624, 636.

[3] 李欣, 李慧荣, 马涛, 等. 钢材表面热浸镀铝的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 19-22.
LI Xin, LI Hui-rong, MA Tao, et al. Research progress of hot dip aluminum on steel surface[J]. Hot working technology, 2019, 48(8): 19-22.

[4] 王雪明, 李爱菊, 管从胜, 等. 防腐涂层钢铁基体表面处理的研究进展[J]. 石油和化工设备, 2004, 7(6): 44-47.
WANG Xue-ming, LI Ai-ju, GUAN Cong-sheng, et al. Research progress on surface treatment of steel substrate with anticorrosive coating[J]. Petro & chemical equipment, 2004, 7(6): 44-47.

[5] 吴笛, 刘炳, 易大伟. 热浸镀铝技术的研究进展及应用[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(2): 7-10.
WU Di, LIU Bing, YI Da-wei. Application and research progress of hot dip aluminizing technology[J]. Plating & finishing, 2008, 30(2): 7-10.

[6] DE GRAEVE I, SCHOUKENS I, LANZUTTI A, et al. Mechanism of corrosion protection of hot-dip aluminium-silicon coatings on steel studied by electrochemical depth profiling[J]. Corrosion science, 2013, 76: 325-336.

[7] SCHOUKENS I, DE GRAEVE I, DE STRYCKER J, et al. Effect of local surface microstructure and composition on the electrochemical behavior of hot dip aluminum-silicon coatings on steel[J]. Corrosion, 2012, 68(11): 982-993.

[8] 郑毅然, 高文禄. 热浸镀铝钢材的应用与发展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(3): 179-184.
ZHENG Yi-ran, GAO Wen-lu. Application and development of hot dip aluminized steel[J]. Corrosion science and protection technology, 1999, 11(3): 179-184.

[9] 田澍. 55%Al-Zn 镀层钢板的发展与应用[J]. 鞍钢技术, 2000(2): 30-33.
TIAN Shu. Development and application on 55%Al-Zn coating plate[J]. Angang technology, 2000(2): 30-33.

[10] 张伟, 郭勤军, 文九巴. 稀土在热浸镀铝中的行为和分布研究[J]. 稀土, 2009, 30(5): 50-55.
ZHANG Wei, GUO Qin-jun, WEN Jiu-ba. Behavior and distribution of rare earths in hot dip aluminizing[J]. Chinese rare earths, 2009, 30(5): 50-55.

[11] KONG De-jun, WANG Jin-chun. Salt spray corrosion and electrochemical corrosion properties of anodic oxide film on 7475 aluminum alloy[J]. Journal of alloys and compo-

- unds, 2015, 632: 286-290.
- [12] 孙伟, 蔡启舟, 罗强. RE 对热浸镀铝镀层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 24-29, 80. SUN Wei, CAI Qi-zhou, LUO Qiang. Effects of rare earth on microstructure and corrosion resistance of hot-dip aluminum coating[J]. China surface engineering, 2010, 23(6): 24-29.
- [13] WEN Jiu-ba, ZHANG Wei, LI Xiao-yuan, et al. The influence of La on the corrosion resistance of hot-dip aluminized steel[M]. Stafa: Trans Tech Publications Ltd., 2005: 3851-3854.
- [14] 于升学, 夏原, 姚枚. 稀土铈对热浸镀铝层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2006, 30(6): 77-79. YU Sheng-xue, XIA Yuan, YAO Mei. Effect of rare earth element cerium on properties and microstructure of hot dip aluminum coating on Q235 steel[J]. Materials for mechanical engineering, 2006, 30(6): 77-79.
- [15] 徐秀清, 杜小英, 索涛, 等. 热浸铝镀层在氯化铵环境中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 16-20. XU Xiu-qing, DU Xiao-ying, SUO Tao, et al. Corrosion behavior of hot-dipped aluminum coating in ammonium chloride environment[J]. Surface technology, 2019, 48(5): 16-20.
- [16] 刘璇. 热浸镀 Al-Zn-In-Si 和 Al-Zn-Sn-Si 镀层的耐腐蚀性能及微观组织研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. LIU Xuan. Corrosion resistance and microstructure of hot-dip Al-Zn-In-Si and Al-Zn-Sn-Si coatings[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [17] 韩剑, 戴起勋, 李桂荣, 等. 稀土钇对 7055 铝合金铸态组织的影响[J]. 材料工程, 2009, 37(4): 67-70. HAN Jian, DAI Qi-xun, LI Gui-rong, et al. Effect of addition of yttrium on as-cast microstructure of 7055 aluminum alloy[J]. Journal of materials engineering, 2009, 37(4): 67-70.
- [18] 肖程波, 韩雅芳. 钇对 Ni_3Al 基合金 IC6 微观组织和高温抗氧化性能的影响[J]. 材料工程, 1998, 26(6): 23-25. XIAO Cheng-bo, HAN Ya-fang. Effect of yttrium on the microstructure and high temperature oxidation resistance of Ni_3Al base alloy IC6[J]. Journal of materials engineering, 1998, 26(6): 23-25.
- [19] WEN Jiu-ba, LI Quan-an, ZHAO Wan-xiang, et al. Investigation of properties of hot-dipped Ce-rich rare earth aluminum alloy upon conditions of corrosion environment full-text in English[J]. Acta scientiarum naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(S1): 41-44.
- [20] 文九巴, 李全安, 赵万祥, 等. 富 Ce 混合稀土铝合金热浸镀渗工艺研究[J]. 热加工工艺, 2003, 32(4): 13-14. WEN Jiu-ba, LI Quan-an, ZHAO Wan-xiang, et al. Research on the technology of hot-dipped Ce-rich mixed rare-earth aluminium and diffused-aluminized[J]. Hot working technology, 2003, 32(4): 13-14.
- [21] YAO Wen-li, LI Qian, LI Mou-cheng, et al. Effect of water rinsing temperature for steel substrate on corrosion behavior of hot-dip aluminizing coatings[J]. Advanced materials research, 2010, 148-149: 503-506.
- [22] 李冬冬, 邓尼丝, 许佳宁, 等. 65Mn、35Cr₂Ni₃MoV 和 AF1410 在模拟海洋环境中的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(4): 355-361. LI Dong-dong, DENG Ni-si, XU Jia-ning, et al. Corrosion resistance of 65Mn, 35Cr₂Ni₃MoV and AF1410 in simulated marine environment[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(4): 355-361.
- [23] 姚文俐, 董速伟, 陈金清, 等. 热浸镀铝锌镀层在 NaCl 溶液中腐蚀电化学行为[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(3): 13-17. YAO Wen-li, DONG Su-wei, CHEN Jin-qing, et al. The electrochemical corrosion behavior of hot-dip Al-Zn coatings in NaCl aqueous solution[J]. Nonferrous metals science and engineering, 2011, 2(3): 13-17.
- [24] 顾宝珊, 刘建华. 铝合金在铈盐溶液中成膜过程的电化学阻抗谱研究[J]. 中国稀土学报, 2007, 25(2): 210-216. GU Bao-shan, LIU Jian-hua. Cerium(III) film formation process for aluminum alloys observed with electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2007, 25(2): 210-216.
- [25] 郭晓宏, 吴秀霞, 张瑞琦, 等. Cl^- 对 S450AW 在酸性环境中腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(2): 21-25, 36. GUO Xiao-hong, WU Xiu-xia, ZHANG Rui-qi, et al. Effect of Cl^- ions on the corrosion behaviors of S450AW in acidic medium[J]. Materials protection, 2020, 53(2): 21-25.
- [26] 郭丽娟, 张潇华, 徐继昌, 等. 35CrMo 钢热浸镀铝工艺研究[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 186-191. GUO Li-juan, ZHANG Xiao-hua, XU Ji-chang, et al. Hot-dip aluminizing technology of 35CrMo steel[J]. Surface technology, 2018, 47(1): 186-191.
- [27] 黄亲国, 钟华仁. 稀土对热浸镀层组织和性能的影响[J]. 南昌航空工业学院学报, 1999, 13(2): 31-34. HUANG Qin-guo, ZHONG Hua-ren. Effect of RE on the microstructures and properties of hot-dip aluminized coatings[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 1999, 13(2): 31-34.
- [28] 刘正, 吕振家. 稀土表面处理的空位机制[J]. 科学通报, 1991, 36(12): 951-954. LIU Zheng, LYU Zhen-jia. Vacancy mechanism of rare earth surface treatment[J]. Chinese science bulletin, 1991, 36(12): 951-954.
- [29] GHALI E. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [30] 黄卫东, 张良玉, 曲谦, 等. 热浸铝材料表面电化学氧化工艺研究[J]. 有色矿冶, 2018, 34(1): 37-41. HUANG Wei-dong, ZHANG Liang-yu, QU Qian, et al. Study on electrochemical oxidation process of hot dip aluminum material[J]. Non-ferrous mining and metallurgy, 2018, 34(1): 37-41.
- [31] GE Hong-hua, ZHOU Guo-ding, WU Wen-quan. Passivation model of 316 stainless steel in simulated cooling water and the effect of sulfide on the passive film[J]. Applied surface science, 2003, 211(1-4): 321-334.