

Er 对 Al-Zn-In 合金组织和电化学性能的影响

李 航¹, 魏 兵¹, 许征兵^{1,2}, 曾建民^{1,2}, 陈 蓉¹, 李 恒¹, 陆艳艳¹

(1. 广西大学 有色金属材料及其加工新技术教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

(2. 广西理工科学实验中心, 广西 南宁 530004)

摘 要: 采用 SEM、EDS 和 XRD 等方法, 研究了不同 Er 含量对 Al-Zn-In 阳极合金组织的影响; 在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中测试了不同 Er 含量的 Al-5Zn-0.03In-Er 合金的极化曲线和电化学阻抗 (EIS)。结果表明: 随着 Er 含量的增加, 铝合金阳极枝晶得到细化, 枝晶间析出相增多, 合金腐蚀电位正移, EIS 谱中阻抗弧半径增大, 腐蚀速度减缓。4 种合金中, Al-5Zn-0.03In-1Er 合金枝晶得到一定程度细化、析出相数量适中, 点蚀坑较为独立, 呈现均匀腐蚀的特征, 可作为阳极合金材料。

关键词: Al-Zn-In 牺牲阳极; Er; 微观组织; 极化曲线; 电化学阻抗

中图分类号: TG174.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)07-1848-07

Al-Zn-In 系合金是被广泛研究和使用的牺牲阳极材料^[1], 但仍存在溶解不够均匀、电流效率有待提高等问题^[2], 研究人员为此采用热处理^[3]、变形加工^[4]、合金化等方法, 以期改变阳极合金组织来提升合金性能。向 Al-Zn-In 系阳极中添加第 4、第 5 组元的合金元素则是改善组织提高其性能的主要途径^[5,6]。

张有慧等人^[7]在天然海水中研究了合金元素镓、锡、铋等对 Al-Zn-In 系牺牲阳极电化学性能的影响, 通过极差分析来研究不同合金元素对电流效率和溶解形貌的影响, 各元素影响大小排序为锡>镓>铋。李威力等人^[8]认为添加适量的合金元素可以有效的提高 Al-Zn-In 系牺牲阳极合金的电化学性能: 如 Ga 能够使阳极合金电位负移, 增加阳极活化过程中的活化离子浓度; Sn 离子可以有效增加阳极表面自由能, 提高阳极活性, 同时可使 Ga 离子更易沉积在阳极表面, 增加活化作用; Ti 元素可细化阳极合金晶粒, 减少晶粒在腐蚀过程中大块脱落引起的机械损失。

有关 RE 元素添加对铝合金阳极电化学性能的影响的报道中目前受关注较多的是 La 和 Ce, 或二者组成的混合稀土。Ma Jingling^[9]认为 Ce 加入后形成的 Al₂CeZn₂ 相, 其开路电位较纯铝更负, 在合金中成为活化中心, 引起点蚀的发生与蚀孔的增殖。Ce 加入形成半球状析出相, 增加了 Al-Zn-In 合金的阳极表面活

化, 阳极溶解也最先由此发生^[10]。齐公台等人^[11]研究了混合稀土 (La、Ce) 对 Al-Zn-In 阳极组织、腐蚀形貌和电流效率的影响。结果表明, 混合稀土细化了合金晶粒, 使晶界面积增大, 主要存在于晶界的偏析相变得更细小、分布更均匀, 腐蚀形貌较为均匀; 另一方面, 对单个晶粒而言, 晶界面积减小, 晶界处偏析相增多, 由此导致的优先溶解更易于破坏晶粒间的结合力, 所以晶粒更易脱落, 致使阳极极化效率下降。而魏伯康等人^[12]认为, 混合稀土在铝基阳极中具有强烈的晶粒细化作用, 使金属间化合物细化和晶界面积增加, 既延长晶界腐蚀向阳极内扩展的路径, 减少选择性溶解发生的倾向, 改善阳极腐蚀溶解的均匀性; 又使脱落晶粒尺寸减小, 大大抑制电流效率的降低。唐有根等人^[13]则认为混合稀土对阳极合金组织和性能影响与其加入量有关, 以加入量小于 0.5% 为佳, 加入量超过 0.7% 时, 由于稀土元素在合金中分布不均, 变质效果变弱, 在腐蚀介质中晶粒大量脱落, 阳极利用率降低。混合稀土同时可以减少 Sn 等元素的晶间腐蚀倾向, 降低铝合金的析氢腐蚀倾向。

已有研究表明, 铝合金的某些合金元素主要是通过自身形成的析出相产生晶粒细化和强化等作用^[14], 如 Sc、Er, 其合金化作用的关键是其自身形成具有稳定 L1₂ 结构的 Al₃X (X=Sc, Er) 相, 该相在凝固时析

收稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51401057); 广西自然科学基金 (2013GXNSFBA019252); 广西教育厅科研项目 (2013YB011); 新型铝合金材料及先进加工理论与技术系统性课题 (桂科能 13-051-02, 13-A-02-03); “铝合金材料先进加工技术”八桂学者专项经费

作者简介: 李 航, 男, 1990 年生, 硕士生, 广西大学有色金属材料及其加工新技术教育部重点实验室, 广西 南宁 530004, 电话: 0771-3231238, E-mail: lihang.feng@qq.com

出成为非均质晶核, 细化铸态合金的晶粒; 这些析出相阻碍晶界扩张, 抑制合金晶粒的长大, 能有效提高铝合金的性能。相较于 Sc 而言, Er 是一种性价比较高的合金元素^[15], 但有关 Er 对铝合金阳极组织和电化学性能影响的研究鲜见报道。本研究以 Al-Zn-In 系合金为研究对象, 在前期工作的基础上, 通过对不同 Er 元素含量的 Al-5Zn-0.03In 合金进行组织观察、电化学测试, 研究 Er 含量对合金组织与电化学性能的影响。

1 实 验

实验所用合金的编号和名义成分见表 1。首先在 WKDHL 非自耗真空熔炼炉中熔炼 Al-Zn (50%Zn)、Al-In (0.1% In)、Al-Er (10%Er) 中间合金, 然后在 Ducatron Series3 高频感应炉内熔炼, 每炉容量 50 g, 浇注用金属模具尺寸为 $\Phi 20\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 预热至 $300\text{ }^\circ\text{C}$, 合金浇注温度为 $720\text{ }^\circ\text{C}$ 。浇注好的合金在三光线切割机切割成 $\Phi 14\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱试样。电化学测试用合金试样在切割后进行打磨、抛光至 $1\text{ }\mu\text{m}$ 研磨膏; 用于组织分析的试样则在抛光后用 Keller 试剂浸蚀 30 s 后备用。腐蚀形貌采用极化曲线测试后试样进行观察。

采用日立 S-3400N 扫描电子显微镜以及 EDAX 能谱仪对金相试样进行组织显微组织、元素组成分析, Rigaku D/Max 2500V X 射线衍射仪进行物相分析。

在 Gamery750 型电化学工作站上对合金进行极化曲线和电化学阻抗 (EIS) 的测定。采用三电极体系, 铝合金作为工作电极, 铂作为辅助电极, 饱和甘汞电

极为参比电极, 实验介质为 3.5% (质量分数) NaCl 溶液, 实验温度为室温, 试样工作面积为 1 cm^2 。极化曲线电位扫描范围为 $\pm 200\text{ mV}$ (vs.OCP), 扫描速率为 0.2 mV/s ; EIS 测试扰动信号正弦波幅值为 5 mV , 频率扫描范围为 $0.01\text{ Hz} \sim 100\text{ kHz}$ 。试样在介质中浸泡 2400 s, 待开路电位稳定后进行电化学测量。

2 实验结果

2.1 组织观察与分析

4 种合金的 SEM 低倍组织如图 1 所示。随着 Er 元素含量的增加, 枝晶形态发生较大变化, 由粗大状向长条、细小等轴状过渡; 枝晶间析出相的数量逐渐增多, 且形态由断续状逐渐向连续网状变化。合金的枝晶尺寸也发生显著变化, 4 种合金的 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶平均尺寸如图 2 所示, 依次为 51.3 、 21 、 18 、 $13.9\text{ }\mu\text{m}$ 。由此可知, 添加 1%Er 即可使合金枝晶明显细化, Er 含量继续增加, 枝晶进一步细化, 细化效果趋缓。

图 3 是添加 Er 元素的合金 SEM 高倍组织, 枝晶间相主要由鱼骨状相或白色颗粒相组成。Er 含量较少时, 枝晶间相主要呈鱼骨状, 白色颗粒相较少 (图 3a);

表 1 实验合金化学成分

Table 1 Chemical composition of tested alloys ($\omega/\%$)				
Alloy No.	Zn	In	Er	Al
1#	5	0.03	0	Balance
2#	5	0.03	1	Balance
3#	5	0.03	4	Balance
4#	5	0.03	7	Balance

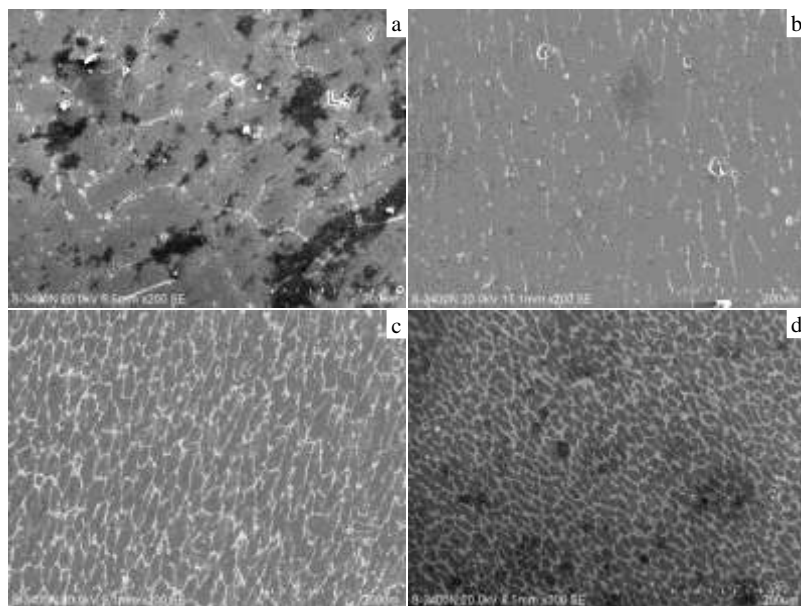


图 1 合金 SEM 枝晶组织

Fig.1 Dendrites of aluminum alloy: (a) Al-5Zn-0.03In, (b) Al-5Zn-0.03In-1Er, (c) Al-5Zn-0.03In-4Er, and (d) Al-5Zn-0.03In-7Er

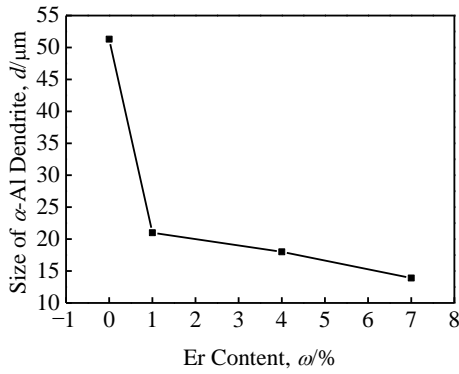


图 2 不同 Er 含量合金的 α -Al 枝晶尺寸

Fig.2 α -Al dendrite size of alloys with different Er content

Er 含量较大于 4% 时 (图 3b、3c), 枝晶间鱼骨状相增多, 连续成网状, 且有较多的白色颗粒相出现。

添加 Er 的合金, 基体未能探测出 Er, 鱼骨状部分 Er 含量较高, 白色颗粒状相中 Er 含量较基体和鱼骨状部分高。不同含量 Er 的合金分析结果类似, 故图 4 仅列出 Al-5Zn-0.03In-1Er 合金的枝晶间相能谱图。合金的枝晶间相主要由 Al、Zn、Er 3 种元素组成。图 4a 为 Al-5Zn-0.03In-1Er 合金基体能谱 (图 3a 中的 A

区), 显示基体仅有 Al 和 Zn, 即 α -Al (Al-Zn 固溶体); 图 4b 为枝晶间相的鱼骨状部分能谱 (图 3a 中的 B 区), 显示除 Al、Zn 外还有 Er 元素; 图 4c 为枝晶间相的白色颗粒 (图 3a 中的 C 区), Er 元素含量较图 4b 中高, 有可能是富 Er 析出相。

为了确定该相的物相组成, 对该 Al-5Zn-0.03In-1Er 合金进行了 XRD 分析, 与未添加 Er 的合金的 XRD 结果进行对比分析, 如图 5 所示。未添加 Er 的合金, 主要由 Al-Zn 固溶体组成, Al-5Zn-0.03In-1Er 合金中除了 Al-Zn 固溶体外, 还有 Al_3Er 相存在, 结合 SEM 和 EDS 分析, 鱼骨状组织应为 α -Al 和富 Er 相组成的共晶体组织, 图 4b 中白色颗粒相应为 Al_3Er 析出相。In 元素因添加量极少, 可能是由于超过了能谱和 XRD 的探测精度, 因而未能探测到含 In 相。

2.2 电化学性能测试与分析

合金的极化曲线如图 6 所示。对阳极合金材料而言, 阳极极化曲线表明合金使用过程中电位正向移动的快慢和钝化倾向的大小, 阳极极化曲线越平坦则极化程度越小, 表明阳极表面活性强, 电化学性能优越^[16]。从图中可以看出 4 种合金的阴极极化程度较阳极极化大, 阳极极化曲线较为平坦, 阳极极化程度较小,



图 3 合金枝晶间相 SEM 照片

Fig.3 SEM images of inter-dendrite phase of alloys: (a) Al-5Zn-0.03In-1Er, (b) Al-5Zn-0.03In-4Er, and (c) Al-5Zn-0.03In-7Er

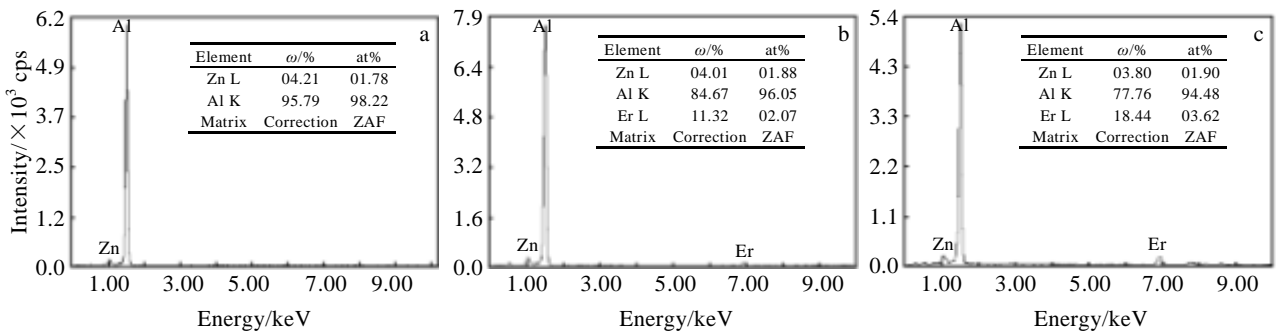


图 4 Al-5Zn-0.03In-1Er 合金能谱分析

Fig.4 EDS spectra analysis of A zone (a), B zone (b), and C zone (c) in Fig.3a for Al-5Zn-0.03In-1Er alloy

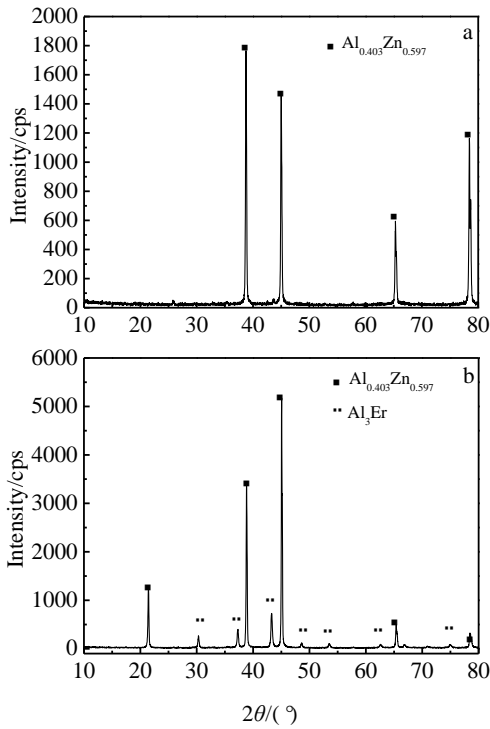


图 5 合金 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Al-5Zn-0.03In (a) and Al-5Zn-0.03In-1Er (b) alloys

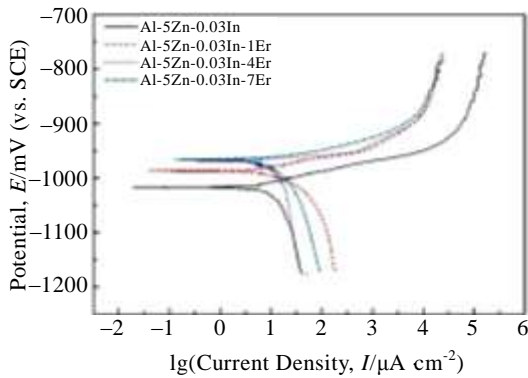


图 6 铝合金的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of aluminum alloys

合金在腐蚀介质中始终处于活化状态, 无钝化现象。表明合金试验过电位范围内, 合金阳极过程属于活性区的溶解过程, 合金阳极能够连续溶解, 阴极保护效应大。

合金的 EIS 谱如图 7 所示。可以看出, 4 种阳极在中高频扫描区域出现容抗弧, 低频出现感抗弧, EIS 谱曲线形状类似, 这说明 Er 元素的添加仅改变合金阻抗的大小, 并未改变其类型, 即未改变合金电化学动力学机制^[17]。高频区域的容抗弧随着合金中 Er 含量

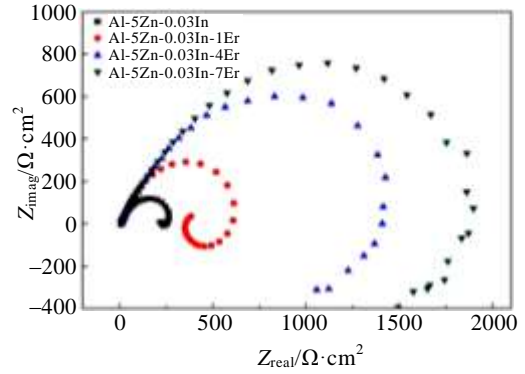


图 7 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中的 EIS 谱

Fig.7 EIS curves of aluminum alloys in 3.5% NaCl solution

的增加, 曲率半径显著增大。

合金的 EIS 谱在中低频区域, 均显示出感抗弧, 有关感抗弧的说法, Carmel B. Breslin^[18]认为低频感抗弧的出现是金属表面原始钝化膜的保护性减弱引起的, 曹楚南等人^[19]则认为有钝化膜覆盖的金属可能在钝化膜点蚀期产生感抗, 感抗成分是由于合金点蚀溶解反应生成中间产物所导致的。这表明 4 种阳极都处于活性区, 能够不断溶解。Al-5Zn-0.03In-1Er 与未添加 Al-5Zn-0.03In 相比, 阻抗弧相差不大, 而 Al-5Zn-0.03In-4Er 与 Al-5Zn-0.03In-7Er 的阻抗弧明显增大。

3 分析与讨论

由 Al-Er 二元相图^[20]可知, Er 在 Al 中的平衡固溶度很低, 在相图富铝角, 有 Al-Al₃Er 共晶反应, 其共晶反应温度为 655 °C, 共晶成分点为 6% (质量分数) Er, 合金在凝固结晶过程中, Er 在固液界面前沿大量富集, 使得界面附近 Er 含量升高, 合金达到共晶成分时, 形成 α-Al 和 Al₃Er 的共晶组织, 即图 3 中的鱼骨状组织。共晶的鱼骨状组织阻碍了枝晶的正常生长, 使枝晶细化^[21], 在共晶反应时, 界面前沿由于 Er 富集加剧, 超过共晶成分, 直接从熔体中形成高熔点的 Al₃Er 颗粒相 (图 3b 中的 C 区)。刘晓清等人^[22]的研究表明, 这类直接从熔体中产生的 Al₃Er 相满足充当非均质形核核心的条件, 能够促进合金形核, 细化合金晶粒; 同时, Al₃Er 相在枝晶间的形成, 进一步阻碍晶粒的长大和晶界滑移。而当 α-Al 枝晶数量已经非常多时, Al₃Er 不再作为非均质形核的核心, 而是直接依附于 α-Al 枝晶上, 阻碍其生长, 使得其根部发生颈缩^[23], 进而与枝晶主干分离, 分离后的细枝作为新的晶核, 使晶粒增殖, 细化晶粒。

除此之外, Zn、In 等元素在铝中的溶解度较小, Al-Zn-In-xEr 系列合金的微观组织的基体为 α-Al (Al-Zn 固溶体), 合金元素部分存在于固溶体中, 超

过固溶度的合金元素多以偏析相等形式分布于基体、晶界以及枝晶间。向 Al-Zn-In 合金中添加 Er 元素，受正常凝固条件下扩散动力学条件的限制，合金凝固过程中，Er 元素将富集于固液界面前沿，引起溶质再分配，增大了合金凝固过程中的成分过冷，使分枝过程加剧，从而使得枝晶网胞变细^[15]。

根据图 6 中的合金极化曲线，拟合后得出腐蚀电流密度以及腐蚀电位，如表 2 所示。从表 2 中可以看出，随着 Er 含量的增加，合金腐蚀电流密度大幅减小，说明合金的腐蚀速率下降，在合金充当阳极工作时，因自腐蚀导致的阳极损耗减少；而腐蚀电位升高，则表明合金的腐蚀倾向减小，Al-5Zn-0.03In-4Er 与 Al-5Zn-0.03In-7Er 合金相差不大，4 种合金的腐蚀电位都低于钢的保护电位-0.85 V。

电化学阻抗谱中高频容抗弧由电荷转移电阻和界面双层电容的弛豫过程引起，容抗弧直径的大小反映了合金在充放电、电荷转移等电化学过程受阻程度的大小^[19]。与未添加 Er 的 1#、添加 1%Er 的 2#阳极合金相比，Er 添加量为 4%和 7%的 3#、4#阳极合金的阻抗弧明显增大，这说明后两者合金阳极溶解过程中的阻力较大；相较而言，前两者腐蚀较快，后两者腐蚀较慢。

等效电路是电化学阻抗谱分析的常用方法，但等效电路方法存在与电极反应的动力学模型不能一一对应，等效元件的物理意义不明确等缺陷^[19]。因此，结合组织状态和阳极溶解过程对电化学阻抗谱进行分析。在 3.5%（质量分数）NaCl 介质中，未添加 Er 元素的合金原始表面覆盖一层极薄的钝化膜，但由于 Zn

的存在，使得氧化膜比较疏松，而 In 的存在，使合金活性增加，电荷转移电阻较小，双层电容弛豫过程较弱，容抗弧曲率半径较小。随着添加 Er 元素含量的增加，使 Zn 的偏析减少，而 Er 本身富集于枝晶间，一方面细化了合金枝晶，另一方面偏析相增多，且均匀分布，合金均匀溶解。Er 元素的加入，增加了合金在溶液体系电化学过程中的转移电阻，双层电容弛豫过程加强，容抗弧曲率半径增大，相较未添加 Er 的合金，添加 Er 的合金溶解速度减慢，合金的耐腐蚀性能提高，这与极化曲线拟合结果相吻合。4 种合金的 EIS 谱中都出现代表点蚀的低频感抗弧，表明合金的溶解由点蚀开始。在海水中，点蚀由侵蚀性阴离子 Cl⁻引起，容易吸附在表面有缺陷（如位错、析出相）的位置，这些位置成为活性点引发点蚀^[24]。适当均匀分布的析出相由于 Cl⁻的吸附成为诱发孔蚀的活性点，有利于合金均匀溶解。Al-5Zn-0.03In-1Er 合金在低频区出现部分容抗弧，可能是由于合金表面反应物形成了一层表面膜^[25]，固溶在 Al 基体中的 Zn、In 等元素以“溶解-再沉积”形式溶解，在反应物表面膜沉积引起。

4 种合金经电化学腐蚀后的形貌如图 8 所示。与

表 2 实验合金电化学性能

Table 2 Electrochemical properties of tested alloys

Alloy No.	Corrosion current density $I_{corr}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Corrosion potential, E_{corr}/mV
1#	24.2	-1020
2#	6.73	-987
3#	4.22	-968
4#	3.74	-966

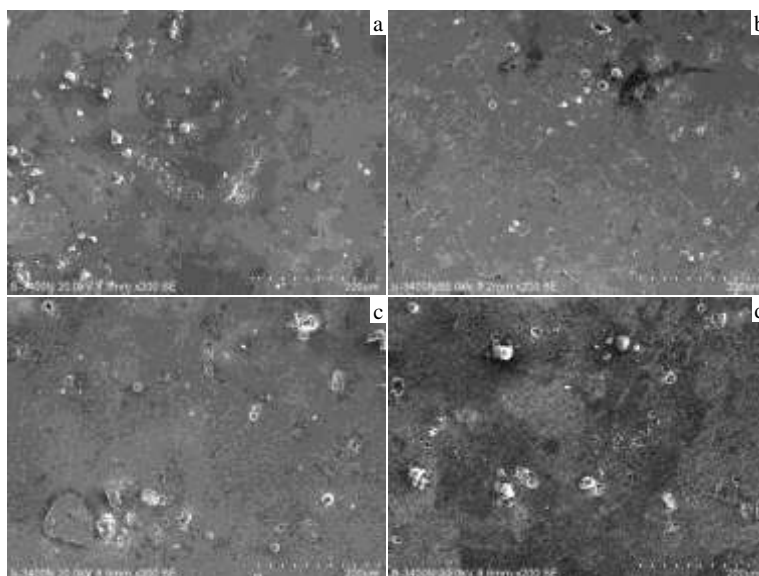


图 8 铝合金阳极电化学腐蚀形貌

Fig.8 Electrochemical corrosion morphologies of aluminum alloy sacrificial anode: (a) Al-5Zn-0.03In, (b) Al-5Zn-0.03In-1Er, (c) Al-5Zn-0.03In-4Er and (d) Al-5Zn-0.03In-7Er

未添加 Er 的合金相比, Al-5Zn-0.03In-1Er 合金存在点蚀现象, 后者点蚀坑面积小; Al-5Zn-0.03In-4Er 点蚀坑较小, 个别腐蚀坑较大; Al-5Zn-0.03In-7Er 因为点蚀启动点多、扩展速度快, 使得点蚀相互连接, 呈现沿晶界腐蚀的特征。结合极化曲线中腐蚀电流密度和腐蚀电位的分析结果可知, 添加 Er 后的合金可能是由于合金晶粒得到细化, 其腐蚀产物较为细小, 不呈大块脱落, 提高了合金的耐腐蚀性能^[26]。

阳极合金材料必须具有一定的活性, 以便能够对钢铁等金属器件进行保护, 同时腐蚀速度不宜太快, 腐蚀速度过快降低了阳极的使用寿命; 另一方面, 对于含稀土元素的阳极合金, 稀土含量较高时, 析出相在合金中分布不均, 在腐蚀介质中可能出现晶粒大块脱落现象, 阳极利用率降低^[13]。结合合金的极化性能和 EIS 谱的分析, 4 种合金中, Al-5Zn-0.03In-1Er 晶粒得到一定程度细化、析出相数量适中, 呈现均匀腐蚀的特征; 4 种合金表面都存在腐蚀产物局部吸附的现象, 综合比较 Al-5Zn-0.03In-1Er 合金点蚀腐蚀坑较小, 点蚀坑较独立, 并未连成一片, 可作为阳极合金的选择。

4 结 论

1) Er 能够显著细化 Al-5Zn-0.03In 合金的枝晶, 随 Er 含量的增加, 细化效果减缓, 枝晶间析出相的数量增多, 主要为 Al-Zn 固溶体和 Al₃Er 相。

2) Er 含量增加, 合金腐蚀电流密度减小, 腐蚀电位正移, EIS 谱中容抗弧半径增大, 合金溶解速度降低, 耐腐蚀性能得到提高。

3) Al-5Zn-0.03In-1Er 合金晶粒得到一定程度细化、析出相数量适中, 呈现均匀腐蚀的特征, 可作为阳极合金的选择材料。

参考文献 References

- [1] Reboul M C, Gimenez P H, Ramaen J J. *Corrosion*[J], 1984, 40(7): 336
- [2] Wei Xiaohua(韦小华), Li Hang(李 航), Xu Zhengbing(许征兵) *et al. Foundry(铸造)*[J], 2014, 63(3): 844
- [3] Li Yuanzhen(李元贞), Wen Jiuba(文九巴), Zhao Shengli(赵胜利) *et al. Corrosion Science and Protection Technology(腐蚀科学与防护技术)*[J], 2010, 22(5): 395
- [4] Lin J C, Shih H C. *Journal Electrochemistry Society*[J], 1987, 134(4): 817
- [5] Qi Gongtai(齐公台), Guo Zhihu(郭稚弧), Zhang Huamin(张华民) *et al. Corrosion Science and Protection Technology(腐蚀科学与防护技术)*[J], 1997, 9(3): 61
- [6] Zhao Yuehong(赵月红), Lin Leyun(林乐耘), Liu Zengcai(刘增才) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2000, 24(5): 341
- [7] Zhang Youhui(张有慧), Zhang Lin(张 林), Cheng Guodong(程国东) *et al. Corrosion and Protection(腐蚀与防护)*[J], 2013, 34(9): 775
- [8] Li Weili(李威力), Yan Yonggui(闫永贵), Chen Guang(陈 光) *et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection(中国腐蚀与防护学报)*[J], 2012, 32(2): 127
- [9] Ma Jingling, Wen Jiuba, Zhai Wenxia *et al. Materials Characterization*[J], 2012, 65: 86
- [10] Xiong W, Qi G T, Guo X P *et al. Corrosion Science*[J], 2011, 53(4): 1298
- [11] Qu Jun'e(屈钧娥), Qi Gongtai(齐公台), Zhang Lei(张 磊) *et al. Corrosion Science and Protection Technology(腐蚀科学与防护技术)*[J], 2002, 14(3): 169
- [12] Wei Bokang(魏伯康), Cai Qizhou(蔡启舟), Lin Hantong(林汉同) *et al. Journal of the Chinese Rare Earth Society(中国稀土学报)*[J], 1998, 16(3): 270
- [13] Tang Yougen(唐有根), Han Hongtao(韩红涛), Xie Zhenghe(谢正和) *et al. Journal of Center South University, Science and Technology(中南大学学报, 自然科学版)*[J], 2006, 37(4): 737
- [14] Yang Wei(杨 伟), Chen Shouhui(陈寿辉), Zhang Shouyin(张守银) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2014, 24(3): 593
- [15] Nie Zuoren(聂祚仁), Wen Shengping(文胜平), Huang Hui(黄 晖) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2011, 21(10): 2361
- [16] Li Yuanzhen(李元贞), Wen Jiuba(文九巴), Zhao Shengli(赵胜利) *et al. Corrosion Science and Protection Technology(腐蚀科学与防护技术)*[J], 2010, 22(3): 216
- [17] Ma Jingling(马景灵). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009
- [18] Breslin Carmel B, Rudd Amy L. *Corrosion Science*[J], 2000, 42(6): 1023
- [19] Cao Chunan(曹楚南), Zhang Jianqing(张鉴清). *An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy(电化学阻抗谱导论)*[M]. Beijing: Science Press, 2002
- [20] Buschow K H J. *Philips Res Rep*[J], 1971, 26: 49
- [21] Zhu Shidan(朱世旦), Huang Hui(黄 晖), Nie Zuoren(聂祚仁) *et al. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术)*[J], 2009, 37(5): 53
- [22] Liu Xiaoqing(刘晓清), Li Bolong(李伯龙), Li Hongmei(李红梅) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2008,

- 37(7): 1
- [23] Zhu Shidan(朱世旦), Huang Hui(黄 晖), Nie Zuoren(聂祚仁) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2009, 33(2): 164
- [24] Ma Jingling(马景灵), Wen Jiuba(文九巴), Li Guangfu(李光福) *et al. Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2008, 33(8): 57
- [25] Luo T J, Yang Y S, Li Y J *et al. Electrochimica Acta*[J], 2009, 54(26): 6433
- [26] Zheng Xiaohua(郑晓华), Zhang Xiaoru(张小茹), Zhang Daidong(张代东) *et al. Journal of the Chinese Society of Rare Earths(中国稀土学报)*[J], 2012, 30(5): 594

Effect of Er on Microstructure and Electrochemical Performance of Al-Zn-In Anode

Li Hang¹, Wei Bing¹, Xu Zhengbing^{1,2}, Zeng Jianmin^{1,2}, Chen Rong¹, Li Heng¹, Lu Yanyan¹

(1. Key Laboratory of Nonferrous Materials and New Processing Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2. Guangxi Experiment Centre of Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The effect of Er content on microstructure of Al-Zn-In alloy anodes were studied by scanning electron microscopy (SEM), energy spectrum analysis and X-ray diffraction analysis. The polarization curves and EIS of Al-Zn-In alloy with different Er contents were tested in the 3.5wt% NaCl solution. The results show that with the increase of Er content, the dendrite of Al-Zn-In alloy anodes is refined, the amount of inter-dendritic precipitates increases, the corrosion potential becomes more positive, the radius of electrochemical impedance spectroscopy enlarges while the corrosion rate decreases. Al-5Zn-0.03In-1Er alloy possesses refined dendrites and a proper amount of precipitates, with independent pitting and uniform corrosion, which is an ideal sacrificial alloy.

Key words: Al-Zn-In sacrificial alloy; Er; microstructure; polarization curve; EIS

Corresponding author: Xu Zhengbing, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Nonferrous Materials and New Processing Technology, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China, Tel: 0086-771-3231238, E-mail: 51happiness@163.com