

Er 对铸态 AZ91 镁合金显微组织和耐腐蚀性能的影响

刘楚明^{1,3}, 葛位维¹, 李慧中^{1,2}, 陈志永^{1,2}, 王 荣³, 高艳蕊¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083;

3. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 宁波 315103)

摘 要: 利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X 射线衍射分析、集气法及动电位极化曲线研究了微量 Er 对铸态 AZ91 镁合金显微组织和腐蚀性能的影响。结果表明: 微量 Er 可细化 AZ91 镁合金的铸态组织, 当 AZ91 镁合金中加入 Er 的含量不高于 0.7%(质量分数)时, 随着 Er 含量的增加, 镁合金中的 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相由粗大、连续块状分布逐渐转变为细小、岛状均匀分布, 并且有 Al₃Er 相生成; 同时, 微量 Er 也可显著提高铸态 AZ91 的耐腐蚀性能, 当 Er 含量为 0.7%时, 合金耐蚀性能大幅度提高, 在 3.5%(质量分数)NaCl 水溶液中浸泡的腐蚀速率为 0.546 06 mg/(cm²·d), 仅为常规 AZ91 镁合金的 1/15; 微量 Er 使得 AZ91 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的自腐蚀电位升高, 自腐蚀电流降低, 从而提高 AZ91 镁合金的耐腐蚀性能。

关键词: AZ91 镁合金; Er; 显微组织; 腐蚀性能

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of Er on microstructure and corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy

LIU Chu-ming^{1,2}, GE Wei-wei¹, LI Hui-zhong^{1,2}, CHEN Zhi-yong^{1,2}, WANG Rong³, GAO Yan-rui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Ningbo Branch, Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China)

Abstract: The microstructure and corrosion behavior of AZ91 magnesium alloys with trace addition of Er were investigated by optical microscopy (OM), scanning electronic microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffractometry (XRD), collecting gas, immersion test and potentiation dynamic polarization. The results show that with Er addition in the range of 0%–0.7% (mass fraction), the γ -Mg₁₇Al₁₂ phase is refined with increasing Er addition and disperses well in the matrix, and Al₃Er phase forms. The corrosion resistance of alloy is significantly improved. The alloy with 0.7% Er has the best corrosion resistance, and the corrosion rate is 0.546 06 mg/(cm²·d), only 1/15 of that of common AZ91 alloy. Trace addition of Er enhances the electrode voltage and lowers the corrosion current of AZ91 alloy in 3.5% NaCl solution, thus improves the corrosion characters of magnesium alloy.

Key words: AZ91 magnesium alloy; Er; microstructure; corrosion resistance

AZ91 镁合金是最常用的镁合金之一, 具有易加工、易铸造、强度高以及成本低等优点, 已经被广泛

应用于多种形式的机械部件。但是, 通常 AZ91 镁合金只能在 120 ℃ 以下使用^[1], 且在各种介质中的耐腐

基金项目: 国防重大基础研究基金资助项目(2005 年)

收稿日期: 2008-12-09; 修订日期: 2009-03-02

通讯作者: 刘楚明, 教授, 博士; 电话: 0731-8830257; E-mail: cmLiu@mail.csu.edu.cn

蚀性能较差,成为其大规模应用的严重障碍。因此,提高 AZ91 镁合金的耐高温和抗腐蚀性能一直是目前材料科学工作者急需解决的重要问题之一。

稀土元素具有独特的物理和化学性质,在镁及其合金中加入稀土元素可以细化晶粒、改善组织、提高高温力学性能以及耐腐蚀性能^[2-6]。在 AZ91 镁合金中,通过添加稀土元素来提高其综合性能是常用手段之一。目前研究较多的稀土元素主要有钇、铈、富铈或者富镧的混合稀土等^[7-10]。但是,Er 作为一种重要的稀土元素,在 AZ91 镁合金中的应用仅有少量研究报道。肖代红和黄伯云^[11]研究发现,在 AZ91 镁合金中添加 0.98%~1.92%Er 后,能有效细化铸态合金的晶粒,且其室温抗拉强度从 162 MPa 提高到 211 MPa。但是 Er 对 AZ91 镁合金腐蚀性能的影响规律研究的较少。本文作者研究了添加微量稀土元素 Er 对 AZ91 镁合金显微组织和耐腐蚀性能的影响,为提高 AZ91 镁合金的耐腐蚀性能以扩大其应用领域提供有益参考。

1 实验

实验合金的化学成分及编号如表 1 所列。采用 Mg (99.78%)、纯 Al(99.7%)、纯 Zn(99.8%)、Al-9.55% Mn 及 Al-30%Er 中间合金,在井式电阻炉中使用不锈钢坩埚熔炼,熔炼温度 750 °C,保护气体为 SF₆+CO₂,在 680 °C 将合金溶液浇入预热至 200 °C 的铁模中。

表 1 实验镁合金实际化学成分表

Table 1 Chemical composition of experiment alloys

| Alloy No. | Alloy | Mass fraction/% | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|------|------|------|------|
| | | Al | Zn | Mn | Er | Mg |
| 1 | AZ91 | 8.90 | 0.71 | 0.23 | — | Bal. |
| 2 | AZ91+0.3%Er | 8.95 | 0.68 | 0.27 | 0.29 | Bal. |
| 3 | AZ91+0.5%Er | 9.21 | 0.70 | 0.27 | 0.45 | Bal. |
| 4 | AZ91+0.7%Er | 8.96 | 0.72 | 0.25 | 0.70 | Bal. |

腐蚀速率采用失重法和析氢法相结合的方法测定,腐蚀介质为 3.5%NaCl 溶液,实验温度为室温(20 °C),试样尺寸为 $d\ 30\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$,试样表面经金相砂纸逐级打磨后,用丙酮溶液超声波清洗、吹干,并用十万分之一电子天平称量后,悬挂在体积为 400 mL 的腐蚀溶液当中,每隔 24 h 记录滴定管内气体的体积,计算其腐蚀速率。试样分别于 24、48、72 和 96 h

后取出用 20%CrO₃+1%AgNO₃ 溶液清洗腐蚀产物,并用无水乙醇和二次去离子水冲洗表面,热风吹干后称质量,计算腐蚀质量损失和自腐蚀速率,取 3 次平行实验的平均值为结果。试样腐蚀 48 h 后的宏观形貌和显微组织观察在 POLYVAR-MET 金相显微镜下进行,扫描电镜分析在 Sirion200 场发射扫描电镜上进行,EDS 分析在其附带的 Gensis60 型能谱分析仪来进行。腐蚀产物 X 射线衍射分析在 DMAX22000 上进行。采用 IM6ex 电化学工作站测试 Tafel 曲线。用 Pt 为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极的三电极体系,电解质为 3.5%NaCl 溶液,扫描范围-1.8~0.2 V,扫描速度 10 mV/s,测试温度 25 °C。

2 结果与讨论

2.1 微量 Er 对 AZ91 微观组织的影响

图 1 所示为添加不同 Er 含量的 AZ91 镁合金铸态组织。从图 1(a)可以看出,AZ91 镁合金的微观组织主要是由 α -Mg 和尺寸粗大、连续分布的 γ -Mg₁₇Al₁₂ 组成。比较图 1(b)~(d)发现:添加 Er 可以明显细化 γ -Mg₁₇Al₁₂,并使第二相 γ -Mg₁₇Al₁₂ 由原来的块状连续分布变成弥散细小的球状或点状分布,且随着 Er 含量的增加不断细化和球化,分布更均匀。图 2 所示为合金 1 和合金 4 的 SEM 像和 EDS 谱。由图 2(a)可见,合金中除了 α -Mg 和 γ -Mg₁₇Al₁₂ 之外,还有一些白亮的粒状相。经 EDS 分析表明,合金中含有 Mg、Al 和 Mn 等元素(见图 2(b))。从图 2(c)还可发现,加入 Er 后形成白亮杆状相。经 EDS 分析表明,该相主要含 Al 和 Er,其摩尔比约为 3:1(见图 2(d)),可以确定该相为 Al₃Er^[11]。

AZ91 镁合金中添加 Er 后,合金组织发生的变化很大程度上与 Er 有关。一方面由于 Er 与 Al 的电负性差值为 0.4,大于 Er 与 Mg 的电负性差值 0.1^[12],因此,在凝固过程中形成了 Al-Er 相而不是 Mg-Er 相。且在合金凝固过程中,Mg₁₇Al₁₂ 相和 Al₃Er 相的形成温度分别为 437 °C 和 655 °C^[13],Al₃Er 相先于 Mg₁₇Al₁₂ 相在凝固早期开始形成,消耗了基体中的一部分 Al 原子,减少了 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相的形成数量。另一方面,稀土 Er 元素是表面活性元素,在 Mg₁₇Al₁₂ 相生长过程中可以吸附在生长枝晶尖端,抑制 Mg₁₇Al₁₂ 相的长大,从而减少 Mg₁₇Al₁₂ 相的数量,增大其弥散程度,减小其尺寸^[14]。加入稀土 Er 后,稀土相受凝固时扩散动力学条件限制而聚集在固液界面前沿,增大

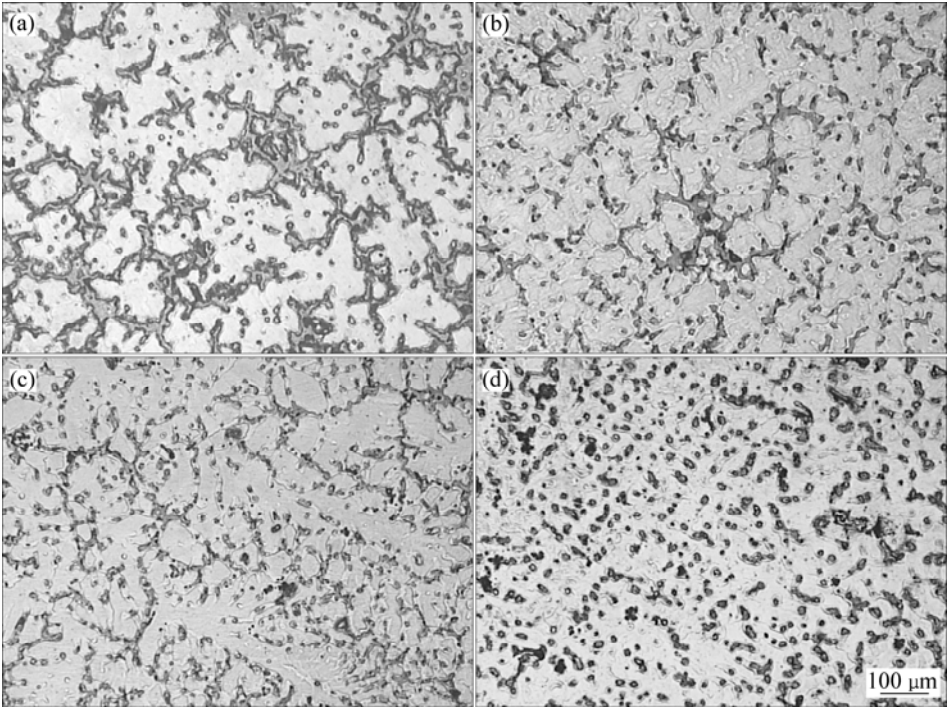


图 1 铸态合金的光学显微组织

Fig.1 Optical microstructures of as-cast alloys: (a) AZ91; (b) AZ91+0.3%Er; (c) AZ91+0.5%Er; (d) AZ91+0.7%Er

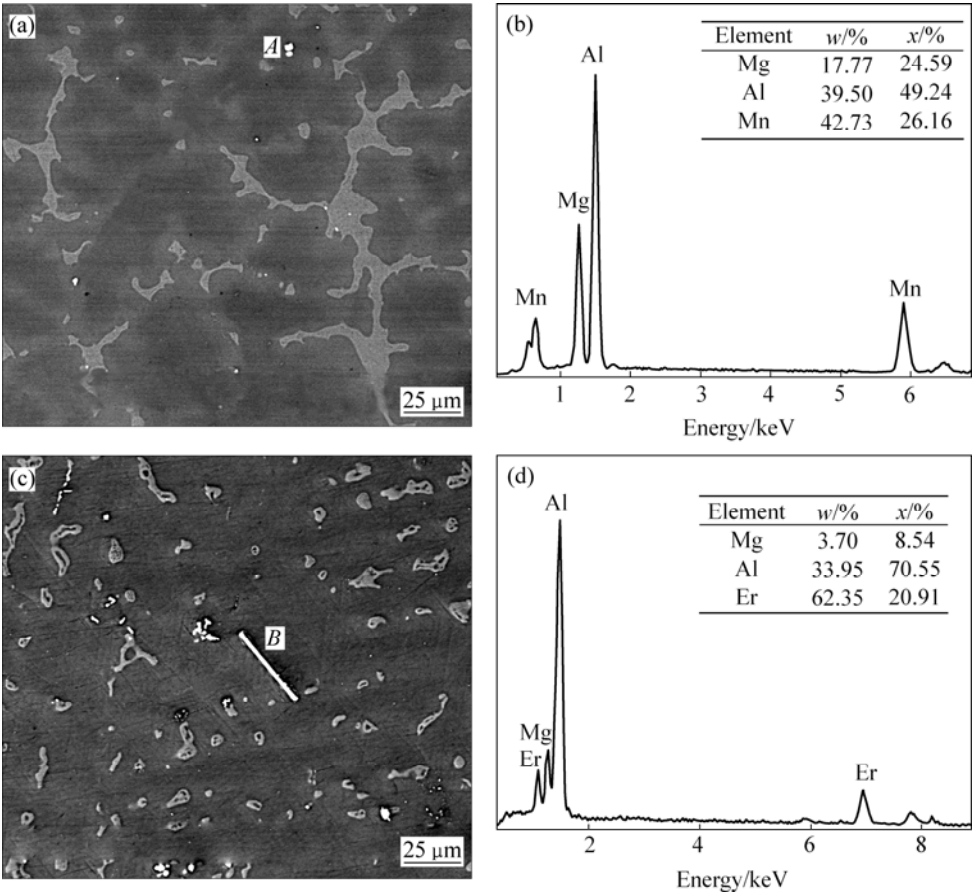


图 2 铸态合金的 SEM 像和 EDS 能谱

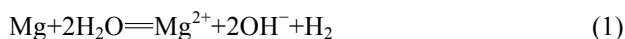
Fig.2 SEM images and EDS patterns of as-cast alloys: (a) SEM image of AZ91; (b) EDS pattern of point A; (c) SEM image of AZ91+0.7%Er; (d) EDS pattern of point B

了合金的成分过冷而使分枝过程加剧,二次枝晶增多,最终使枝晶间距减小,组织细化^[11]。

2.2 微量 Er 对 AZ91 镁合金耐腐蚀性能的影响

2.2.1 镁合金的腐蚀速率

采用气体容量法测定腐蚀速率,根据镁腐蚀机理,镁合金在水溶液中主要发生如下反应:



式(1)表明,每溶解一个镁原子就会产生一个 H_2 分子。所以测量腐蚀过程中析出的氢气体积,就可算出被腐蚀镁的量。换算结果表明:1 L 析出气体近似为 1 g 镁或镁合金被腐蚀^[15]。合金 1~4 在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 d 的平均腐蚀速率分别为 7.652 43、1.514 37、1.211 99 和 0.546 06 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$,结果如图 3 所示。由图 3 可见:当 Er 含量为 0.7%以下时,合金的腐蚀速率随着 Er 含量的增加而降低;当 Er 含量为 0.3%和 0.5%时,腐蚀速率相差不大,降到约为原 AZ91 镁合金腐蚀速率的 20%左右;当 Er 含量达到 0.7%时,合金的腐蚀速率仅相当于 AZ91 腐蚀速率的 7.2%。

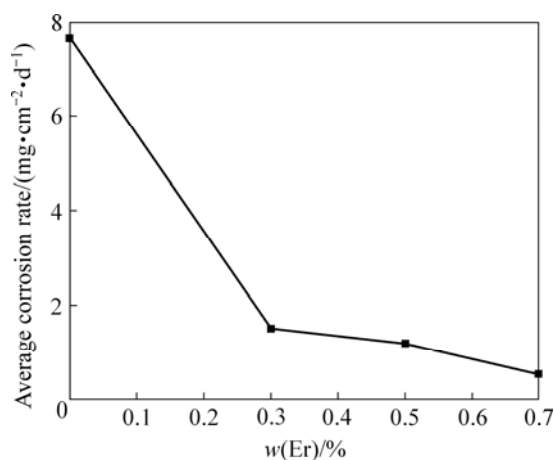


图 3 不同合金浸泡 5 d 的平均腐蚀速率

Fig.3 Average corrosion rates of different alloys immersed in 3.5% NaCl solution for 5 d

图 4 所示为 AZ91 和 AZ91+xEr 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的析氢腐蚀速率随时间的变化曲线。由图 4 可以看出, AZ91 合金的析氢腐蚀速率远大于 AZ91+xEr 合金的,并且 AZ91 镁合金腐蚀速率随时间波动较大,随着腐蚀时间的增加腐蚀速率迅速增大,在第 4 d 达到最大值,然后腐蚀速率开始下降。AZ91+xEr 腐蚀速率随着腐蚀时间的增加变化比较平缓,在第 2 d 或第 3 d 达到最大值,随后逐渐下降。

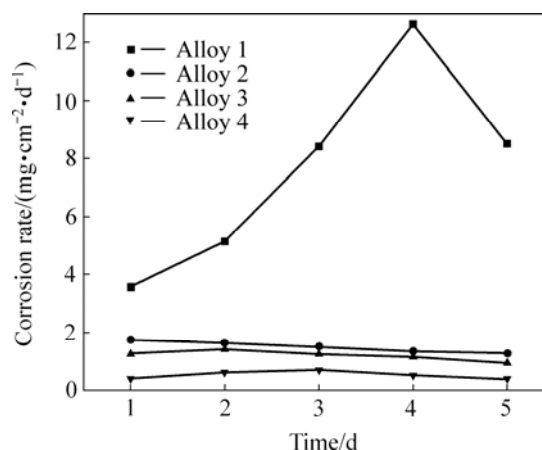


图 4 合金在溶液中浸泡不同时间的腐蚀速率

Fig.4 Corrosion rates of alloys immersed in 3.5% NaCl solution after different times

2.2.2 镁合金的极化曲线

图 5 所示为不同合金在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线。由图 5 可以看出, AZ91 及 AZ91+xEr 镁合金极化曲线阴极分支都遵循 Tafel 规律,对应于阴极析氢反应,极化曲线的阴极 Tafel 曲线斜率逐渐增加,表明 Er 的加入能抑制阴极析氢反应。同时,随着 Er 含量的增加,阳极极化曲线斜率逐渐增加,其自腐蚀电流密度降低。

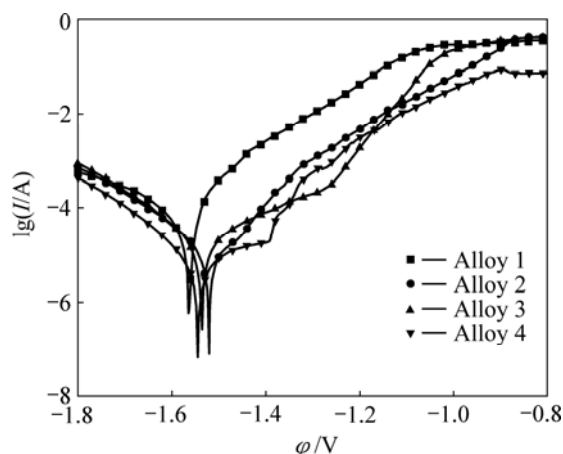


图 5 实验合金的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of alloys in 3.5% NaCl solution

表 2 所列为极化曲线进行 Tafel 拟合的结果。由表 2 可以看出,添加 Er 后,合金的自腐蚀电位升高,自腐蚀电流密度降低;当 Er 含量达到 0.7%时,自腐蚀电位升至 -1.544 V,自腐蚀电流降为 8.577 μA 。根据法拉第定律,电流密度与腐蚀速率成正比,由此可

知, 加入 Er 后合金的耐腐蚀性能显著提高, 实验结果与失重法、析氢法测试结果一致。

表 2 AZ91+xEr 的极化曲线拟合结果

Table 2 Fitting results of polarization curves for AZ91+xEr alloys

| Sample No. | $\varphi_{\text{corr}}/\text{V}$ | $J_{\text{corr}}/\mu\text{A}$ |
|------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | -1.566 | 37.020 |
| 2 | -1.536 | 19.890 |
| 3 | -1.521 | 9.206 |
| 4 | -1.544 | 8.557 |

2.2.3 AZ91 镁合金的表面腐蚀形貌及产物分析

图 6 所示为不同 Er 含量的 AZ91 镁合金在 3.5% NaCl 溶液浸泡 2 d 后的腐蚀形貌。由图可以看出, 合金 1 表面全部被腐蚀, 腐蚀程度较深, 有大量的腐蚀产物, 且存在深腐蚀坑; 合金 2 和 3 被腐蚀的部分约为合金表面的 1/3, 腐蚀产物相对要少, 腐蚀坑较浅; 合金 4 表面的腐蚀最少, 只在边缘被少部分腐蚀, 其耐腐蚀性能最好, 这与失重法、析氢法测试的腐蚀性规律一致。

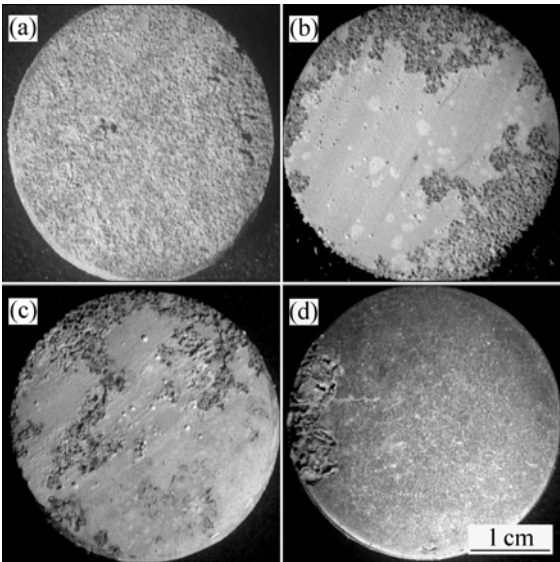


图 6 AZ91 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 2 d 的腐蚀形貌
Fig.6 Morphologies of corrosion surfaces of alloys in 3.5% NaCl solution for 2 d: (a) AZ91; (b) AZ91+0.3%Er; (c) AZ91+0.5%Er; (d) AZ91+0.7%Er

图 7 所示为合金 1、3 和 4 在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 d 后表面 XRD 分析。结果显示: 合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡后的腐蚀产物主要是 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 Al_2O_3 。

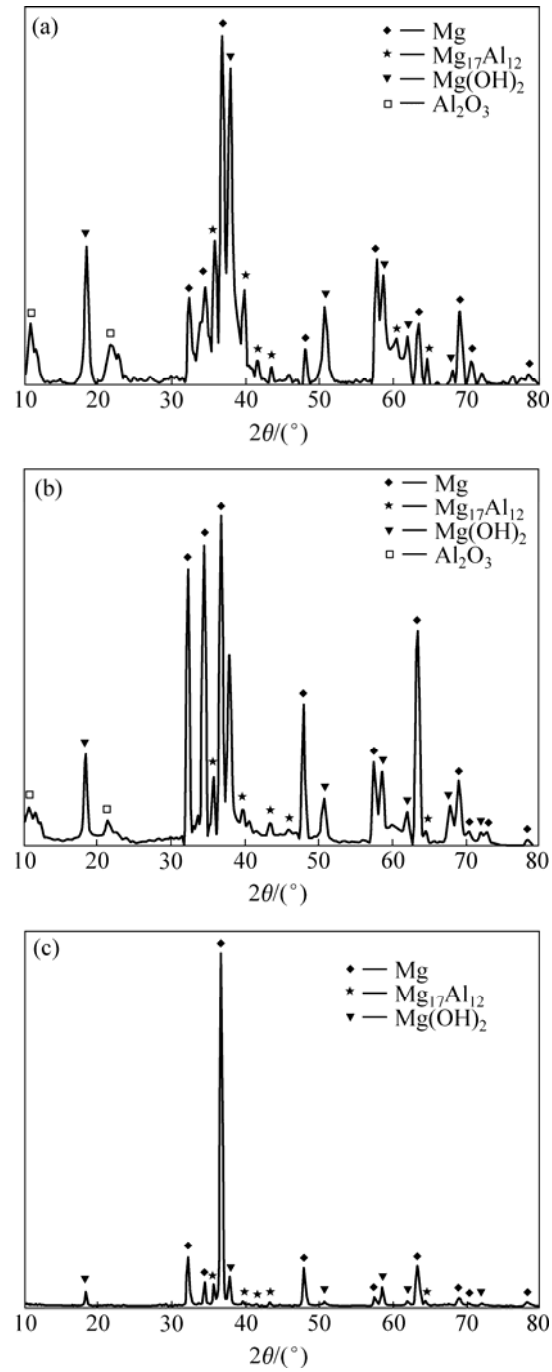


图 7 合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 d 后的腐蚀表面 XRD 谱
Fig.7 XRD patterns of alloys surface after immersion in 3.5% NaCl solution for 5 d: (a) AZ91; (b) AZ91+0.5%Er; (c) AZ91+0.7%Er

由于合金 4 的腐蚀速率很低(见图 3), 因而在相同的时间内其表面的腐蚀产物比较少, 而 XRD 分析合金腐蚀产物中没有检测到 Al_2O_3 的存在。这也说明加入 Er 能显著提高 AZ91 镁合金的耐腐蚀性能。

上述结果表明, 加入微量稀土 Er 能显著提高

AZ91 镁合金的耐腐蚀性能。已有的研究显示, 该合金中 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的形态、数量、大小、分布与其腐蚀性能有着密切的关系^[16-17]。Er 的添加使得 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相更细小、分布更均匀。在腐蚀体系中, $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的电位(约-1.3 V)比 $\alpha\text{-Mg}$ (约-1.6 V)的高^[18], $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相可作为阴极, 与阳极 $\alpha\text{-Mg}$ 构成腐蚀电池, $\alpha\text{-Mg}$ 尤其是 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相周围的 $\alpha\text{-Mg}$, 晶粒作为阳极优先发生腐蚀, 而大部分 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相作为阴极被保护, 留在基体表面, 仅少部分 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相因其周围的 $\alpha\text{-Mg}$ 晶粒严重腐蚀而脱落, 形成腐蚀坑, 因此, $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的细化、均匀分布与数量减少可有效地降低合金的腐蚀(见图 6)。另一方面添加 Er 后 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相数量的减少使 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中的铝含量增加, $\alpha\text{-Mg}$ 基体中 Al 含量增加可以提高合金的耐腐蚀性能^[19-20], 同时, $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的数量减少, 使得活性阴极的面积减少, 有效地抑制自腐蚀过程, 另外, 加入 Er 后, 可以抑制阴极析氢反应, 增大阳极极化曲线的斜率, 大幅度降低合金的自腐蚀电流密度, 因此, 添加 Er 可以提高合金的耐腐蚀性能。

3 结论

1) 在 AZ91 镁合金中添加稀土 Er 后可使 $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相由连续的网状结构变为细小弥散的岛状结构, 并有 Al_3Er 相形成。

2) 在 AZ91 镁合金中添加稀土 Er 后, 随着 Er 的含量增加, 腐蚀质量损失和析氢腐蚀速率逐渐降低。当 Er 含量达到 0.7% 时, 合金的腐蚀速率降低至 $0.546\ 06\ \text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$, 为未添加 Er 的 AZ91 合金的 1/15。

3) Er 的加入使得 AZ91 镁合金的自腐蚀电位升高, 同时降低了其自腐蚀电流密度, 从而大幅度提高了合金的耐腐蚀性能。

致谢:

本论文在撰写过程中得到丁道云教授的帮助与指导, 在此表示诚挚的谢意。

REFERENCES

[1] 袁广银, 孙扬善, 张为民. Bi 对铸造镁合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 1998, 5: 5-7.
YUAN Guang-yin, SUN Yang-shan, ZHANG Wei-min. Effect of bismuth on the microstructure and mechanical properties of cast magnesium alloy[J]. Foundry, 1988, 5: 5-7.

[2] 陈健美, 张新明, 邓运来, 肖阳, 熊创贤, 蒋浩. 镁合金熔炼的热力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(3): 427-432.
CHEN Jian-mei, ZHANG Xin-ming, DENG Yun-lai, XIAO Yang, XIONG Chuang-xian, JIANG Hao. Thermodynamics of melting and refining of magnesium alloys[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2006, 37(3): 427-432.

[3] NAIR K S, MITTAL M C. Rare earths in magnesium alloys[J]. Sci Forum, 1988, 30: 89-104.

[4] 樊昱, 吴国华, 高洪涛, 李冠群, 翟春泉. La 对 AZ91D 镁合金力学性能和腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(1): 35-40.
FAN Yu, WU Guo-hua, GAO Hong-tao, LI Guan-qun, ZHAI Chun-quan. Effect of La on the mechanical property and corrosion resistance of AZ91D Magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(1): 35-40.

[5] KIRYUU M, OKUMURA H, KAMADO S, KOJIMA Y, NINOMIYA R, NAKATSUGAW A. Corrosion resistance of heat resistant magnesium alloys containing heavy rare earth elements[J]. Japan Institute of Light Metal, 1996, 46(1): 39-44.

[6] 王忠军, 张彩磊, 邵晓宏, 崔健忠, 乐启焱. 添加稀土 Er 与溶剂中对铸态 AZ91 镁合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 181-187.
WANG Zhong-jun, ZHANG Cai-bei, SHAO Xiao-hong, CUI Jian-zhong, LE Qi-chi. Effects of Er addition in flux on microstructure and properties of casting AZ91 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2): 181-187.

[7] 刘生发, 王慧源, 徐萍. 钕对 AZ91 镁合金腐蚀性能的影响[J]. 铸造, 2006, 55(3): 296-299.
LIU Sheng-fa, WANG Hui-yuan, XU Ping. Influence of neodymium on the corrosion of AZ91 magnesium alloy[J]. Foundry, 2006, 55(3): 296-299.

[8] WANG Qu-dong, LU Yi-zhen, ZENG Xiao-qin, DING Wen-jiang, ZHU Yan-ping. Effects of RE on microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 235-239.

[9] 张诗昌, 魏伯康, 林汉同, 王立士. 钕及铈镧混合稀土对 AZ91 镁合金铸态组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 99-102.
ZHANG Shi-chang, WEI Bo-kang, LIN Han-tong, WANG Li-shi. Effect of yttrium and mischmetal on as-cast structure of AZ91 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): 99-102.

[10] LIU Sheng-fa, KANG Liu-gen, HAN Hui, LIU Lin-yan, ZOU Xiao-qiang, GUO Hong-he. Influence of electromagnetic stirring on microstructure of AZ91-0.8%Ce magnesium alloy[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(6): 613-617.

- [11] 肖代红, 黄伯云. 铒对 AZ91 镁合金铸态组织与力学性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2008, 26(1): 78–81.
XIAO Dai-hong, HUANG Bai-yun. Effect of erbium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(1): 78–81.
- [12] 肖纪美. 合金能量学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 50.
XIAO Ji-mei. Energetics of materials[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 50.
- [13] OKAMOTO H, HIROAK I. Phase diagrams of dilute binary alloys[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2002: 157.
- [14] NUSSBAUM G, SAINFORT P. Strengthening mechanism in the rapidly solidified AZ91 magnesium alloy[J]. Scripta Metallurgica, 1989, 23: 1079–1085.
- [15] 宋光龄. 镁合金的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 209–223.
SONG Guang-ling. Corrosion and protection of magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 209–223.
- [16] SONG Gang-ling. Corrosion and protection of magnesium alloys an overview of research undertaken by cast[J]. Materials Science Forum, 2005, 488/489(2): 649–652.
- [17] LUNDER O, NISANCIOGLU K, STEEN HANSEN R. Corrosion of die cast magnesium-aluminum alloy[R]. SAE Technical Paper 930755. Detroit: International Congress and Exposition, 1993: 1–5.
- [18] ZHAO Ming-chun, LIU Ming, SONG Guang-ling, ATRENS A. Influence of the β -phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1939–1953.
- [19] AMBAT R, AUNG N N, ZHOU W. Evaluation of microstructural effects on corrosion behavior of AZ91D magnesium alloy[J]. Corrosion Science, 2000, 42(8): 1433–1455.
- [20] SONG Guang-ling, ATRENS A, WU Xian-liang, ZHANG Bo. Corrosion behavior of AZ21, AZ501 and AZ91 in sodium chloride[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1769–1791.

(编辑 龙怀中)