

文章编号: 1000-582X(2011)03-057-07

Nd 对 AJ61 镁合金微观组织及腐蚀性能的影响

杨 艳, 彭晓东, 武 同, 谢卫东, 魏群义, 陈 刚

(重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心; 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 采用真空熔炼、氩气保护的方法制备了 AJ61-xNd 镁合金, 研究了稀土元素 Nd 对 AJ61 镁合金微观组织的影响规律。采用静态失重法、极化曲线法研究了 AJ61-xNd 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为。实验结果表明: 随着 Nd 的加入, 合金中出现 Al₂Nd、Al₃Nd 新相, 合金晶粒得到细化, 当 Nd 的质量分数为 0.5% 时合金晶粒最细。稀土元素 Nd 的加入显著降低了 AJ61 合金的腐蚀速度和腐蚀电流, 提高了 AJ61 镁合金的平衡电位和腐蚀电位, 显著改善了合金的耐腐蚀性能。在本实验范围内, 当 Nd 质量分数为 0.5% 时, 实验合金的耐腐蚀性能最好。

关键词: AJ61 镁合金; 钕; 微观组织; 腐蚀性能;

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effects of Nd on microstructure and corrosion behavior of AJ61 magnesium alloy

YANG Yan, PENG Xiao-dong, WU Tong, XIE Wei-dong, WEI Qun-yi, CHEN Gang

(National Engineering Research Center for Magnesium Alloys; College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: AJ61-xNd magnesium alloys are prepared in vacuum furnace under the protection of argon atmosphere and the effect of Nd content on microstructure of the test alloy is studied. The corrosion behavior of AJ61-xNd alloys in 3.5% NaCl aqueous solution is investigated by static weight-loss test and polarization curve measurement. The results indicate that with the addition of Nd, binary Al₂Nd phase and Al₃Nd phase are formed in the alloy, meanwhile, grain sizes are greatly reduced with the addition of Nd and the refinement effect on the test alloy is the best when the mass fraction of Nd is 0.5%. It is found that due to the addition of Nd, the corrosion rate and corrosion current of AJ61 magnesium alloy can be significantly reduced, the equilibrium potential and corrosion potential of the test alloy can be enhanced substantially. The corrosion resistance of AJ61 magnesium alloys is improved a lot with the Nd addition. The AJ61-0.5Nd magnesium alloy has the best corrosion resistance behavior.

Key words: AJ61 magnesium alloy; neodymium; microstructure; corrosion

镁合金是目前最轻的金属结构材料, 具有高的比强度、比模量, 良好的导电、导热、铸造、尺寸稳定性等优点, 在汽车、电子、家电、通信、仪表以及航空航天等领域有着广阔的应用前景, 并已成为重要的

现代工业材料, 也被誉为 21 世纪的绿色环保结构材料^[1-2]。近年来, AJ(Mg-Al-Sr) 系列镁合金的研究和开发逐渐成为镁合金材料研究领域的热点。加拿大诺兰达公司开发的 AJ52 合金其蠕变抗力优于

收稿日期: 2010-10-10

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2007CB613702); 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2006AA4012)

作者简介: 杨 艳(1983-), 女, 重庆大学博士研究生, 主要从事轻合金的制备及其组织性能研究。

彭晓东(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel) 023-65111625; (E-mail) pxd@cqu.edu.cn.

AE42 和 A380, 在 175℃ 时合金的抗拉强度和屈服强度优于 AZ91D 和 A380, 已用于汽车动力系统工件, 最新开发的 AJ62(Mg-6Al-2Sr) 合金具有优异的铸造性能, 其热裂倾向甚至低于 A380 铝合金, 是用于汽车动力系部件的理想材料^[3-4], 因此 AJ 系列镁合金具有良好的发展前景。

但 AJ 系列镁合金的耐腐蚀性能较差, 腐蚀机理尚不明确。为使 AJ 系列镁合金具有更为广阔的发展前景, 势必需要研究其腐蚀机理, 探索提高此系列镁合金耐腐蚀性能的关键技术。周学华, 刘生发和刘文娟等人的研究表明^[5-8]: 向 AM 系、AZ 系和 Mg-9Al 系等镁合金中加入适量的稀土元素, 可显著改善合金的耐腐蚀性能。目前也有关于稀土元素 Nd 加入到 ZA 系、LA 系等镁合金中, 可显著改善合金的组织和性能的相关报道^[9-11]。但到目前为止, 还没有关于稀土元素 Nd 对 AJ 系列镁合金腐蚀性能影响的研究报道, 笔者首次研究稀土元素 Nd 对 AJ61 镁合金腐蚀性能的影响规律, 探讨 AJ61-xNd 镁合金腐蚀机理, 为 AJ 系列镁合金的腐蚀性能研究奠定基础。

1 实验方法

1.1 熔炼工艺

AJ61-xNd 镁合金在额定功率为 7.5 kW 的井式坩埚电阻炉中熔制。实验原材料采用纯度为 99.9% 的纯镁、99.9% 的纯铝、含锶质量分数为 4% 的 Mg-4Sr 和含钕质量分数为 23% 的 Mg-23Nd 中间合金。熔炼过程中首先将纯镁、纯铝放置于电阻熔炼炉中的坩埚内, 充氩气保护熔炼, 升温至 720℃ 使纯镁和纯铝全部熔化, 然后加入 Mg-4Sr 和 Mg-23Nd 中间合金, 再将温度升高至 740℃ 保温一定时间并充分搅拌后, 将温度降至 680℃, 将合金液浇入预热 200℃ 左右的金属模具中, 得到铸态合金试样。采用原子吸收光谱法对所制备的实验合金成分进行检测, 结果如表 1 所示。



表 1 实验合金的化学成分(质量分数) %

试样编号	Al	Sr	Nd	Mg
AJ61	6.05	0.93	0	bal
AJ61-0.3Nd	5.92	1.06	0.34	bal
AJ61-0.5Nd	5.82	0.86	0.56	bal
AJ61-1.0Nd	6.09	1.07	1.12	bal

1.2 腐蚀实验

1.2.1 静态失重法

采用静态失重法测量 AJ61-xNd 镁合金在 3.5% NaCl 水溶液中的腐蚀速率。溶液体积为 100 mL, pH=9。试样尺寸为 15 mm×5 mm×5 mm, 平行试样 3 块。浸泡前所有试样均经研磨处理, 并采用丙酮和无水酒精清洗试样表面。实验过程中将试样悬挂于溶液中浸泡 6 h 后取出, 再用含有 200 g CrO₃、10 g AgNO₃、20 g Ba(NO₃)₂ 的 1 000 mL 蒸馏水溶液浸泡 10 min 去除腐蚀产物, 然后用水清洗并干燥。采用德国 Sartorius 出产的型号为 BS210S, 精度为 0.1 mg 的电子天平称量试样腐蚀前后的重量, 计算平均腐蚀速度:

$$V = \frac{W_1 - W_2}{St}, \quad (1)$$

式中: V 为试样的腐蚀速率; W_1 为合金试样腐蚀前的重量, g; W_2 为清除腐蚀产物后的合金试样重量, g; S 为金属的表面积, m²; t 为腐蚀时间, h; 取 3 块平行试样的平均值作为实验结果。

1.2.2 极化曲线法

动电位极化曲线采用上海辰华仪器公司出产的 CHI600C 系列的电化学分析仪进行测量, 设备如图 1 所示。采用三电极测试体系, 铂电极为辅助电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 电解质为 3.5% NaCl 溶液。电位扫描区间为 $E_{\text{corr}} - 250 \text{ mV} \sim E_{\text{corr}} + 350 \text{ mV}$, 扫描速度为 0.001 V/s。

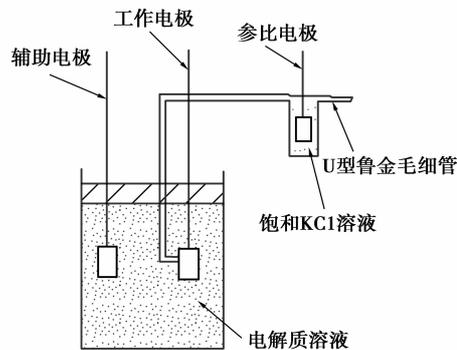


图 1 极化曲线装置图

1.3 组织观察

将合金试样表面抛光并用超声波清洗后,采用浓度为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜观察合金试样的金相显微组织,采用 JEOL JSM 6460LV 型扫描电子显微镜观测合金试样腐蚀前后的表面形貌。采用日本理光 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射仪分析合金的相组成。

2 实验结果与分析

2.1 铸态合金微观组织与相组成

图 2 所示为加入不同含量的 Nd 时铸态 AJ61 镁合金的金相显微组织,由图可知,Nd 的加入细化了合金的晶粒,当 Nd 的添加量为 0.5% 时,合金晶粒最细小。图 3 为 AJ61-xNd 合金的 SEM 形貌,结合图 2、图 3 可知,Nd 的加入使得连续网状分布的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相结构被打碎, β -Mg₁₇Al₁₂ 相由沿晶界分布的半连续的网状转变为弥散、均匀分布的条状,合金中出现颗粒状组织,合金中的化合物相分布更加均匀,合金的铸态组织得到一定改善。

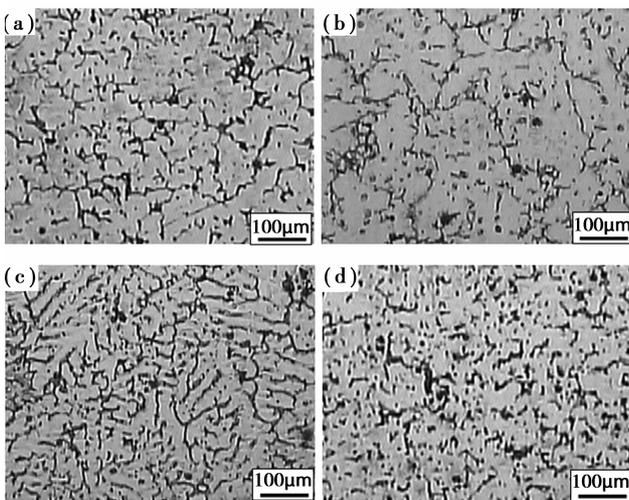


图 2 AJ61-xNd 合金铸态显微组织
(a)AJ61; (b)AJ61-0.3Nd;
(c)AJ61-0.5Nd; (d)AJ61-1.0Nd

为确定 AJ61-xNd 镁合金的相组成,对实验合金进行了 X 射线衍射分析,分析结果如图 4 所示。由图 4 可知,AJ61 镁合金由 α -Mg、 β -Mg₁₇Al₁₂ 和 Al₄Sr 相构成。AJ61-0.5Nd 合金由 α -Mg、Al₄Sr、 β -Mg₁₇Al₁₂、Al₃Nd 和 Al₂Nd 相组成。可见随着 Nd 的加入,AJ61 镁合金组织中出现了 Al₂Nd 和 Al₃Nd 新相。

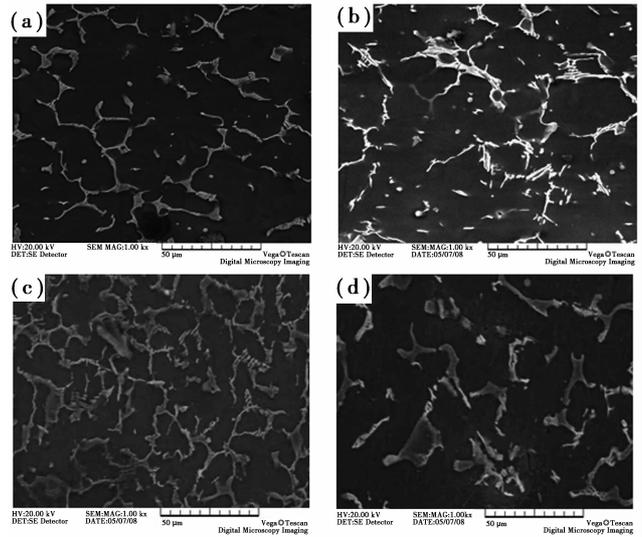


图 3 AJ61-xNd 合金的 SEM 形貌
(a)AJ61; (b)AJ61-0.3Nd;
(c)AJ61-0.5Nd; (d)AJ61-1.0Nd

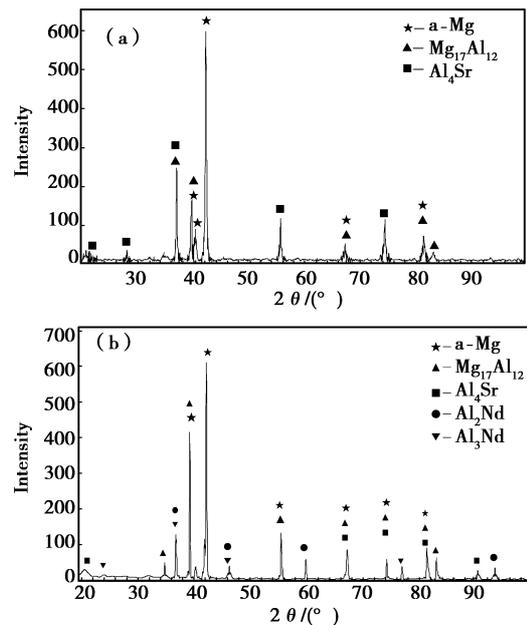


图 4 实验合金的 XRD 衍射图谱
(a)AJ61; (b)AJ61-0.5Nd

2.2 腐蚀性能

2.2.1 失重法

图 5 为不同 Nd 含量对 AJ61 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀速率的影响,由图可知:AJ61 镁合金的腐蚀失重速率为 8.69g/(m²·h),当 Nd 元素的添加量为 0.5% 时,合金的腐蚀失重速率为 0.82g/(m²·h),此时合金的腐蚀失重速率最低,当 Nd 含量的继续增加时,合金的腐蚀失重速率也增加。合金腐蚀失重速率随着 Nd 元素的加入呈现先减小后增加的趋势。由实验结果可知,当 Nd 元素添加量为

0.5%时合金的腐蚀速率最低,因此适量 Nd 元素的加入显著降低了 AJ61 镁合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀失重速率,提高了合金的耐腐蚀性能。

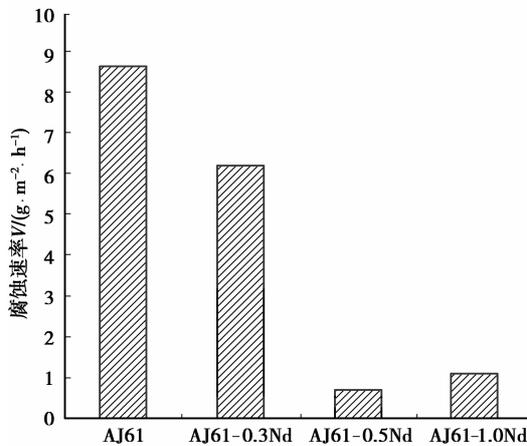


图 5 不同 Nd 含量对 AJ61 合金腐蚀速率的影响

图 6 为铸态 AJ61、AJ61-0.5Nd 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 6h 后腐蚀试样表面的宏观形貌。由图 6(a)可知,铸态 AJ61 镁合金的表面腐蚀严重,表面出现大量的腐蚀凹坑。由图 6(b)可以看出,合金中加入 0.5%Nd 之后,合金表面的腐蚀凹坑数量明显减少,腐蚀深度较浅。可见与 AJ61 镁合金相比,加入 0.5%Nd 之后,合金表面腐蚀明显减轻。

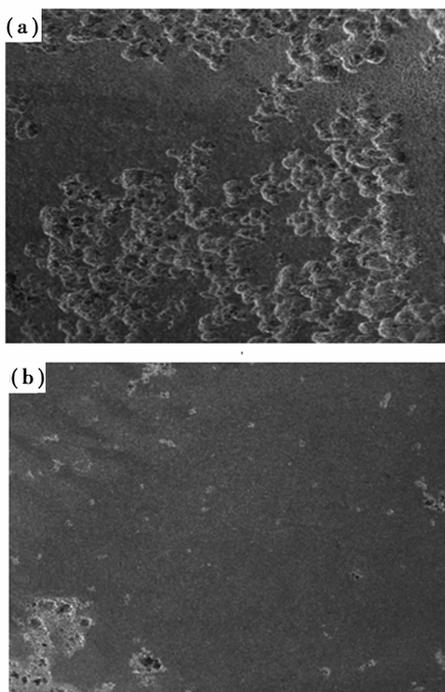


图 6 铸态合金腐蚀试样的宏观形貌(3.5%NaCl, 6h)
(a)AJ61; (b)AJ61-0.5Nd

图 7 为铸态 AJ61、AJ61-0.5Nd 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 6h 去除腐蚀产物后腐蚀试样的微观组织形貌。由图可知:AJ61 合金腐蚀首先发生在晶界周围的 α -Mg 基体处,合金表面出现大量的腐蚀孔,主要沿晶界周围分布,腐蚀极不均匀,合金表面留下较深的腐蚀坑。AJ61-0.5Nd 镁合金整体腐蚀较轻,腐蚀较均匀。合金腐蚀表面的微观形貌表明加入稀土元素 Nd,能明显提高 AJ61 镁合金的耐腐蚀性能。

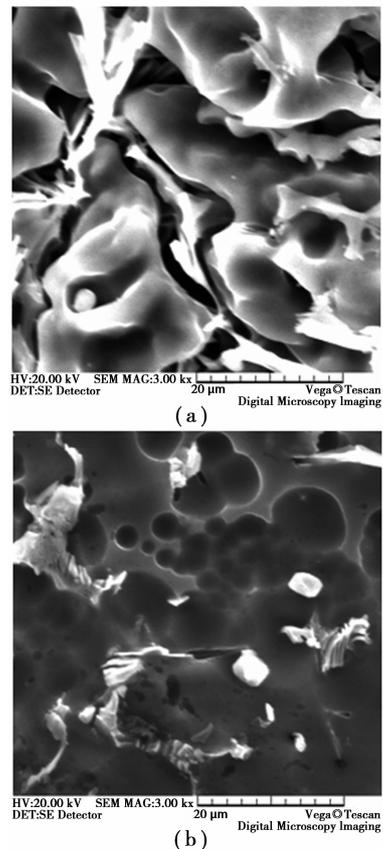


图 7 去除腐蚀产物铸态合金腐蚀试样的微观形貌
(a)AJ61; (b)AJ61-0.5Nd

2.2.2 极化曲线法

图 8 所示为 Nd 含量对 AJ61 镁合金在 25 °C、3.5%NaCl 溶液中极化曲线的影响。由图可知,加入稀土元素 Nd 提高了 AJ61 镁合金的自然腐蚀电位,在本实验范围内,当加入 0.5%Nd 后,合金的自然腐蚀电位的提高程度最大。由图还可以看出, AJ61 镁合金在加入 0.5%Nd 元素之后,阳极极化曲线的弱极化区出现了一段平台,这说明在阳极极化过程中存在钝化行为。可见, Nd 元素能够提高 AJ61 镁合金的自腐蚀电位,并促进合金在腐蚀过程中的钝化。

合金极化曲线均遵从 Tafel 规律,对图 8 进行 Tafel 拟合,拟合结果如表 2 所示。由表可知,稀土元素 Nd 的加入提高了合金的平衡电位及腐蚀电位,降低了合金的腐蚀电流,其中加入 0.5%Nd 时其腐蚀电流最低。由于合金的腐蚀速率与电流密度成正比,因此可知,在本实验范围内,添加 0.5%Nd 的 AJ61 合金的耐腐蚀性能最好。

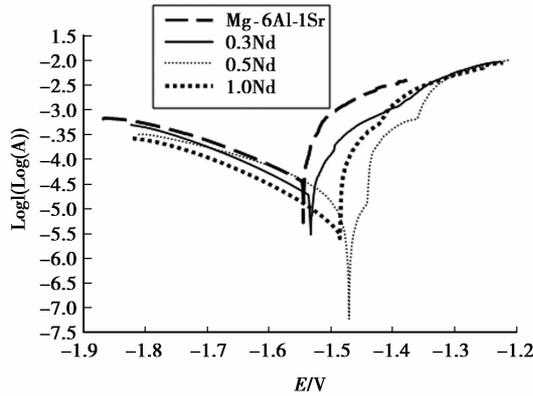


图 8 Nd 含量对 AJ61 合金在 3.5%NaCl 溶液中极化曲线的影响

表 2 AJ61+xNd 的极化曲线拟合结果

合金编号	平衡电位 E_{corr}/V	腐蚀电位 E_{corr}/V	腐蚀电流 I_{corr}/A
AJ61	-1.522 8	-1.542 0	3.681×10^{-5}
AJ61-0.3Nd	-1.532 3	-1.538 9	1.968×10^{-5}
AJ61-0.5Nd	-1.469 7	-1.471 4	7.150×10^{-6}
AJ61-1Nd	-1.484 6	-1.524 5	8.263×10^{-6}

2.3 腐蚀机理

AJ61 镁合金的腐蚀性能较差。一方面,AJ61 镁合金表面所形成的腐蚀保护膜 (MgO) 不致密,其 PB 值小于 1,不能形成有效的保护膜,容易被氯

离子破坏;另一方面,镁的标准电位较低 $V_{\text{NHE}} = -2.37 \text{ V}$ (NHE: 标准氢电极),为所有结构金属中最低,相对其他结构金属呈阳极,容易与第二相或杂质元素形成电偶腐蚀。AJ61 镁合金晶界处 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 、第二相粒子和一些金属间化合物,易于与镁基体发生较为严重的微电偶腐蚀,致使合金腐蚀性能较差。镁合金的微观组织如晶粒大小和微区成分以及合金中化合物相的数量和分布对合金的腐蚀性能均有很大的影响^[12-14]。由本实验可知,稀土元素 Nd 的加入,显著提高了 AJ61 镁合金的腐蚀性能,当 Nd 添加量为 0.5%时,合金的腐蚀性能最好,其腐蚀机理主要归结为以下几个方面。

2.3.1 基体

实验研究表明,镁合金的腐蚀一般先发生在 α -Mg 相,而晶界处化合物相较耐腐蚀。造成 α -Mg 基体和边界腐蚀差异的原因与 Al 元素在 α -Mg 晶粒内部的偏析程度有关,Al 含量越高的区域其耐腐蚀性能越好,而且 Al 的浓度差异越大, α -Mg 晶粒的耐腐蚀性越差^[15-16]。由图 2 和图 3 可知,将稀土元素 Nd 加入到 AJ61 镁合金中,可显著细化合金晶粒,其中 AJ61-0.5%Nd 镁合金晶粒最细,而此时合金的腐蚀性能最好,因此可见晶粒越细,合金成分分布愈加均匀,合金的耐腐蚀性能越好。合金中 Al 元素的分布自 α -Mg 晶粒内部向晶界处逐渐升高,晶界处 Al 元素的含量最高^[17]。图 9 所示为对 AJ61 和 AJ61-0.5Nd 镁合金的晶界处的 EDS 分析结果。由分析结果可知,AJ61-0.5Nd 镁合金晶界处的 Al 元素含量为 13.79%,而 AJ61 镁合金晶界处 Al 元素含量达到了 26.3%,对比分析结果可知:AJ61-0.5Nd 镁合金中 Al 元素的偏析程度相比 AJ61 镁合金大大降低,结合腐蚀实验结果可知:将稀土元素 Nd 加入到 AJ61 镁合金中,细化了合金晶粒,降低了合金基体中 Al 元素的偏析程度,从而显著改善合金的耐腐蚀性能。

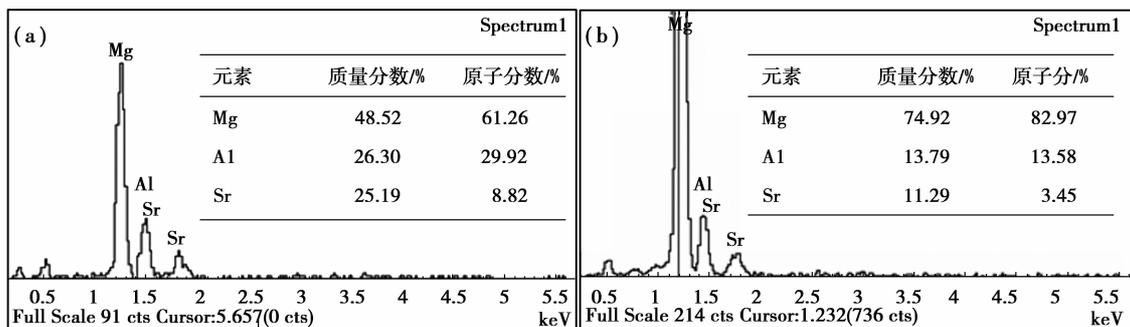


图 9 AJ61-xNd 晶界处 EDS 能谱分析结果
(a)AJ61;(b)AJ61-0.5Nd

2.3.2 β 相的作用

β 相是镁合金中的强化相,在合金的腐蚀行为中, β 相起着非常重要的作用, β 相的含量和分布对合金的腐蚀性能有重要影响^[18]。在3.5%NaCl溶液中, β -Mg₁₇Al₁₂相的自腐蚀电位为-1.2 V,而 α -Mg基体的腐蚀电位为-1.65 V,因此 β -Mg₁₇Al₁₂相对于 α -Mg基体为较强的阴极相,若其分布不合理,则会因电偶腐蚀效应而加速 α -Mg基体的腐蚀,若分布合理则会阻碍 α -Mg基体腐蚀的发展^[19]。AJ61镁合金的 β 相呈块状不均匀分布(如图2(a)所示),使得 β 相对腐蚀的阻碍作用降低甚至失去。适量稀土Nd的加入使AJ61镁合金中的 β -Mg₁₇Al₁₂相的分布更加均匀,且在合金中形成的新相Al₃Nd、Al₂Nd在晶界和晶内均有分布,较均匀分布的 β 相与新相一起构成合金腐蚀的屏障,使合金内部的微电偶腐蚀变得均匀分散,从而使合金的耐腐蚀性能得到提高。

2.3.3 腐蚀电位

由表2可知,稀土元素Nd加入到AJ61镁合金中使得合金的平衡电位及腐蚀电位均向正方向移动,添加0.5%Nd时,合金的腐蚀电位从-1.5420 V升高到-1.4714 V,合金的腐蚀电流从 3.681×10^{-5} A降低到 7.150×10^{-6} A,即Nd的加入提高了AJ61镁合金的腐蚀电位,降低了合金的腐蚀电流,有利于改善合金的耐腐蚀性能。

3 结 论

1) AJ61镁合金中加入一定量的稀土元素Nd之后,合金晶粒明显细化,当Nd质量分数为0.5%时合金晶粒最细。合金中加入稀土元素Nd之后,合金中形成Al₂Nd、Al₃Nd新相,合金中化合物相分布更加均匀。

2) 稀土元素Nd的加入显著改善了AJ61合金的腐蚀性能。在本实验测试范围内,Nd质量分数为0.5%时,合金腐蚀失重速率最小,合金的腐蚀电位最高、腐蚀电流最小,合金的耐腐蚀性能最好。

参考文献:

[1] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[2] 张津, 章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[3] 周健, 白晶, 薛烽. Al含量对耐热Mg-Al-Sr合金显微组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(4): 6-11.

ZHOU JIAN, BAI JING, XUE FENG. Effect of Al concentration on microstructure and mechanical

properties of heat-resistant Mg-Al-Sr alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(4): 6-11.

- [4] 张新明, 彭卓凯, 陈健美, 等. 耐热镁合金及其研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1443-1450.
- ZHANG XIN-MING, PENG ZHUO-KAI, CHEN JIAN-MEI, et al. Heat-resistant magnesium alloys and their development [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(9): 1443-1450.
- [5] 李凌杰, 于生海, 雷惊雷, 等. AZ40镁合金在模拟海水介质中的腐蚀行为[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(6): 702-706.
- LI LING-JIE, YU SHENG-HAI, LEI JING-LEI, et al. Corrosion behavior and mechanism of AZ40 magnesium alloy in simulated sea water[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(6): 702-706.
- [6] 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.
- LIU WEN-JUAN, CAO FA-HE, ZHANG ZHAO, et al. Effect of rare earth elements on corrosion behavior of AM60 magnesium alloys [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(2): 82-84.
- [7] 刘生发, 王慧源, 徐萍. 敏对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] 周学华, 卫中领, 陈秋荣, 等. 含稀土耐蚀Mg-9Al铸造镁合金腐蚀行为研究[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(10): 487-491.
- ZHOU XUE-HUA, WEI ZHONG-LING, CHEN QIU-RONG, et al. Corrosion behavior of die-cast Mg-9Al magnesium alloy [J]. Corrosion & Protection, 2006, 27(10): 487-491.
- [9] WANG J L, YANG J, WU Y M, et al. Microstructures and mechanical properties of as-cast Mg - 5Al - 0.4Mn - xNd (x = 0, 1, 2 and 4) alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 472(1/2): 332-337.
- [10] ZOU H H, ZENG X Q, ZHAI C Q, et al. Effects of Nd on the microstructure of ZA52 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392(1/2): 229-234.
- [11] LIU B, ZHANG M L, WU R Z. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of as-cast LA141 alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1/2): 347-351.
- [12] ZHANG J H, WANG J, QIU X, et al. Effect of Nd on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of die-cast Mg-4Al-based alloy[J]. Journal of

- Alloys and Compounds, 2008, 464(1/2):556-564.
- [13] LIU W, CAO F, ZHONG L, et al. Influence of rare earth element Ce and La addition on corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Materials and Corrosion, 2009, 60(10): 795-803.
- [14] AMIRA S, DUBE D, TREMBLAY R, et al. Influence of the microstructure on the corrosion behavior of AXJ530 magnesium alloy in 3.5% NaCl solution[J]. Materials Characterization, 2008, 59(10):1508-1517.
- [15] MATHIEU S, RAPIN C, STEINMETZ J, et al. A corrosion study of the main constituent phases of AZ91 magnesium alloys[J]. Corrosion Science, 2003, 45(12): 2741-2755.
- [16] 刘生发, 刘林艳, 黄尚宇, 等. 铈对AZ91镁合金腐蚀性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(2):211-216.
LIU SHENG-FA, LIU LIN-YAN, HUANG SHANG-YU, et al. Influence of Cerium on Corrosion of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Journal of the Chinese rare earth society, 2006, 24(2):211-216.
- [17] MARTIN J, DOMINIQUE T, NATHALIE L. The influence of microstructure on the corrosion behaviour of AZ91D studied by scanning Kelvin probe force microscopy and scanning Kelvin probe[J]. Corrosion Science, 2006, 48(5):1193-1208.
- [18] ZHANG T, LI Y, WANG F H. Roles of β phase in the corrosion process of AZ91D magnesium alloy[J]. Corrosion Science, 2006, 48(5): 1249-1264.
- [19] 宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

(编辑 王维朗)

(上接第56页)

- [12] 彭卓凯, 张新明, 陈健美, 等. Mn, Zr对Mg-Gd-Y合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6):917-922.
PENG ZHUO-KAI, ZHANG XIN-MING, CHEN JIAN-MEI, et al. Effects of Mn, Zr on microstructure and properties of Mg-Gd-Y alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6):917-922.
- [13] ARMSTRONG R, COLD I, DOUTWAITE R M, et al. The relation of yield and flow stresses with grain size in polycrystalline iron[J]. Philos Mag, 1962, 77(7):45-51.
- [14] QIU D, ZHANG M X. Effect of active heterogeneous nucleation particles on the grain refining efficiency in an Mg-10 wt.% Y cast alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488(1): 260-264.
- [15] 余琨, 黎文献, 张世军. Ce对镁及镁合金中晶粒的细化机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(7): 1013-1016.
YU KUN, LI WENXIAN, ZHANG SHIJUN. Mechanism of grain refining by adding cerium in Mg and Mg alloys[J]. Rare metal materials and engineering, 2005, 34(7):1013-1016.
- [16] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002:200.
- [17] 余琨. 稀土变形镁合金组织性能及加工工艺研究[D]. 长沙: 中南大学博士论文, 2002:45.
- [18] LIU H, CHEN Y, TANG Y, et al. The microstructure and mechanical properties of permanent-mould cast Mg-5wt.%Sn-(0~2.6)wt.%Di alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 437(2): 348-355.

(编辑 王维朗)