

添加稀土 Er 于熔剂中对铸态 AZ91 镁合金组织与性能的影响

王忠军¹, 张彩碚¹, 邵晓宏¹, 崔建忠², 乐启炽²

(1. 东北大学 理学院, 沈阳 110004;

2. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 研究了熔炼时在熔剂(42%MnCl₂+53%LiCl+5%CaF₂, 质量分数, %)中添加稀土 Er 对铸态 AZ91 镁合金显微组织、力学性能、断口形貌以及腐蚀行为的影响。结果表明: 在熔剂中添加稀土 Er 能够去除镁合金熔炼过程中产生的熔剂夹杂, 净化镁合金熔体, 提高铸态 AZ91 镁合金的拉伸性能和耐腐蚀性能; 当熔剂中添加 10 % 的稀土 Er 时, 镁合金的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 分别从 156 MPa 和 1.8% 上升到最大值 220 MPa 和 4.1%; 同时, 镁合金在 5%NaCl 水溶液中的腐蚀速率从 1.20 mg/(cm²·d) 下降到最小值 0.15 mg/(cm²·d); 然而, 随着稀土 Er 在熔剂中添加量的进一步提高, 合金中开始有 φ -(Al₇ErMn₅) 和 τ -(Al_{66.7}Mg_{23.3}Er₁₀) 等含有稀土 Er 的相生成, 消耗了合金中的 Al 和 Mn 元素, 改变了 β -(Mg₁₇Al₁₂) 相的形态; 而且沿枝晶界附近分布的粗大 φ -(Al₇ErMn₅) 相降低了枝晶之间的结合力, 使得合金的 σ_b 和 δ 下降; 同时, 部分网状的 β -(Mg₁₇Al₁₂) 相断裂, 呈离散的块状, 导致合金的腐蚀速率增加; 熔剂中添加稀土 Er 不改变镁合金的断裂机理, 断裂机制仍为准解理断裂。

关键词: AZ91 镁合金; 稀土 Er; 熔剂; 力学性能

中图分类号: TG 146.22

文献标识码: A

Effects of Er addition in flux on microstructure and properties of casting AZ91 magnesium alloy

WANG Zhong-jun¹, ZHANG Cai-bei¹, SHAO Xiao-hong¹, CUI Jian-zhong², LE Qi-chi²

(1. College of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials(EPM),
Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The effects of Er addition in the flux(42%MnCl₂+53%LiCl+5%CaF₂, mass fraction, %) on the microstructure, tensile properties, fractography, and corrosion behaviour of casting AZ91 Mg alloy were investigated. The results show that Er addition in the flux can eliminate the inclusions formed during smelting, purify the melt and improve the tensile properties and corrosion resistance. Using the flux mixed with 10% Er, σ_b and δ of the casting AZ91 magnesium alloy can be improved by purification from 156 MPa and 1.8% to the maximum value of 220 MPa and 4.1%, respectively. Meanwhile, the corrosion rate decreases from 1.20 mg/(cm²·d) to the minimum value of 0.15 mg/(cm²·d) in 5%NaCl solution. However, further increasing Er content in flux, φ -(Al₇ErMn₅) and τ -(Al_{66.7}Mg_{23.3}Er₁₀) phase form, which can consume Al and Mn element in the alloy, and modify the morphology of β -(Mg₁₇Al₁₂) phase. The coarse φ -(Al₇ErMn₅) phase along dendrite boundaries can decrease the cohesion force between dendrites, which leads the tensile properties to decrease. In addition, some net-like β -(Mg₁₇Al₁₂) phases become dispersive and nubble-like, resulting in the increase of corrosion rate. The Er addition in flux cannot change the fracture mechanism of quasi-cleavage of AZ91 Mg alloy.

Key words: AZ91 magnesium alloy; rare earth of Er; flux; mechanical properties

AZ91 镁合金是 Mg-Al-Zn-Mn 系合金,在航空航天以及汽车零部件上得到日益广泛的应用^[1-4]。镁合金的纯净度对其强度和耐腐蚀性能的影响极大,制备高纯度的 AZ91 镁合金越来越引起人们的重视^[5]。影响镁合金纯净度的主要因素是 MgO 夹杂和 Fe 杂质^[6-7]。MgO 夹杂可以用含有 MgCl_2 的氯化物熔剂通过精炼过程去除,而去除 Fe 杂质的最有效方法是在镁合金内加入 Mn 元素^[8-9]。制备高纯度的 AZ91 镁合金要求 Fe 的含量极低($>5 \times 10^{-5}$),且 Fe 与 Mn 的质量比要低于 0.032 的临界值^[10]才不至于导致耐腐蚀性减弱。因 Mn 的熔点高,熔炼时通常是以 Al-Mn 中间合金的形式向镁熔液中加入 Mn。常用 Al-Mn 中间合金中 Mn 的含量有限(Al 与 Mn 的质量比一般为 10:1 左右),且容易随中间合金而带入 Si、Fe、Cu、Ni 等杂质元素,以这种方式制备 AZ91 镁合金会导致 Fe 与 Mn 的临界值难以控制^[11]。

有研究表明^[12],在以 MgCl_2 为主的熔剂中添加 B_2O_3 熔炼 AZ91 镁合金除 Fe 效果显著,可以将 Fe 的含量降低到 5×10^{-5} 以下。但是这种除铁方法要求 B_2O_3 的加入量大(占镁熔液总质量的 0.61%),而且离不开加 Mn 的工序,因熔炼工艺复杂而没有得到广泛的应用。此外,还可以 MnCl_2 的形式向镁合金中加入元素 Mn^[7]。 MnCl_2 中的 Mn 在镁熔液中能够通过置换反应被 Mg 还原出来生成 MgCl_2 和 Mn,从而使得元素 Mn 进入镁熔体中。采用含有 MnCl_2 的熔剂熔炼镁合金能够在实现精炼的同时直接加入 Mn,简化熔炼工艺。然而这种熔剂通常会造成 MgCl_2 过剩而结成球团,悬浮于合金熔体中成为二次夹杂^[8, 12],因此在传统的氯化物熔剂中往往需要补充一定量的 MgO 用于去除熔剂夹杂^[8]。但是这种方法很难确定 MgO 的加入量,从而在实际的生产作业中难以保证熔炼高纯镁合金的纯度要求。

本研究工作发现,同时含有 MnCl_2 和稀土 Er 的熔剂不仅保留了 MnCl_2 良好的除 Fe 效果,Fe/Mn 比值低,工艺简单,而且熔剂中含有适量的稀土 Er 还具有阻燃和净化镁合金液体的作用,能够有效地去除夹杂且不改变原 AZ91 镁合金的组织结构,显著提高合金的拉伸性能和耐腐蚀性能,为开发新型高效的镁合金熔剂提供新的思路。

1 实验

本实验所用镁合金为 AZ91,化学成分配比为: Al 9.2, Zn 0.8, Mn 0.45, 余量为 Mg。熔炼时所用

Mg、Al 和 Zn 锭的纯度(质量分数)为 99.99%。氯化物熔剂组成(质量分数)为: $42\% \text{MnCl}_2 + 53\% \text{LiCl} + 5\% \text{CaF}_2$ 。氯化物熔剂中 LiCl 的作用是降低 MnCl_2 的熔点以及熔剂的表面张力、粘度和密度,使熔剂能够在镁熔液表面铺展开来而隔绝空气,具有精炼剂和覆盖剂的双重作用。 CaF_2 主要起到稠化剂的作用,在精炼静置的过程中使得炉渣脱离镁液而下沉^[5-6]。稀土 Er 的纯度(质量分数)为 99.9%。

合金熔炼前,将稀土 Er 压碎成对角线尺寸不大于 2 mm 的碎块,然后将其与氯化物熔剂混合,配制成含有稀土 Er 的氯化物熔剂,其中稀土 Er 的含量为 5%~15%。在本实验中,将稀土 Er 和氯化物熔剂混合在一起是为了尽可能减少稀土元素在加入镁液时的烧损和氧化,提高稀土元素的利用率。

将熔炼工具、所需原料、熔剂在 200 °C 烘干箱内预热除去水分。采用 3kW 电阻炉和可以容纳 3.0 kg 镁合金的铁坩锅熔炼,每一炉熔炼镁合金 2.6 kg,每炉熔剂的使用量为合金总质量的 3%。热电偶插入镁液中,控温仪直接控制镁液的温度。精炼处理温度为 725~735 °C,精炼时间 15 min,镁熔体上方采用 CO_2 和 SF_6 混合气体保护。将熔炼好的镁液浇入铁模型腔内,浇注温度为 700~710 °C。型腔为圆柱状,其直径为 60 mm,高为 120 mm。

采用棒状拉伸试样,其标距段直径为 10 mm,长度为 50 mm,取样位置距离圆柱状的铸锭中心线 1/2 半径处,且拉伸方向平行于铸锭的中心线。采用 INSTRON 万能材料实验机进行拉伸实验,每一炉取 5 个拉伸试样检测,结果取平均值。采用型号为 Leica-DMR 的光学显微镜观察合金的金相组织,利用 SHIMADZU SSX-550 扫描电镜观察析出相和试样断口形貌以及 EDS 能谱分析。使用型号为 D/max 2400 的 X 射线衍射仪作物相分析。腐蚀实验的测定方法为:将直径 50 mm、厚度 2 mm 的盘形试样浸入 5% 的 NaCl 水溶液中,室温保持 3 d 后取出,采用文献[13]的方法通过测定金属质量损失(W_t , 单位为 mg)来计算腐蚀速率(R , 单位为 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$)。铸锭的化学成分采用型号为 ZSX 100e 的 X 射线荧光光谱分析仪测定,而微量的金属杂质 Fe 元素的含量采用高频电感耦合等离子体发光光谱仪(ICP, Optima 4300 DV)测定。

2 结果与讨论

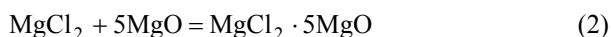
2.1 MnCl_2 和稀土 Er 的净化作用机制

合金熔炼时,氯化物熔剂中的 MnCl_2 会与镁液自

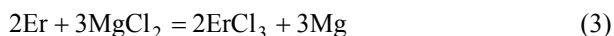
行发生以下化学反应。



MnCl_2 中的 Mn 元素被 Mg 置换出来进入镁液中, 同时生成 MgCl_2 并释放出较多的热量。当 Mn 进入镁液后, 部分 Mn 会与杂质 Fe 结合生成沉淀进入渣中, 其余进入镁熔体中^[3, 7, 10]。 MgCl_2 对合金熔体中的夹杂具有良好的润湿性能, 能够有效地吸附悬浮于镁熔液中的 MgO 絮状夹杂, 形成以 $\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{MgO}$ 为主的炉渣(见式(2))^[8, 11]。生成的炉渣由于其自身的密度高于镁液而下沉, 能够将镁熔体中悬浮的 MgO 夹杂去除。



然而由于镁合金液体中的 MgO 夹杂数量有限往往造成 MgCl_2 的过剩。放热反应会使得过剩的 MgCl_2 易于结团而悬浮于合金熔体中成为二次夹杂, 难以去除。熔剂中添加稀土 Er 能够有效地去除这些夹杂。图 1(a)所示为使用添加了 10%Er 的氯化物熔剂精炼 AZ91 镁合金后坩锅底部沉积物的扫描电镜二次电子像, 可以看出沉积物为结晶的盐类和絮状夹杂的混合物。EDS 能谱分析结果(见图 1(b))表明: 沉积物由 Mg、Cl、O 以及少量的 Si、Ca、Fe、Mn、Er 等元素组成。镁合金液体中的 Fe、Si 等杂质元素随着熔剂沉积到了坩锅的底部。对沉积物进行 X 射线物相分析(XRD, 见图 1(c))可知: 沉积物主要由 MgCl_2 、 MgO 、 LiCl 等熔剂和炉渣的混合物以及 ErCl_3 组成。热力学分析表明^[13], 镁熔液中的稀土元素和 MgCl_2 具有极强的交互作用。稀土 Er 能够和镁合金液体中过剩 MgCl_2 反应, 置换出 Mg 并且生成 ErCl_3 (见式(3))。



稀土 Er 属于重稀土元素, ErCl_3 的比重远远大于镁液, 很容易沉积到坩锅的底部。因此稀土 Er 能够有效地去除悬浮于合金液体中过剩的 MgCl_2 , 起到净化镁合金液体的作用。另外稀土 Er, 如同其它稀土元素一样, 是表面活性元素, 会在合金液体的表面生成一层稀土氧化物薄膜, 阻止镁液的进一步氧化和燃烧, 间接地减少了合金液体中生成的 MgO 夹杂^[14], 对合金的净化同样起到积极的作用。

表 1 所列为使用不同熔剂精炼处理后的 AZ91 镁合金铸锭化学成分分析结果(质量分数, %)以及 Fe 与 Mn 的成分比值。由表 1 可以看出, 合金中 Mn 的含量保持在 0.40%~0.45%之间, 而 Fe 的含量极低, 最大值仅为 0.004%。Fe 与 Mn 的质量比值最大为 0.009, 远小于 0.032 的临界值。可见, 以 MnCl_2 的形式向镁液中加 Mn 去除 Fe 杂质元素的效果显著。然而, 经过

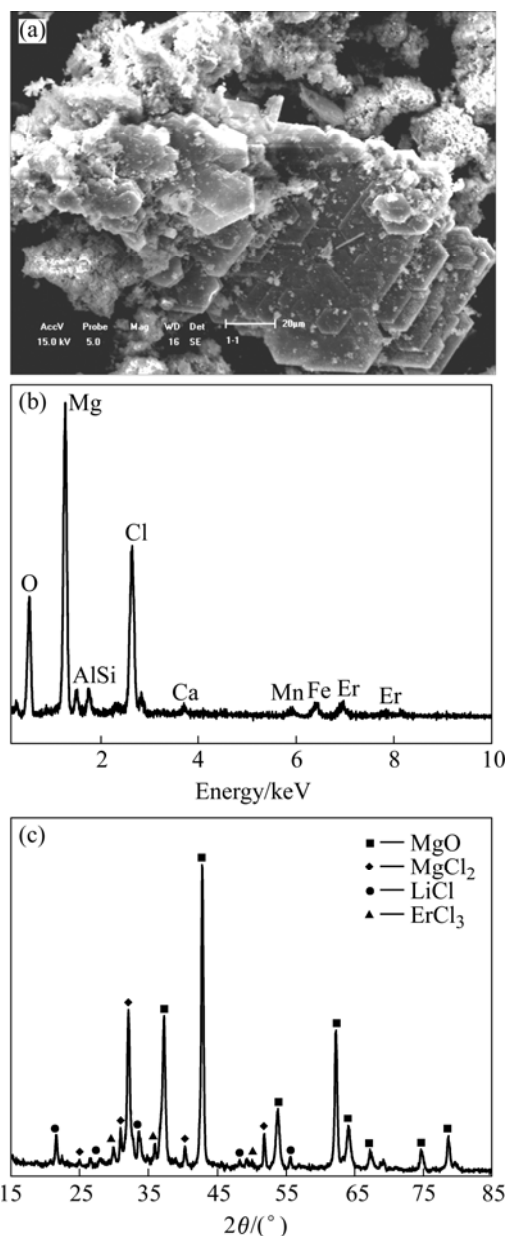


图 1 使用添加了 10% Er 的氯化物熔剂精炼处理 AZ91 镁合金后坩锅底部沉积物的扫描电镜二次电子像(a)、EDS 能谱分析结果(b)和 XRD 分析结果(c)

Fig.1 SEM image(a), energy dispersive spectrum(b) and X-ray diffraction pattern(c) of melting sludge at bottom of crucible used in smelting AZ91 magnesium alloy treated by chlorate flux mixed with 10% Er

含有 MnCl_2 的熔剂精炼的合金中含有较高的元素 Cl。当添加稀土 Er 后, 元素 Cl 的含量明显减少。熔剂中 Er 的添加量达到 10%时合金中的元素 Cl 消失, 说明稀土 Er 具有去除杂质元素 Cl 的作用, 能够净化合金熔体。当熔剂中 Er 的添加量达到 15%时, 合金中开始含有元素 Er。

表 1 采用熔剂以及熔剂中添加不同质量分数的 Er 精炼处理后的 AZ91 镁合金铸锭的化学成分以及 Fe 与 Mn 的成分比值

Table 1 Chemical composition(mass fraction, %) of AZ91 magnesium alloy treated by chlorate flux and chlorate flux mixed with different mass fractions of Er additive, and value of Fe/Mn

Er content in flux/%	Mg	Al	Zn	Mn	Er	Cl	Fe	Fe/Mn
0	Bal.	9.16	0.82	0.45	—	0.39	0.004	0.009
5	Bal.	9.15	0.85	0.40	—	0.12	0.003	0.008
10	Bal.	9.10	0.80	0.42	—	—	0.003	0.007
15	Bal.	9.20	0.82	0.45	0.18	—	0.003	0.007

2.2 熔剂中添加稀土 Er 对铸态 AZ91 镁合金组织的影响

图 2(a)所示为经过熔剂精炼处理后的 AZ91 镁合金金相组织。由图可见，初生 α -Mg 枝晶的尺寸不均，在枝晶界附近有呈网状分布的 β -(Mg₁₇Al₁₂)相；沿着部分枝晶界处分布有颜色较深的物质，由 EDS 能谱分析

以及表 1 的分析结果可知，其主要成分为元素 Cl，是在熔炼过程中产生的熔剂夹杂。图 2(b)所示为使用添加 10%Er 的熔剂进行精炼处理后的 AZ91 镁合金金相组织。由图可见，镁合金的组织纯净，不存在夹杂物，正如 2.1 节所分析，添加 10%Er 的熔剂具有良好的精炼和净化效果。枝晶界附近的 β -(Mg₁₇Al₁₂)相呈网状连续分布。由于合金熔体得到明显的净化，凝固过程没有受到熔剂夹杂物的干扰，初生 α -Mg 枝晶大小均匀。当熔剂中添加 15% Er 时，合金枝晶界附近的部分 β -(Mg₁₇Al₁₂)相断裂，初生 α -Mg 枝晶大小不均(见图 1(c))，合金的组织形态发生了明显的变化。由放大倍数更高的扫描电镜背散射电子像(图 3)、能谱分析(表 2)并结合文献[16]以及 Mg-Al-Er 三元相图^[17] 综合分

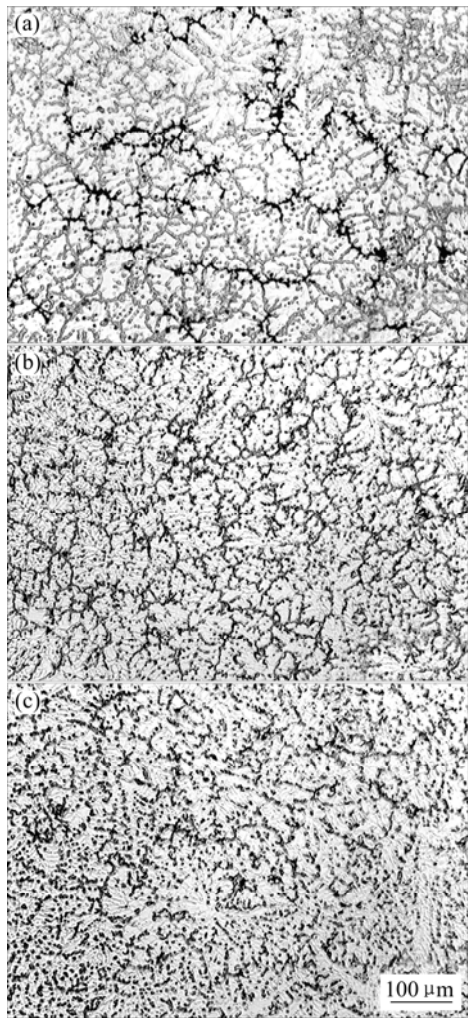


图 2 经过熔剂处理后的 AZ91 镁合金金相组织

Fig.2 Optical microstructures of AZ91 Mg alloys treated by flux (a), flux+10%Er (b) and flux+15%Er (c)

表 2 相的化学组成

Table 2 Chemical composition of phases(mole fraction, %)

Phase	Mg	Al	Zn	Mn	Er
β -(Mg ₁₇ Al ₁₂)	56.8	43.0	0.2	—	—
τ -(Al _{66.7} Mg _{23.3} -Er ₁₀)	22.8	67.0	—	—	10.2
ϕ -(Al ₇ ErMn ₅)	1.5	53.2	0.1	37.7	7.5

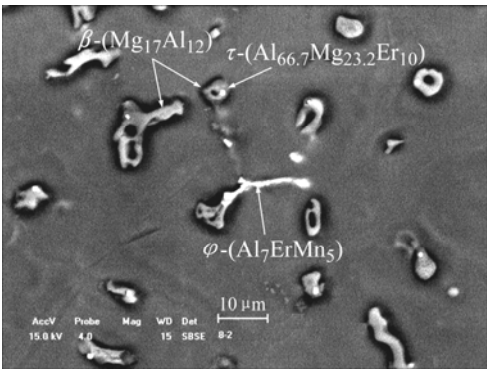


图 3 使用添加 15%Er 的熔剂精炼处理的 AZ91 镁合金扫描电镜背散射电子像

Fig.3 SBSE image of AZ91 magnesium alloy treated by flux mixed with 15%Er

析可知, 合金中生成了两种稀土相: 一种是在 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相附近的粗大稀土相 φ -(Al_7ErMn_5), 而另一种是 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相内部的细小稀土相 τ -($\text{Al}_{66.7}\text{Mg}_{23.3}\text{Er}_{10}$)。由图 2 和图 3 还可以看出, 由于合金中稀土元素 Er 的存在改变了 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相的形态, 使得部分 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相断裂, 由原来的粗大连续分布变成了块状离散分布。

2.3 熔剂中添加稀土 Er 对铸态 AZ91 镁合金拉伸性能的影响

熔剂中添加稀土 Er 对铸态 AZ91 镁合金拉伸性能有显著影响。最初随着稀土 Er 含量的增加, 合金的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 上升。当熔剂中添加 10% 的 Er 时, σ_b 和 δ 分别从 156 MPa 和 1.8% 上升到最大值 220 MPa 和 4.1%。此时合金中已经不含杂质元素 Cl, 见表 1。由于合金中杂质元素的减少, 导致合金的力学性能显著提高。然而, 随着 Er 添加量的进一步提高, 合金的力学性能开始下降。尽管熔剂中添加 Er 减少了合金中的杂质元素, 能够提高力学性能, 但是稀土 Er 的添加量过大会改变合金的组织结构。特别是粗大 φ -(Al_7ErMn_5)稀土相的存在对于合金基体具有割裂作用, 降低了枝晶间的结合力, 同时增加了 Mn 在合金中的偏析程度, 导致合金的拉伸性能下降。

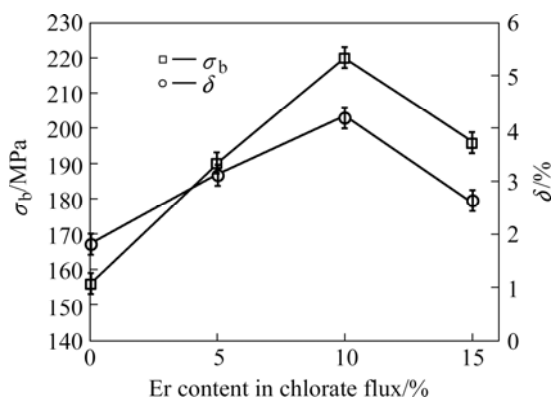


图 4 熔剂中添加稀土 Er 对 AZ91 镁合金拉伸性能的影响

Fig.4 Effect of Er addition in flux on tensile properties of AZ91 Mg alloy

图 5 所示分别为使用熔剂、熔剂+10%Er 和熔剂+15%Er 精炼 AZ91 镁合金的拉伸试样断口扫描电镜二次电子像。采用熔剂精炼 AZ91 镁合金时, 由于合金中含有较多的夹杂导致合金在拉伸断裂的过程中裂纹迅速萌生和扩展, 拉伸断口中的裂纹表现出粗大, 平滑的特征(图 5(a)), 合金的力学性能低下; 当熔剂中添加 10%Er 时, 由于稀土 Er 的净化作用合金中的夹

杂明显减少, 原拉伸断口中的粗大裂纹消失, 撕裂棱和花瓣样的解理小刻面增多(图 5(b)), 极大地减少了合金在拉伸断裂过程中的应力集中和裂纹的萌生, 导致强度和塑性明显提高; 当熔剂中添加 15%Er 时, 合金的拉伸断口存在大量的凹坑, 部分凹坑内部还存在裂纹。正如 2.2 节所述, 此时合金中生成了 φ -(Al_7ErMn_5)和 τ -($\text{Al}_{66.7}\text{Mg}_{23.3}\text{Er}_{10}$)两种含有稀土 Er 的相, 消耗了合金中的 Al 和 Mn 元素, 降低了枝晶间的结合力。稀土元素 Er 的存在还改变了 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相的形态, 使得部分 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相断裂, 由原来的粗大连续分布变成了块状离散分布。合金在拉伸的过程中, 块状的 β -($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)相和稀土相首先与基体分离导致凹坑的形成, 同时由于粗大 φ -(Al_7ErMn_5)相对于基体的割裂

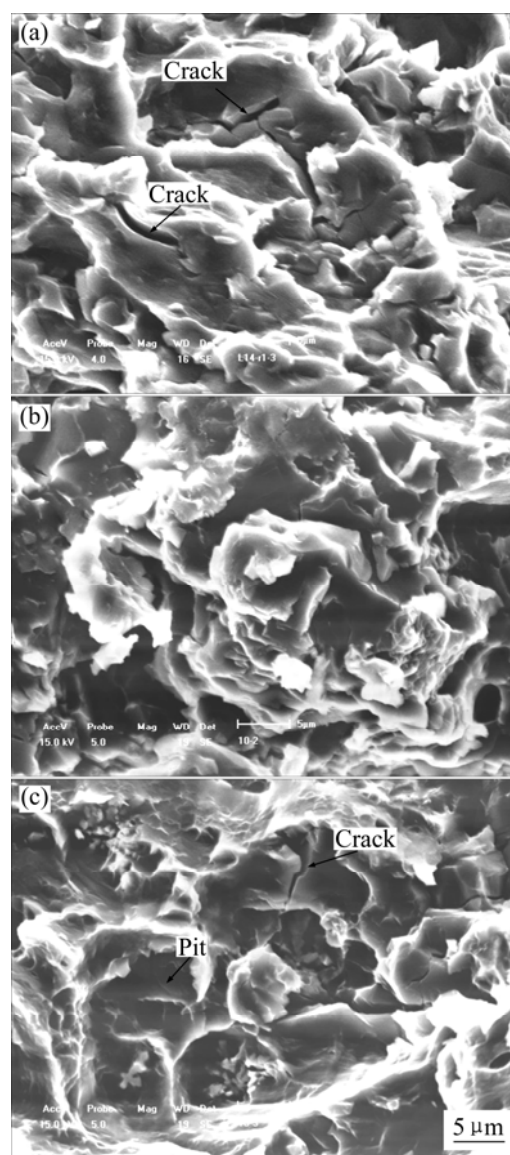


图 5 试样断口形貌的扫描电镜照片

Fig.5 SEM images of AZ91 Mg alloy treated by flux (a), flux+10%Er (b) and flux+15%Er (c)

作用还会诱发裂纹的萌生和扩展,从而导致力学性能的下降。从图 5(a)~(c)还可以看出,熔剂中添加稀土 Er 前后的拉伸断口都存在有明显的撕裂棱和花瓣样的解理小刻面,属于准解理断裂,断裂机制没有发生改变。

2.4 熔剂中添加稀土 Er 对铸态 AZ91 镁合金耐腐蚀性能的影响

图 6 所示为熔剂中添加稀土 Er 对 AZ91 镁合金在 5%NaCl 水溶液中腐蚀速率的影响。从图 6 可以看出,熔剂中添加稀土 Er 能够显著提高铸态 AZ91 镁合金的耐腐蚀性能。当稀土 Er 的添加量为 10%时,合金的腐蚀速率从 $1.20 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 下降到最小值 $0.15 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。当熔剂中 Er 含量进一步增加达到 15%时,腐蚀速率稍有提高。由于金属镁的标准电极电位极低,为 -2.40 V ,当镁合金处于腐蚀性水溶液中时,合金中的杂质或者沉淀相会与基体形成腐蚀电池^[18],加快合金的腐蚀速率。因此镁合金的纯净度以及沉淀相的形态和分布会对其耐腐蚀性能产生极大影响。当熔剂中添加稀土 Er 时,由于净化作用使得合金基体杂质减少,从而腐蚀速率下降。当 Er 在熔剂中的添加量达到 10%时净化效果最佳,腐蚀速率达到最低值。当熔剂中 Er 的加入量增加到 15%时,由于合金中生成稀土相,使得 $\beta\text{-(Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 相形态和分布发生了改变,由原来的粗大连续分布变成块状离散分布。这种组织结构与没有生成稀土相的组织结构相比较,合金中的腐蚀电池数量增加,使得耐腐速率上升。

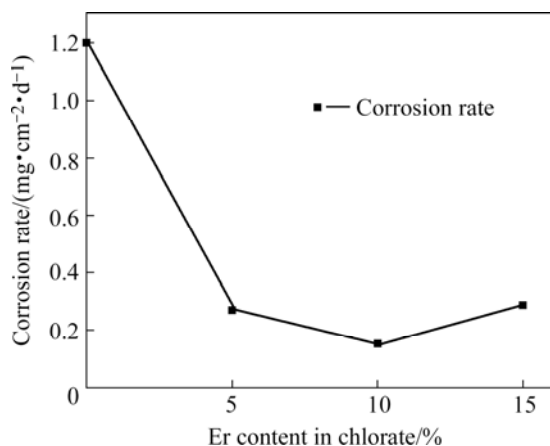


图 6 熔剂中添加稀土 Er 对 AZ91 镁合金在 5%NaCl 水溶液中腐蚀速率的影响

Fig.6 Effects of Er addition in flux on corrosion rate in 5%NaCl solution for AZ91 alloy

3 结论

1) 熔炼时在含有 MnCl_2 的氯化物熔剂中添加适量的稀土 Er, 不仅保留了 MnCl_2 原有的除 Fe 效果, Fe/Mn 比值低, 工艺简单, 而且还具有阻燃和净化镁合金液体的作用, 能够有效地去除合金中的熔剂夹杂, 显著提高合金的拉伸性能和耐腐蚀性能。当稀土 Er 在熔剂中的添加量达到 10%时, AZ91 镁合金的抗拉强度 σ_b 和延伸率 δ 分别从 156 MPa 和 1.8%上升到最大值 220 MPa 和 4.1%。同时, AZ91 镁合金在 5%NaCl 水溶液中的腐蚀速率从 $1.20 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 下降到最小值 $0.15 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

2) 进一步增加熔剂中稀土 Er 的含量, 在合金的组织中会形成 $\varphi\text{-(Al}_7\text{ErMn}_5)$ 和 $\tau\text{-(Al}_{66.7}\text{Mg}_{23.3}\text{Er}_{10})$ 两种含有稀土 Er 的相, 消耗了合金中的 Al 和 Mn 元素, 部分连续分布的 $\beta\text{-(Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 相断裂成离散的块状, 使得 AZ91 镁合金的拉伸性能和耐腐蚀性能下降。

3) 熔剂中添加稀土 Er 不改变镁合金的断裂机理, 断口形貌仍为准解理断裂。

REFERENCES

- [1] Mordike B L, Ebert T. Magnesium properties-application-potential [J]. Mater Sci Eng A, 2001, A302: 37-45.
- [2] Friedrich H, Schumann S. Research for a new age for magnesium in the automotive industry [J]. J Mater Process Technol, 2001, 117: 276-281.
- [3] 郑卫超, 李双寿, 汤彬, 曾大本. 混合稀土对 AZ91 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(8): 835-842. ZHENG Wei-chao, LI Shuang-shou, TANG Bin, ZENG Da-ben. Effect of mishmetal on the microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(8): 835-842.
- [4] 郭旭涛, 李培杰, 曾大本. 混合稀土去除再生镁合金中的夹杂[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1295-1299. GUO Xu-tao, LI Pei-jie, ZENG Da-ben. Inclusions decrease in recycling magnesium alloy with rare earths[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1295-1299.
- [5] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 韩恩厚, 朱自勇. Mg 合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685. ZENG Rong-chang, KE Wei, XU Yong-bo, HAN En-hou, ZHU Zi-yong. Recent development and application of magnesium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 673-685.
- [6] 张诗昌, 魏伯康, 林汉同. 镁合金中的 MgO 夹杂物及熔剂精炼过程的研究[J]. 铸造, 2003, 52(7): 488-491.

- ZHANG Shi-chang, WEI Bo-kang, LIN Han-tong. Investigation on MgO inclusions and refining mechanism of magnesium alloy [J]. Foundry, 2003, 52(7): 488–491.
- [7] 吴国华, 卢晨, 翟春泉. MnCl_2 对镁合金废旧料组织性能的影响[J]. 铸造, 2003, 52(12): 1166–1160.
- WU Guo-hua, LU Chen, ZHAI Chun-quan. Effect of MnCl_2 on structure and properties of magnesium alloy wastes [J]. Foundry, 2003, 52(12): 1166–1160.
- [8] 刘正, 张奎, 曾晓勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 71–89.
- LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Basic Theory and Application of Light Metal for Magnesium Matrix [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [9] АЛЪТМЭН М Б, Лебедев, Палянский А П. 轻合金的熔炼和铸造[M]. 钱世民, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1959: 125–152.
- АЛЪТМЭН М Б, Лебедев, Палянский А П. Smelting and Foundry of Light Metal Alloy [M]. QIAN Shi-min transl. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1959: 125–152.
- [10] Hillis J E, Schook S O. New high purity Mg alloy [J]. Automot Eng, 1989, 97(5): 57–59.
- [11] 郑来苏. 铸造合金及其熔炼[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994: 271–283.
- ZHENG Lai-su. Casting Alloy and Its Smelting [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1994: 271–283.
- [12] GAO Hong-tao, WU Guo-hua, DING Win-jiang. Study on Fe reduction in AZ91 melt by B_2O_3 [J]. Mater Sci Eng A, 2004, A386: 311–317.
- [13] Lunder O, Videm M, Nisancioglu K. Corrosion Resistant Magnesium Alloys [J]. Society of Automotive Engineers (SAE) Transactions, 1995, 104 (5): 352–357.
- [14] 罗治平, 张少卿, 汤亚力. 稀土在镁合金溶液中作用的热力学分析[J]. 中国稀土学报, 1995, 13(2): 119–122.
- LUO Zhi-ping, ZHANG Shao-qing, TANG Ya-li. Thermodynamical analysis of effect of rare earth on magnesium alloy melt [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 1995, 13(2): 119–122.
- [15] ZENG Xiao-qin, WANG Qu-dong, LU Zen-yi. Influence of beryllium and rare earth additions on ignition-proof magnesium alloys [J]. J Mater Process Technol, 2001, 112: 17–23.
- [16] Edward L L. Binary Alloy Phase Diagrams[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000: 200.
- [17] Saccone A, Cacciamani G, De Negri S. The Al-Er-Mg ternary system(I): Experimental investigation[J]. J Phase Equilibria, 2002, 23: 29–37.
- [18] Song G L, Atrens A, Dargusch M. Influence of microstructure on the corrosion of diecast AZ91D [J]. Corrosion Science, 1999, 41: 249–273.

(编辑 何学锋)