



不同锰添加剂对 Mg-3%Al 合金 显微组织的影响

石裕同, 杜 军, 黄正阳, 李文芳

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘 要: 采用光学和扫描电子显微镜研究了 3 种添加剂 Mg-10Mn、Al-20Mn 和 MnCl_2 对 Mg-3Al%合金组织的影响, 利用相提取技术分析不同锰添加剂下 Mg-3%Al(质量分数)合金中生成的 Al-Mn 相, 并通过边边匹配模型对 Al-Mn 相和 α -Mg 间的晶体学错配度进行计算。结果表明: 不同锰添加剂对 Mg-3%Al 合金晶粒和 Al-Mn 相类型有显著影响。Mg-10Mn 和 Al-20Mn 中间合金在 Mn 加入量为 0.3%时, 对 Mg-3%Al 合金晶粒有一定的细化作用, 而 MnCl_2 导致晶粒显著粗化。Mn 加入量为 0.3%时, 添加 Mg-10Mn 和 Al-20Mn 中间合金形成的 Al-Mn 相主要为 Al_8Mn_5 ; 而 Mn 量增至 0.5%时, 添加 Mg-10Mn 和 Al-20Mn 中间合金形成的 Al-Mn 相则主要为 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ 。添加 MnCl_2 时, Mg-3Al%合金中形成的 Al-Mn 相主要为 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$ 。晶体学错配度计算表明: Al_8Mn_5 能充当 Mg-3%Al 合金的异质形核核心, 但形核效率一般, $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ 和 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$ 不能充当异质形核核心。

关键词: Mg-3Al%合金; 晶粒细化; 锰添加剂; 相提取; 边边匹配模型

文章编号: 1004-0609(2018)-05-0916-07

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

作为最轻质的金属结构材料, 镁合金以其显著的高比强度和高比刚度特性而在轻量化和节能减排方面具有独特优势, 在交通、航空航天和电子产品等领域受到广泛关注^[1]。但镁合金的绝对强度较低, 同时因镁属于 HCP 结构, 塑性变形能力差, 从而限制了镁合金在工业中的大规模应用^[2]。大量研究表明^[3-5]: 通过组织控制特别是细化晶粒组织可同时提高镁合金的强度和塑性, 改善镁合金的综合性能。合金化是提高和改善镁及其合金组织综合性能的有效途径^[6], 其中 Al 是最为常用的合金元素, 当前 Mg-Al 系合金是应用范围最广、市场占有率最大的商用镁合金, 被广泛应用于铸造和挤压轻质零部件生产。

Mn 是 Mg-Al 系合金中最常见的合金元素, 其主要目的是消除杂质 Fe 对镁合金耐蚀性能的不利影响^[7]。同时, Mn 会与 Al 作用生成 Al-Mn 相并导致镁合金晶粒尺度的显著变化^[8], 而晶粒尺度的变化趋势及其幅度与 Mn 的添加途径有关。 MnCl_2 是常用的锰合金化添加剂, TINNER^[9]发现, 在过热工艺条件下只有当 Mn 含量高于 0.2%才会导致晶粒的明显细化; 而 NELSON^[10]发现相反的现象, Mg-Al 熔体中存在较多

Mn 时, 过热法无法细化晶粒。TAMURA 等^[11]发现利用 Al-10%Mn 中间合金作为 Mn 添加剂会使 Mg-9%Al 的晶粒发生粗化。CAO 等^[12]发现 Al-60%Mn 中间合金可以明显细化 Mg-3%Al、Mg-6%Al 和 Mg-9%Al 的晶粒, 但是添加纯锰以及锰剂无法细化镁铝合金晶粒。可见, Mn 对 Mg-Al 合金铸造组织, 特别是晶粒尺度的影响与添加途径密切相关, 这可能与锰添加剂不同导致生成的 Al-Mn 合金相类型不同有关。从 Al-Mn 相图可知, 存在多种不同的 Al-Mn 合金相种类, 不同类型的合金相存在不同的晶体结构, 对 α -Mg 晶粒表现出不同的细化能力。

由于 Mn 的加入量少, Al-Mn 相种类很难进行精确表征和确定。基于此, 本文作者以 Mg-3%Al 合金为研究对象, 选择 Mg-10Mn、Al-20Mn(质量分数, %, 下同)和 MnCl_2 (工业纯, 纯度为 99.5%)作为锰添加剂, 并调整锰的加入量, 研究加入量对 Mg-3%Al 合金晶粒尺度的影响, 并利用化学萃取法收集获得 Al-Mn 相颗粒, 利用 XRD 分析其物相类型, 进而讨论对镁铝合金晶粒的影响机制, 从而为商用 Mg 合金 Mn 合金化途径提供一定的指导。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574127); 广东省自然科学基金资助项目(2014A030313221)

收稿日期: 2017-03-10; **修订日期:** 2017-06-01

通信作者: 杜 军, 教授, 博士; 电话: 020-87113597; E-mail: jundu@scut.edu.cn

1 实验

利用高纯 Mg(99.95%)和高纯 Al(99.99%)配置并熔炼 Mg-3%Al 合金,选择 Mg-10Mn、Mg-20Mn 和 MnCl_2 作为锰合金化添加剂。Mn 含量控制为 0、0.15%、0.3%和 0.5%(体积分数)。熔炼温度控制为 760 °C,使用 1% SF_6 和 99% N_2 组成的混合气体防止镁合金的氧化燃烧。添加含 Mn 中间合金或化合物后,搅拌并保温 30 min 确保中间合金全部熔化并混合均匀,然后浇注到 500 °C 预热的 $d 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的模具中得到试样。从离样品底部 10 mm 处截取晶粒观测试样,并在 400 °C 下固溶 8 h 后空冷,经标准磨抛工艺后利用苦味酸酒精溶液进行腐蚀以显示晶界。腐蚀后的样品在 Leica DFC320 型金相显微镜下观察,通过截点法测量晶粒大小。采用 Quanta 200 型环境扫描电镜对试样进

行第二相析出物微观形貌分析,并利用扫描电镜附带的 IE350MT 型能谱仪(EDS)进行成分分析。将铸态样品置入醋酸溶液(冰醋酸与水的体积比为 1:10)溶解掉镁基体,随后对溶液进行过滤收集,经洗涤后烘干并对提取颗粒利用 XRD 进行物相分析和鉴定。

2 实验结果

2.1 光学显微组织

经光学显微组织观测发现锰的添加途径对 Mg-3%Al 合金的晶粒尺度有显著影响。图 1 所示为经锰合金化处理的 Mg-3%Al 合金的典型光学显微组织。未添加中间合金时, Mg-3%Al 合金的晶粒粗大(见图 1(a)),添加 Mg-10Mn 和 Al-20Mn 中间合金可对其晶粒起到一定的细化作用(见图 1(b)~(e)),但当添加 MnCl_2 时晶粒明显粗化(见图 1(f))。图 2 所示为不同锰

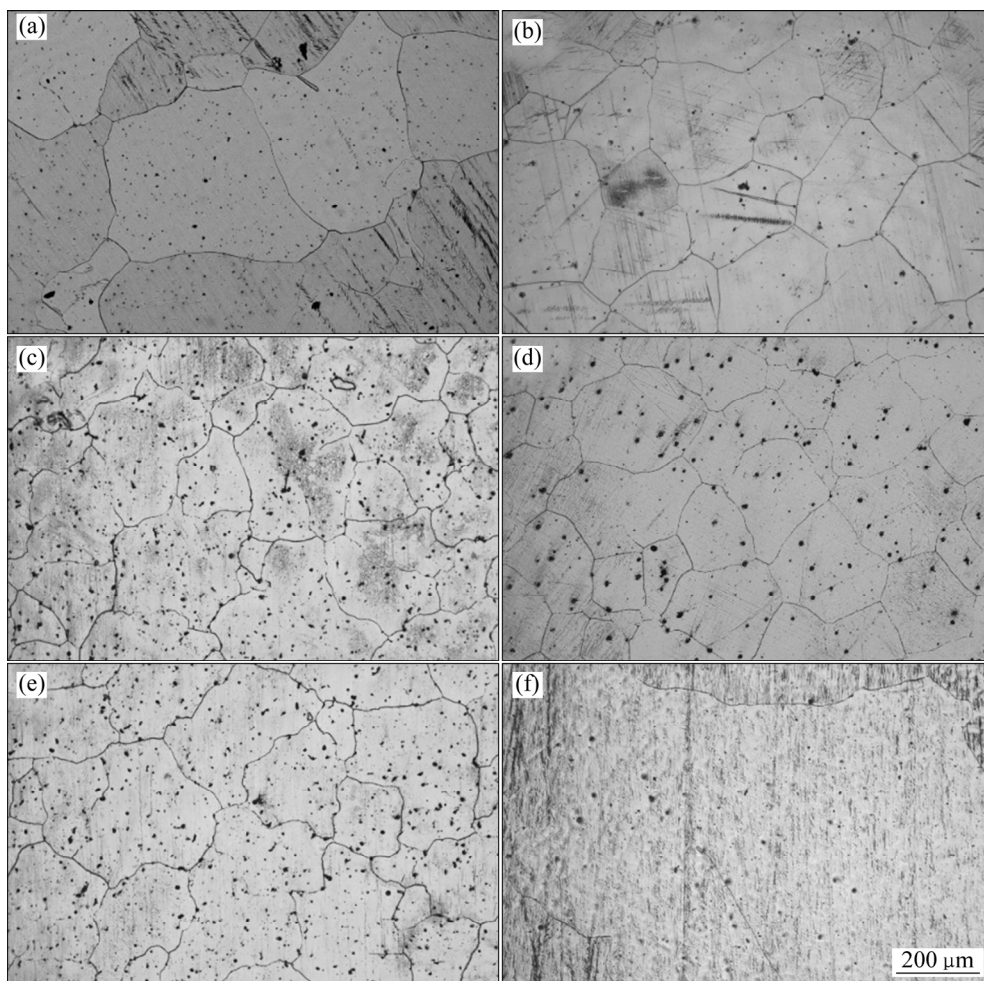


图1 加入不同锰添加剂的 Mg-3%Al 合金的金相照片

Fig. 1 Metallographs of Mg-3%Al alloy adding different manganese additives: (a) Without adding; (b) 0.3%Mg-10Mn; (c) 0.5%Mg-10Mn; (d) 0.3%Al-20Mn; (e) 0.5% Al-20Mn; (f) 0.3% MnCl_2

含量对 Mg-3%Al 合金晶粒尺寸的影响。由图 2 可看出,未添加 Mn 时,Mg-3%Al 合金的晶粒尺寸约为 510 μm 。当添加 Mg-10Mn 中间合金且 Mn 加入量分别为 0.15%、0.3%和 0.5%时,相应的晶粒尺寸分别约为 420、361 和 448 μm 。当添加 Al-20Mn 中间合金且 Mn 加入量分别为 0.15%、0.3%和 0.5%时,相应的晶粒尺寸分别约为 450、335 和 490 μm 。当添加 MnCl_2 且 Mn 加入量分别为 0.15%、0.3%和 0.5%时,相应的晶粒尺寸分别约为 1256、1300 和 1459 μm 。

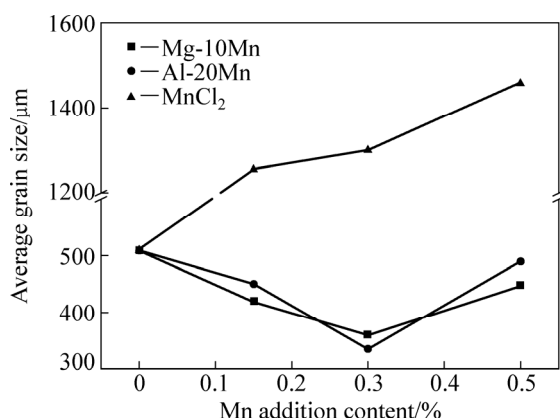


图 2 Mn 添加量对 Mg-3%Al 合金晶粒尺寸的影响

Fig. 2 Effect of Mn addition on grain size of Mg-3%Al alloy

2.2 SEM 观测

通过 SEM 观测可知,加入不同锰添加剂的 Mg-3%Al 合金中均存在合金相,随着 Mn 加入量的增加,合金相数量不断增多。图 3 所示为添加 Mg-10Mn 的 Mg-3%Al 合金中 Al-Mn 的 SEM 像。由图 3 可看出,当 Mn 加入量为 0.3%时,基体中分布大量细小杆状和球状中间相,对合金相进行 EDS 能谱分析,并经统计获得含 Mn 中间相中 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 为 1.58~1.75;当 Mn 加入量为 0.5%时,中间合金相主要为杆状,与 Mn 加入量为 0.3%时对比,部分杆状中间相增粗。而基于能谱统计发现,此时含 Mn 中间相中 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 为 0.95~1.06。

图 4 所示为添加 Al-20Mn 的 Mg-3%Al 合金中 Al-Mn 相的 SEM 像。由图 4 可看出,当 Mn 加入量为 0.3%时,基体中分布大量球状和短粗杆状中间相,含 Mn 中间相中 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 为 1.49~1.78,而 Mn 加入量增至 0.5%时,中间相主要为球状和长条状,中间相中的 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 比例范围在 0.89~0.96 之间。而利用 MnCl_2 进行合金化时,与 Mg-10Mn 和 Al-20Mn 合金化相比,基体中分布的杆状中间相明显减少,如图 5 所示,且合金相中 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 明显较大,为 2.2~3.68。

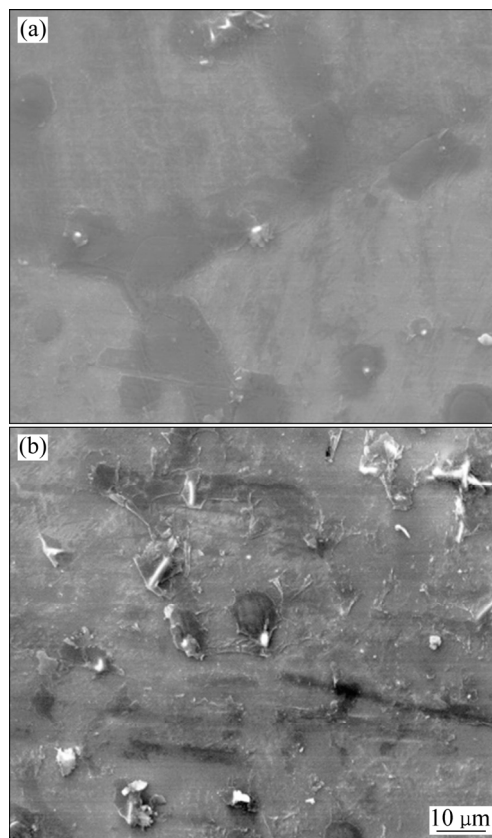


图 3 添加 Mg-10Mn 的 Mg-3%Al 合金中 Al-Mn 相的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of Al-Mn particles in Mg-3%Al alloy modified by Mg-10Mn: (a) 0.3%; (b) 0.5%

2.3 合金相 XRD 分析

为准确鉴定锰合金化后 Mg-3%Al 合金中形成的含 Mn 中间相,对不同锰合金化且 Mn 加入量分别为 0.3%和 0.5%时萃取的合金相颗粒进行物相分析,其结果如图 6 所示。当锰合金化途径和加入量不同时,合金中 Al-Mn 相类型存在差异。对于利用 Mg-10Mn 合金化,当 Mn 加入量为 0.3%时,合金中的含 Mn 中间相主要为 Al_8Mn_5 ;当 Mn 加入量增至 0.5%时,含 Mn 中间相主要为 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ 和少量 $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$ (见图 6(a))。物相鉴定结果与能谱分析所得 $n(\text{Al})/n(\text{Mn})$ 较为吻合。而对于利用 Al-20Mn 合金化,Al-Mn 相类型与利用 Mg-10Mn 合金化相似,即 Mn 加入量为 0.3%时,合金中的含 Mn 中间相主要为 Al_8Mn_5 ;而当 Mn 加入量增至 0.5%时,含 Mn 中间相主要为 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ (见图 6(b))。而若利用 MnCl_2 作为 Mn 剂添加的情况下,当 Mn 加入量分别为 0.3%和 0.5%时,Mg-3%Al 合金中提取颗粒的含 Mn 中间相均为 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$ (见图 6(c))。

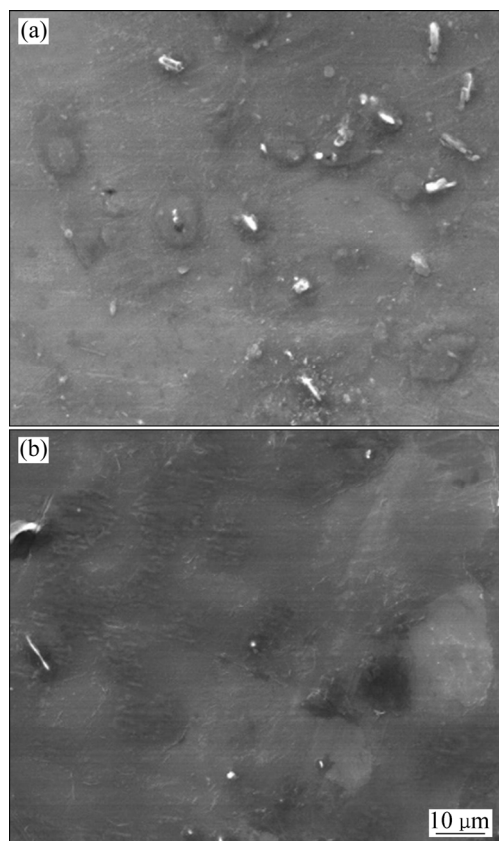


图 4 添加 Al-20Mn 的 Mg-3%Al 合金中 Al-Mn 相的 SEM 像

Fig. 4 SEM images of Al-Mn particles in Mg-3%Al alloy modified by Al-20Mn: (a) 0.3%; (b) 0.5%

3 分析与讨论

基于以上研究可知, Mn 的添加途径和 Mn 加入量对 Mg-3%Al 合金的微观组织及晶粒尺度有显著影响。当合金中形成的含 Mn 中间相为 Al_8Mn_5 时, 晶粒细化效果达到最佳。当形成的中间相为 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ 时, 晶粒略微细化。而当形成的中间相为 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$ 时, 合金晶粒明显粗化。HAN 等^[13]利用 Mg-0.72Mn 制备 Mg-Al-Mn 合金时发现随着 Mn 加入量的增加晶粒尺寸维持不变, 并通过 FESEM 和 TEM 确定合金中的 Al-Mn 相主要是 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$, 因而, Mn 对 Mg-3%Al 合金晶粒尺度的影响可能与 Al-Mn 相类型有关。根据金属凝固理论, 晶核与基体之间的界面结构特性以及晶体学位向关系是决定中间相的异质形核能力的重要因素, Al-Mn 相和 α -Mg 之间的界面结构可能对合金组织产生影响。

边边匹配模型(Edge-to-edge matching model)被广

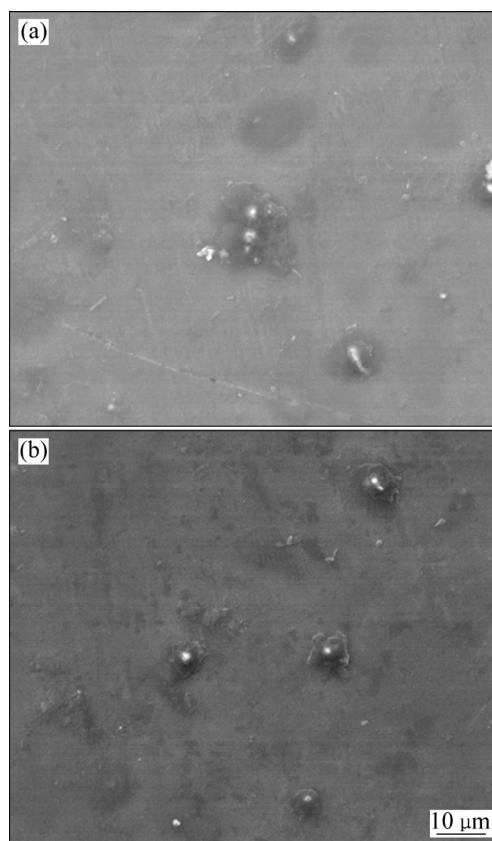


图 5 添加 MnCl_2 的 Mg-3%Al 合金中 Al-Mn 相的 SEM 像
Fig. 5 SEM images of Al-Mn particles in Mg-3%Al alloy modified by MnCl_2 : (a) 0.3%; (b) 0.5%

泛用于分析中间相和镁基体之间的晶体学位向关系。该模型由学者 ZHANG 等^[14-15]提出: 利用原子位置、点阵参数和晶体结构来研究两相在交叉界面上原子间的匹配关系。为了获得最佳的匹配关系, 两相之间必须满足一定条件。如果晶核和基体沿密排或近密排方向的原子错配度小于 10%, 并且包含该方向的密排或近密排晶面的晶面间距错配度小于 6%, 则晶核能作为有效的异质形核核心。当晶核和基体沿密排或近密排方向的原子错配度小于 10%, 而晶面间距错配度大于 6%, 则晶核能作为异质形核核心但效率一般。如果晶核和基体沿密排或近密排方向的原子错配度大于 10%或者面间距错配度很大, 则晶核不能作为有效的异质形核核心。

Mg 与 Al_8Mn_5 (PDF#32-0021)间的匹配晶向对为 $\text{Mg}\langle 10\bar{1}0 \rangle / \text{Al}_8\text{Mn}_5\langle 10\bar{1}1 \rangle$ ^[16], 包含该匹配晶向的匹配晶面为 $\text{Mg}\{0002\} / \text{Al}_8\text{Mn}_5\{30\bar{3}3\}$ 。Mg 与 $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ (PDF#30-0028)间的匹配晶向对为 $\text{Mg}\langle 11\bar{2}0 \rangle / \text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}\langle 111 \rangle$, 包含该匹配晶向的匹配晶面为 $\text{Mg}\{0002\} / \text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}\{110\}$ 。Mg 与 $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$

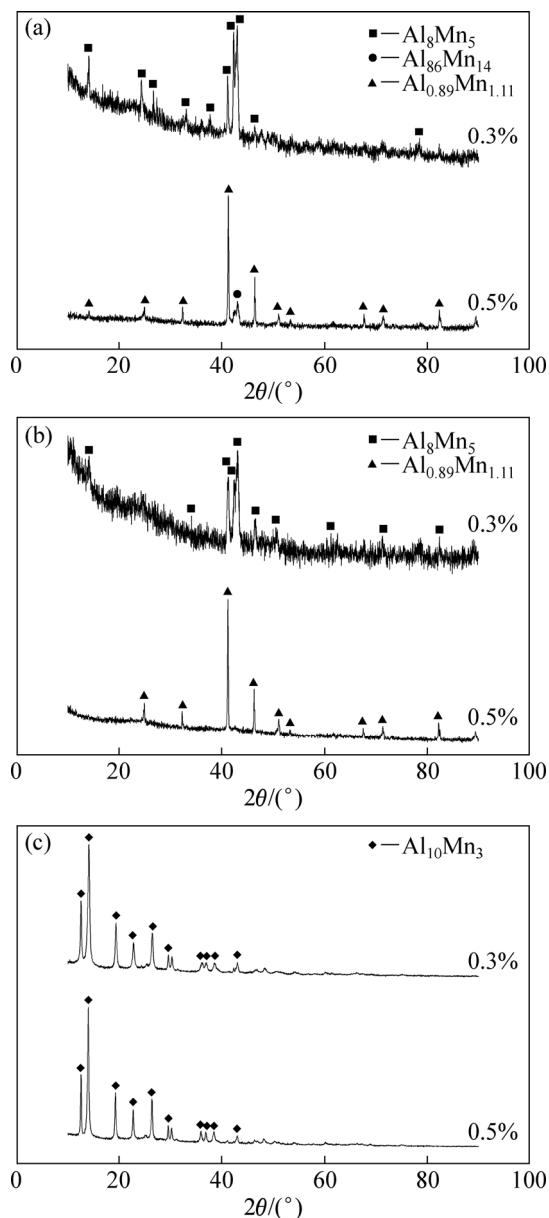


图6 Mg-3%Al-xMn($x=0.3\%$, 0.5%)合金中提取颗粒的XRD谱

Fig. 6 XRD patterns of particles extracted from Mg-3%Al-xMn($x=0.3\%$, 0.5%) alloys: (a) Mg-10Mn; (b) Al-20Mn; (c) MnCl₂

(PDF#65-6205) 间的匹配晶向对为 Mg($10\bar{1}0$)/Al₁₀Mn₃($\bar{1}100$), 包含该匹配晶向的匹配晶面为 Mg{0002}/Al₁₀Mn₃{11 $\bar{2}0$ }。原子间距错配度和晶面间距错配度计算结果分别如表1和2所列。

由表1和2可知, Mg和Al₈Mn₅的 $\langle 10\bar{1}0 \rangle_{\text{Mg}} / \langle 10\bar{1}1 \rangle_{\text{Al8Mn5}}$ 的原子间距错配度小于10%, 但包含该匹配晶向的匹配晶面{0002}_{Mg}/{30 $\bar{3}3$ }_{Al8Mn5}的晶面间距错配度大于6%。而Mg、Al_{0.89}Mn_{1.11}及Al₁₀Mn₃间的

表1 Mg与Al₈Mn₅、Al_{0.89}Mn_{1.11}和Al₁₀Mn₃间的原子间距错配度

Table 1 Interatomic spacing misfit along matching directions between Mg and Al₈Mn₅, Al_{0.89}Mn_{1.11}, Al₁₀Mn₃ (%)

$\langle 10\bar{1}0 \rangle_{\text{Mg}} /$ $\langle 10\bar{1}1 \rangle_{\text{Al8Mn5}}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\text{Mg}} /$ $\langle 111 \rangle_{\text{Al0.89Mn1.11}}$	$\langle 10\bar{1}0 \rangle_{\text{Mg}} /$ $\langle \bar{1}100 \rangle_{\text{Al10Mn3}}$
7.4	21.6	27.6

表2 Mg与Al₈Mn₅、Al_{0.89}Mn_{1.11}和Al₁₀Mn₃间的晶面间距错配度

Table 2 Interplanar spacing mismatches between matching planes for Mg and Al₈Mn₅, Al_{0.89}Mn_{1.11} and Al₁₀Mn₃ (%)

{0002} _{Mg} /	{0002} _{Mg} /	{0002} _{Mg} /
{30 $\bar{3}3$ } _{Al8Mn5}	{110} _{Al0.89Mn1.11}	{11 $\bar{2}0$ } _{Al10Mn3}
17.8	33.0	31.6

原子间距错配度均远大于10%, 相应的晶面间距错配度均远大于6%。因此, 从晶体学角度分析, Al₈Mn₅能作为镁合金的异质形核核心, 但效率一般。而Al_{0.89}Mn_{1.11}和Al₁₀Mn₃不能作为镁合金的异质形核核心。

对比3种主要Al-Mn相与Mg间的匹配关系, Al₈Mn₅的匹配关系最好, Al_{0.89}Mn_{1.11}的次之, Al₁₀Mn₃相的匹配关系最差。匹配关系与锰合金化后Mg-3%Al合金晶粒细化效果一致。由于形成Al₁₀Mn₃相消耗了合金体系中大量的Al, 而Al本身对镁有一定的晶粒细化作用, 因此, 添加MnCl₂后Mg-3%Al合金的晶粒不仅没细化, 反而明显粗化。

4 结论

1) 不同锰添加剂对Mg-3%Al合金晶粒有不同的细化作用, 可以细化Mg-3%Al合金晶粒, 当Mn添加量为0.3%时, Mg-10Mn和Al-20Mn中间合金的细化效果最佳。MnCl₂对Mg-3%Al合金晶粒没有细化作用, 反而使晶粒显著粗化。

2) Mn加入量为0.3%时, Mg-10Mn和Al-20Mn中间合金在Mg-3%Al合金中形成的Al-Mn相主要为Al₈Mn₅。Mn加入量增至0.5%时, 合金中形成的Al-Mn相主要为Al_{0.89}Mn_{1.11}。而添加MnCl₂时, Mg-3%Al合金中形成的Al-Mn相主要为Al₁₀Mn₃。

3) 边边匹配模型表明, Al₈Mn₅能充当Mg-3%Al合金的异质形核核心, 但效率一般。Al_{0.89}Mn_{1.11}和Al₁₀Mn₃不能作为Mg-3%Al合金的异质形核核心。

REFERENCES

- [1] KUBOTA K, MABUCHI M, HIGASHI K. Review processing and mechanical properties of fine-grained magnesium alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(10): 2255–2262.
- [2] 汪凌云, 黄光胜, 范永革, 黄光杰. 变形 AZ31 镁合金的晶粒细化[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(3): 594–598.
WANG Ling-yun, HUANG Guang-sheng, FAN Yong-ge, HUANG Guang-jie. Grain refinement of wrought AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(3): 594–598.
- [3] PAN Hu-cheng, REN Yu-ping, FU He, ZHAO Hong, WANG Li-qing, MENG Xiang-ying, QIN Gao-wu. Recent developments in rare-earth free wrought magnesium alloys having high strength: A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 663: 321–331.
- [4] KASEEM M, CHUNG B K, YANG H W, HAMAD K, KO Y G. Effect of deformation temperature on microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy processed by differential-speed rolling[J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2015, 31(5): 498–503.
- [5] ZENG Xiao-qin, WANG Ying-xin, DING Wen-jiang, LUO A A, SACHDEV A K. Effect of strontium on the microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(4): 1333–1341.
- [6] 毕广利, 李元东, 黄晓峰, 陈体军, 马 颖, 郝 远. Zn 含量对铸态 Mg-Dy 合金显微组织和力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(4): 875–882.
BI Guang-li, LI Yuan-dong, HUANG Xiao-feng, CHEN Ti-jun, MA Ying, HAO Yuan. Effect of Zn addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Dy alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(4): 875–882.
- [7] WEI Liu-ying, WESTENG H, AUNE T K, ALBRIGHT D. Characterisation of manganese-containing intermetallic particles and corrosion behaviour of die cast Mg-Al-based alloys[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016: 153–160.
- [8] CAO P, STJOHN D H, QIAN M. The effect of manganese on the grain size of commercial AZ31 alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 488: 139–142.
- [9] TINER N. Superheating of magnesium alloys[J]. *Trans AIME*, 1945, 161: 242–264.
- [10] NELSON C E. Grain size behavior in magnesium casting alloys[J]. *Trans AFS*, 1948, 56: 1–23.
- [11] TAMURA Y, MOTEGI T, KONO N, SATO E. Effect of minor elements on grain size of Mg-9% Al alloy[C]. *Materials Science Forum*, 2000, 350: 199–204.
- [12] CAO P, QIAN M, STJOHN D H. Effect of manganese on grain refinement of Mg-Al based alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(11): 1853–1858.
- [13] HAN Guang, MA Guo-long, LIU Xiang-fa. Effect of manganese on the microstructure of Mg-3Al alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1/2): 136–141.
- [14] ZHANG M X, KELLY P M. Edge-to-edge matching and its applications: Part II. Application to Mg-Al, Mg-Y and Mg-Mn alloys[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(4): 1085–1096.
- [15] FU H M, QIU D, ZHANG M X, WANG H, KELLY P M, TAYLOR J A. The development of a new grain refiner for magnesium alloys using the edge-to-edge model[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 456(1): 390–394.
- [16] ZHANG M X, KELLY P M, QIAN M, TAYLOR J A. Crystallography of grain refinement in Mg-Al based alloys[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(11): 3261–3270.

Effects of different manganese additions on microstructure of Mg-3Al alloy

SHI Yu-tong, DU Jun, HUANG Zheng-yang, LI Wen-fang

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of three kinds of manganese additions on microstructure of the Mg-3Al% alloy were studied by optical microstructure and scanning electron microscope. The phase extracting method was utilized to analyze the Al-Mn phases generated in Mg-3Al% alloy modified by different manganese additions. The crystallography misfits between Al-Mn phases and α -Mg were calculated by using edge-to-edge matching model. The results show that different manganese additions can obtain different grain refinement efficiency and Al-Mn phases for the Mg-3Al% alloy. The grain size of the alloy can be slightly refined by Mg-10Mn and Al-20Mn master alloys when Mn addition is 0.3%. However, the grain is obviously coarsened after being modified by MnCl_2 . The Al-Mn phase generated in the alloy modified by Mg-10Mn and Al-20Mn master alloys mainly contains Al_8Mn_5 when Mn addition is 0.3%. And the Al-Mn phase turns to be $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ when Mn addition is 0.5%. When the alloy is modified by MnCl_2 , the Al-Mn phase is mainly $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$. The crystallography misfit results show that Al_8Mn_5 can act as crystallize nuclei with impotent effect. $\text{Al}_{0.89}\text{Mn}_{1.11}$ and $\text{Al}_{10}\text{Mn}_3$ cannot act as crystallize nuclei. The results correspond with the grain refinement efficiency of Mg-3Al% alloy modified by different Mn additions.

Key words: Mg-3Al% alloy; grain refinement; manganese addition; phase extraction; edge-to-edge matching model

Foundation item: Project(51574127) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2014A030313221) supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China

Received date: 2017-03-10; **Accepted date:** 2017-06-01

Corresponding author: DU Jun; Tel: +86-20-87113597; E-mail: jundu@scut.edu.cn

(编辑 李艳红)