

文章编号:1671-6833(2011)05-0049-03

## Al-5Ti-0.25C-8Sr 对 AM60B 镁合金铸态 显微组织及性能的影响

赵红亮, 段晓辉, 于洋, 翁康荣, 孔亚萍

(郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**研究了 Al-5Ti-0.25C-8Sr 对 AM60B 镁合金显微组织及性能的影响. 结果表明: Al-5Ti-0.25C-8Sr 对 AM60B 具有良好的细化和变质效果. 添加质量分数为 0.1% 的 Al-5Ti-0.25C-8Sr 时,  $\alpha$ -Mg 显著细化,  $\beta$  相由连续或半连续状转变为颗粒状, 平均晶粒尺寸由 265  $\mu\text{m}$  降低到约 78  $\mu\text{m}$ ; 但当 Al-5Ti-0.25C-8Sr 加入量大于 0.1% 时, 镁合金晶粒有粗化趋势; AM60B 的抗拉强度和显微硬度随着 Al-5Ti-0.25C-8Sr 添加量的增加先升高后下降, 当加入量为 0.1% 时具有最大值.

**关键词:** AM60B 镁合金; Al-5Ti-0.25C-8Sr; 晶粒细化; 变质

**中图分类号:** TG292

**文献标志码:** A

### 0 引言

Mg-Al 系镁合金为目前应用最广泛的镁合金之一, 在 Mg-Al 系镁合金中, AM60 镁合金具有较高的塑性、较好的韧性和抗蠕变性, 日渐成为汽车部件生产首先考虑的材料, 但该合金存在着强度较低的缺点. 添加晶粒细化剂细化镁合金晶粒和改变组织形态是改善镁合金性能, 扩大镁合金应用范围的一种方便而有效的手段. 近年研究结果表明: Al-Ti、Al-Ti-C 中间合金对纯镁及其镁合金的组织 and 性能有较好的改善<sup>[1-3]</sup>, 但这类二元或三元中间合金多只从组织细化方面讨论了其对镁合金的影响, 而对镁合金组织中第二相变质的讨论则较少. 因此, 笔者通过添加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 四元中间合金, 研究 Al-5Ti-0.25C-8Sr 对 AM60B 镁合金组织的细化和变质效果以及其性能的影响, 并对其细化变质机理进行探讨.

### 1 试验方法

晶粒细化剂采用自制的 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金<sup>[4]</sup>, 选用 AM60B 合金作为晶粒细化的基础合金; 在一定比例的  $\text{SF}_6 + \text{CO}_2$  混合气体保护下, 采用 SG2-7.5-12 铸铁坩埚电阻炉 (7.5 kW) 进行熔炼; 熔配 3 种成分的 AM60B +  $x\%$  Al-5Ti-

0.25C-8Sr ( $x = 0.1, 0.3, 0.5$ ) 试验合金. 熔炼过程为: 720  $^{\circ}\text{C}$  将 AM60B 镁合金熔化, 后升温到 740  $^{\circ}\text{C}$  时加入中间合金, 待中间合金熔化后轻微搅拌, 使中间合金在熔体中分布均匀, 静置保温 20 min 并降温至 720  $^{\circ}\text{C}$ , 浇铸于规格为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  并预热 250  $^{\circ}\text{C}$  的钢模内.

从试样顶端 25 mm 处取样分析. 试样经过打磨和抛光后腐蚀, 腐蚀溶液为苦味酸酒精溶液 (10 mL 醋酸, 4.2 g 苦味酸, 10 mL 水, 70 mL 乙醇) 与 4% 硝酸酒精溶液. 腐蚀后经蒸馏水清洗并吹干后进行金相观察. 利用截线法测量  $\alpha$ -Mg 晶粒的尺寸大小; 通过 XRD 分析试样的相组成; 利用扫描电镜 (SEM) 研究合金的显微组织.

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 中间合金对 AM60B 晶粒和铸态组织的影响

图 1 为固溶处理后 AM60B 镁合金的固溶组织. 可以看出, 添加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金后, AM60B 合金晶粒出现了先细化后粗化的趋势. 未添加中间合金时 AM60B 平均晶粒尺寸为 265  $\mu\text{m}$ , 添加 0.1% 后其晶粒最细小, 平均晶粒为 78  $\mu\text{m}$ , 且晶粒大小均匀, 这说明 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金对 AM60B 具有良好的细化效果.

收稿日期: 2011-04-21; 修订日期: 2011-05-20

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目 (2011A430027); 国家大学生创新性实验计划项目 (101045942)

作者简介: 赵红亮 (1972-) 男, 河南项城人, 郑州大学教授, 博士后, 主要从事高性能镁铝合金方面研究, E-mail: zhl-wkr@zzu.edu.cn.

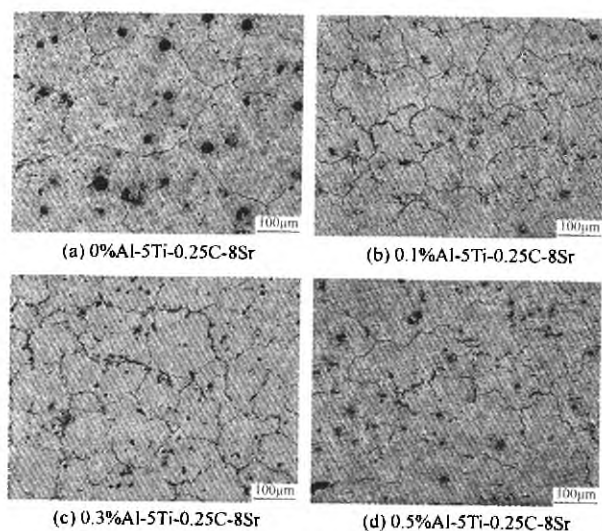


图1 添加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金前后 AM60B 镁合金的固溶组织照片

Fig.1 Solid solution microstructure of AM60B without and with addition of Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy

图2为添加不同量 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金时 AM60B 镁合金的铸态 SEM 照片。由图2(a)可以看出:AM60B 是由基体  $\alpha$  相和离异共晶析出的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相组成, $\beta$  相主要以半连续网状沿晶界分布且尺寸较大,也有少量颗粒状分布于晶内。在添加质量分数为 0.1% 的 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金后(见图2(b)), $\beta$  相全部转变为颗粒状并均匀弥散地分布于基体中,且析出量明显减少。当加入质量分数为 0.3% 时(见图2(c)), $\beta$  相仍主要以颗粒状分布,但析出量较 0.1% 时多。继续增加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 添加量后,发现粒状  $\beta$  相减少,骨骼状  $\beta$  相增多,甚至重新出现了断续网状  $\beta$  相,如图2(d)。这说明该中间合金对 AM60B 中的  $\beta$  相具有良好的变质作用,不仅可改变  $\beta$  相的大小、形貌和分布,而且可抑制  $\beta$  相的析出,但加入量不能过多,0.1% 时最佳。

为了研究 AM60B 中添加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金后晶粒细化的机理及 Ti 和 Sr 元素在 AM60B 中存在的位置,对添加质量分数为 0.5% Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金的 AM60B 合金试样进

行了面扫描,结果如图3所示。可以看出,Ti 和 Sr 元素均存在于镁合金中,且主要沿晶界分布。

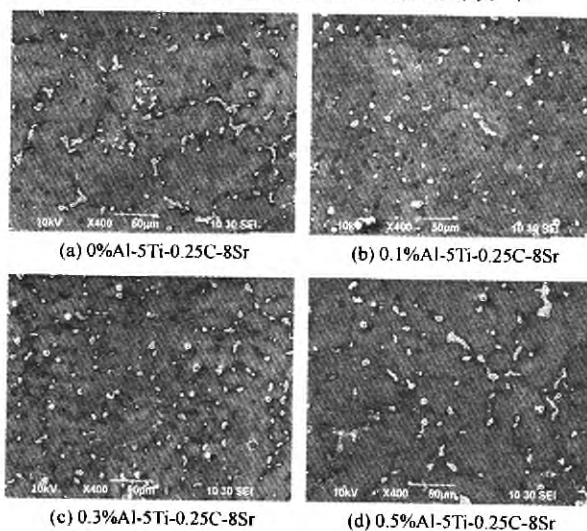


图2 添加 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金前后 AM60B 合金的铸态 SEM 照片

Fig.2 SEM micrograph of as-cast AM60B without and with addition of Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy

向熔融态 AM60B 合金液中加入 Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金后,释放出 TiC、Al<sub>4</sub>Sr、TiAl<sub>3</sub> 和少量 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 粒子<sup>[4]</sup>。TiAl<sub>3</sub> 相高温分解后 Ti 溶于合金熔体中,Al 则与 C 发生反应生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 粒子。Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 为密排六方结构,与  $\alpha$ -Mg 具有相同的晶体结构,TiC 虽为体心立方结构,但其(111)面与 Mg 的(0001)面具有相似的原子排列方式,这两种粒子与  $\alpha$ -Mg 的错配度分别为 3.8% 和 4.6%。根据异质形核理论,晶格错配度  $\delta \leq 9\%$  即可作为有效核心。因此,Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 和 TiC 粒子均可作为  $\alpha$ -Mg 的有效形核核心<sup>[5]</sup>。Ti 和 Sr 元素在镁中的溶解度均较小,是所谓的“表面活性元素”<sup>[6-8]</sup>。在合金凝固过程中,Ti 和 Sr 被排挤到固-液界面前沿,富集在  $\alpha$ -Mg 晶粒相界面,降低了溶质原子的扩散速度,并抑制了晶粒长大,从而细化合金晶粒并使  $\beta$  相转变为弥散分布的颗粒状。另外,部分 Al<sub>4</sub>Sr 相在合金凝固过程中,会在  $\alpha$ -Mg 晶粒相界面前沿偏聚,起到阻止晶粒长大作用。

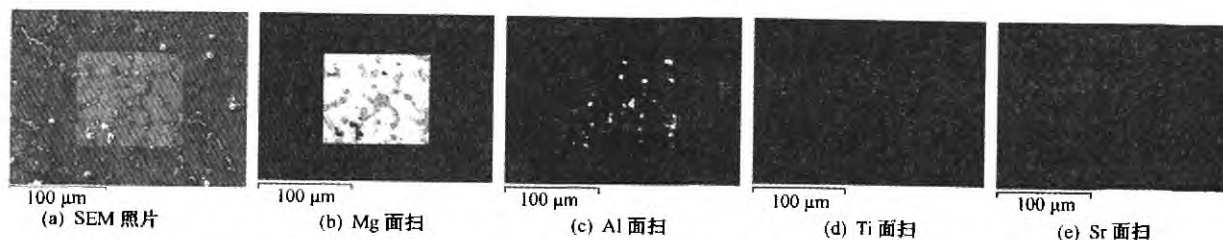


图3 添加质量分数 0.5% Al-5Ti-0.25C-8Sr 中间合金的 AM60B 面扫描照片

Fig.3 SEM micrograph of AM60B with addition of 0.5% Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy

## 2.2 中间合金对AM60B抗拉强度的影响

在添加Al-5Ti-0.25C-8Sr中间合金后,AM60B合金的抗拉强度和显微硬度均呈现出先升高后降低的趋势。当加入质量分数为0.1% Al-5Ti-0.25C-8Sr时,其抗拉强度达到181 MPa,较原合金提高了22%;显微硬度达到57.9 Hv,提高了21.9%。继续增加Al-5Ti-0.25C-8Sr添加量时,抗拉强度和显微硬度均有所下降,这主要是由合金晶粒粗化和 $\beta$ 相变质效果较弱所影响。在添加0.1% Al-5Ti-0.25C-8Sr时,合金晶粒最小,且 $\beta$ 相为细小颗粒相,因此其抗拉强度和显微硬度最高。

## 3 结论

(1) Al-5Ti-0.25C-8Sr中间合金不仅可有效细化AM60B合金晶粒,并可改变其 $\beta$ 相的大小、形貌和分布,添加0.1% Al-5Ti-0.25C-8Sr中间合金具有最佳的细化变质效果, $\alpha$ -Mg平均晶粒尺寸由原265  $\mu\text{m}$ 细化到78  $\mu\text{m}$ ,但当中间合金加入量大于0.1%时,AM60B呈现晶粒粗化趋势。

(2)  $\text{Al}_4\text{C}_3$ 和TiC粒子在合金凝固过程中起异质形核核心作用;Sr和Ti则作为“表面活性元素”,在合金凝固过程中富集在固-液界面前沿,降低溶质原子的扩散速度,并抑制晶粒长大,从而细化 $\alpha$ 相和变质 $\beta$ 相。

(3) Al-5Ti-0.25C-8Sr中间合金对AM60B抗拉强度和显微硬度的影响均呈现先升高后降低的趋势,当加入质量分数为0.1%的中间合金时抗拉强度和显微硬度达到最大值。AM60B抗拉强度

的变化趋势与合金晶粒细化及 $\beta$ 相大小、形貌和分布的变化是密不可分的。

## 参考文献:

- [1] 卢斌峰,许春香,张金山,等. Al-Ti-C中间合金对纯镁的细化效果研究[J]. 铸造设备研究,2007,(1): 26-31.
- [2] 冀亚森,李亚维,何源,等. Al-Ti-C对AZ91D合金显微组织影响[J]. 热加工工艺,2009,38(9):49-51.
- [3] 柳延辉,刘相法,李延斌,等. Al-Ti-C中间合金对Mg-Al合金的晶粒细化作用[J]. 中国有色金属学报,2003,13(3):622-626.
- [4] ZHAO Hong-liang, WANG Jun, SONG Yong, et al. Microstructure and synthesis mechanism of Al-Ti-C-Sr master alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2010,20(5):751-756.
- [5] DU Jun, YANG Jian, KUWABARA M, et al. Effect of strontium on the grain refining efficiency of Mg-3Al alloy refined by carbon inoculation[J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,470:228-232.
- [6] 贺峰,李建平,杨忠,等. 铸态AM60-Ti镁合金的显微组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2008,28(3):227-230.
- [7] 崔红卫,闵光辉,刘俊成. 微量元素Sr对AM60B镁合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2010,39(2):273-276.
- [8] 金鑫焱,李双寿,曾大本,等. Sr对AM60B铸造镁合金晶粒细化的影响[J]. 铸造,2005,54(6):566-569.

## Effect of Al-5Ti-0.25C-8Sr on the As-Cast Microstructures and Properties of AM60B Magnesium Alloy

ZHAO Hong-liang, DUAN Xiao-hui, YU Yang, WENG Kang-rong, KONG Ya-ping

(School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The effect of Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy on the microstructure and mechanical properties of AM60B magnesium alloy was studied. The results show that the Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy exhibited good grain-refining and modification performance. The optimum refinement can be obtained with 0.1% Al-5Ti-0.25C-8Sr addition. The grain size of  $\alpha$ -Mg reduced from 265  $\mu\text{m}$  to 78  $\mu\text{m}$ , and the shape of  $\beta$  phase changed from a continuous or discontinuous form to particulate. When the addition of Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy is above 0.1%, the grains become coarse. With increasing Al-5Ti-0.25C-8Sr master alloy, the tensile strength and microhardness of AM60B magnesium alloy increase and then decrease. The maximum values are obtained at 0.1%.

**Key words:** magnesium alloy AM60B; Al-5Ti-0.25C-8Sr; grain refinement; modification