

微量元素 Sr 对 AM60B 镁合金组织和性能的影响

崔红卫^{1,2}, 闵光辉¹, 刘俊成²

(1. 山东大学 材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

(2. 山东理工大学, 山东 淄博 255049)

摘要: 利用光学显微镜(OM)、场发射扫描电子显微镜(FESEM)、电子万能试验机、数显洛氏硬度计和显微硬度仪研究微量元素 Sr 对镁合金 AM60B 的铸态组织和力学性能的影响。结果表明, 添加微量元素 Sr 可以细化镁合金的晶粒, 而不改变基体 α -Mg 相的枝晶形貌, 但可改变 γ 相的形态和大小, 从连续或断续网状、长条状, 变为卵石状或颗粒状。Sr 对 AM60B 镁合金的抗拉强度和延伸率的影响具有相似的趋势, 即随着 Sr 含量的增加, 合金的抗拉强度和延伸率呈现先升后降的趋势, 当 Sr 含量为 0.05% 时抗拉强度和延伸率分别达到最大值 191.82 MPa 和 4.63%, 而洛氏硬度和显微硬度随着 Sr 含量的增加而增大。AM60B 镁合金断裂方式存在着由解理断裂向准解理断裂再向解理断裂转化的模式。

关键词: 锶; 镁合金; 显微组织; 力学性能; 晶粒细化

中图分类号: TG146.2⁺2; TG292

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0273-04

Mg-Al 系列镁合金因兼有价格低、良好的铸造和力学等性能, 是目前应用最广泛的镁合金之一。与 AZ91 镁合金相比, AM60 合金由于含 Al 量较低, 使合金中含 Al 的二次化合物相的析出量有所减少, 所以该合金的塑性和韧性较高, 但强度有所降低。据报道^[1-10], 在 Mg-Al 合金中添加合金元素 Sr 能细化合金晶粒, 减少显微缩松, 并提高合金的力学性能。文献[10]研究了合金元素 Sr 能够显著减小 AM60B 镁合金的晶粒尺寸, 但未涉及 Sr 对 AM60B 镁合金性能的影响。本实验的目的就是研究微量元素 Sr 对 AM60B 镁合金的微观组织和力学性能的影响, 为扩大镁合金的应用提供一定的借鉴和指导作用。

1 实验

实验原料为南京云海特种金属有限公司生产的 AM60B 合金铸锭和 Al-10Sr 中间合金, Sr 的添加量(质量分数, 下同)分别为 0, 0.01%, 0.02%, 0.05%, 0.10% 和 0.15%。

合金在配有 PID 温控系统的 SG2-3-12 型坩埚电阻炉中熔化, 在熔炼过程中, 使用高纯 Ar 气防止镁合金的氧化燃烧, 720 °C 时浇入预热至 200 °C 的钢模具中。浇注的试棒经机加工后在 WDW1020 型微机控制电子万能试验机上进行力学性能测试, 拉伸速度为 1 mm/min。洛氏硬度和显微硬度分别采用数显洛氏硬度计 HRS-150 和 HV-1000 显微硬度仪进行测定。

从拉伸试棒夹头部位取样进行分析, 试样经过镶嵌、磨平、抛光后浸蚀, 浸蚀剂为 3% 草酸溶液。浸蚀后用蒸馏水冲洗干净, 再用吹风机吹干。显微组织、试样拉伸断口形貌采用光学显微镜(OM)和荷兰 FEI 公司 Sirion 200 场发射扫描电子显微镜(FESEM)进行观察。

2 结果及分析

2.1 显微组织

根据 Mg-Al 二元相图, AM60B 合金的典型组织为基体 α -Mg 相+因离异共晶而产生的 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相。图 1 为 AM60B 合金中加入不同含量 Sr 前后初生相 α -Mg 的形貌。可以看出, 未添加 Sr 的 AM60B 的初生相 α -Mg 为典型的粗大树枝晶, 一次枝晶和二次枝晶都比较粗大(图 1a)。在添加微量 Sr 后, 初生相形态发生了明显的变化, 树枝状初生相明显变小, 二次枝晶臂也变小(图 1b-图 1f)。特别是当 Sr 加入量达到 0.10% 和 0.15% 时, 晶粒细小且分布均匀, 各个方向的一次枝晶基本相等, 呈等轴晶(图 1e 和图 1f)。这一方面说明 Sr 对 AM60B 具有细化作用, 另一方面说明随着 Sr 含量的增加, α -Mg 相的枝晶形貌由粗大的树枝晶转变为等轴晶。

目前, 由于 Mg-Al 合金很难用常规的金相腐蚀工艺腐蚀出 α -Mg 树枝晶, 本实验采用拉伸断口来研究 Mg-Al 合金中 α -Mg 树枝晶的大小与形态, 定性地判断 Mg-Al 合金中 α -Mg 树枝晶大小随不同 Sr 含量的演

收稿日期: 2009-03-25

作者简介: 崔红卫, 男, 1971 年生, 博士生, 讲师, 山东大学材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室, 山东 济南 250061, 电话: 0531-88395639, E-mail: mostnewmaterials@yahoo.com.cn

变规律。图 2 为 AM60B 合金中 α -Mg 树枝晶大小与形态随不同 Sr 含量的演变规律。可以看出，不同 Sr 含量对 AM60B 镁合金中 α -Mg 树枝晶大小与形态的影响与图 1 中一致，特别是当 Sr 含量为 0.10% 和 0.15% 时， α -Mg 树枝晶明显变小(图 2c 和图 2d)。需注意的是图 2d 中的放大倍数为 1000 倍，比其它照片的放大倍数更大。为了分析 Sr 对 AM60B 镁合金中 γ 相形态和大小的影响，对试样进行扫描电镜(FESEM)观察，结果见图 3。可以看出，未添加 Sr 时， γ 相呈现连续或断续网状、长条状、颗粒状(图 3a)。添加 0.01% Sr 后， γ 相的连续性减小，颗粒状或卵石状增多(图 3b)。添加 0.05% Sr 后，连续状 γ 相基本消失， γ 相多呈卵石状或颗粒状，且分布均匀(图 3c)。当添加 0.10% Sr 后， γ 相变得更加细小且均匀(图 3d)。这说明合金元素 Sr 可以改变 AM60B 镁合金中 γ 相的形态，随着 Sr 含量的增加，从连续或断续网状、长条状，改变为卵石状或颗粒状，这将对合金的力学性能有利。

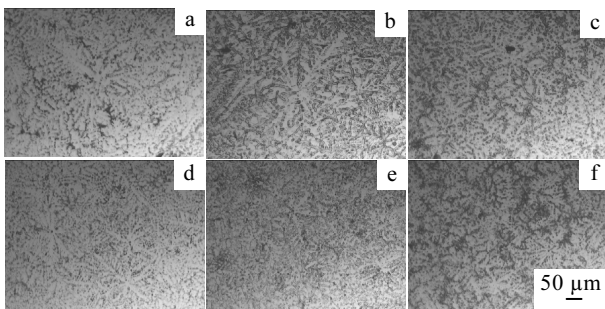


图 1 不同 Sr 含量 AM60B 合金的金相组织

Fig.1 Optical microstructures of AM60B magnesium alloy with different Sr contents: (a) 0%, (b) 0.01%, (c) 0.02%, (d) 0.05%, (e) 0.10%, and (f) 0.15%

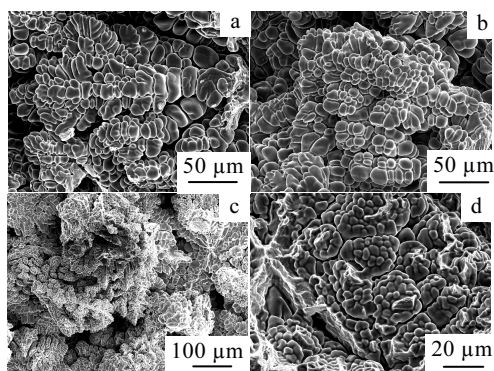


图 2 不同 Sr 含量 AM60B 镁合金的 α -Mg 树枝晶 FESEM 照片

Fig.2 FESEM images of α -Mg dendrites of AM60B magnesium alloy with different Sr contents: (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.10%, and (d) 0.15%

根据体姆-罗塞利经验规律，当原子半径差的相对值大于 15% 时，只能形成固溶度很小的固溶体，由于 Sr 的原子半径为 0.245 nm，Mg 的原子半径为 0.172 nm，两者的原子半径差相对值为 42.4%，远大于 15%，因此 Sr 在镁中的溶解度很小，是所谓的“表面活性元素”。Sr 的原子体积大于 Mg 的原子体积，由于它的存在使 Mg 的晶格歪曲畸变，使势能增加。但是，系统总是向着减小自由能的方向自发进行，因而这些体积较大的 Sr 原子总是倾向于被排挤到镁合金液表面，在表面富集，使整个系统的表面张力降低^[11]。Sr 作为“表面活性元素”，在生长的固-液界面前沿形成含 Sr 的吸附膜，导致晶粒生长速率的降低。低的生长速率使得熔体有更充足的时间产生更多的晶核，最终使晶粒细化^[2]。而 γ 相形态和大小的改变，主要是因 Sr 的添加导致初生 α 相的细化，晶粒细化过程减小了位于晶粒间的高溶质含量熔体的体积，增加了晶界的数量，从而使凝固的最后阶段达到共晶成分的液相分布比较均匀，单位晶界面积上的共晶相较少^[12]。

2.2 力学性能

图 4 为 Sr 含量对 AM60B 镁合金抗拉强度和延伸率的影响。从图 4 可看出，Sr 对 AM60B 镁合金的抗拉强度和延伸率的影响具有相似的趋势，即随着 Sr 含量的增加，合金的抗拉强度和延伸率呈现先升后降的趋势。当 Sr 含量为 0.05% 时抗拉强度和延伸率分别达到最大值 191.82 MPa 和 4.63%，比未添加 Sr 时分别增大 29.5% 和 41.2%。当 Sr 含量又增加时，合金的强度和延伸率下降，也就是说 AM60B 镁合金的抗拉强度和延伸率的最大值不是出现在晶粒尺寸最细小的 Sr 含量为 0.15% 处。这种现象与 Sr 对 AM60B 镁合金的组织 and 晶粒大小的影响有关，因为合金的力学性能不仅取决于晶粒大小，还取决于第二相形态和大小以及合金是否

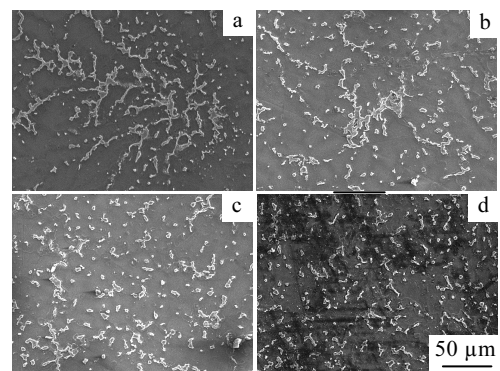


图 3 不同 Sr 含量 AM60B 镁合金的 FESEM 照片

Fig.3 FESEM images of AM60B with different Sr contents: (a) 0%, (b) 0.01%, (c) 0.05%, and (d) 0.10%

存在缺陷等多种因素。随着 Sr 含量的增加，AM60B 镁合金的晶粒得到细化， γ 相的形态和大小得到改善，这都有利于合金力学性能的提高。但是当 Sr 含量超过 0.05% 时，合金中出现缺陷，特别是当 Sr 含量为 0.15% 时，合金中出现明显的缩松缺陷(图 5)，而强度和延伸率是对缺陷非常敏感的，缺陷的存在将大大降低合金的力学性能。所以尽管当 Sr 含量为 0.15% 时晶粒尺寸细小， γ 相的形态和大小也非常有利于力学性能的提高，但是最终的抗拉强度和延伸率并不高。

图 6 为 Sr 含量的变化对 AM60B 镁合金的洛氏硬度和显微硬度的影响。可以看出，Sr 含量对 AM60B 镁合金的洛氏硬度和显微硬度的影响具有基本相似的趋势，即随着 Sr 含量的增加，AM60B 的洛氏硬度和显微硬度值逐渐增大，0.05%Sr 时达到较大值，Sr 含量再增加，洛氏硬度和显微硬度值继续增加，但增加趋势变缓。

从上面的分析可看出，AM60B 合金中添加微量 Sr 就可以明显改善镁合金的力学性能，而成本增加很少，这将在市场竞争中非常有利。

2.3 拉伸断口形貌

图 7 为不同 Sr 含量 AM60B 镁合金拉伸断口的 FESEM 照片。可以看出，不含 Sr 的合金拉伸断口比较齐平，存在解理台阶(图 7a)，这说明 AM60B 镁合金的断裂方式为解理断裂，这是由于 Mg 属于密排六方晶系，滑移面、滑移系较少，塑性变形程度小所导致。随着 Sr 含量的增加，AM60B 镁合金断口中除了存在解理面和解理台阶外，还存在一些撕裂棱和韧窝(图 7b 和 7c)，这种断裂方式为准解理断裂，特别是 Sr 含量为 0.05% 时，断口上撕裂棱和韧窝数量较多(图 7c)。当 Sr 含量为 0.15% 时拉伸断口又比较齐平，存在解理台阶(图 7d)，其断裂方式为解理断裂。这说明随着 Sr 含量的添加，AM60B 镁合金的断裂方式由解理断裂向准解理断裂，再向解理断裂方式转变。

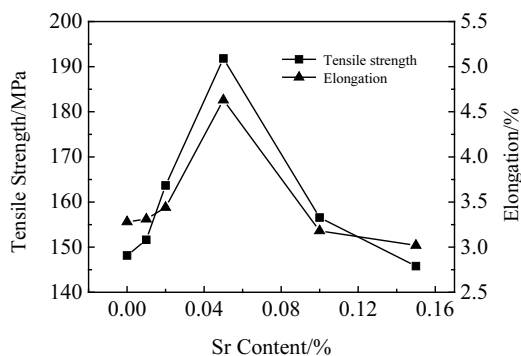


图 4 不同 Sr 含量对 AM60B 镁合金的抗拉强度和延伸率的影响
Fig.4 Effects of different Sr contents on tensile strength and elongation of AM60B magnesium alloy

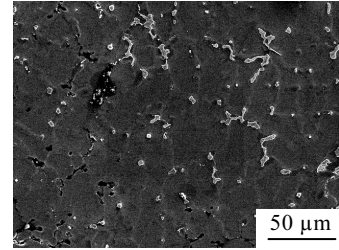


图 5 AM60B+0.15%Sr 镁合金中显微缩松缺陷

Fig.5 Microshrinkage defects in AM60B+0.15%Sr magnesium alloy

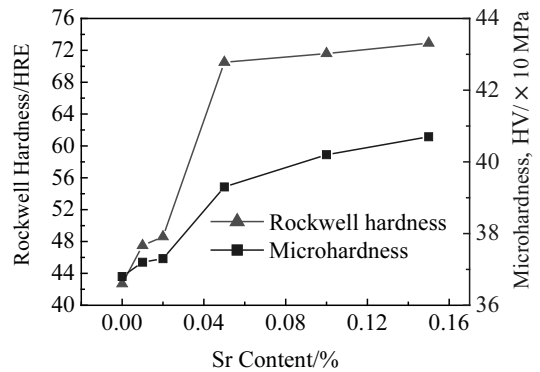


图 6 不同 Sr 含量对 AM60B 镁合金洛氏硬度和显微硬度的影响

Fig.6 Effects of different Sr contents on Rockwell hardness and microhardness of AM60B magnesium alloy

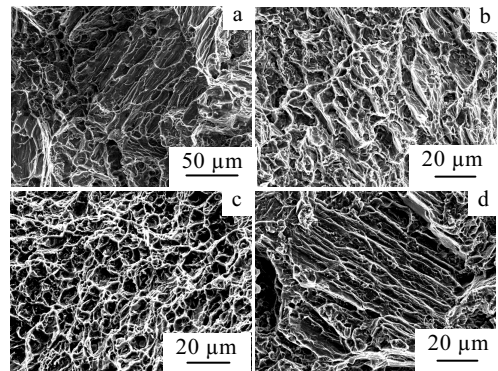


图 7 不同 Sr 含量 AM60B 镁合金的拉伸断口 FESEM 照片

Fig.7 Tensile fracture FESEM images of AM60B magnesium alloy with different Sr contents: (a) 0%Sr, (b) 0.01%Sr, (c) 0.05%Sr, and (d) 0.15%Sr

3 结 论

1) 添加微量元素 Sr 可以细化镁合金的晶粒，而不改变基体 α -Mg 相的枝晶形貌，但可改变 γ 相的形态和大小。

2) Sr 对 AM60B 镁合金的抗拉强度和延伸率的影响具有相似的趋势,即随着 Sr 含量的增加,合金的抗拉强度和延伸率呈现先升后降的趋势,而硬度随着 Sr 含量的增加而增大。

3) AM60B 镁合金断裂机制存在着由解理断裂向准解理断裂再向解理断裂转化的模式。

参考文献 References

- [1] Liu Shengfa(刘生发) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(6): 970
- [2] T Aliravci C A *et al. AFS Transactions*[J], 1992, 115: 353
- [3] Lee Y C *et al. Metallurgical and Materials Transaction A*[J], 2000, 31(11): 2895
- [4] Xu Songbing(徐宋兵) *et al. Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术) [J], 2005, 33 (10): 29
- [5] Zheng Feiyan(郑飞燕) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2006, 26(11): 745
- [6] Pan Yichuan *et al. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*[J], 2007, 22(1): 74
- [7] Yang Mingbo(杨明波) *et al. Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition)* (重庆工学院学报自然科学版)[J], 2007, 27(3): 10
- [8] Cui Hongwei(崔红卫) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2007, 27(12): 968
- [9] Yang Mingbo(杨明波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(3): 413
- [10] Jin Xinyan(金鑫焱) *et al. Foundry*(铸造)[J], 2005, 54(6): 566
- [11] An Geying(安阁英). *Casting Forming Theory*(铸件成形理论) [M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 22
- [12] Gong Liqin(龚丽勤) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(12): 2003

Effect of Trace Element Sr on Microstructure and Properties of AM60B Magnesium Alloy

Cui Hongwei^{1,2}, Min Guanghui¹, Liu Juncheng²

(1. Key Laboratory of Liquid Structure and Heredity of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

(2. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Effects of trace element Sr on the as-cast microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AM60B were studied by optical microscope (OM), field emission scanning electron microscopy (FESEM), electronic universal testing machine, digital display Rockwell hardness tester and microhardness tester. The results show that the addition of trace element Sr can refine grains without change of dendrite morphology of matrix α -Mg phase, but can change the morphology and size of γ -Mg₁₇Al₁₂ phase from continuous/discontinuous netlike or strip form to cobble or particulate form. The effect of Sr on the tensile strength and elongation of AM60B magnesium alloy has the similar tendency, i.e. with the increase of Sr content, the tensile strength and elongation of AM60B magnesium alloy are first increased and then decreased. With addition of 0.05% Sr, the tensile strength and elongation reach the maximum 191.82 MPa and 4.63%, respectively, while the Rockwell hardness and microhardness are increased with the increase of Sr content. The fracture mechanism of AM60B magnesium alloy is changed from cleavage fracture to quasi-cleavage fracture to cleavage fracture.

Key words: strontium; magnesium alloy; microstructure; mechanical properties; grain refinement

Corresponding author: Cui Hongwei, Candidate for Ph. D., Lecturer, Key Laboratory of Liquid Structure and Heredity of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China, Tel: 0086-531-88395639, E-mail: mostnewmaterials@yahoo.com.cn