

Si 对原位自生 Mg₂Si/AM60 复合材料组织及性能的影响

胡 勇, 闫 洪, 陈国香, 梅楹煜

(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘 要: 采用原位合成技术制备 Mg₂Si/AM60 复合材料, 研究不同 Si 含量对其组织及性能的影响。结果表明: 镁合金中加入结晶 Si 后, 出现短棒状及中国汉字状的 Mg₂Si 相; 当 Si 含量较高时, 中国汉字状的 Mg₂Si 相消失, 变成不规则的块状。制备过程中对复合材料进行机械搅拌, Mg₂Si 相的分布较未搅拌更加均匀、弥散。复合材料的抗拉强度、硬度随 Si 含量的增加呈上升趋势, 延伸率则下降。当 Si 量为 1.0%(质量分数, 下同)时, 强度较基体提高 12%, 含量为 5% 时, 硬度较基体提高 48.6%。

关键词: 原位自生; Mg₂Si; 复合材料; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0343-05

镁及镁合金具有比强度高、比刚度高, 减振性、电磁屏蔽和抗辐射能力强, 易切削加工, 易回收等一系列优点, 在汽车、电子、电器、交通、航空航天和国防军事工业领域具有极其重要的应用价值和广阔的前景, 是继钢铁和铝合金之后发展起来的第 3 类金属结构材料, 并称之为 21 世纪的绿色工程材料。但是, 镁合金的综合力学性能较低, 制约了其广泛应用。复合材料为解决这一缺陷提供了良好的途径。按增强体的加入方法, 复合材料的制备可分为外加复合法和原位生成法。长期以来, 对复合材料制备工艺的研究一直侧重于传统的外加增强体与基体复合的方法, 如粉末冶金、挤压铸造或液态搅拌法等。这类方法不仅工艺复杂, 成本较高, 而且存在增强体与基体之间相容性较差, 结合不良等问题。与外加增强体复合复合材料相比, 由于原位生成法的增强相在基体内反应生成, 具有尺寸小、界面洁净无污染、热稳定性好、与基体相容性好、制备成本低等优点, 已成为金属基复合材料中的一个重要发展方向^[1]。Mg₂Si 具有低密度(1990 kg/m³)、高熔点(1087 °C)、高硬度(Hv 为 4600 MPa)、高强度($\sigma_b=1670$ MPa)、高弹性模量(120 GPa)和低热膨胀系数($7.5 \times 10^{-6}/K$)等优点^[2-4], 是镁基复合材料的理想增强相。

本实验以 Si 作为反应添加物, 制备 Mg₂Si/AM60 复合材料, 研究 Si 含量对复合材料组织及性能的影响。

1 实验方法

实验材料为 AM60 合金及结晶 Si。首先在电阻炉中将 AM60 合金熔化, 并用自制覆盖剂及 Ar 气对熔体进行保护, 以防止镁合金的氧化燃烧。温度达到 800 °C 时保温, 用钟罩将包于铝箔中的结晶 Si 粉末压入熔体当中, 为使结晶 Si 充分溶解和成分分布均匀, 反应 15 min 后对熔体搅拌 5~10 min, 再保温 30 min, 当温度降至 700 °C 时, 将合金液浇入金属模中。

从试样的相同部位截取金相试样, 用 5% 硝酸乙醇溶液腐蚀, 采用光学显微镜(OM)和带能谱分析的扫描电镜(SEM)对试样进行金相组织形貌观察。用多功能 X 射线衍射(XRD)仪对试样进行物象分析, 试验条件为: Cu K α 线, 电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 扫描速度为 6°/min。用 HBE-3000A 型布氏硬度计测量硬度。拉伸试验在电子万能试验机上进行。

2 结果与分析

2.1 AM60 合金中加 Si 后的铸态组织特征

为确定合金中是否生成 Mg₂Si 相, 对比了 AM60 和 AM60+Si 合金的 XRD 谱, 其结果如图 1 所示。由图 1 可知: AM60 合金的 XRD 谱由 α -Mg 基体和 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的峰组成; 而 AM60+Si 合金 XRD 谱除

收到初稿日期: 2008-01-25; 收到修改稿日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(50465003, 50765005); 江西省科技厅和江西省教育厅资助项目

作者简介: 胡 勇, 男, 1982 年生, 博士生, 南昌大学先进成形制造及模具研究所, 江西 南昌 330031, 电话: 0791-3969633, E-mail: huyong2136@163.com

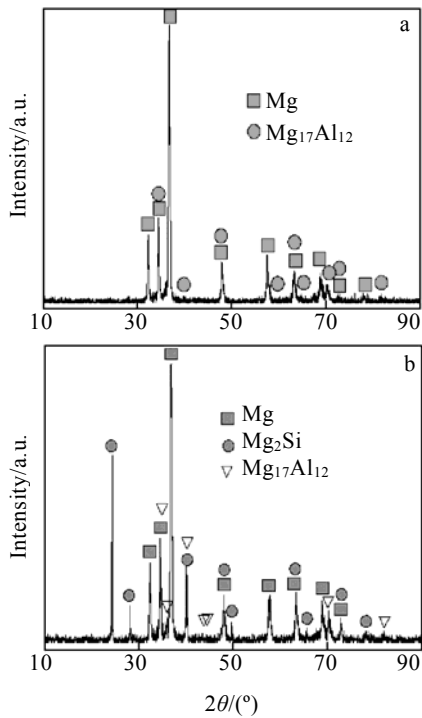


图 1 合金的 X 射线衍射图谱

Fig.1 The XRD results of (a)AM60 and (b) AM60+Si

了存在与之相同的 α -Mg 基体和 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的峰外, 还存在 Mg₂Si 相的峰。由此可推断, 加入 Si 后, AM60 合金组织中原位生成了 Mg₂Si 颗粒。

图 2 为复合材料的显微组织及第二相能谱分析结果。从能谱分析结果可知, 图 2a 中 1 点处黑色颗粒的成分为 Mg 和 Si 及少量 Al(图 2b), 结合图 1 XRD 的分析结果可知, AM60 合金中的中国汉字状增强颗粒即为 Mg₂Si。

2.2 Si 对复合材料组织的影响

根据 Mg-Si 二元相图^[4], Si 在镁基体中几乎不固溶, 其固溶度仅为 0.003%。因此, Si 可与镁几乎完全生成 Mg₂Si 相。图 3 为不同 Si 含量的 AM60 复合材料微观组织。由图 3a 可看出, AM60 合金铸态组织为典型的枝晶组织, 由白色初生 α -Mg 及不连续呈网状分布的 β -Mg₁₇Al₁₂ 组成。向 AM60 合金中添加一定量的 Si 后, 发现组织中出现了中国汉字状及块状和树枝状的 Mg₂Si 相。当 Si 含量为 0.5% 时, Mg₂Si 相为短棒状及细小的中国汉字状(图 3b)。当 Si 含量为 1.0% 时, 发现中国汉字状的 Mg₂Si 相变多, 且开始出现树枝状(图 3c)。当 Si 含量为 1.5% 时, 除了有中国汉字状的 Mg₂Si 相外, 还出现了较多树枝状及块状的 Mg₂Si 相(图 3d)。进一步加大 Si 的含量时, 中国汉字状的 Mg₂Si 相消失, 只有板块状和粗大的树枝状 Mg₂Si 相存在(图 3e)。

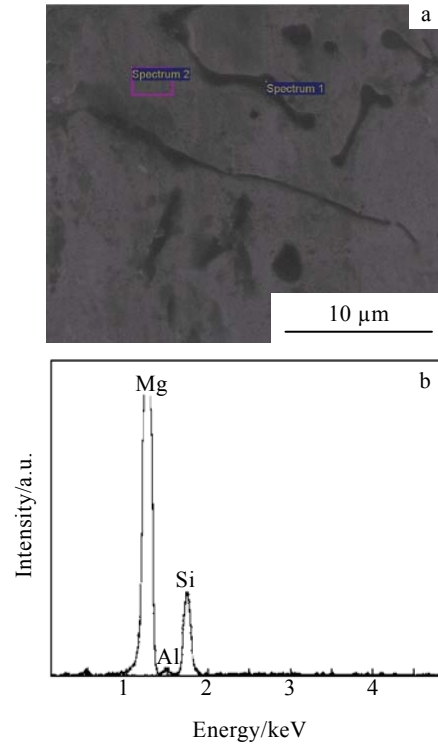


图 2 复合材料的 SEM 照片(a)及能谱分析结果(b)

Fig.2 SEM morphology of composites (a) and chemical composition of positions by EDAX (b)

对于 Si 含量较高时 Mg₂Si 相变得粗大, 根据扩散相变理论, 沉淀颗粒的粗化速率与溶质原子的浓度有关, 溶质浓度越高, 颗粒的粗化速率也越高。因此, 加入过多的结晶 Si 后会使得 Mg₂Si 聚集长大而粗化。

图 4 为对含 Si 量 5% 的复合材料进行机械搅拌与未进行机械搅拌的显微组织。可看出, 未进行搅拌的组织中 Mg₂Si 相偏聚严重, 分布不均匀(图 4a)。而搅拌后的组织中, Mg₂Si 相则弥散地分布在基体中(图 4b)。这是因为搅拌作用促使 Si 在熔体中分布均匀, 改善了反应条件, 反应更加充分。而且搅拌加强熔体的对流, 使 Mg₂Si 相分布更均匀。

2.3 Si 对复合材料力学性能的影响

图 5 为不同 Si 含量对复合材料力学性能的影响。由图可看出, 复合材料的抗拉强度、硬度随 Si 含量的增加呈上升趋势, 延伸率则下降。未加 Si 时, 材料的抗拉强度为 176.3 MPa, 当 Si 含量为 1.0% 时, 其抗拉强度为 197.5 MPa, 提高 12%。但是进一步提高 Si 含量, 其强度开始下降(图 5a)。随 Si 的增加, 硬度明显提高, 基体 AM60 的硬度其 HB 为 459 MPa, 当 Si 含量为 5% 时, HB 达到 682 MPa, 提高幅度达 48.6%。

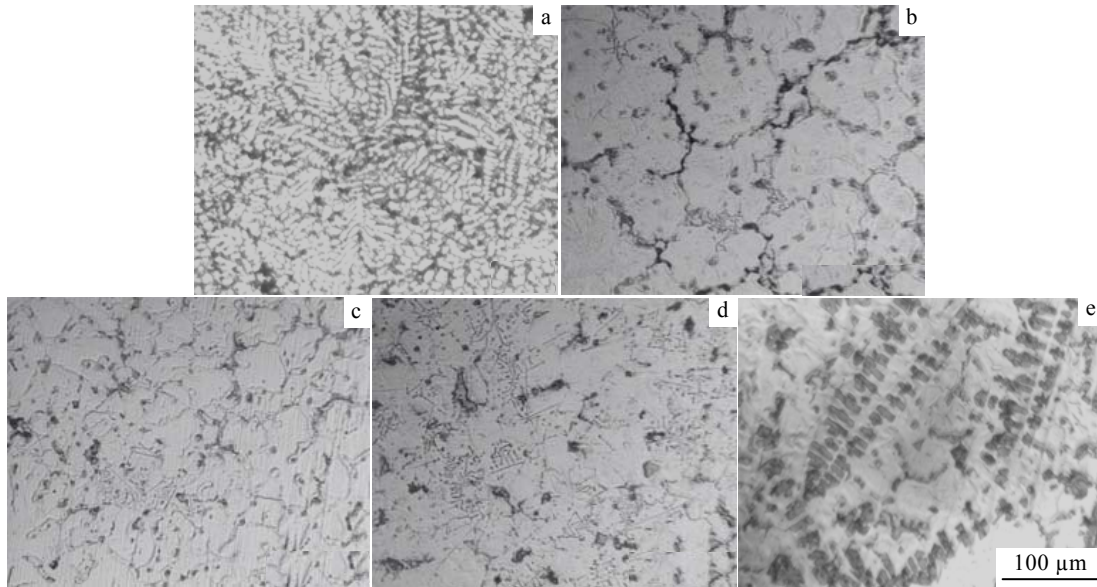


图 3 不同 Si 加入量的复合材料显微组织

Fig.3 The microstructures of composites by different Si additions: (a) 0%; (b) 0.5%; (c) 1.0%; (d) 1.5%; and (e) 5.0%

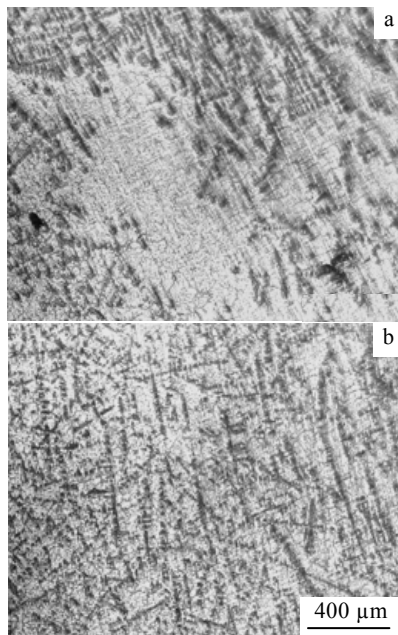


图 4 机械搅拌与未机械搅拌的复合材料的显微组织

Fig.4 Effects of mechanical stirring on the microstructures of composites: (a) no stirring and (b) stirring

由于点阵常数和晶体结构的不同, 镁基体与增强相 Mg₂Si 之间的界面不可能完全一致^[21]。因此, Mg₂Si/AM60 复合材料强度的提高可用以下机制来解

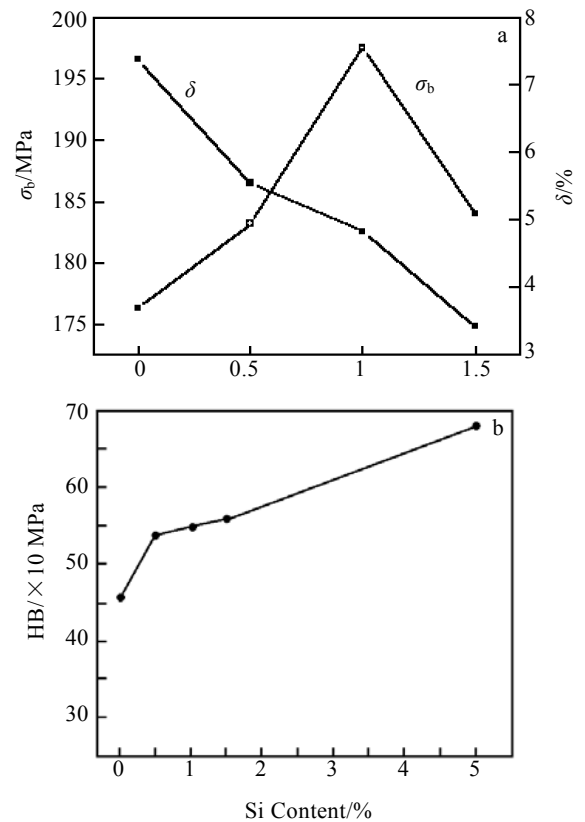


图 5 Si 含量对复合材料力学性能的影响

Fig.5 Effects of Si content on the mechanical properties of composites: (a) σ_b, δ and (b) HB

释:(1)增强颗粒 Mg_2Si 与基体之间热膨胀系数的差异,导致 Mg_2Si 相周围产生较高密度的位错区,从而提高了位错运动的摩擦阻力,使强度增加;(2)材料当中弥散分布的第二相粒子可急剧阻碍位错运动^[5],对相邻晶粒起到钉扎作用,从而提高合金的强度;(3)载荷传递作用,由于 Mg_2Si 相与基体结合良好,因此在拉伸过程中,应力将从较软的基体传递到较硬的增强相上,由于二次硬相 Mg_2Si 的强度较基体高得多,对较软的基体起到保护作用,从而提高了强度;(4)合金的晶粒细化作用。 Si 的加入,对晶体尺寸有一定的细化作用,根据 Hall-Petch 公式^[6,7],屈服强度与晶粒尺寸的关系可表示为:

$$D_s = Kd^{-1/2}$$

式中: D_s 为材料的屈服强度增量; K 为常数(对于 Mg , $K=0.28 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$); d 为晶粒的平均尺寸。由此可见,减小晶粒尺寸将使材料的屈服强度提高。同时,晶粒尺寸的减小意味着晶界的增加,而晶界是晶粒位错运动的阻碍,从而可提高合金的强度。

当结晶 Si 的含量高于 1.0%之后,材料的综合性能开始下降。这是由于 Si 含量过多时,颗粒聚集长大,尺寸较大的增强颗粒产生的应力集中也大,并且会割裂基体,受载时越容易产生晶间裂纹,使得性能下降^[8]。材料的延伸率随着 Si 含量的提高而逐渐下降,这是由于生成的脆性增强相 Mg_2Si 提高了材料的硬度,在拉伸过程中,阻碍位错运动,进一步强化基体,使材料的塑性下降。

2.4 断口分析

图 6 为 AM60 合金和 $Mg_2Si/AM60$ 复合材料拉伸断口扫描电镜照片。从图 6a 可以清楚地看出: AM60 合金的拉伸断口是以解理断裂为主的脆性断裂,拉伸断口较为平直;断口上还存在穿晶断裂(如图 6a 中箭头 A 所指)和沿晶断裂(如图 6a 中箭头 B 所指)。 $Mg_2Si/AM60$ 复合材料的拉伸断裂方式也属于脆性断裂(如图 6b 所示),断裂发生在 Mg 基体与 Mg_2Si 的界面处(如图 6b 中箭头 C 所指),界面开裂引起基体和增强体的分离。

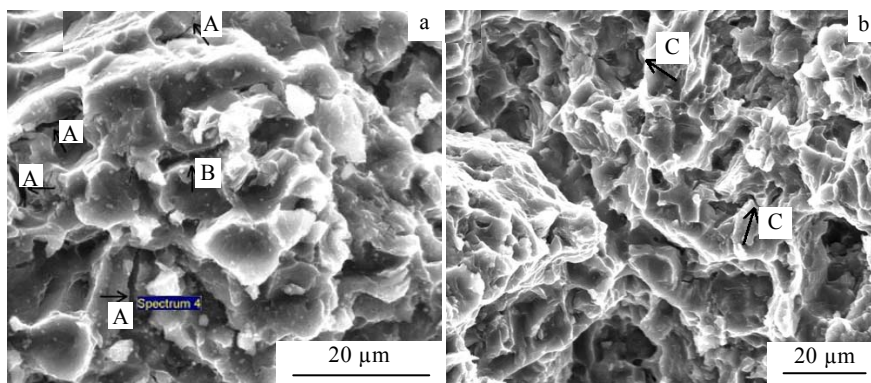


图 6 AM60 合金(a)和 $Mg_2Si/AM60$ 复合材料(b)拉伸断口形貌

Fig.6 SEM photos showing the fracture surfaces of AM60 alloy (a) and $Mg_2Si/AM60$ composites (b)

3 结 论

1) 镁合金中加入结晶 Si 后,出现短棒状及中国汉字状的 Mg_2Si 相,当 Si 含量较大时,中国汉字状的 Mg_2Si 相消失,变成不规则的块状。制备过程中对复合材料进行机械搅拌, Mg_2Si 相的分布较未搅拌更加均匀、弥散。

2) 复合材料的抗拉强度、硬度随 Si 含量的增加呈上升趋势,延伸率则下降。当 Si 量为 1.0%时,强度较基体提高 12%,含量为 5%时,硬度较基体提高 48.6%。

参考文献 References

[1] Chen Liqing(陈礼清), Guo Jinhua(郭金花), Wang Jijie(王继杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(1): 29
 [2] Mabuchi M, Higashi K. *Acta Mater*[J], 1996, 44(11): 4611
 [3] Yuan G Y, Liu Z L, Wang Q D *et al. Materials Letters*[J], 2002, 56: 53
 [4] Zhang Jinshan(张金山), Gao Yibin(高义斌), Pei Lihua(裴利霞) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2006, 16(8): 1361
 [5] Song Haining(宋海宁), Yuan Guangyin(袁广银), Wang Qudong(王渠东) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2002, 12(5): 956
 [6] Zhao Degang(赵德刚), Liu Xiangfa(刘相法), Bian Xiufang(边

- 秀房) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(10): 1723
- [7] Weijie Lu, Di Zhang, Xiaonong Zhang *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2001, 36: 3707
- [8] Zhang Chunxiang(张春香), Guan Shaokang(关绍康), Chen Haijun(陈海军) *et al.* *Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料)[J], 2004, 28(9): 19

Effects of Si on Microstructure and Properties of *in Situ* Synthesized Mg₂Si/AM60 Composites

Hu Yong, Yan Hong, Chen Guoxiang, Mei Yingyu

(Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Mg₂Si/AM60 composites were fabricated by *in situ* synthesis, and their microstructures and properties were investigated for the composites adding different Si contents. The results indicate that some fine Mg₂Si particles of cosh shape and chinese script shape appeared in the microstructure by adding crystal Si, but were changed to irregular bulks when the content of Si is high. The composites with more homogeneous distribution of Mg₂Si particles were produced by mechanical stirring. The ultimate tensile strength and hardness of composites were increased with the increase of Si, but the elongation was reduced. The ultimate tensile strength increased by 12 % for 1.0 % Si addition and the hardness increased by 48.6 % for 5 % Si addition.

Key words: *in situ* synthesized; Mg₂Si; composites; microstructure; mechanical properties

Biography: Hu Yong, Candidate for Ph. D., Institute of Advanced Forming & Manufacturing and Die & Mold, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, Tel: 0086-791-3969633, E-mail: huyong2136@163.com