

超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金组织及力学性能的影响

付浩¹ 吴红燕¹ 曹炳鑫¹ 徐超¹ 周全² 张连腾²

(1.九江职业技术学院工程训练中心; 2.南昌航空大学航空制造工程学院)

摘要 研究了超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金凝固组织及力学性能的影响。结果表明,通过控制超声工艺参数可改善 Mg-9Al-3Si 合金凝固组织,提高其力学性能的目的。在超声功率为 0~900 W 时,随着超声功率增大,合金中的 Mg₂Si 相逐渐细化,其抗拉强度先增后减,转折点为 700 W。在超声处理时间为 0~90 s 时,随着超声处理时间延长,合金中的 Mg₂Si 相逐渐细化,其抗拉强度先增后减,转折点为 60 s。分析其断口发现,未经超声处理的合金断裂形式为解理断裂,经过超声处理的合金断口解理台阶尺寸减小,呈准解理断裂特征。

关键词 Mg-Al-Si 合金; 超声处理; 凝固组织; 力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Ultrasonic Treatment on Solidification Structure and Mechanical Properties of Mg-9Al-3Si Alloy

Fu Hao¹, Wu Hongyan¹, Cao Bingxin¹, Xu Chao¹, Zhou Quan², Zhang Lianteng²

(1.Engineering Training Center, Jiujiang Vocational and Technical College;

2.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of ultrasonic power and treatment time on the solidification structure and mechanical properties of Mg-9Al-3Si alloy were investigated. The results reveal that refinement of the structure and improvement of the mechanical properties of the alloy can be achieved by controlling the ultrasonic parameters. In the range of 0~900 W, with the increase of ultrasonic power, the Mg₂Si phase in the alloy is gradually refined, and its tensile strength is increased firstly and then decreased, where the turning point is 700 W. In the range of 0~90 s, with the increase of ultrasonic treatment time, the Mg₂Si phase in the alloy is gradually refined, and its tensile strength is increased firstly and then decreased, and the turning point is 60 s. The fracture morphology of Mg-9Al-3Si alloy without ultrasonic treatment presents cleavage fracture, while the size of cleavage step of Mg-9Al-3Si alloy is decreased after ultrasonic treatment, characterized by quasi-cleavage fracture.

Key Words: Mg-Al-Si Alloy, Ultrasonic Treatment, Solidified Structure, Mechanical Properties

镁合金具有低密度,良好的比强度、电磁屏蔽性和减震性等特点,广泛应用于交通运输、航空、移动通信、电子封装、高能贮氢等领域^[1]。Mg₂Si 在镁合金中不易溶解和长大,且具有高熔点、低热膨胀性、高硬度和高弹性模量等特点,是镁合金中较为理想的增强相^[2]。但是,普通重力铸造所析出的 Mg₂Si 相,常为粗大的汉字状或发达的枝晶状,会严重破坏基体,使合金的性能变差,而均匀分散的球状 Mg₂Si 相能提高镁合金的力学性能^[3]。

Mg₂Si 相的细化方法主要分为物理细化、变质细化以及对 Si 含量和尺寸的控制。物理细化可以在不添加

其他元素的前提下细化 Mg₂Si 相。物理细化方法主要有电磁搅拌法、快速凝固法、挤压加工法和超声波处理法等^[4~6]。有关电磁搅拌、快速凝固及挤压加工细化镁合金中的 Mg₂Si 相的研究较多,但是超声波处理细化 Mg₂Si 相的报道较少。

张黎等^[7]研究了不同超声功率和作用时间对 ZA27 合金组织和力学性能的影响,发现在 520 ℃保温时,随着超声功率或超声处理时间的增加,其初生相均先细化后粗化。李正生等^[8]研究了超声熔体处理对 AZ91D-3Ca 镁合金凝固组织的影响及工艺优化,发现超声处理对于 AZ91D-3Ca 镁合金凝固组织的晶粒大小

收稿日期:2020-07-24;修改稿收到日期:2020-08-27
基金项目:江西省教育厅科技资助项目(GJJ181217)
第一作者简介:付浩,男,1986 年出生,讲师,江西九江(332007),E-mail:2238979709@qq.com
引用格式:付浩,吴红燕,曹炳鑫,等. 超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):73-77.
FU H, WU H Y, CAO B X, et al. Influence of ultrasonic treatment on solidification structure and mechanical properties of Mg-9Al-3Si alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):73-77.

和形貌均有一定的影响,其中施振温度的影响效果大于超声功率及处理时间。廖露亮等^[9]研究了超声处理对 AS31 镁合金凝固组织和力学性能的影响,结果表明,随着超声功率增加,AS31 镁合金晶粒显著细化,组织中共晶 Mg_2Si 相形貌、尺寸和分布明显改善。

本课题研究了超声功率和处理时间对 Mg-9Al-3Si 合金凝固组织和力学性能的影响,对 Mg-Al-Si 系耐热镁合金中初生 Mg_2Si 相的生长机制的研究具有积极意义,同时也为 Mg-Al-Si 合金凝固组织和力学性能的改善提供参考。

1 试验材料与方法

Mg-9Al-3Si 合金由 99.96% (质量分数) 的 Mg 和 Al-25Si 中间合金熔炼制成。超声波搅拌装置主要由超声波发生器、超声波换能器、变幅杆、导入杆组成,见图 1。超声波发生器将 220 V/50 Hz 的市电变成 20 kHz,其输出功率连续可变,最大值为 1 000 W,换能器将高频率的电转变为搅拌的机械能。超声处理采用低碳钢坩埚,其内径为 80 mm,壁厚为 3 mm,高为 120 mm,每次超声处理 300 g 的镁合金熔体。采用的石墨铸型高度为 80 mm,内径为 30 mm,外径为 40 mm。

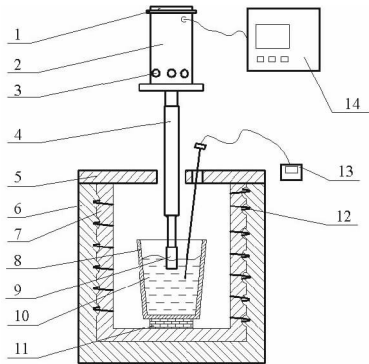


图 1 超声熔体处理工艺装置图

Fig.1 Schematic diagram of melt-treatment apparatus by ultrasonic

1. 风扇 2. 换能器 3. 散热孔 4. 变幅杆 5. 炉盖 6、11. 耐火砖
7. 炉膛 8. 坩埚 9. 导入杆 10. 熔体 12. 电阻丝 13. 热电偶
14. 超声波发生器

首先在电阻式加热炉内放入备有顶盖的坩埚,预热至 600 ℃。将预热干燥好的镁块(1 760 g)、Al-25Si 合金(240 g)放入熔炼炉坩埚中熔炼,温度为 740 ℃。用热电偶对合金熔体进行实时测温,将超声波导入杆插入金属熔体液面以下 10 mm 的位置,根据设定的超声功率和时间分别对降到 660 ℃的熔体进行超声处理,随后浇注到石墨铸型中,在空气中冷却直至完全凝固。

试验分 2 组,第 1 组固定处理温度为 660 ℃,处理时间为 60 s;第 2 组固定功率为 700 W,处理温度为 660

℃,分别研究不同超声功率和处理时间对合金凝固组织及力学性能的影响。试样经切割、粗磨、细磨、机械抛光后采用体积分数为 0.5% 的氢氟酸水溶液腐蚀,在 ZEISS Axio Imager 金相显微镜下观察微观组织,用 S-Viewer 工具软件对试样微观组织进行分析并测量初生 Mg_2Si 相的尺寸;采用相对标准偏差法测量 Mg_2Si 相的分布均匀性,在视场区域将 Mg_2Si 相图片分成 2×4 方格,计算每个微区中包含的 Mg_2Si 相,最后求出各参数下的相对标准偏差 Sr' ^[10]。

$$Sr' = \left[\frac{1}{(N-1)\bar{Z}} \right] \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \tag{1}$$

式中, N 为划分微区个数; Z_i 为第 i 微区包含 Mg_2Si 相的个数; $\bar{Z}$ 为单位微区内 Mg_2Si 相的平均数量。 Sr' 可以有效反映各参数对 Mg_2Si 相在基体中的分布情况的影响。 Sr' 值越小, Mg_2Si 相在基体中分散程度越好;反之,团聚越严重。

通过 WDW-200D 万能材料试验机测试合金试样的抗拉强度和伸长率,拉伸试样见图 2。

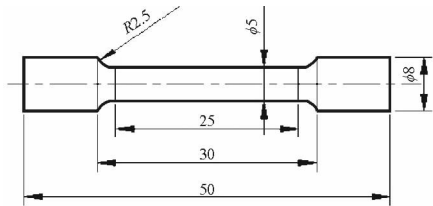


图 2 拉伸试样

Fig.2 Cylindrical tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金铸态组织的影响

图 3 为不同处理方式下合金的 XRD 图谱。可以看出,经 700 W 功率的超声处理后,合金主要由 Mg、 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Mg_2Si 相组成,XRD 谱中的峰与未处理时相比,只是强度不同,无新相生成。由此可知,超声处理只改变合金凝固过程,不会改变相组成。

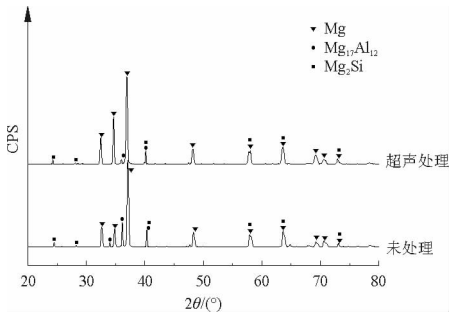


图 3 未处理及超声处理 Mg-9Al-3Si 合金的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of untreated Mg-9Al-3Si alloy or under ultrasonic treatment

2.2 超声功率对合金凝固组织及力学性能的影响

图 4 和图 5 分别为不同超声功率下合金中初生 Mg_2Si 相的分布和形貌。图 6 为不同超声功率对 Mg_2Si 相形貌和直径的影响。可以看出,随着超声功率增加, Sr' 值逐渐增加。未经处理的合金中初生 Mg_2Si

相的形状为不规则的多角形状;经过超声处理后,初生 Mg_2Si 相变为小块状或球状;当功率达到 900 W 时,合金组织还出现条状的 Mg_2Si 相。经过超声处理后的合金, Mg_2Si 相直径减小,可见超声处理可以明显细化初生 Mg_2Si 相。

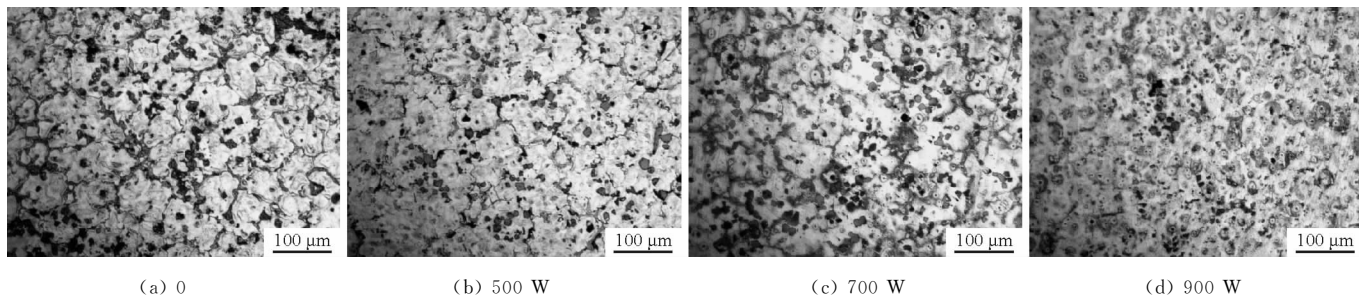


图 4 不同超声功率下 Mg-9Al-3Si 合金中 Mg_2Si 相分布情况

Fig.4 Distribution of Mg_2Si phase in the Mg-9Al-3Si alloy at different ultrasonic powers

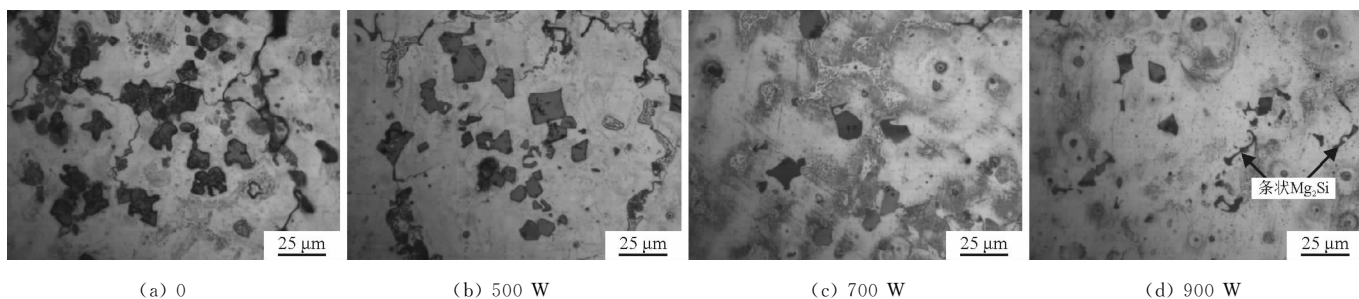


图 5 不同超声功率下 Mg-9Al-3Si 合金中 Mg_2Si 相形貌

Fig.5 Morphology of Mg_2Si phase in the Mg-9Al-3Si alloy at different ultrasonic powers

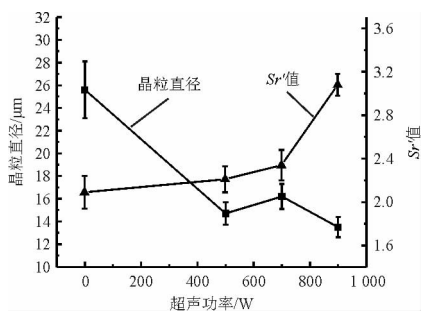


图 6 超声功率对 Mg_2Si 相 Sr' 值和晶粒直径的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic power on Sr' value and grain diameter of Mg_2Si phase

当超声对合金熔体处理时,超声会在熔体中产生空化效应和声流作用。空化泡临界半径与声压关系如下^[10]:

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma}{P_0} R_{\min}^2 - \frac{32}{27} \frac{\sigma^3}{(P_m - P_0)} = 0 \quad (2)$$

式中, $R_{\min}$ 为一定声压条件下能产生声空化的最小气泡半径; σ 为熔液的表面张力; P_m 为声压幅值; P_0 为静压力。

随着超声功率增加,产生的声空化泡所需要的临界半径 $R_{\min}$ 减小,则熔体中空化泡的数量增多。一方面随

着空化泡的生长,其内部液体蒸发,空化泡表面从周围吸热,造成局部过冷且空化泡闭合或崩溃时,将释放能量,空化泡的过冷形核作用增强。同时空化泡崩溃使熔体压力增大,有效过冷度增大,促使晶核的形核率增加;另一方面,随着超声功率增加、振幅加大,声流的速度增大,超声振动搅拌的作用加强,可使合金液填充熔体中难熔杂质微粒上的缺陷部位,使其活化并转换为形核基底从而增加形核。因此,在 0~900 W 范围内,随着超声功率增加,合金中初生 Mg_2Si 相逐渐细化。

图 7 为不同超声功率作用下合金的抗拉强度和伸长率。可以看出,随着超声功率增加,合金的抗拉强度先增大后减小,转折点为 700 W;当超声功率为 500 W 和 700 W 时,合金抗拉强度达到最大值约为 176 MPa,比未经处理的合金提高了 46%。合金的伸长率随着超声功率的增加先增加后降低,700 W 时伸长率最大;当超声功率为 900 W 时,伸长率为 1%。经过超声熔体处理后的 Mg_2Si 相得到细化,因此合金的力学性能提高。合金中 Mg_2Si 相属于增强相,若 Mg_2Si 相尺寸细小且数量多,则细小的增强相在合金变形时阻碍其继续变形,增加合金变形抗力。超声波处理除了可以使凝固组织细化外,还有除气作用,改善合金的伸长率。结合图

5 可知,不同超声功率下的 Mg_2Si 相都得到细化,而 Mg_2Si 增强相越细小,对位错的运动阻碍作用越大,表现为强度提高。而当超声功率为 900 W 时,虽然 Mg_2Si 相平均尺寸减小,但形态变差,出现了条絮状 Mg_2Si 相,因此,合金的抗拉强度下降。

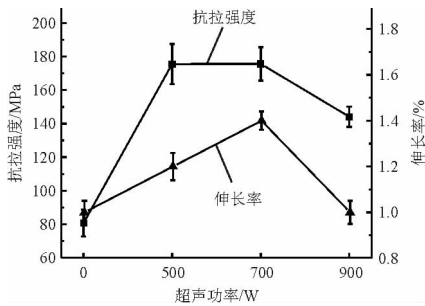


图 7 超声功率对 Mg-9Al-3Si 合金力学性能的影响
Fig.7 Effects of ultrasonic power on mechanical properties of Mg-9Al-3Si alloy

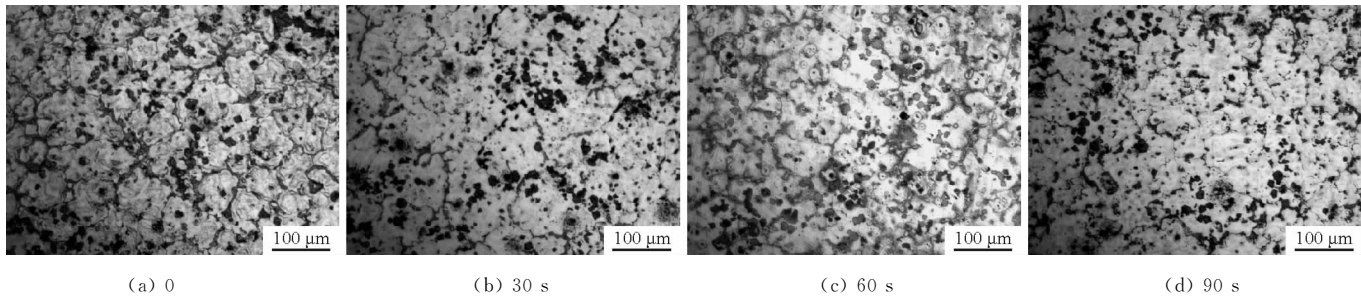


图 8 不同超声处理时间下 Mg-9Al-3Si 合金中的 Mg_2Si 相分布
Fig.8 Distribution of Mg_2Si phase in the Mg-9Al-3Si alloy during different ultrasonic treatment time

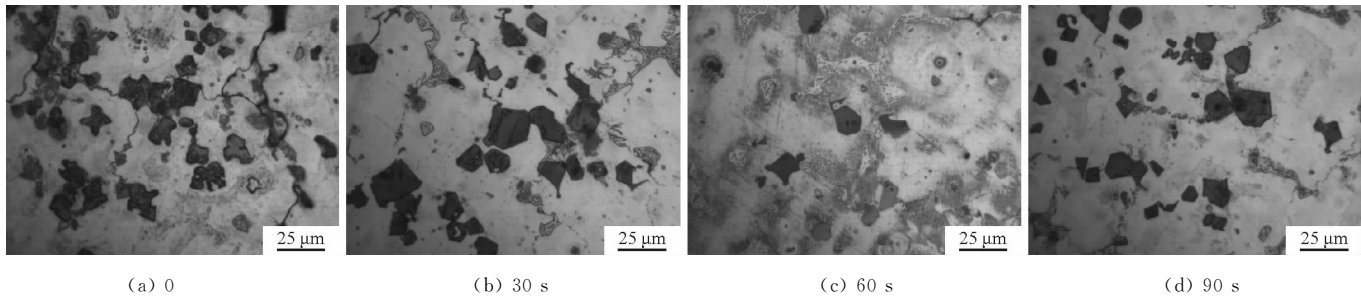


图 9 不同超声处理时间下 Mg-9Al-3Si 合金中的 Mg_2Si 相形态
Fig.9 Morphology of Mg_2Si phase in the Mg-9Al-3Si alloy during different ultrasonic treatment time

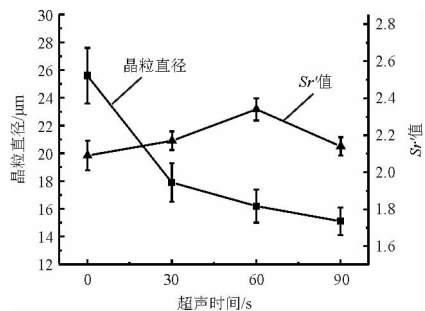


图 10 不同超声处理时间下 Mg_2Si 相 Sr' 值和晶粒直径
Fig.10 Effects of ultrasonic treatment time on Sr' value and grain diameter of Mg_2Si phase

2.3 超声处理时间对合金凝固组织及力学性能的影响

图 8 和图 9 分别为不同超声处理时间作用下合金中初生 Mg_2Si 相的分布和形貌。图 10 为不同超声处理时间下 Mg_2Si 相的分布和尺寸。从图 10 可以看出,随着超声处理时间延长, Sr' 值先增大再减小,但 Sr' 值相差不大,即 Mg_2Si 相分布虽稍有团聚现象,但与未经超声处理的情况相差不大,都是较均匀地分布在铸锭中。与未处理的合金相比,经过超声处理的合金中初生 Mg_2Si 相的形状为小块状或球状。未经处理的初生 Mg_2Si 相直径为 $25.6\ \mu m$,经过超声处理后的初生 Mg_2Si 相直径明显减小,并随着超声处理时间增加,细化效果更明显,分别为 17.9 、 16.2 、 $15.1\ \mu m$ 。同时还可以看出,初生 Mg_2Si 相直径的变化率不断减少,即随着处理时间的延长, Mg_2Si 相细化的速度和效果有所减弱。

超声处理能有效地细化组织,使初生 Mg_2Si 相分布均匀。超声波的搅拌作用会折断、碎化粗大的初生 Mg_2Si 相,从而提高形核率。在处理时间为 $0\sim 90\ s$ 时,超声处理所引起的空化和声流效应逐渐积累,超声振动搅拌作用加强,使初生 Mg_2Si 相不断细化。当超声处理时间超过 $30\ s$ 后,一方面由于超声的空化和声流效应加强,使初生 Mg_2Si 相显著细化;另一方面,由于超声波的热效应,使合金液的温度上升,会阻碍 Mg_2Si 相继续细化,但总体上超声细化效应强于热效应,所以在 $30\sim 90\ s$ 内, Mg_2Si 相直径继续减小,但速度变缓。

图 11 为不同的超声处理时间对合金力学性能的影响。可以看出,随着超声处理时间增加,合金的抗拉强度先快速升高然后有所降低,转折点为 60 s,此时,其抗拉强度达到 176 MPa,相较未处理时提高了 123%;而当超声处理超过 60 s 后,抗拉强度开始下降,处理时间为 90 s 时,抗拉强度降至 162 MPa。伸长率随时间的增加先提高然后降低再提高,90 s 时伸长率为 3%,而未经处理的试样为 1%。

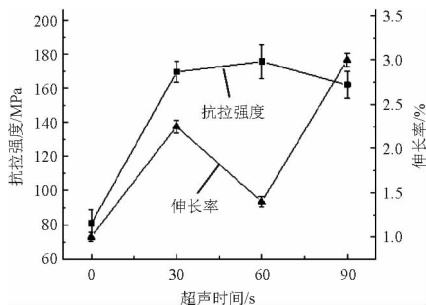
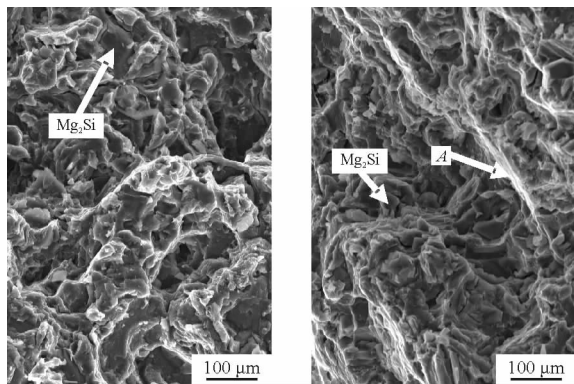


图 11 超声处理时间对 Mg-9Al-3Si 合金力学性能的影响
Fig.11 Effects of ultrasonic treatment time on mechanical properties of the Mg-9Al-3Si alloy

由图 8~11 可知,随着处理时间增加,Mg₂Si 相尺寸逐渐减小,Mg₂Si 相的分布均匀性也有很大改善,所以合金的抗拉强度和伸长率提高;而当处理 90 s 时,由于超声热效应使得金属熔体温度上升,削弱了细化效果,而且因为冷却时间变长,合金中出现了一些大块状的 Mg₂Si 相,使合金抗拉强度有所降低。

2.4 超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金断口形貌的影响

图 12 为 Mg-9Al-3Si 合金试样超声处理前后的拉伸断口形貌。可以看出,未处理时,断口存在较大的解理台阶且集中在粗大的 Mg₂Si 相附近,表面几乎看不到撕裂棱存在,断裂形式为解理断裂;经 700 W,60 s 超声处理后,解理台阶尺寸减小,集中在初生 Mg₂Si 相附近,且断口表面存在河流花样,见图 12b 中 A 处,同时



(a) 超声处理前 (b) 超声处理后

图 12 超声处理对 Mg-9Al-3Si 合金断口形貌的影响
Fig.12 Effects of ultrasonic treatment on fracture morphology of Mg-9Al-3Si alloy

存在短而弯曲的撕裂棱,呈准解理断裂特征。说明合金抗拉强度和伸长率的提高主要来源于初生 Mg₂Si 相的细化。

3 结 论

(1)通过控制超声处理工艺参数可以改善 Mg-9Al-3Si 合金的凝固组织和力学性能。

(2)在超声功率为 0~900 W 时,随着输出功率增加,Mg-9Al-3Si 合金中 Mg₂Si 相逐渐细化,同时团聚严重,其抗拉强度先提高再降低,转折点为 700 W。

(3)在超声时间为 0~90 s 时,随着超声处理时间增加,Mg-9Al-3Si 合金中 Mg₂Si 相尺寸逐渐减小,Mg₂Si 相分布虽稍有团聚现象,与未经过超声处理的情况相差不大。合金抗拉强度先提高再降低,转折点为 60 s。

(4)对其断口分析可知,未经超声处理的 Mg-9Al-3Si 合金表现为解理断裂,经超声处理的 Mg-9Al-3Si 合金解理台阶尺寸减小,呈准解理断裂特征。

参 考 文 献

- [1] 董群,陈礼清,赵明久,等.镁基复合材料制备技术、性能及应用发展概况[J].材料导报,2004(4): 86-90.
- [2] 吴晗,周全,王俊,等.磁场和铸造工艺对 Mg₂Si/Al 复合材料中 Mg₂Si 相的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(6): 656-660.
- [3] ZHANG J,FAN Z,WANG Y Q,et al. Effect of cooling rate on the microstructure of hypereutectic Al-Mg₂Si alloys[J]. Journal of Materials Science Letters,2000,1999(20):1 825-1 828.
- [4] 杨森,曹志强,陈东风,等.电磁搅拌对半固态 Al-20Mg₂Si 合金组织的影响[J].铸造,2007,56(1):79-81.
- [5] 苏兆兴,陈之林,赵宇光.Si 含量和冷却速率对 Mg₂Si/Al 复合材料组织与耐磨性能的影响[J].金属热处理,2016,41(3): 175-179.
- [6] 郭学锋,杨文朋,宋佩维.往复挤压 Mg-4Al-2Si 合金中 Mg₂Si 颗粒形貌与分布[J].材料工程,2011(11): 62-67.
- [7] 张黎,陈乐平,周全.超声熔体处理对 ZA27 合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(1): 78-81.
- [8] 李正生,付浩,陈丽君,等.超声波熔体处理 AZ91D-3Ca 阻燃镁合金的工艺优化[J].热加工工艺,2015,44(11): 33-36.
- [9] 廖露亮,尧军平,张磊,等.超声处理对 AS31 镁合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10): 1 150-1 153.
- [10] 何祚镛,赵玉芳.声学理论基础[M].北京:国防工业出版社,1981.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com