

文章编号: 1004-0609(1999)04-0719-04

功率超声对 Al-Si 合金组织和性能的影响^①

李英龙 李宝绵 刘永涛 高彩茹 戴恩泰

(东北大学 黄金学院, 沈阳 110015)

摘 要: 研制成功率超声铸造设备和附属装置, 研究了全过程超声处理和结晶前超声处理对 Al-Si 共晶和过共晶合金铸造组织和性能的影响。结果表明: 适宜的超声参数对初晶 Si 和共晶 Si 组织具有双重细化作用, 使 Si 破碎变成颗粒状, 合金的机械强度和塑性明显提高。认为超声细化合金组织存在阈值声压, 对功率超声细化合金组织的机理进行了理论上的分析和探讨。

关键词: 功率超声; Al-Si 合金; 组织性能

中图分类号: TG166.3

文献标识码: A

在铝硅合金的凝固过程中, 由于硅在铝液中的扩散速度较大, 共晶转变时领先析出针(片)状共晶硅, 并在硅晶体上析出长大呈相互交叉的形态。随着硅含量的增加, 组织中共晶硅的数量也随之增加, 甚至出现粗大的初晶硅块(片)。它们由一些极薄的六角形板状晶重叠而成, 板间结合力很弱, 严重地割裂了合金基体, 变形时在硅相尖端和棱角部位引起应力集中, 合金容易沿晶粒边界或硅本体开裂而形成裂纹, 使力学性能特别是塑性明显降低, 切削加工性能变差^[1]。因此, 对硅含量超过 6%~8% 的 Al-Si 合金, 一般要进行细化处理或变质处理, 以细化或改善硅的形态, 从而减小其对基体的削弱作用。自发现 Na 对 Al-Si 合金的变质作用以来, 已研制出磷及磷化合物、锶等多种变质处理方法^[2,3]。

采用物理形核方法^[4~6], 如电磁搅拌、脉冲放电、射流或压力等, 所产生的强对流或自然对流, 可使熔融金属凝固成细而均匀的组织。本文通过对凝固过程中的 Al-Si 熔体进行超声振动处理, 引起类似于对流的机械作用, 来细化合金组织以改善合金性能, 并结合理论分析, 探讨功率超声的组织细化机理, 以便对超

声处理过程进行控制, 寻求适宜的超声细化组织工艺。

1 试验方法

1.1 试验合金

合金成分: 工业用 Al-Si 共晶成分合金和过共晶成分(Si20%)合金。

1.2 装置与流程

试验装置主要由压铸装置、超声波发生器、超声振动铸造装置、气体保护装置、电阻加热炉和测控温装置组成。图 1 是振动铸造装置结构原理图。换能器发射的超声波, 通过与速度变换器联接的振动辐射块直接耦合到熔体中, 辐射块端面的纵向振动幅值和声压由改变输入换能器的电功率控制, 熔体经压铸口压铸到铸模, 用温控模套保持或控制熔体温度。

驱振用超声波发生器为频率自动跟踪式结构, 频率为 20 kHz, 最大电功率 500 W(可调), 系统的声电效率约为 75%。

实验合金经熔炼和除渣处理后进行压铸, 分别铸出经超声处理和未经超声处理的铸锭。超声处理采用两种方式: 对熔体施振直至合金

① 收稿日期: 1999-05-30; 修回日期: 1999-08-10 李英龙(1961-), 男, 讲师, 硕士

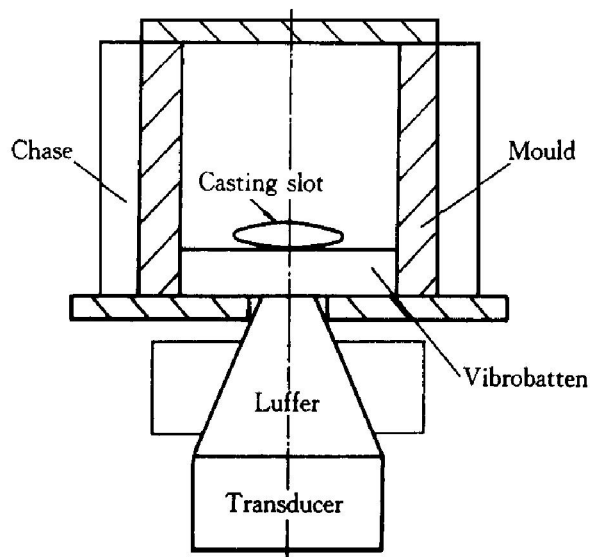


图 1 超声振动铸造装置

Fig. 1 Casting device of ultrasonic vibration

凝固的全过程超声处理；在共晶转变前对熔体施振的结晶前超声处理。在 650~550℃ 间选择不同的压铸(振动)温度，采用水冷、空冷和控温缓冷的不同模冷方式，以研究超声处理方式及工艺条件对合金组织和性能的影响。

在铸锭上分别距振动辐射块端面大于 $D^2/4\lambda - N\lambda$ 的远声场和小于 $D^2/4\lambda - N\lambda$ 的近声场位置，截取金相试样和拉伸试样，进行扫描电镜观测和性能测试。

2 试验结果

2.1 全过程超声处理的合金组织

图 2(a) 为共晶合金从压铸至凝固全过程经声强 $I = 3.5 \text{ W/cm}^2$ 超声处理及空冷模冷却的合金组织，与未经超声处理的合金组织(图 2(b))相比，共晶 Si 显著细化，断裂并呈粒状分布，断裂处有局部熔化现象，棱角变钝。与声束平行和垂直断面上的组织细化程度相同，超声处理后合金性能由 $\sigma_b = 140 \text{ MPa}$, $\delta_5 = 1\%$ ；提高到 $\sigma_b = 210 \text{ MPa}$, $\delta_5 = 7\%$ 。

图 3 为声强与合金强度间的关系曲线，可见超声对合金组织的细化作用存在阈值声压 p_{ho} ，当作用声压 $p_h < p_{ho}$ 时，合金组织无明显

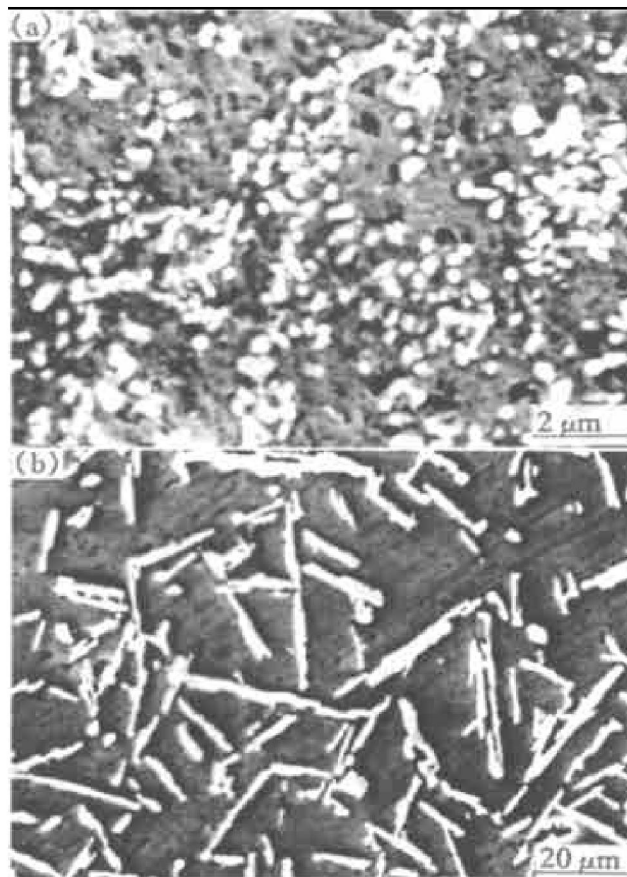


图 2 Al-Si 共晶合金的铸态组织 SEM 照片

Fig. 2 SEM micrographs of eutectic Al-Si alloy structure

- (a) —Treated by ultrasonic during whole solidification
(b) —Untreated by ultrasonic

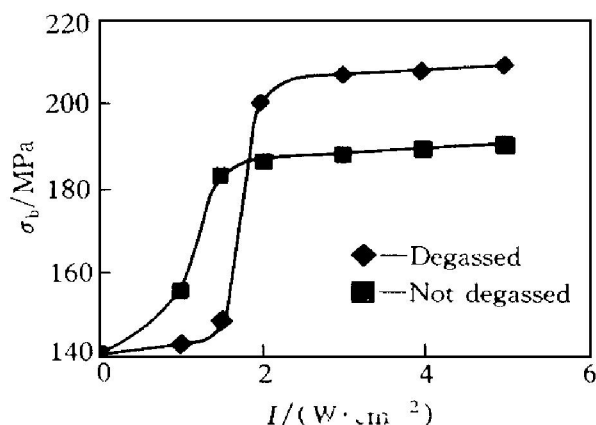


图 3 声强对合金强度的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic intensity on alloy strength

变化(未断裂或破碎)；当 $p_h > p_{ho}$ 时，组织显著细化，随 p_h 值变大细化程度提高并趋于饱和。 p_{ho} 附近 σ_b 存在突变。熔体经除气处理时，

p_{ho} 值提高, 细化作用增强, 同时发现近声场细化效果较远声场略好。

2.2 结晶前超声处理的合金组织

图4(a)和(b)为共晶和过共晶合金在650℃经声强 $I = 3.5 \text{ W/cm}^2$ 超声处理1min后空冷模冷却的合金组织形貌。可见, 共晶和初晶Si均细化, 但仍呈针片状(未断裂)分布, 合金性能略有提高。图4(c)与图2(b)(未经超声处理)的合金组织比较表明, 结晶前对熔体进行超声处理使液相形核率提高, 超声振动对Si相的破碎作用发生于结晶凝固过程。图5为超声处理的温度区间与 AlSi 共晶合金强度间的关系, 表明在熔点附近区域超声处理效果最好, 超声细化合金组织主要作用于形核及结晶凝固过程。

2.3 冷却速度和浇铸温度的影响

实验比较了水冷、空冷与控温缓冷的不同模冷方式和650℃与600℃压铸条件下, 超声振动对合金组织和性能的影响。结果表明, 冷却速度增加, 合金强度随之提高, 在较大冷却速度下(水冷模冷却), 呈细粒状分布的合金组织进一步细化, 合金性能提高到 $\sigma_b = 230 \text{ MPa}$, $\delta_5 = 10\%$; 提高压铸温度时 p_{ho} 降低, 组织细化程度减弱。

3 分析与讨论

当超声波在 AlSi 熔体中传播时, 会产生正压相和负压相, 破坏熔体的结构完整性, 使声阻连续性降低, 熔体对声能吸收的微区差异性提高, 近程有序度下降, 增加结晶核心。

合金凝固时, 领先析出Si相, 超声波使Si晶核处于振荡之中, 熔体对Si晶核表面产生机械空蚀作用, 空化时的微冲流作用加速了Si的熔化传质过程, Si向液相的扩散作用加速。可见超声波能提高Si晶核的形核率, 并有抑制生长作用, 表现为结晶前对熔体超声处理使合金组织细化, 强度提高。

辐射块前端所产生的强声波能激活熔体中的空化气核, 当气泡崩溃时伴随有强烈的冲击波或射流^[7]。按 Fitzgerald 的稳态空化计算式^[8]: 对于该试验条件下的H单原子气体的空化泡, 气核崩溃时产生2100 MPa的强大压力, 释放到熔体中作用于Si相, 并产生3269 K的局部高温, 击碎并高温熔断Si晶体。Si的声压透射系数 $D = 2Z_{Si} / (Z_{Si} + Z_{Al}) > 1$, Si对透射声波具有声压放大作用, 气泡崩溃施压时相当于绝热过程, 热流将从Si晶体受压一侧流

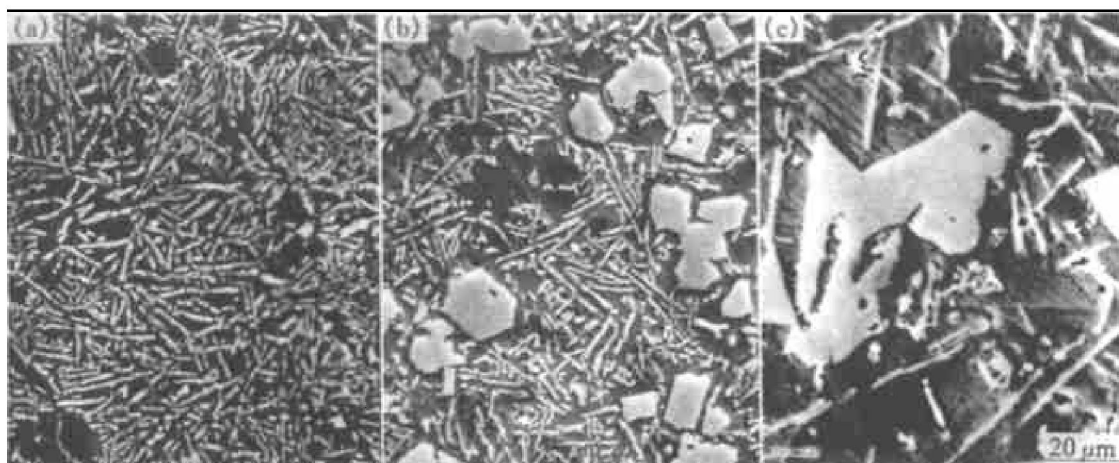


图4 结晶前超声处理的合金组织 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrographs of alloy structure treated by ultrasonic before solidification

(a) —Eutectic AlSi alloy treated by ultrasonic; (b) —Al-20Si alloy treated by ultrasonic;

(c) —Al-20Si alloy untreated by ultrasonic

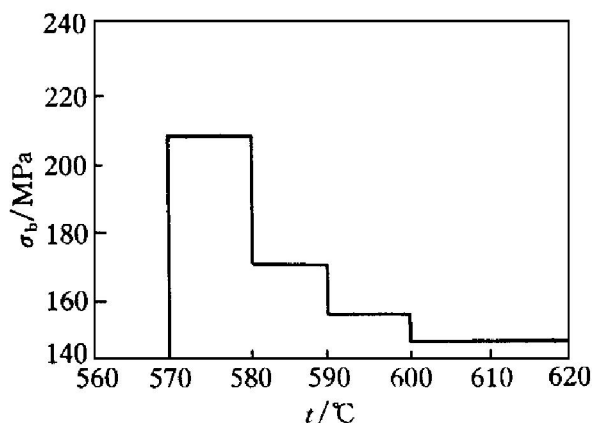


图 5 振动温度对合金强度的影响

Fig. 5 Effect of temperature on strength of alloy in ultrasonic vibration

向未受压一侧, 热流引起的附加形变滞后应力的变化, 从而引起热弛豫型内耗, 吸收气泡崩溃时的能量并使之转化为热能。

由声空化的动力学公式知^[9], 熔体作用声压与空化泡半径 R 的三次方成反比, 所以, 存在一个阈值声压 p_{ho} , 小于 p_{ho} 时空化变得不稳定, 只有大于 p_{ho} 时, 超声才具有显著的组织细化效应。提高浇铸温度和未经除气时导致阈值声压下降、组织细化作用减弱的原因是: 由于温度升高, 熔体的体积粘滞系数下降, 空化强度降低; 熔体中空化核心增多, 空化泡内气体含量增大, 崩溃的缓冲效应提高。

快速凝固时, 由于孪晶缺陷增多, 使其呈

薄片状生长^[10], 在超声作用下, Si 相单位体积的内耗能量增大, 导致 Si 的强烈破碎和熔断, 所以在快速凝固时使组织进一步细化。

REFERENCES

- 1 Zhang C F(张承甫), Gong J L(龚建林) and Huang X R(黄杏蓉). The Purification and Modification of Liquid Metal(液态金属的净化与变质). Shanghai: Shanghai Science and Technology University Press, 1992: 300~ 305.
- 2 Pacz A Z. US Patent No. 13887900. 1920.
- 3 Denton J R and Spittle J A. Mater Sci Technol, 1985, 1(4): 305~ 311.
- 4 Flemings M C. Metall Trans, 1991, 22(B): 269.
- 5 Misra A K. Metall Trans, 1985, 16(A): 1354.
- 6 Maesiar H. Giessereitechnik, 1985, 31(7): 211~ 214.
- 7 Feng N(冯 若) and Li H M(李化茂). The Applications of Sound Chemistry(声化学及其应用). Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1992: 67~ 122.
- 8 Fitzgerald M E, Griffing V and Sullivan J. Phys, 1956, 25(2): 926.
- 9 Mason T J and Lorimer J P. Sonochemistry, 1988, 5(7): 45.
- 10 Liu Q. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25: 371~ 368.

Effect of high-intensity ultrasonic on structures and properties of Al-Si alloys

Li Yinglong, Li Baomian, Liu Yongtao, Gao Cairu, Dai Entai

Institute of Gold Technology, Northeastern University, Shenyang 110015, P. R. China

Abstract: The casting device of ultrasonic vibration was designed. The effect of high-intensity ultrasonic on the structures and properties of the eutectic and hypereutectic Al-Si alloys was studied. It is shown that appropriate ultrasonic parameters can fine both the primary Si and the eutectic Si, Si phase is broken off into globular thus raising the strength and plasticity of the alloys remarkably. The mechanisms of ultrasonic action were investigated experimentally and approached theoretically, on the basis of which it is concluded that there exists an ultrasonic intensity threshold in fining the alloy structures.

Key words: ultrasonic; Al-Si alloys; structure and property

(编辑 袁赛前)