



超声场中亚共晶 Al-5%Si 合金的 动态凝固及其力学性能

王宝剑, 翟 薇, 魏炳波

(西北工业大学 应用物理系, 西安 710072)

摘 要: 将 20 kHz、500 W 的高强超声分别引入亚共晶 Al-5%Si 合金凝固过程的不同阶段, 探索了超声场对于初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和枝晶间组织形成的作用机制。结果表明: 超声作用下凝固组织中气孔率显著降低, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相从“粗大枝晶”演变为“等轴或碎断枝晶”, 枝晶间组织也呈现出细化趋势。在液相阶段施加超声, 可以改善熔体中晶胚与杂质的润湿程度, 促进晶粒细化。若在初生相形核和长大阶段施加超声, 空化效应引发的晶体形核以及空化引起的枝晶碎断是超声场细化初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的主要机制。在共晶转变阶段施加超声, 力学效应则是枝晶碎断的主要原因。在凝固过程的不同阶段施加超声, 均能提高 Al-5%Si 合金的显微硬度和屈服强度。

关键词: 超声场; 共晶凝固; 动态形核; 空化效应; 组织形成; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2019)-01-0001-10

中图分类号: TG113.1

文献标志码: A

超声场中合金凝固组织的形成规律研究是凝聚态物理和材料科学共同关注的重要课题^[1-6]。超声波在液体中传播时具有空化效应和声流效应等, 能够显著改变凝固过程中的晶体形核和长大以及传热传质规律, 而被广泛应用于凝固过程中, 成为改善凝固组织形态和提高其物理性能的有效方法之一^[7-11]。已有的研究表明, 功率超声对合金凝固组织具有一系列作用, 例如熔体除气、宏观/微观偏析的抑制以及晶粒细化等^[12-19]。特别是, 陈瑞润等^[20-22]将高强超声引入高温 TiAl 合金中, 显著细化了合金晶粒, 大幅提高了 Ti 合金的屈服强度和显微硬度。目前, 研究者基于大量实验结果, 提出了如下两种主要的晶粒细化机制: 一是超声空化引发的异质形核机制, 即超声空化改变合金熔体与杂质之间的润湿性, 提高局域过冷度, 从而促进形核, 细化晶粒; 二是空化诱导的枝晶碎断机制, 即超声空化气泡崩溃的瞬间所产生的高温高压以及冲击波会对正在形核和长大的枝晶产生破坏作用, 从而细化晶粒^[23-28]。但是, 超声场在合金凝固各个不同阶段对于晶粒细化的具体作用机制, 尚不清楚, 急待进行深入细致的研究。

Al-Si 合金因其具有优异的机械强度、塑性、硬度和疲劳强度等而成为目前广泛应用的合金体系之

一^[2-3, 29-32]。对于亚共晶 Al-Si 合金, 其凝固组织由初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和二元 (Al+Si) 共晶组成。因此, 如何通过改变凝固条件以改善初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和共晶组织的微观形貌并优化其力学性能就成为研究者关注的焦点问题^[33]。基于此, 本文以亚共晶 Al-5%Si 合金为研究对象, 通过在凝固过程中的不同阶段施加功率超声, 考察初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和 (Al+Si) 共晶组织的形貌变化, 并据此揭示功率超声对于初生相和枝晶间组织生长的作用机制。

1 实验

Al-5%Si 合金试样由纯度为 99.7% 的 Al 元素和纯度为 99.9% 的 Si 元素配制而成, 每个试样的质量约为 30 g。实验过程中, 将合金试样置于 $d22 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的石墨坩埚中, 加热熔化至 1273 K, 并保温 30 min。随后将提前预热至 503 K 的超声变幅杆插入合金液体内部, 深度约为 6 mm, 同时用 K 型 NiCr-NiSi 热电偶测量合金凝固的冷却曲线, 每次实验中保持热电偶插入的位置和深度一致。根据二元 Al-Si 合金的平衡相图, 如图 1(a) 所示, Al-5%Si 合金从 1150 K 冷却到室温的过程中会经历四个不同的阶段, 分别为液相阶段、初

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51327901, 51727803, 51571164)

收稿日期: 2017-09-05; 修订日期: 2018-04-03

通信作者: 魏炳波, 教授, 博士, 电话: 029-88431669; E-mail: bbwei@nwpu.edu.cn

生相形核和长大阶段、共晶转变阶段和固相阶段。如图 1(b)所示,分别在凝固过程的三个不同阶段施加相同频率($f=20$ kHz)和相同功率($P=500$ W)的超声波(Ultrasonic treatment, UST): 1) 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相形核前的阶段,即合金完全处于液相时施加超声波,超声作用温度区间为 1150~897 K,简记为 L; 2) 初生相形核和长大阶段施加超声波,超声作用温度区间为 878~832 K,简记为 P; 3) 共晶转变阶段施加超声,超声作用温度区间为 832~723 K,简记为 E。

实验结束之后,将 Al-5%Si 合金试样沿纵向剖开,对其进行镶嵌、打磨和抛光。采用 Rigaku D/max2500 X 射线衍射仪对凝固组织的相组成进行分析。利用 Zeiss Axiovertzoo MAT 光学显微镜和 Image-pro plus 软件对试样的组织形态和尺寸分布进行分析。采用 HXD-2000 TML/LCD 数显显微硬度计测定试样的显微硬度。测试过程中,以 0.4903 N 的恒定压力加载 10 s 获得压痕,进而计算出显微硬度值。采用 Instron 5969 万能试验机测定试样的压缩性能。测定过程中,以 0.5 mm/min 的恒定压缩速率获得压缩应力-应变曲线。

2 结果与讨论

图 1(c)所示为在静态和不同凝固阶段施加超声作用时 Al-5%Si 合金试样的 XRD 谱。可以看出,四种条件下,凝固组织的 X 射线衍射图谱中衍射峰的位置不变,凝固组织均由 $\alpha(\text{Al})$ 相和(Si)相组成。这表明在不同凝固阶段施加超声并没有改变 Al-5%Si 合金的相组成。

2.1 超声场对液态合金的除气作用

图 2(a)~(d)所示为不同凝固条件下 Al-5%Si 亚共晶合金凝固组织的宏观形貌。可以看出,与静态条件相比,在凝固的不同阶段施加超声场均能显著降低凝固组织中的气孔尺寸和数目。为了定量分析不同凝固阶段施加超声的除气效果,对凝固组织中的气孔尺寸进行了统计分析,结果示于图 2(e)中。在静态条件下,Al-5%Si 合金试样中的气孔平均长度为 757 μm ,其中最大长度长达 1.5 mm;在液相阶段施加超声波时,试样中气孔的平均长度为 80 μm ;在初生相形核和长大阶段施加超声波时,试样中气孔的平均长度为 102 μm ;在共晶转变阶段施加超声波时,试样中的平均气孔尺寸为 400 μm 。可以看出,在不同凝固阶段施加超声场,凝固组织中的气孔尺寸均减小,尤以在液相阶段施加超声时,气孔尺寸减小最为显著。

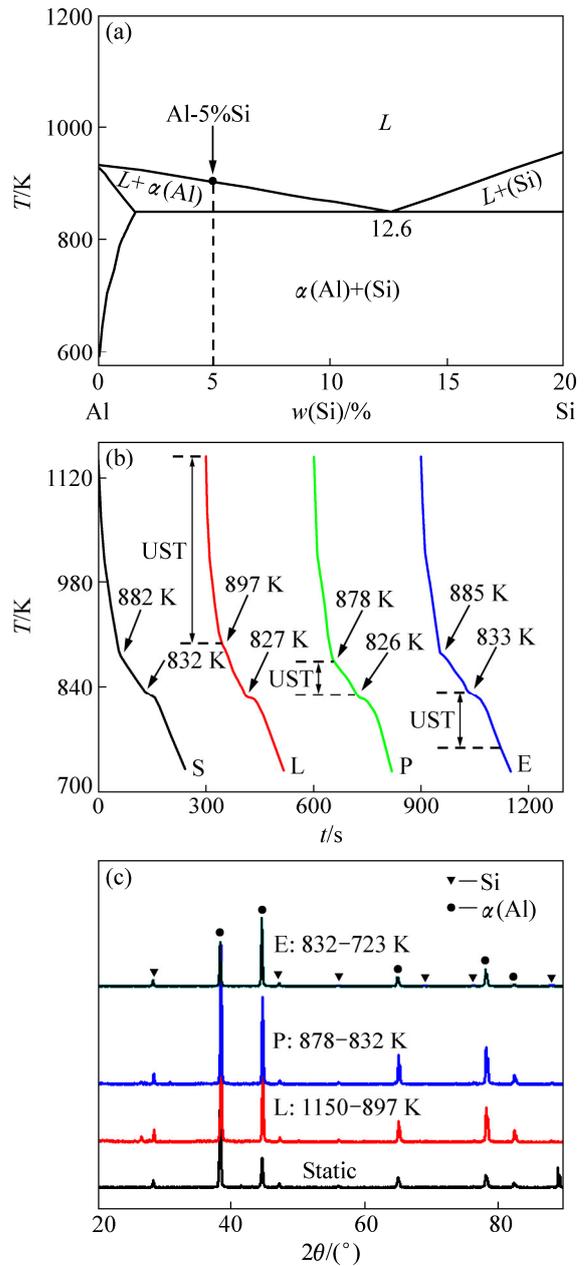


图 1 亚共晶 Al-5%Si 合金的基本特征

Fig. 1 Fundamental characteristics of hypoeutectic Al-5%Si alloy: (a) Position in binary Al-Si alloy phase diagram; (b) Cooling curves under different solidification conditions; (c) XRD patterns

进一步,利用 Image-pro plus 软件统计了气孔体积 V_{gas} 和试样的总体积 V_0 ,并定义试样中的气孔率 η 为

$$\eta = \frac{V_{\text{gas}}}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

根据上式计算得出的气孔率随超声施加阶段的变化规律也示于图 2(e)中。可以看出,相比于静态条件

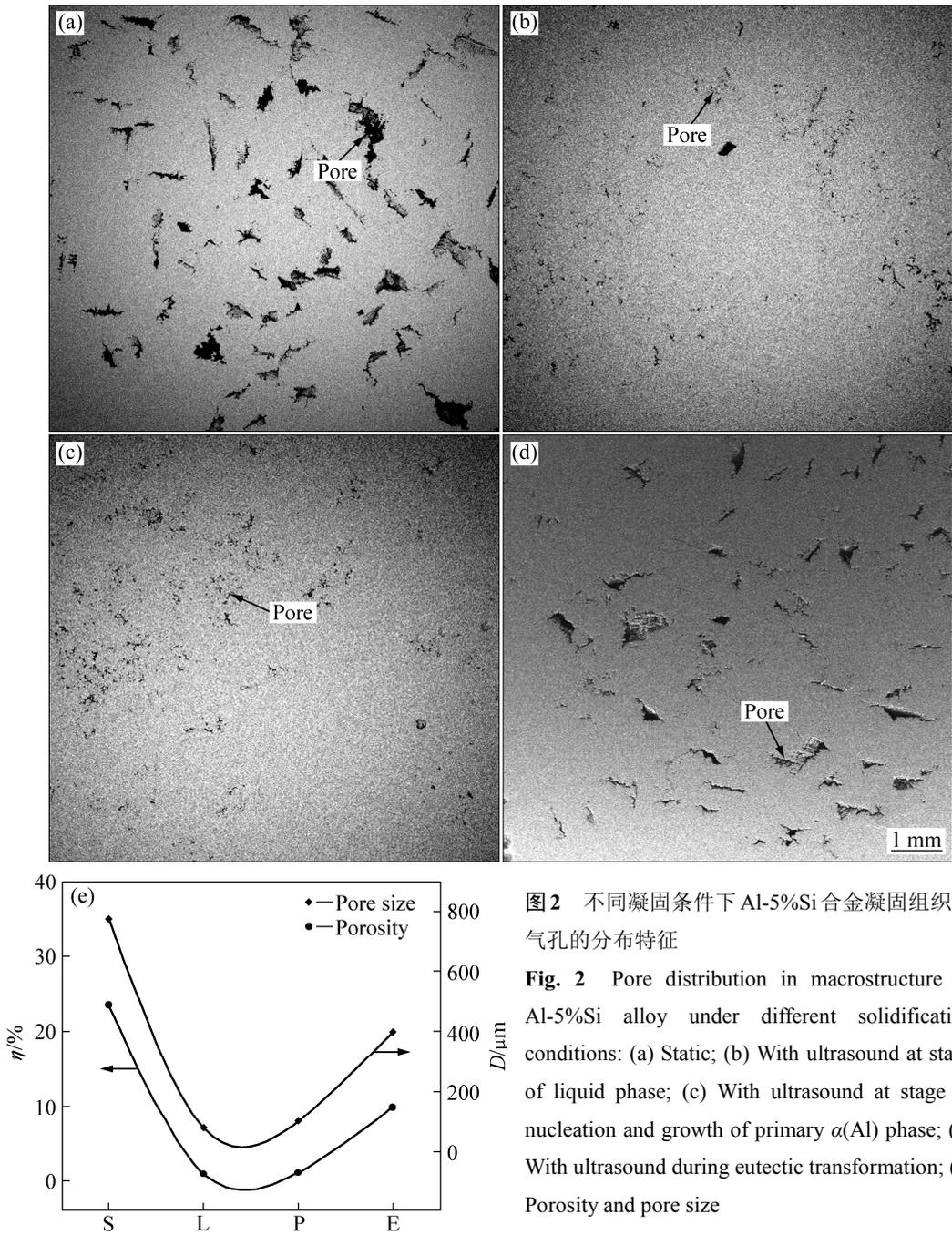


图 2 不同凝固条件下 Al-5%Si 合金凝固组织中气孔的分布特征
Fig. 2 Pore distribution in macrostructure of Al-5%Si alloy under different solidification conditions: (a) Static; (b) With ultrasound at stage of liquid phase; (c) With ultrasound at stage of nucleation and growth of primary $\alpha(\text{Al})$ phase; (d) With ultrasound during eutectic transformation; (e) Porosity and pore size

下 24% 的气孔率, 在不同阶段施加功率超声均能够降低 Al-5%Si 合金凝固组织中的气孔率, 尤以在液相阶段施加超声时最为显著, 气孔率仅为 1%, 次之为初生相形核和长大阶段施加超声, 最弱为共晶转变阶段施加超声。因此, 功率超声的除气作用取决于合金熔体中液相的体积分数, 当合金熔体中液相的体积分数越大时, 功率超声的除气效果越好。

2.2 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的组织演化机制

在静态凝固过程中, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相以粗大的枝晶方

式生长, 平均主干长度大约为 1309 μm , 最大枝晶主干长度约为 3.2 mm, 如图 3(a)~(b)所示。在液相阶段施加超声波时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相以等轴枝晶为主要的生长方式, 晶粒平均直径大约为 424 μm , 如图 3(c)~(d)所示。在初生相形核和长大阶段施加超声波时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相以更加细小的球状晶均匀分布, 晶粒的平均直径约为 82 μm , 如图 3(e)~(f)所示。在共晶转变阶段施加超声波时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相仍以粗大的枝晶方式生长, 但在凝固组织中少量枝晶出现了碎断的痕迹, 其平均主干长度约为 654 μm , 如图 3(g)~(h)所示。

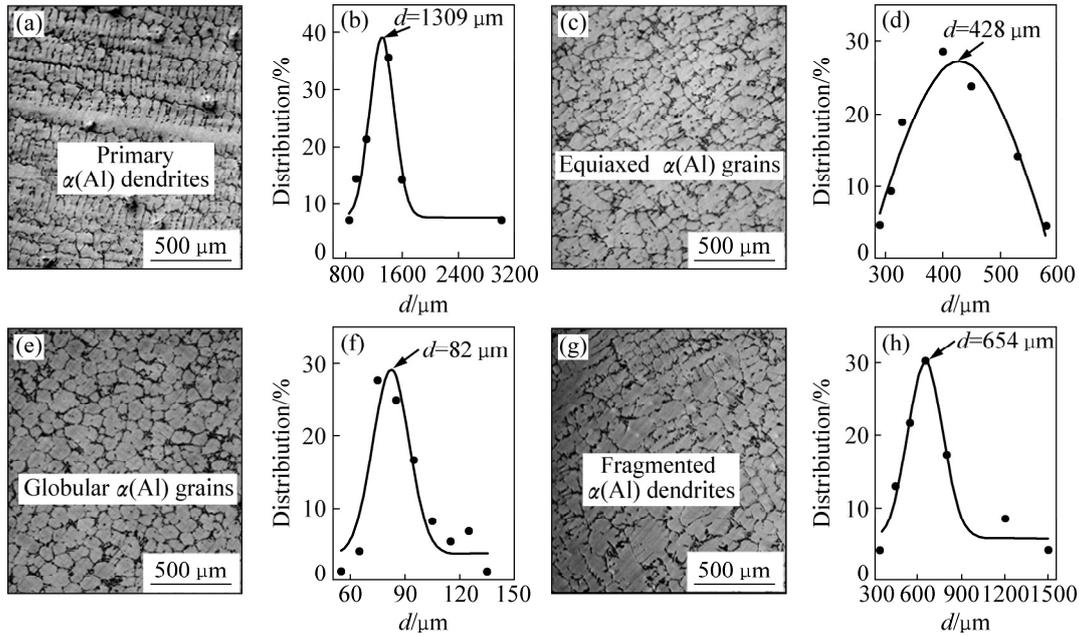


图3 Al-5%Si合金凝固组织中初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的生长形态和尺寸分布

Fig. 3 Morphologies and size distributions of primary $\alpha(\text{Al})$ phase in Al-5%Si alloy: (a), (b) Static; (c), (d) With ultrasound at stage of liquid phase; (e), (f) With ultrasound at stage of nucleation and growth of primary $\alpha(\text{Al})$ phase; (g), (h) With ultrasound during eutectic transformation

从上述初生相形态和尺寸变化可以看出,在液相阶段施加超声场,平均晶粒尺寸下降为静态条件下的1/3。以上结果证实,超声场能够改善合金熔体与杂质的润湿程度,从而提高初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的形核率,致使晶粒细化。结合图1(b)中的冷却曲线可以看出,在液相阶段施加超声时,初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的形核温度提高,达到897 K,而其他三种条件下,形核温度均处于878~885 K之间。这说明在液相阶段施加超声能够降低熔体整体过冷度,促进初生 $\alpha(\text{Al})$ 相形核。

在初生相形核和长大阶段施加超声场,平均晶粒尺寸下降为静态条件下的1/16。这证明空化效应引发的局域形核是初生 $\alpha(\text{Al})$ 相晶粒细化的最重要机制。

经典形核理论中形核率的表达式为

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right) \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2)$$

$$A = \frac{16\pi\sigma^3 T_L^2}{3\Delta H_m^2 \Delta T^2} f(\theta) \quad (3)$$

式中: I_0 是形核因子,通常取为 $10^{41} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; θ 是润湿角, $f(\theta) = (2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2 / 4$ 为异质形核因子; σ 是液固界面能,可由Spaepen的界面模型计算^[34]:

$$\sigma = \frac{\alpha_m \Delta H_m}{(N \cdot V_m^2)^{1/3}} \quad (4)$$

式中: α_m 为结构因子; V_m 是摩尔体积; N 是阿伏伽德罗常数。由于 Q 随温度变化较小^[34],本文中均取 $\exp[-Q/(kT)] = 10^{-2}$ 。从(2)式中可以看出,对于固定成分的合金,形核率主要取决于润湿因子 $f(\theta)$ 和过冷度 ΔT 。

由凝固理论知,合金熔体开始凝固时至少存在一个晶核,即要满足:

$$Nt \geq 1 \quad (5)$$

式中: V 是合金熔体的体积; t 是凝固时间。根据图1(b)中的冷却曲线可知,静态条件下凝固时间 $t=105 \text{ s}$,对应 $f(\theta) \leq 0.007$,即 $\theta \leq 25^\circ$ 。

由于超声波具有改变杂质与合金熔体之间润湿性的作用^[35-37],因而相比静态条件,超声场作用下合金熔体与杂质的润湿性会在一定程度上提高。因此,功率超声作用下合金熔体与杂质的润湿角应为 $0^\circ < \theta < 25^\circ$ 。

同时,理论计算和实验结果表明,超声在合金熔体中发生空化效应时,产生的高温和高压的数量级分别可以达到 10^4 K 和 10^9 Pa ^[38-39]。根据Clausius-Clapayron方程^[3],空化效应引发的合金熔体内局域过冷度的变化可以表示为

$$\Delta T_p = \frac{T_L \Delta V}{\Delta H} \Delta p \quad (6)$$

式中: T_L 是合金在标准大气压下的液相线温度; ΔV 是凝固时体积的变化量; ΔH 是凝固时的焓变; Δp 是压强变化量。由上式计算可得 Al-5%Si 合金在凝固过程中因压强变化而导致的局部过冷度变化为

$$\Delta T_p = 4.35 \times 10^{-8} \Delta p \quad (7)$$

计算结果如图 4(a)所示, 计算中所用物性参数见表 1。因此, 当空化效应引发的局域压强变化达到 1~5 GPa 时, Al-5%Si 合金局域过冷度将增加 43~137 K。

结合(2)~(7)式的分析计算, 得到形核率 I 随压强 p 和润湿角 θ 的变化关系, 如图 4(b)所示, 计算中所用的物性参数列于表 1 中。可以看出, 润湿角由 25° 降低到 1° 时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的形核率提高约 38 个数量级。压强由一个标准大气压升高到 5 GPa 时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的形核率提高约 35 个数量级。上述实验结果和理论计算均证实, 超声场对润湿因子 $f(\theta)$ 和过冷度 ΔT 的改变是提高初生 $\alpha(\text{Al})$ 相形核率而引发晶粒细化的重要原因。

最后, 在共晶转变阶段施加超声时, 由于初生 $\alpha(\text{Al})$ 相已经完全生成, 合金熔体中液相的体积分数小于

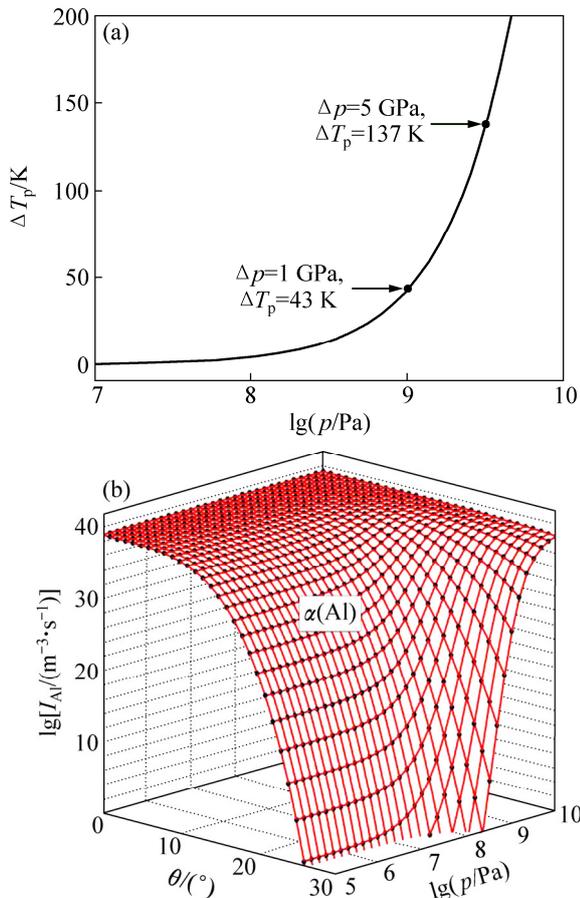


图 4 超声场中 Al-5%Si 合金的动态形核规律

Fig. 4 Dynamic nucleation feature of Al-5%Si alloy within ultrasonic field: (a) Local undercooling versus pressure; (b) Nucleation rate versus pressure and wetting angle

表 1 计算中所用物性参数

Table 1 Physical parameters used in calculation

Physical parameter	Symbol and unit	Value
Si content in alloy	$C_0/\%$	5
Si content in primary phase	$C_{Si}/\%$	1.7
Undercooling degree	$\Delta T/\text{K}$	30
Liquidus temperature	T_L/K	903
Molar mass of Al	$M_{Al}/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	26.98
Molar mass of Si	$M_{Si}/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	28.08
Fusion enthalpy of Al	$\Delta H_{m-Al}/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	10.47 ^[40]
Fusion enthalpy of Si	$\Delta H_{m-Si}/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	50.66 ^[40]
Volume change rate of Al	$\Delta V_{m-Al}/\%$	6.5 ^[40]
Volume change rate of Si	$\Delta V_{m-Si}/\%$	-10 ^[40]
Density of melted Al	$\rho_{m-Al}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2.385×10^3 ^[40]
Density of melted Si	$\rho_{m-Si}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2.53×10^3 ^[40]

30%。此时, 合金熔体的黏度很高, 超声空化效应发生的机率大大降低。但是, 超声的力学效应还是能够碎断一部分 $\alpha(\text{Al})$ 枝晶, 使得平均晶粒尺寸相对于静态条件下还是略微降低。

2.3 枝晶间组织特征

图 5 所示为亚共晶 Al-5%Si 合金在不同凝固条件下枝晶间组织的微观形貌。在静态和超声作用条件下, 枝晶间组织均由两部分组成, 分别是离异(Si)相和共晶(Al+Si)组织。离异(Si)相以板条状和块状形态存在, 而共晶(Al+Si)组织以层片共晶形式生长。

对离异(Si)相的长宽比进行统计计算, 如图 6(a)所示, 超声作用下, 离异(Si)相的长宽比均变小, 且在初生相形核和长大阶段施加超声时, 离异(Si)相的长宽比最小。图 6(b)所示为枝晶间共晶(Al+Si)组织中(Si)相间距统计分布。在静态条件下, 共晶(Si)相的相间距最大, 平均相间距约为 $7.36 \mu\text{m}$, 而在液相阶段, 初生相形核和长大阶段, 以及共晶转变阶段分别施加超声波后, 共晶(Si)相的相间距均略微变小, 平均相间距分别为 6.78 、 5.33 和 $5.16 \mu\text{m}$ 。因此, 相对静态条件, 在不同凝固阶段分别施加超声波均能在一定程度上细化 Al-5%Si 合金的枝晶间组织。

需要指出的是, 前两种条件下, 即在液相和初生相形核、生长阶段施加超声, 均能引发初生 $\alpha(\text{Al})$ 相的细化。这是由于随后的共晶组织依附于初生 $\alpha(\text{Al})$ 相生长, 分布于 $\alpha(\text{Al})$ 相晶界处。所以, 超声场引发的初生相细化是此两种条件下枝晶间组织细化的原因。而在共晶转变阶段施加超声, 共晶组织细化是超声力学效应作用的直接结果。

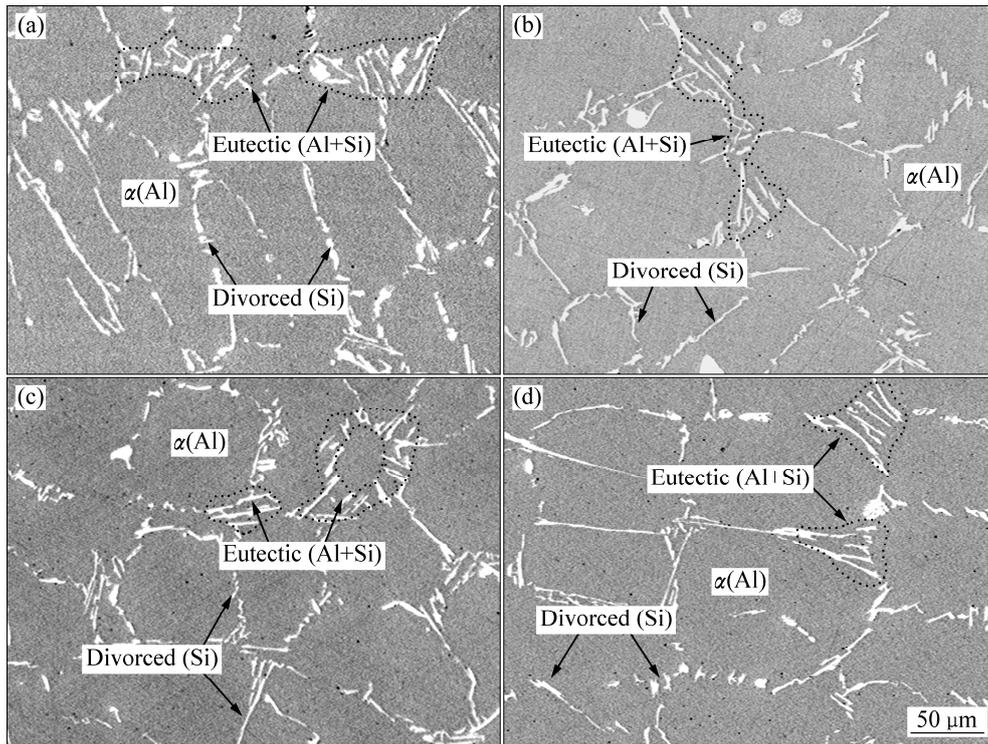


图5 Al-5%Si合金中枝晶间组织随凝固条件变化特征

Fig. 5 Interdendritic structure of Al-5%Si alloy under different solidification conditions: (a) Static; (b) With ultrasound at stage of liquid phase; (c) With ultrasound at stage of nucleation and growth of primary $\alpha(\text{Al})$ phase; (d) With ultrasound during eutectic transformation

2.4 显微硬度和压缩强度

为了建立微观组织与力学性能之间的关系，分别测定了 Al-5%Si 合金在不同凝固条件下初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和共晶组织的显微硬度，如图 7(a) 所示。相对静态条件，在不同凝固阶段分别施加超声波后，Al-5%Si 合金凝固组织中初生 $\alpha(\text{Al})$ 相和共晶组织的显微硬度均在一定程度上有所提高。对于初生 $\alpha(\text{Al})$ 相，超声施加于合金的液相阶段时，显微硬度提高最大，比静态提高 21.1%，这是因为超声在液相阶段施加时对合金熔体的除气效果最好，对凝固组织的致密度提高最大。而对于 (Al+Si) 共晶组织，超声施加于合金的初生相形核和长大阶段时，显微硬度提高最大，比静态时提高 23.0%，这是因为在该阶段超声对共晶组织的细化作用最为明显。

图 7(b) 所示为不同凝固条件下亚共晶 Al-5%Si 合金试样的压缩应力-应变曲线。在不同凝固阶段施加超声后，Al-5%Si 合金试样在压缩过程中均发生墩粗变形，均表现出较好的塑性。在静态条件时，Al-5%Si 合金的屈服强度为 41 MPa，而在不同阶段施加功率超声之后，屈服强度均在一定程度上提高，尤其在初生相形核和长大阶段施加功率超声时，屈服强度提高最

大，相比静态条件提高了约 37%。Al-5%Si 合金的屈服强度之所以在初生相形核和长大阶段施加功率超声时提高最大，是因为此阶段超声对凝固组织的细化效果最为显著，即所谓的细晶强化机制。由此可知，在凝固过程中施加超声能够明显提高 Al-5%Si 合金的屈服强度。

3 结论

1) 在 Al-5%Si 合金的不同凝固阶段分别施加超声波，均对合金熔体有除气作用，且合金熔体中液相的体积分数越大，超声除气的效果越佳。

2) 静态条件下，初生 $\alpha(\text{Al})$ 相为粗大的树枝晶，而超声作用于液相阶段后，形成了较小的等轴枝晶；超声作用于初生相形核和长大阶段后，形成了细小的球状晶，且晶粒细化最为显著；超声作用于共晶转变阶段后，初生 $\alpha(\text{Al})$ 相树枝晶出现了碎断。

3) 超声空化效应引发的晶体形核是初生 $\alpha(\text{Al})$ 相晶粒细化的最主要原因。同时，超声在合金熔体中传播时能够显著改善晶胚与杂质的润湿程度而促进形核，

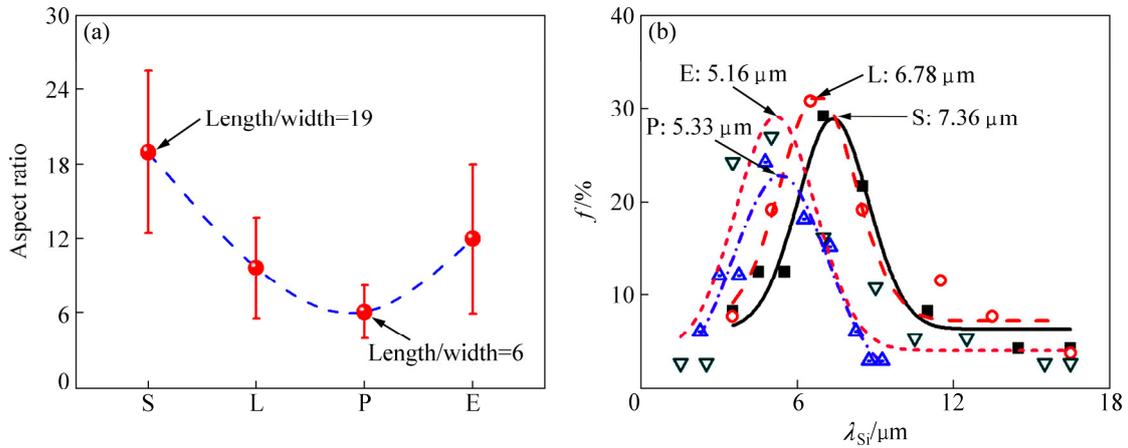


图 6 枝晶间(Si)相随凝固条件变化的规律

Fig. 6 Growth characteristics of interdendritic (Si) phase under different solidification conditions: (a) Aspect ratios of divorced (Si) phase; (b) Spacing distribution of eutectic (Si) phase

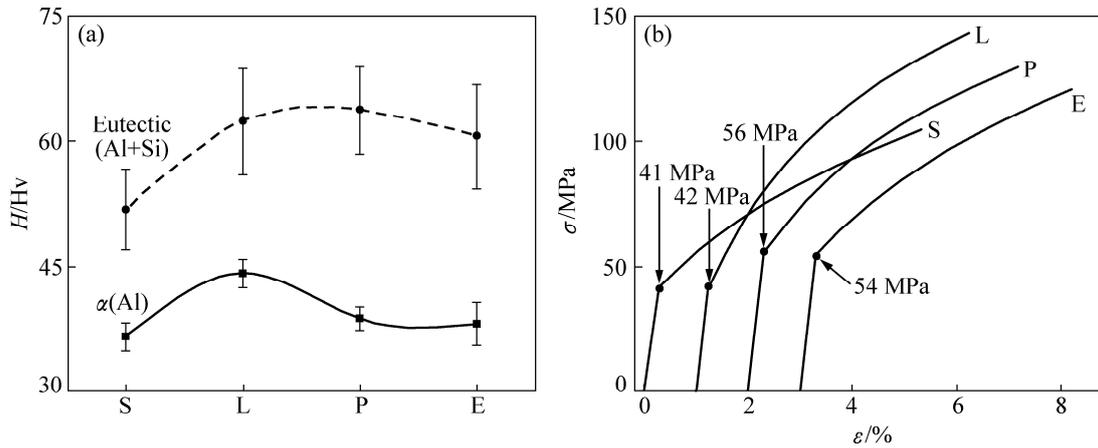


图 7 亚共晶 Al-5%Si 合金力学性能与凝固条件的相关性

Fig. 7 Relations between mechanical properties and solidification condition in hypoeutectic Al-5%Si alloy: (a) Microhardness of $\alpha(Al)$ phase and (Al+Si) structure; (b) Compressive strain-stress curves of samples under different solidification conditions

这也是超声场中晶粒细化的重要机制之一。此外，超声的力学效应也能打碎正在生长的初生 $\alpha(Al)$ 相枝晶，使晶粒细化。

4) 在 Al-5%Si 合金的不同凝固阶段施加超声，均能在一定程度上减小离异(Si)相的长宽比和共晶(Si)相的间距，细化枝晶间组织。

5) 在不同凝固阶段分别施加超声，显微硬度和屈服强度较之静态条件下均明显提高。因此，在凝固过程中施加超声场是改善 Al-5%Si 合金力学性能的有效途径。

致谢：感谢陕西省“青年科技新星”计划资助本文，同时感谢刘金明、孔章环和朱海哲等同事在实验及分析过程中给予的有益帮助。

REFERENCES

[1] QIAN M, RAMIREZ A. An approach to assessing ultrasonic attenuation in molten magnesium alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(1): 1669-1625.

[2] JIAN X, XU H, MEEK T T, HAN Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59(2): 190-193.

[3] 高学鹏, 李新涛, 郝喜望, 吴亚萍, 李喜孟, 李廷举. 功率超声对 Al-Si 合金凝固过程中溶质偏析的抑制效应[J]. 物理学报, 2007, 56(2):1188-1194.

GAO Xue-peng, LI Xin-tao, QIE Xi-wang, WU Ya-ping, LI Xi-meng, LI Ting-ju. Effect of high-intensity ultrasound on restraining solute segregation in Al-Si alloy casting process[J].

- Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 1188–1194.
- [4] JIA S, NASTAC L. The influence of ultrasonic stirring on the solidification microstructure and mechanical properties of A356 alloy[J]. Chemical and Materials Engineering, 2013, 1: 69–73.
- [5] ZHAI W, WEI B B. Peritectic solidification characteristics of Sb-Sn alloy under ultrasonic vibration[J]. Materials Letters, 2015, 138: 1–4.
- [6] JIAN X, MEEK T T, HAN Q. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(5): 893–896.
- [7] 罗 执, 张 杨, 赵愈亮, 张卫文. 复合场作用下 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 707–714.
- LUO Zhi, ZHANG Yang, ZHAO Yu-liang, ZHANG Wei-wen. Microstructure and mechanical property of Al-5.0Cu-1.0Fe alloy treated by compound field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 707–714.
- [8] ESKIN G I. Improvement of the structure and properties of ingots and worked aluminum alloy semifinished products by melt ultrasonic treatment in a cavitation regime[J]. Metallurgist, 2010, 54(7/8): 505–513.
- [9] FORN A, SILVA M D, BAILE M T, PICAS J A, FAURIA A. Effect of ultrasounds during the solidification process of the A357 aluminium alloy[J]. Solid State Phenomena, 2012, 192/193: 428–432.
- [10] LIN J, BAI G, LIU Z, NIU L, LI G, WEN C. Effect of ultrasonic stirring on the microstructure and mechanical properties of in situ Mg₂Si/Al composite[J]. Materials Chemistry and Physics, 2016, 178: 112–118.
- [11] LIU Z, HAN Q, LI J. Fabrication of in situ Al₃Ti/Al composites by using ultrasound assisted direct reaction between solid Ti powders and liquid Al[J]. Powder Technology, 2013, 247: 55–59.
- [12] 李新涛, 高学鹏, 李廷举, 李喜孟, 金俊泽, 殷国茂. 连铸过程中超声细晶技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 377–380.
- LI Xin-tao, GAO Xue-peng, LI Ting-ju, LI Xi-meng, JIN Jun-ze, YIN Guo-mao. A experimental study of grain refinement by ultrasonic treatment during continuous casting[J]. Rare Materials and Engineering, 2007, 36(3): 377–380.
- [13] 李军文, 桃野正, 付 莹. 超声波功率对铸锭内的气孔及组织细化的影响[J]. 铸造, 2007, 56(2): 152–154.
- LI Jun-wen, MOMONO Tadashi, FU Ying. Effect of ultrasonic power on density and refinement in aluminum ingot[J]. Foundry, 2007, 56(2): 152–154.
- [14] 乐启炽, 张志强, 崔建忠, 刘鸿明, 高恩保. 超声孕育处理对 AS41 镁合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 813–819.
- LE Qi-chi, ZHANG Zhi-qiang, CUI Jian-zhong, LIU Hong-ming, GAO En-bao. Effect of ultrasonic inoculation treatment on solidification microstructure of AS41 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 813–819.
- [15] KOTADIA H R, DAS A, DOERNBERG E, SCHMID-FETZER R. A comparative study of ternary Al-Sn-Cu immiscible alloys prepared by conventional casting and casting under high-intensity ultrasonic irradiation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 131(1): 241–249.
- [16] LI Y L, FENG H K, CAO F R, CHEN Y B, GONG L Y. Effect of high density ultrasonic on the microstructure and refining property of Al-5Ti-0.25C grain refiner alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1): 518–523.
- [17] PATEL B, CHAUDHARI G P, BHINGOLE P P. Microstructural evolution in ultrasonicated AS41 magnesium alloy[J]. Materials Letters, 2012, 66(1): 335–338.
- [18] ADLER L, ROSE J H, MOBLEY C. Ultrasonic method to determine gas porosity in aluminum alloy castings: Theory and experiment[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(2): 336–347.
- [19] ABRAMOV O V. Action of high intensity ultrasound on solidifying metal[J]. Ultrasonics, 1987, 25(2): 73–82.
- [20] CHEN R R, ZHENG D S, GUO J J, MA T F, DING H S, SU Y Q, FU H Z. A novel method for grain refinement and microstructure modification in TiAl alloy by ultrasonic vibration[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 653: 23–26.
- [21] ZHENG D S, CHEN R R, MA T F, DING H S, SU Y Q, GUO J J, FU H Z. Microstructure modification and mechanical performances enhancement of Ti₄₄Al₆Nb₁Cr alloy by ultrasound treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 409–417.
- [22] CHEN R R, ZHENG D S, MA T F, DING H S, SU Y Q, GUO J J, FU H Z. Effects and mechanism of ultrasonic irradiation on solidification microstructure and mechanical properties of binary TiAl alloys[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017: 120–133.
- [23] WANG F, ESKIN D, MI J, CONNOLLEY T, LINDSAY J, MOUNIB M. A refining mechanism of primary Al₃Ti intermetallic particles by ultrasonic treatment in the liquid state[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 354–363.
- [24] 范金辉, 翟启杰. 物理场对金属凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 11–17.
- FAN Jin-hui, ZHAI Qi-jie. Effects of physical fields on solidification structure of metals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 11–17.
- [25] HEM S L. The effect of ultrasonic vibrations on crystallization processes[J]. Ultrasonics, 1967, 5(4): 202–207.
- [26] WANG G, DARGUSCH M S, QIAN M., ESKIN D G, STJOHN D H. The role of ultrasonic treatment in refining the as-cast grain structure during the solidification of an Al-2Cu alloy[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 408: 119–124.
- [27] ESKIN G I. Influence of cavitation treatment of melts on the

- processes of nucleation and growth of crystals during solidification of ingots and castings from light alloys[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1994, 1(1):S59-S63.
- [28] ATAMANENKO T V, ESKIN D G, SLUITER M, KATGERMAN L. On the mechanism of grain refinement in Al-Zr-Ti alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(1): 57-60.
- [29] 蒋伟, 胡恺琪, 朱向镇, 武玉英, 刘相法. Al-Si 合金力学行为对 Si 相形貌敏感性的差异[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(1): 15-23.
- JIANG Wei, HU Kai-qi, ZHU Xiang-zhen, WU Yu-ying, LIU Xiang-fa. Difference in sensitivity of mechanical behaviors for Al-Si alloys to Si phase morphologies[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(1): 15-23.
- [30] 张勇, 李红萍, 康唯, 张新明. 高强铝合金时效微结构演变与性能调控[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(7): 1323-1336.
- ZHANG Yong, LI Hong-ping, KANG Wei, ZHANG Xin-ming. Aging microstructure evolution in high strength aluminum alloys and performance controlling[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(7): 1323-1336.
- [31] GUAN R G, DI T. A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 30(5): 1-24.
- [32] WANG Y X, GUAN R G, HOU D W, ZHANG Y, JIANG W S, LIU H N. The effects of eutectic silicon on grain refinement in an Al-Si alloy processed by accumulative continuous extrusion forming[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(2):1137-1148.
- [33] GUO W B, LUAN T M, LENG X S, HE J S, YAN J C. Interfacial microstructure evolution and mechanical properties of Al/Sn joints by ultrasonic-assisted soldering[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(4): 962-970.
- [34] TURNBULL D, CECH R E. Microscopic observation of the solidification of small metal droplets[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(8): 804-810.
- [35] CUI W, WANG C, YAN J, WANG Z, WEI D. Wetting and reaction promoted by ultrasound between sapphire and liquid Al-12Si alloy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 196-201.
- [36] JUNG J G, AHN T Y, CHO Y H, KIM S H, LEE J M. Synergistic effect of ultrasonic melt treatment and fast cooling on the refinement of primary Si in a hypereutectic Al-Si alloy[J]. *Acta Materialia*, 2017.
- [37] WANG F, ESKIN D, CONNOLLEY T, MI J W. Influence of ultrasonic treatment on formation of primary Al₃Zr in Al-0.4Zr alloy[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(5): 977-985.
- [38] HICKLING R. Transient, high-pressure solidification associated with cavitation in water[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(21): 2853-2856.
- [39] BARBER B P, PUTTERMAN S J. Observation of synchronous picosecond sonoluminescence[J]. *Nature*, 1991, 352(6333): 318-320.
- [40] GALE W F, TOTEMEIR T C. *Smithells metals reference book*[M]. 8th ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

Dynamic solidification and mechanical properties of hypoeutectic Al-5%Si alloy within ultrasonic field

WANG Bao-jian, ZHAI Wei, WEI Bing-bo

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: High-intensity ultrasound at a resonant frequency of 20kHz and power of 500 W was introduced into different solidification stages of hypoeutectic Al-5%Si alloy, and the formation mechanism of primary $\alpha(\text{Al})$ phase and its interdendritic structure was explored. The results show that porosity in the solidified structure reduces remarkably, and the primary $\alpha(\text{Al})$ phase transforms from coarse dendrites under static into equiaxed grains or fragmented dendrites by introducing power ultrasound during different solidification stages. Meanwhile, the interdendritic structure is also refined by ultrasound. When the power ultrasound is applied into liquid phase, it accelerates the nucleation of primary $\alpha(\text{Al})$ phase by enhancing wetting status between the crystal embryos and impurities in the alloy melt. If ultrasound is employed during nucleation and growth of primary $\alpha(\text{Al})$ phase, the cavitation-induced nucleation and cavitation-induced fragmentation take the responsibility of most remarkable grain refinement. Once the ultrasound is introduced in eutectic transformation, the dendritic fragmentation results from mechanical effect accounted for the reducing in grain size of primary $\alpha(\text{Al})$ phase. Both microhardness and yield strength can be improved after ultrasound is applied at each solidification stage of Al-5%Si alloy, indicating that applying power ultrasound is an effective way to moderate the mechanical properties of Al-Si alloys.

Key words: ultrasonic field; eutectic solidification; dynamic nucleation; cavitation effect; structure formation; mechanical property

Foundation item: Projects(51327901, 51727803, 51571164) supported by National Natural Science Foundation of China

Received date: 2017-09-05; **Accepted date:** 2018-04-03

Corresponding author: WEI Bing-bo; Tel: +86-29-88431669; E-mail: bbwei@nwpu.edu.cn

(编辑 何学锋)