

文章编号:1671-6833(2009)04-0093-05

功率超声对纯铝凝固过程的影响及衰减特性分析

胡仕成, 杨运猛, 胡永清, 付明志

(中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要:研究了超声波对凝固过程的影响,探讨了不同超声功率对纯铝凝固过程冷却温度变化,声流和空化对细化晶粒的作用,实验结果表明:在不同超声功率下处理的铸锭,凝固时间缩短,温度分布更加均匀,温度梯度场变小,在不同功率超声振动下凝固组织平均晶粒尺寸从 500 μm 变成 90 μm ,但随着超声功率的增加细化程度不再明显.超声的衰减作用使铸锭不同位置的晶核细化程度有很大的不同,由于空化效应和声流搅拌双重作用效应,使凝固组织细化程度提高.

关键词:功率超声;温度曲线;凝固组织;空化;声流

中图分类号: TG 249.9, TB 559

文献标识码: A

0 引言

铝工业的发展对基础纯铝板坯的组织要求越来越高,获得细小均匀的晶粒是能否获得高性能铝材的一个关键因素^[1-2].超声波导入到液态金属中,金属内部形成剧烈的强迫对流,它改变凝固界面前的温度场和溶质浓度场,对凝固组织形态产生影响.相对于自然对流冷却,强迫对流冷却的强度可以达到它的数十倍.热对流引起熔体中温度不同的各部分相互混合,造成熔体宏观运动后进行热量传递.超声波处理情况下,强迫对流对熔体冷却速率产生强大的影响,国外学者对金属的凝固过程开展了大量工作,取得了不少成果^[3-5].20 世纪 30 年代, D. Loomis、W. Wood 和 S. Dnilov 等学者分别研究了超声振动对金属和有机物凝固过程的影响,随后 P. Alekseev、G. Eskin 和 O. Abramov 等人也分别对超声场下金属的凝固规律进行了探索^[6-7].我国李喜孟、刘清梅^[8-10]等采用不同超声处理方式处理,均发现超声处理能使具有不同点阵的金属晶粒细化,金属熔点较低晶粒形貌变化最大,随着材料熔化温度增加,细化效果减弱.将超声振动应用于合金铸造、铸轧是当前国际研究的热点^[8-10],因此迫切需要对铝合金超声进行系统深入地研究.以往的试验研究普遍表明,空化效应产生瞬时的高温、高压引发了巨大的能量起伏,在熔体中造成过冷,产生了大量的晶

核;同时声流搅拌效应将冲蚀和打断长大的枝晶,促进溶质和碎小晶体的扩散.然而,超声对温度场的改变还没有深入研究,笔者主要研究在纯铝凝固过程中施加超声场,考察超声场下凝固过程温度的变化规律,并具体探讨不同超声振动对不同铸锭位置金属凝固组织细化程度的影响和超声衰减情况.

1 试验材料、装置与试验方法

1.1 试验材料与装置

试验材料为工业纯铝大铸锭,材料的合金成分如表 1 所示.试验使用的超声设备包括:他激式超声波发生器,具有 5 个功率档位(105 W、135 W、170 W、200 W、240 W);PZT 压电陶瓷换能器、变幅杆、钛合金工具杆、电阻丝加热炉及配套的温度控制记录仪、热电偶、坩埚、位移控制操作台、Leica 台式金相显微镜.

整个试验装置如图 1 和图 2 所示,通过热电偶测量不同位置的冷却温度,并用温度控制记录仪分析采集数据.

表 1 试验用工业纯铝的合金成分

Tab.1 Alloy composition of industrial pure aluminum in experiment

组分	Si	Mn	Cu	Fe	Zn	Al
质量分数	0.001	0.001	0.001	0.086	0.01	余量

收稿日期:2009-01-01;修订日期:2009-07-13

基金项目:国家“863”科技计划项目(2008AA03Z103)

作者简介:胡仕成(1968-),男,湖南桃江人,中南大学副教授,博士,主要从事材料成型工艺及装备研究.

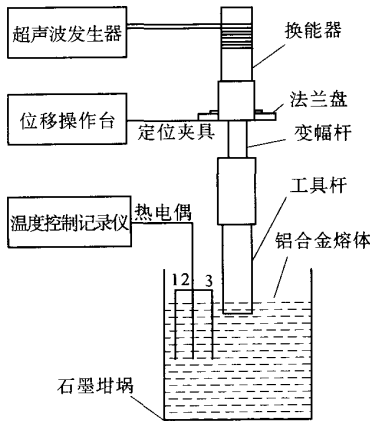


图1 超声铸造试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic casting experiment apparatus

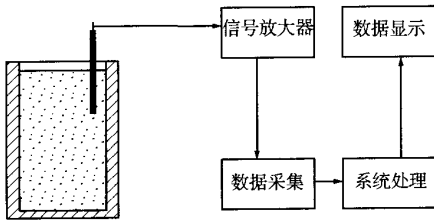


图2 热分析系统装置

Fig.2 The thermal analyzer of experiment

1.2 试验方案

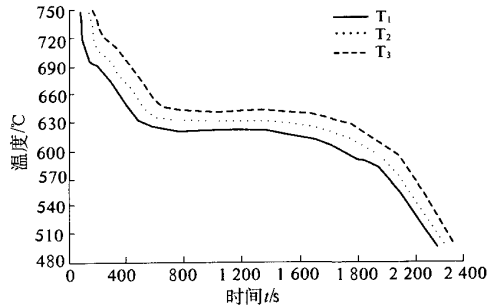
将铝块置于石墨坩埚并放入电阻加热炉进行熔炼,待其完全熔化后,添加铝打渣剂打渣净化铝熔体.持续加热至 850 ℃,移出石墨坩埚,在炉外自然空冷,待熔体温度降至 785 ℃时,对熔体进行超声处理.施振方式为铝熔体中心处顶部持续导入超声波.每次试验工作频率为 19 ± 0.5 kHz,固定超声波发生器输出功率为:(a)自然冷却,(b)施加 105 W 超声,(c)施加 170 W 超声处理,(d)施加 240 W 超声处理.分别测量不同功率超声振动对凝固温度曲线的变化,然后将不同功率超声下的样品从中间施振处对称切开,研磨、化学抛光后用强酸对观察面进行浸蚀处理,观察铸锭凝固组织.

2 结果分析与讨论

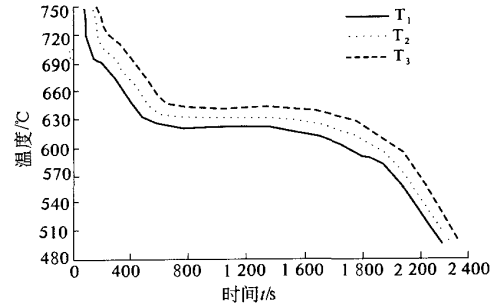
2.1 功率超声对冷却温度场的变化

图2是实验测得的3条冷却曲线图.图中从上到下的冷却曲线依次代表3根不同的热电偶测出的温度变化数据,分别用 $T_1 \sim T_3$ 表示,最下方的曲线用 T_1 表示,其最靠近坩埚壁,最上方的冷却曲线用 T_3 表示,靠近超声波发生器.

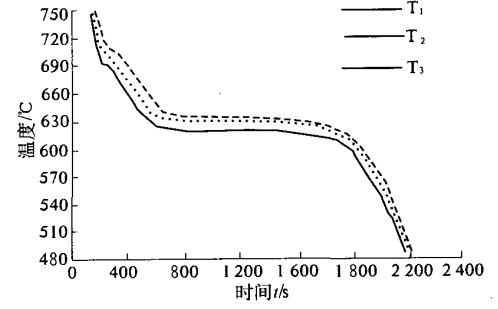
经过超声波处理的铝熔体比未经超声波处理的各点的时间差有很大的差距,第一拐弯处(液相



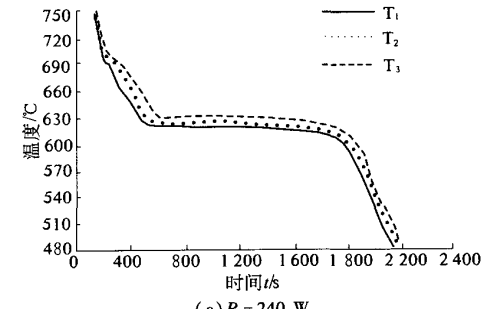
(a) $P = 0$



(b) $P = 105 \text{ W}$



(c) $P = 170 \text{ W}$



(d) $P = 240 \text{ W}$

图2 不同超声功率对熔体凝固曲线影响

Fig.2 Cooling curves of pure Aluminum with different ultrasonic treatments

线)到第二拐弯(固相线),在没有施加超声时凝固时间为 572 s,总凝固时间为 2 560 s,坩埚壁到中心点最大温度差达到 9 ℃;当施加超声功率 105 W 时,第一拐弯处到第二拐弯凝固时间变化为 370 s,坩埚壁到中心点最大温度差减少到 5 ℃;随着功率增加液相线到固相线时间变短,当

功率增加到 240 W 时,时间变化为 260 s,总的凝固时间为 2 020 s,坩埚壁到中心点最大温度差减少到 3 ℃ 左右。

这说明超声波的声流能有效改善熔体凝固温度场,当超声波导入到金属液中,由于在熔体中形成一定的声压喷流直接离开超声变幅杆的端面并在整个流体中形成环流,对金属液进行搅拌,提高了温度场分布的均匀性,减小了整体熔体的温度梯度。

2.2 功率超声对凝固组织的影响

由图 3 可知,未加超声波形成的铸锭组织多为发达的树枝晶、柱状晶,晶粒尺寸粗大.引入功率超声波后,一次枝晶被打断,晶粒尺寸减小,但由于声功率较小,所形成的晶粒尺寸偏大,同时发现组织中仍存在许多枝晶网胞;当超声功率 $P = 170\text{ W}$ 时,二次枝晶也被打断,晶粒进一步细化,超声细化效果达到了最佳状态,若继续增大声功率,强烈的空化与声流效应使得铝熔体瞬时局部温度升高,延长了晶体的长大时间,晶粒尺寸变化不是很明显,超声细化效果没有增强.试验统计了单位面积上所有晶粒的线性尺寸,得到铸锭组织平均晶粒尺寸随超声功率变化的规律,如图 4 所示。

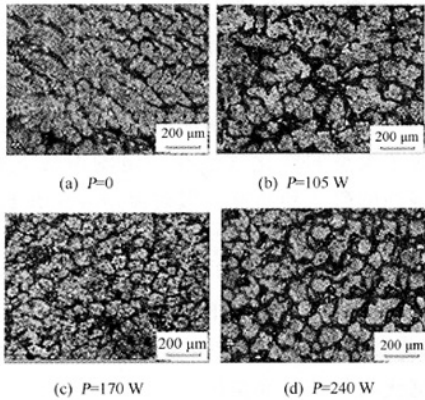


图 3 不同超声功率对熔体凝固组织影响

Fig.3 Microstructures obtained with the application of different ultrasonic powers($\times 50$)

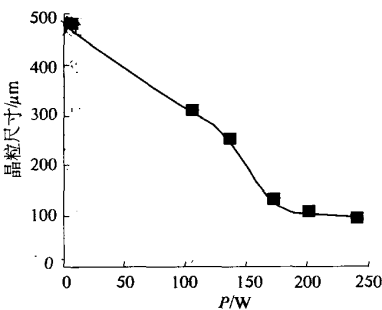


图 4 晶粒尺寸随超声波功率的变化

Fig.4 Average grain size with different ultrasonic powers

施加超声时,晶粒十分粗大,且组织分布较不均匀尺寸偏大.经超声波处理后铝凝固组织明显细化,随着超声功率的增加,组织细化程度明显提高,但功率提高到一定程度,超声波的细化作用不再明显增强.当超声波功率在 135 W 时,凝固组织一部分转化为树枝晶,同时还有部分等轴晶,晶粒尺寸明显缩小,但此时组织仍为连成一体的枝晶网胞,同时存有少部分的粗大晶粒;超声波功率为 170 W 时,其凝固组织完全成等轴晶,树枝晶进一步被打碎,晶粒尺寸趋于均匀,组织细化非常明显,240 W 时,凝固组织进一步细化不再明显。

2.3 功率超声对凝固组织有效晶细范围

图 5 是观察区域晶粒尺寸分布示意图.图 6 是在金属凝固过程中施加功率超声获得细化金属组织,从图 6 可以看出: B-1 ~ B-6 在不同位置凝固组织细化程度存在很大的不同,在靠近超声波施加的地方即 B-1 至 B-4 位置, B-1 处因为超声波径向作用不是很明显,因此有粗大的树枝晶、柱状晶细化不是很明显, B-2、B-3、B-4 组织中粗大的树枝晶、柱状晶已被细小等轴晶取代,在远离振动源处 B-5 和 B-6,晶粒开始变得比较粗大,但它们的显微组织明显不同于 B-2 和 B-4.在改变超声输出功率得到的铸锭组织中,发现当超声输出功率越大时时, B-6 处晶粒细化效果越好。

2.4 功率超声对熔体凝固有效作用范围分析

高能超声在熔体中传播时,由于声波和铝熔体粘滞力的交互作用,有限振幅衰减使液体从声

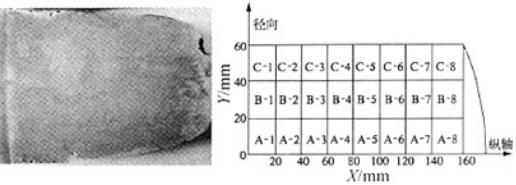


图 5 观察区域分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of distribution of observed areas

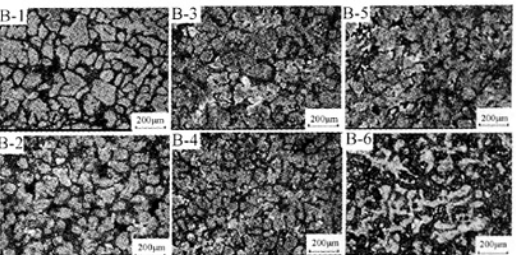


图 6 不同位置的凝固组织

Fig.6 Different positions of the solidifaction

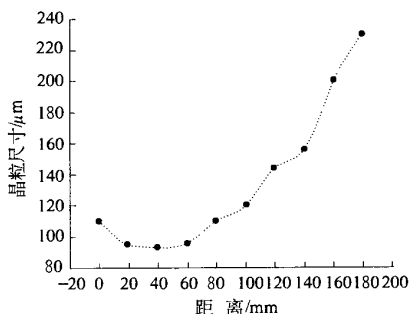


图7 功率超声细晶有效作用范围

Fig.7 The ultrasonic fine-grained range

源处开始在导入杆周围形成一定声压梯度,导致超声波变幅杆前端熔液的流动,熔体在容器中的单项流动的速度为^[11]:

$$v_x = \frac{\Delta P}{\mu} \frac{l_y^2}{l_x} \quad (1)$$

声流的最大速度能达到:

$$v_{\max} = \sqrt{2\pi} f A \quad (2)$$

式中: ΔP 为声压在 X 方向的衰减量; μ 为熔体黏度; l_x, l_y 分别为容器 X 和 Y 方向上的长度; f 为频率; A 为变幅杆端面最大振幅。

超声波产生的声流速度比质点振动速度小的多但亦能达到熔体热对流速度的数10倍。当功率超声的导入,一定能量的超声波在传递过程中,由于散射、折射及分子间振动摩擦吸收声能等原因,必然会产生衰减,反映在声压上,就是从工具杆端面沿声波传播方向形成一定的压力梯度,因此顺着压力梯度方向引发了熔体的环向流动,声流与热对流将发生强烈的交互作用,同时空化泡在崩溃时,泡壁运动速度非常高,能形成速度极大的微射流,加强了声流的搅拌效应。能够显著改变熔体温度梯度,可以明显提高温度场的均匀性。

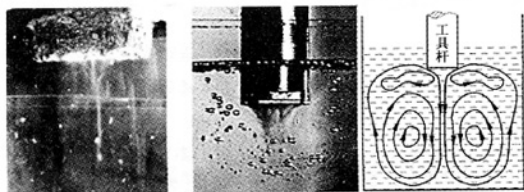


图8 超声声流效应

Fig.8 Effect of ultrasonic acoustic stream

超声波在介质中传播时,随着传播距离的增加,声束扩散和散射以及介质吸收等会使超声波在传播过程中引起衰减,超声波传播距离的声强能产生空化有效作用距离 x 为^[12]

$$x = \frac{\delta^3 \rho c^3}{\omega \tau_0 k \left(T + \frac{Q}{K} \right)} \frac{I_0}{I_b} \quad (3)$$

式中: I_b 为空化阈声强; I_0 为超声波输入强度; τ 为原子在平衡位置的震动周期; k 为波尔兹曼常数; T 为熔体的绝对温度; δ 为相邻原子平衡位置间的平均距离; Q 为原子移动的激活能。

超声的扩散衰减可以忽略,假设沿超声波的方向上能量是均匀的,在金属熔体中的冲击力与传播的距离之间的关系式为:

$$F_r = I_m \cdot S \cdot \exp[-2ax] \cdot e_1 / c \quad (4)$$

式中: I_m 为实际功率强度; e_1 为金属熔体吸收的功率超声能量; a 为衰减系数; S 为单位面积; c 为超声波速度。

因此一定距离内在超声波作用下空化和声流效应对温度场的均布起到重要的作用,功率超声在金属熔体中的衰减作用力是非常明显的,在靠近工具头端,力很强,可以产生强烈的空化效应,从而可以改善金属的组织、细化晶粒和提高力学性能。然而随着超声在金属熔体中的传播,力的作用产生衰减。当力小到不能使金属熔体产生空化效应时,功率超声就不能对金属的凝固组织产生较大的影响,从而达不到细化金属晶粒。

2.5 超声对凝固组织细晶机理分析

(1) 超声波空化泡崩溃断裂理论。高能超声波形成了大量的空化气泡在一定的声压下崩溃,形成很高的激波和高速的微射流击碎正在长大的晶体或使较远处晶枝产生疲劳断裂,击碎的晶体散布在溶液中,成为新的晶体质点,通过声流和冲击波产生的搅拌力作用下又使其均匀弥散在熔体中,因此超声空化处理能明显细化金属组织晶枝,得到细化均匀的凝固组织。

(2) 空化泡长大和崩溃过程中形成有效过冷生核理论。超声波在产生空化泡半径在增大以及缩小过程中内部的蒸气由于从外部熔液中吸取热量而降低了空化泡的温度,这将导致空化泡表面的金属熔体温度降低,造成局部过冷,因此在空化泡附近形成晶核,使晶核的形核率增加;在空化气泡崩溃的过程中,会瞬间在极有限的体积内产生很大的温度梯度和压力梯度,空化效应产生瞬时的高温、高压引发了巨大的能量起伏,在这样复杂的条件下会形成局部过冷,生成晶粒。

3 结论

(1) 超声空化和声流效应对凝固热过程的变

化对金属形核和长大过程有很大的影响,最终在凝固组织中得到体现。

(2)超声波在液体中传播时产生有限振幅衰减使介质从声源处开始形成一定的声压梯度,导致液体的快速流动.流动引起了质点快速传输和液态金属温度场的变化.由于压力梯度的改变,熔体在空间流动过程中形成了复杂的流动场和压力场分布,加强了声流的搅拌效应.能够显著改变熔体温度梯度,可以明显提高温度场的均匀和晶核的扩散性。

(3)高能超声能制备出晶粒均匀分布、细化的金属组织是因为空化泡瞬时产生的高压作用下形成的强冲击波微射流使熔体中成团的晶枝被击碎,实现了微观的均匀分散,使金属组织得到细化。

参考文献:

- [1] ESKIN G, GS M. Effect of cavitation melt treatment on the structure refinement and property improvement in cast and deformed hypereutectic Al - Si alloys [J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 65 - 70.
- [2] 李军文, 桃野正, 付莹. 超声功率对铸镜内的气孔及组织细化的影响[J]. 铸造, 2007, (2): 70 - 73.
- [3] 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 (1): 11 - 15.
- [4] 马立群, 舒光冀, 陈 锋. 金属熔体在超声场中凝固的研究[J]. 材料科学与工程, 1995, 13 (4): 2 - 7.
- [5] 李英龙, 李宝绵, 刘永涛, 等. 功率超声对合金组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9 (4): 719 - 722.
- [6] ESKIN G I. Ultrasonic treatment of light alloy melts [M]. Amsterdam: Gordon & Breach, 1998: 1 - 5.
- [7] ESKIN G I. Ultrasonic treatment of molten aluminum [M]. Moscow: Metallurgiya, 1985: 1 - 10.
- [8] PAN I, YOSHIDA M, SASAKI G. Ultrasonic insert casting of aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 2000, 43 (2): 155 - 159.
- [9] ABRAMOV O V. Solidification of metals in an ultrasonic field [M]. Moscow: Metallurgiya, 1972: 154 - 168.
- [10] IRSID. Ultrasonic can replace mould oscillation during billet Casting [J]. Steel Times Int, 1989, 10 (5), 45.
- [11] DING L, QI F P, ZHAI Q J. Thermal analysis on the solidification process of Sn - Sb alloy under power ultrasonic [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2003, 27 (7): 1 - 2.
- [12] 刘青梅. 超声波对金属凝固特性及组织影响的研究 [D]. 长沙: 中南大学材料工程学院, 2007: 101 - 102.

Effect of Ultrasonic Treatment on Solidification Characteristic and Analysis the Ultrasonic Attenuation Mechanism

HU Shi - cheng, YANG Yun - meng, HU Yong - qing, FU Ming - zhi

(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing, Ministry of Education; Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Ultrasonic treatment on pure aluminum solidification process was studied. The cooling temperature curves and cavitation and acoustic stream refined by ultrasonic was discussed. Experimental results showed that solidification structures of casting ingot treated by ultrasonic are refined significantly. The solidification process time becomes shorter and temperature gradient field smaller, Average grain size was 90 ~ 500 μm , With the increasing of ultrasonic power, more refined structure can be obtained. However, when the ultrasonic power reaches a certain value and different positions of the the casting ingot, the effect of refining grains does not increase significantly. Cavitation effect can effectively function and solidification structure can be refined better aided by agitating effect of acoustic stream.

Key words: power ultrasonic; temperature curve; solidification structure; cavitation; acoustic stream