

超声施振方式对纯铝凝固组织细化规律的研究

Research on the Solidification Structure Refining Laws of
Pure Aluminum Under Different Methods of
Ultrasonic Vibration

蒋日鹏, 李晓谦, 张立华, 张 雪, 吴 钰, 谢恩华
(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

JIANG Ri-peng, LI Xiao-qian, ZHANG Li-hua, ZHANG Xue, WU Yu, XIE En-hua
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 分别采取静态连续施振和动态间歇施振两种方式对工业纯铝熔体进行超声处理, 并根据空化效应和声流效应理论详细分析了铸锭凝固组织的细化规律。实验结果表明, 两种施振方式对凝固组织均有不同程度的细化。连续施振条件下, 不同的超声功率对组织的细化效果有所不同。当选取施振功率为 170W 时, 组织细化作用最强, 所得晶粒尺寸最小。间歇施振条件下, 当超声功率从大到小加载时, 组织细化较为理想。每隔不同温度施以不同时间的超声振动时, 若处理时间与温度选取适当则能获得比连续施振时更为细小的组织。

关键词: 铝熔体; 施振方式; 超声振动; 凝固组织; 晶粒

中图分类号: TB559; TG249.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)02-0006-05

Abstract: Industrial aluminum melt was treated by ultrasonic with two methods: applying static continuous vibration and dynamic intermittent vibration. And the solidification structure refining laws was analyzed according to the theory of cavitation and acoustic effects. The results indicate that solidification structures are both refined to different extents by two ways. Under the condition of continuous vibrating, structure refining effects are diverse with different ultrasonic powers. Structure refining effect is best and the grain size is smallest when applying vibrating power 170W. Under the condition of intermittent vibrating, when ultrasonic power varies from small to large, structure refinement is more perfect. Better structure can be obtained if treating time and temperature selected correctly during the process of applying ultrasonic vibration for different time at the diverse temperatures.

Key words: aluminum melt; method of applying vibration; ultrasonic vibration; solidification structure; grain

大规模高性能铝材不能合格生产, 高强铝合金综合性能太低严重制约了本国铝工业的发展, 另一方面, 国民经济及国防建设对铝材的需求却日益增大, 解决根本办法就是要突破技术瓶颈, 努力提高铝合金的强度和韧性, 成功制备满足应用要求的高性能铝坯。为了实现这一目标, 人们探索了很多合金强化方法, 如固溶强化、时效强化、过剩相强化、冷变形强化、组织细化强化^[1, 2]。其中, 组织细化强化作为一种既不损坏金属材料的延性和韧性, 又能极大程度提高合金强度的手段广泛应用于工业领域^[1]。传统的晶粒细化工艺是在铝合金中添加细化剂, 此法不可避免地

产生合金污染, 影响金属的重复使用性^[3]。因此, 开发绿色环保的组织细化工艺引起了世界各国的纷纷重视, 通过引入外场调控金属熔体的凝固过程, 细化铸锭组织是当前国际研究的热点。由于超声波具有空化、声流、机械等特殊非线性效应, 能够促进液相形核, 提高形核率, 打碎枝晶, 抑制晶体长大, 有效细化组织, 美国、俄罗斯、日本等国都对超声细晶技术进行了大量的研究^[4-8]。20 世纪 90 年代, 国内以赵忠兴等人为代表的一批科研工作者对此领域也进行了相关研究^[9-13], 但因为各方面条件的制约, 研究工作还未形成系统性, 将超声振动有效应用于工业生产的成果很

少。所以在铝合金超声铸造上,尚有巨大的研究空间,同时任务十分艰巨。中南大学冶机所一直致力于铝材质量的提高和高性能铝合金的开发,在外场铸造、铸轧上有良好的科研平台和丰富的实践经验^[14, 15],本工作将对超声细晶机理、超声铸造工艺参数对凝固组织的影响规律等展开全面深入的研究,储备理论知识和技术规范,为超声铸造有效应用于工业领域打下基础。本工作主要分析不同的超声施振方式,即静态连续施振与动态间歇施振对纯铝凝固组织的细化规律。

1 实验

1.1 超声功率测量

测量超声波在高温铝熔体的有效功率十分困难,因此实验选用比热小,升温快的甘油溶液进行模拟测试,利用恒流量热法^[16],即在固定工况下,向确定的溶液辐射超声能,每隔一定时间测量液体温升,最后根据热功转换原理,由总温升计算等效超声功率。在测量过程中,应保持超声振动系统处于谐振状态,同时采取保温措施,以保证模拟法测得的功率与在铝熔体中的功率尽可能接近。由图 1 的温升曲线计算得到实验所用超声波发生器五个功率档位对应的输出声功率依次为 105, 135, 170, 200, 240W。

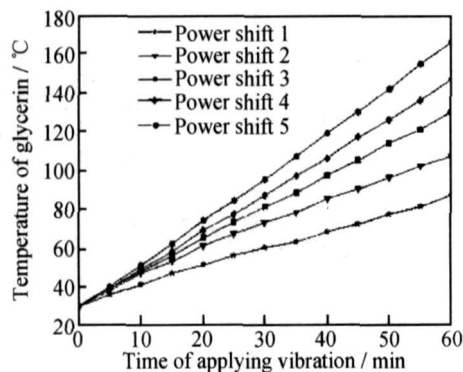


图 1 不同超声功率下的甘油温升曲线

Fig 1 Temperature rising curves of glycerin with different ultrasonic powers

1.2 实验设备及材料

实验选用工作频带宽、输出功率稳定且能根据不同负载工况需要改变频率与功率的他激式超声波发生器,共有 19 ± 0.5 , 20 ± 0.5 , $21 \text{ kHz} \pm 0.5 \text{ kHz}$ 三组备选频率和五个功率档位。使用的超声振动系统包括压电陶瓷式换能器,设计频率为 19.8 kHz ; 45° 钢变幅杆及钛合金工具杆。为了缓解高温工作环境及机械损耗所带来的发热效应,在压电陶瓷片端部安装了散热风扇。其他辅助设备:电阻丝加热炉及配套的温控记录

仪;石墨坩埚,外形尺寸为 $\phi 170 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,壁厚 15mm;热电偶;位移操作台;Leica 台式金相显微镜。整个实验装置如图 2 所示,通过液压式位移操作台调节超声振动系统,可以准确改变工具杆在坩埚铝熔体中的位置,控制超声施振时间,既可满足不同的实验要求,又可保证高温环境下实验操作的安全性。

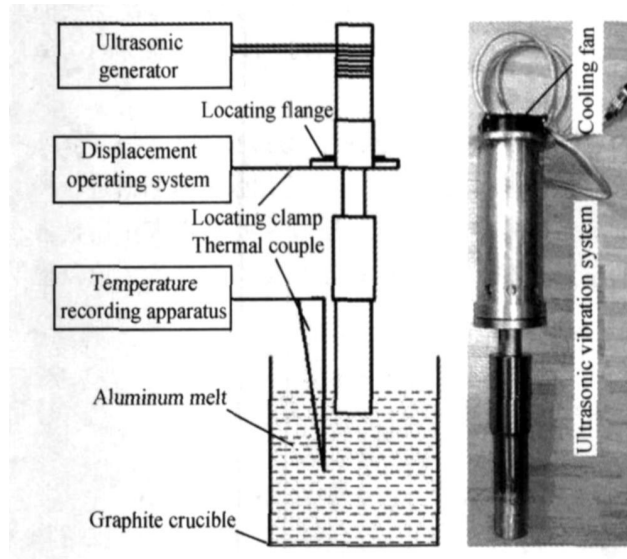


图 2 超声铸造实验装置示意图

Fig 2 Schematic diagram of ultrasonic casting experiment apparatus

实验材料为工业纯铝,材料取自工业半连续铸造成型的 $\phi 300 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 大铸锭,材料的合金成分(质量分数/%)为: 0.001 Si; 0.001 Mn; 0.001 Cu; 0.086 Fe; 0.01 Zn; 余量 Al。

1.3 实验过程

将盛有铝块的石墨坩埚放入电阻丝加热炉进行熔炼,待铝块完全融化后,对铝熔体进行充分搅拌,并持续加热同时添加铝打渣剂进行打渣净化铝熔体。当熔体温度下降到 900°C 时,用夹具将坩埚从电阻炉中移出,使其自然空冷至实验所需温度后,对熔体施以超声振动。在导入声波前,为避免施振时高温铝熔体粘附在冷工具杆上而导致超声振动系统严重过载失谐^[17],无法工作,应先接通超声电源,启动振动系统,对工具杆进行预热处理。超声波从铝熔体中心处顶部导入,主要考察静态连续和动态间歇施振两中工况下铸锭组织的细化规律。具体实验步骤如下:

①首先不施加超声波,制备一个常规铸锭样品,以供对比。

②静态连续施振:使工具杆浸入铝熔体 25mm,超声波发生器工作频率为 $19 \text{ kHz} \pm 0.5 \text{ kHz}$,当熔体温度下降到 750°C 时导入超声波,在液相线 660°C 停止施振,移走振动系统。分别使用五个功率档位重复进行

上述试验。

③动态间歇施振: 工作频率仍为 $19\text{kHz} \pm 0.5\text{kHz}$, 施振深度为 25mm , 在 750°C 时, 功率分别采取依次从小到大和从大到小两种加载方式对铝熔体施以超声振动直至其液相线温度。同法, 固定输出超声功率为 170W , 从 750°C 对铝熔体进行间接的超声振动处理, 即向熔体每隔 10°C 导入超声波一定时间, 每次试验的时间间隔分别取 $30, 40, 50\text{s}$ 。采用温度间隔 30°C , 导入超声波时间为 $100, 130, 160\text{s}$ 重复试验。

将试验铸得的样品从中间施振处对称切开, 取四分之一断面进行研磨、抛光, 最后用强酸对断面进行浸蚀处理。样品冲洗拭干后, 取施振处即超声作用最强烈的位置观察其凝固组织, 同时对样品进行标记以便记录与分析。

2 实验结果与分析

2.1 超声空化效应与声流效应

图 3 为超声空化, 声流效应图。超声波在铝熔体中传播时, 液体分子将受到交变的声压作用。首先负相声压抽拉液体形成空化泡或空穴, 接着正相声压压缩气泡、气穴, 使之以极高的速度闭合、崩溃。气泡崩溃时形成了很多微气泡, 再次溶解于熔体中, 并继续长大、崩溃, 从而保证了整个空化过程持续进行。空化泡破灭蒸发时从其周围带走了大量的热量, 因而使气泡附近的熔体产生瞬时过冷, 且过冷度比正常结晶情况下大很多, 结晶动力增大, 这样就在铝熔体中形成了大量的晶核, 显著提高形核率。同时气泡的崩溃能产生了高达 10^4K 和 10^4MPa 的高温、高压冲击波^[14], 如此强烈的冲击波贯穿于铝熔体中势必引起巨大的能量起伏, 使得近程有序的液体分子转为远程有序排列, 开始自发形核^[18], 二次提高形核率。再者, 强烈的冲击波可以打断或熔断正在生长的晶体, 有效抑制晶体长大。

超声波在熔体传播时将产生衰减, 因此有限强度的超声波, 从其振源处沿传播方向, 声压逐渐减小, 即在工具杆端面沿施振轴线向下形成一定的压力梯度, 从而引发熔体流动, 声压越大, 声流效应越明显, 甚至可以使铝熔液上下翻动。前人研究计算表明由声流效应引发的声流速度可达熔体热对流速度的 $10 \sim 10^3$ 倍^[19], 从而有效提高铝熔体的流动性和改善温度场的均匀性。此外, 声流搅拌可以冲蚀成长的晶体, 并把碎小的晶粒子弥散地分布在铝熔体中, 成为新的晶核, 提高了形核率。

2.2 铸锭凝固组织

图 4 的宏观组织表明, 未加超声振动处理的铸锭,

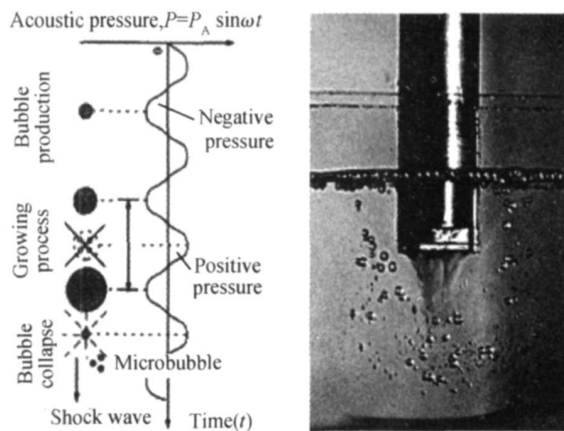


图 3 超声空化、声流效应

Fig. 3 Ultrasonic cavitation and acoustic stream effect

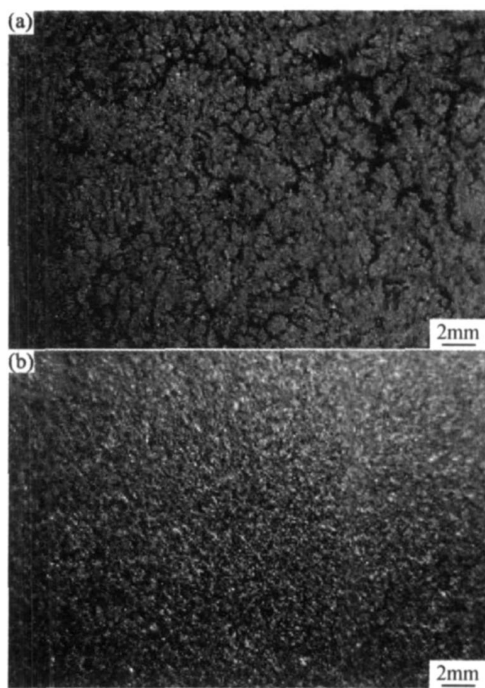


图 4 铸锭宏观组织对比 (a) 未加超声; (b) 施加超声

Fig. 4 A comparison of ingot macrostructures obtained without (a) and with (b) the application of ultrasonic power

树枝晶、柱状晶十分发达, 晶粒尺寸粗大, 组织呈块状, 缩孔、裂纹等铸造缺陷也十分明显。当向熔体引入超声波时, 无论是以何种方式导入, 所得铸锭组织均获得不同程度的细化, 晶粒明显细小, 且分布较为均匀。

微观组织更清晰地反映了这一变化规律, 图 5 显示的是在相同温度下分别采用不同的超声功率连续施振所获得的微观组织, 从图中可以发现, 连续施振时, 随着导入熔体超声功率的增大, 组织的细化程度逐渐提高, 晶粒尺寸缩小, 当功率增大到 $P = 170\text{W}$ 时, 组织细化效果最佳, 继续增大施振超声功率, 超声细化效果反而减弱, 晶粒尺寸再次增大。小功率的超声波引

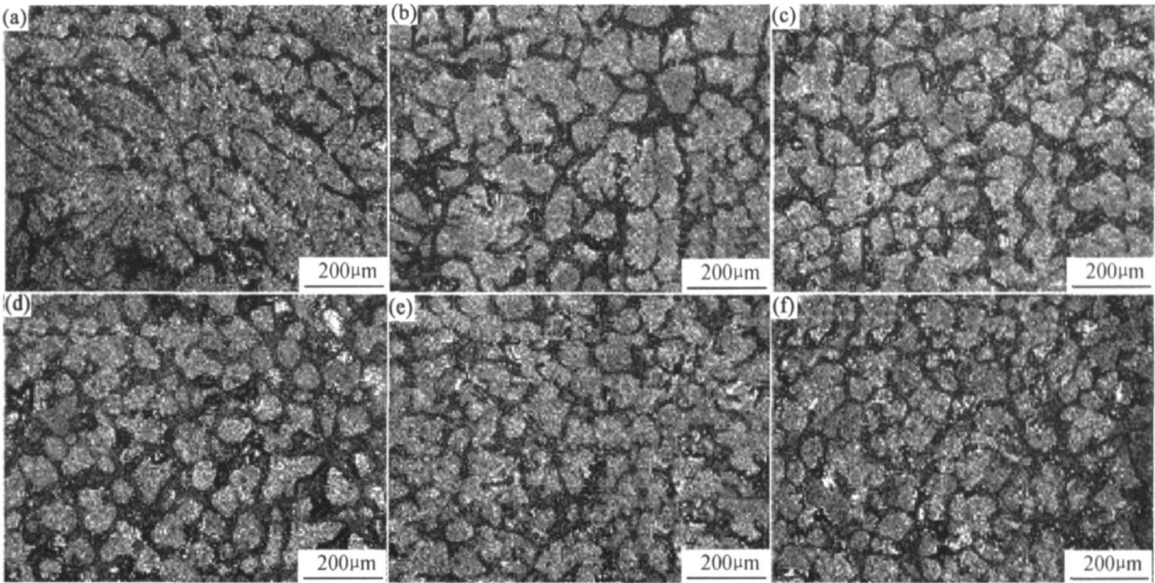


图 5 静态连续施振时获得的微观组织

(a) $P=0\text{W}$; (b) $P=105\text{W}$; (c) $P=135\text{W}$; (d) $P=170\text{W}$; (e) $P=200\text{W}$; (f) $P=240\text{W}$

Fig 5 Microstructures obtained with the application of static continuous vibration

(a) $P=0\text{W}$; (b) $P=105\text{W}$; (c) $P=135\text{W}$; (d) $P=170\text{W}$; (e) $P=200\text{W}$; (f) $P=240\text{W}$

发的空化、声流效应比较微弱, 细晶作用也较弱, 故此时形成的凝固组织与未加超声作用时的情况相比, 虽然一次枝晶已被打断, 但有些区域还存在大量的二次枝晶, 形成的等轴晶尺寸也相对较大。增大超声功率, 形成空化泡临界半径 R_{\min} 越小, 空化泡易于形成, 空化现象也易于发生^[11], 同时提高功率可以增大铝熔体中的声压梯度、声流速度, 加强声流搅拌作用, 使得原有的二次枝晶再次被打断, 组织进一步细化。但是过大

的施振功率, 却不能使空化效应持续增强, 因为此时 R_{\min} 随声功率的变化已很小。此外, 由于强烈的声流搅拌作用, 熔体温度场趋于均匀并略有提高, 晶体长大时间延长, 晶粒尺寸相应增大。

采取动态间歇方式对铝熔体施振时, 凝固组织的细化规律有所不同。如图 6a, b 所示, 在功率变化加载下, 功率从大到小施振时获得的组织较为细小, 而功率从小到大变化时组织的细化效果却不是很理想。造成

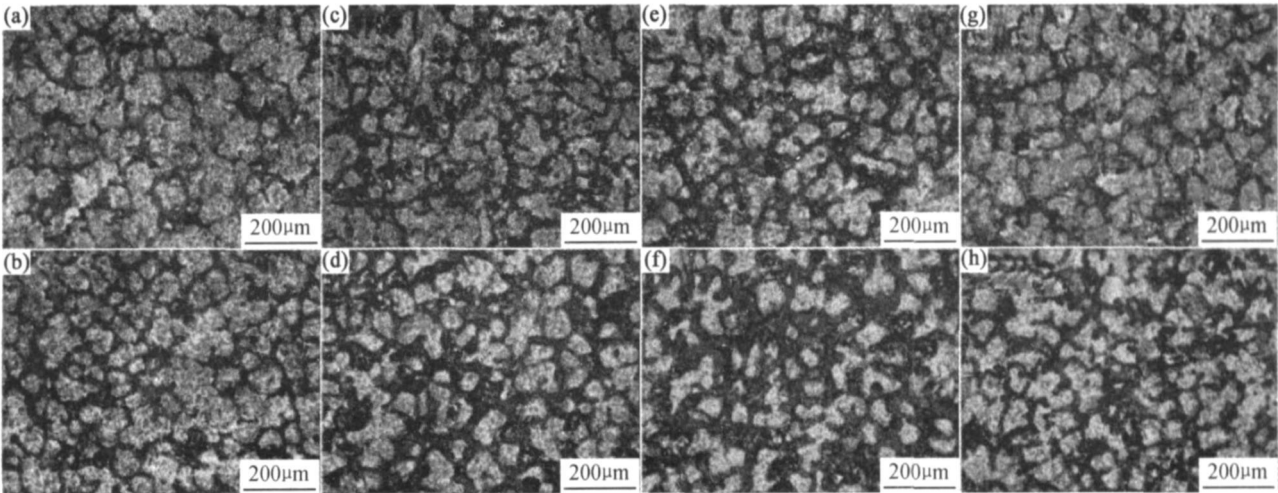


图 6 动态间歇施振时获得的凝固组织

(a) 功率从小到大; (b) 功率从大到小; (c) 每 10°C 施振 30s, (e) 40s, (g) 50s; (d) 每 30°C 施振 100s, (f) 130s, (h) 160s

Fig 6 Microstructures obtained with the application of dynamic intermittent vibration

(a) power varies from small to large; (b) from large to small; (c) applying vibration every 10°C for 30s,

(e) for 40s, (g) for 50s; (d) applying vibration every 30°C for 100s, (f) for 130s, (h) for 160s

细化效果差异的原因与功率加载顺序有关系,先施加大功率的超声振动可以产生强烈的空化、声流效应,此时在铝熔体中形成了大量的晶核,而后引入小功率超声,一方面可以继续维持空化、声流过程,另一方面,可以减弱超声波的热效应,抑制晶体持续长大,从而有效减小晶粒尺寸。从图 6 可以发现在间歇施振所获得的组织中,晶粒普遍较为细小,同时每 30℃施振时得到的组织明显比 10℃时的细化效果好,可见增大施振温度区间更有利于组织的细化,这与超声有效作用时间有关,因为超声振动形成大量晶核需要一定时间^[20]。两组间歇施振的组织中,分别以导波时间 40s 和 130s 的细化效果最好,且较优于连续施振时的情况。相比于连续施振,间歇施振时熔体的冷却速度较快,形成的晶核不易被重融,且容易长大,最终形成等轴晶组织。间歇施振时间太短,则超声细晶能力未能得到充分发挥,时间太长,则熔体温度也会随之提高^[21],凝固过程延长,因而晶粒尺寸也将增大。

3 结论

(1) 超声振动对工业纯铝凝固组织有明显的细化效果,这主要得益于超声的空化和声流效应。静态连续施振时,选取合适的超声功率可以达到细化组织的最佳效果。

(2) 动态间歇施振时,温度和施振时间对组织的细化程度非常重要,两者的合理选配可以最大限度地发挥超声的细晶作用,获得比连续施振时更为细小的组织。

(3) 动态间歇施振的情况比较复杂,参数选择具有多样性,最优参数的匹配还必须开展大量的试验并具体结合不同的处理材料与工况。从本试验中可近似认为增大施振温度区间,并将间歇施振时间大约取为同等条件下的连续施振时间的三分之二时可以获得较为理想的凝固的组织。

参考文献

- [1] 张小明,张廷杰.多向锻造对改善 7075 铝合金性能的作用[J].稀有金属材料与工程,2003,32(5):372-374.
- [2] 王祝堂,田荣璋.铝合金及其加工手册[M].长沙:中南工业大学出版社,1989.152-153.

- [3] 谭敦强,黎文献. Al-Ti-C 晶粒细化剂对工业纯铝的晶粒细化[J].特种铸造及有色合金,2003,(2):1-3.
- [4] JIANG X, XU H. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Material Letters, 2005, 59(3): 190-193.
- [5] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[M]. Amsterdam: Gordon & Breach, 1998. 1-5.
- [6] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Molten Aluminum [M]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 1-10.
- [7] PAN J, YOSHIDA M, SASAKI G. Ultrasonic insert casting of aluminum alloy[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(2): 155-159.
- [8] 李军文,桃野正,田汤善章.日本铸造工学会第 141 回全国讲演大会论文集[C].东京:社团法人日本铸造学会,2002.16-20.
- [9] 马立群,舒光翼,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.
- [10] 李英龙,李宝绵,刘永涛.功率超声对 Al-Si 合金组织的影响[J].中国有色金属学报,1999,9(4):719-722.
- [11] 李新涛,高学鹏,李廷举.连铸过程中超声细晶技术的研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(3):377-380.
- [12] 王俊,周尧和,舒光翼.用高能超声制备金属基复合材料的形状与发展[J].铸造,1997(12):40-42.
- [13] 胡化文,陈康华.超声熔体处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织和性能的影响[J].金属热处理,2005,30(5):43-46.
- [14] 聂朝辉,毛大恒,张云芳.超声波处理对铸轧铝板带组织的影响[J].轻合金加工技术,2006,34(4):10-13.
- [15] 钟掘.铝合金的超常铸轧制备[J].中国有色金属学报,2004,14(S1):147-153.
- [16] 应崇福.超声学[M].北京:科学出版社,1990.524-526.
- [17] 黄运明.超声铸造中振动系统失谐现象分析及其设计研究[D].长沙:中南大学机电工程学院,2006.35-38.
- [18] 王家炘,黄积荣.金属凝固及其控制[M].北京:机械工业出版社,1989.5-6.
- [19] 王俊,周尧和,舒光翼.用高能超声制备金属基复合材料的形状与发展[J].铸造,1997,(12):40-42.
- [20] Л.Л.СИЛИН, Г.Ф.БАЛАНДИН, М.Г.КОТН.超声波焊接[M].姜健,关中原译.北京:国防工业出版社,1963.104-106.
- [21] 张勇.超声参振对 Al-Fe 合金凝固过程的影响[J].铸造技术,2005,26(6):511-514.

基金项目:国家 973 计划资助项目(2005CB23707)

收稿日期:2007-09-24;修订日期:2008-03-14

作者简介:蒋日鹏(1983—),男,硕士研究生,主要从事铝合金超铸造及其工业应用研究,联系地址:湖南长沙中南大学机电工程学院冶金机械研究所(410083),E-mail:jiangripeng@163.com