

超声处理对 Al-5Si 合金除气效率的影响

杜安娜, 刘 岩, 贾 征, 徐海鹏, 陈杼鑫

(沈阳大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110044)

摘要: 考察了超声处理对Al-5Si合金除气效率的影响, 对超声除气的机理进行了分析。研究发现, 恰当的超声处理时间对合金有良好的除气效果; 当超声处理时间为60~120 s时, 铸锭的除气效果比较理想, 密度和除气率最大值分别达到2.661 3 g/cm³和69.0%; 同时, 超声处理可使共晶Si颗粒变得分散和均匀; 采用C₂Cl₆除气剂-超声联合处理可在短时间内达到良好除气效果, 具有很高的除气效率。

关键词: 超声处理; Al-5Si合金; 密度; 除气率; C₂Cl₆除气剂-超声联合处理

作者简介:

杜安娜(1997-), 女, 硕士生, 主要研究方向为铝合金成形工艺。E-mail: duanna37@163.com

通讯作者:

刘 岩, 女, 副教授, 博士, 硕士生导师。电话: 024-62269467。E-mail: liuyan@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

10-1072-05

基金项目:

辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2019042); 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0545、2019-ZD-0561); 2019年沈阳大学大学生创新创业训练计划项目(2019110350102); 国家自然科学基金资助项目(51901037); 辽宁省博士启动基金项目(2019-BS-083)。

收稿日期:

2020-03-26 收到初稿,

2020-06-04 收到修订稿。

铝合金是有色金属中典型的轻金属, 在军用和民用等各个领域均有广泛应用^[1]。铝合金具有比强度高、密度小, 且有较好的导电及导热性、良好的耐蚀性, 易加工以及易于回收等一系列优点^[2]。但铝合金在熔炼过程中极易吸氢, 氢气存在于金属中容易形成气孔, 影响材料的使用性能。因此, 在铸造时熔炼铝合金过程中进行除气是很有必要的。

近年来, 国家坚持生态文明建设, 在工业发展、装备制造等各个方面都更注重环境保护, 致力开发新型绿色、无污染的技术, 超声波技术基于其无污染的优势, 无疑是有应用前景的一项技术^[3]。随着超声波技术越来越被人们所关注, 发现利用超声波的声流、声空化两大效应, 可以改变铝合金熔体内部结构组织以及力学性能^[4-8], 在金属熔炼时加入超声波可以促进熔体内部粗大的晶粒细化, 致密度提高^[9-13]。与此同时, 高强超声也可使熔体内气体通过超声波与熔体之间接触产生的空化作用被带出。因此, 本试验以Al-5Si合金为研究对象, 研究超声处理时间对Al-5Si合金除气效率的影响, 并对其机理进行了分析。

1 试验材料及方法

所使用的装置是利用压电陶瓷将高频电能转化为超声波的声波发生器, 超声功率设置为2 000 W, 频率20 kHz。超声波处理装置如图1所示。采用99.7%工业纯铝和Al-20Si中间合金, 在井式坩埚式电阻炉熔配成Al-5Si合金, 每次熔体的质量约为210 g左右, 熔配完成后对其进行三次充分的搅拌, 静置10 min后当熔体温度达到760 ℃时浇注到一号粘土-石墨坩埚中, 当熔体温度达到730 ℃后将事先预热到730 ℃的超声杆迅速插入到熔体下5 mm, 对其进行一定时间的超声处理。一共进行两组试验。第一组试验过程如下: 不添加任何除气剂, 直接进行超声处理, 处理时间分别为0、30 s、60 s、90 s及120 s; 处理结束后自然冷却得到铸锭, 将冷却后的铸锭采用阿基米德原理测定原始铸锭的密度, 然后将其切割成两部分, 一半用于宏观组织观察, 另一半用于微观组织观察。其中, 宏观试样的尺寸如图2所示, 对于微观组织观察, 取距超声探头下10 mm部位取10 mm×10 mm×10 mm的试样。宏观组织采用HCl:HNO₃:HF=75:25:5腐蚀剂进行腐蚀, 微观组织电解抛光后进行腐蚀。第二组试验过程如下: 将4.5 kg左右的Al-5Si合金放入20号粘土-石墨坩埚中熔炼, 待温度到达760 ℃保温10 min, 然后添加熔体质量1%的C₂Cl₆除气剂; 除气完成后静止20 min,

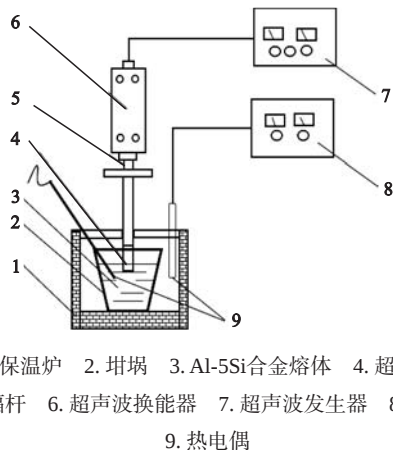
立即浇注到预热730 ℃的一号粘土-石墨坩埚中,待温度稳定到730 ℃后进行0、15 s、30 s、45 s及60 s超声处理(处理功率为2 000 W);处理后将熔体静止10 min,利用Alscan铝液测氢仪来测定熔体中的氢含量,之后自然冷却后得到试样。为了对比有无除气剂处理的超声处理效果,同时将未进行除气剂处理的熔体按照同样方法进行一定时间的超声波处理,微观组织取样方法同第一组试验。

2 试验结果及分析

2.1 Al-5Si 合金凝固组织观察

图3为Al-5Si不同超声处理时间后的凝固组织变化情况。从图中可以看出,未经过超声处理的铸锭分布着不均匀的组织,铸锭上部分有些较粗大的等轴晶,铸锭中心聚集有粗大的等轴晶和柱状晶,下段分布着较细小的等轴晶,如图3a所示;经过30 s超声处理后,比未经超声处理的组织均匀,铸锭凝固组织中心部分柱状晶明显减少,整体凝固组织均匀,分布在铸锭的上、中、下的小气孔明显减少,中心气孔变小最为明显,但上方晶粒仍然较为粗大,如图3b所示;当超声处理达到60 s时,凝固组织上半部分原来粗大的等轴晶明显变小,柱状晶开始变得细小,原来在铸锭凝固组织分散的小气孔变少且向铸锭凝固组织中心聚集,如图3c所示;当超声处理时间为90 s时,铸锭凝固组织左右两部分的等轴晶细化最为明显,铸锭凝固组织中心部分的小气孔相对于未处理及30 s、60 s处理时间气孔都要少且小很多,如图3d所示;当超声处理时间为120 s时,铸锭凝固组织下部分等轴晶细化效果最好,铸锭凝固组织中间等轴晶也有不同程度的细化,铸锭凝固组织上端出现了较大的等轴晶和柱状晶,出现这种现象的原因是由于随着处理时间的延长,铸锭上端组织处理时间温度过高,热效应导致Al-5Si晶核重熔,等轴晶变粗,如图3e所示。

图4为Al-5Si经不同超声时间处理后微观组织变化情况。未经处理的铸锭,树状枝晶发达且气孔明显,枝晶随处可见,且气孔存在在枝晶周围,如图4a所示;而经过30 s超声处理后,组织变化不明显,仍然存在大量的树枝晶,枝晶处连续的共晶Si组织被打碎,且分布更为均匀,但是气孔数目和大小都在减少,如图4b所示;当超声处理达到60 s时,组织没有明显细



1. 电阻保温炉 2. 坩埚 3. Al-5Si合金熔体 4. 超声波探头
5. 变幅杆 6. 超声波换能器 7. 超声波发生器 8. 控温仪
9. 热电偶

图1 超声波处理实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic treatment experimental setup

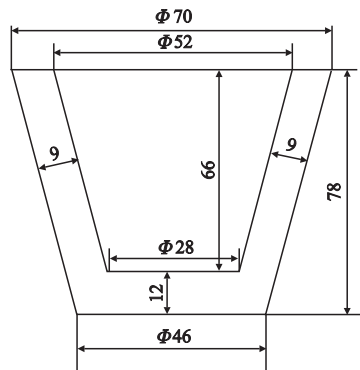
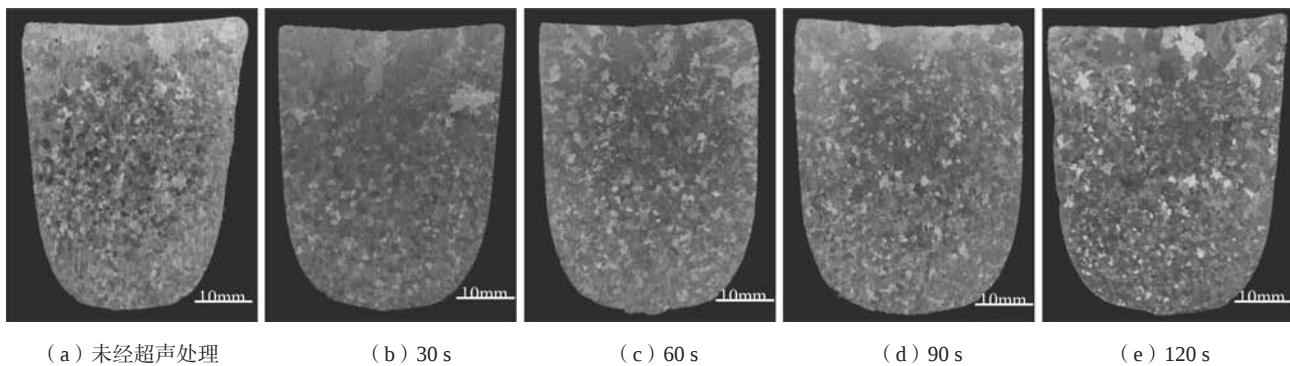


图2 宏观组织观测试样尺寸示意图

Fig. 2 Size of sample for macroscopic structure observation



(a) 未经超声处理

(b) 30 s

(c) 60 s

(d) 90 s

(e) 120 s

图3 不同超声处理时间对Al-5Si合金铸锭凝固组织宏观的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic duration on macrostructure of Al-5Si alloy ingot

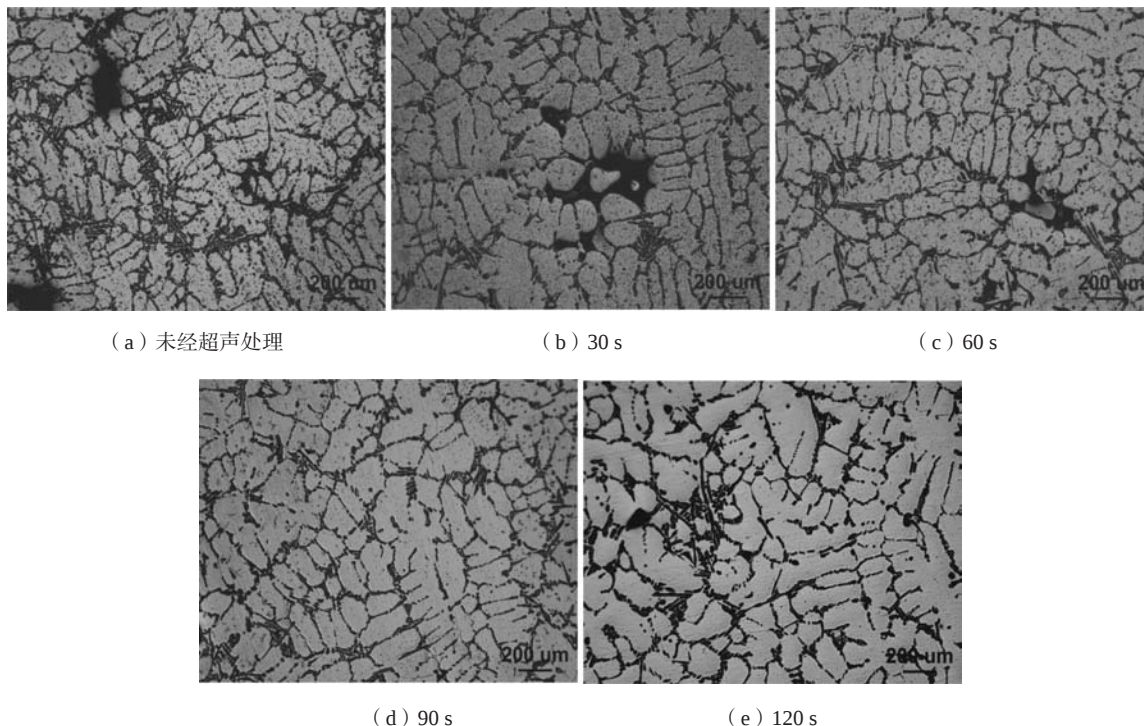


图4 超声处理时间对Al-5Si合金铸锭显微组织的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic duration on microstructure of Al-5Si alloy ingot

化, 但发现凝固组织中出现较少气孔, 如图4c所示; 90~120 s时凝固组织中气孔较少出现, 如图4d-e所示。共晶Si在施加超声前后有明显变化, 不施加超声时, 共晶Si在晶界处聚集, 长度平均在100 μm左右, 施加超声后, 共晶Si被打碎, 变得分散、细小, 超声处理时间越长, 共晶Si越细小, 在超声处理时间为120 s时, 长度平均在40 μm左右。

2.2 Al-5Si合金密度测定与除气率

除气率定义 η 为^[14]:

$$\eta = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_i - \rho_0} \quad (1)$$

式中: ρ_i 为Al-5Si合金的理论密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_0 为Al-5Si未经除气处理的铸锭密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_a 为Al-5Si经除气处理的铸锭密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

通过密度变化以及除气率可以判断超声除气效果。画出铸锭密度-时间曲线, 如图5所示; 利用公式(1)计算出除气率, 其中Al-5Si合金的理论密度为 2.6777 g/cm^3 , 曲线如图6所示。

从图中5和6中可看出, Al-5Si合金在未施加超声时, 铸锭的密度非常低, 为 2.6241 g/cm^3 ; 而施加30 s超声处理后, 铸锭的密度明显提高, 为 2.6323 g/cm^3 ; 超声处理从60 s至90 s, 密度与除气率变化不明显; 超声处理120 s时, 铸锭的密度和除气率比60 s时略有提高, 分别为 2.6613 g/cm^3 和69.0%。

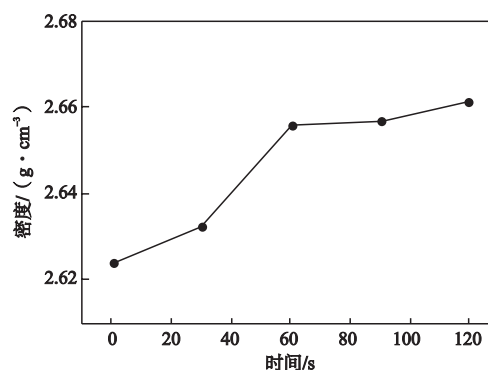


图5 不同超声处理时间对Al-5Si合金铸锭密度的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic duration on density of Al-5Si alloy ingot

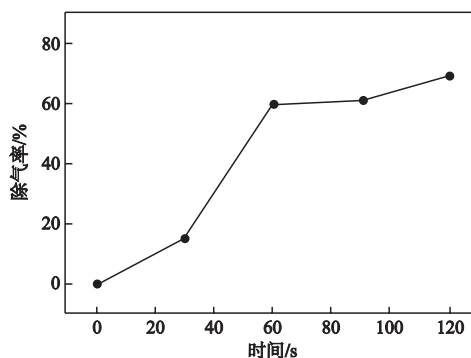


图6 不同超声处理时间对Al-5Si合金铸锭除气率的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic duration on degassing rate of Al-5Si alloy ingot

2.3 C₂Cl₆ 除气剂 - 超声联合处理下 Al-5Si 合金氢含量变化

图7所示为添加除气剂与未添加除气剂情况下, 超声波处理时间与Al-5Si合金氢含量的关系。在未添加除气剂与添加除气剂两种情况下的熔体中, 均施加超声波处理, 氢含量随着超声处理时间的加长, 均有所降低, 但添加了除气剂的氢含量能够降低更多。这是由于在超声处理前, 加入除气剂能够起到预先除气的作用。在除气剂的作用下, 气体含量有所降低, 为后续超声处理提供了便利, 在短时间就能达到较好的除气效果。而未添加除气剂的则需要较长时间才能达到预期除气效果。但在超声处理一定时间后, 发现氢含量有升高的趋势。这是因为在铝液表面存在吸氢和溢氢两种反应过程, 在超声波的不断振动下, 增加了外界气体进入熔体中的可能, 长时间的超声波作用会使熔体中氢含量有所增加。

图8为Al-5Si合金未除气、仅用1% C₂Cl₆除气、超声处理45 s及1% C₂Cl₆处理+超声处理45 s除气前后的组织照片。从图中可以看出, 未进行除气时, 铸锭内部分布不均的气孔随处可见, 这是由于氢含量较高导致; 当进行1% C₂Cl₆除气后, 铸锭的气孔有所减少, 但是也有少量气孔存在, 且铸锭的凝固组织较为粗大, 这是由于经过加入除气剂搅拌后, 强烈的搅拌作用使结晶的晶核重熔导致; 当仅用超声处理45 s后, 共晶Si被超声打碎, 组织有所细化, 但气孔仍然存在; 但是利用1% C₂Cl₆处理+超声处理45 s后, 铸锭内的气孔很少见, 凝固组织也有了适当改善, 说明联合处理对合金处理效果较为明显。

2.4 除气机理分析

合金熔炼时, 由于金属内部以及环境中的氢的存在, 使得熔体中的氢过量。其中, 大部分气体(氢), 溶解在熔体中, 以原子态存在, 另一部分的氢吸附于夹杂物上。当高强超声波导入到熔体中时, 熔体内部会产生空化气泡。而在熔体中以溶解态存在的氢则可扩散至空化气泡的气-液界面, 此时氢原子以吸附态存在。随着超声处理时间的增长, 吸附在气-

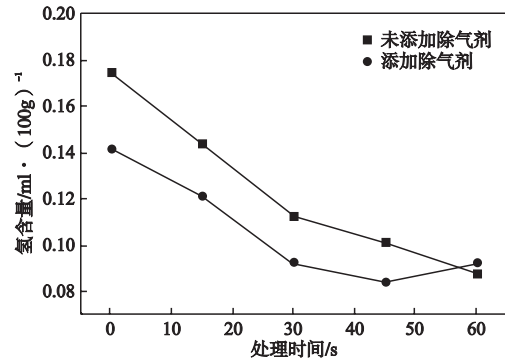


图7 超声波处理时间与Al-5Si合金氢含量的关系

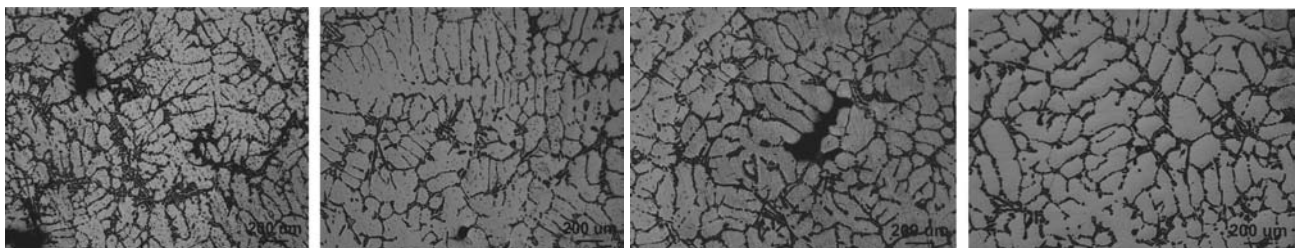
Fig. 7 Relationship between ultrasonic duration and hydrogen content in Al-5Si alloy

液界面的氢原子增多, 其相互作用结合成为氢分子, 氢分子脱附后进入到空化气泡中。在超声的声流作用下, 空化泡不断连续运动, 许多微小气泡在运动过程中相互汇聚、结合, 进而长大。当空化气泡大到一定程度便漂浮至熔体表面并“逃逸”, 带走了熔体中的氢, 起到了除气的作用。

此外, 从声压的角度来分析Al-5Si合金熔体内空化效应所处的状态。熔体中声空化效应的声压值 P_k 可由下式求出^[15]:

$$P_k = \left(\frac{2P\rho_L c_L}{S} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: P 为输出功率, W ; ρ_L 为熔体密度, g/m^3 ; c_L 为超声波声速, m/s ; S 为熔体表面积, m^2 。本试验中, 功率 $P=2\,000\,W$, $\rho_L=2.3 \times 10^3\,kg/m^3$, $c_L=4\,650\,m/s$, 坩埚直径 $\Phi=0.052\,m$, 空化效应阈值 $P_a>1.0 \times 10^6\,Pa$ ^[14]。求得声压值 $P_k=4.49 \times 10^6\,Pa$, 其远大于所需空化效应的阈值, 因此认为本阶段处于空化效应的发达阶段。在该阶段, 空化气泡之间的结合与长大极其活跃, 促进了空化气泡向熔体表面逃逸, 从而达到了除气的目的。另外, 随着超声处理时间的不断增加, 空化气泡的数量亦随之增加, 空化效应更加明显, 空化气泡的聚集与结合就越容易, 促进空化气泡的长大, 因此超声产生的声流搅拌作用会将熔体中的氢大部分带出, 达到



(a) 未处理

(b) C₂Cl₆处理

(c) 超声处理45 s

(d) C₂Cl₆-超声联合处理45 s

图8 Al-5Si合金除气前后的组织对比

Fig. 8 Microstructure of Al-5Si alloy

除气的效果。

使用 C_2Cl_6 -超声波联合处理时, C_2Cl_6 除气剂会起到预先除气的作用,降低了合金熔体中的氢含量,随后施加超声波,超声波空化作用产生的空化气泡将剩余的氢带出熔体。由于氢含量的降低,后续超声处理时间明显减少,所以使用 C_2Cl_6 -超声波联合处理能够在短时间内得到良好的除气效果,效率显著提高。

3 结论

(1) 对于Al-5Si合金来说,超声处理为60~120 s

时,铸锭的除气效果最好,最大密度值和除气率分别为 $2.661\ 3\ g/cm^3$ 和69.0%。

(2) 合适的超声处理时间可使共晶Si从连续变得分散、均匀。不施加超声时,共晶Si在晶界处聚集,长度平均在 $100\ \mu m$ 左右;施加超声后,超声处理时间越长,共晶Si越细小、越分散;在超声处理时间为120 s时,长度平均在 $40\ \mu m$ 左右。

(3) 采用添加 C_2Cl_6 除气后再进行超声处理的 C_2Cl_6 -超声波联合处理的方法,可大幅度缩短超声处理所需时间,显著提高超声处理效率。

参考文献:

- [1] 贾征,张志强,乐启炽,等.铝合金和镁合金中除氢方法及进展[J].铸造,2011,60(7):635-640.
- [2] JIA Zheng, ZHANG Wen-ming, YANG Fu, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy [J]. China Foundry, 2015, 12(1): 15-19.
- [3] 贾征,李展志,乐启炽,等.氩气除氢对AZ91镁合金力学性能和耐腐蚀性能的影响[J].铸造,2019,68(7):718-722.
- [4] 张勇,刘清梅,宋耀林,等.功率超声对T10钢凝固特性的影响[J].铸造,2006,55(2):188-190.
- [5] 李光,张阳,李喜孟,等.Pb-Sn合金在功率超声场中的凝固过程研究[J].铸造技术,2006,27(4):374-377.
- [6] 郭晓亮,周生刚,竺培显,等.功率超声对合金熔体处理和晶粒细化的研究现状[J].热加工工艺,2016,45(7):6-10.
- [7] 高守雷,翟启杰,戚飞鹏,等.超声波在金属凝固中的应用与发展[J].材料导报,2002,16(9):5-6.
- [8] 陈家驹.超声波对铝合金组织和性能的影响[D].北京:清华大学,2015.
- [9] 林书玉.功率超声技术的研究现状及其最新进展[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2001,29(1):101-106.
- [10] 葛飞.超声波技术的应用现状及发展前景[J].郑州牧业工程高等专科学校学报,1999,19(1):58-59.
- [11] MIAO Long, LU Yiping, ZHANG Yubo, et al. Effect of ultrasonic treatment and Sr addition on microstructure of Al-20%Si alloy [J]. China Foundry, 2013, 10(4): 213-216.
- [12] 陈康华,黄兰萍,胡化文.熔体超声波处理对超强铝合金组织和性能的作用[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(3):354-357.
- [13] 赵忠兴,穆光华,黄金日,等.超声波对铸造合金组织和性能的影响[J].铸造,1996(3):21-25.
- [14] LI Junwen, TADASHI Momono, YOSHINORI Tayu, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots [J]. Materials Letters, 2008, 62: 4152-4154.
- [15] AGRANATH B A. Ultrasonic engineering and application technology [M]. Wakayama: Japan-Soviet Communication Inc., 1991.

Effect of Ultrasonic Treatment on Degassing Efficiency of Al-5Si Alloy

DU An-na, LIU Yan, JIA Zheng, XU Hai-peng, CHEN Zhu-xin

(College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, Liaoning, China)

Abstract:

The effect of high-strength ultrasonic treatment on degassing efficiency of Al-5Si alloy was investigated in this work and the mechanism of ultrasonic degassing was analyzed. The study found that the proper ultrasonic treatment time has a good degassing effect on the alloy. When the ultrasonic duration is 60-120 s, the degassing effect of the ingot is relatively ideal, and the maximum density and degassing rate can reach $2.661\ 3\ g \cdot cm^{-3}$ and 69.0%, respectively. At the same time, ultrasonic treatment can make the eutectic Si phase particles dispersed and uniform. Combination of C_2Cl_6 degasser with ultrasonic treatment is most efficient for degassing in a short time and has a high degassing efficiency.

Key words:

ultrasonic treatment; Al-5Si alloy; density; degassing efficiency; combination of C_2Cl_6 degasser with ultrasonic treatment