

文章编号:1673-9981(2020)03-0190-06

超声波处理 AlSi12Fe 铝熔体对除气和晶粒细化效果的实验分析*

陈苏坚

广州致远新材料科技有限公司, 广东 广州 511470



摘要:为了提高 AlSi12Fe 铝熔体除气和晶粒细化的效果,通过优化超声波功率和对铝熔体处理效率的变量参数,对 AlSi12Fe 铝熔体进行超声波处理. 实验结果:经 1000 W 超声波功率处理 1 min 后,40 kg 的 AlSi12Fe 铝熔体的密度当量为 1.28%,比处理前降低了 45.06%;除气效果明显,晶粒级别由二级细化至一级. 表明,利用超声波的空化作用,对铝熔体进行超声波处理,并选择合适的输入功率和处理效率,能实现有效提高铝合金熔体除气的效果和晶粒细化的效果.

关键词:超声波;铝熔体;除气;晶粒细化

中图分类号:O212.6;TG292

文献标识码:A

超声波是指频率为 $2 \times 10^4 \sim 10^7$ Hz 的声波,它超过了人耳所听频率的范围. 当超声波在液体介质中传播时,通过空化作用、声流作用、机械作用,产生了一系列的效应. 尤其是强烈的空化作用,在局部形成瞬时高温、高压、真空和微射流. 超声波在铝合金熔体的应用多见运用于纯铝或 7 系超硬铝合金中的研究. 本文主要是通过实验研究将超声波应用于 AlSi12Fe 熔体中对进一步提高除气效果和晶粒细化效果的影响.

1 实验部分

1.1 实验装置

大功率超声波金属熔体处理系统:系统由超声波发射器和超声波振动棒构成. 超声波发射器频率为 20 kHz、功率 0~2000 W(可调),其将 50~60 Hz

的市电转化为高功率的高频率电源,提供给换能器. 超声波振动棒包括大功率换能器、变幅杆、工具头(发射头),用于产生超声波振动,并将此振动能量向铝熔体中发射. 其中换能器将输入的高频率电能转换成机械能(即超声波),具体在几个微米振幅之间在纵向作来回伸缩运动. 变幅杆将换能器的振幅放大后将超声波能量振动传送给工具头,工具头将超声波能量发射到铝熔体中,工具头材料为钛合金.

1.2 实验方法

1.2.1 超声波处理铝熔体

实验材料为共晶系 AlSi12Fe 铝合金熔体. 首先在坩埚炉中将 40 kg 的 AlSi12Fe 铝熔体熔炼合格(包括正常的除气除渣),然后对超声波发生器进行搜频,待其正常后调整该组的功率位置,将超声波工具头插入 740~750 °C 的铝熔体中进行 15 min 的预热. 在进行超声波处理过程中,铝熔体温度在

收稿日期:2020-03-17

* 基金项目:广州市科技计划项目(201802030012)

作者简介:陈苏坚(1956-)男,广东顺德人,工程师,大专,研究方向为铝合金性能和熔炼工艺及其产品开发,不锈钢、模具钢性能及其冶炼工艺.

720~740 °C 之间, 工具头均持续插入坩埚炉铝熔体表面中心向下 30 mm 的深度. 超声波处理完毕, 提起工具头, 取样检测试样.

1.2.2 除气效果与晶粒细化效果的量度

除气效果采用密度当量值对比, 每组实验均取常压与真空(0.08 MPa)试样测试密度, 并计算密度当量值. 对比时密度当量越小, 表明铝熔体含气越少, 除气效果越好.

晶粒细化效果采用试样断口, 根据 GB/T 3246.2-2000 标准分级进行检测判断, 其中一级为细小最优.

1.2.3 实验方法

将超声波功率和超声波处理效率(对相同数量铝熔体所用的处理时间)作为变量, 分别分析对密度当量、晶粒级别的变化影响. 超声波功率根据斐波那契数列, 采用 5/8 分数法在 400~2000 W 之间安排实验优选, 第 1 次和第 2 次实验功率采用的是 1000 和 1400 W, 第 3 次的功率根据前两次的结果进行比较优选 800 或 1600 W, 第 4 次的功率根据前三次的结果进行比较优选 600, 1200 或 1800 W. 超声波处理效率用处理 40 kg 铝熔体所需时间来表述. 在同一功率下用 1, 2, 4, 8 和 16 min 五组不同的处理时间, 进行超声波处理效果的对比. 也就是说, 整个实验分为四种不同功率, 每种功率又分为五组不同超声波处理时间, 连同无进行超声波处理的对

照组, 合计 21 组的实验进行数据对比分析.

2 实验方案优选

2.1 对照组实验

无进行超声波处理的 AlSi12Fe 对照组的实验数据如表 1 所示.

表 1 无超声处理时对应密度当量和晶粒级别

Table 1 Density equivalent and grain grade without ultrasonic treatment

组别	处理时间/min	密度当量/%	晶粒级别
对照组	0	2.33	2

2.2 超声波实验及其方案优选

通过对同一功率不同超声波处理时间对应密度当量、晶粒级别的变化影响分析, 优选超声波功率方案.

2.2.1 第一轮功率优选实验

根据实验所采用的 5/8 分数优选法, 首先进行了 1000 W 和 1400 W 两种超声波功率强度的实验, 每种功率强度又分别采用了 1, 2, 4, 8 和 16 min 五种不同的超声波处理时间. 超声波处理时间对密度当量、晶粒级别的变化如图 1 和图 2 所示.

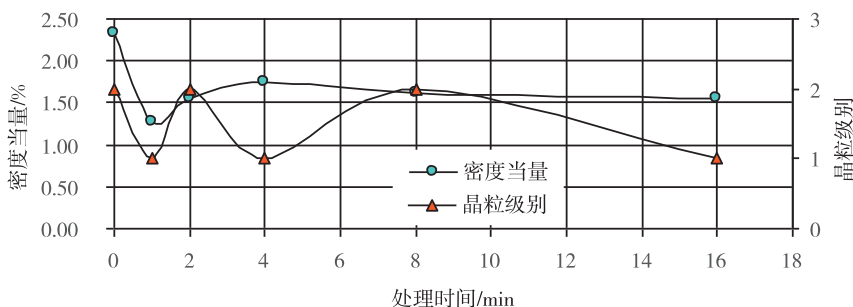


图 1 1000 W 超声不同处理时间对应处理效果

Fig. 1 Processing effects for different treatment times of 1000 W ultrasound

从图 1 和图 2 可见: AlSi12Fe 铝熔体的密度当量随着超声波处理时间的延长而降低, 在前两分钟内下降幅度比较明显, 在前一分钟内超声波功率为 1000 W 时的熔体密度当量比功率为 1400 W 的降

幅更大, 随后波动变化缓慢; 晶粒级别在超声波处理时间为 1, 4 和 16 min 时 AlSi12Fe 铝熔体晶粒均为一级, 但在 2 和 8 min 时又回升到二级, 表明随时间的几何递增熔体晶粒的细化与粗化呈现交替变化.

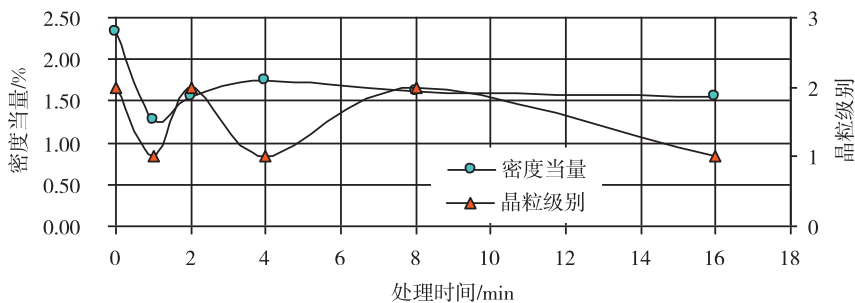


图2 1400 W 超声不同处理时间对应处理效果

Fig. 2 Processing effects for different treatment times of 1400 W ultrasound

在这两种功率的实验数据比较中发现,熔体晶粒级别的变化相同,而1000 W 功率的密度当量值低于1400 W 功率的密度当量值,因此选用1000 W 功率的方案为这两个功率方案中的优选方案。

2.2.2 第二轮功率优选实验

同样根据5/8 分数优选法,选取了超声波功率强度为800 W,采用五种不同处理时间进行了超声

波处理实验。超声波处理时间对应密度当量、晶粒级别的变化如图3所示。

从图3可见:密度当量在前1分钟内下降幅度比较明显,随超声波处理时间的延长而逐渐有所回升;晶粒级别在超声波处理时间为前4分钟和16分钟时均为一级,但在8分钟时回升到二级,出现粗化现象。

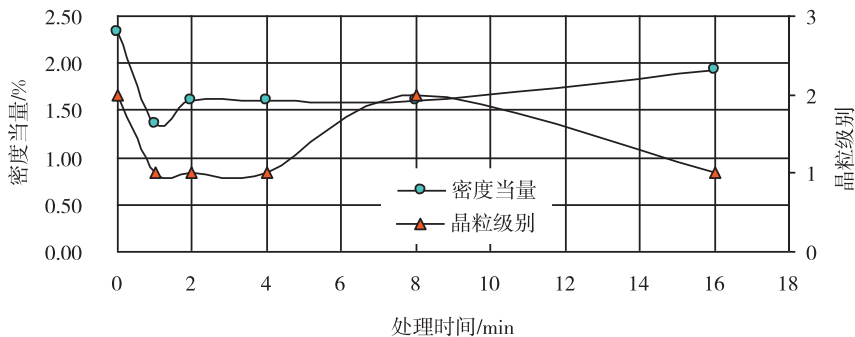


图3 800 W 超声不同处理时间对应处理效果

Fig. 3 Processing effects for different treatment times of 800W ultrasound

800 W 功率与1000 W 功率的实验结果表明:800 W 功率的晶粒级别变化优于1000 W 功率的,它的晶粒粗化随处理时间延长出现的频率较少;1000 W 功率的密度当量变化优于800 W 功率的,它的密度当量值更低。因此,从处理时间更短(1 min)的密度当量和晶粒级别效果来考虑,采用1000 W 功率强度仍为这两个功率方案中的优选方案。

2.2.3 第三轮功率优选实验

同样根据5/8 分数优选法,选取超声波功率强度为1200 W,采用五种不同处理时间进行了超声波处理实验。超声波处理时间对应密度当量、晶粒级

别的变化如图4所示。

从图4中看出:密度当量在前1 min 内降幅度比较明显,随后在超声波处理时间为2 min 时有所回升,再继而随超声波处理时间的继续延长变化不大;晶粒级别只有在超声波处理2 min 时细化为一级,其余处理时间均为二级,即没有细化或发生粗化现象。

从1200 W 功率与1000 W 功率的实验结果表明,无论是密度当量还是晶粒级别,1000 W 功率强度依然为这两个功率方案中的优选方案。

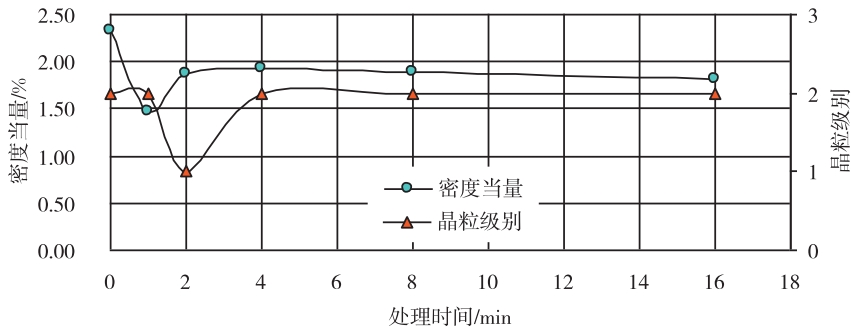


图 4 1200 W 超声不同处理时间对应处理效果

Fig. 4 Processing effects for different treatment times of 1200 W ultrasound

3 结果与讨论

3.1 实验方案的优选结果

根据 5/8 分数优选法,在对总功率为 2000 W 的超声波发生器进行的四种功率实验中,通过每种功率分别进行五组不同处理时间的实验结果对比,可确定 1000 W 最终为功率的优选方案.在该功率的方案结果中发现,超声波处理时间为 1 min 时最佳.也就是说,通过功率为 1000 W 强度的超声波对共晶系 AlSi12Fe 铝合金的熔体进行超声波处理 1 min,可实现密度当量 1.28% 及晶粒一级的最佳效果.

3.2 讨论

3.2.1 空化效应

当铝熔体进行超声波处理时,熔体中的金属原子受到周期性的交变声压作用,前半周期中的负声压作用会在熔体薄弱处形成空化泡,紧接着后半周期中的正声压会使前半周期受拉应力作用而继续长大的空化泡以极高的速度闭合或崩溃.因此,在气泡崩溃瞬间将形成强烈的冲击波,而在液体内部产生局部的高温、高压,形成了“空化效应”.长大中的空化泡会从周围熔体中大量吸热而导致熔体局部深度过冷,形成了大量的晶核,而在气泡崩溃破灭的过程中释放出的巨大冲击波又会击碎刚形成的晶核,从而形成更多的结晶核心^[1].这是过冷形核和冲击波动力形核.

超声的空化效应使熔体中不能被润湿的微小氧化物杂质颗粒被活化.在铝合金熔体中存在大量的未溶杂质主要是尺寸小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 颗粒,这些活化了杂质也可作为形核的基底从而促

进了形核. H_2 被吸附在这些颗粒的表面缺陷处,在超声的空化作用下空化泡在液态铝—氢气— Al_2O_3 颗粒杂质这个液、气、固三相的界面上形成,颗粒表面缺陷处的 H_2 以及熔体中的 H_2 扩散到新形成的气泡中.随着气泡的迅速长大、崩溃,微小的氧化物杂质颗粒表面被熔体填充,转变成为活性的凝固核心^[2].在这个过程中,非润湿杂质颗粒由不被铝液润湿变为可以被铝液润湿,使铝液中产生大量的异质形核核心.这是空化效应过程中利用微小杂质颗粒的异质形核.这个过程也是对 H_2 去除的过程.所以,影响晶粒细化的主要作用是空化作用,同时空化作用也是除气的关键.

3.2.2 声流效应及热效应

起声波在熔体中传播时由于声压与熔体的粘滞力相互作用,导致了超声振幅随着作用距离的增加而衰减,形成了一定的压力梯度,熔体介质吸收了超声波的动量而产生流动,形成了“声流效应”.声流把在铝熔体中空化范围内形成的结晶及有效形核质点转移到其它区域,又把其它区域的熔体带到空化范围内,而形成结晶和更多的形核质点^[1].在这个过程中,声流效应对铝熔体的除气和晶粒细化起到了很好的动力学作用.

当超声波作用于铝熔体时,超声在熔体中的传播过程中,会引起熔体质点交替的压缩与伸张,构成压力的变化,同时由于熔体粘度较大,存在内摩擦损耗.一定时间内的连续超声作用,超声波能量会被熔体吸收转变成热能,使熔体中声场区域产生温升,形成了“超声热效应”.在频率一定的条件下,超声波功率越大,超声波处理时间越长,热效应越明显.热效应由于产生温升会降低熔体的冷却速度.

3.2.3 阈值

超声波处理时间和处理功率对除气和晶粒细化的处理效果存在阈值。对于超声波处理时间,无论是反映除气效果的密度当量还是晶粒级别,随处理时间的延长都有阈值,出现回升或者效果降低。当功率为 800 W 时,处理时间超过 1 min 后除气效果降低,超过 4 min 后晶粒出现粗化;当功率为 1000 W 时,处理时间超过 1 min 除气效果降低,晶

粒出现波动性粗化;当功率为 1200 W 时,处理时间超过 1 min 除气效果降低,超过 2 min 后晶粒开始粗化;当功率为 1400 W 时,处理时间超过 4 min 除气效果降低,超过 1 min,晶粒出现波动性粗化。

对于超声波功率,无论是密度当量还是晶粒级别,随超声波功率的增加都有阈值,出现回升或者效果降低(图 5~图 6)。

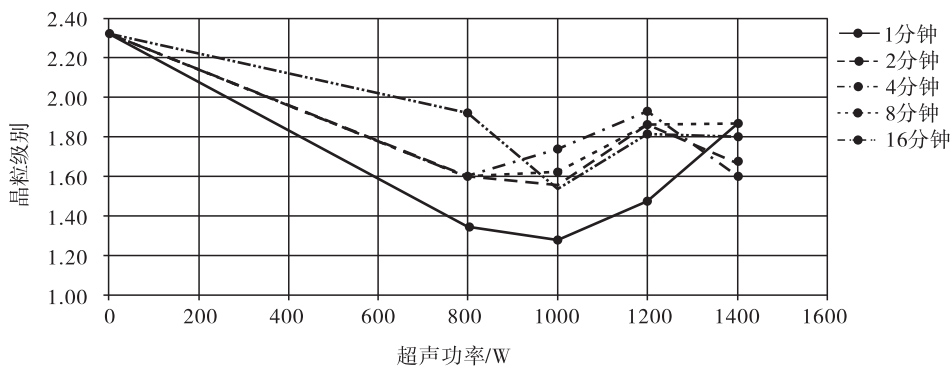


图 5 不同处理时间超声功率与密度当量的关系

Fig. 5 The relationship between ultrasonic power and density equivalent for different treatment times

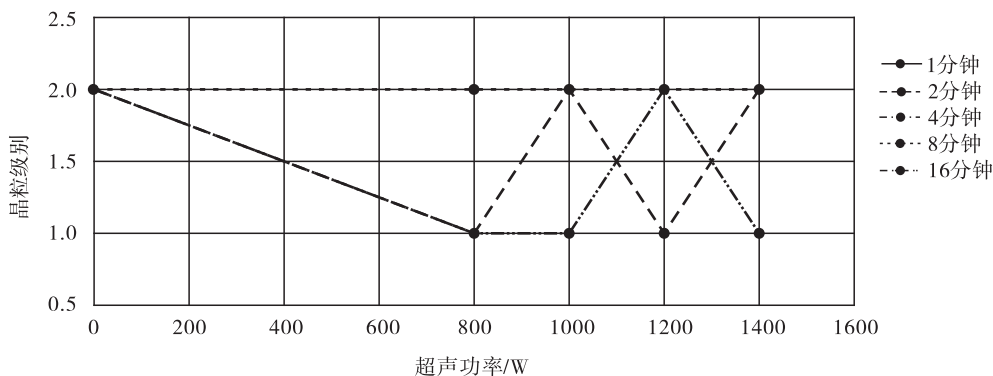


图 6 不同处理时间超声功率与晶粒级别的关系

Fig. 6 The relationship between ultrasonic power and grain grade in different treatment times

从图 5~图 6 可见:当处理时间为 1 min 时,功率超过 1000 W 除气效果降低,晶粒出现粗化;当处理时间为 2 min 时,功率超过 1000 W 除气效果降低,功率超过 800 W 晶粒出现粗化;当处理时间为 4 min 时,功率超过 800 W 除气效果降低,功率超过 1000 W 晶粒出现粗化;当处理时间为 8 min 时,功率超过 1000 W 除气效果降低,4 种不同功率下晶粒均没有被细化;当处理时间为 16 分钟时,功率超过 1000 W 除气效果降低,晶粒出现粗化。

探讨上述出现阈值的现象,初步认为主要原因在于超声波的热效应。当随着超声波的处理时间增加或者超声波功率的增大,在铝熔体内产生了较强的热效应。处理时间越长、功率越大,热效应变得越显著,熔体中的声场区域温升越高,使冷却速度下降,凝固时间变长,初生晶胚或原来已经形成的小枝晶发生重熔,导致凝固后铸锭晶粒发生粗化。同时,也因为声场区域的温升过高而影响了除气的效果。

在超声波处理过程中,空化效应、声流效应、热

效应是同时进行的。当热效应的作用大于空化、声流作用时,除气效果降低,晶粒出现粗化;当热效应的作用小于空化、声流作用时,有利于除气和晶粒细化的进行。这个动态过程也使得晶粒的细化与粗化在不同的处理时间和不同的功率中产生对应的波动变化。也就是说,它并不随处理时间或功率单调递增或递减。因此,并非超声波处理时间越长功率越高,除气和晶粒细化的效果就一定越好。它们都存在阈值。应根据不同铝熔体中的成分组成属性、不同的处理量,选择合适的处理功率和处理时间,以实现最佳的除气效果和晶粒细化效果。

4 结 论

(1)利用超声波的空化作用,对铝熔体进行超声波处理,可实现铝合金细化晶粒的效果和降低铝合金的密度当量、实现熔体除气的效果。

(2)对于 40 kg 共晶系 AlSi12Fe 铝熔体,通过 1000 W 强度的超声波功率处理 1 min,可实现除气和晶粒细化的最佳效果。

(3)超声波处理时间和处理功率对于铝熔体除气和晶粒细化处理效果存在阈值。实验中数据显示超过阈值时效果不明显或效果降低,初步分析其原因在于超声波的热效应作用及其与空化效应、声流效应所处的动态平衡影响的结果。

参考文献:

- [1] 李军文,桃野正,何丽娜. 各种因素对铝合金超声波铸锭等轴晶占有率的影响[J]. 有色金属:冶炼部分,2011(5):42-46.
- [2] 胡化文,陈康华,刘红卫,等. 熔体超声处理对 7055 铝合金显微组织和性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2004,9(2):156-160.

Experimental analysis of the effect of ultrasonic treatment of AlSi12Fe aluminum melt on dehydrogenation and grain refinement

CHEN Sujian

Guangzhou Zhiyuan New Material Technology Co., Ltd, Guangzhou 511470, China

Abstract: The aim is to improve the effect of dehydrogenation and grain refinement of AlSi12Fe aluminum melt. By optimizing the parameters of ultrasonic power and treatment efficiency of aluminum melt, the aluminum melt of AlSi12Fe is ultrasonically treated by optimizing the ultrasonic power and the variable parameters of the aluminum melt processing efficiency. The density equivalent of 40 Kg AlSi12Fe aluminum melt is 1.28% after being treated with 1000 W ultrasonic power for 1 minute, which is 45.06% lower than that before treatment, the effect of dehydrogenation is obvious. At the same time, the grain grade is refined from the second level to the first level. By using the cavitation effect of ultrasonic wave, the aluminum melt can be treated by ultrasonic wave, and the effect of dehydrogenation and grain refinement can be effectively improved by selecting appropriate ultrasonic input power and processing efficiency.

Key word: ultrasonic; aluminum melt; dehydrogenation; grain refinement