DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.02.003

高强超声处理和强制冷却对 Al–5Cu 合金组织细化及除气效果的影响

喻　兵,贾　征,韩　旭,宋婧怡,刘玉鹏,陈晓东
(沈阳大学 机械工程学院焊接工程系,辽宁 沈阳 110044)

摘　要:研究了高强超声联合铸锭底部强冷处理对 Al-5Cu 合金凝固组织的影响,并采用密度法研究了除气效果。结果表明,超声联合铸锭底部强制冷却处理具有良好的细化和除气效果,当 2 000 W×120 s 时细化效果最佳;铸锭断面几乎为 100%等轴晶且内部组织致密、无气孔,此时铸锭密度为 2.791 1×10^3 kg·m^{-3},除气率为 95.1%。最后对其细化及除气的机理进行了分析。

关键词:超声处理;Al-5Cu 合金;密度;除气率;空化效应
中图分类号:TG146.2　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2022)02-0090-05

Effect of High Intensive Ultrasonic and Forced Cooling Treatment on Microstructure Refinement and Degassing of Al–5Cu Alloy

YU Bing, JIA Zheng, HAN Xu, SONG Jingyi, LIU Yupeng, CHEN Xiaodong
(College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The effect of strong cooling treatment at the bottom of ingot and high intensity ultrasonic on the solidification microstructure of Al-5Cu alloy was studied, and the degassing effect was studied by density method. The results show that ultrasonic and forced cooling treatment at the bottom of ingot has good refining and degassing effect, and the refining effect is the best at 2 000 W×120 s. The cross section of the ingot is almost 100% equiaxed grains and the internal structure is dense without pores. At this time, the ingot density is 2.791 1×10^3 kg·m^{-3} and the degassing rate is 95.1%. At last, the mechanism of refinement and degassing were analyzed.

Key words: high-intensity ultrasonic; Al-5Cu alloy; density; degassing efficiency; cavitation effect

铝合金在3C、航空航天及建筑行业等领域中应用十分广泛,而铝合金的制造一般都涉及到其熔炼过程[1-5]。在此过程中,铝合金熔体从空气中吸收的大量氢,随着温度的下降来不及逸出而留在金属中形成气孔,这对材料性能的影响非常大。最近,超声波因其对环境无任何不良影响,改善工人劳动环境等绿色环保优势,越来越普遍的应用于各领域中[6-9],有研究发现高频超声振动所产生的空化效应和声流的搅拌作用具有细化和除气双重作用。合金铸锭质量及力学性能也进一步提高,因此得到了国内外学者的广泛青睐[10-14]。

目前关于超声对金属熔体处理的报道比较多,但是均以细化为主,而超声波除气研究虽然较少,但也受到世界各国的广泛关注。如前苏联就报道过有关超声波除气效果主要与超声产生的空化效应有关[15-16];美国的橡树岭国家实验室也曾对大气湿度、熔体温度及体积的除气内容进行过研究[17];Helder P等[18]研究发现熔体的体积、温度以及超声波处理时间对AlSi9Cu3铝合金除气均有重要的影响;李晓谦等[19-20]研究发现超声功率、频率、施振深度的参数对除气均有较大的影响;李争彩等[21]通过数值模拟超声波空化过程发现,空化气泡在较低的频率下更容易产生,该研究也与李晓谦的结论相吻合。综上所述,目前的超声除气虽然已经取得了一定的进展,但是也有不足之处,如美国橡树岭实验室采用的真空–超声复合除气法效果虽然较好,但是也存在设备复杂及除气率低的问题,因此,需要寻找一种除气率高、装置比较简单及成本低的除气方法。本文作者选用的Al-5Cu作为二元合金,具有成分简单、熔点较低及易操作等特点,因此,以本合金为例,研究了一种坩埚底部强制冷却施加超声处理的方法进行联合除

收稿日期:2021-03-27
基金项目:辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0561);辽宁省教育厅重点资助项目(LJKZ1171)
作者简介:喻　兵(1998—),硕士生.研究方向:铝合金成形工艺.Email:3127567079@qq.com
通讯作者:贾　征(1982—),副教授,博士后,硕士生导师.研究方向:铝合金成形工艺.电话:02462268134,Email:jz140@163.com

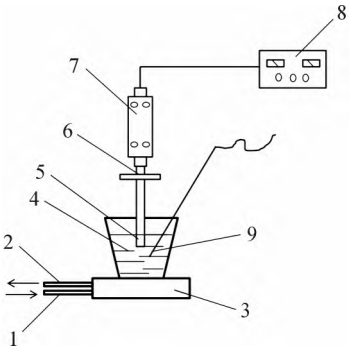
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气，考察其规律并进行了分析。

1　实验方法

1.1　实验装置示意图

实验设备包括超声波发生器，其最大输出功率为2 000 W，频率为20 kHz；还包括熔体控温的控温表、井式电阻炉、超声波支架（可实现超声探头的上下前后移动）及粘土-石墨坩埚，见图1。



1- 进水口；2- 出水口；3- 铜板；4- Al-5Cu 合金熔体；5，6- 超声波探头
7- 超声换能器；8- 超声发生器；9- 热电偶

图 1　超声场装置布置示意图

Fig.1　Schematic diagram of ultrasonic field device layout

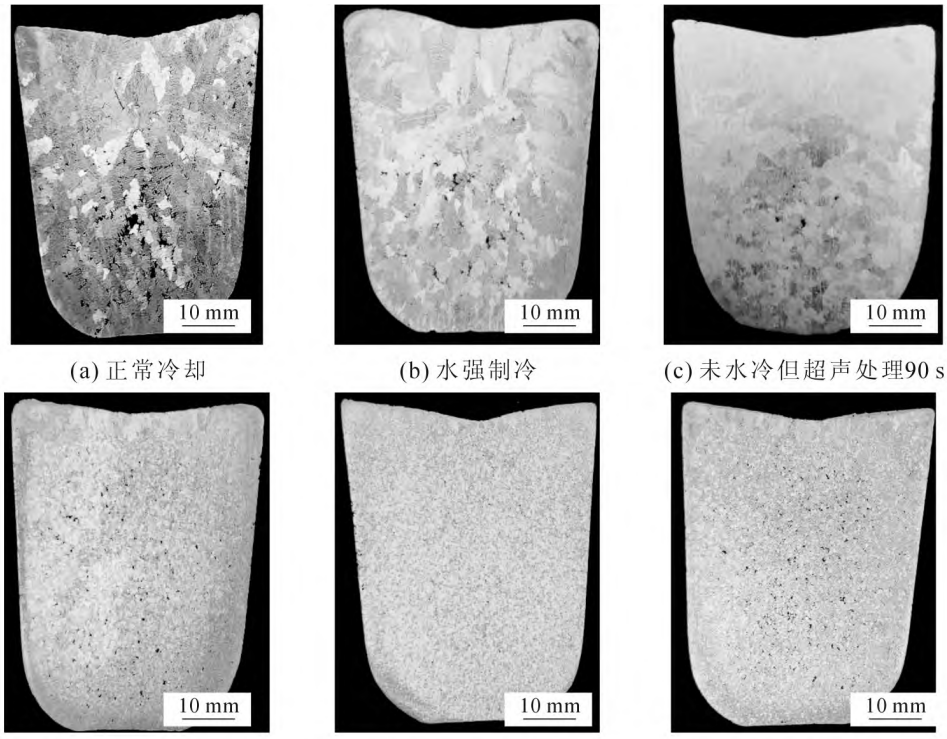
1.2　实验方法

实验所用Al-5Cu合金采用工业纯铝（99.7%）与电解铜片按比例熔配而成，熔炼时使用石墨杆多次搅拌金属熔体使成分均匀化，将浇注成型后的铸锭使用切割机切成小块，留待重熔使用。将试样分为6组，放入1号粘土–石墨坩埚中进行重熔，每组试样的质量为200 g左右，重熔过程中当温度800 ℃稳定后，将含有熔体的1号粘土–石墨坩埚放入铜板上，使用预热500 ℃超声探头插入熔体中进行超声处理，插入深度为5 mm，当熔体温度降为750 ℃时，铜板内部通入循环冷却自来水，直至铸锭凝固至室温（20 ℃左右）。实验条件为未施加超声、底部仅水冷、仅超声处理90 s未水冷、超声–底部水冷处理90、120、150 s，处理后让熔体自然冷却后得到铸锭。铸锭密度采用阿基米德原理进行测量，最后将铸锭从顶部向下切成对称的两块，用于组织观察。其中，Al-5Cu合金宏观腐蚀液为：HCl:HF:H_2O=15:10:90，显微组织腐蚀液为5%HF水溶液。

2　实验结果及分析

2.1　宏观组织状态

铸锭经自然冷却后，观察其宏观组织发现，在观察范围内分布着较粗大的气孔和柱状晶，如图2(a)所示；而铸锭强制水冷后，从断面可以看出，铸锭气孔有所减少，但是并不理想，且铸锭细化效果也不好，仅在铸锭的底部分布着少量粗大的等轴晶，如图2(b)，这主要是由于冷却速度较快使气体被封锁在熔体内而留下气孔；再对比不同冷却方式但超声处理时间同为90 s的2(c)与2(d)时发现，使用强冷后的凝固组织细化效果最好，气孔量明显下降，如图2



(a) 正常冷却　(b) 水强制冷　(c) 未水冷但超声处理90 s

(d) 超声处理90 s并强制水冷　(e) 超声处理120 s并强制水冷　(f) 超声处理150 s并强制水冷

图 2　AI-5Cu 合金自然冷却和经各种处理后冷却铸锭的宏观组织

Fig.2　Macrostructure of Al-5Cu alloy ingots naturally cooled and cooled with different treatments

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(d)。但如果将超声时间延长到120、150 s，发现凝固组织并没有得到进一步细化，但是肉眼可见的气孔在逐渐减少，相对来说，图2(e)的细化和除气效果最好。

2.2 微观组织的观察

为了进一步说明不同超声处理时间对粘土–石墨坩埚底部强制水冷凝固组织的影响，取样部位均为试样的中心部位，从图3(a)看出，正常冷却的铸锭中心部位均为粗大的树状晶，气孔也较多，如图3(a)所示；当铜板加水冷未经超声处理时，可见中心部位凝固组织依旧比较粗大，没有得到细化，见图3(b)；随着超声处理时间的延长，可看出微观组织不断从粗大的树枝晶向细小圆整的晶粒过渡，见图3(c)、3(d)、3(e)及3(f)所示。其中，可看出图3(e)的细化效果最好，视野内很少见到气孔，这与图2(e)吻合，但是当超声处理时间进一步延长，气孔有增多的趋势，如图3(f)。

2.3 Al–5Cu合金除气密度及除气率分析

合金熔体除气率具体计算公式如下[22]：

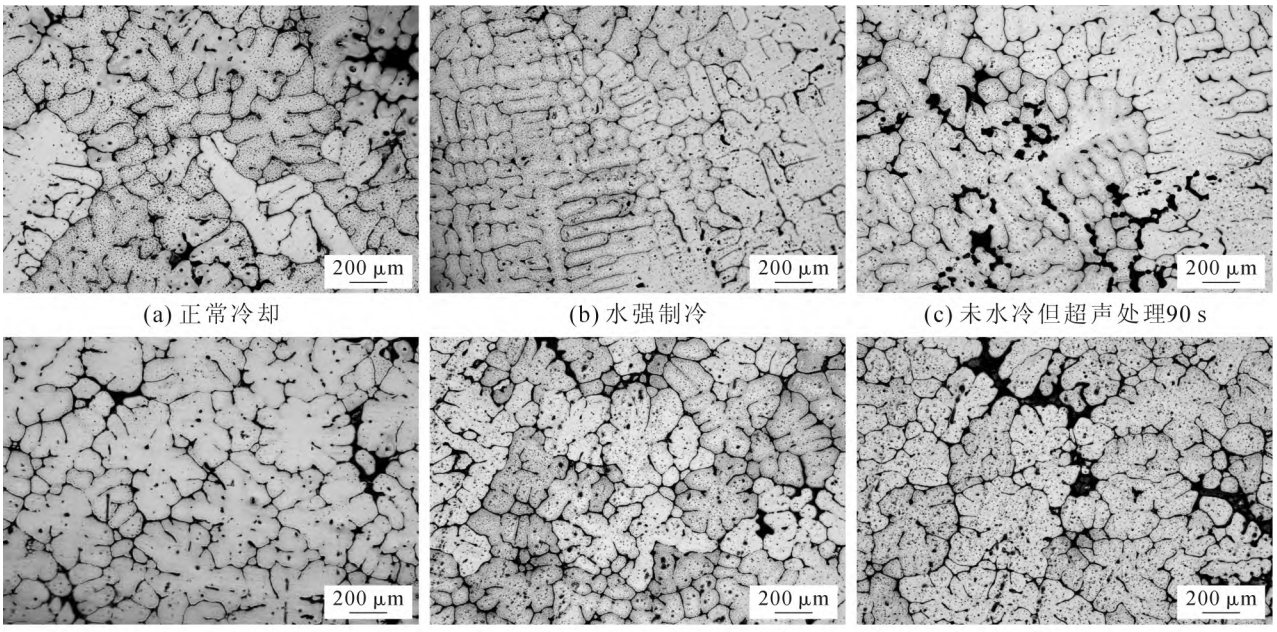
$$\eta=\frac{\rho_a-\rho_0}{\rho_b-\rho_0} \quad (1)$$

式中，ρ_0为未除气合金试样密度，$\times10^3$ kg·m^{-3}；ρ_a为除气合金试样密度，$\times10^3$ kg·cm^{-3}；ρ_b为合金试样理论密度(Al-5Cu 合金是2.796 6$\times10^3$ kg·cm^{-3})。

表1给出了粘土–石墨坩埚底部强制冷却不同超声时间对铸锭密度和除气率的比较，即自然冷却时，铸锭的密度仅有2.683 1$\times10^3$ kg·m^{-3}；底部水冷时，铸锭密度有所提升，达到 2.698 7$\times10^3$ kg·m^{-3}，但效果不明显；而超声处理90 s后，即使不加底部水冷铜板，铸锭密度也可达到2.736 5$\times10^3$ kg·m^{-3}，说明超声处理有很好的除气效果；底部水冷后加入超声后，随着处理时间延长，铸锭的密度会增大，最高可达到2.791 1$\times10^3$ kg·m^{-3}，除气率可达95.1%，但超声时间不宜过长，否则会降低铸锭的密度和除气率。

2.4 Al–5Cu合金粘土–石墨坩埚底部强制水冷的超声除气机理

当使用超声处理熔体时，产生的空化气泡会在正负周期中长大和收缩[23]，如图4[24]。熔体经超声处



(a) 正常冷却　(b) 水强制冷　(c) 未水冷但超声处理90 s

(d) 超声处理90 s并强制水冷　(e) 超声处理120 s并强制水冷　(f) 超声处理150 s并强制水冷

图 3 Al-5Cu 合金自然冷却和经各种处理后冷却铸锭的微观组织

Fig.3 Microstructure of Al-5Cu alloy ingots naturally cooled and cooled with different treatments

表 1 不同处理条件的铸锭密度和除气率

Tab.1 Density and Degassing rate of Al–5Cu alloy ingots naturally cooled and cooled with different treatments

处理条件	铸锭密度 /$\times10^3$ kg·m^{-3}	除气效率 η_{deg}(%)
自然冷却	2.683 1	0
底部水冷但是未加超声	2.698 7	13.7
超声处理 90 s	2.736 5	47.0
粘土–石墨坩埚底部强制冷却和超声处理 90 s	2.756 6	64.8
粘土–石墨坩埚底部强制冷却和超声处理 120 s	2.791 1	95.1
粘土–石墨坩埚底部强制冷却和超声处理 150 s	2.759 5	67.3
Al-5Cu 合金铸锭的理论密度	2.796 6	100

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理后晶粒细化的原因有两个：首先，空化气泡的生长可以吸收熔体中的热量，然后在气泡界面受到冷却影响而形核[25]。随后空化气泡的破裂产生巨大能量粉碎熔体中的初始晶核和枝晶，导致晶核数量增加，晶粒尺寸变小，如图4(c)。并且产生的声流是一种由于声压梯度引起的液体流动，也有利于晶粒细化[25-26]。而超声产生的液相宏观流动效应表现为液体内部的普遍回流，可以将非均匀形核和枝晶破碎引起的大量核输运到整个铝合金熔体中[27-29]。当对粘土–石墨坩埚底部进行强制冷却时，由超声产生的细小等轴晶会在声流的作用下向下掉落凝固成细小等轴晶粒，下面的气孔会逐渐被排出，于是致密的组织开始从熔体最下方开始形成，当该阶段到达120 s时，效果最佳；进一步延长超声处理时间到150 s后，由于铝液温度的下降导致熔体粘度过大会阻碍气体的上浮，因此出现了很多气孔。

图5为超声除气的机理图[5]，当施加适宜的超声波处理熔体时，产生的空化气泡吸附周围的氢原子，此时气泡会迅速长大析出，达到除气目的。对于本实验过程，图6为超声和粘土–石墨坩埚底部强制水冷的机理图，在粘土–石墨坩埚底部放置铜板进行通水冷却时，超声振动形成的细小等轴晶会不断向下掉落后会很快凝固，而它们之间的空隙会被上方的金属液所填补，进而形成致密的组织，如图3(e)。而在粘土–石墨坩埚底部非强制冷却的情况下，虽然在超声作用下也具有除气效果，但此时熔体是由四周开始凝固的，各个方向的冷却速度相当，这使得熔体中的大部分气体还未完全逸出就被凝固前熔体形成的枝晶所阻碍，残留在熔体中形成气孔。

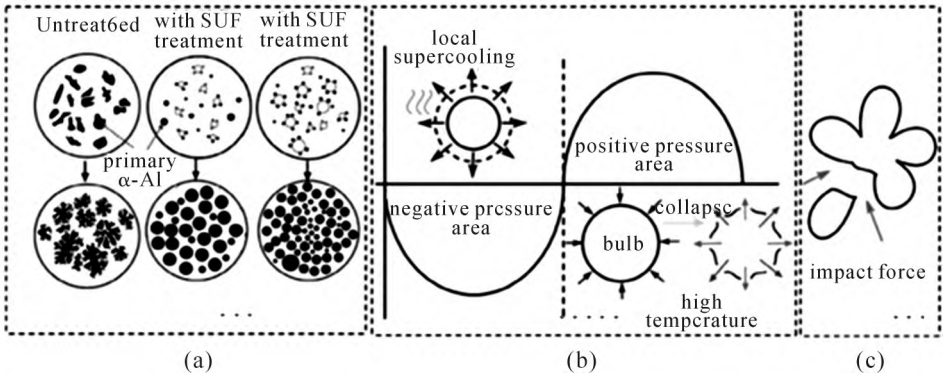


图 4　晶粒细化示意图

Fig.4　Schematic grain refinement

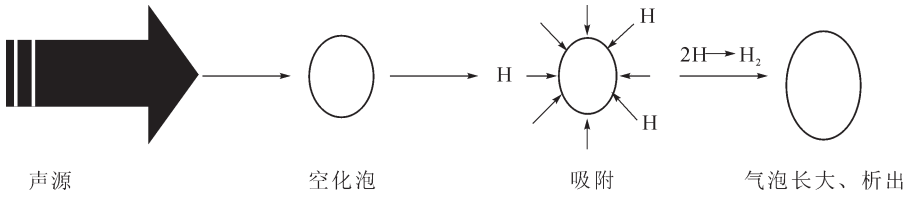
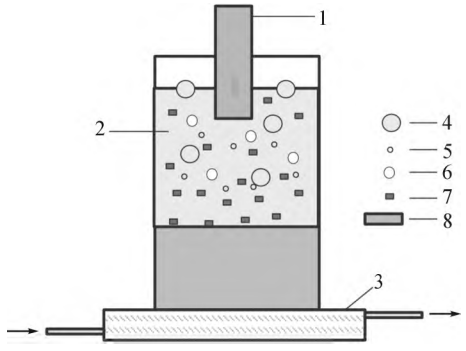


图 5　超声除气机理示意图

Fig.5　Schematic mechanism of ultrasonic degassing



1- 超声探头；2- 铝液；3- 水冷铜板；4- 空化气泡
5- 铝合金熔体内部气体；6- 氢原子扩散至空化气泡内
7- 被细化的晶粒；8- 强制冷却区

图 6　铝合金超声除气示意图

Fig.6　Schematic diagram of aluminum alloy by ultrasonic degassing

3　结论

(1)铝合金铸锭的除气效果可用测定铸锭的密度来表征，这是一种简单、经济及快速的方法。

(2)采用超声联合粘土-石墨坩埚底部强制水冷方法，可大幅度细化铸锭的凝固组织，2 000 W处理90~150 s铸锭断面均可获得细小、均匀的等轴晶。

(3)在本实验中，采用超声联合粘土-石墨坩埚底部强制水冷除气的最佳条件为2 000 W×120 s，铸锭密度和除气率分别为2.791 1×10^3 kg·m^{-3}和95.1%。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 何磊东，仲召军，李鹏鹏. 高硅铝合金变质处理的研究现状及发展趋势[J]. 铸造技术，2021，42(1):65-68.

[2] 赵凯. 熔炼工艺对铝钛硼中间合金组织的影响 [J]. 铸造技术，2020，41(9):816-819.

[3] LIU X A, ZHANG Z Q, HU W Y, et al. Study on hydrogen removal of AZ91 alloys using ultrasonic argon degassing process[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26:73-80.

[4] JIA Z, ZHANG W M, YANG F, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy [J]. China Foundry, 2015, 12(1):15-19.

[5] 贾征. 几种镁合金与铝合金熔体的除氢工艺研究[D]. 沈阳：东北大学，2014.

[6] 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(Z1):11-17.

[7] 田志凌，许良红，彭云，等. 高强铝合金焊接接头无析出物区的形成机理[J]. 金属学报，2008(1): 91-97.

[8] 张忠涛. 外场对铝熔体异相粒子运动及其凝固行为影响研究[D]. 大连：大连理工大学，2009.

[9] 吕书林，吴树森，戴维，等. 间接超声振动制备5052铝合金半固态浆料[J]. 金属学报，2011，47(5): 634-640.

[10] 姜佳佳. AZ91镁合金熔体除氢工艺及其对组织与性能的影响[D]. 沈阳：东北大学，2014.

[11] MAUER F A. An Ultrasonic Method for Reconstructing the Two Dimensional Liquid/Solid Interface in Solidifying Bodies[J]. Metallurgical Transaction, 1991, 22B(8): 467-473.

[12] 贾征，李又佳，席玖瑞，等. 镁合金晶粒细化技术研究进展之一——物理细化技术[J]. 特种铸造及有色合金，2020，40(6): 607-613.

[13] XU H B, HAN Q Y, THOMAS T M. Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys [J]. Materials Science Engineering A, 2008, 473: 96-104.

[14] 李军文，由向群，付莹，等. 超声波共振度对铸锭内气孔生成的影响[J]. 铸造技术，2008，29(6): 790-792.

[15] ABRAMOV O V. Ultrasound in Liquid and Solid Metals[M]. CRC Press, Boca Raton, 1994.

[16] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[A]. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1998.

[17] XU H B, JIAN X G, THOMAS T M, et al. Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic variation [J]. Materials Letters, 2004, 58: 3669-3673.

[18] PUGA H, JTEIXEIR A C, BARBOSA J, et al. The combined effect of melt stirring and ultrasonic agitation on the degassing efficiency of $AlSi_9Cu_3$ alloy [J]. Materials Letters, 2009, 63: 2089-2092.

[19] 李晓谦，陈铭，赵世琏，等. 功率超声对7050铝合金除气净化的试验研究[J]. 机械工程学报，2010，46(18) :41-45.

[20] 李晓谦，许显华. 超声频率对铝合金除气影响的试验研究[J].特种铸造及有色合金，2010，30(11) :981-984.

[21] 李争彩，林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究[J].陕西师范大学学报（自然科学版），2008，36(1)：38-42.

[22] LI J W, MOMONO T, YOSHINORI T, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots [J]. Materials Letters, 2008, 62: 4152-4154.

[23] ZHANG Z T, YUE H Y, ZHANG J, et al. Effect of compound field on horizontal continuous casting of Al-1wt.% Si alloy [J]. China Foundry, 2015, 12(2):123-128.

[24] PUGA H, JTEIXEIR A C, BARBOSA J, et al. Potency of high-intensity ultrasonic treatment for grain refinement of magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(1) :19-22.

[25] MIAO L, LU Y P, ZHANG Y B, et al.Effect of ultrasonic treatment and Sr addition on microstructure of Al-20% Si alloy [J]. China Foundry, 2013, 10(4):213-216.

[26] JIANA X, XUA H, MEEK T T, et al. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials. Letters., 2004, 59(2) :190-193.

[27] XI X Y, FREDERIC B C, MICHAEL L, et al. Study on the bubble transport mechanism in an acoustic standing wave field [J]. Ultrasonics, 2011, 51(8) :1014-1025.

[28] GUILLAUME M, DANIEL G, JEAN-MICHEL F, et al. Magnetic resonance imaging of acoustic streaming: absorption coefficient and acoustic field shape estimation [J]. Ultrasonics 2006, 44(3): 272-278.

[29] VICTOR F, ROI G, ALEX L, et al. Preliminary investigations of ultrasound induced acoustic streaming using particle image velocimetry[J]. Ultrasonics. 2001, 39(3) :153-156.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net