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<sup>3</sup> kg·m<sup>3</sup>,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  $2.791 \ 1 \times 10^3 \ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  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<sup>[1,5]</sup>。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<sup>[69]</sup>,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<sup>[10-14]</sup>。

目前关于超声对金属熔体处理的报道比较多,

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

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[2]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

《铸造技术》02/2022

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2000 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。



<sup>1-</sup> 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AI-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200g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5mm,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90s未水冷、超声--底部水冷处理90、120、150s, 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<sub>2</sub>O=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



(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

(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<sup>[22]</sup>:

#### $\eta = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a}$ (1) $ho_{\rm b}$ - $ho_0$

式中, $\rho_0$ 为未除气合金试样密度,×10<sup>3</sup> kg·m<sup>-3</sup>;  $\rho_a$ 为除 气合金试样密度,× $10^3$  kg·cm<sup>-3</sup>;  $\rho_b$ 为合金试样理论 密度(Al-5Cu 合金是2.796 6×10<sup>3</sup> kg·cm<sup>-3</sup>)。

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 1×103 kg·m3;底部水冷时,铸 锭密度有所提升,达到 2.698 7×103 kg·m-3,但效果不 明显;而超声处理90s后,即使不加底部水冷铜板, 铸锭密度也可达到2.736 5×10<sup>3</sup> kg·m<sup>-3</sup>, 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 1×10<sup>3</sup> kg·m<sup>-3</sup>,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<sup>[23]</sup>,如图4<sup>[24]</sup>。熔体经超声处



200 µm

(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 AI-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

Fab.1 Densit	v and Degassing	rate of Al–5Cu allo	v ingots naturally	cooled and cooled	with different treatments
L GOOL DOUDIO	, and Dogaboning		y migoto matur any	coolea ana coolea	with anter ene el caemento

	铸锭密度 /×10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup>	除气效率 $\eta_{deg}(\%)$
	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

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<sup>[25]</sup>。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<sup>[25-26]</sup>。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<sup>[27-29]</sup>。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<sup>181</sup>,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。





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,2000 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<sup>3</sup> kg·m<sup>-3</sup>和 95.1%。

#### 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<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> 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.