

超声处理对 7005 铝合金凝固组织及除气的影响

贾 征^{1,2,3} 喻 兵¹ 乐启炽^{2,3} 周 策³ 路宝坤³ 闵爱武³ 胡文鑫⁴
(1.沈阳大学机械工程学院; 2.东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室; 3.福建省南平铝业股份有限公司博士后科研工作站; 4.白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室)

摘 要 对半连续水冷 DC 铸造 7005 铝合金的凝固组织及除气进行了研究。结果表明,超声处理对锭坯的凝固组织均有一定的细化作用,边部晶粒尺寸从未处理的 200 μm 降至 100 μm ;1/2 半径部位从未处理的 120 μm 降至 100 μm ;中心部位晶粒尺寸从 100 μm 降至 80 μm ,即边部凝固组织细化效果最好;超声杆的插入深度对锭坯的细化效果也有重要的影响;超声处理后的 DC 铸造铝合金中,氢含量降低了 26.8%。综上,超声波对 DC 铸造铝合金具有良好的细化和除气作用。

关键词 7005 铝合金;DC 铸造;超声场;晶粒细化;除气

中图分类号 TG441.8;TG146.21;TG156.96 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effect of Ultrasonic Treatment on Solidification Structure and Degassing of 7005 Aluminum Alloys

Jia Zheng^{1,2,3}, Yu Bing¹, Le Qichi^{2,3}, Zhou Ce³, Lu Baokun³, Min Aiwu³, Hu Wenxin⁴
(1.College of Mechanical Engineering, Shenyang University; 2.Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University; 3.Fujian Nanping Aluminum Co., Ltd.; 4.State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization)

Abstract: Effects of ultrasonic treatment on solidification structure and degassing of DC casting 7005 aluminum alloys were investigated. The results reveal that ultrasonic treatment can refine the solidification structure. The size of grain at the edge is decreased from 200 μm to 100 μm , while that of $R/2$ grain is decreased from 120 μm to 100 μm , and that of center grain is decreased from 100 μm to 80 μm , indicating the desirable refinement of the edge. Inserting depth of ultrasonic probe has important effect on grain refinement, and the hydrogen content in DC casting is decreased by 26.8% after ultrasonic treatment, showing that ultrasonic has desirable refinement and degassing effect on DC casting aluminum alloy.

Key Words: 7005 Aluminum Alloy, DC Casting, Ultrasonic Field, Grain Refinement, Degassing

半连续直接水冷(DC)铸造是生产变形合金锭坯的主要方式。该技术工艺流程简单、结晶速度快,避免了倾斜模铸造的湍流,改善了锭坯的晶内结构,减少了化学成分区域偏析以及氧化夹杂和锭坯中心的组织缩松,并且能够实现生产工艺过程的连续化和自动化,铸锭品质和生产率高,是铝合金锭坯制备的主要方法。

超声场在金属凝固过程的应用研究始于 20 世纪 30 年代,但由于当时超声装置的制造技术还不成熟,没有被应用于处理 Al、Mg 等金属。进入 21 世纪后,随着物理、材料和电子等学科的发展,出现了耐高温变幅杆和大功率超声设备,使超声处理 Al、Mg 等金属成为可能。近年来,超声作用于 Mg 合金的研究逐渐增多。乐启炽等^[1]采用连续超声对 AS41 镁合金熔体进行孕育处理,发现 AS41 镁合金的凝固组织显著细化,晶粒尺寸仅为未经超声处理的 30%~50%,适当提高超声强度、处理温度以及处理时间均可增强细化效果。何丽娜等^[2]、LI J W 等^[3,4]也研究了超声处理对铝合金和工业纯镁的影响,发现适当时间的超声处理可对铝合金及纯镁有一定的细化和除气作用;郭峰^[5]研究发现,采用超声振动能缩短镁合金的凝固时间,加快凝固冷却速率;QIAN M 等^[6]研究表明,超声场对镁合金的细化效果优于碳酸盐的细化效果,但比 Zr 的细化效果差,推测超声

收稿日期:2022-03-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974082);包头稀土研究院开放课题资助项目(2021H2279);内蒙古自治区科技计划资助项目(2020GG0175);辽宁省教育厅重点资助项目(LJKZ1171);中国博士后基金资助项目(2020M680978);辽宁省博士启动基金资助项目(2020-BS-260)
第一作者简介:贾征,男,1982 年出生,副教授,沈阳(110044),E-mail:jz140@163.com
引用格式:贾征,喻兵,乐启炽,等. 超声处理对 7005 铝合金凝固组织及除气的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):793-796.
JIA Z, YU B, LE Q C, et al. Effect of ultrasonic treatment on solidification structure and degassing of 7005 aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):793-796.

在金属熔体中引起的空化形核是导致晶粒细化的主要因素;CHEN X R 等^[7]对超声设备进行了相关调整,发现变频超声处理可以控制镁合金的晶粒尺寸,改变第二相形貌和分布,相比传统定频超声场,变频超声能更大幅度地细化晶粒;张忠涛^[8]研究了超声处理对水平连铸铝合金的影响,发现超声场在铝合金水平连铸中细化效果很好。目前,超声处理铝合金在工业生产中应用的并不多见,而超声场在工业上的推广却是至关重要的。因此,本课题以 7005 工业铝合金为例,研究了超声处理对 DC 铸造铝合金凝固组织及除气的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验装置示意图

采用蓄热式熔炼炉进行熔炼,超声波发生器(超声探头为 TC4 钛合金)最大输出功率为 2 000 W,超声频率为 20 kHz,试验装置示意图见图 1。

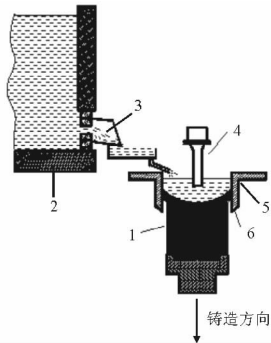


图 1 试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.铸锭 2.电阻加热炉 3.熔体 4.超声杆 5.结晶器 6.冷却水

1.2 试验过程

采用 7005 铝合金,其化学成分见表 1。合金中的主要元素 Al、Zn、Mg 分别以工业纯铝(99.7%)、纯锌(99.9%)和纯镁(99.95%)为原料,Mn、Cr 和 Ti 以 Al-10Mn,Al-5Ti-1B,Al-5Cr 中间合金形式加入,微量元素 Zr 以复合锆盐(原料为氟锆酸钾、氯化锂和氟化钙)加入。首先将纯铝锭加入到 500 kW 中频感应炉内熔炼,当铝锭基本熔化后,加入铜;温度达到 740~750 ℃时,加入 Zn 并撒上覆盖剂;继续加热,当炉内温度达到 760 ℃左右时,依次加入复合锆盐和镁。在 750 ℃左右除气、扒渣,保温 15 min 后出炉,出炉温度为 750~760 ℃。合金熔体转入电阻静置炉(中间包),中间包由控温柜和铂铑铂热电偶精确控制温度,精度为±3 ℃。在铝液温度为 720 ℃左右时,进行二次除气、扒渣以减少含气量和含渣量对组织的影响。保温 20 min 左右,进行铸造。

在铸造过程中施加超声场,功率为 2 000 W,施加温度为 720 ℃,插入深度分别为 20 mm 与 50 mm,铸造速度为 80 mm/min,冷却水量为 70 L/min,为了对比,在铸锭开始阶段不施加超声场,由此制备出初始铸锭。

表 1 7005 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7005 aluminum alloy %									
ω _B									
Zn	Mg	Cu	Mn	Si	Fe	Cr	Zr	Ti	Al
4.0~5.0	1.0~1.8	≤0.10	0.20~0.7	≤0.35	≤0.40	0.06~0.20	0.08~0.20	0.01~0.06	其余

沿铸锭横截面,截取 20 mm×20 mm×10 mm 的立方体,取样位置见图 2。截取的试样分别在 100~2000 号水磨砂纸粗磨,进行机械抛光和鹿皮精抛,直至表面光亮,抛光结束后进行化学腐蚀。采用成分为 2 mL 的氢氟酸+3 mL 的盐酸+5 mL 的硝酸+190 mL 的蒸馏水的腐蚀液进行腐蚀后制成金相试样,腐蚀时间约为 5 s,用冷水清洗后用酒精擦干。采用金相显微镜(Leica DMR)观察微观组织。利用 ISA 图像分析仪统计测定晶粒/枝晶臂的平均尺寸。

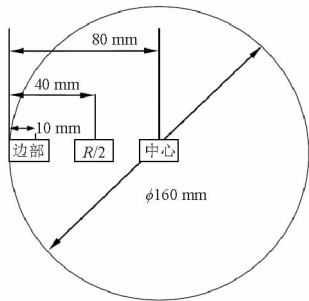


图 2 取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling position

2 试验结果与分析

2.1 超声处理对 7005 铝合金 DC 铸造凝固组织的影响

图 3 为超声处理对 7005 铝合金 DC 铸造凝固组织的影响。可以看出,未经过超声处理时,边部凝固组织较粗大,晶粒尺寸约为 200 μm;经超声处理后,边部凝固组织发生明显变化,晶粒尺寸约为 100 μm。图 4 为合金晶粒尺寸情况统计。可以看出,超声处理后,边部晶粒尺寸降低了 50%;R/2 部位从未处理的 120 μm 降低至 100 μm,降低了 16.7%;中心部位晶粒尺寸从 100 μm 降至 80 μm,降低了 20%。整体上,晶粒全部得到细化,大量的枝晶被打碎,取而代之的是细小、均匀的等轴晶,并且边部的细化效果更明显。

图 5 为同等条件下,超声杆插入液面下深度为 50 mm(已接近引锭杆)时超声处理对 7005 铝合金 DC 铸

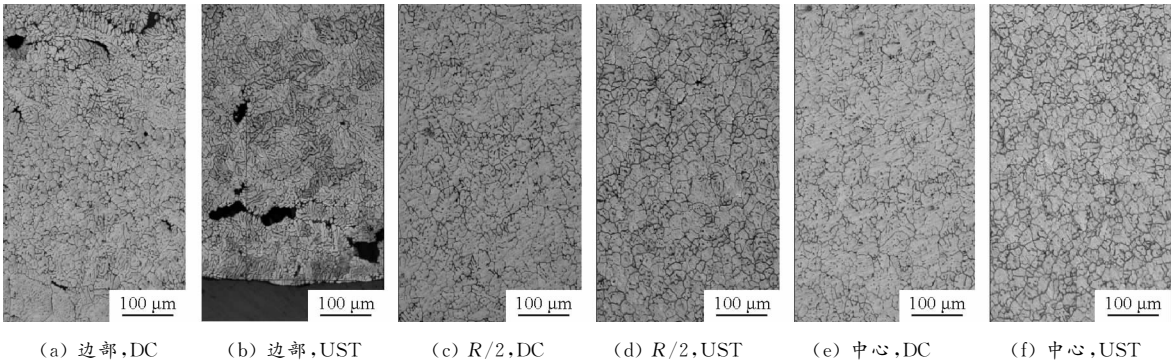


图 3 DC 铸造和超声处理的 7005 合金的显微组织

Fig.3 Microstructures of 7005 alloy by DC casting or ultrasonic treatment

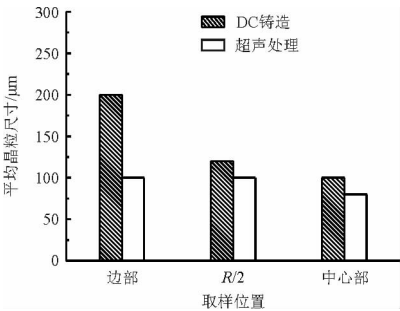


图 4 DC 铸造和超声处理后 7005 合金的晶粒尺寸
Fig.4 Grain size of 7005 alloy after DC casting or ultrasonic treatment

造凝固组织的影响。可以看出,未经过超声处理的铸锭,凝固组织并不均匀,晶粒尺寸约为 $150\text{ }\mu\text{m}$,经超声处理后,组织不但没有细化,反而凝固后全部为发达的树枝晶,这与前面得到的结论不符。

图 6 为图 5 中凝固组织的放大图。结果发现,超声场虽然没有细化铸锭的凝固组织,但有很强的搅拌痕迹,见图 5b。这是因为超声杆插入深度较深(50 mm),接近引锭杆,而熔体的冷却速度较快,超声搅动的是温度较低的合金熔体,搅拌困难,未发挥出其细化作用,因此晶粒没有较大变化,但是可以看到明显的搅拌痕迹。

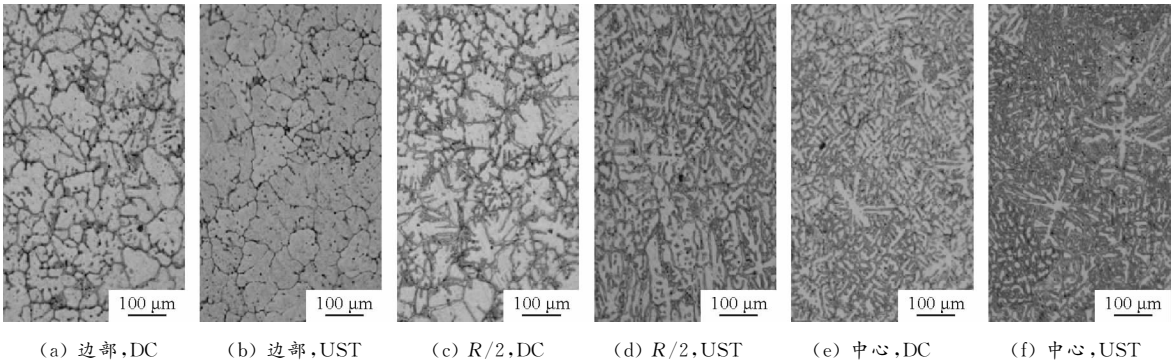


图 5 DC 铸造和超声处理的 7005 合金的显微组织

Fig.5 Microstructures of 7005 alloy by DC casting or ultrasonic treatment

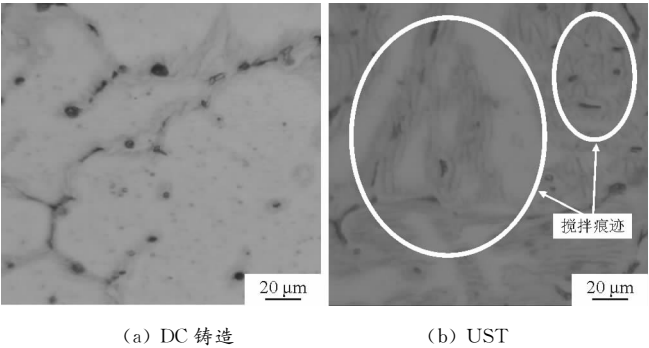


图 6 DC 铸造和超声处理的 7005 合金组织高倍图

Fig.6 High magnification of microstructures of 7005 alloy by DC casting or ultrasonic treatment

2.2 超声处理对 7005 铝合金 DC 铸造除气的影响

超声处理对 7005 铝合金 DC 铸造氢含量的影响见

表 2。可以看出,即使经过旋转喷吹除气后的铝合金熔体,氢含量也较高,为 $0.284\text{ cm}^3/(100\text{ g})$,而经过超声处理后,氢含量降低了 26.8% ,说明超声处理对于 DC 铸造,也有较好的除气效果。

表 2 超声处理前后 7005 合金中氢含量
Tab.2 Hydrogen content in 7005 alloy before and after ultrasonic treatment

7005 合金	氢含量/ $[\text{cm}^3 \cdot (100\text{ g})^{-1}]$
未处理	0.284
超声处理	0.208

图 7 为超声处理对 7005 铝合金 DC 铸造凝固组织的影响,取样部位为中心部位。可以看出,中心部位凝固组织有一定的细化效果,缩松也有所降低。

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,见图 8。经超声处理后晶粒细化的

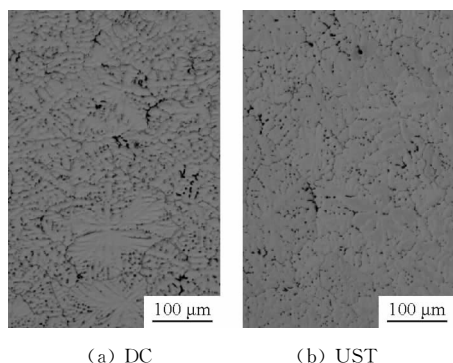


图 7 DC 铸造和超声处理的 7005 合金组织

Fig.7 Microstructures of 7005 alloy by DC casting or ultrasonic treatment

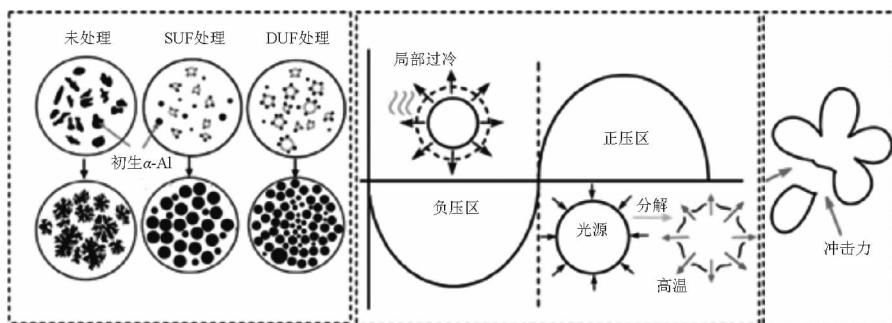


图 8 晶粒细化示意图

Fig.8 Schematic diagram of grain refinement

显。研究表明,超声场对晶粒的细化取决于原始晶粒尺寸,原始晶粒尺寸较小,则细化效果不明显,超声场很难进一步将其细化,因此,边部细化最好, $R/2$ 和中心部位细化效果较弱,这与图 3、图 4 中观察到的现象相符。另外,插入深度非常重要,插入深度较深(如靠近引锭杆附近),则超声的搅拌作用受限,达不到最佳效果。

图 9 为超声除气的机理图^[8]。当施加超声波的时间合适,超声场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,这也和熔体原始氢含量密切相关。本试验中,半连续铸造的氢含量很高,因此,除氢效果很明显。在旋转喷吹除气后,进一步利用超声场净化是很好的措施。

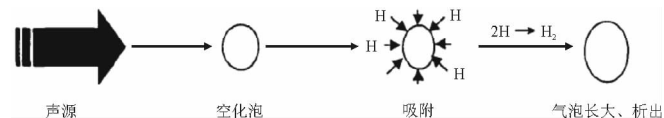


图 9 超声除气机理图

Fig.9 Mechanism diagram of ultrasonic degassing

3 结 论

(1) 超声处理对锭坯的凝固组织均有一定的细化作用,边部凝固组织细化效果最好, $R/2$ 部位和中心部位凝固组织细化效果较弱。

(2) 超声杆的插入深度对锭坯的细化效果也有重要的影响,插入深度太大,超声的搅拌作用无法发挥。

原因包括:空化气泡的生长可以吸收熔体中的热量,在气泡界面受到冷却影响而形核。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,而产生的声流是一种由于声压梯度引起的熔体流动,也有利于晶粒细化。另外,超声产生的液相宏观流动效应表现为熔体内部的普遍回流,可以将非均匀形核和枝晶破碎引起的大量形核输运到整个铝合金熔体中。

由于气隙区处于结晶器和冷却水击水点之间,冷却作用较弱,同时凝固潜热大量释放,冷却速度较慢,晶体生长较慢^[8,9],铸锭边部的凝固组织在气隙区形成,导致DC铸造边部晶粒较粗大,超声场对晶粒的细化明

(3) 超声处理对 DC 铸造铝合金有明显的除气效果。对于 DC 铸造 7005 铝合金锭坯来说,即使经过旋转喷吹除气后的铝合金熔体,氢含量也较高,为 $0.284 \text{ cm}^3/(100 \text{ g})$;而经过超声处理后,氢含量降至 $0.208 \text{ cm}^3/(100 \text{ g})$,比 DC 铸造合金降低了 26.8%。

参 考 文 献

- [1] 乐启炽,张志强,崔建忠,等. 超声孕育处理对 AS41 镁合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 813-819.
- [2] 何丽娜,李军文. 超声波功率对工业纯镁凝固组织及除气的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(2): 182-185.
- [3] LI J W, MOMONO T, YOSHINORI T, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots[J]. Materials Letters, 2008, 62: 4 152-4 154.
- [4] 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.
- [5] 郭峰. 镁合金凝固组织的超声细化机制及工艺研究[D]. 南昌:南昌大学, 2008.
- [6] QIAN M, RAMIREZ A, DAS A. Ultrasonic refinement of magnesium by cavitation: Clarifying the role of wall crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(14): 3 708-3 715.
- [7] CHEN X R, NING F K, HOU J, et al. Dual-frequency ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy[J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2018, 40: 433-441.
- [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]. 辽宁大连:大连理工大学, 2009.
- [9] 陈丹丹. 低频电磁铸造铝合金锭坯中的合金元素偏析研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011.

(编辑:彭瑾)