

超声场对 2219 铝合金连铸坯晶粒尺寸的影响

王宇钊 孟令刚 亚 斌 张长日 徐大召 张兴国
(大连理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 利用 Fluent 软件对 2219 铝合金连铸过程进行数值模拟,并通过小铸锭模拟试验结合数值模拟研究连铸过程中最佳超声施加方式,以达到使铸坯晶粒组织细小均匀的目的。结果表明,凝固速度不同导致铸坯内晶粒组织不均匀,超声施加方式对晶粒细化效果影响较大。当凝固时间为 4 min 时,在第 1 min 加超声细化效果较为理想,晶粒尺寸细化了 24.5%;在凝固末期施加超声细化效果存在较大梯度,沿作用方向降低。连铸中宽度方向中部施加超声作用,探头应位于糊状区上方。

关键词 2219 铝合金;铸造;超声处理;晶粒细化

中图分类号 TG144;TG249.7;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ultrasonic Field on Grain Size of Continuous Casting Ingot of 2219 Aluminum Alloy

Wang Yuzhao, Meng Linggang, Ya Bin, Zhang Changri, Xu Dazhao, Zhang Xingguo
(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology)

Abstract: The continuous casting process of 2219 aluminum alloy was simulated by Fluent software. The optimal ultrasonic application mode in continuous casting process was explored to achieve the uniform grain structure of casting ingots through the combination of simulation experiment of small ingot and the numerical simulation. The results indicate that different solidification speeds lead to uneven grain structure in the continuous casting ingots, and the ultrasonic application method has a great influence on the effect of grain refinement. When the solidification time is 4 min, the ultrasonic refining is more uniform in the first minute, reaching 24.5%. At the end of solidification, the ultrasonic refinement effect has a large gradient, which is decreased along the action direction. During the continuous casting process, ultrasound was applied in the middle of the width direction, and the probe should be located above the mushy zone.

Key Words: 2219 Aluminum Alloy, Casting, Ultrasonic Treatment, Grain Refinement

2219 铝合金属于可热处理强化的 2xxx 系铝合金,具有较高的比强度和良好的焊接性能以及力学性能,工作温度范围为-250~300℃,因而在航空航天领域获得广泛的应用,常被用来制造运载火箭燃料贮箱、飞机蒙皮和结构件等^[1,2]。航空航天等领域的发展对更大规格铝合金结构件的需求越来越大^[3],而对于大规格的铝合金铸锭,由于金属凝固过程存在尺寸效应,尺寸越大的铸锭凝固速度越慢,宏观偏析、缩孔、缩松等缺陷越严重^[4,5],常规加工方式难以解决。

有研究者提出的超大尺寸金属成形技术^[6,7],突破原来“以大制大”获得大锻件的思路局限,提出“基材构筑、以小制大”的理念,将小型均质化铸坯作为基元,通

过表面加工、清洁组坯、真空封装、高温形变等技术,获得超厚尺度均质化大锻坯,通过后续锻造与热处理,获得高性能均质大锻件。该技术的先决条件是构筑组织性能均匀的铸坯,因此为满足均质化要求,需要针对铸坯中晶粒尺寸差异较大的区域进行细化,使整体晶粒尺寸达到同一水平。关于超声在铸造过程中的应用及作用机理的研究已经很多^[8~10]。赵金国^[11]利用超声铸造制备汽车用铝合金,发现合金的平均晶粒尺寸细化明显,同时提高了铝合金的抗拉强度和伸长率等力学性能。ZHANG L 等^[12]在 $\phi 1\ 380\ \text{mm}$ 2219 铝合金连铸过程中施加超声,发现初生 $\alpha\text{-Al}$ 相从铸锭心部到边缘显著细化,超声抑制了共晶相的团聚,并且降低了片状

收稿日期:2021-01-19;修改稿收到日期:2021-03-14
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702903,2018YFA0702901)
第一作者简介:王宇钊,男,1995 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail:tj490656879@163.com
通信作者:张兴国,男,1960 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail:zxgwj@dlut.edu.cn
引用格式:王宇钊,孟令刚,亚斌,等. 超声场对 2219 铝合金连铸坯晶粒尺寸的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 245-1 250.
WANG Y Z, MENG L G, YA B, et al. Effects of ultrasonic field on grain size of continuous casting ingot of 2219 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 245-1 250.

共晶网格的连续性。郭兴等^[13]也发现在 $\phi 1\ 250\ \text{mm}$ 的 2219 铝合金半连铸过程中施加恒定功率的超声处理,Cu 元素的宏观偏析下降了 24%,晶内的元素固溶度上升了 13%。但由于超声作用范围有限,在尺寸较大铸锭的连铸过程中,需要施加多个超声探头对晶粒组织粗大区域进行细化,所以确定连铸过程中需要施加探头位置的难题亟待解决。

本课题选用截面尺寸为 $200\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$ 的 2219 铝合金作为研究对象,在电磁铸造过程中研究宽度方向上的超声施加方式。基于 Fluent 软件对连铸过程进行仿真模拟,根据糊状区尺寸确定铸锭不同位置的凝固时间,然后针对计算的凝固时间浇注小铸锭进行模拟试验,分析不同凝固时间对晶粒组织的影响。因为超声效果随着作用方向而降低,因此超声探头插入的深度及不同深度的作用效果同样是研究的关键。通过浇注小铸锭试验确定最佳的超声施加方式,为大尺寸铝合金板坯的连铸工艺优化提供参考。

1 研究方法

1.1 连铸过程数值模拟

基于 Fluent 软件,对连续铸造过程进行数值模拟分析,根据熔池形貌及铸锭不同位置的糊状区尺寸,判断铸锭不同位置凝固速度的差异性。由于铸锭为中心对称,所以取 1/4 铸锭进行建模及网格划分。本模型全部采用六面体网格,并对浇注入口等流速较大区域进行网格加密。

电磁铸造示意图见图 1。当金属液由流槽流出后,电磁场产生的电磁力使液柱呈半悬浮状态,与结晶器无物理接触,后经底模及冷却水冷却凝固成坯壳,逐步引锭成形。所以在本模型中,铸锭液固界面上部视为在空气中悬浮的熔融金属液,铸锭下部为水幕冷却下的凝固坯。

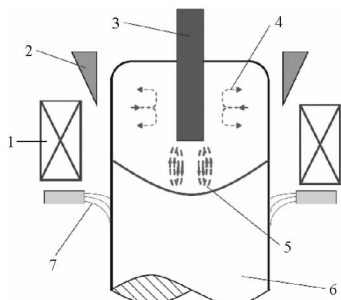


图 1 电磁铸造示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic casting

- 1.感应线圈 2.屏蔽罩 3.超声探头 4.金属液流
5.空化及声流效应 6.铸锭 7.冷却水

磁场产生的电磁力虽然可以通过改变流场影响糊状区的形貌,但对超声的作用能力影响很微弱,所以暂

未引入电磁场。根据拉坯速度,将模型所有边界壁面统一设置为移动壁面;入口处流速依据拉坯速度由质量守恒定律计算得出,流入温度设置为熔体温度;出口处设置为自然流出壁面;由于与冷却水相比,空气对铸锭的冷却作用很微弱,所以将铸锭与空气接触的壁面设置为绝热边界;铸锭与冷却水接触壁面的对流传热系数 h_c 为^[14]:

$$h_c = (-1.67 \times 10^5 + 704\bar{T}) \cdot Q'^{1/3} \quad (1)$$

式中, $\bar{T}$ 为铸锭表面和冷却水的平均温度,K; Q' 为冷却水单位周长上的体积流量, m^3/s 。

为方便模拟,作如下基本假设:①铝熔体为不可压缩流体;②固-液界面假设为无滑移边界,即壁面处速度为 0;③视铸锭上表面为平面;④忽略固、液相的密度差。数值模拟计算参数见表 1。

表 1 数值模拟计算参数^[15]

Tab.1 Parameters of numerical simulation calculation^[15]

拉坯速 度/(cm· min ⁻¹)	浇注 温度/ K	铝合金密 度/(kg· m ⁻³)	液相线动 力粘度/ (g·s·m ⁻²)	液相 线温 度/K	固相 线温 度/K	冷却 水温 度/K	凝固潜 热/(kJ· kg ⁻¹)
5	1 023	2 700	1.38	916	787	298	360

拉坯速度为 5 cm/min 时,从铸锭中心部位沿宽度方向取截面,其熔池及糊状区形貌的模拟结果见图 2。由于表面激冷,铸锭内部的固液界面呈向下的弧状,从边部到心部糊状区逐渐变厚,凝固速度相应逐渐减小。选取图 2 中区域 a~c,糊状区厚度分别为 5、10 和 20 cm,根据拉坯速度,可知相应凝固时间约为 1、2、4 min。

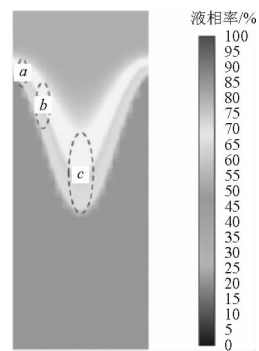


图 2 截面糊状区分布图

Fig.2 Distribution diagram of cross-section mushy zone

1.2 凝固模拟试验

为达到晶粒尺寸均匀的目的,针对不同位置凝固时间,利用小铸锭进行模拟试验,分析不同凝固时间下的组织差异,并探究需要施加超声的位置及超声施加的方法。由于在连铸过程中超声探头的位置固定,其作用效果只针对同一片区域内具有相同特征(固相率)的熔体,且作用时间受拉坯速度限制。本课题为规避小铸锭与连铸凝固特点上的差异并保证熔体组织稳定,根据所选连铸参数,固定超声作用时间为 1 min,该时间下熔体

在小区域范围内呈现相对一致的凝固特征。

试验使用可控温 SG2-5-10 型井式电阻炉熔炼 2219 铝合金,原材料为工业纯铝(纯度>99.7%,质量分数,下同)、Al-50Cu、Al-5V、Al-10Mn、Al-5Zr、Al-5Ti 中间合金。具体熔炼步骤为:将纯铝随炉升温加热至熔化(660℃),待熔体温度达到 730℃时加入中间合金,保温至完全熔化后,进行搅拌和精炼处理,在 730℃时浇注到不同预热温度的圆柱模具中制备小铸锭。铝熔体总质量为 4 kg,将模具预热温度分别控制在 20、150 及 500℃,凝固时间分别为 1、2、4 min。超声设备最大功率为 450 W,前部探头选用直径为 30 mm 的不锈钢探头。超声探头下开始每隔 1.5 cm 取 1 次样,将试样抛光腐蚀后,在 LEICA DMi8 金相显微镜和 JXA-8530F Plus 型电子探针(EPMA)上进行晶粒尺寸观察及合金第二相形貌分析。

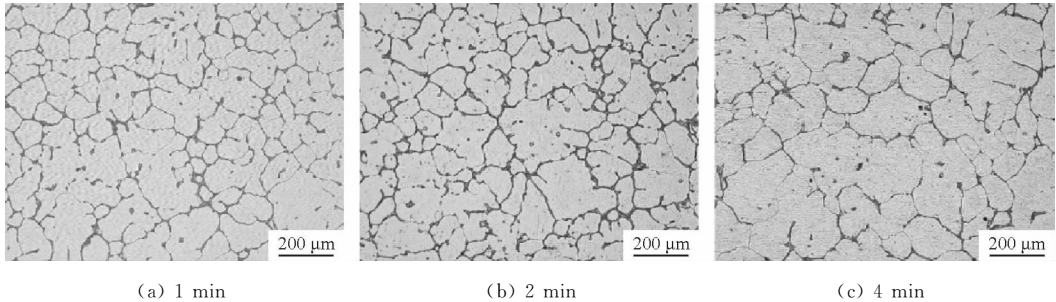


图 3 2219 铝合金不同凝固时间下金相组织

Fig.3 Metallography of 2219 aluminum alloy under different solidification time

99.6 μm,差别不大,无需超声细化。而凝固 4 min 的铸锭,晶粒尺寸达到 137.4 μm,与凝固 1 min 的铸锭相比,增大了 43.1%。因此,为实现晶粒组织均匀的目的,需对凝固时间为 4 min 的区域施加超声。

2.2 凝固初期超声对晶粒尺寸的影响

对凝固 4 min 的模拟铸锭,在凝固的第 1 min 开始施加 450 W 超声,其探头下不同距离的金相组织见图 4。结果表明,在超声作用下,组织由枝晶转变为等轴晶

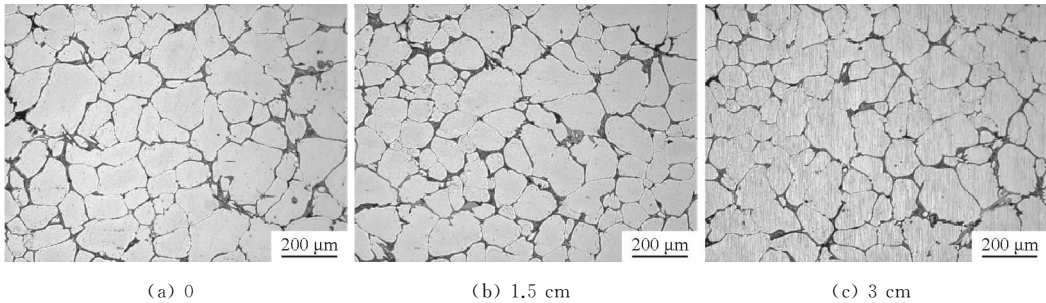


图 4 凝固第 1 min 时超声距探头不同距离金相组织及晶粒尺寸

Fig.4 Metallography and grain size of ultrasonic probe at different distances from probe in the first minute of solidification

2.3 凝固末期超声对晶粒尺寸的影响

对凝固 4 min 的模拟铸锭,在凝固的最后 1 min 施加 450 W 超声后的组织见图 5。对晶粒尺寸进行统计

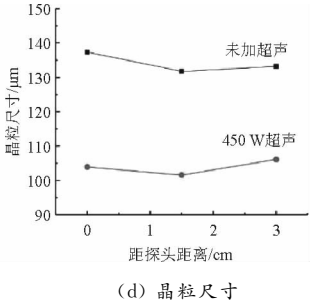
2 试验结果分析

2.1 不同凝固时间对晶粒尺寸的影响

在连续铸造过程中,冷却水全部集中在铸锭表面,而由于铸锭尺寸偏大,铸锭内部的冷却强度远弱于铸锭表面,这种不同部位冷却速度的差异造成了铸锭组织的不均匀性。

由于当熔体温度为 600℃时 2219 铝合金的固相率已经达到 80% 以上,所以取凝固时间为浇注完毕至熔体降至 600℃的时间,误差控制在 10 s 以内。图 3 是 2219 铝合金在凝固时间为 1、2、4 min 的金相组织。可以看出,铸锭组织以等轴晶及少量枝晶组织为主,并且随着凝固时间延长,晶粒尺寸整体呈增大趋势。凝固时间为 1 min 和 2 min 的铸锭,晶粒尺寸分别为 96.0 和

组织,晶粒尺寸明显减小且组织均匀。利用 Image Pro Plus 软件对距探头不同距离的试样进行晶粒尺寸测量,并与未加超声试样进行对比,见图 4d。可以看出,超声处理对晶粒尺寸具有显著的细化效果,且随着距探头距离的增加,细化效果并没有减弱,在高度方向上细化作用较为均匀,平均晶粒尺寸细化至 103.8 μm,对比同等凝固时间下未加超声处理铸锭的晶粒尺寸,细化了 24.5%。



对比后发现,超声对晶粒尺寸的细化效果随着距探头距离的增大明显下降,见图 5d。在距探头 0 和 1.5 cm 处的平均晶粒尺寸差距较小,而随着距离继续增大,超声

细化效果急剧衰减,在探头下 3 cm 处出现枝晶组织,且晶粒尺寸接近未加超声时水平。细化效果随着距探头

距离的增大,超声效果越来越弱,与同等条件下在凝固初期施加超声的作用效果具有较大差异。

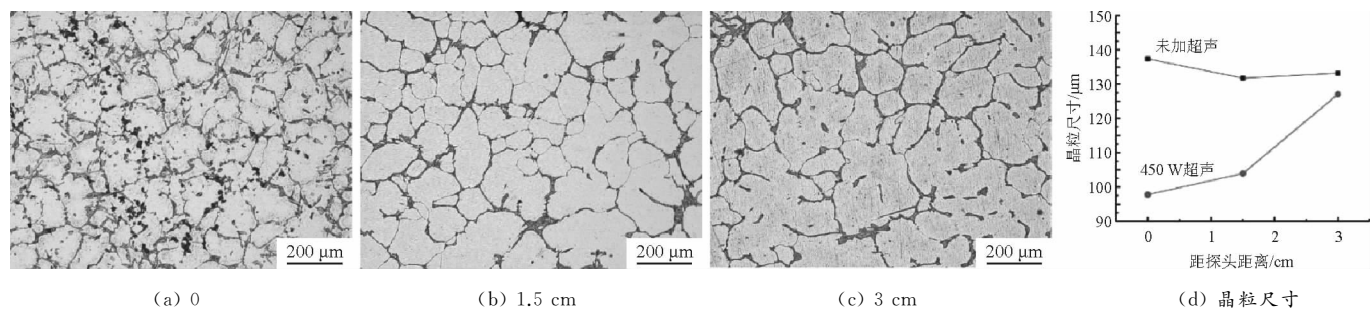


图 5 凝固最后 1 min 超声距探头不同距离的金相组织和晶粒尺寸

Fig.5 Metallography and grain size of ultrasonic probe at different distances from probe in the last minute of solidification

2.4 超声处理对凝固末期第二相形貌的影响

超声处理对铸锭的第二相组织具有相似的细化效果,见图 6。在 2219 铝合金中,除 Cu 之外其他元素含量较少,Zr、V、Ti 等元素主要形成细小的金属间化合物并均匀分布在合金基体中,所以合金中的第二相主要为 Al_2Cu 相^[16,17]。

在 EPMA 下观察距探头不同距离试样的显微组织分布发现,未超声处理的 Al_2Cu 相沿晶界呈连续的骨骼状分布;而经 450 W 超声处理后,从图 6b 可见, Al_2Cu 相明显破碎,沿晶界分布的长条相细化为破碎的点状相和块状相;距探头 1.5 cm 时, Al_2Cu 相虽未出现明显的破碎,但与未加超声处理的组织对比,呈现了明

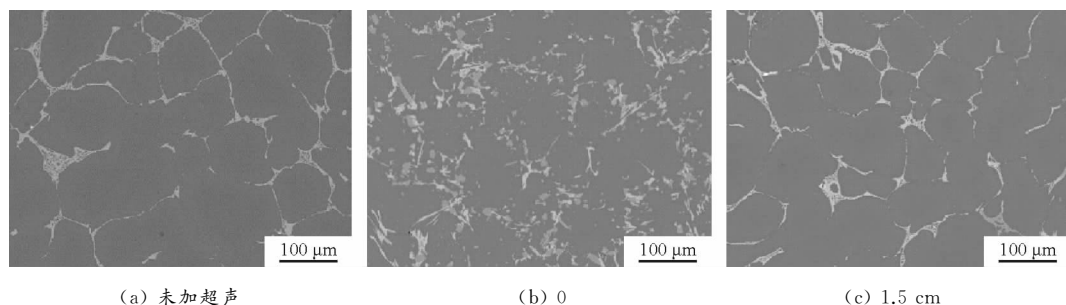


图 6 距探头不同距离第二相分布

Fig.6 Second phase distribution in the alloy at different distances from probe

显的细化效果,第二相连续性降低且尺寸减小。

2.5 不同凝固时间施加超声作用机理分析

对比图 4 和图 5 可以发现,对凝固 4 min 的模拟铸锭,在凝固的第 1 min 加超声与在凝固最后 1 min 施加超声对晶粒的细化效果存在很大差异。这主要是超声作用区域的凝固状态不同,固相率相差较大导致的。对于连续铸造过程来说,固相率不同意味着超声作用于糊状区的位置不同,而研究超声探头插入糊状区的深度对指导连铸过程超声施加位置具有积极意义。

为研究在连铸过程中超声探头合理的插入深度,需要分析铸锭中心区域的糊状区分布及液相率随铸锭高度的变化趋势。由于超声处理 1 min,根据拉坯速度及此区域的凝固时间,将糊状区平均分为 I、II、III、IV 4 区域,每个区域的高度约为 5 cm,即每 min 铸锭向下移动的距离,见图 7。依超声作用区域及该区域固相率分析超声作用差异原因,并探究适宜施加超声的位置。

图 8 为超声作用示意图。当凝固 4 min 时,在凝固

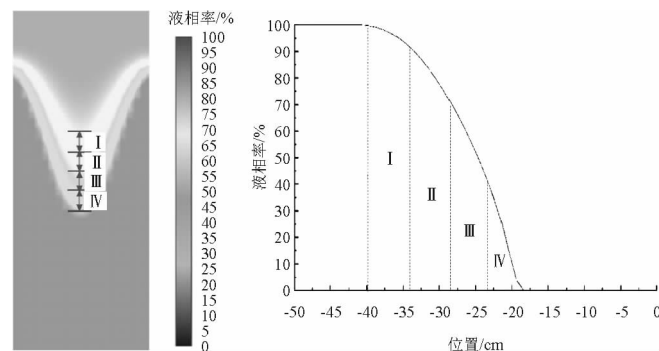
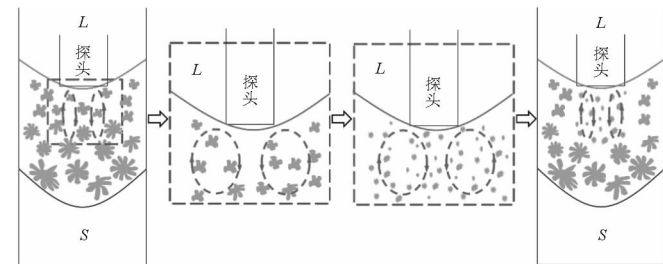


图 7 凝固区域划分示意图

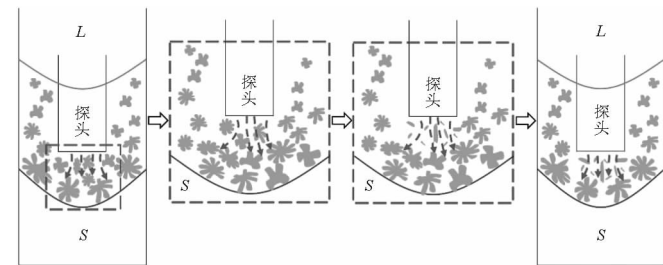
Fig.7 Schematic diagram of solidification zone division

第 1 min 加超声,此时超声探头位于糊状区顶部,超声作用的主要阶段为图 7 中区域 I,此区域的固相率约为 10%。从图 8a 可以看出,在此阶段,铝熔体开始凝固,在熔体中形成了细小的初始枝晶组织,作为后续形核的质点。此时施加超声,大部分初始枝晶组织均悬浮于熔体之中,对超声效果的阻碍作用并不明显。在超声的空化作用下,探头下一定范围内形成大量微小的空化泡,

这些空化泡迅速破裂并瞬间产生局部的高温高压,释放出巨大的能量,从而破碎了熔体中先形成的细小枝晶,使其成为微小颗粒悬浮于熔体之中。同时,由于铝熔体存在负载阻抗,导致超声声能的损耗,造成在超声探头下沿传播方向存在一定声压梯度;由于距探头不同距离存在声压压差,从而在一定范围内引起了熔体的对流。由于声流效应,探头下破碎的细小悬浮颗粒随熔体流向铸锭底部,最后均匀分布于探头下的熔体中。停止超声作用后,随着熔体的逐渐凝固,这些被打碎的枝晶颗粒将作为异质形核质点,提高熔体的形核率,形成了在一定范围内均匀细化的效果。



(a) 第 1 mm 超声



(b) 最后 1 mm 超声

图 8 超声效果示意图

Fig.8 Schematic diagram of ultrasound effect

在当凝固末期施加超声作用,超声探头伸入糊状区 15 cm,此时超声的主要作用阶段为图 7 中区域Ⅳ,固相率已经达到 60% 以上。从图 8b 可知,在此凝固区间,糊状区已经形成了粗大的枝晶组织。此时施加超声,在超声空化作用下,粗大枝晶组织破碎并悬浮于熔体之中,但由于此时液相占比已经很低,熔体的流动性很弱,这些破碎的枝晶无法被运输到其他区域,所以探头底部的组织成明显的破碎状。并且随着距探头距离的增大,超声声压逐渐降低,发达的枝晶组织对超声的衰减作用很明显,当达到一定距离时,空化作用已经不足以打破某些粗大的枝晶壁,导致对枝晶的破碎效果下降,从而出现随着距探头距离的增大,晶粒细化效果逐渐降低的现象。随着距离继续增大,固相率进一步提高,固态树枝状结构已经基本形成,由于缺少液相,超声对这一区域的细化效果急剧衰减,晶粒尺寸基本与未加超声的相同。

3 结 论

(1)对比不同凝固时间 2219 铝合金铸锭的金相组织可知,随着凝固时间延长,晶粒尺寸整体呈增大趋势,在凝固时间为 1 min 和 2 min 时相差不大,凝固 4 min 时晶粒尺寸差达到 43.1%。

(2)2219 铝合金不同超声施加方式其作用效果存在较大影响。当凝固 4 min 时,在凝固初期施加超声对晶粒组织的细化效果最佳且较为均匀;在凝固末期超声的晶粒细化效果随着距探头距离的增大明显衰弱,在探头下 3 cm 处逐渐达到未施加超声水平。因此超声探头位于糊状区顶部时,超声作用效果最佳。

(3)超声对 2219 铝合金第二相与对基体组织具有相似的细化效果,探头下 Al_2Cu 相呈明显的破碎状,随着距探头距离的增加,细化效果逐渐减弱。

参 考 文 献

- [1] MONDOL S, KASHYAP S, KUMAR S, et al. Improvement of high temperature strength of 2219 alloy by Sc and Zr addition through a novel three-stage heat treatment route[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A723: 157-166.
- [2] LU Y, WANG J, LI X, et al. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A723: 204-211.
- [3] 雷洋,龚海.超声无损评价 2219 铝合金晶粒尺寸[J].热加工工艺, 2019, 48(19): 65-69.
- [4] 唐露华,何克准,李承波,等.均匀化后冷却方式对大规格 2219 铝锭组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(4): 439-442.
- [5] 郭兴,蒋日鹏,李晓谦,等.超声处理铝合金熔体对半连铸大铸锭组织与偏析的影响[J].热加工工艺, 2016, 45(7): 25-29.
- [6] 中科院研制成功世界最大无焊缝整体不锈钢环形锻件[J].中国冶金, 2019, 29(4): 59.
- [7] 孙明月,徐斌,谢碧君,等.大锻件均质化构筑成形研究进展[J].科学通报, 2020, 65(27): 3 043-3 058.
- [8] SALLOUM-ABOU-JAOUDE G, ESKIN D G, LEBON G S B, et al. Altering the Microstructure Morphology by Ultrasound Melt Processing During 6XXX Aluminium DC-Casting[M]. Springer, Cham:Light Metals, 2019.
- [9] ESKIN G I. Effect of ultrasonic (cavitation) treatment of the melt on the microstructure evolution during solidification of aluminum alloy ingots[J]. Z. Metallkd, 2013, 93(6): 502-507.
- [10] KOMAROV S V, KUWABARA M, ABRAMOV O V. High power ultrasonic in pyrometallurgy: Current status and recent development[J]. ISIJ Int., 2005, 45(12): 1 765-1 782.
- [11] 赵金国.超声铸造对汽车用 7050 铝合金组织和力学性能的影响 [J].热加工工艺, 2020, 49(3): 74-76.
- [12] ZHANG L, LI X, LI R, et al. Effects of high-intensity ultrasound on the microstructures and mechanical properties of ultra-large 2219 Al alloy ingot[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A763: 138 154.

深冷处理对非平衡凝固 Mg-6Al-1Y 合金组织的影响

刘 灵 杨 伟 刘 亮 张丽攀 余 欢 王振军
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 采用铜模喷铸与深冷处理相结合,制备出 Mg-6Al-1Y 细晶合金,对比研究深冷处理对合金快冷组织及其时效析出的影响。结果表明,由于凝固过冷度及形核率增大,快冷 Mg-6Al-1Y 合金的组织主要为细小等轴枝晶,局部存在微米级粒状晶,同时形成高固溶组织及位错结构。深冷过程中引起的应力累积效应有利于快冷合金中细小枝晶发生碎断,并随深冷时间的增加而趋于球化,其中深冷 32 h 后的平均晶粒尺寸降至 10 μm,同时位错密度急剧升高。经 200 ℃×16 h 时效处理后,快冷与深冷协同作用下 Mg-6Al-1Y 合金的晶界不连续析出程度大幅增加,同时晶内连续析出相形貌及数量得到有效改善,合金显微硬度(HV)高达 71.3,相比原始快冷合金提高了 11.9%。

关键词 非平衡凝固;深冷处理;晶粒细化;时效析出
中图分类号 TG156.91;TG146.22 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influences of Cryogenics Treatment on the Non-equilibrium Solidified
Mg-6Al-1Y Alloy

Liu Ling, Yang Wei, Liu Liang, Zhang Lipan, Yu Huan, Wang Zhenjun
(National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University)

Abstract: Grain refinement of Mg-6Al-1Y alloy was achieved by the collaboration of copper mold injection casting and cryogenics treatment. The influences of cryogenics treatment on non-equilibrium solidified structure and subsequent precipitation behavior were investigated. The results reveal that with the increase of undercooling and corresponding nucleation rate, the formation of fine equiaxed dendrite grains with partial micron-size granular grains can be observed, accompanied by the formations of high supersaturated structure and considerable dislocation defect under the non-equilibrium solidification condition. Stress accumulation induced by cryogenic treatment is beneficial to the fragmentation of fine dendrites in rapidly cooled alloy and spheroidization of segments occurs subsequently. The average grain size is decreased to 10 μm and the amount of dislocation density is increased significantly after cryogenics for 32 h. As for the rapid cooled and cryogenic treated alloy, discontinuous precipitation at grain boundary is accelerated during the isothermal annealing at 200 ℃ for 16 h. Moreover, both the morphology and quantity of continuous precipitation within grain are improved effectively. The resultant hardness is increased to 71.3 HV, which is 11.9% higher than that of the original rapidly cooled alloy.

Key Words: Non-equilibrium Solidification, Cryogenic Treatment, Grain Refinement, Precipitation

收稿日期:2021-04-24;修改稿收到日期:2021-05-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52061032,51461032);江西省教育厅资助项目(GJJ180513)
第一作者简介:刘灵,男,1995 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:deliuling@163.com
通信作者:杨伟,男,1983 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail:nchkyw@163.com
引用格式:刘灵,杨伟,刘亮,等. 深冷处理对非平衡凝固 Mg-6Al-1Y 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 250-1 254.
LIU L, YANG W, LIU L, et al. Influences of cryogenics treatment on the non-equilibrium solidified Mg-6Al-1Y alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 250-1 254.

[13] 郭兴,蒋日鹏,李晓谦,等.超声处理铝合金熔体对半连铸大铸锭组织与偏析的影响[J].热加工工艺,2016,45(7):25-29.

[14] 鞠增业.7050 合金大规格铸锭超声半连铸多场耦合建模与仿真及试验研究[D].长沙:中南大学,2013.

[15] 徐婷,张立华,李瑞卿,等.铝合金大铸锭超声半连铸多场耦合的数值模拟与试验研究[J].工程科学学报,2016,38(9):1 270-1 277.

[16] 张航,唐露华,何克准,等.大规格高性能 2219 铝合金圆锭铸造工艺研究[J].轻合金加工技术,2016,44(12):8-14.

[17] 李康,李晓谦,李瑞卿.铸造过程中超声处理对 2219 铝合金固溶后组织和性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(13):18-22,26.

(编辑:刘晨辉)