

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.4088

# 超声与氩气冷却对 2219 铝合金组织及偏析的影响

蒋日鹏<sup>1,2</sup>, 刘京柱<sup>1,2</sup>, 李瑞卿<sup>1,2</sup>, 胡仁俊<sup>1,2</sup>, 李安庆<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 轻合金研究院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学 极端服役性能精准制造全国重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 2219 铝合金作为一种广泛应用于航天、汽车制造等领域的重要合金, 其在一般重力铸造条件下生产的铸锭容易出现孔缩、第二相聚集、宏观偏析等问题。本研究在高纯气氛保护条件下, 采用超声辅助处理熔体与氩气冷却相结合的方法制备了 2219 铝合金铸锭。通过光谱仪、光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)等手段研究了超声波、氩气冷却对改善 2219 铝合金凝固组织及宏观偏析的影响。结果表明, 在高纯气氛保护下, 超声作用对 2219 铝合金铸造具有良好的细化晶粒、均匀化第二相的效果, 组织内无疏松缩孔缺陷。当超声与氩气冷却共同作用时, 铸锭晶粒细化及第二相均匀化效果更佳, 平均晶粒尺寸减小 69.4%。超声空化效应促进了更多溶质元素在铝熔体中的均匀分布, 提高了晶粒形核率, 同时在空化破碎与声流的扰动效应作用下, 第二相组织更为细小均匀, 宏观偏析显著改善。

**关键词:** 气氛保护; 铸造; 2219 铝合金; 超声铸造; 第二相; 宏观偏析

中图分类号: TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0440-06

## Effects of Ultrasonication and Argon Cooling on the Microstructure and Segregation of 2219 Aluminium Alloy

JIANG Ripeng<sup>1,2</sup>, LIU Jingzhu<sup>1,2</sup>, LI Ruiqing<sup>1,2</sup>, HU Renjun<sup>1,2</sup>, LI Anqing<sup>1,2</sup>

(1. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** As an important alloy widely used in the aerospace and automobile manufacturing industries, 2219 aluminium alloys are prone to hole shrinkage, second-phase aggregation, and macroscopic segregation of ingots produced under general gravity casting conditions. In this study, 2219 aluminium alloy ingots were prepared by combining the ultrasound-assisted treatment of melt and argon cooling under high-purity atmosphere protection. The effects of ultrasonication and argon cooling on the solidification structure and macroscopic segregation of 2219 aluminium alloy were studied by spectrometer, OM, SEM, etc. The experimental results show that under high-purity atmosphere protection, ultrasonication has a good effect on refining grains and homogenizing the second phase in 2219 aluminium casting, and there are no loose shrinkage defects in the microstructure. When ultrasonication and argon cooling are applied together, the grain refinement and second-phase homogenization of the ingot are improved, and the average grain size is reduced by 43.5%. Due to the cavitation effect of ultrasound, the nucleation of the melt is accelerated, promoting the solid solution of more solute elements in the aluminium matrix. At the same time, under the disturbance effect of cavitation fragmentation and sound flow, the second phase structure is finer and more uniform, and the macroscopic segregation is greatly improved.

**Key words:** atmosphere protection; casting; 2219 aluminium alloy; ultrasonic casting; second phase; macroscopic segregation

2219 铝合金是属于 Al-Cu-Mn 系的一种高强度铝合金, 具有良好的强度、韧性、耐腐蚀性及耐磨性, 广泛应用于航空航天、军事船舶、高速列车及汽车等装备制造领域<sup>[1-4]</sup>。随着这些装备结构件性能要

求不断提高, 对制造构件用 2219 铝合金铸锭坯料质量要求愈发严格。2219 铝合金第二相组织的形貌、GP 区、 $\theta$  相等分布情况直接影响其性能<sup>[5]</sup>。在一般重力铸造条件下, 2219 铝合金铸锭容易出现孔缩, 以

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 湖南省自然科学基金(S2024JJMSXM1602)

作者简介: 蒋日鹏, 1983 年生, 博士, 副研究员。研究方向为铸造技术与装备。Email: jiangrp@csu.edu.cn

通讯作者: 李瑞卿, 1987 年生, 博士, 讲师。研究方向为铸造技术与装备。Email: lli87430@126.com

引用格式: 蒋日鹏, 刘京柱, 李瑞卿, 胡仁俊, 李安庆. 超声与氩气冷却对 2219 铝合金组织及偏析的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 440-445.

JIANG R P, LIU J Z, LI R Q, HU R J, LI A Q. Effects of ultrasonication and argon cooling on the microstructure and segregation of 2219 aluminium alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 440-445.

及严重的枝晶偏析而导致的第二相聚集共晶组织等问题。气氛保护铸造能有效改善铸锭缩孔、疏松,提升凝固组织致密性,是一类能高效优化铸锭内部组织、易于操作、成品率高的新型铸造工艺。而且气氛保护铸造对生产开发特殊微成分(如添加稀土元素)调控的 2219 铝合金具有重要意义。

目前,对于在气氛保护环境下进行的铸造,主要困难体现在人工干预凝固过程,特别是在气氛保护状态下实现快速凝固降温。此外,以较低成本达到较高气氛纯度也是影响这一铸造技术推广的难点。利用超声处理熔体辅助铸锭凝固成形是一种新型技术,1936年,前苏联科学家 Sokolov<sup>[6]</sup>首次进行了超声处理熔体试验,发现超声波对熔体的凝固过程具有较大的影响。在此之后,越来越多的学者开始探究超声在铸造方面的应用,许多研究证实,在金属熔体凝固过程中施加超声波能场,超声波在介质中传导时会产生周期性的应力和声压变化,从而在局部产生高温高压效应<sup>[7-9]</sup>,对金属熔体的凝固过程产生了显著影响,包括细化晶粒、减少偏析等<sup>[9-11]</sup>,这些发现为超声铸造技术在铝合金生产中的应用提供了理论依据。中南大学<sup>[12-15]</sup>将超声波辅助铸造技术应用于 2xxx 与 7xxx 大型铸锭的半连续铸造工业化生产中,发现该技术能有效改善半连续铸锭的内部组织,达到细化晶粒,抑制宏观偏析,改善晶内偏析的效果。

基于上述超声辅助铸造的技术优势与工艺效果,为了更大程度地提高重力浇铸 2219 铝合金铸锭的质量,本文在气体保护氛围下,通过施加超声与气体冷却共同作用制备了 2219 铝合金铸锭,探究超声作用及快速冷却气氛保护铸造对 2219 铝合金微观组织及宏观偏析的影响,对于制造高品质 2219 铝合金铸锭具有重要意义。

## 1 实验材料与方法

图 1 为多功能真空熔铸实验示意图。采用高纯气氛保护铸造,2219 铝合金圆锭直径为 100 mm。熔铸开始前,将铸模清理、接入冷却气管并吊入真空熔铸炉中,放置在合适位置;然后将 2219 铝合金块放入电阻炉中,设定炉内温度为 800 °C 并加热,融化后持续保温 1 h,取中心区域部分熔体进行成分检测,如表 1 所示。在密闭真空炉中开真空泵使炉内保持真空(即炉内气压在 50 Pa 以下),再通入纯度为 99.999% 的氩气作为保护气体,直到炉内气压与实验环境气压相同。之后保持氩气持续流通,打开炉体上方的法兰盖,将超声振动系统固定于法兰

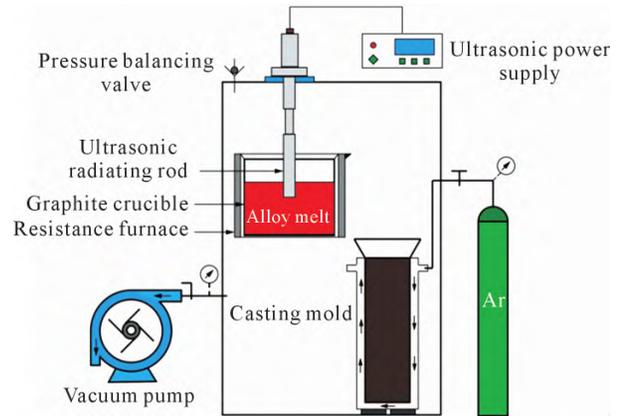


图 1 多功能真空熔铸实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the multifunctional vacuum casting experiment

表 1 2219 铝合金成分配比

Tab.1 Chemical composition of the 2219 aluminium alloy (mass fraction/%)

Cu	Mn	Si	Zr	Fe	Mg	Zn	Ti	Al
6.12	0.26	0.04	0.12	0.06	<0.02	<0.02	0.10	Bal.

口,使超声辐射杆浸入熔体液面以下 250 mm,辐射杆预热 2 min 后,启动超声波电源。根据前期的实验研究结果<sup>[14]</sup>,选择最佳的超声波作用参数:超声功率 800 W,超声处理时间 10 min。施振 10 min 后关闭超声波电源,最后以 800 r/min 的速度倾倒入电阻炉,将熔体倒入铸模内,同时开启已提前接入铸模的冷却气体(氩气),流速约为 15 L/min,持续 20 min,冷却至室温。以是否进行超声处理,以及浇铸时铸模是否通入冷却气体冷却为变量,设计 4 组实验,如表 2 所示。

表 2 样品实验条件

Tab.2 Experimental conditions for the samples

Variant	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
Ultrasonic treatment	No	Yes	Yes	No
Argon cooling	No	No	Yes	Yes

分别在铸锭心部和上、下截面处取 1 块厚度为 15 mm 的轴向切片试样,以及 2 块厚度 10 mm 的径向切片试样。通过 SPECTRO MAXx 直读光谱仪依次检测样板上各点成分,对顶部圆切片试样进行低倍组织检测,侵蚀剂按照氢氟酸 2 mL、盐酸 1 mL、硝酸 1 mL、水 76 mL 进行配比,共侵蚀 2 次,每次 2 min,侵蚀后用酒精洗去黑膜,用清水冲洗表面至清晰。如图 2 所示,在 2 块径向切片试样的中心与边缘位置取 10 mm×10 mm×10 mm 的金相试样,依次用 600、1000、1500 目的水磨砂纸及 2 000 目的金相砂纸打磨,再用变速磨抛机对其进行抛光,利用 TESCAN 扫描电镜对样品进行 SEM 观察,利用牛津仪器 One Max 20 型能谱仪进行成分分析。最后对试样进

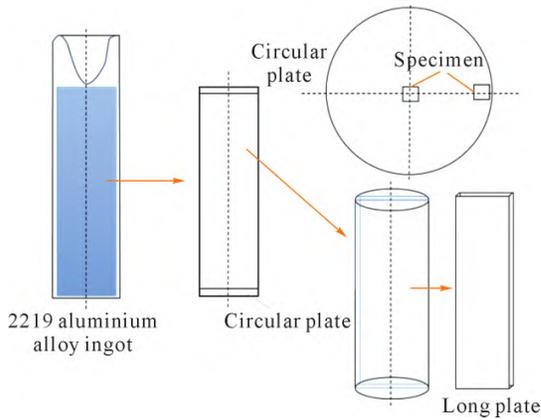


图2 取样示意图  
Fig.2 Schematic of the sampling

行电解腐蚀,覆膜液按照氢氟酸(分析纯)与蒸馏水体积分数 1:5 的比例进行配比,控制电压 20 V,电流 0.2~0.4 A,作用时间约 10 s,利用 Leica DM6000M 金相显微镜观察显微组织,依据 GB/T 6394-2017 要求,采用截点法测量平均晶粒尺寸,使用 Image pro plus 图像处理软件计算获得平均晶粒直径参数。

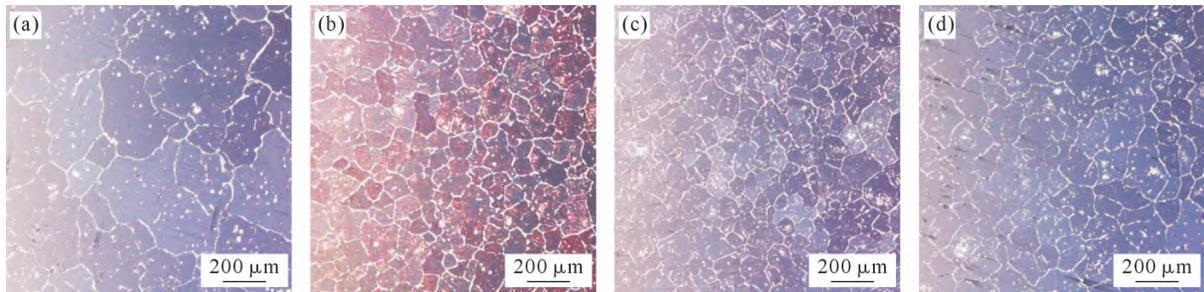


图3 2219 铸锭底部中心处金相组织:(a)第1组;(b)第2组;(c)第3组;(d)第4组  
Fig.3 2219 Metallographic microstructure at the bottom center of the ingot: (a) Group 1; (b) Group 2; (c) Group 3; (d) Group 4

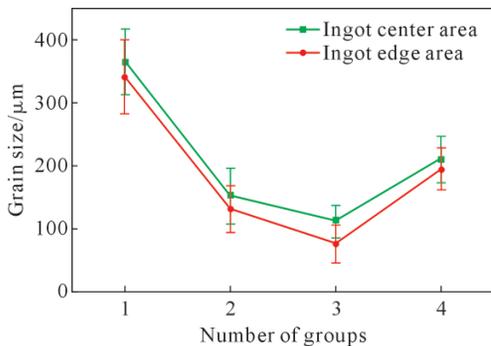


图4 2219 铝合金铸锭晶粒尺寸  
Fig.4 Grain size of the 2219 aluminium alloy ingot

时由于声空化效应,熔体形核位点与形核速率提升,处于生长进程中的晶体不断破碎再生长,有效抑制了枝晶产生,使晶粒逐渐呈等轴晶状<sup>[6]</sup>。如图5所示,氩气冷却时,由于铸模升温速率降低,凝固速率增高,同样提高了形核率,但形核生长由边缘冷区向热区方向的速率越来越慢,越靠近中心部的晶粒越大,树枝状晶粒依然存在<sup>[7]</sup>,且在超声与氩气冷却协同条件下,这一现象并没有明显改善。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 铸锭凝固组织分析

图3为2219铝合金铸锭的金相显微组织,图4为2219铝合金铸锭晶粒尺寸。由图可知,在无超声作用及无氩气冷却条件下,所得到的晶粒大多数为树枝状晶粒,尺寸较大,且发生了混晶,平均晶粒直径为 366 μm(图3a)。在单独的超声作用下,晶粒明显细化,枝晶破碎,等轴晶占比较高,平均晶粒直径为 152 μm,晶粒尺寸相对减小了 58.4%(图3b)。在超声以及氩气冷却共同作用下,所有晶粒都呈等轴晶状,大小均匀且细密,平均晶粒尺寸为 112 μm,晶粒尺寸减小了 69.4%(图3c)。在氩气冷却作用下,树枝状晶粒依然存在,但晶粒大小相比无超声作用以及无氩气冷却条件下铸锭的晶粒更细小均匀,未发生混晶,平均晶粒直径为 211 μm,晶粒尺寸减小了 42.3%(图3d)。

在超声作用下,声流促进熔体不断加速流动,同

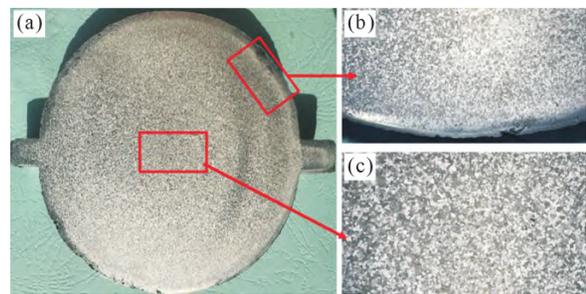


图5 超声与氩气冷却条件下2219铝合金铸锭顶部横截面宏观晶粒形态:(a)横截面整体宏观晶粒形态;(b)截面边缘处3.5倍放大;(c)截面中心处3.5倍放大  
Fig.5 Macroscopic grain morphology of the top cross-section of 2219 aluminium alloy ingots under ultrasonic and argon cooling conditions: (a) cross-sectional macroscopic grain morphology; (b) 3.5x magnification at section edges; (c) 3.5x magnification at the center of the section

图6为没有气氛保护条件下的普通重力铸造2219铝合金铸锭底部中心处金相组织。可以发现,图中在晶界第二相聚集处出现了较多的缩孔,在此周围的第二相聚集也更为严重,而在第1组铸锭的内部组织内则未发现明显缩孔,两者晶粒大小接近。

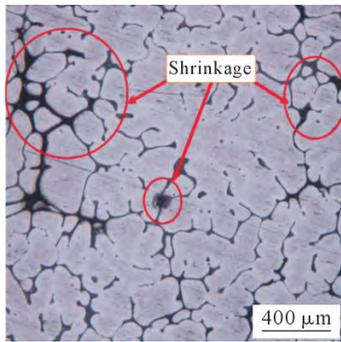


图 6 普通重力铸造 2219 铝合金底部中心处金相组织  
Fig.6 Metallographic microstructure at the bottom centre of the 2219 aluminium alloy after normal gravity casting

在气氛保护条件下,由于铸造环境为高纯氩气,有效防止了铸锭冷却过程中因吸气产生的孔洞和气穴,而冷却过程中孔洞或气穴温度一直较高,使得第二相更容易聚集在其周围析出,形成第二相偏聚。

## 2.2 第二相组织分析

图 7 为 2219 铝合金底部中心处的 SEM 照片,图 7a 和 e 是未超声处理且未经氩气冷却的铸锭底部中心处 SEM 背散射电子像。由图可知,晶粒边界存在粗大的树枝状第二相组织,且大部分聚集在一起,同时其中掺杂着基体相,晶粒内部也分布着较大的第二相颗粒状物。图 7b 和 f 所示为在单独超声作用下 2219 铝合金 SEM 背散射电子像,虽然存在第二相组织聚集,但内部第二相组织变得更加弥散,团聚处占比更小。如图 7c 和 g 所示,在超声及氩气冷却共同作用下,第二相组织几乎无聚集,大部分呈细密的网格状分布,晶内第二相颗粒变得细小;如图 7d 和 h 所示,在仅氩气冷却作用下,第二相组织细密分布,虽未呈现细密的网格状均匀分布,但亦未出现大量聚集现象,晶内第二相颗粒同样得到细化。

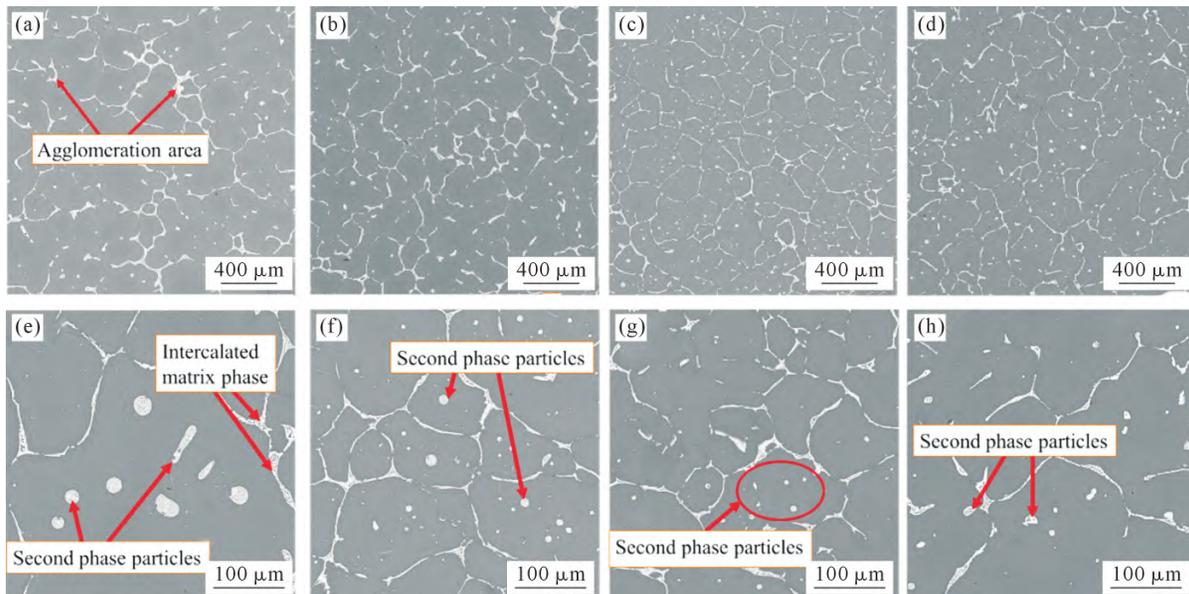


图 7 2219 铸锭底部中心处第二相组织:(a) 第 1 组;(b) 第 2 组;(c) 第 3 组;(d) 第 4 组;(e) 第 1 组样品 500 倍放大;(f) 第 2 组样品 500 倍放大;(g) 第 3 组样品 500 倍放大;(h) 第 4 组样品 500 倍放大

Fig.7 Microstructure of the second phase at the bottom center of the 2219 ingot: (a) Group 1; (b) Group 2; (c) Group 3; (d) Group 4; (e) 500x magnification for the Group 1; (f) 500x magnification for the Group 2; (g) 500x magnification for the Group 3; (h) 500x magnification for the Group 4

图 8 为未超声处理且未经氩气冷却的铸锭底部中心处第二相组织 EDS 能谱分析结果,表 3 为点扫

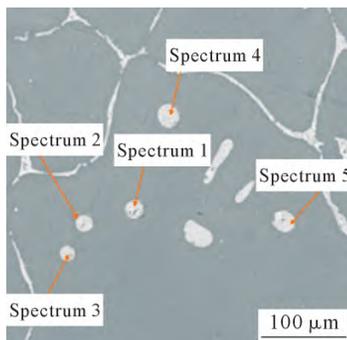


图 8 EDS 元素分析标定  
Fig.8 Calibration points for EDS elemental analysis

表 3 EDS 点元素分析结果  
Tab.3 EDS point element analysis results  
(atomic fraction/%)

Elemental	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5
Al	74.38	75.91	75.49	73.20	72.32
Cu	25.62	24.09	24.51	26.80	27.68

结果。由此可知,4 个目标点中 Al 与 Cu 的原子比大约为 2:1,且未检测出其他明显的由 Fe、Si、Mn 等杂质元素或 Mg 所形成的第二相组织成分,因此可以认为第二相成分主要为 Al<sub>2</sub>Cu 相(θ 相),而图中大部分深灰色区域则是 α-Al 基体。

超声的空化作用能显著提高固溶体内的溶质浓度<sup>[7]</sup>,从而细化基体晶界处第二相组织分布,同时由

于声流作用,不断打碎枝晶,使得第二相组织更细密均匀;氩气冷却可以加速熔体凝固,加速形核,改善第二相组织聚集。超声空化与氩气冷却的共同作用使θ相析出速率减缓的同时不断被打碎漂移,阻止了第二相组织的连续析出,改善晶内第二相组织形态,极大细化了第二相组织结构。

### 2.3 2219 铸锭的宏观偏析

图 9a 和 b 为沿轴向及径向的 2219 铸锭 Cu 元素偏析变化曲线,使用相对偏析率表示偏析程度,则相对偏析率可以通过下式计算获得:

$$\Delta C = \frac{(C_i - C_0)}{C_0}$$

式中,ΔC 为相对偏析率;C<sub>i</sub> 为各点的 Cu 元素含量,测试时轴向各位置距离 15mm,相同位置上测试 4 个点,并取平均值作为 C<sub>i</sub>;C<sub>0</sub> 为所有点的平均 Cu 元素含量。

从轴向来看,2219 铸锭靠近顶部的组织呈负偏析,沿轴向方向偏析率逐渐升高,中部时达到最高,靠近底部时,Cu 元素含量突降,甚至由正偏析逐渐转变为负偏析;从径向分析,靠近边部的组织呈负偏析,越靠近中心铸锭的偏析率呈上升趋势,直到心部呈正偏析。一般认为,造成这种现象的主要原因是熔体刚倾倒入铸模中时,底部及边缘表面熔体快速凝固、晶枝收缩,发生较大形变,之后熔体完全倒入铸

模。同时模具温度不断上升,底部收缩中心表面又因温度上升开始聚集沉降溶质含量较低的游离晶体,因此在最底部附近 Cu 元素的含量一般较少,甚至会形成负偏析<sup>[19-20]</sup>。而中部靠近底部的位置,因凝固速度放缓,也是最后凝固区域,溶质的界面扩散较慢,导致此处 Cu 元素含量达到最高,形成正偏析峰,同时使得靠近顶部位置的 Cu 元素含量更低。由于心部相比边部凝固较慢,这也容易导致径向靠近边部形成负偏析、心部形成正偏析的结果。

由图 9 可知,对比未超声处理且未经氩气冷却的铸锭,从轴向上看,仅单独超声处理后的铸锭其偏析率峰值降低;仅氩气冷却的铸锭,其中部靠近底部部分正偏析未有明显改善,但平均偏析率绝对值相对减小,偏析得到一定改善。在超声及氩气冷却共同作用下,偏析曲线的波动明显降低,铸锭整体相对偏析率得到改善。从径向上看,在超声及氩气冷却的共同作用下,偏析率波动及峰值都得到极大降低。由此可见,在超声处理与氩气冷却共同作用下,铸锭的偏析能得到最大改善。主要有以下原因:①超声的空化作用使得熔体内热—溶质对流加剧,改善液相内 Cu 等溶质原子成分沉降,Cu 元素得到均匀化;②氩气冷却使得铸模温度升高速率减缓,凝固温度得到有效降低,加速凝固速率,这使得中部最后的液相也得到快速凝固,降低了整体的绝对偏析率。

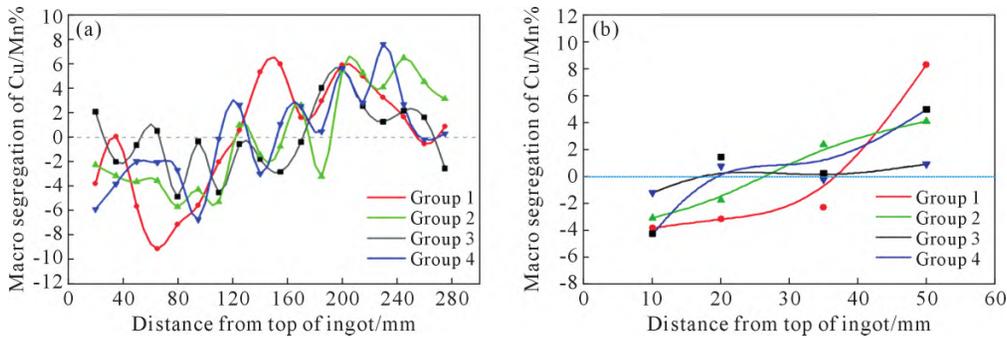


图 9 2219 铸锭 Cu 元素相对偏析率:(a) 沿轴向;(b) 沿径向  
Fig.9 Relative segregation rate of Cu in 2219 ingots: (a) axial; (b) radial

## 3 结论

(1)在真空铸造与气氛保护协同条件下,单独施加超声与同时施加超声/氩气冷却均对晶粒细化及改善晶粒形态均具有显著作用,且单独施加超声的作用效果稍佳。在超声作用下,由于声流与空化作用,铸态晶粒状态改善效果更为明显,晶粒组织以等轴晶为主,相比未超声作用以及氩气冷却的铸锭晶粒减小了 69.4%。

(2)施加超声/氩气冷却可有效阻止第二相组织聚集,在两者协同作用下,组织中第二相均匀细密的分布在基体晶界上,且晶内第二相呈点状弥散分布。

(3)单独施加超声与同时施加超声/氩气冷却对改善铸锭成分偏析均具有积极作用,从铸锭轴向及径向分析,后者具有更佳的抑制偏析效果,铸锭的相对偏析率曲线都变化更为平缓。

### 参考文献:

[1] 管仁国, 姜花芬, 黄晖, 梁霄鹏, 肖翔, 李慧中, 李芳, 王建军, 运新兵, 曾黎滨. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68-75.  
GUAN R G, LOU H F, HUANG H, LIANG X P, XIAO P, LI H Z, LI F, WANG J J, YUN X B, ZENG L B. Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68-75.

- [2] 曹景竹,王祝堂. 铝合金在航空航天器中的应用(2)[J]. 轻合金加工技术,2013,41(3): 1-12.  
CAO J Z, WANG Z T. Application of aluminum alloy in aeronautics and aerospace vehicle(2)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(3): 1-12.
- [3] XU Z W, YAN J C, KONG X L, YANG S Q. Interaction behaviors between Zn-Al alloy and  $Al_2O_3/6061Al$  composite with aid of ultrasonic vibration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(S2): 60-65.
- [4] 冯海阔. 铝合金熔体的超声处理及表面复合材料的超声法制备[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
FENG H K. The ultrasonic treatment of Al alloy melts and the preparation of surface composites by ultrasonic method [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [5] 高为国,钟利萍. 机械工程材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018.  
GAO W G, ZHONG L P. Mechanical engineering materials[M]. Changsha: Central South University Press, 2018.
- [6] SOKOLOV S Y, SUR L. Influence des ondes ultra-soniques sur les reactions chimiques[J]. Technical Physics of the USSR, 1936, 3: 176.
- [7] ABRAMOV O V. High-intensity Ultrasonic: Theory and Industrial Applications[M]. London: CRC Press, 1999.
- [8] ESKIN G I, ESKIN D G. Ultrasonic treatment of light alloy melts (2nd Ed)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [9] 李海仙,姜德俊,韩华,周明,腾志贵,殷云霞. Al-Cu-Mn 合金大规格圆铸锭熔铸工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(6): 15-20.  
LI H X, JIANG D J, HAN H, ZHOU M, TENG Z G, YIN Y X. Study on the casting process for the large round ingot of Al-Cu-Mn alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(6): 15-20.
- [10] ESKIN D G, NADELLA R, KATGERMAN L. Effect of different grain structures on centerline macrosegregation during direct-chill casting[J]. Acta Materialia, 2008, 56(6): 1358-1365.
- [11] ZHU C, ZHAO Z H, ZHU Q F, WANG G S, ZUO Y B, QIN G W. Structures and macrosegregation of a 2024 aluminum alloy fabricated by direct chill casting with double cooling field[J]. China Foundry, 2022, 19: 1-8.
- [12] 钟贞涛,李瑞卿,李晓谦,陈平虎. 超声处理对 2219 大规格铝锭微观组织与宏观偏析的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(9): 1347-1354.  
ZHONG Z T, LI R Q, LI X Q, CHEN P H. Effect of ultrasonication on the microstructure and macrosegregation of a large 2219 aluminum ingot[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9): 1347-1354.
- [13] 蒋日鹏,李晓谦,李开焯,张雪. 超声对铝合金凝固传热与组织形成的影响与作用机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 3807-3813.  
JIANG R P, LI X Q, LI K Y, ZHANG X. Effect of ultrasonic on heat transfer and microstructure formation of aluminum alloy during solidification and its mechanism [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(10): 3807-3813.
- [14] 谢恩华,李晓谦. 超声波对铝合金熔体的有效细化区域[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(2): 149-153.  
XIE E H, LI X Q. Efficient refining zone of ultrasonic sonication on the industrial aluminum alloy melt[J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(2): 149-153.
- [15] 蒋日鹏,李晓谦,张立华,胡仕成,刘荣光. 施振功率与温度对工业纯铝凝固组织的影响[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(11): 1260-1265.  
JIANG R P, LI X Q, ZHANG L H, HU S C, LIU R G. Effects of ultrasonic power and temperature subjected to vibration on the solidification structure of industrial pure aluminum[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(11): 1260-1265.
- [16] 刘荣光. 超声波在铝熔体中的声场分布和空化效应及其对凝固过程影响[D]. 长沙: 中南大学, 2008.  
LIU R G. Sound field distribution and cavitation effect in aluminum melt and effect on solidification process and its effect on solidification process[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [17] 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(S1): 11-17.  
FAN J H, ZHAI Q J. Effects of physical fields on solidification structure of metals[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 11-17.
- [18] ZHANG L, JIANG R P, LI X Q, LI R Q, ZHANG L H. Microstructure modification for 2219 Al alloy through ultrasonic treatment and fast cooling[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(11): 1392-1400.
- [19] 钟贞涛. 超声作用下大规格铝合金圆锭宏观偏析规律的分析与实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2017.  
ZHONG Z T. Analytical and experimental study on the macroscopic segregation pattern of large-size aluminum alloy round ingot under ultrasonic action[D]. Changsha: South Central University, 2017.
- [20] RUVALCABA D, MATHIESEN R H, ESKIN D G, ARNBERG L, KATGERMAN L. In situ observations of dendritic fragmentation due to local solute-enrichment during directional solidification of an aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2007, 55(13): 4287-4292.