

功率超声波辅助铸造仿真模拟研究进展

罗雨戈 李瑞卿 董 方 刘峙麟
(中南大学轻合金研究院)

摘 要 物理、材料和电子等领域科学技术的飞速发展使得声场、磁场和电场等外场调控技术逐渐成熟。其中,超声场能在高温金属熔体中诱导独特的非线性声学效应(主要包括声流作用与空化效应),进而对金属凝固过程产生调控作用。在金属凝固前或凝固过程中施加功率超声波,均可在一定程度上改善凝固路径、细化晶粒组织、降低偏析、减少凝固缺陷等。功率超声辅助铸造技术亦逐渐成为工程领域基础研究与工业化应用的热点之一。围绕超声波辅助铸造中换能系统、流场、温度场、声流作用、空化效应及晶粒细化等建模仿真内容进行综述和比较分析,并对大规格金属材料多源超声铸造仿真进行了展望。

关键词 功率超声;超声铸造;金属凝固;仿真模拟;组织调控

中图分类号 G353.11 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in Simulation and Modeling for Power Ultrasound-assisted Casting
Luo Yuge, Li Ruiqing, Dong Fang, Liu Zhilin
(Light Alloy Research Institute, Central South University)

Abstract: The rapid development of science and technology in terms of physics, materials and electronics gradually promotes the external field controlling technologies, including acoustic field, magnetic field, electric field. Ultrasonic field can induce unique non-linear effects(including acoustic streaming and cavitation effect) in high temperature liquid metal, further controlling the solidification process. Introducing power ultrasound before or during solidification enables to modify solidification path, refine grain structures, reduce segregation and decrease solidification defects. The power ultrasound-assisted casting is now quite attractive for fundamental research and industrialization applications. The simulation and modelling of ultrasonic casting were reviewed, focusing on convertible system, flow field, temperature field, acoustic streaming, cavitation effect, and grain refinement, and simulation of multi-source ultrasonic casting for large-scale metallic materials was prospected.

Key Words: Power Ultrasound, Ultrasonic Casting, Metal Solidification, Simulation, Structure Controlling

采用导入设备将功率超声波施加到金属熔体中,形成非线性效应的综合作用,可以改善或控制金属材料的凝固行为,获得优良组织和力学性能。在处理熔体过程中,超声波通过预先存在的溶解气泡或固体杂质中的气泡等来促使空化泡的形成^[1]。在此期间,对形成的气泡施加一个不断振荡的声压场,引起高低压循环,压缩气泡内的气体,迫使气泡膨胀^[2]。气泡与声场强烈耦合,当气泡自身振动频率与超声频率相近时将产生共振,在周期振荡中气泡大小增长到最大值^[3]。在临界特征大小时自发地由内而外产生“爆破”并分裂成更小的气泡,周期性地不断重复该过程。

20 世纪 90 年代,各类仿真软件开始涌现,如 Ansys、ProCAST、CAE、Forcast 等^[4]。这些软件可以在

超声与铸造条件下对温度场、流场、应力场等进行模拟,大幅减少人工解析计算量。超声铸造凝固过程的模拟研究^[5-7]多以水为介质。事实上超声波在金属熔体中产生的非线性效应要比在水中复杂得多。MEIDANI A R N 等^[8]在水物理数学模型基础上,通过改变流体黏度、压力场和温度场来模拟 Al-3.4Cu 合金熔体中超声作用下所产生的单个氢气泡的演化过程,但这种方法在实际试验和宏观角度上仍有一定局限性。本研究基于金属凝固及超声铸造仿真研究进行综述和比较分析。

1 超声换能系统的振动仿真

由于换能系统的声发射功率受到压电陶瓷、辐射杆

收稿日期:2023-08-20
第一作者简介:罗雨戈,男,1995 年出生,博士研究生,长沙(410083),E-mail:1658743009@qq.com
通信作者:刘峙麟,男,1986 年出生,教授,长沙(410083),E-mail:zhilin.liu@csu.edu.cn
引用格式:罗雨戈,李瑞卿,董方,等. 功率超声波辅助铸造仿真模拟研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 351-1 359.
LUO Y G, LI R Q, DONG F, et al. Progress in simulation and modeling for power ultrasound-assisted casting[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2023, 43(10):1 351-1 359.

(超声导波杆)等结构与材质的影响,很难精确地检测出换能系统的最大谐振频率^[9]。同时,工作过程中空化腐蚀会使辐射杆表面微观结构改变,从而降低换能系统的使用性能。针对铸造用超声换能系统,李晓谦等^[10]和黄运明^[11]对设计的换能系统采用 BLOCK LANCZOS 进行模态分析,结合理论计算得到大致频率范围,运用 Ansys 软件进行有限元仿真谐响应分析,多普勒测试和有限元分析结果比较一致,获得了相对精确的输出结果,见表 1。此外,铸造中换能器浸入金属熔体的端部温度高于 100 ℃,而不同温度(尤其是在高温下)会对辐

射杆表面材料发生改性,使换能系统的固有谐振频率以及振动模态均发生相应改变,见图 1。随着服役温度的升高,辐射杆材料弹性模量降低较为明显,换能系统的

表 1 理论计算、多普勒测试和有限元分析所得换能系统的输出结果^[10]

Tab.1 Output results of energy exchange system obtained from theoretical calculation, Doppler test and finite element analysis ^[10]			
名称	纵向固有频率/Hz	位移节点/mm	振子输出振幅/ μm
理论计算	20 000	167.5	-
多普勒测试	19 844	-	9.287 8
有限元分析	19 643	165	9.926 2

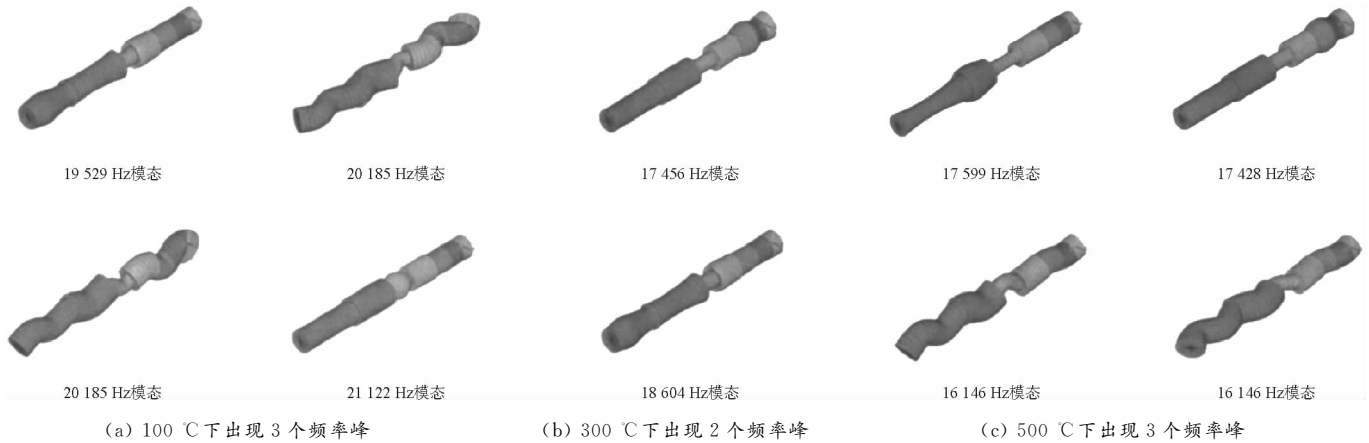


图 1 不同环境温度下仿真所得不同的谐振峰值及其模态^[11]

Fig.1 Different resonance peaks and modes obtained by simulation at different ambient temperatures^[11]

固有频率随之降低^[11]。

TIAN Y 等^[12]研究了声空化效应对辐射杆侵蚀分布的影响。以钛合金辐射杆为研究对象,见图 2。通过铸造试验发现空化腐蚀位置主要发生在距离端部 42、134 和 221 mm 的位置(见图 2c 和图 2d)。采用 Hyper Mesh V 12.0 有限元仿真软件分析后,发现这 3 处位置

正好处于辐射杆的波节位置,推断服役条件下接近波节处的这些地方更容易发生空化效应,生成了致密的空化泡,从而比其他地方产生更加剧烈的空化效应(见图 2e)。因此,运用有限元软件预测能对换能系统进行定量研究,为设计校核超声辐射杆提供了一种有效途径,也为结构的动力学优化设计提供了参考。

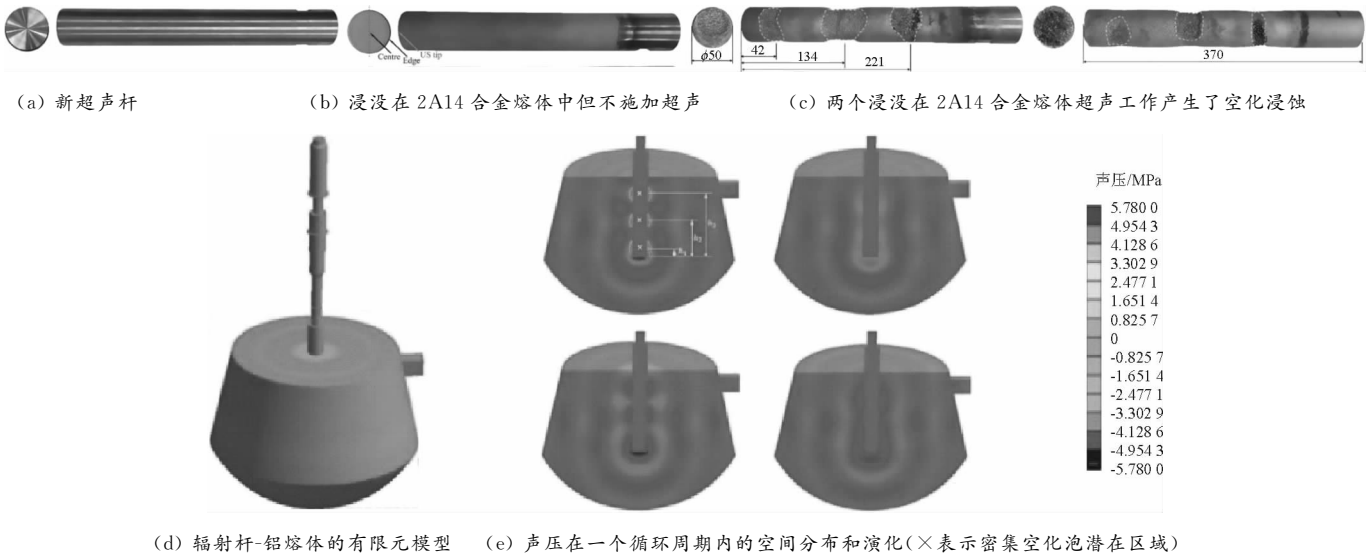


图 2 超声杆腐蚀情况^[12]

Fig.2 Corrosion of ultrasonic rod

2 超声流场仿真模拟

空化泡破裂在液体中会产生冲击波。这些冲击波将促进传质强烈的湍流混合^[13],实现对熔体宏观流场的“搅拌”作用^[14]。SAJJADI B 等^[15]研究了在 24 kHz、高功率(100~400 W)条件下超声波对流体湍流情况的

影响,并用 Fluent 三维 CFD 软件模拟超声能量所产生的高速流体流动的数值分析并运用 PIV 试验进行实时验证。超声射流是从辐射杆端部表面向容器底部作为输入能量和动力激发而出的,能够对液体施加强烈的冲击力^[16],并推动液体在容器中从顶部到底部的循环(见图 3)。该研究表明,功率的增大并不能改变超声固有的循环轨迹,但能增大液体的循环流速。

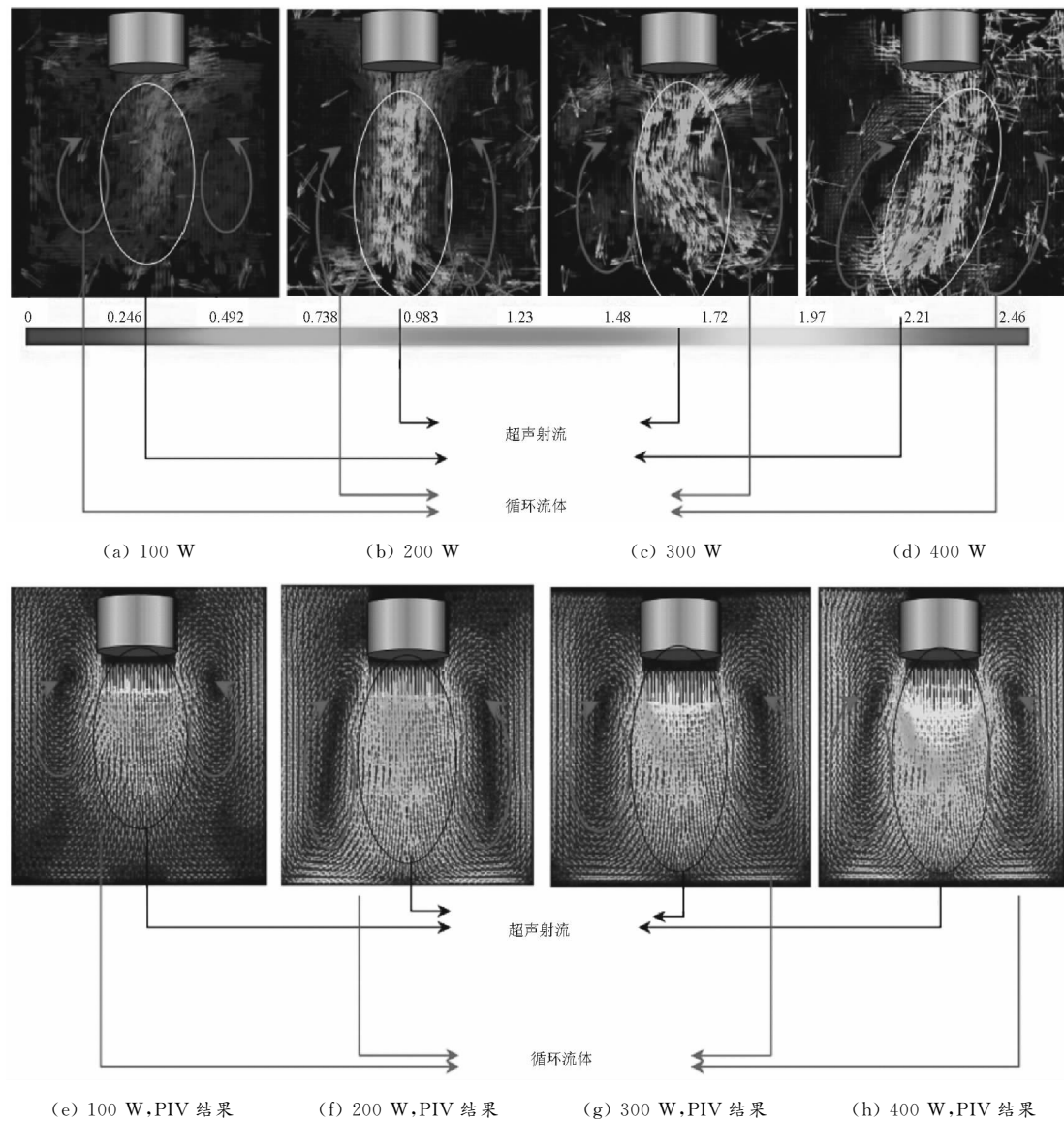


图 3 24 kHz 下平均速度矢量场的 CFD 仿真模拟^[15]

Fig.3 CFD simulation of average velocity vector field at 24 kHz^[15]

NASTAC L^[17] 基于 Lilley 模型、流体模型、传热方程以及晶粒结构数值解,建立了超声波搅拌对凝固结构演化的 CFD 宏观模型、介观模型和形核微观模型。在流场仿真研究上,采用两相空化模型,包括控制相运输的标准粘性流动方程和湍流模型。在空化过程中,液相传质由空化气泡输运方程控制:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_b \rho_b) + \nabla \cdot (f_b \rho_b \vec{v}_b) = R_G - R_C \quad (1)$$

式中, f_b 为空化气泡体积分数; ρ_b 为气泡密度; $\vec{v}_b$ 为气泡速度; R_G 为空化气泡生长的传质条件; R_C 为空化气泡溃灭的传质条件。单位体积相间传质速率(R_G 和 R_C)表示空化过程中液体相和气泡相,并结合一般 Rayleigh-Plesset 方程中的气泡动力学:

$$R_b \frac{d^2 R_b}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_b}{dt} \right)^2 = \frac{p_b - p}{\rho_L} - \frac{2\sigma_L}{\rho_L R_b} - \frac{4v_L}{R_b} \frac{dR_b}{dt} \quad (2)$$

式中, R_b 为气泡半径; σ_L 为液相的表面张力系数; ρ_L 为液体密度; ν_L 为液相的运动黏度; p_b 为气泡表面压力;

p 为局部远场压力。运用 Fluent 软件获得了对 A356 铝合金熔体流动和超声空化的宏观预测模型, 见图 4。

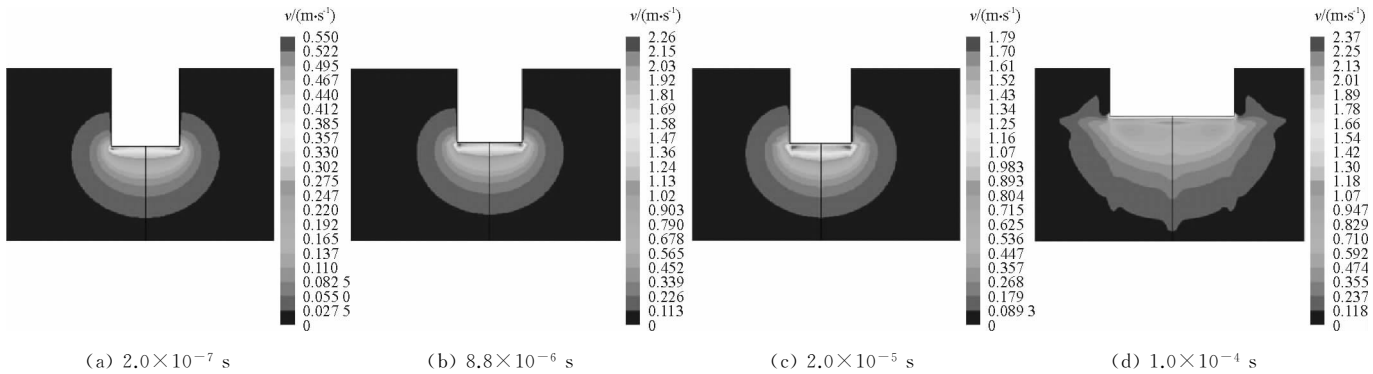


图 4 超声流场仿真云图(速度轮廓)^[18]

Fig.4 Nephogram of ultrasonic flow field simulation^[18]

3 超声能场及温度场仿真模拟

在大多数的空化泡振荡周期中,在气泡和外部之间有可能发生热交换,产生热效应^[19]。其温度最高可达几千开尔文^[20-21],产生伴随着能量变化的深过冷区域(大温度梯度微区)。SHAO Z W 等^[22]对超声净化 AZ80 合金中的 MgO 夹杂进行声压仿真,引入亥姆霍兹方程与声振幅力理论^[23]:

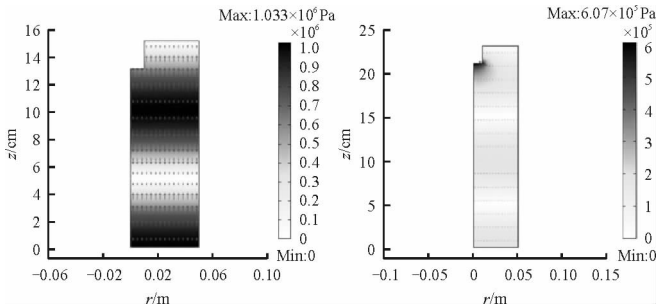
$$\nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) + \frac{\omega^2}{\rho c^2} P = 0 \quad (3)$$

式中, P 为声压; ρ 为密度; c 为熔体中的声速; t 为时间; ω 为角频率。

$$F_z = -V' k E_{ac} (A_\rho + A_\gamma) \sin(2kz) \vec{k} \quad (4)$$

$$F_r = V' \nabla E_{ac} [A_\rho \cos^2(kz) - A_\gamma \sin^2(kz)] \quad (5)$$

式中, F_z 为轴向平均时间辐射力; F_r 为横向平均时间辐射力; V' 为杂质颗粒体积; k 为波速; $\vec{k}$ 为梯度算子; ∇E_{ac} 为声能量密度; A_ρ 为声学密度对比系数; A_γ 为声学可压缩性对比系数。进行有限元求解,获得两种不同高度熔体中的幅值分布,见图 5,其中颜色越深表明悬浮在熔体中的 MgO 粒子所受的声辐射力越大,在图 5a



(a) 高度 15 cm 坩埚 (b) 高度 23 cm 坩埚

图 5 80 W 超声处理熔体中声压力幅值分布^[22]

Fig.5 Distribution of acoustic pressure amplitude in 80 W ultrasonic treated melt

中获得了一个近乎理想化的驻波场。在驻波场内的轴向力使最初位于不同高度的粒子在节点处聚集^[24]。此外,一旦粒子移动到节点平面,侧向辐射力和粒子-粒子相互作用产生的二次级辐射力会导致颗粒在节点面内的某些位置形成更大振幅^[25]。

NING S C 等^[26]通过声压模拟空化强度来解释晶粒细化差异机制,采用瞬态压力声学模型计算声压值:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0 \quad (6)$$

式中, ρ_0 为熔体密度。简化了边界条件,气-液界面视为软声场,变幅杆侧面视为硬声场,坩埚-熔体的界面设置为阻抗边界条件。对熔体施加超声会发生某些区域周期性的正负压交替,当声压达到空化阈值时,空化泡被压缩并溃灭。一般将声压值大于空化阈值的区域定义为有效空化阈。图 6 为双频超声作用于金属熔体及其最大空化面积。可以看出,15 kHz 单频超声的最大空化面积约为 20 kHz 单频超声的两倍。正负压共存会增加空化面积(双频超声产生的空化面积大于两次单频超声之总和),并改变其空间分布。这是由于两个异频超声场的非线性叠加,诱发了一些新的空化区域。因此,合理布控双源异频超声可以显著提高空化面积,促进晶粒细化效率。

ZHANG X P 等^[27]利用 ANSYS Fluent 软件建立了底部导入超声源对熔体流动和传热模型。在超声处理下,熔体由自然对流转变为湍流,采用 $k-\epsilon$ 模型^[28]进行计算:

动量方程(N-S 方程):

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (7)$$

湍流方程:

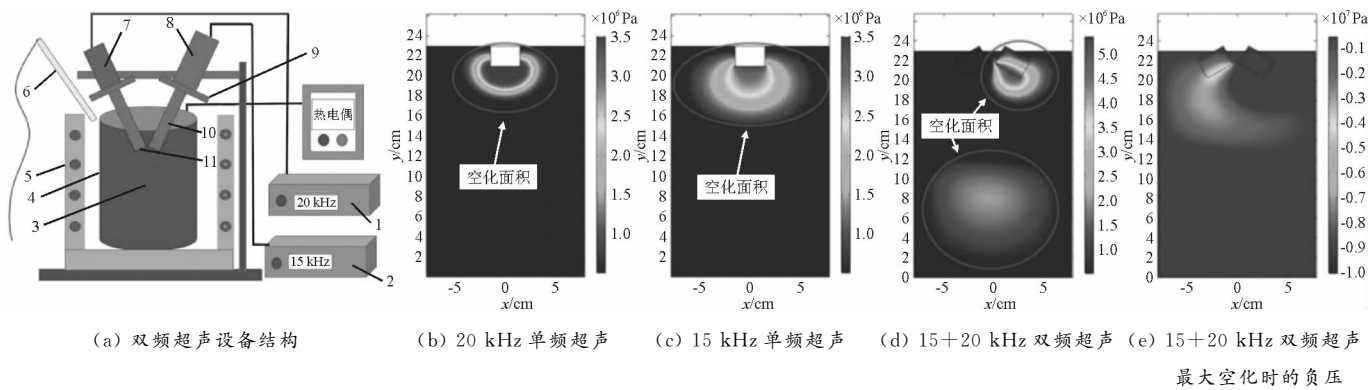


图6 双频超声设备结构及熔体的最大空化面积^[26]

Fig.6 Dual-frequency ultrasonic equipment and maximum cavitation area of melt

1、2.超声电源 3.AZ80 熔体 4.铸铁坩埚 5.电阻炉 6.CO₂+SF₆ 7、8.换能器 9.热电偶 10.辐射杆

$$\rho \frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \quad (8)$$

湍流耗散方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\epsilon}{k} G - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \rho \quad (9)$$

连续方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

式中, u_i 和 u_j 分别为流体在 i 轴和 j 轴方向上的速度分量; x 为点的位置; μ 为动力黏度; g_i 为重力加速度; ϵ 为湍流耗散率; k 为湍流动能; G 为动能方程: $G = u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, 其中 μ_t 为湍流速度, μ_{eff} 为动力黏度的有效值: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho_{\text{cu}} \frac{k^2}{\epsilon}$, 其中 μ_t 为湍流黏度, σ_k 、 σ_ϵ 、 c_1 和 c_2 均为经验常数, 其中 $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.3$; $c_1 = 1.44$; $c_2 = 1.92$ 。

熔体中的热传导情况为:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad (11)$$

式中, c 为超声波声速; T 为温度; q_v 为熔体内部热源, 超声波作用熔体过程中产生的热量随超声功率的增大而增大。另外考虑到熔体温度较高, 也需将对环境的辐射热 Q_r 和对流散 Q_c 热考虑:

$$Q_r = \xi \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (12)$$

$$Q_c = h (T - T_0) \quad (13)$$

式中, Q_r 为热辐射传递; ξ 为放射系数; σ 为 Stefan-Boltzman 常数; Q_c 为对流传热; h 为热对流系数; T_0 为周围环境温度。最终得到熔体内声压和声强对称分布, 见图 7, 可见中心附近的压力明显高于两侧附近的压力。图 7a 中熔体 1/2 高度处有一个压力为 0 区域, 此处声压幅值为 0, 而该位置上下声压振幅为非零值, 流场的上下分别会出现两个涡流。温度分布显示超声处理使温度分布更加均匀, 图 7b 的温度梯度明显小于图 7c。这是因为超声声流引起了对称涡流, 出现了两个低温峰, 而无超声下熔体流动多为自然对流, 只有一个低温峰。

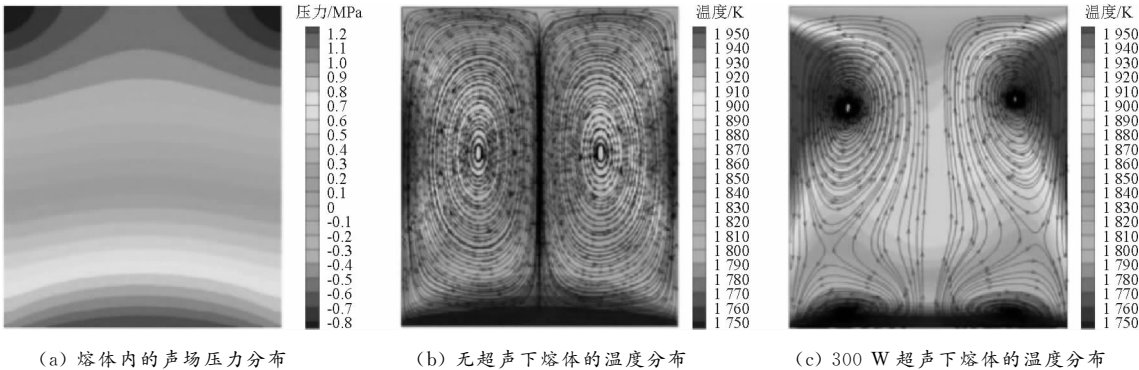


图7 熔体内的声场压力分布以及熔体的温度分布^[27]

Fig.7 Pressure distribution of acoustic field and temperature distribution in melt

有超声和无超声下的熔体凝固过程中固/液相分数比较见图 8。可以看出, 随着凝固的进行, 糊状区的高度逐渐增大, 直到凝固至中心结束。比较可知, 超声功

率越高, 熔体凝固速率越慢, 凝固是从下到上发生的, 而未经超声处理的液相线和固相线均呈弧形, 但在超声处理下的液相线变得平缓, 表明水平方向的温度梯度明显

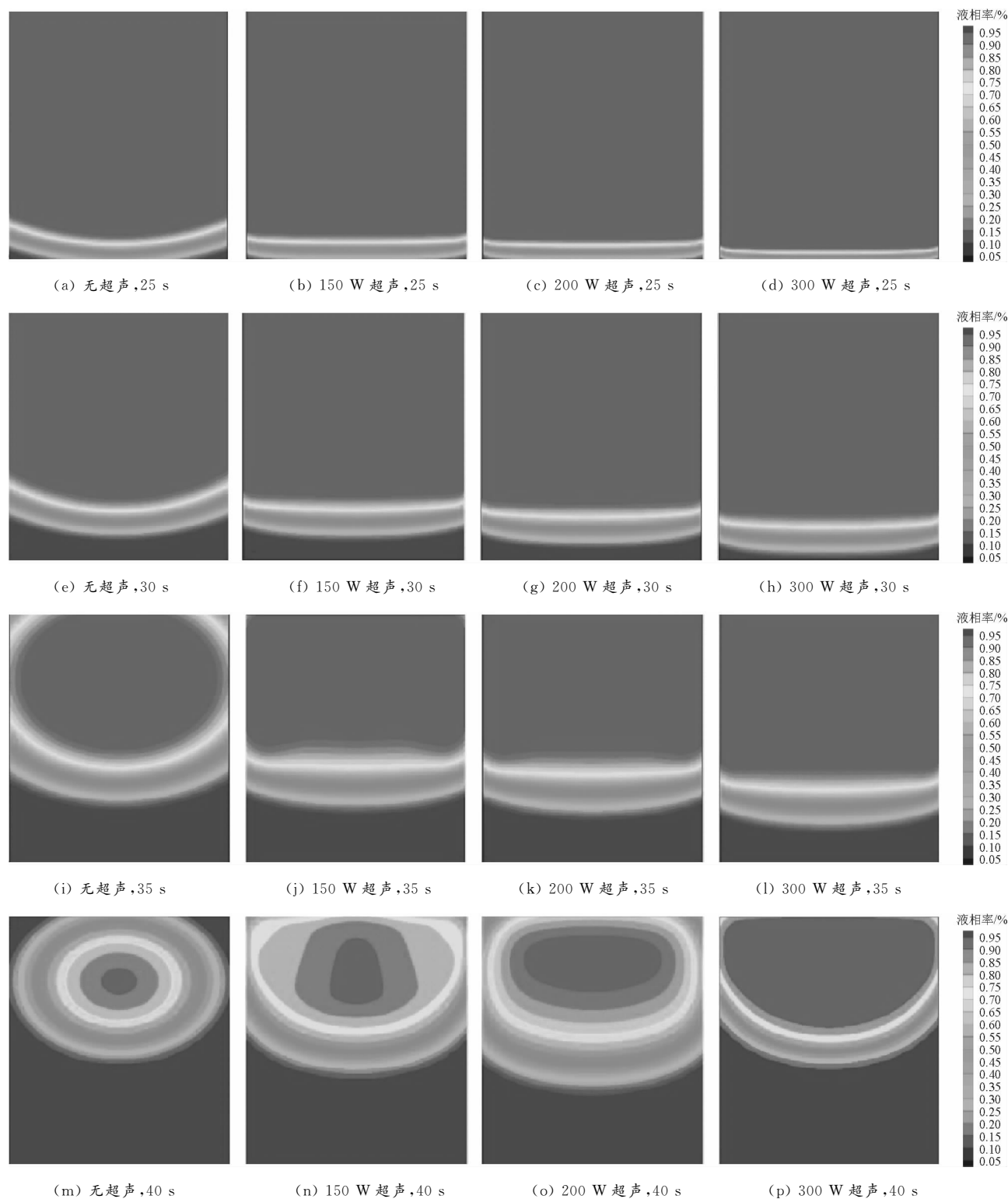


图 8 在超声下和无超声下凝固过程中的固/液相分数比较^[27]

Fig.8 Comparison of solid/liquid fraction during solidification with and without ultrasound

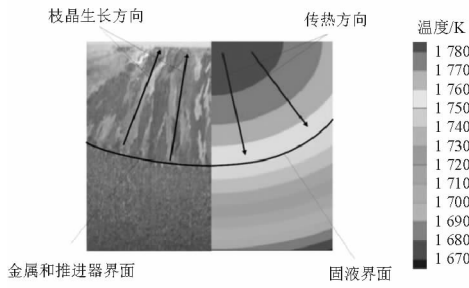
减小,超声处理延长了凝固时间,有助于避免快速凝固导致的过度枝晶生长。图 9 为有无超声下凝固组织和温度场对比。结果表明,传热方向与枝晶生长方向具有关联性,模拟的固/液相界面与试验结果一致。由于超声引起的微观结构细化,在辐射杆附近出现了等轴晶组

织,等轴区的面积由超声的有效作用距离决定,等轴区的形状与凝固过程中的等温线分布相关。在凝固过程中,等轴带与等温线的出现基本一致。

NASTAC L^[17] 在超声声场模拟上,用 Rayleigh 积分模型和 Helmholtz 简波方程解析求解声场:

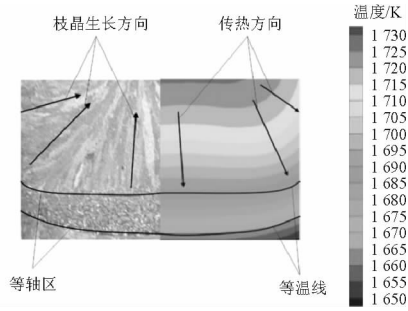
$$\nabla^2 \Phi(p) + k_w^2 \Phi(p) = 0 \quad (14)$$

$$k_w = \frac{\omega}{\sqrt{3}c} \quad (15)$$



(a) 无超声波

式中, $\Phi(p)$ 为速度势; k_w 为波的矢量大小。获得了金属合金系统中预测的超声压力、体积力、超声强度和热效应作为自变量为径向距离函数的介观模型, 见图 10。



(b) 有超声波

图 9 无超声波和有超声波的凝固组织和温度场的比较^[27]

Fig.9 Comparison of solidification structure and temperature field without and with ultrasound

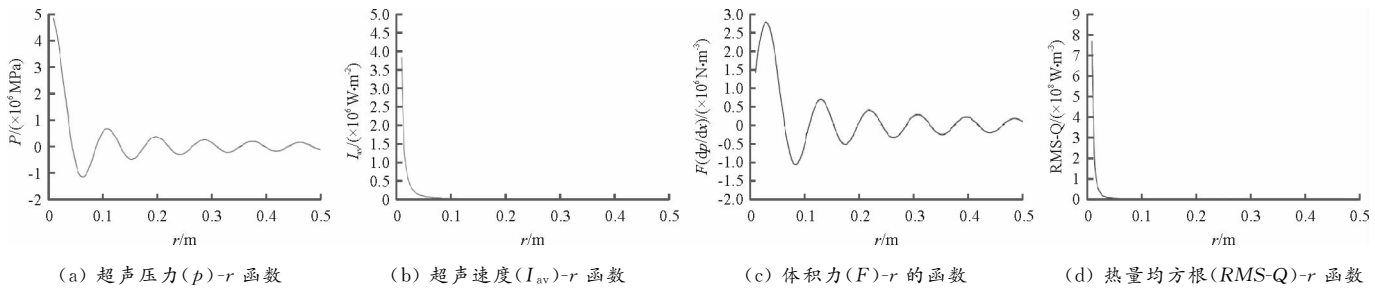


图 10 介观模型^[17]

Fig.10 Mesoscopic model

4 超声对微观组织影响的仿真研究

超声作用促进晶粒组织更小, 分布更均匀^[29-31]。超声波振动可显著细化过共晶 Al-Si 合金中的 α -Al 晶粒和 Si 相(包括初生相、共晶相和金属间化合物)^[32-34]。KHALIFA W 等^[35]证明超声产生的空化泡溃灭形成可促进 A356 合金中 α -Al 相晶粒等轴化, 并且在略高于液相线附近状态施加超声振动能获得更好等轴晶组织。JIAN X 等^[36]对 A356 合金(Al-7.0Si-0.4Mg-0.1Fe)进行超声铸造, 将在常规铸造下原本高达几毫米的微观枝晶组织分解为球状晶。此外, 超声波还能显著细化 A356 合金中共晶 Si 的尺寸^[37-38]。ZHANG S L 等^[39]也研究了超声波对 A356 合金微观组织和力学性能的影响, 发现超声波会使合金中原本为树枝晶的 Si 相破碎。当高功率超声波在铝熔体中传输时, 由于超声波与铝熔体的黏性力的相互作用, 造成了有限的振幅衰减, 从而由声源建立了声压梯度, 有助于熔体流动。当高能超声引入 Al-Si 合金熔体时, Si 相获得瞬间冲击, 可表示为^[40]:

$$a = \frac{dv}{dt} = A_m \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) \quad (16)$$

式中, dv/dt 为单位时间 t 内的速度变化量; A_m 为振幅

的最大值; ω 为频率; φ 为初始相位。根据动量守恒定律:

$$F dt = \Delta m v \quad (17)$$

式中, Δm 为 Si 的单位面积质量。由式(16)和式(17)合并得到:

$$F = \Delta m a \quad (18)$$

$$\Delta m = \rho \Delta V \quad (19)$$

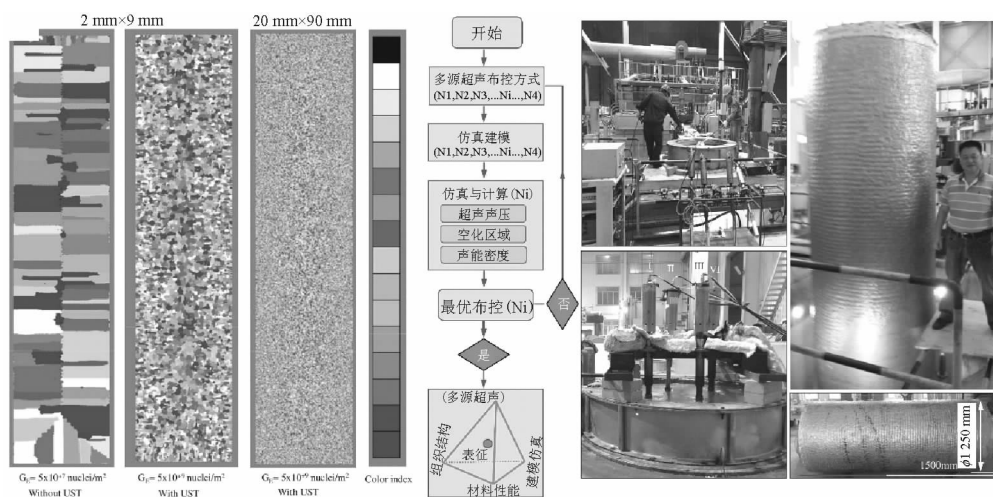
式中, ΔV 为 Si 的单位面积体积; ρ 为 Si 的密度。可以得到:

$$F = \rho \Delta V a \quad (20)$$

施加在 Si 的面积单元 dS 上的应力可以表示为:

$$\sigma = \frac{F}{dS} = \frac{\rho \Delta V a}{dS} = \frac{\rho \Delta V A_m \omega^2}{dS} \quad (21)$$

式中, dS 是 Si 的单位面积, 当超声施加的应力超过 Si 的开裂强度值时, 树枝晶 Si 被破碎成(短)圆球状。为了更好地揭示超声铸造技术中的凝固机理, NASTAC L^[17]建立了包括晶粒尺寸、柱状晶、等轴晶以及微观偏析模型(见图 11)。该模型用于预测树枝晶粒的形态和破碎模式。仿真结果表明, 在超声条件下的晶粒度比在无超声条件下的晶粒度至少低一个数量级^[41]。近年来, LIU Z L 等^[42]开展了大规格铝合金铸锭超声铸造研究, 提出了基于跨尺度仿真计算的多源声



(a) 超声熔体处理对锭坯晶粒组织细化影响规律^[41] (b) 大规格铸锭超声铸造的多源声场构筑及布控优化^[42-45]

图 11 超声熔体处理对锭坯晶粒组织细化影响规律及大规格铸锭超声铸造的多源声场构筑及布控优化

Fig.11 Influence of ultrasonic melt treatment on grain refinement of ingot and multi-source sound field construction and layout optimization for ultrasonic casting of large-scale ingot

场构筑及布控优化,为大规格轻合金铸造工业化应用提供了技术途径和工艺窗口^[42-45]。

5 结论与展望

模拟仿真验证了超声辅助铸造过程中引入超声波可以促进熔体流动,起到声流“搅拌”作用,降低熔体内部的温度梯度,产生空化效应细化晶粒组织,扩大锭坯等轴晶区域。模拟仿真可揭示空化效应的形成机理与作用方式,空化还应考虑到超声设备自身的固有频率。影响超声铸造质量的因素主要包括熔体浓度、超声功率、换能器的类型、铸造温度等,这些参数之间具有耦合的关联并通常对性能表现出非线性的影响。未来超声铸造仿真建模可考虑将传热模型、应力模型、凝固模型、界面模型、材料模型、接触模型等进行合理集成,同时向工业应用亟需的大规格多源超声铸造方向发展,并考虑包含晶体生长速度、溶质扩散、生长抑制因子等的多尺度建模与仿真方法,为大规格金属材料多源超声铸造中声场物理布控优化及工业化应用提供理论基础和工艺途径。

参 考 文 献

- [1] CRUM L. Acoustic cavitation series: Part five rectified diffusion [J]. Ultrasonics, 1984, 22(5): 215.
- [2] WOOD R J, LEE J, BUSSEMAKER M J. A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 351-370.
- [3] XU H, ZEIGER B W, SUSLICK K S. Sonochemical synthesis of nanomaterials [J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42: 2 555-2 567.

- [4] 刘诗月. 铝合金超声凝固实验及铸造过程有限元仿真分析[D].长沙:中南大学, 2009.
- [5] KIM K Y, BYUN K T, KWAK H Y. Temperature and pressure fields due to collapsing bubble under ultrasound [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 132: 125-135.
- [6] RIVAS D F, DAVID F, BETJES J, et al. Gardeniers, erosion evolution in mono-crystalline silicon surfaces caused by acoustic cavitation bubbles [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113: 064 902.
- [7] BAI L X, XU W L, TIAN Z, et al. A high-speed photographic study of ultrasonic cavitation near rigid boundary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20: 637-644.
- [8] MEIDANI A R N, HASAN M. A study of hydrogen bubble growth during ultrasonic degassing of Al-Cu alloy melts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147: 311-320.
- [9] 李晓谦, 聂广, 蒋日鹏, 等. 25kHz 超声铸造系统仿真对比分析 [J]. 机电信息, 2013(27): 142-143.
- [10] 李晓谦, 黄运明. 铝合金超声铸造中换能系统的有限元仿真分析 [J]. 机械设计与制造, 2007(8): 156-158.
- [11] 黄运明. 超声铸造中换能系统失谐现象分析及其设计研究[D].长沙:中南大学, 2007.
- [12] TIAN Y, LIU Z L, LI X Q, et al. The cavitation erosion of ultrasonic sonotrode during large-scale metallic casting: Experiment and simulation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 43: 29-37.
- [13] KIM H N, SUSLICK K S. Sonofragmentation of organic molecular crystals vs strength of materials [J]. Journal of Organic Chemistry, 2021, 86: 13 997-14 003.
- [14] WEISSLER A. Cavitation in ultrasonic depolymerization [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1951, 23: 370.
- [15] SAJJADI B, RAMAN A A A, IBRAHIM S. A comparative fluid flow characterisation in a low frequency/high power sonoreactor and mechanical stirred vessel [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 359-373.
- [16] XU Z, YASUDA K, KODA S. Numerical simulation of liquid velocity distribution in a sonochemical reactor [J]. Ultrasonics Sono-

- chemistry, 2013, 20: 452-459.
- [17] NASTAC L. Mathematical modeling of the solidification structure evolution in the presence of ultrasonic stirring[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, B42: 1 297-1 305.
- [18] NASTAC L. Multiscale modeling of the solidification microstructure evolution in the presence of ultrasonic stirring[J]. Materials Science and Engineering, 2012, 33: 12 079.
- [19] BARBER B P, HILLER R A, LÖFSTEDT R, et al. Defining the unknowns of sonoluminescence[J]. Physics Reports, 1997, 281: 65-143.
- [20] FLANNIGAN D J, HOPKINS S D, CAMARA C G, et al. Measurement of pressure and density inside a single sonoluminescing bubble[J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 204 301.
- [21] SUSLICK K S, FLANNIGAN D J. Inside a collapsing bubble: Sonoluminescence and the conditions during cavitation[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2008, 59: 659-683.
- [22] SHAO Z W, LE Q C, ZHANG Z Q, et al. Effect of ultrasonic power on grain refinement and purification processing of AZ80 alloy by ultrasonic treatment[J]. Metals and Materials International, 2012, 18: 209-215.
- [23] GOR'KOV L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[J]. Soviet Physics Doklady, 1962 (6): 773-778.
- [24] YASUDA K, UMEMURA S I, TALEDA K. Particle separation using acoustic radiation force and electrostatic force[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99: 1 965-1 970.
- [25] MARGULIS M A. Advances in Sonochemistry[M]. London: JAI Press, 1990.
- [26] NING S C, CHEN X R, LE Q C, et al. Effect of ultrasonic frequency on cavitation behavior, microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy[J]. Materials Research Express, 2019(6): 865-872.
- [27] ZHANG X P, KANG J W, WANG S, et al. The effect of ultrasonic processing on solidification microstructure and heat transfer in stainless steel melt[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 307-315.
- [28] LEGAY M, GONDREXON N, PERSON S L, et al. Enhancement of heat transfer by ultrasound: Review and recent advances[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2011: 1-17.
- [29] RUECROFT G, HIPKISS D, LY T, et al. Sonocrystallization: The use of ultrasound for improved industrial crystallization[J]. Organic Process Research & Development, 2005(9): 923-932.
- [30] LI H, LI H R, GUO Z C, et al. The application of power ultrasound to reaction crystallization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2006, 13: 359-363.
- [31] VALOPPI F, SALMI A, RATILAINEN M, et al. Controlling oleogelcrystallization using ultrasonic standing waves[J]. Scientific Reports, 2020(10): 14 448.
- [32] LUO F, LI K H, ZHONG J M, et al. An ultrasonic microforming-process for thin sheet metals and its replication abilities[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 10-18.
- [33] DAS A, KOTADIA H R. Effect of high-intensity ultrasonic irradiation on the modification of solidification microstructure in a Si-rich hypoeutectic Al-Si alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 125: 853-859.
- [34] ESKIN G I, ESKIN D G. Production of natural and synthesized aluminum-based composite materials with the aid of ultrasonic (cavitation) treatment of the melt [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4): 297-301.
- [35] KALIFA W, TSUNEKAWA Y, OKUMYIA M. Effect of ultrasonic melt treatment on microstructure of A356 aluminium cast alloys[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2008, 21: 129-134.
- [36] JIAN X, XU H, MEEK T T, et al. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59: 190-193.
- [37] FENG H K, YU S R, LI Y L, et al. Effect of ultrasonic treatment on microstructures of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208: 330-335.
- [38] JIAN X, MEEK T, HAN Q. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration [J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 893-896.
- [39] ZHANG S L, ZHAO Y T, CHENG X N, et al. High-energy ultrasonic field effects on the microstructure and mechanical behaviors of A356 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470: 168-172.
- [40] PETERSEN K E. Silicon as a mechanical material[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(5): 420-457.
- [41] NASTAC L. Modeling and Simulation of Microstructure Evolution in Solidifying Alloys[M]. US: Springer, 2004.
- [42] LIU Z L, LI R Q, JIANG R P, et al. Scalable ultrasound-assisted casting of ultra-large 2219 Al alloy ingots[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50(3): 1 146-1 152.
- [43] ZHANG L, LI X Q, LIU Z L, et al. Scalable ultrasonic casting of large-scale 2219AA Al alloys: Experiment and simulation[J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102 329.
- [44] LI A Q, JIANG R P, LIU Z L, et al. Effect of multi sources on microstructures of 2219 Al alloy large scale ingots[J]. Frontiers in Materials, 2022(9): 796 730.
- [45] LI R Q, LIU Z L, DONG F, et al. Grain refinement of a large-scale Al alloy casting by introducing the multiple ultrasonic generators during solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47: 3 790-3 796.

(编辑:彭瑾)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |