

振荡电磁力对熔体内空化影响的数值模拟

姜明轩, 张琦*, 李君康, 李杨

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 基于计算流体动力学(CFD)方法采用 Schnerr-Sauer 空化模型对全局振荡电磁场作用下铝熔体内空化作用进行数值计算, 分别计算了不同幅值与变化频率的单向和双向振荡电磁力对熔体内空化发生的影响。计算结果表明, 振荡电磁力的幅值与频率对熔体内空化的影响与空化膨胀相的时间密切相关。振荡电磁力幅值增加, 空化膨胀相的时间增加, 空化气体体积组分随之增大; 频率在 50~300 Hz 时, 空化膨胀相的时间和空化气体体积组分随频率增大呈现减小趋势; 单向振荡电磁力在熔体单侧边缘产生周期性空化, 双向振荡电磁力可以在熔体两侧边缘同时产生周期性空化, 且更易在熔体中心产生空化。

关键词: 铝基复合材料; 振荡电磁力; 数值模拟; 空化

中图分类号: TQ050.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0099-09

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.013

Numerical simulation of the effect of oscillating electromagnetic force on cavitation in melt

JIANG Mingxuan, ZHANG Qi*, LI Junkang, LI Yang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, the Schnerr-Sauer cavitation model is used to numerically calculate the cavitation effects within the aluminum melt under the influence of global oscillating electromagnetic fields. The study separately investigates the effects of unidirectional and bidirectional oscillating electromagnetic forces with different amplitudes and frequencies on cavitation occurrence within the melt. The results show that the impact of the amplitude and frequency of the oscillating electromagnetic force on cavitation within the melt are closely related to the duration of the cavitation expansion phase. The volume fraction of cavitation gas increases with the rise in the amplitude of the oscillating electromagnetic force and the extension of the cavitation expansion phase duration. Within the frequency range of 50 Hz to 300 Hz, the duration of the cavitation expansion phase and the vapor volume fraction decrease as the frequency increases. Unidirectional oscillating electromagnetic force induces periodic cavitation alternately on one side of the melt edge, while bidirectional oscillating electromagnetic force can simultaneously generate

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023ME128)

作者简介: 姜明轩(1995—), 男, 山东莱州人。硕士, 研究方向为电磁场辅助材料成型。E-mail: jiangmingxuan0402@163.com。

* **通信作者:** 张琦(1979—), 女, 山西永济人。博士, 副教授, 主要从事金属材料电磁加工等方面的研究。

E-mail: zhangqi@qut.edu.cn。

periodic cavitation on both sides of the melt edge and is more likely to produce cavitation in the center of the melt.

Key words: aluminum matrix composites; oscillating electromagnetic force; numerical simulation; cavitation

传统铝基材料难以满足航空航天装备在 573~723 K 的耐热性能要求^[1]。在铝基材料中添加纳米陶瓷颗粒增强体可使其具有高比强度、高比模量及良好的耐高温性能,并具备热膨胀系数低及导热性良好等诸多优势^[2],纳米颗粒增强铝基复合材料成为当前我国新材料研究的重点。但是由于纳米颗粒之间存在极强的团聚作用,很难在基体的铝液中润湿并分散于金属中,因此在熔体中的纳米颗粒更倾向于形成大的团簇。当纳米颗粒形成团簇时,其不再起位错锚的作用,而是成为了缺陷,影响纳米颗粒增强铝基复合材料的质量^[3-4]。解决纳米颗粒在铝熔体内的团聚现象具有重要的意义。

为了避免纳米颗粒在液态金属熔体中的团聚,主要采用超声波法和电磁制备法,通过空化作用分散颗粒^[5-6]。超声波法可以有效地改善纳米颗粒与金属液间的润湿性,同时也可使小于 10 μm 的微粒在铝液中均匀分散^[7-8],但存在高温和空化腐蚀超声探头、污染基体合金、空化产生区域小且处理时间长等问题。为避免这些问题,将 0.5 T 轴向稳恒磁场和 14.7 kHz、1×10³ A 交变电流作用于金属熔体内产生空化作用^[9-10]实现了 100 nm 的 SiC 颗粒在纯铝样品中的分散。利用顶部线圈法^[11-13]来制备铝基复合材料,在熔体的自由表面上施加螺线管线圈,线圈通入幅值 1×10³ A、频率 8.89 kHz 的电流,在熔体内产生空化从而使得 A357 铝熔体中的 1 μm SiC 颗粒均匀分布。以上研究中的振荡电磁场的频率很高,由于集肤效应,振荡电磁力主要集中在几个毫米厚的很薄的集肤层内,集肤层外,振荡电磁力迅速衰减,从而影响熔体内空化效应的发生区域,限制了振荡电磁力对熔体内纳米颗粒团聚的作用范围。

因此,本文提出了采用低频振荡电磁力在铝熔体内产生空化,并采用数值模拟方法基于 Fluent 21.0 软件建立了质量守恒方程、动量守恒方程、Schnerr-Sauer 空化模型的多方程的耦合模型,研究了单向和双向振荡电磁力幅值与频率 2 个参数对熔体内空化发生的影响规律,为后续的实验研究提供方向和理论支持。

1 数学模型

连续性方程^[14-15]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_m \quad (2)$$

式中: ρ_m 为混合物密度, kg/m³; u_i 、 u_j 分别为 i 、 j 轴方向的混合相速度, m/s; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 轴方向的坐标, m; p 为环境压力, Pa; μ_m 为混合相动力黏度, Pa·s; F_m 为振荡电磁力源项, N/m³。

Schnerr-Sauer 模型^[16]是一种将水汽的混合物看作包含大量球形蒸汽泡的体系,直接基于汽液净质量传输率表达式计算其中汽相体积分数的均质流模型,该模型中不存在经验系数,相变表达式如式(3)、式(4)所示。

$$R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad p < p_v \quad (3)$$

$$R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad p \geq p_v \quad (4)$$

式中: R_e 、 R_c 分别为蒸发和凝结源项, kg/(m³·s); ρ_l 、 ρ_v 为液体密度和蒸汽密度, kg/m³; α_v 为汽相体积分数; R_B 为空泡半径, m; p_v 为饱和蒸汽压, Pa。

本文分析了两种形式的全局振荡电磁力,即单向振荡电磁力和双向振荡电磁力。单向振荡电磁力如图 1(a)所示(其中,AC 为交变电流),在铝熔体的外部施加 z 向的稳恒磁场,与 y 方向的交变电流产生 x 方向振荡电磁力,在同一时刻,熔体内各部分产生的振荡电磁力的方向一致,单向振荡电磁力的表达式如式(5)所示。双向振荡电

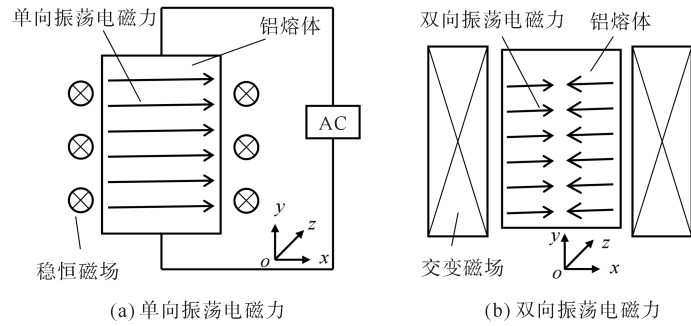


图 1 熔体内产生的振荡电磁力示意

磁力如图 1(b)所示,在铝熔体外部施加螺线管线圈,螺线管线圈内通入交变电流,在外加交变电流的作用下,铝熔体内感应出电磁挤压力和振荡电磁力,本文只考虑振荡电磁力。在同一时刻,熔体内中心两侧的振荡电磁力方向相反,双向振荡电磁力的表达式如式(6)所示。

单向振荡电磁力 F_m 的表达式^[17]为

$$F_m = \sqrt{2}JB \exp\left(-\frac{x_i}{\delta}\right) \cos\left(2\pi ft - \frac{x_i}{\delta}\right) \quad (5)$$

式中: J 为电流密度, A/m^2 ; B 为磁感应强度, T ; δ 为集肤深度, m ; f 为频率, Hz ; t 为时间, s 。

双向振荡电磁力 F_m 的表达式^[18]为

$$F_m = C_1 \cos(4\pi ft + \phi_1 + \phi_2) \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{\sqrt{R_w} B^2}{2\mu l (b_{er}^2 \sqrt{R_w} + b_{ei}^2 \sqrt{R_w})} \sqrt{\left[b_{er0}^2 \left(\sqrt{R_w} \frac{x_i}{l} \right) + b_{ei0}^2 \left(\sqrt{R_w} \frac{x_i}{l} \right) \right] \left[b_{er1}^2 \left(\sqrt{R_w} \frac{x_i}{l} \right) + b_{ei1}^2 \left(\sqrt{R_w} \frac{x_i}{l} \right) \right]} \quad (7)$$

式中: R_w 为屏蔽参数; μ 为熔体磁导率, H/m ; l 为熔体宽度, m ; b_{er} 为贝塞尔函数实部; b_{ei} 为贝塞尔函数虚部; ϕ_1 、 ϕ_2 为双向振荡电磁力公式定义系数,具体定义见参考文献[18]。

式(5)和式(6)能够准确地描述振荡电磁力在熔体内的分布和变化规律,为数值模拟提供了精确的物理基础。振荡电磁力通过用户自定义函数(UDF)添加到动量方程源项中,从而获得振荡电磁力对熔体内流速和压力的影响。

2 计算模型、边界条件及计算方法

2.1 计算模型与边界条件

图 2 为振荡电磁空化流计算模型,熔体高度为 150 mm,宽度为 100 mm,近壁面处理选择标准壁面函数,入口设置为速度入口,出口设置为压力出口,表压设置为 0 Pa。在研究振荡电磁力对熔体内空化的影响过程中,选择标准的 $k-\epsilon$ 模型,结构化网格数量为 23 万个。

2.2 计算方法

对于压力和速度耦合选择 PISO 格式,压力离散方式采用 PRESTO! 方式,体积分数离散模式采用 Quick 模式,其余参数均采用二阶迎风格式以提高计算精度。在计算模型中,选择 Fluent 材料库中的铝为第 1 相流体介质,密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,黏度为 $1.72 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$;氢气为第 2 相,密度为 $8.19 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$,黏度为 $8.41 \times 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,饱和蒸汽压为 1 kPa^[19]。

在本文中定义熔体边缘的振荡电磁力的最大值为幅值。对于单向振荡电磁力,通过改变磁感应强度来调整振荡电磁力的幅值,当电流密度 $J = 4.38 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 时,磁感应强度 B 的变化范围为 0.3~

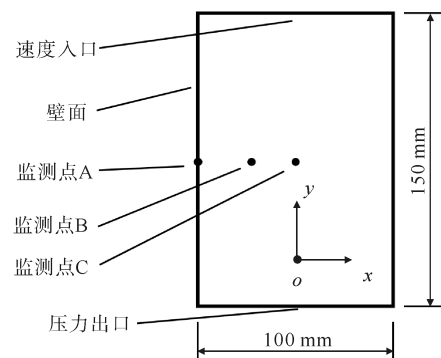


图 2 振荡电磁空化流二维几何模型

0.7 T, 振荡电磁力 F_m 的幅值为 $(1.86 \sim 4.33) \times 10^6 \text{ N/m}^3$, 振荡电磁力的变化频率与交变电流的变化频率一致, 频率 f 的变化范围为 50~300 Hz。对于双向振荡电磁力, 当磁感应强度 $B = 1.0 \sim 1.6 \text{ T}$ 时, 振荡电磁力 F_m 的幅值也为 $(1.86 \sim 4.33) \times 10^6 \text{ N/m}^3$, 频率 f 的变化范围为 50~300 Hz。时间步长设置为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$, 迭代步数设置为 1×10^5 步。

2.3 算法验证

现有研究中超声空化的模拟与实验较为成熟, 为验证电磁空化流计算模型, 对超声作用下空化现象进行数值模拟并与实验结果进行对比。如图 3(a) 所示, 二维模型尺寸不变, 超声探头设置为压力入口, 压力幅值设置为 2 MPa, 频率设置为 20 kHz。数值计算结果如图 3(b) 所示, 超声探头处产生周期性变化的空化, 与实验结果吻合良好^[20]。

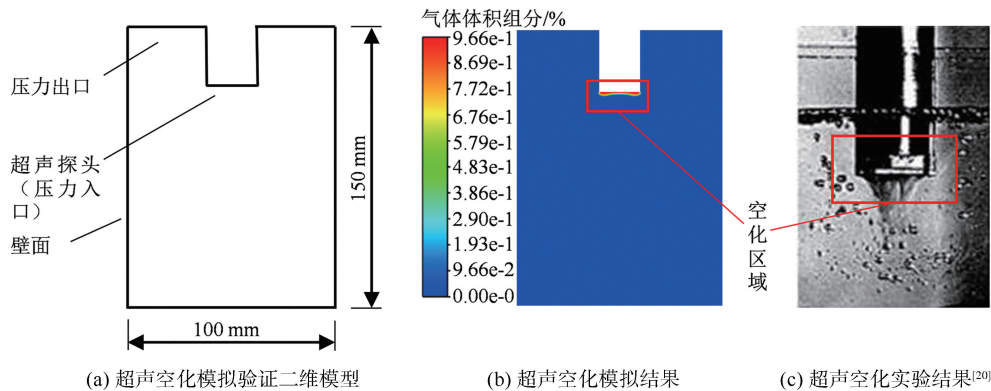


图3 超声探头空化模拟与实验对照

3 计算结果与分析

3.1 不同振荡电磁力对空化区域的影响

VIVÈS^[21]在振荡电磁力作用下使熔体产生空化的实验中发现空化会在熔体边缘产生。本研究模拟频率为 50 Hz 的单向振荡电磁力和双向振荡电磁力, 其幅值均为 $4.33 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 。图 4 与图 5 为单向振荡电磁力作用下熔体压力及气体体积组分云图, 振荡电磁力在熔体内产生负压, 达到空化阈值 -0.1 MPa ^[22], 满足空化条件, 发生空化现象, 在熔体的单侧边缘产生周期性空化, 计算结果与实验结果吻合。

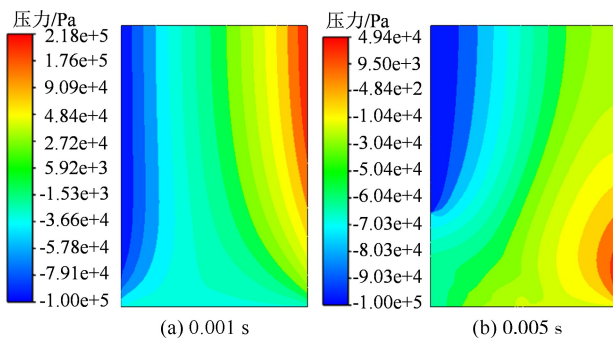


图4 单向振荡电磁力作用下不同时刻熔体压力云图

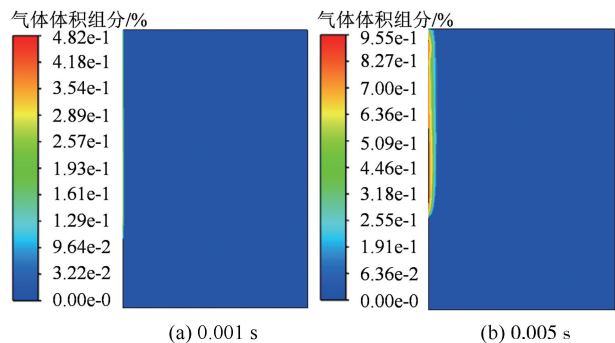


图5 单向振荡电磁力作用下不同时刻熔体气体体积组分云图

图 6 和图 7 为双向振荡电磁力作用下熔体内压力与空化云图, 压力随频率产生对称交替变化, 空化可以在熔体的两侧边缘同时产生, 熔体中心更容易产生空化。对比图 5 与图 7 可知双向振荡电磁力的空化范围更大。

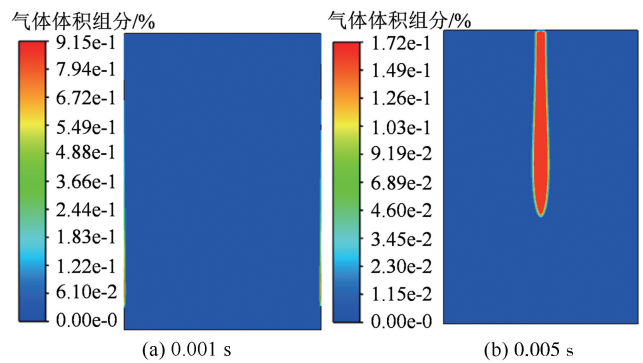
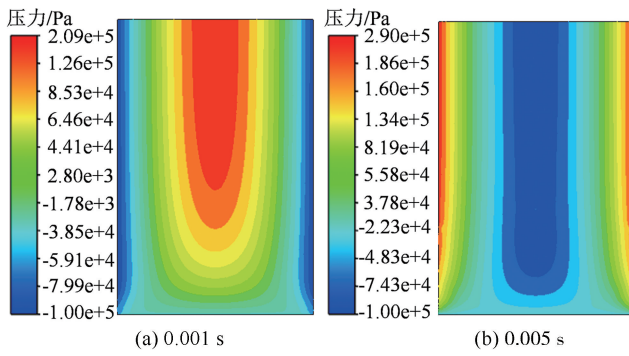


图 6 双向振荡电磁力作用下不同时刻熔体压力云图

图 7 双向振荡电磁力作用下不同时刻熔体气体体积组分云图

3.2 振荡电磁力幅值对空化效应的影响

在距中心 50 mm 的边缘处、距中心 25 mm 处以及模型中心分别设置监测点 A、B、C,如图 2 所示,对压力和气体体积组分进行监测。图 8 和图 9 为单向振荡电磁力幅值对熔体监测点压力和气体体积组分的影响,频率固定为 $f=50$ Hz。当磁感应强度 $B=0.3$ T 时,单向振荡电磁力幅值为 1.86×10^6 N/m³,熔体内 3 个监测点的压力未达到空化阈值 -0.1 MPa,未产生空化。当磁感应强度增加至 0.5 T 时,单向振荡电磁力幅值为 3.09×10^6 N/m³,熔体边缘负压达到空化阈值,在熔体边缘区域单侧产生空化,空化随着电磁力周期性变化,在熔体单侧边缘交替产生周期性变化并全部溃灭,监测点 A 处气体体积组分最高约为 22%。当磁感应强度进一步增大到 0.7 T 时,如图 8(b)所示,单向振荡电磁力幅值为 4.33×10^6 N/m³,熔体边缘监测点 A 的气体体积组分达到 100%,熔体边缘的空化区域随之增大,监测点 B、C 处压力未达到空化阈值,未产生空化。

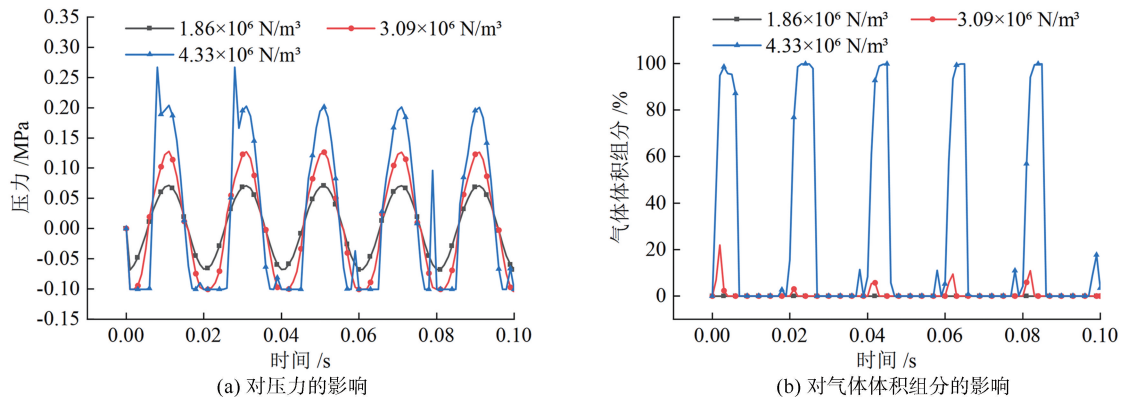


图 8 单向振荡电磁力幅值对熔体监测点 A 的压力和气体体积组分的影响

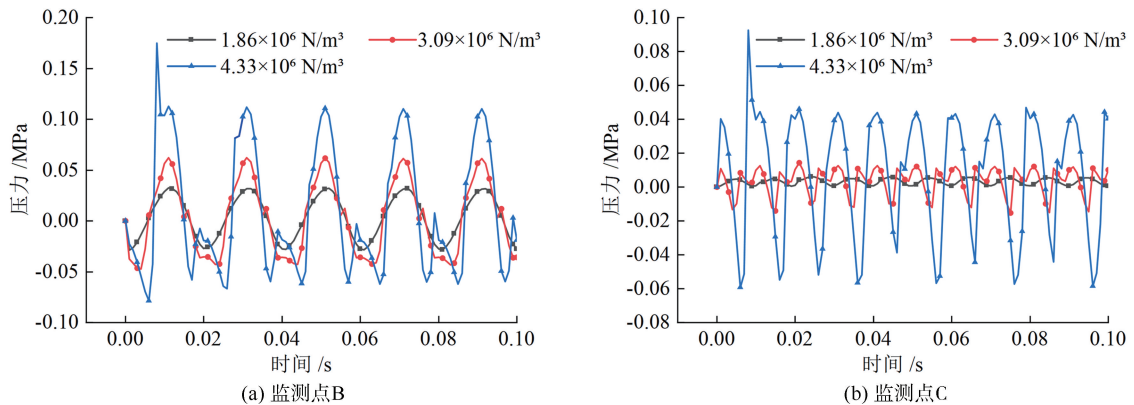


图 9 单向振荡电磁力幅值对熔体监测点 B 和 C 压力的影响

图 10—12 为双向振荡电磁力作用下振荡电磁力幅值对熔体监测点压力和气体体积组分的影响。当磁感应强度为 1.0 T 时,双向振荡电磁力幅值为 $1.86 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,熔体内各监测点产生的压力未达到空化阈值,未产生空化。随着磁感应强度增至 1.2 T,双向振荡电磁力幅值为 $3.09 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,熔体边缘负压达到了空化形成的阈值,空化开始在熔体两侧边缘产生和溃灭,监测点 A 的气体体积组分最高约为 80%。当磁感应强度进一步增至 1.6 T 时,双向振荡电磁力幅值为 $4.33 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,监测点 A 的气体体积组分最高约为 100%,观察到此时监测点 B、C 处压力达到空化阈值,空化开始在熔体的中部区域产生,熔体的中心监测点 C 的气体体积组分最高约为 30%,距中心 25 mm 处监测点 B 的气体体积组分最高约为 5%。

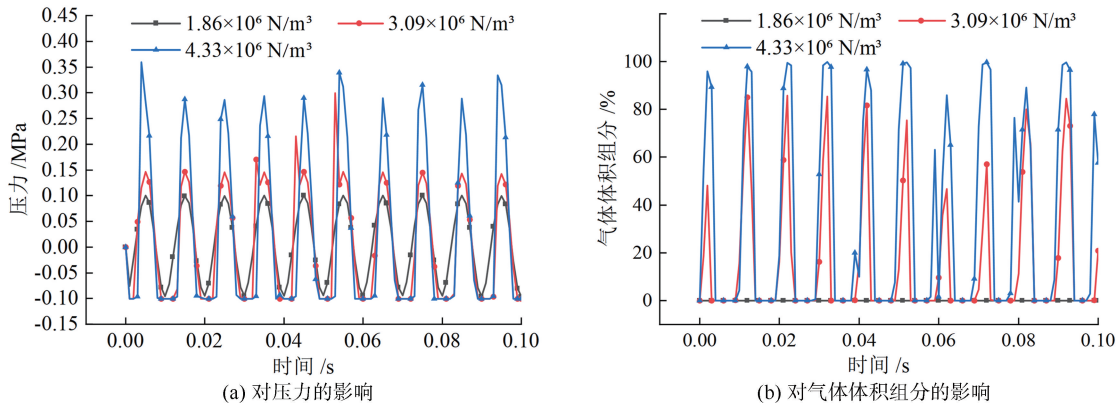


图 10 双向振荡电磁力幅值对熔体监测点 A 的压力和气体体积组分的影响

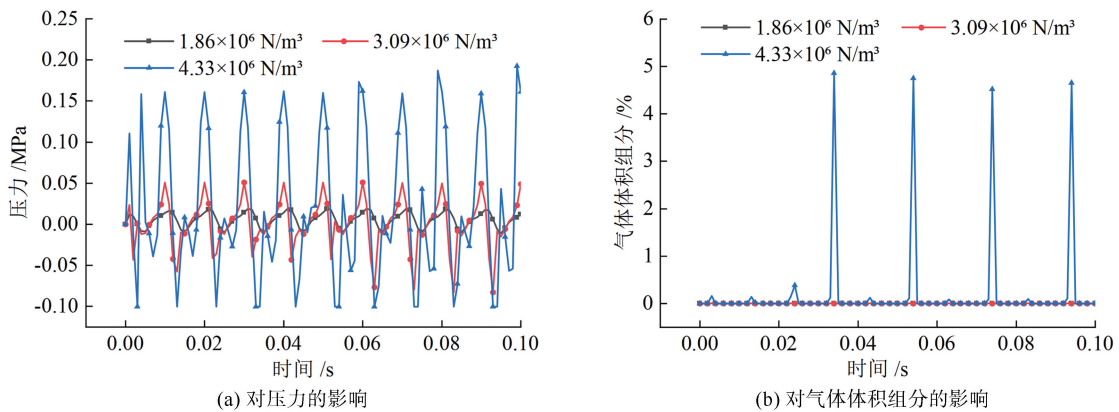


图 11 双向振荡电磁力幅值对熔体监测点 B 的压力和气体体积组分的影响

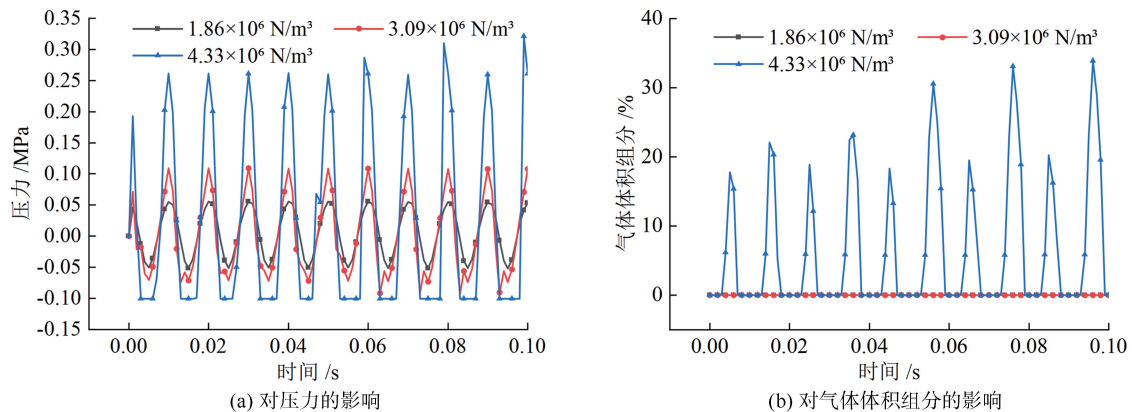


图 12 双向振荡电磁力幅值对熔体监测点 C 的压力和气体体积组分的影响

图 13 为振荡电磁力幅值对膨胀相时间的影响,膨胀相时间^[23]足够长,空化核生长产生空化。压力变化周期内磁感应强度越大越容易达到空化阈值,故同一个频率相同周期内单向和双向振荡电磁力幅值增大,膨胀相时间也增长。

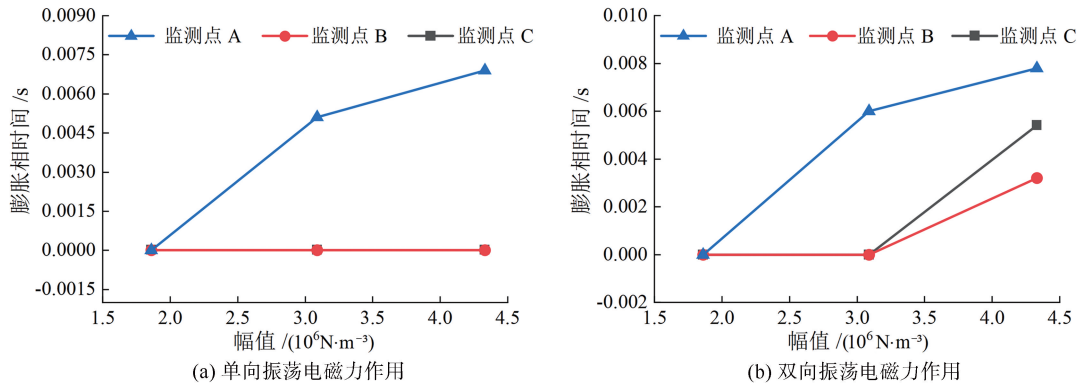


图 13 振荡电磁力幅值对膨胀相时间的影响

图 14 为振荡电磁力幅值对熔体内气体体积组分的影响,熔体内气体体积组分随振荡电磁力幅值增加而增大。膨胀相时间增长,空化泡有更长的时间增长,熔体内气体体积组分随之增大,各监测点的气体体积组分随着振荡电磁力幅值增加而增大也证实了这一结果。

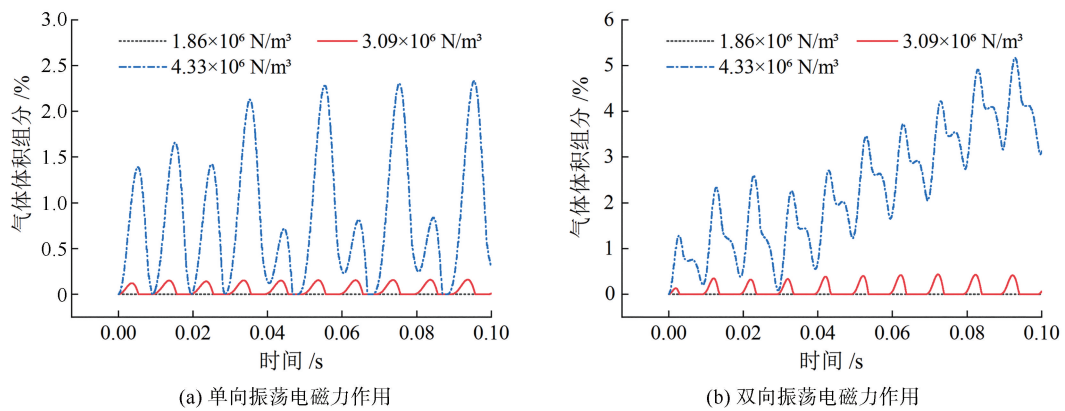


图 14 振荡电磁力幅值对熔体内气体体积组分的影响

3.3 频率对空化效应的影响

振荡电磁力幅值为 $4.33 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 时,在 50~300 Hz 频率范围内单向振荡电磁力对熔体内空化的影响如图 15(a)所示。在 50 Hz 时,气体体积组分最高达到 2.4%;在 100 Hz 时,气体体积组分最高达到 0.21%,在 200 Hz 时,气体体积组分最高达到 0.02%;在 300 Hz 时,气体体积组分最高为 0.01%;频率进一步增加,空化不能发生。50~300 Hz 频率范围内空化只在熔体边沿产生,且气体体积组分极低。

振荡电磁力幅值为 $4.33 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 时,在 50~300 Hz 频率范围内双向振荡电磁力对熔体内空化的影响如图 15 (b)所示。在 50 Hz 时,气体体积组分最高达到 5%;在 100 Hz 时,气体体积组分最高达到 25%,熔体内存在部分未溃灭的空化泡使得气体体积组分在 15%左右振荡;在 200 Hz 时,大量空化泡随频率振荡,导致气体体积组分最高达到 40%,且在 35%左右波动;在 300 Hz 时,气体体积组分最高为 12%,随着空泡的形成和溃灭,熔体内气体体积组分在 4%左右振荡。频率增加,熔体内气体体积组分先增后减。

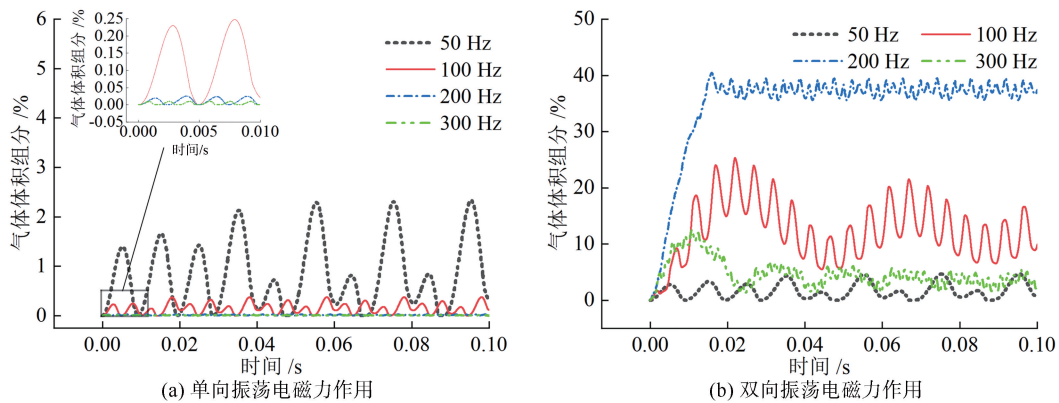


图 15 频率对熔体内气体体积组分的影响

图 16 为频率对膨胀相时间的影响。由图 16 可知,在 0.1 s 参考时间内频率显著影响了空化膨胀相的时间。当振荡电磁力幅值为 $4.33 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 时,在 50~300 Hz 频率内,空化膨胀相的时间随着频率增加呈现下降趋势。

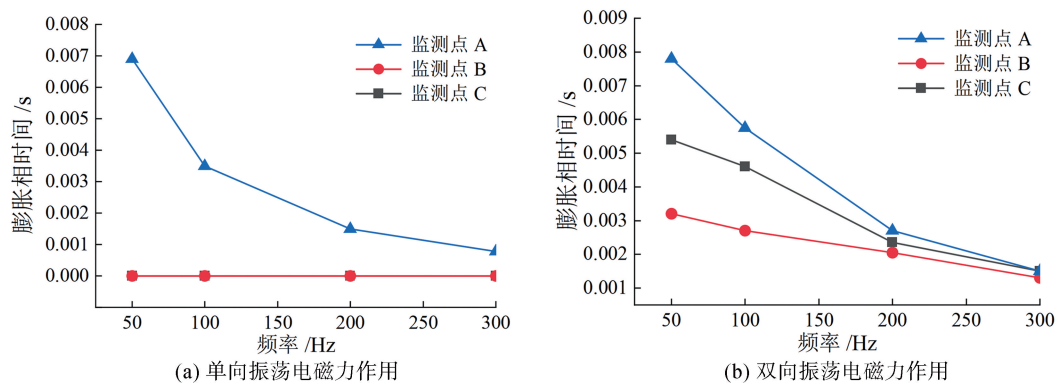


图 16 频率对膨胀相时间的影响

随着频率进一步增大,集肤效应不断增强,熔体内部振荡电磁力分布急剧减小,其产生的负压更难达到空化阈值,导致膨胀相时间减小。单向振荡电磁力作用下产生的空化泡可以完全溃灭,熔体内气体体积组分随频率增加而减小。但在双向振荡电磁力作用下,频率 50~300 Hz 时,空化泡不能完全溃灭,未溃灭的空化泡跟随频率振荡^[20],200 Hz 时气体体积组分最大;随着频率进一步增大,膨胀相的时间减少,部分空化核来不及增长到可以产生空化泡^[23],熔体内未溃灭的空化气体显著减少,熔体内气体体积组分随频率增加而减小,因而在双向振荡电磁力作用下 50~300 Hz 范围内熔体内空化气体体积组分随频率增大呈现先升再降的趋势。频率继续增大,熔体内空化难以发生。

4 结论

1) 振荡电磁力幅值与频率相同时,单向振荡电磁力作用下,空化在熔体单侧边缘产生周期性变化;双向振荡电磁力作用下,空化在熔体两侧边缘同时产生周期性变化,中心处压力更易达到空化阈值产生空化,双向振荡电磁力的空化范围更大。

2) 当频率为 50 Hz 时,单向振荡电磁力磁感应强度的变化范围是 0.3~0.7 T,双向振荡电磁力磁感应强度的变化范围是 1.0~1.6 T,振荡电磁力的幅值均为 $(1.86 \sim 4.33) \times 10^6 \text{ N/m}^3$ 。随着磁感应强度增大,振荡电磁力幅值达到 $3.09 \times 10^6 \text{ N/m}^3$,所产生的负压达到空化阈值,熔体内产生空化,振荡电磁力幅

值逐渐增大,空化膨胀相的时间增长,空化区域扩大,熔体中的空化体积分数增加,空化随之增强。

3) 熔体内振荡电磁力幅值相同,频率为 50~300 Hz 时,熔体内空化膨胀相的时间随着频率增加呈现下降趋势。单向振荡电磁力作用下熔体内产生的空化泡全部溃灭,气体体积组分随频率的增加而减小;双向振荡电磁力作用下,空化泡不能完全溃灭,熔体内存在部分空化泡,跟随频率振荡,气体体积组分呈现先升高后降低趋势,200 Hz 频率时气体体积组分最大。

参考文献(References):

- [1] 曾穗娟. 原位生长 SiC 纳米线及其在 SiC_f/SiC 复合材料中的应用[D]. 长沙:国防科学技术大学,2015.
ZENG Suijuan. In-situ growth of SiC nanowires and its application in SiC_f/SiC composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2015.
- [2] 曹遹,陈彪,贾振东,等. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023,44(8):685-705.
CAO Lin, CHEN Biao, JIA Zhendong, et al. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite[J]. Foundry Technology,2023,44(8):685-705.
- [3] SUN Y, ZHAO Y T, WU J L, et al. Effects of particulate agglomerated degree on deformation behaviors and mechanical properties of in-situ ZrB₂ nanoparticles reinforced AA6016 matrix composites by finite element modeling[J]. Materials Research Express, 2020, 7(3):36507.
- [4] SHIN H, BAEK K, HAN J G, et al. Homogenization analysis of polymeric nanocomposites containing nanoparticulate clusters[J]. Composites Science and Technology,2017,138:217-224.
- [5] 张恒,胡海豹. 基于格子 Boltzmann 方法的空泡溃灭过程模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(4):42-48.
ZHANG Heng, HU Haibao. Simulation of cavitation collapse process based on lattice Boltzmann method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,52(4):42-48.
- [6] XIONG G Q, REN Y L, FANG Z, et al. Understanding the cavitation effect of power ultrasound in cement paste[J]. Construction and Building Materials,2024,438:137089.
- [7] 邹杨,刘海霞,陈杰,等. 原位纳米颗粒增强 AA6016 基复合材料超声空化强化后微观组织及性能的变化[J]. 表面技术,2023,52(8):424-432.
ZOU Yang, LIU Haixia, CHEN Jie, et al. Variation of microstructure and property of in-situ nanoparticle-reinforced AA6016 matrix composite after ultrasonic cavitation strengthening[J]. Surface Technology,2023,52(8):424-432.
- [8] LEI J, WANG B W, ZHAO Y T, et al. Microstructure and creep properties of in situ ZrB₂/AA6016 composites assisted by ultrasonic treatment[J]. International Journal of Metalcasting,2024,18:620-632.
- [9] GRANTS I, GERBETH G, BOJAREVICS A. Contactless magnetic excitation of acoustic cavitation in liquid metals[J]. Journal of Applied Physics,2015,117(20):204901.
- [10] KALDRE I, BOJAREVICS A, GRANTS I, et al. Nanoparticle dispersion in liquid metals by electromagnetically induced acoustic cavitation[J]. Acta Materialia,2016,118:253-259.
- [11] PERICLEOUS K, BOJAREVICS V, DJAMBAZOV G, et al. Contactless ultrasonic cavitation in alloy melts[J]. Materials, 2019, 12(21):3610.
- [12] KALDRE I, BOJAREVICS A. Combined electromagnetic and mechanical ultrasound for particle dispersion in liquid metals[J]. Journal of Metals,2020,72:2892-2897.
- [13] BOJAREVICS V, DJAMBAZOV G, LEBON G S B, et al. Contactless ultrasonic treatment of melts using EM induction[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2015,84(1):012017.
- [14] 刘世博,陈晓林,徐超,等. 基于 FLUENT 的大螺旋角沟槽砂轮磨削弧区气流场特性研究[J]. 青岛理工大学学报,2024,45(4):131-138.
LIU Shibao, CHEN Xiaolin, XU Chao, et al. Research on the airflow field characteristics of a grinding wheel with a large spiral angle groove in the grinding arc zone based on FLUENT[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2024,45(4):131-138.
- [15] 王培,施志钢,张亮月,等. 基于 Fluent 的埋管式辐射地板传热及供冷能力研究[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(2):154-160.
WANG Pei, SHI Zhigang, ZHANG Liangyue, et al. Research on heat transfer and cooling capacity of buried tube radiant floor based on Fluent[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(2):154-160.
- [16] 蔡军,淮秀兰,刘斌,等. 液体空化技术应用[M]. 北京:科学出版社,2019.
CAI Jun, HUAI Xiulan, LIU Bin, et al. Application of liquid cavitation technology[M]. Beijing: Science Press,2019.
- [17] VIVÈS C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys; Part I. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,1996,27(3):445-455.