DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5136

# 7075 铝合金磁流体熔滴增材电磁搅拌过程的数值模拟

陈　浩,王永欣,罗　贤,胡　锐,霍　达
(西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072)

**摘　要**:本研究提出在磁流体熔滴增材工艺中增加电磁搅拌环节,以促进 7075 铝合金熔滴增材的熔体成分均匀性和杂质气体排出。通过数值模拟分析,系统考察了 3 种不同线圈绕组结构产生的搅拌磁场特性,基于坩埚内流场轨迹和流速分布选择出了最合适的电磁搅拌模型。结果表明,当相位相同的绕组两两相邻,并随后根据相位差有序排列时,产生的行波磁场电磁搅拌模型更加适合熔滴增材工艺,其液态金属的流场轨迹线呈现完整的空间贯穿特性,且其搅拌强度最高。并研究了电流幅值和电流频率对搅拌强度的影响,发现增加线圈电流幅值和频率均可以一定限度内提高搅拌强度。模拟结果表明,最佳的线圈工艺参数为:电流幅值 300 A, 电流频率 5 Hz。

**关键词**:磁流体;熔滴增材;7075 铝合金;电磁搅拌;数值模拟

**中图分类号**: TG146.2; O361.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)01-0067-10

# Numerical Simulation of the Electromagnetic Stirring Process for 7075 Aluminium Alloy Magnetohydrodynamic Molten Droplet–based Additive Manufacturing

CHEN Hao, WANG Yongxin, LUO Xian, HU Rui, HUO Da
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract**: This work proposed a strategy in which an electromagnetic stirring process was added to magnetohydrodynamic molten metal droplet-based additive manufacturing to increase the melt composition uniformity and remove impurity gas. By numerical simulation analysis, the stirring magnetic field traits of three different types of coil winding configurations were systematically investigated, and the optimal electromagnetic stirring model was determined on the basis of the trajectories and velocity distributions of the flow field. The results show that when windings with the same phase are arranged adjacently in pairs and subsequently ordered according to phase differences, the resulting travelling wave magnetic field electromagnetic stirring model is more suitable for molten droplet additive manufacturing processes, as it exhibits complete spatial penetration characteristics in the molten metal flow field and provides the highest stirring intensity. The influence of the current amplitude and frequency on the stirring intensity was also investigated. Increasing the coil current amplitude and frequency can enhance the stirring intensity to a certain extent. The simulation results indicate that the optimal process parameters are a current amplitude of 300 A and a coil frequency of 5 Hz.

**Key words**: magnetohydrodynamic; molten droplet-based additive manufacturing; 7075 aluminium alloy; electromagnetic stirring; numerical simulation

7075 铝合金是一种以 Zn 作为主要合金化元素的 7 系高强铝合金，具有比强度和疲劳强度高、断裂韧性好的特点,是汽车和航空航天领域广泛应用的轻量化结构性材料之一[1-4]。然而,7075 铝合金可焊性较差，这是由于其在经历增材制造熔化和凝固过程后,微观组织以粗大树枝晶为主,而粗大树枝晶之间会留下残余液相构成微长通道，随着温度和液相体积分数的降低，通道中的体积凝固收缩和热收

收稿日期: 2025-07-04
基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1193)
作者简介: 陈　浩,2000 年生,硕士生. 研究方向为磁流体熔滴增材数值模拟. Email: chenhao01@mail.nwpu.edu.cn.
通信作者: 罗　贤,1980 年生,博士,副教授. 研究方向为先进金属及金属基复合材料的开发. Email: luoxian@nwpu.edu.cn
引用格式: 陈浩,王永欣,罗贤,胡锐,霍达. 7075 铝合金磁流体熔滴增材电磁搅拌过程的数值模拟[J]. 铸造技术,2026, 47(1): 67-76.
CHEN H, WANG Y X, LUO X, HU R, HUO D. Numerical simulation of the electromagnetic stirring process for 7075 aluminium alloy magnetohydrodynamic molten droplet-based additive manufacturing[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 67-76.

缩会产生孔洞和热撕裂裂纹，这些裂纹可能贯穿整个柱状晶粒长度，并会向其他晶界区域扩展[5]。目前，常用于 7075 铝合金的 3D 打印工艺主要是以激光束为能量源的粉末床熔融或定向能量沉积技术，这些技术的凝固速率在 0.1~5.0 m/s 范围内，高于传统铸造工艺一个数量级。粉末床熔融技术引起的局部温度梯度甚至可达 $10^6$ K/m，冷却速率高达 $10^6$ K/s，导致打印工件存在很高的残余应力并出现层间剥离缺陷[5-6]。此外，由于打印过程中铝合金粉末对激光的高反射性及未熔合等缺陷，孔洞也会存在于 7075 铝合金工件中，所以需要更高的激光能量以克服上述不足。然而，激光功率过高会引起合金元素的蒸发和氧化[7-10]。

7075 铝合金由于其可焊性差，不仅在 3D 打印中产生诸多冶金缺陷，还会在打印薄壁件时面临加工困难的挑战。当前，铝合金薄壁件凭借其既能满足轻量化要求，又具备可靠性能的优势，已成为航空航天和汽车工业中的核心承力构件[11]。薄壁件在加工过程中受到应力、热量和振动的影响，容易发生变形，传统的成型方法仅能加工一般尺寸或形状简单的薄壁件[12]。在这种情况下，需采用新型加工方法来加工金属薄壁件。Fan 等[11]采用梯度超低温成型方法成功冲压成型了厚度为 1 mm 的 7075 铝合金半球壳工件，该工艺需要严格控制成型温度以及压边力大小。Panchagnul 等[13]利用冷金属过渡技术与气体保护金属电弧焊技术的协同优势，最终获得具有内凹特征的复杂低碳钢薄壁件。Yadroitsev 等[14]采用选择性激光熔融技术成功制备出厚度仅 0.4 mm 的精细三维多孔过滤元件。Jayanthi 等[15]采用电子束选区熔化成形技术制备了具有生物医学应用特性的 Ti6Al4V 多孔结构件。然而，上述成型方法需要严格控制工艺参数，且有些技术尚不成熟。对于选择性激光熔融和电子束选区熔化技术而言，加工设备则较为昂贵，且需要提前制粉。综上所述，为了减少 7075 铝合金内部冶金缺陷，并高效打印 7075 铝合金薄壁件，有必要开发新的加工技术。

金属熔滴增材技术是基于“离散 -叠加”的成型原理，通过液滴喷射器产生均匀金属微滴，同时控制三维基板运动，使金属微滴精确沉积在特定位置并相互融合、凝固，逐点逐层“堆积”，从而实现复杂三维结构的快速打印[16]。由于熔滴作为成型单元，且熔滴本身直径微小(30~1 000 μm)，故金属熔滴增材技术在加工薄壁件方面具有显著优势。Chao 等[12]以锡铅合金为原料，利用金属熔滴增材技术成功制备出厚度可薄至 400 μm 的蜂窝状薄壁件。该技术无需事先制粉，还易于回收原料，故大大降低了加工成本，缩短了工期。此外，熔滴增材过程的凝固速率和冷却速度较低，工件的微观组织主要以等轴晶为主，所以能够在很大程度上减少裂纹和残余应力缺陷的产生[17-18]。金属熔滴增材按照单个熔滴的产生方式分类，可以分为压电式、气动式和磁流体式 3 种类型。其中，磁流体熔滴增材是基于交变电磁场在液态金属内部产生洛伦兹力压力脉冲挤压液态金属的原理以产生单个熔滴，与压电式和气动式相比，磁流体熔滴增材设备简单，更适合于中高熔点合金熔滴的喷射成型。取决于喷嘴直径，磁流体熔滴增材产生的熔滴直径范围为 50~500 μm，熔滴喷射频率范围为 40~1 000 Hz。目前，Sukhotskiy 等[19]已经通过实验表明，采用磁流体熔滴增材打印 4043、6061 及 7075 铝合金薄壁件，壁厚可达 2 mm。

虽然磁流体熔滴增材在加工 7075 铝合金薄壁件方面更具优势，但是仍存在以下问题：①由于 7075 铝合金是一种析出强化型合金，工件内部成分均匀性决定着工件最终的力学性能是否满足服役要求，所以不同时刻滴落的熔滴彼此成分应该尽量保持相同。②7075 铝合金在熔滴生成器内熔化时会释放或者裹入杂质气体，在熔滴喷射过程中，这些气体形成的微气泡很容易存在于熔滴内部，影响沉积时熔滴间的热交换及熔滴和基板间的碰撞行为[20]。

基于此，本文提出在原有熔滴增材工艺基础上增加电磁搅拌环节以解决上述问题。电磁搅拌的工作原理基于电磁感应定律和洛伦兹力原理，依靠交变磁场在液态金属内部产生洛伦兹力以实现搅拌效果，从而促进成分均匀和杂质气体排出。然而，由于电磁搅拌过程中，坩埚内流场无法用肉眼或其他手段直接观察，所以本文利用数值模拟探究电磁搅拌对磁流体驱动式坩埚内部液态 7075 合金流场的影响规律，并根据模拟结果为磁流体熔滴增材选择合适的电磁搅拌方案，以初步验证电磁搅拌工艺的可行性和有效性。

## 1 电磁搅拌有限元模型的建立

使用 COMSOL 软件对金属熔滴增材工艺中的电磁搅拌环节进行有限元模拟，模拟过程主要通过湍流流场模型和电磁场模型进行耦合以实现计算[21]。选取磁流体熔滴增材坩埚内部的液态 7075 铝合金为研究对象。图 1a 为磁流体熔滴增材中涉及到的电磁搅拌模型，包括液态 7075 铝合金、氮化硼坩埚、12 个线圈绕组以及放置线圈的铁芯。其中坩埚内液态金属液面高度 $h$ 为 52 mm，坩埚上端内壁半

径 $r$ 为 5 mm，线圈绕组的径向厚度 $t$ 为 5mm，线圈绕组的轴向高度 $l$ 为 3.5 mm。在该模型中，可将系统简化为二维轴对称模型进行计算。采用二维轴对称模型的原因有 3 点：①本文拟采用线性电磁搅拌，所以液态金属的流动主要为线性环流(轴向流动)；②坩埚尺寸微小，坩埚直径尺寸远小于坩埚高度尺寸，因此主要研究内容是坩埚高度方向的液态金属流动情况 (影响坩埚高度范围内的成分分布和气泡上浮)；③流场以及电磁场均呈二维轴对称分布。表 1 为本次模拟中所需要的液态 7075 铝合金的相关材料物性参数。图 1b 为电磁搅拌线圈绕组模型示意图，12 个线圈绕组被分为 6 组，每组线圈的电流分别用 IA、IZ、IB、IX、IC 和 IY 表示，它们之间的相位差为 $\varphi$。按照产生搅拌磁场的绕组电流相位差，电磁搅拌磁场的类型主要有两种，当绕组电流相位差 $\varphi$ 为 0°时，为单相搅拌磁场；当绕组电流相位差 $\varphi$ 为 60°时，绕组产生的磁场称为行波磁场。根据上述搅拌磁场形成原理，设计了 3 种基于不同绕组排序的电磁搅拌模型，即单相搅拌磁场，12 个线圈绕组的相位差为 0，用 Case 1 表示，以及另外两种行波搅拌磁场，分别用 Case 2 和 Case 3 表示。将相位相同的绕组两两相邻，根据相位差有序排列为 Case 2；将相位相邻的绕组彼此相邻排列为一组，且下一组倒序排列时为 Case 3。按照以上描述，Case 1、Case 2 和 Case 3 的绕组排列如图 1b 右侧所示。图 1c 为有限元网格划分情况，为了使网格划分能够更加适配于流场和电磁场，且同时考虑到集肤效应，在模拟过程中，网格划分方式为物理场控制的网格划分。可以看出，网格从坩埚中心到外壁由疏到密，同时由于搅拌磁场来源于线圈，故线圈的网格也划分得更密一些，而远离线圈和铁芯的其他计算域的网格则较粗。在 COMSOL 中，网格单元质量用 0~1 之间的数字表示，网格单元质量显示 1 为最好，而网格质量低于 0.1，在许多应用中被认为质量较差。本次模拟中的网格单元数量为 16 445，网格单元质量最小值为 0.495 4，网格单元质量平均值 0.918 5，认为本次划分网格得到的网格质量可以保证模拟精度。

## 2　实验结果及讨论

### 2.1　不同电磁搅拌模型的磁通量分布

3 种电磁搅拌模型的磁感应强度分布如图 2 所示。在图 2 中，磁感应强度的大小用不同颜色来表示，磁感应强度的方向用红色箭头表示，且箭头长短表示磁感应强度的大小，最终这些箭头组成的轨迹代表磁感应线在空间的分布状态。经过对比可以看出，这 3 种电磁搅拌模型的磁感应强度大小和磁感应线在空间中的分布状态存在明显差异。当电磁搅拌模型为 Case 1 时，经过液态 7075 铝合金横截面的磁感应强度平均值为 0.25882 T，磁感应线轨迹只存在一种闭合轨迹(图 2a)；当电磁搅拌模型为 Case 2 时，经过液态 7075 铝合金横截面的磁感应强度平均值为 0.18212 T，磁感应线轨迹将空间至上而下分为 3 个区域，相邻区域间磁感应线轨迹方向不同(图 2b)；当电磁搅拌模型为 Case 3 时，经过液态 7075 铝合金横截面的磁感应强度平均值为 0.11 339 T，磁感应线轨迹将空间在上而下分为了 5 个区域，与 Case 2 类似，相邻区域间的磁感应线轨迹方向存在差异(图 2c)。以上模拟结果表明，不同绕组代表的不同电磁搅拌模型会影响磁通量密度大小和磁感应线分布状态，进而影响最终的电磁搅拌结果。

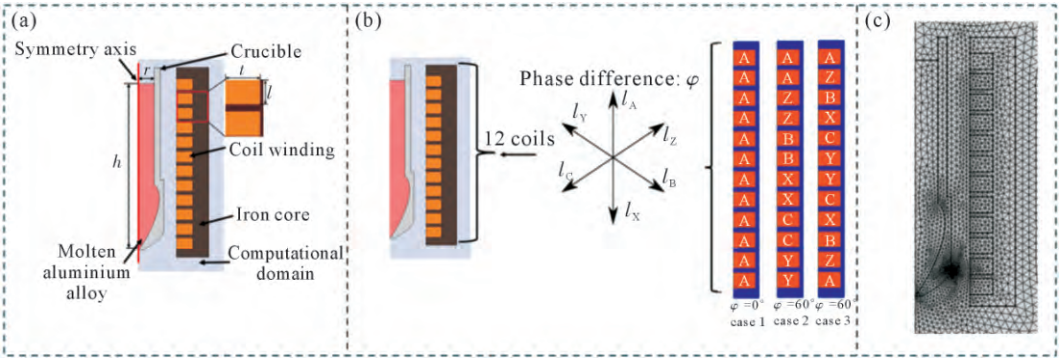


图 1　电磁搅拌有限元模型：(a) 电磁搅拌二维轴对称模型；(b) 3 种不同搅拌磁场的线圈绕组组合；(c) 模型网格划分

Fig.1　Finite element model of electromagnetic stirring: (a) 2D axisymmetric model for electromagnetic stirring; (b) coil winding configurations for different types of stirring magnetic fields; (c) meshing of the model

表1 液态7075铝合金的物性参数[22]

Tab.1 Properties of 7075 aluminium alloy[22]

| | Density/(kg·m$^{-3}$) | Viscosity/(mPa·s) | Electrical conductivity/(S·m$^{-1}$) | Relative permittivity | Relative permeability |
|---|---|---|---|---|---|
| 7075 Aluminium alloy | 2447.9 | 1.37 | $3.7\times10^{6}$ | 1 | 1 |

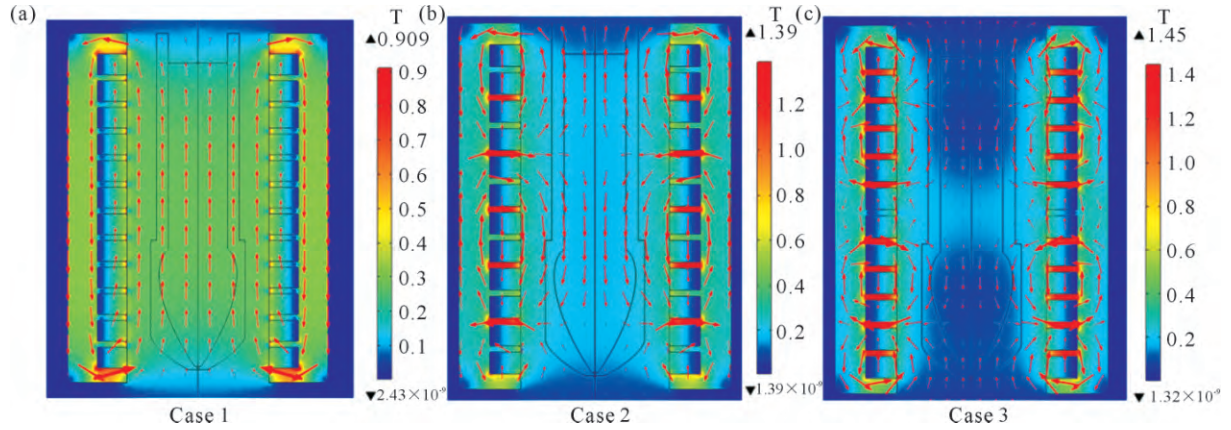


**图 2 3 种电磁搅拌模型的磁感应强度分布**:(a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

Fig.2 Magnetic flux density distributions of the three electromagnetic stirring models: (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

### 2.2 不同电磁搅拌模型的洛伦兹力分布

图 3 为经过模拟得到的 3 种电磁搅拌模型的洛伦兹力分布情况。模拟参数为:电流幅值 100 A,加载频率 50 Hz。由于洛伦兹力是由感应电流 $J$ 和感应磁场 $B$ 耦合产生的,在图 3 中,颜色图代表感应电流值的大小,洛伦兹力的方向用黑色箭头表示,黑色箭头的长短则代表洛伦兹力的大小。从图 3 可以看出,由于趋肤效应,在 3 种电磁搅拌模型中,靠近坩埚壁面的感应电流值和洛伦兹力值均最高。如图 3a 所示,当电磁搅拌模型为 Case 1 时,液态 7075 铝合金内部的洛伦兹力方向垂直于壁面,即洛伦兹力方向几乎为径向,所以此时坩埚内的液态 7075 铝合金受挤压力。当电磁搅拌模型为 Case 2 或 Case 3 时,液态 7075 铝合金内部的洛伦兹力方向则几乎平行于壁面(图 3b 和 c),这是由行波磁场的特性所决定的,即洛伦兹力方向与行波磁场的传播方向一致,此时液态 7075 铝合金受沿着轴线方向的推动力。由于 Case 2 和 Case 3 的绕组排列方式存在差异,所以其洛伦兹力的分布也有所差异。当相位相同的绕组两两相邻,并随后根据相位差有序排列时,液态 7075 铝合金截面上的洛伦兹力方向相同;当相位相邻的绕组彼此相邻排列为一组,且下一组倒序排列时,则液态 7075 铝合金上下两半部截面上的洛伦兹力方向相反。

图 4 为在距离坩埚底端 25 mm 处 3 种电磁搅拌模型的洛伦兹力值分布。根据图 3 中不同电磁搅拌模型下洛伦兹力方向呈现的特点,在图 4 中选取洛伦兹力的 $r$ 分量作为 Case 1 洛伦兹力值的评价指标,而选取洛伦兹力的 $z$ 分量作为 Case 2 和 Case 3 洛伦兹力值的评价指标。图 4 一方面体现了趋肤效应,即靠近坩埚壁位置处的洛伦兹力值最高,另一方面反映了不同电磁搅拌模型之间洛伦兹力值的大小关系。当电磁搅拌模型为Case2 时,液态金属受到的洛伦兹力值最大,其值为 12 867 N/m$^3$;而当电磁搅拌模型为 Case 1 时,液态金属受到的洛伦兹力值最小,Case1 条件下的洛伦兹力最大值仅为 521.06 N/m$^3$。造成这种差异的原因在于,尽管 Case 1 的磁感应强度略高于 Case 2 和 Case 3,但是从图 3 可以看出,由于直接贡献于洛伦兹力的感应电流密度值显著低于 Case 2 和 Case 3 的感应电流密度值,因此,Case 1 对应的洛伦兹力值最小,Case 3 居中,Case 2 对应的洛伦兹力值最高。

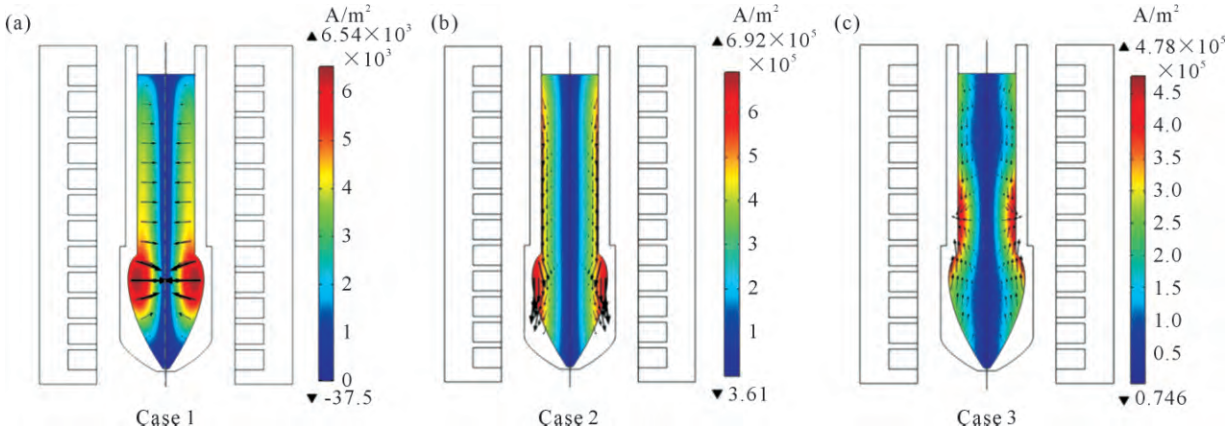


**图 3 3 种电磁搅拌模型的洛伦兹力和感应电流分布**:(a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

Fig.3 Lorentz force and induced current distributions of the three electromagnetic stirring models: (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case3

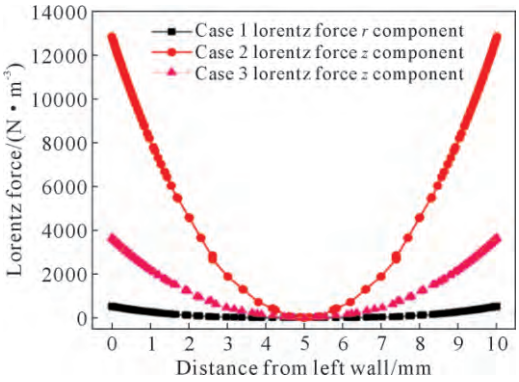


图 4　3 种电磁搅拌模型的洛伦兹力分布曲线

Fig.4　Lorentz force distribution curves of the three electromagnetic stirring models

### 2.3　不同电磁搅拌磁场模型流场分析

#### 2.3.1　3 种电磁搅拌模型的流场特征分析

图 5 为液态 7075 铝合金在 3 种电磁搅拌模型框架下达到稳态时的流场分布。其中，不同颜色代表流场中每点速度值的大小，而液态金属经受搅拌作用而呈现的流动轨迹则用带有箭头的流线表示。图 5a 为 Case 1 模型相应的流场分布。可以看出，由于液态 7075 铝合金受到径向洛伦兹力的挤压作用，坩埚内部的液态金属较多一部分流向上端，较少一部分流向下端。坩埚上部和下部液态金属的流动方向相反。以坩埚右半部分为例，较多的液态金属在坩埚上部分顺时针流动，而较少的液态金属在坩埚下部分逆时针流动。此外，靠近坩埚底端的搅拌强度高于其他区域。图 5b 为 Case 2 模型相应的流场分布。如图 3 所示，由于液态金属受到左右壁面处沿轴向向下的洛伦兹力的推力作用，所以在图 5b 中，坩埚右半部分的液态金属在整个坩埚高度范围内呈顺时针方向流动，左半部分的液态金属则呈逆时针方向流动，这与 Case 1 模型的流场轨迹有明显差异。此外，除了靠近坩埚底端的搅拌强度较高外，坩埚中央部分的搅拌强度也有所升高。图 5c 为 Case 3 模型相应的流场分布。以坩埚右半部分液态金属为分析对象如图 3 所示，由于此时坩埚上半部分液态金属受到壁面处轴向向下的洛伦兹力，而坩埚下半部分的液态金属受到壁面处轴向向上的洛伦兹力，所以在图 5c 中，上部分的液态金属呈顺时针方向流动，下部分的液态金属呈逆时针方向流动，但与 Case 1 模型相比，坩埚上下两部分流动的金属体积几乎相同。另外，Case 3 模型搅拌强度高的区域仍位于靠近坩埚底端的位置。

#### 2.3.2　3 种电磁搅拌模型的流场速度演化分析

在电磁搅拌工艺中，流场中每点的速度在搅拌过程的变化规律是值得关注的。这是因为流场中每一点的速度都和搅拌强度息息相关。由于液态金属受到的电磁搅拌力，本质上是液态金属内部的电荷在交变磁场中运动而产生的洛伦兹力。液态金属的流动速度显然会改变其内部的电荷速度，从而改变洛伦兹力大小，最终改变搅拌强度。所以在本文中，流场速度可作为搅拌强度的评价指标。图 6 为 3 种电磁搅拌模型各自对应的流场速度演化曲线，搅拌时间是 30 s。逐一分析流场中每点的速度演化规律是繁杂的，为了简化分析，如图 6a 所示，在坩埚中间轴线上选取了 3 个具有代表性的点，自下而上距离底端 5、15 和 30 mm，分别记做 A 点、B 点和 C 点，坐标分别是(0, 5 mm)，(0, 15 mm)和(0, 30 mm )。点 A 靠近坩埚喷嘴，结合图 5 可知，点 B 位于坩埚内部搅拌强度最高的区域，点 C 则位于坩埚上部分以表示该区域的速度。图 6b 为 Case 1 对应的流场速度演化曲线。以点 C 为例，根据速度随时间的变化规律，可以在图 6b 中划分出 3 个阶段，其中Ⅰ为流速升高阶段，Ⅱ为流速降低阶段，Ⅲ为流速稳定阶段。其中第Ⅰ阶段为 0~3.9 s，第Ⅱ阶段为 3.9~15 s，第Ⅲ阶段为 15~30 s。Case 1 模型的流速波动时间可以被视为Ⅰ阶段和Ⅱ阶段的时间之和。因此，Case1 模型需

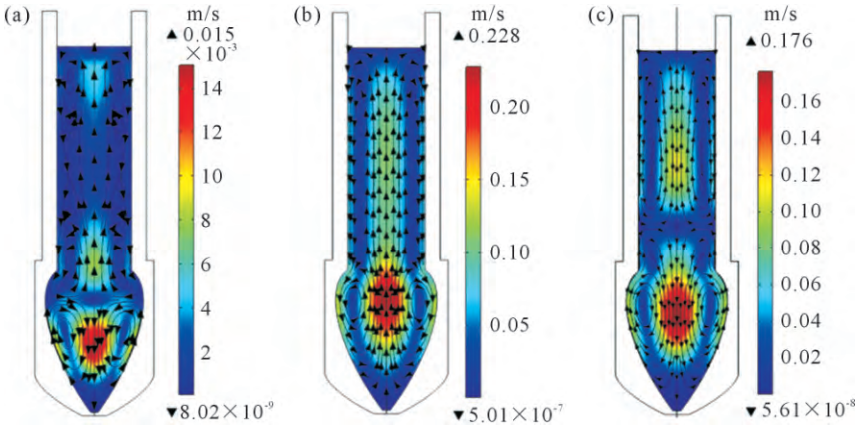


图 5　3 种电磁搅拌模型对应的流场分布：(a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

Fig.5　Flow field distributions of the three electromagnetic stirring models: (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3

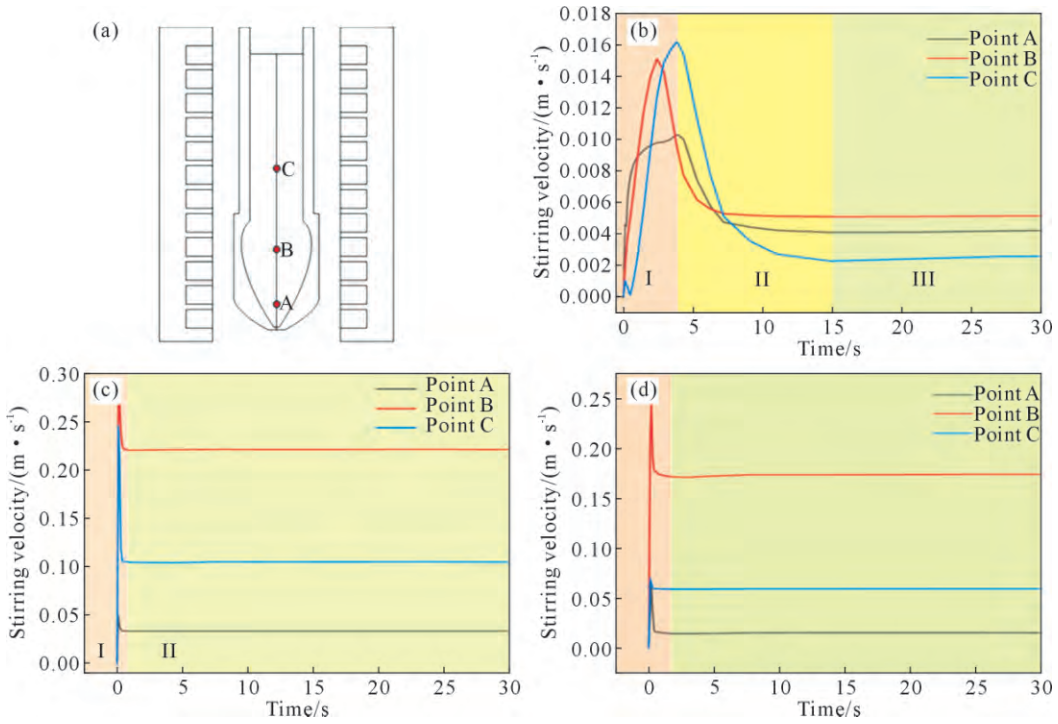


图 6 3 种电磁搅拌模型的流场速度演化曲线：(a) 坩埚内 A、B、C 点位置示意图；(b) Case 1 A、B、C 3 点流速演化曲线；(c) Case 2 A、B、C 3 点流速演化曲线；(d) Case 3 A、B、C 3 点流速演化曲线

Fig.6 Flow velocity evolution curves of the three electromagnetic stirring models: (a) position schematic of points A, B, and C in the crucible; (b) velocity evolution curves at points A, B, and C for Case 1; (c) velocity evolution curves at points A, B, and C for Case 2; (d) velocity evolution curves at points A, B, and C for Case 3

要经过 15 s 左右流速才会达到稳定。此外，图 6b 也再次表明，当流速达到稳定阶段时，位于搅拌强度高的区域的点 B 速度要高于 A 点和 C 点。图 6c 和 d 分别是 Case 2 和 Case 3 对应的流场速度演化曲线，可以看出，两组流场速度演化曲线具有相似特征。在电磁搅拌初期，流场中 A、B、C 3 点速度瞬间上升，随后又迅速下降至某一值，此后在电磁搅拌过程中，流速保持不变。由于图 6c 和 d 的速度波动时间极短，分别为 1.1 和 1.7 s，为了清晰展现流速演化曲线的分阶段过程，故相比于图 6b 做了两处改动：①将流速升高阶段和流速降低阶段合并为流动波动阶段 Ⅰ；②该阶段所表示的区域将 0 s 之前的区域包括进来，目的是突显速度波动阶段的存在，并无实际物理含义。综上可以看出，电磁搅拌类型对流场速度随时间演化规律有显著影响，即 Case 1 电磁搅拌模型导致流场流速波动时间显著长于 Case 2 和 Case 3 模型的流速波动时间，且流场内各点的流速明显低于 Case 2 和 Case 3 的流速值。

### 2.4 电磁搅拌类型选择

在熔滴增材工艺之前，对液态 7075 铝合金进行电磁搅拌的原因有：①促进熔体的成分均匀；②将 7075 铝合金受热熔化时产生的气体加速排出。如前文所述，不同的电磁搅拌模型会对液态金属流场的轨迹和流速有着显著的影响，因此需要确定一种合适的电磁搅拌模型。

如图 5 所示，Case 1 和 Case 3 模型的流场轨迹在坩埚上下两部分呈现出不同的方向，最终导致流场被分割成了上下不互通的 2 个区域。此外，针对 Case 1 模型，由于液态金属受到挤压作用，导致一部分液态金属向上流动，另一部分液态金属向下流动，如果此时没有及时的液态金属补充，根据质量守恒定律，这种挤压过程势必会引起坩埚内壁附近出现体积空缺，最终导致液体金属内部出现空穴[6]。相比之下，Case 2 模型的流场轨迹在坩埚内部是完整的，没有出现流场被分割的现象。所以，从施加电磁搅拌的原因考虑，Case 2 模型所表现出的流场轨迹更有利于整个坩埚内部液态金属的流动，而且也更有利于喷嘴位置的气体加速向上运动，以完成排气。除了对比 3 种电磁搅拌模型的流场轨迹外，搅拌强度也是需要进行对比的特征。图 7 为 3 种电磁搅拌模型的搅拌速度最大值随时间变化曲线。从图中可以明显看出，采用 Case 2 的电磁搅拌模型对液态金属产生更强的搅拌力，因而更加有利于促进熔体成分均匀以及加速杂质气体的排除。综上对比分析，Case 2 电磁搅拌模型更适合于熔滴增材工艺。

### 2.5 线圈电流工艺参数对搅拌效果的影响

#### 2.5.1 线圈电流幅值对搅拌效果的影响

为了分析 Case 2 模型的线圈电流幅值对电磁

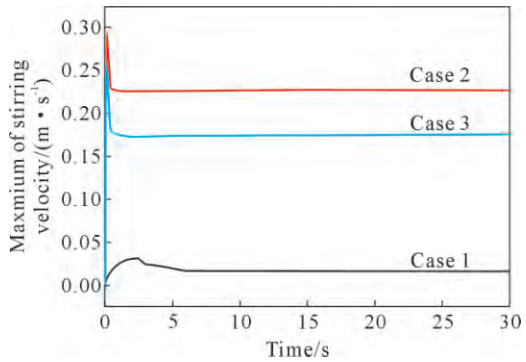


图 7　3 种电磁搅拌模型搅拌速度最大值随时间变化曲线

Fig.7　Temporal variation curves of the maximum stirring velocity for the three electromagnetic stirring models

搅拌效果的影响，通过有限元数值模拟得到了不同线圈电流幅值条件下的液态 7075 铝合金流场分布，如图 8 所示。其线圈电流幅值范围为 50~300 A，线圈输入频率为 5 Hz。从图 8 可以发现，随着线圈电流幅值升高，坩埚内流场各点速度均随之升高，但是流场中的回流区分布并未发生变化。红色区域表示搅拌速度最高的区域，随着线圈电流幅值的增加，坩埚中间轴线处搅拌速度最高的区域沿轴线方向向上有所扩展。为了更清楚地展现这一趋势，根据模拟结果得到了不同电流幅值下沿坩埚轴线的速度分布曲线，如图 9 所示。从图中可以看出，随着线圈电流幅值的增加，坩埚轴线上每点的速度均有升高。以电流幅值分别为 200、250、300 A 为例，当流速高于 0.08 m/s 时，可以视为最高搅拌速度。从图 8 可以看出，电流幅值分别为 200、250 和 300 A 的条件下，坩埚中间轴线上搅拌速度最高区域范围分别为 A1A2、B1B2 和 C1C2，且A1A2>B1B2>C1C2。所以，随着电流幅值增加，流场内各点速度均会升高，而且坩埚中间处流速最高的区域会沿着轴向发生扩展。

### 2.5.2　线圈电流频率对搅拌效果的影响

图 10 为经过模拟得到的不同线圈电流频率下的液态 7075 铝合金流场分布。线圈输入电流为 100 A，线圈电流频率分别为5、25、50、100、500 和 1 000 Hz。可以看出，随着线圈输入频率的增加，流场中各点的速度均有所升高，表明线圈频率的升高同样会加强电磁搅拌效果。此外，随着电流频率的改变，流场中回流区的分布并未发生变化。为了分析线圈电流频率对液态 7075 铝合金内部搅拌强度高的区域分布范围的影响，根据模拟结果得到了不同线圈频率下的流场速度沿坩埚轴线的速度分布曲线，结果如图 11 所示。可以看出，不同频率下，流速最大值的位置均在距离坩埚底端 16.3 mm 处。定义搅拌强度高的区域流速范围为：最大流速值的 60%~ 最大流速值。根据模拟结果和图 11 的数据，得到了不同频率下的搅拌强度高的区域范围变化曲线（图 12）。在图 12

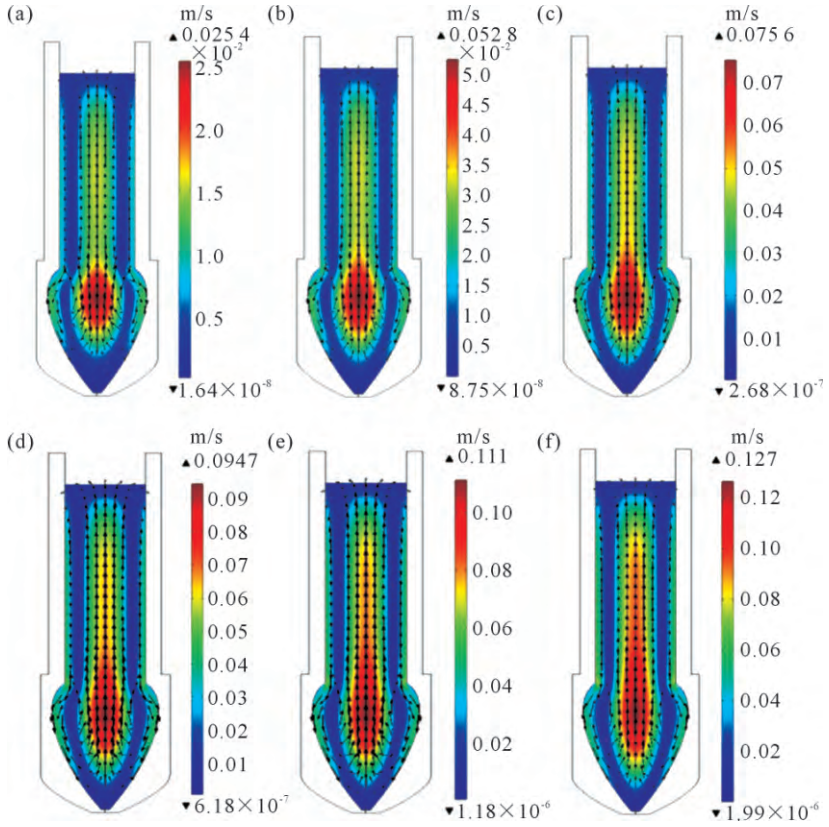


图 8　不用线圈电流幅值条件下的流场分布：(a) 50 A; (b) 100 A; (c) 150 A; (d) 200 A; (e) 250 A; (f) 300 A

Fig.8　Flow field distributions under different coil current amplitudes: (a) 50 A; (b) 100 A; (c) 150 A; (d) 200 A; (e) 250 A; (f) 300 A

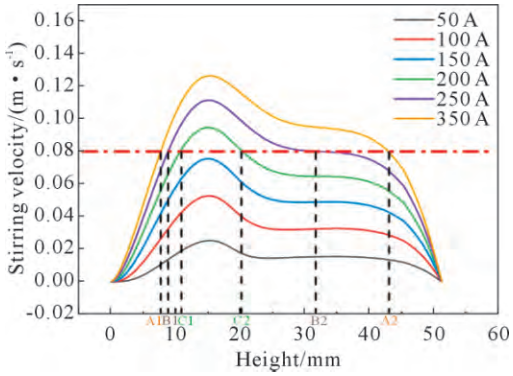


**图 9 不同线圈电流幅值下流场速度沿坩埚轴线分布曲线**

Fig.9 Axial velocity distribution curves along the crucible centerline at different coil current amplitudes

**中，当频率为** 5 Hz **时，搅拌强度高的区域范围可达** 33 mm，**随着线圈频率的升高，这一范围开始缩小至** 11.0~12.5 mm，**且当频率持续升高时，变化幅度很小，即搅拌强度高的区域范围基本保持不变，这种现象的出现是由趋肤效应导致的。随着线圈频率的升高，尽管流场内各点的速度均开始升高，但是由于趋肤效应，电磁搅拌的渗透程度开始下降，坩埚轴线处搅拌强度高的区域范围开始缩小。但是由于磁流体熔滴增材的坩埚体积较小，直径约为** 3~5 mm，**高度为** 52 mm, **所以尽管频率持续增加，当搅拌强度高的区域范围缩小至一定值后，其后续变化幅度将会很小。此外，由于该模拟中的导电材料为液态** 7075 **铝合**

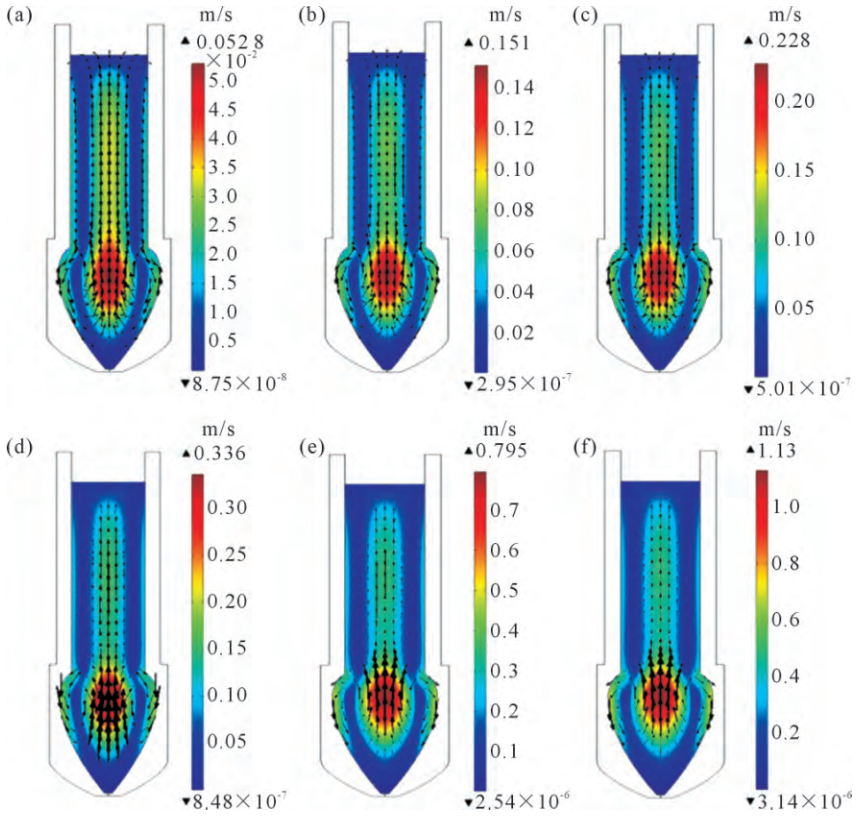


**图 10 不同频率下的流场分布**：(a) 5 Hz; (b) 25 Hz; (c) 50 Hz; (d) 100 Hz; (e) 500 Hz; (f) 1 000 Hz

Fig.10 Flow field distributions at different frequencies: (a) 5 Hz; (b) 25 Hz; (c) 50 Hz; (d) 100 Hz; (e) 500 Hz; (f) 1 000 Hz

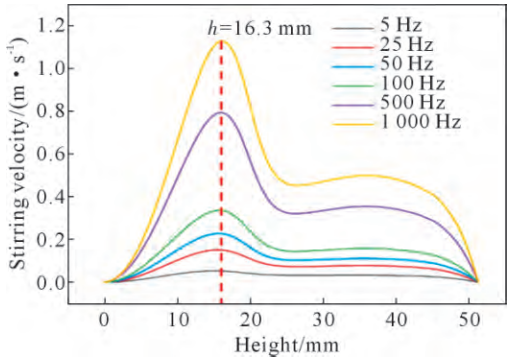


**图 11 不同频率下流场速度沿坩埚轴线分布曲线**

Fig.11 Axial velocity distribution profiles along the crucible centerline under varying frequencies

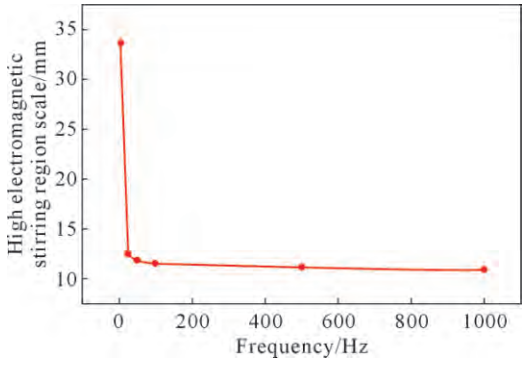


**图 12 不同频率下沿坩埚轴线的高搅拌强度区域范围变化曲线**

Fig.12 Variation curves of high intensity stirring zone scales along the crucible axis at different frequencies

金，由于趋肤效应，表层的液态金属动能初始会较大，随后由于线性流动的特性，表层的液态金属会取代轴线处的液态金属，而原来轴线处的液态金属则会被驱赶至表层，周而复始，轴线处的液态金属也具有很大的速度，而由于趋肤效应，表层的液态金属速度高的区域则始终较窄，这一特征在电流频率较高时也较为明显。

### 2.5.3　线圈电流工艺参数选择

图 13a 为液态 7075 铝合金流场内最大速度、平均速度和最小速度随线圈电流幅值变化曲线。可以看出，随着电流幅值增加，流场内部的搅拌强度随之上升，然而表征速度变化的斜率值却有所变小。这表明，当电流增加到某一极限值时，流场内部搅拌强度的改善也会有所限制。图 13b 为液态 7075 铝合金流场内最大速度、平均速度和最小速度随线圈频率变化曲线。随着输入频率的增加，流场中的最大速度、平均速度和最小速度均呈升高趋势，然而，速度的变化趋势却逐渐变缓，这与电流幅值对其的影响是相似的，所以这也表明，当输入频率不断升高时，流场内部的搅拌效果的改善程度将变得不再明显。在实际电磁搅拌过程中，电磁搅拌强度过低，会导致液态金属内部成分分布不均匀，另外也不会加速杂质气体的排出。然而电磁搅拌强度过高，也可能会导致液态金属表面的不稳定，甚至会发生二次卷气。为此，需要选择恰当的电流幅值和频率以保证电磁搅拌效果。通过权衡电流值和频率值对电磁搅拌强度的影响，结合 Xu 等[23]在适当电流参数范围内得到的电磁搅拌流场速度值，在本研究中，流场内最大速度值不应超过 0.15 m/s，这样可以保证搅拌强度处于适度状态。在这种要求下，电流幅值可以选择 300 A，而频率值可以选择 5 Hz。另外，再次结合图 10 与 12，当输入频率为 5 Hz 时，坩埚搅拌强度高的区域范围最大，且此时流场内速度也不会过高。综上，电流幅值应选择 300 A，线圈输入频率选择 5 Hz 为宜。

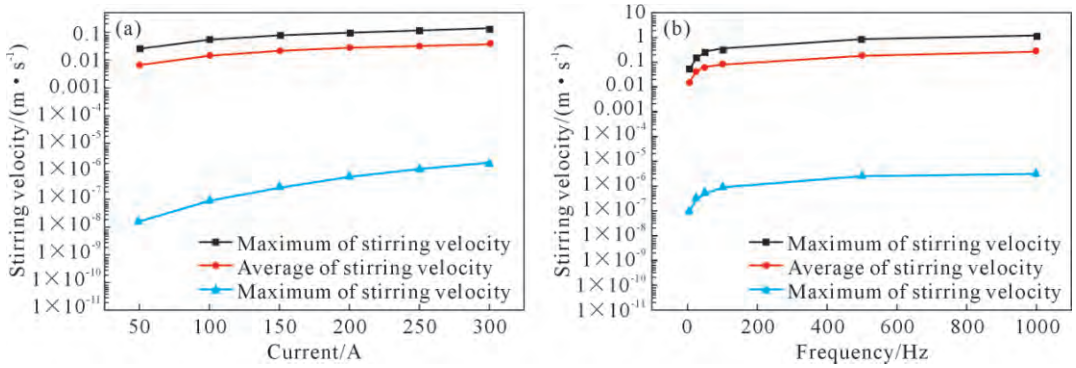


图 13　线圈参数和流场内速度最大值、平均值和最小值的关系：(a) 电流值；(b) 频率

Fig.13　Relationship between the coil parameters and the maximum/mean/minimum velocities in the flow field: (a) current amplitude; (b) frequency

## 3　结论

(1)对 3 种电磁搅拌模型进行了有限元模拟，分析了流场内部的磁场分布特征及洛伦兹力演化规律。结果表明，流场内部的磁场分布形态和洛伦兹力作用方式与线圈绕组的电流相位及组合顺序具有显著的相关性。当线圈绕组通入单相交流电时，液态 7075 铝合金主要受到径向挤压形式的洛伦兹力作用；而当采用六相交流电激励时，洛伦兹力的作用方向转变为轴向推力模式。

(2)通过对比 3 种电磁搅拌模型的流场轨迹和相应流场内的最大流速，发现当电磁搅拌模型为 Case 2 时，液态 7075 铝合金内形成的流场轨迹线呈现完整的空间贯穿特性，即此时线性流动覆盖整个坩埚高度区域，无上下分层，其搅拌强度也明显高于其它两种电磁搅拌模型，故 Case 2 电磁搅拌模型作可作为 7075 铝合金熔滴增材制造的搅拌工艺方案。

(3)模拟分析了线圈电流幅值和电流频率对搅拌效果的影响。结果表明，增加线圈电流幅值和频率均会提升电磁搅拌强度，但随着其增加到一定值，电磁搅拌强度增加的幅度均逐渐变小，最优工艺参数为：电流幅值 300 A、频率 5 Hz，该参数组合可在保证熔体成分均匀性的同时，有效促进杂质气体的排出。

参考文献：

[1] KHALID M Y, UMER R, KHAN K A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications[J]. Results in Engineering, 2023, 20: 101372.

[2] DIXIT S, LIU S. Laser additive manufacturing of high-strength aluminum alloys: Challenges and strategies[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(6): 156-183.

[3] LIU T S, QIU F, DU S, SU J, YANG H Y, CHEN P, NG F L,

CHEW Y, JIANG Q C, TAN C. Tailored porosity in additive manufacturing of 7075 aluminum alloy for crack suppression and high strength[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 334: 118620.

[4] OROPEZA D, HOFMANN D C, WILLIAMS K, FIRDOSY S, BORDEENITHIKASEM P, SOKOLUK M, LIESE M, LIU J, LI X. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 834: 154987.

[5] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, MAYER J A, SCHAEDLER T A, POLLOCK T M. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672) : 365-369.

[6] SUKHOTSKIY V. Computational analysis of liquid metal drop-on-demand jetting and solidification using a contactless magnetohydrodynamic actuator[D]. New York: the University at Buffalo, the State University of New York, 2021.

[7] SVETLIZKY D, DAS M, ZHENG B, VYATSKIKH A L, BOSE S, BANDYOPADHYAY A, SCHOENUNG J M, LAVERNIA E J, ELIAZ N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications [J]. Materials Today, 2021, 49: 271-295.

[8] SINGH A, RAMAKRISHNAN A, BAKER D, BISWAS A, DINDA G P. Laser metal deposition of nickel coated Al 7050 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 719: 151-158.

[9] LIN T C, CAO C, SOKOLUK M, JIANG L, WANG X, SCHOENUNG J M, LAVERNIA E J, LI X. Aluminum with dispersed nanoparticles by laser additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4124-4132.

[10] SVETLIZKY D, ZHENG B, BUTA T, ZHOU Y, GOLAN O, BREIMAN U, HAJ-ALI R, SCHOENUNG J M, LAVERNIA E J, ELIAZ N. Directed energy deposition of Al 5xxx alloy using laser engineered net shaping (LENS® ) [J]. Materials & Design, 2020, 192: 108763.

[11] FAN X, QIAO K, CHEN X, YUAN S. Wrinkling control and microstructure of 7075 aluminum alloy hemispherical shell in gradient ultra-low temperature forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129: 2227-2239.

[12] CHAO Y P, QI L H, XIAO Y, LUO J, ZHOU J M. Manufacturing of micro thin-walled metal parts by micro-droplet deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 484-491.

[13] PANCHAGNULA J S, SIMHAMBHATLA S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 194-203.

[14] YADROITSEV I, SHISHKOVSKY I, BERTRAND P, SMUROV I. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5523-5527.

[15] PARTHASARATHY J, STARLY B, RAMAN S, CHRISTENSEN A. Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2010, 3(3) : 249-259.

[16] 罗俊,齐乐华,钟宋义. 基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术[J]. 中国科学:信息科学,2015, 45(2) : 212-223.
LUO J, QI L H, ZHONG S Y. Uniform metal droplet jetting-based 3D printing technology[J]. Scientia Sinca (Inforamtionis), 2015, 45 (2): 212-223.

[17] ANSELL T Y. Current status of liquid metal printing[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5(2): 31-66.

[18] LIU Q, ORME M. On precision droplet-based net-form manufacturing technology [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215 (10) : 1333-1355.

[19] SUKHOTSKIY V, KARAMPELAS I H, GARG G, VERMA A, TONG M, VADER S, VADER Z, FURLANI E P. Magnetohydrodynamic drop-on-demand liquid metal 3D printing[A]: Proceedings of the 28th annual international solid freeform fabrication symposium - An additive manufacturing conference[C]. Austin: The University of Texas at Austin: 2017. 1806-1811.

[20] ZHENG N, LIU Z, PANG Y, CAI F, ZHAO S. Study on flow and heat transfer characteristics of 3D molten aluminum droplet printing process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 204: 123863.

[21] CHEN Y, CAO M, LI H, WANG Y, ZHANG Q. Multi-physics coupling simulation investigation of semi-solid A380 aluminum alloy during intermediate frequency electromagnetic stirring process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125: 4329-4339.

[22] LI H P, LI H J, QI L H, LUO J, ZUO H S. Simulation on deposition and solidification processes of 7075 Al alloy droplets in 3D printing technology[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(6): 1836-1843.

[23] XU S, JIA W, SONG Z. Effects of electromagnetic field on physical behaviors during low-frequency electromagnetic casting of Mg alloy AZ31[J]. Materials Research Express, 2019, 6: 066569.

(责任编辑:李亚敏)