

电磁复合场对激光熔注增强颗粒分布梯度的调控

王梁^{1,2**}, 胡勇^{1,2}, 林英华^{1,2}, 李珏辉^{1,2}, 姚建华^{1,2*}

¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310014;

²浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310014

摘要 对激光熔注过程进行了多物理场仿真,分析了电磁复合场参数对熔池内部流场、温度场和颗粒分布的影响规律,并通过实验进行了验证。结果表明,电磁复合场的施加可抑制熔池流速,但对其温度场的分布无明显影响。当施加与重力同向的定向洛伦兹力时,大部分增强颗粒集中在熔注层上层区域;反之,大部分增强颗粒集中在下层区域。

关键词 激光技术; 激光熔注; 电磁复合场; 洛伦兹力; 增强颗粒; 分布梯度

中图分类号 TG148; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002001

Distribution Gradient Control of Laser Melt Injection Reinforcement Particles by Electromagnetic Compound Field

Wang Liang^{1,2**}, Hu Yong^{1,2}, Lin Yinghua^{1,2}, Li Juehui^{1,2}, Yao Jianhua^{1,2*}

¹Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

²Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract The multi-physics simulation of laser melt injection process is conducted and the effects of electromagnetic compound field parameters on the distributions of the flow field, temperature field and particles within the molten pools are investigated, which is also verified by the experiment. The results indicate that, the addition of the electromagnetic compound field can suppress the fluid speed, but does not obviously influence the temperature field distribution. When the directional Lorentz force and the gravity force are in the same direction, the majority of reinforcement particles is trapped in the upper region of the laser melt injection layer, conversely, the majority is in the bottom region.

Key words laser technique; laser melt injection; electromagnetic compound field; Lorentz force; reinforcement particles; distribution gradient

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光熔注是一种能获得超高表面性能的金属基复合材料的制备方法。该方法利用高能激光束加热材料表面,同时将增强颗粒(一般为陶瓷类高性能颗粒)直接注入到所形成的熔池中。在熔池快速凝固时,增强颗粒被保留在激光熔凝层中,形成颗粒增强的金属基复合材料。不同于激光熔覆过程,激光熔

注所用的颗粒为纯增强颗粒,一般不添加其他金属粉末,且增强颗粒在注入过程中保持固态或仅发生微熔^[1]。激光熔注工艺可有效减少增强颗粒的熔化,进而控制基体中脆性相的数量及增强颗粒与金属基体反应层的厚度^[2-3]。

熔注层中增强颗粒的分布梯度决定了涂层的使用性能和机加工性能,对熔注层中增强颗粒的分布梯度进行灵活调控,是目前研究的热点之一。

收稿日期: 2018-03-23 **修回日期:** 2018-05-02; **录用日期:** 2018-05-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103601)、国家自然科学基金青年基金(51705464)、国家自然科学基金面上项目(51475429)

* **E-mail:** laser@zjut.edu.cn; ** **E-mail:** ddtwl@foxmail.com

宋诗英等^[4]利用稳态磁场辅助激光熔注过程,获得了增强颗粒富集于熔注层表面的调控效果。胡勇等^[5]通过外加稳态磁场和稳态电场形成定向洛伦兹力,消除了气孔缺陷。在此基础上,本文提出了一种在熔池区域同时耦合外部稳态磁场和稳态电场的方法,利用电磁复合场在熔池内形成的定向洛伦兹力对熔注层中增强颗粒的分布进行灵活调控,以在不改变原有熔注工艺参数的条件下,实现对增强颗粒分布状态的调控目的。许华等^[6]对电磁辅助激光熔覆的硬质颗粒进行了研究,发现电磁搅拌能细化熔覆层中的碳化钨(WC)组织,并使其分布均匀化。张勋等^[7]发现,利用稳态纵向磁场可使熔池旋转,细化焊接接头晶粒,提高结晶的均匀性。Gatzen 等^[8-9]建立了稳态磁场作用下激光焊接熔池对流的计算流体力学(CFD)模型,揭示了稳态磁场抑制熔池对流的机理。于群等^[10]采用有限元和有限体积间接耦合法,证明了交变磁场能减小熔池的温度梯度,细化凝固组织。Bachmann 等^[11-12]研究了稳态磁场和高频交变磁场在激光焊接熔池中形成的 Hartmann 效应,并利用该效应对激光深熔焊和穿透焊的过程进行了调控。上述研究主要采用的是单一稳态磁场或者交变磁场,且集中在外部能场对熔池传热、流体运动、溶质元素分布和表面形貌等方面的影响,而电磁复合场对激光熔注过程中增强颗粒运动及分布的调控研究鲜有报道。

在电磁复合场条件下,熔池对流及增强颗粒的

表 1 实验用 316L 基体的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 316L substrate material used in experiment (mass fraction, %)

Composition	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	P	S	Fe
Value	0.02	16.5	10.0	1.55	0.55	2.08	<0.03	<0.03	Bal.

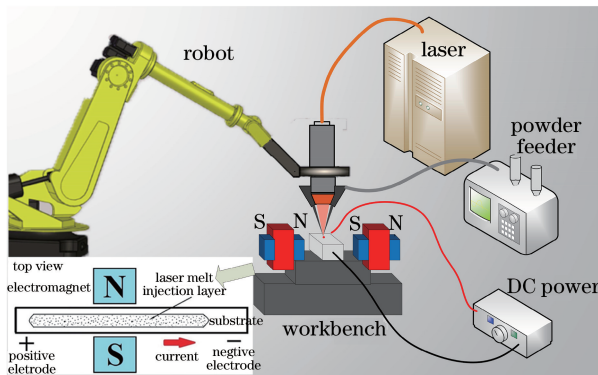


图 1 电磁复合场协同激光熔注的示意图

Fig. 1 Schematic of laser melt injection in collaboration with electromagnetic compound field

运动和固化过程变得更为复杂,传统实验手段难以对其进行有效分析。因此,本文建立了一种电磁复合场协同作用下激光熔注的二维(2D)瞬态模型,分析了电磁复合场作用下熔池内部传热传质过程的变化规律,揭示了电磁场参数与颗粒分布梯度之间的关系。

2 实验条件

实验基材选用顺磁性奥氏体不锈钢 316L,其成分见表 1。将试样加工成 200 mm × 20 mm × 10 mm 的长条,长条两端连接大电流直流电源(电压为 2 V,电流为 500 A)的两个电极,两侧布置电磁铁的两个磁极,所提供的磁感应强度最大为 2.0 T。电磁复合场的施加形式和实验整体布置情况如图 1 所示,其中 N 代表磁铁 N 极,S 代表磁铁 S 极。实验所用激光器为德国 Laserline 公司 LDF 型 2 kW 半导体激光器,运动机构为瑞士 ABB 公司 IRB 1600 型机械手臂。激光熔注采用同轴送粉形式,所用增强颗粒为球形 WC 颗粒,颗粒直径范围为 75 ~ 150 μm,颗粒形貌如图 2 所示。

实验前,将试样表面的油污清理干净,然后装夹在电磁复合场施加装置中。选用的激光熔注工艺参数为:激光功率 1800 W,扫描速度 4.25 mm/s,送粉速率 10 g/min。实验后,制备熔注层纵截面试样,利用德国 Zeiss 公司 SIGMA HV-01-043 型场发射扫描电子显微镜(SEM)的背散射模式拍摄熔注层中 WC 颗粒的分布情况。

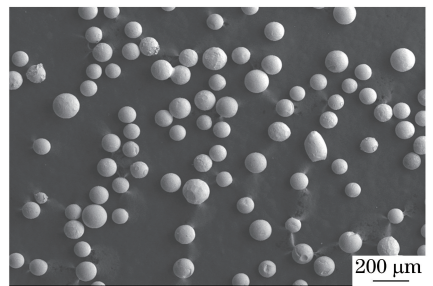


图 2 球形 WC 颗粒形貌

Fig. 2 Morphology of spherical WC particles

3 数值仿真模型

3.1 控制方程

电磁复合场协同激光熔注的过程中涉及材料的

固液相变、熔池传热与对流、颗粒在熔池中的运动以及电磁体积力等主要物理过程,涉及多个物理场的耦合,故使用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics[®]5.1 进行仿真研究。计算采用 2D 瞬态模型,首先分析电磁复合场协同作用下熔池传热传质过程的变化机制。在此基础上,耦合颗粒的运动方程,计算增强颗粒在熔池中的运动轨迹和固化后的分布规律。在激光辐照作用下,熔池流体的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、热浮力方程、固液相变方程及表面张力边界等控制方程和边界条件已在课题组的前期研究中进行了详细阐述^[13],不再重复展开。

激光熔注过程同时耦合了稳态磁场和稳态电场,所形成的洛伦兹力体积力的源项为

$$\mathbf{F}_{\text{Lorentz}} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = \sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \sigma(\mathbf{u} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

式中 \mathbf{j} 为电流密度, \mathbf{B} 为磁场强度, \mathbf{E} 为外部电场强度, σ 为电导率, \mathbf{u} 为熔池流速。外部稳态电场和稳态磁场的协同作用在熔池中形成定向恒稳的洛伦兹力 $\sigma(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ 。同时,导电流体在稳态磁场中的运动生成感应电流,该感应电流在磁场的作用下形成感应洛伦兹力 $\sigma(\mathbf{u} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B})$ 。由(1)式可知,感应洛伦兹力的方向与熔池对流的方向相反。

增强颗粒在熔池中的运动遵守牛顿第二定律:

$$\frac{d(m_p \mathbf{v})}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{Bp}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{m_p}{\tau_p}(\mathbf{u} - \mathbf{v}), \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_g = m_p \mathbf{g}, \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{Bp} = -V_p \rho_l \mathbf{g}, \quad (5)$$

式中 t 为时间, \mathbf{F}_D 为颗粒所受熔池流体的拖曳力, \mathbf{F}_g 为颗粒所受重力, \mathbf{F}_{Bp} 为颗粒所受浮力, m_p 为颗粒质量, τ_p 为颗粒松弛时间, \mathbf{u} 为熔池流速, \mathbf{v} 为颗粒运动速度, ρ_l 为流体密度, V_p 为单颗粒的体积, \mathbf{g} 为重力加速度。

根据经典的多相流理论,颗粒在熔池中因与流体存在速度差,将受到流体阻力(拖曳力)^[14]:

$$\mathbf{F}_D = \frac{\pi d_p^3 \rho_l}{6 \tau_p}(\mathbf{u} - \mathbf{v}), \quad (6)$$

式中 d_p 为颗粒直径; τ_p 与颗粒雷诺数 Re_p 、Stokes 拖曳力系数 C_D 、流体粘度等有关,其表达式为

$$\tau_p = \frac{4 \rho_p d_p^2}{3 \eta C_D Re_p}, \quad (7)$$

式中 η 为动力粘度, ρ_p 为颗粒密度。 Re_p 的表达

式为

$$Re_p = \frac{\rho_l |\mathbf{u} - \mathbf{v}| d_p}{\eta}. \quad (8)$$

拖曳力系数的经验公式^[15]为

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.673}). \quad (9)$$

3.2 边界条件

假设试样的初始温度为 T_0 ,激光光斑的能量分布为均匀分布。熔池表面张力与表面温度的梯度分布相关,将该温度梯度作为边界力加载在试样表面,有

$$-\eta \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad -\eta \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (10)$$

式中 x 、 y 和 z 为直角坐标系坐标, u 为 x 方向速度, v 为 y 方向速度, γ 为表面张力系数, $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 为与温度相关的表面张力系数, T 为试样温度。

计算所用的物性参数见表 1,计算所用的激光工艺参数与实验工艺参数一致。

表 2 材料物性参数

Table 2 Physical parameters of materials

Property	Value
Melting temperature /K	1700
Mass density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850
Dynamic viscosity /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.006
Surface tension coefficient /($10^{-4} \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	-0.52
Thermal expansion coefficient /(10^{-5}K^{-1})	5
Heat convection coefficient /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	20
Particle density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	15600
Particle diameter / μm	80

4 仿真结果

4.1 电磁复合场对熔池流场的影响

图 3 所示为不同电磁复合场工艺参数下,熔池纵截面的流场分布状态($t = 3.9 \text{ s}$),其中蓝色云图代表流场的量值,红色箭头代表流速的量值和方向,黄色曲线为固液界面。由图 3(a)可知,当未附加电磁复合场时,在表面张力的驱动下,流体由熔池中心向熔池前后部运动,并在熔池内部形成典型的双涡状态。当附加 0.9 T 的稳态磁场后,熔池内部的流速整体减小,如图 3(b)所示。根据(1)式可知,熔池内部流体在稳态磁场中的运动生成感应电流,该感应电流在稳态磁场的作用下形成方向与流体方向时刻相反的感应洛伦兹力,故熔池流速整体减小。在此基础上,耦合不同方向的稳态电场,使熔池区域产生不同方向的定向洛伦兹力,熔池流速分布如图 3(c)、(d)所示。由图 3(c)

可知,当洛伦兹力向上时,熔池流速在稳态磁场的抑制作用下进一步减小。这是因为同时耦合稳态磁场和稳态电场时,熔池流体同时受到感应洛伦兹力和定向洛伦兹力的作用。当定向洛伦兹力的

方向与重力反向时,由密度差引起的熔池自然对流被削弱,熔池流速进一步减小。反之,当定向洛伦兹力的方向与重力同向时,熔池自然对流增强,流速增大,如图 3(d) 所示。

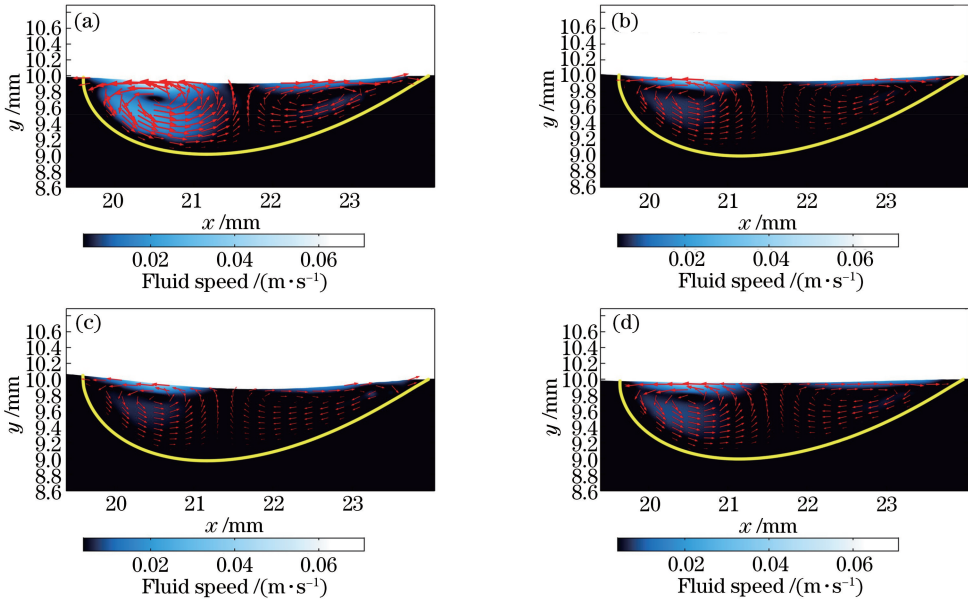


图 3 电磁复合作用下的熔池流场分布 ($t=3.9$ s)。(a) $B=0$ T; (b) $B=0.9$ T; (c) $B=0.9$ T, 洛伦兹力向上; (d) $B=0.9$ T, 洛伦兹力向下

Fig. 3 Flow field distribution in molten pool under action of electromagnetic compound field ($t=3.9$ s). (a) $B=0$ T; (b) $B=0.9$ T; (c) $B=0.9$ T, upward Lorentz force; (d) $B=0.9$ T, downward Lorentz force

电磁复合场形成的感应洛伦兹力和定向洛伦兹力对熔池的流动有着不同的影响。图 4 所示为不同的稳态磁场作用下熔池表面流速的变化情况,其中红色实线为熔池表面的温度分布。可以看出,在激光束的作用范围内,熔池中心偏后方处的温度最高,而此处熔池的流速接近于 0。这是因为熔池的表面张力由表面温度梯度引起,熔池表面温度最高处的温度梯度为 0,此处的流速最小。在熔池中心的前后方,在表面 Marangoni 对流作用下,形成了较高

的流速,即图 4 中的“双峰”。当稳态磁场的感应强度为 0 T 时,不存在感应洛伦兹力,熔池表面的流速最大。当稳态磁感应强度增大时,熔池表面的最高流速从 0.070 m/s 下降至 0.045 m/s。该结果进一步证实稳态磁场引起的感应洛伦兹力对熔池运动起到显著的阻尼作用,导致熔池流速的整体减小^[13,16]。

图 5 所示为电磁复合场引入的感应洛伦兹力对熔池表面流速的影响。同样施加 0.9 T 的磁感应强度时,电场方向决定了定向洛伦兹力的方向。当定

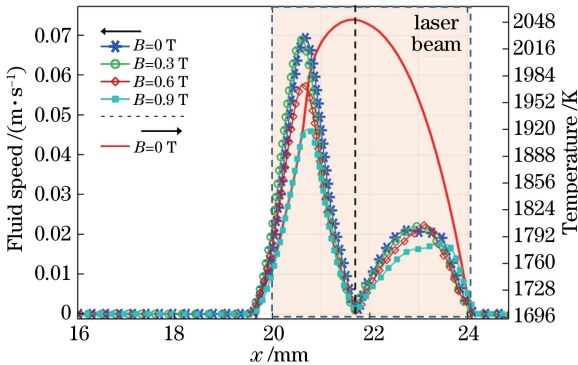


图 4 感应洛伦兹力对熔池表面流速的影响 ($t=3.9$ s)
Fig. 4 Influence of induced Lorentz force on surface fluid speed in molten pool ($t=3.9$ s)

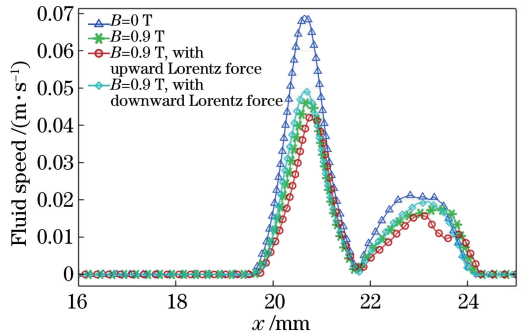


图 5 定向洛伦兹力对熔池表面流速的影响 ($t=3.9$ s)
Fig. 5 Influence of directional Lorentz force on surface fluid speed in molten pool ($t=3.9$ s)

向洛伦兹力向上时,熔池的最大流速稍大于仅附加稳态磁场时的;当定向洛伦兹力向下时,熔池的最大流速稍小于仅附加稳态磁场时的。故定向洛伦兹力的方向对熔池流速有一定影响,但其作用效果不甚明显。根据前面的分析,所施加的定向洛伦兹力为竖直方向的体积力,只能改变熔池内部的自然对流,难以影响作为熔池运动主要驱动力的 Marangoni 对流。

4.2 电磁复合场对熔池温度场的影响

图 6 所示为不同电磁复合场参数下熔池纵截面的温度场分布状态($t=3.9\text{ s}$)。与电磁复合场作用下熔池流速出现较大差异的现象不同,无论是在单纯稳态磁场的作用下,还是在不同方向的定向洛伦兹力的作用下,熔池大小及其内部温度分布差异甚微。当未附加电磁复合场时,熔池表面的最高温度为 2041 K。当仅附加稳态磁场($B=0.9\text{ T}$)时,熔

池近表面的温度上升至 2061 K。当进一步分别附加上、下两个方向的定向洛伦兹力时,熔池表面的最高温度分别为 2050 K 和 2065 K。电磁复合场的施加对熔池温度的影响甚微,这表明熔池内部的传热过程由热传导主导。虽然电磁复合场的加入对熔池内部的热对流过程有较大影响,但仍然难以影响熔池内部的温度分布。上述结果与现有文献中的研究结果^[13]一致。当定向洛伦兹力的方向向下时,熔池近表面的温度最高。这是因为在该条件下,定向洛伦兹力方向与重力同向,熔池流体处于“超重”状态。此时,自然对流作用最强,密度较低的高温熔体易集中在熔池表面,对熔池近表面的温度产生细微影响。上述分析结果表明,电磁复合场的施加几乎不影响熔池的尺寸和凝固时间,即有望在不改变原有熔注工艺中的激光参数的条件下,实现对增强颗粒分布梯度的调节。

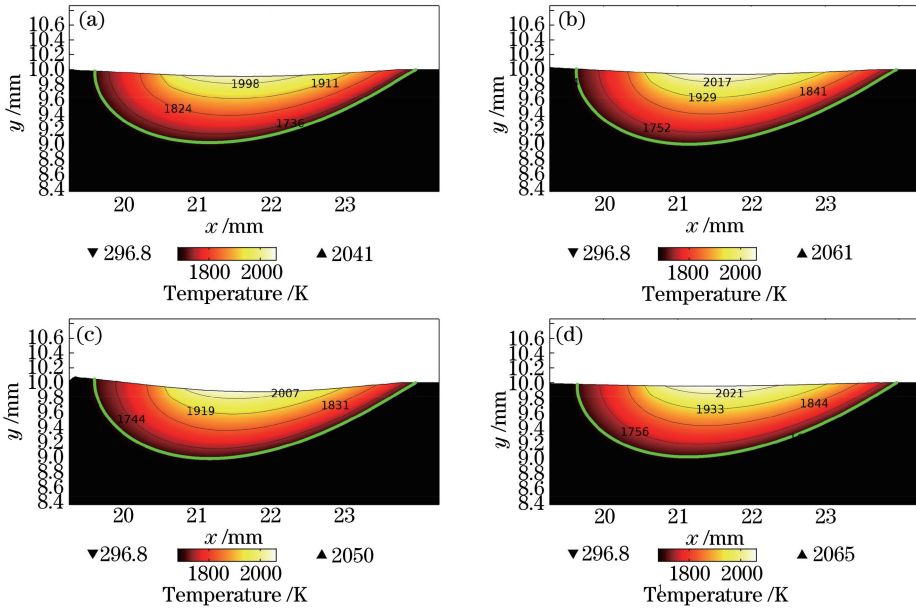


图 6 电磁复合场作用下的熔池温度场分布 ($t=3.9\text{ s}$)。(a) $B=0\text{ T}$; (b) $B=0.9\text{ T}$; (c) $B=0.9\text{ T}$, 洛伦兹力向上; (d) $B=0.9\text{ T}$, 洛伦兹力向下

Fig. 6 Temperature field distribution in molten pool under action of electromagnetic compound field ($t=3.9\text{ s}$).

(a) $B=0\text{ T}$; (b) $B=0.9\text{ T}$; (c) $B=0.9\text{ T}$, upward Lorentz force; (d) $B=0.9\text{ T}$, downward Lorentz force

4.3 电磁复合场对熔注层颗粒分布的影响

在熔池温度场和流场计算的基础上,进一步耦合颗粒运动方程,获得了熔注层中增强颗粒的精确固化位置的计算结果,如图 7 所示。可以看出,当未附加电磁复合场时($B=0\text{ T}$),在当前熔注工艺下,增强颗粒在熔注层中的分布较为均匀,如图 7(a)所示。当附加电磁复合场且定向洛伦兹力的方向向上时,大部分增强颗粒集中在熔注层的下层,如图 7(b)所示,这是因为此时颗粒所受等效浮力减

小,下沉速度加快。当附加定向洛伦兹力的方向向下时,大部分增强颗粒集中于熔注层的上层,如图 7(c)所示,这是因为此时熔池流体处于“超重”状态,颗粒所受等效浮力增大,颗粒难以下沉。虽然增强颗粒的实际运动轨迹还受到流体拖曳力、注入时间和注入位置的影响,但图 7 的结果显示,电磁复合场的方向可显著影响增强颗粒的分布梯度,甚至使分布梯度发生反转,故电磁复合场引入的定向洛伦兹力可引起增强颗粒分布梯度的变化。

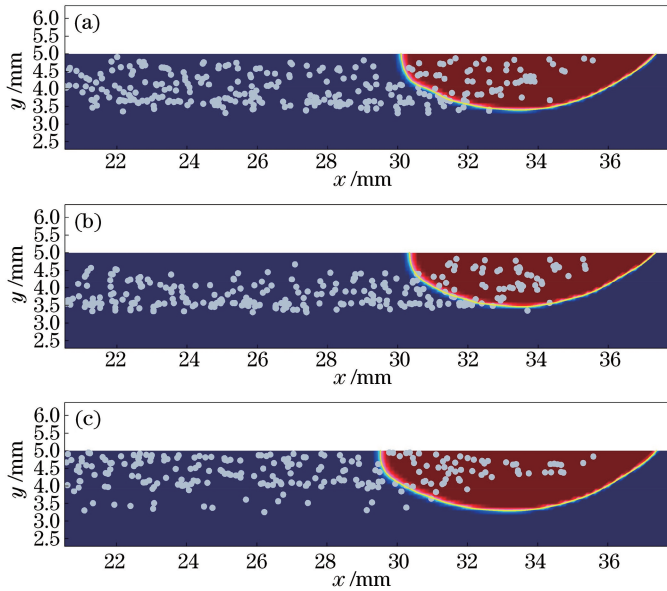


图 7 电磁复合场作用下熔注层的颗粒分布。(a) $B=0$ T; (b) $B=0.9$ T, 洛伦兹力向上; (c) $B=0.9$ T, 洛伦兹力向下

Fig. 7 Particle distribution in melt injection layer under action of electromagnetic compound field.

(a) $B=0$ T; (b) $B=0.9$ T, upward Lorentz force; (c) $B=0.9$ T, downward Lorentz force

5 分析与讨论

5.1 电磁复合场作用下颗粒分布的实验结果

在仿真计算的基础上,采用与仿真模型中一致的激光熔注工艺参数,进行了验证实验。图 8 所示为不同方向的定向洛伦兹力作用下熔注层纵截面上 WC 颗粒的分布状态,其中白色圆点为 WC 颗粒,亮灰色部分为熔凝区域,黑色部分为基体。将每一类参数下熔注层的纵截面平均分为上下两个区域,统

计各区中 WC 颗粒的含量,归一化后的数据如图 8 右侧区域所示。由图 8(a)、(b)可知,当定向洛伦兹力与重力反向时,熔注层下层的颗粒含量要高于其上层的。当洛伦兹力与重力同向时,颗粒的分布趋势出现了明显反转,熔注层上层的颗粒数占到所有颗粒数的 80% 以上。当未附加磁场和电场时,熔注层上层和下层的颗粒含量接近,数量占比在 50% 左右,如图 8(c)所示。虽然所加定向洛伦兹力的方向不同,但在三种条件下熔注层的深度基本一致,这表

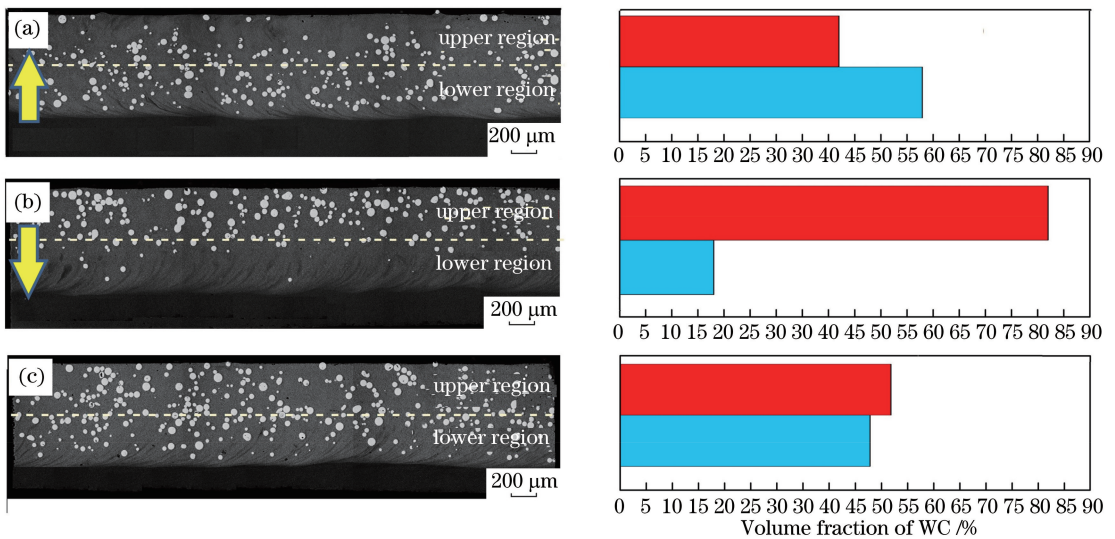


图 8 电磁复合场作用下熔注层纵截面上颗粒分布的实验结果。(a) 洛伦兹力向上; (b) 洛伦兹力向下; (c) 无洛伦兹力

Fig. 8 Experimental results of particle distributions in longitudinal section of melt injection layer under action of electromagnetic compound field. (a) With upward Lorentz force; (b) with downward Lorentz force; (c) without Lorentz force

明定向洛伦兹力的加入对熔池温度场分布的影响不明显。该实验结果与仿真结果吻合,证明仿真模型中对熔池内部传热传质与颗粒运动及固化过程的计算是可靠的。

进一步分析了不同电磁复合场参数下增强颗粒的分解情况及其周围组织的形态变化,结果如图9所示。可以看出,WC颗粒均保持了原始的球形,仅

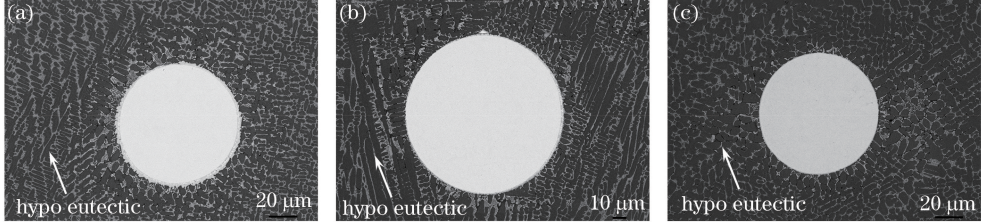


图9 电磁复合场作用下的WC颗粒形貌。(a)未附加电磁复合场;(b)洛伦兹力向下;(c)洛伦兹力向上

Fig. 9 WC particle morphologies under action of electromagnetic compound field. (a) Without Lorentz force; (b) with downward Lorentz force; (c) with upward Lorentz force

5.2 电磁复合场作用机理分析

仿真和实验结果证明,电磁复合场的施加可显著调整熔注层内增强颗粒的分布梯度。虽然增强颗粒在熔池中的运动和固化过程较为复杂,但仍可用简化的受力分析图加以阐释。图10所示为增强颗粒和熔池流体在竖直方向的受力分析,其中 L_f 为虚线圈内流体所受到的定向洛伦兹力体积力, G_f 为虚线圈内流体所受到的重力。假设虚线圈的大小与颗粒大小相同,则有

$$F_p = -L_f, \quad (11)$$

式中 F_p 为颗粒所受到的由定向洛伦兹力导致的周围流体的反作用力,该作用力的大小与相同体积流体所受定向洛伦兹力的大小相同,方向相反。

由图10中的受力解析可得到

$$-F_{iy} = F_B - F_p + F_{dy} - G_p, \quad (12)$$

式中 F_{iy} 、 F_B 、 F_{dy} 、 G_p 分别代表颗粒所受的惯性力、浮力、y方向的拖曳力和重力。 F_B 、 F_{dy} 和 G_p 为与洛伦兹力无关的恒量,故 F_{iy} 与 F_p 正相关。因此,当定向洛伦兹力方向向上时(图10中状态),作用在

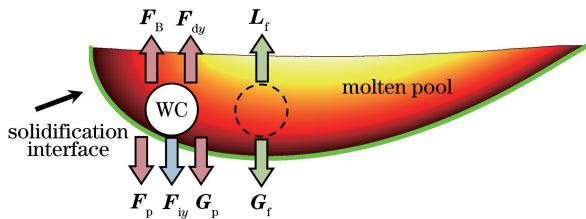


图10 电磁复合场作用下颗粒和流体的受力示意图

Fig. 10 Schematic of forces acting on particles and fluid under action of electromagnetic compound field

在颗粒边缘存在微量分解现象,且颗粒周围组织均呈亚共晶枝晶组织,该组织由316L基体熔凝形成。该现象进一步表明,虽然电磁复合场的参数不同,但熔注增强颗粒的分解程度一致。结合图8和图9的结果可以证实,在利用电磁复合场对熔注层内增强颗粒的分布梯度进行调控时,无需对激光工艺参数进行调整,可大幅节约实验时间,提高调控效率。

颗粒上的等效浮力减小,颗粒下沉速率增大。在连续熔注过程中,增强颗粒更容易进入熔池底部。同理,当施加与重力同向的定向洛伦兹力时,颗粒所受等效浮力增大,难以进入熔池底部而大部分集中在熔注层的上层区域。

6 结 论

对熔注过程进行了多物理场仿真,在相同参数下进行了激光熔注实验,得到以下结论。

- 1) 在电磁复合场的作用下,熔池流体同时受到感应洛伦兹力和定向洛伦兹力的作用。前者为一类方向与熔池流体运动方向时刻相反的阻尼力,导致熔池流速的整体下降;后者对熔池流速的影响甚微。
- 2) 结合仿真和实验结果可知,电磁复合场的施加对熔池的温度场分布无明显影响,即利用电磁复合场对增强颗粒的分布梯度进行调控时,无需调整激光工艺参数。
- 3) 由电磁复合场引入的定向洛伦兹力可显著改变甚至反转增强颗粒的分布梯度。当施加与重力同向的定向洛伦兹力时,大部分增强颗粒集中在熔注层上层区域;当施加与重力反向的定向洛伦兹力时,大部分增强颗粒集中在熔注层下层区域。

参 考 文 献

[1] Vreeling J A, Ocelik V, Pei Y T, *et al.* Laser melt injection in aluminum alloys: On the role of the oxide skin[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(17): 4225-4233.

[2] Li L, Liu D, Chen Y, *et al.* Electron microscopy study of reaction layers between single-crystal WC

- particle and Ti-6Al-4V after laser melt injection[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(12): 3606-3614.
- [3] Li F Q, Chen Y B, Li L Q. Microstructure and wear property of surface modification layer produced by laser melt injection WC on Q235 steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(4): 28-32.
李福泉, 陈彦宾, 李俐群. Q235 钢表面激光熔注 WC 涂层的微观组织及耐磨性[J]. *焊接学报*, 2010, 31(4): 28-32.
- [4] Song S Y, Wang L, Hu Y, *et al.* Graded coating produced by laser melt injection under steady magnetic field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0503005.
宋诗英, 王梁, 胡勇, 等. 稳态磁场辅助激光熔注制备梯度涂层[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503005.
- [5] Hu Y, Wang L, Li J H, *et al.* Effect of orientation Lorentz force on molten pool exhaust in laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802001.
胡勇, 王梁, 李珏辉, 等. 定向洛伦兹力增强激光熔覆熔池排气作用的研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802001.
- [6] Xu H, Zheng Q G, Ding Z H, *et al.* Study on laser cladding hard alloy with electromagnetic stirring[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 449-451, 469.
许华, 郑启光, 丁周华, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[J]. *激光技术*, 2005, 29(5): 449-451, 469.
- [7] Zhang X, Li R Y, Zhao Z Y, *et al.* Influence of external longitudinal magnetic field on weld joint morphology and microstructure in laser-metal inert gas hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802008.
张勋, 李若杨, 赵泽洋, 等. 外加纵向磁场对激光-MIG 复合焊接接头形貌及微观组织的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802008.
- [8] Gatzen M, Tang Z. CFD-based model for melt flow in laser beam welding of aluminium with coaxial magnetic field[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 317-326.
- [9] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(A): 56-65.
- [10] Yu Q, Wang C S. Numerical simulation and experimental analysis of electromagnetic stirring assisted laser additive manufacturing Ni45 alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0402003.
于群, 王存山. 电磁搅拌辅助激光增材制造 Ni45 合金数值模拟与实验分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0402003.
- [11] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 309-321.
- [12] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 578-591.
- [13] Wang L, Yao J H, Hu Y, *et al.* Suppression effect of a steady magnetic field on molten pool during laser remelting[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 794-802.
- [14] Crowe C T, Troutt T R, Chung J N. Numerical models for two-phase turbulent flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, 28(1): 11-43.
- [15] Yue X A. Solid-liquid two phase flow[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 72.
岳湘安. 液-固两相流基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 72.
- [16] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Numerical assessment and experimental verification of the influence of the Hartmann effect in laser beam welding processes by steady magnetic fields[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 101: 24-34.