DOI: 10.3901/JME.2021.01.240

稳态磁场对激光熔注球形 WC 颗粒分布的影响机理研究*

胡 勇^{1,2,3} 王 梁^{1,2,3} 娄复兴^{1,2,3} 夏洪超^{1,2,3} 张群莉^{1,2,3} 姚建华^{1,2,3}

(1. 浙江工业大学激光先进制造研究院 杭州 310014;

2. 浙江工业大学高端激光制造装备省部共建协同创新中心 杭州 310014;

3. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310014)

摘要: 利用稳态磁场对金属流体的粘滞效应,在 316L 不锈钢基体上制备颗粒梯度分布的 WC/316L 复合涂层。为研究稳态磁场对激光熔注球形 WC 颗粒分布的影响机理,建立了考虑固液相变、流动以及洛伦兹力的熔注熔池多物理场模型,分析稳态磁场对流场,洛伦兹力分布以及等效黏度的影响。采用多颗粒动力学模型与熔池模型耦合计算,研究稳态磁场对熔池颗粒运动的影响。实验与仿真结果均证实,随着磁场强度从 0 T 增大至 1.2 T, WC 颗粒集中分布在复合涂层表层的趋势增大。分析结果表明:稳态磁场可有效增加熔池流体的等效黏度,使得颗粒在熔池中对流体的跟随性增强;同时,外加稳态磁场可以明显抑制熔池 Marangoni 对流,进一步降低了颗粒的运动能力,使得颗粒难以运动至熔池内部,大部分增强颗粒集中于熔池上表层。

关键词: 激光熔注; 稳态磁场; 熔池; 复合涂层; 多物理场

中图分类号: TG156

Mechanism Study of Steady Magnetic Field Effect on Spherical WC Particle Distribution during Laser Melt Injection

HU Yong^{1,2,3} WANG Liang^{1,2,3} LOU Fuxing^{1,2,3} XIA Hongchao^{1,2,3}
ZHANG Qunli^{1,2,3} YAO Jianhua^{1,2,3}

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

2. Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

3. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: The viscous effect of steady magnetic field on metal fluid is used to prepare WC/ 316L composite coating with gradient distribution of particles on 316L stainless steel substrate. In order to study the mechanism of steady magnetic field effect on spherical WC particle distribution, laser melt injection (LMI) molten pool model was built with consider of solid-liquid phase change, Lorentz force and fluid flow. The influence of steady magnetic field on fluid flow field, Lorentz force distribution and equivalent viscosity is analyzed. Moreover, single particle dynamic model is used to study the effect of the steady magnetic field on the particle movement in the molten pool. Experimental and simulation results are confirmed that the tendency of WC particles concentrated on the surface of composite coating increases with the increase of the magnetic flux density from 0 T to 1.2 T. The results show that steady magnetic field can effectively increase the equivalent viscosity of molten pool fluid, which can enhance the particle fluid follow ability. Meanwhile, the Marangoni convection is suppressed by the steady magnetic field and the movement velocity of particle is further reduced. Therefore, the particles are difficult to move to the inside of molten pool and most of them are concentrated on the surface of the molten pool.

Key words: laser melt injection; steady magnetic field; molten pool; composite coating; multi-physical field

* 国家重点研发计划(2017YFB1103600)、国家自然科学基金(51705464, 51804274)和浙江省属高校基本科研业务费(RF-C2019003)资助项目。
20200129 收到初稿, 20200618 收到修改稿

0 前言

激光熔注技术是通过高能密度激光将基体熔化形成熔池, 同时颗粒以一定的速度穿透熔池表面保留于涂层中, 得到金属基复合涂层。所制备的金属基复合涂层不仅具有激光熔覆涂层组织致密、冶金结合的特点, 还保留了颗粒本身的特性, 起到提高涂层耐磨、耐蚀等性能。因此, 该工艺越来越受到国内外学者的关注^[1-3]。

近年来, 国内外学者已成功制备了 Fe 基、Ti 基等硬质颗粒强化复合涂层^[4-5]。随着激光设备以及熔注技术的发展, 熔注涂层也从原先的颗粒均匀分布向颗粒梯度分布发展。2000 年, VREELING 等^[6]在铝合金熔注 SiC 颗粒过程中进行辅助加热, 发现预热可破坏表面氧化膜, 减少 SiC 颗粒在熔池界面的阻力, 实现颗粒注入深度的控制, 但该方法也导致熔注层熔池深度显著增加。2014 年, VOLPP 等^[7]采用不同物理属性的颗粒制备梯度复合涂层, 发现颗粒属性中密度及润湿性对熔注层颗粒分布影响最大, 但文献方法无法实现对同一属性颗粒梯度分布的调控, 也未对颗粒运动过程进行详细分析。

受限于熔注工艺窗口, 要想获得颗粒的梯度分布往往较为困难, 因此提出采用磁场辅助的方法对熔注层颗粒进行梯度调控。磁场辅助因其非接触, 容易获取等一系列优点, 已广泛应用于铸造、焊接及激光熔覆等研究, 其作用效果也已通过理论及实验验证^[8-12]。其中德国 BAM 实验室^[8]通过对稳态磁场辅助激光焊接铝合金研究, 发现稳态磁场对流动具有明显抑制作用。德国 BIAS 的 GATZEN 等^[9]利用低频交变磁场控制铝合金激光送丝焊中熔池流体的运动, 获得溶质元素均匀分布的焊接层。国内王维等^[10]将旋转磁场作用于熔池, 在熔池中产生的电磁力使液态金属随旋转磁场进行旋转运动, 促进熔池搅拌作用。林鑫等^[11]采用稳态磁场辅助激光立体成型, 通过稳态磁场与树枝晶内部热电流耦合作用, 实现对 Al-12%Si 合金凝固组织的细化。周祥曼等^[12]采用纵向稳态磁场辅助脉冲电弧熔积, 发现能够细化晶粒, 提高搭接区域晶粒均匀性并减少了冶金缺陷。本团队在电磁复合激光制造方面也进行了系统的研究, 包括利用稳态磁场磁阻尼效应抑制熔凝表面波纹^[13], 定向洛伦兹力对熔覆气孔缺陷的排除作

用机理研究^[14]及电-磁复合场对熔注过程中 WC 颗粒组织及分布调控机理研究^[15-16]等。

综上所述, 当前针对电磁场辅助研究大多集中于熔池强烈对流的控制、溶质元素的分布状态调控、涂层内部缺陷以及颗粒梯度涂层组织研究, 鲜有对稳态磁场条件下熔池内部颗粒运动过程进行分析。因此, 通过建立磁场辅助激光熔注有限元模型, 研究磁场对熔池流场以及颗粒运动的影响机理, 为磁场调控熔注颗粒梯度分布的应用提供理论依据。

1 试验方法

为排除强磁场对熔注过程的干扰, 试验基材与熔注粉末均为非铁磁性材料。基材选用 316L 奥氏体不锈钢, 其热物理属性如表 1 及图 3 所示^[14-15, 17], 基体尺寸为 200 mm×20 mm×10 mm, 试验前经砂纸打磨, 丙酮清除油污。注入粉末为球形铸造 WC 陶瓷颗粒, 粒径为 60~100 μm , 平均尺寸为 80 μm , 如图 1 所示。并将粉末放在 120 $^{\circ}\text{C}$ 的保温箱干燥 2 小时后使用。采用最大场强为 2 T 的电磁铁为熔池区域提供稳态磁场 (如图 2 所示)。激光熔注工艺参数: 激光功率密度 $1.35\times 10^8 \text{ W/m}^2$, 扫描速度 4.25 mm/s, 送粉率 10 g/min, 颗粒注入熔池速度约为 0.4 m/s, 保护气为氩气。将经过熔注后的试样沿扫描方向切开, 经打磨抛光后, 利用扫描电镜的背散射模式观察熔注层纵截面中的颗粒分布。

图 1 WC 颗粒形貌图

图 2 稳态磁场辅助激光熔注示意图

2 数值仿真模型

2.1 控制方程

电磁场辅助激光熔注过程涉及材料的固液相变、温度场的传递、金属熔池 Marangoni 流动及颗粒运动等,故采用 Comsol5.3[®] 多物理场耦合软件进行仿真研究。通过建立 2D 瞬态有限元模型,首先进行固体及流体传热分析,并采用焓-孔隙度法处理固液相变^[13]。在金属熔化区,施加表面张力、热浮力以及磁场所产生的洛伦兹力,分析磁场作用下熔池内部的流动变化规律。在此基础上,通过耦合颗粒所受的流体拖曳力,进一步研究在磁场条件下颗粒的运动行为。在激光辐照作用下,熔池流体的质量、动量及能量守恒方程、热浮力方程、固液相变方程等控制方程和边界条件,已在课题组前期的研究中进行了详细的阐述^[15],不再重复展开。磁场辅助熔注过程中,熔池内部将形成微小的闭合回路,且在熔池运动过程中不断变化,导致其内部的磁通量也随之发生变化,从而形成感应电流^[8]。感应电流与稳态磁场作用形成感应洛伦兹力,在仿真计算中动量方程洛伦兹力体积力源项 F_L 具体表达式如下所示

$$F_L = jB = \sigma(uB)B = \sigma \begin{pmatrix} -u_x B_z^2 \\ -u_y B_z^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, j 为总电流密度矢量, B 为磁感应强度, σ 为电导率, u 为流速, $\sigma \cdot (u \times B)$ 为感应电流项。文中 WC 为球形颗粒,在穿透熔池液面后, WC 颗粒在熔池内部受力复杂,忽略流动不稳定造成的 Basset 力, Saffman 升力等较小力,考虑颗粒受到重力、流体拖曳力以及浮力^[18-19],其运动控制方程如式(2)所示

$$\frac{d(m_p v_p)}{dt} = F_D + F_g + F_{\text{Buoyancy}} \quad (2)$$

式中, m_p 为颗粒质量, v_p 为颗粒运动速度, F_D 为流体拖曳力, F_g 为颗粒重力, F_{Buoyancy} 为浮力。其中 F_D 表达式如下所示

$$F_D = m_p \left(\frac{1}{\tau_p} \right) (u - v_p) \quad (3)$$

$$\tau_p = \left(\frac{4\rho_p d_p^2}{3\eta_{\text{eff}} C_D Re} \right) \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u - v_p|}{\eta_{\text{eq}}} \quad (5)$$

代入参数计算得到雷诺数数量级远小于 1,故采用 Stokes 阻力系数^[19],如式(6)所示。

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

式中, ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒直径, u 为流体速度, C_D 为阻力系数, Re 为雷诺数, η_{eff} 为流体等效黏度, ρ 为流体密度。

表 1 仿真计算用材料物性参数 (T=1 700 K)

名称	数值
熔点/K	1 700
密度/(kg·m ⁻³)	7 350
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	746
潜热/(J·kg ⁻¹)	30
热传导系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	30
黏度/(Pa·s)	0.006
表面张力系数/(N·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	-0.52×10 ⁻⁴

图 3 熔体物性参数随温度变化图

2.2 试验验证

图 4 为不同磁场强度条件下,熔注层中增强颗粒分布的仿真结果和试验结果对比 ($t = 3.9$ s),其中图 4a 为试验结果,图 4b 为仿真结果。试验所采用的工艺参数与仿真模型中的设定工艺参数相同。当磁场强度为 0 T 时,无论是试验结果还是仿真结果,熔注层内的颗粒分布均较为均匀。由此说明在无稳态磁场条件下,仿真模型对颗粒在液态熔池中的运动追踪,熔池凝固边界对颗粒的捕获固化以及颗粒利用率水平等关键过程均可有效地还原。当磁场强度增加到 0.4 T 时,颗粒有向熔注层上部聚集的趋势。当磁场强度增加到 0.8 T 时,该种趋势更加明显,熔注层上部的颗粒数量越来越多,而熔注层下部的颗粒逐渐减少。当进一步增大磁场强度至 1.2 T 时,无论是试验结果还是仿真结果,均显示绝大部分颗粒都集中在了熔注层上部,熔注层下部仅有少量颗粒存在。该现象表明随着磁场强度的增加,增强颗粒具有向熔注层上部集中的趋势。上述试验和仿真结果表明,在稳态磁场辅助条件下,试验结果与仿真结果也具有较好的一致性,表明仿真模型对熔池

内部感应洛伦兹力的分布及颗粒分布的计算也是可靠的。

图 4 仿真与试验对比图

3 结果与讨论

3.1 速度场及洛伦兹力分布特征

图 5 显示了在不同磁场强度条件下, 熔注熔池纵截面的流速分布($t=3.9$ s), 激光扫描方向从左至右。图中红色箭头方向为对流方向, 绿色曲线表示熔池的固液界面。由图 5a 可知, 熔池表层后方 Marangoni 流区为高流速区域, 流动方向由熔池中心指向熔池凝固边界。当稳态磁场从 0 T 增强至 1.2 T, 熔池整体流速得到明显的抑制。其中后方 Marangoni 区最高流速从未加磁场的约 0.06 m/s 降低到约 0.01 m/s, 该区域也是流体抑制最明显的区域, 该现象与文献[8]一致, 也说明仿真结果的可靠性。

图 6 为磁场强度 1.2 T 时熔池纵截面洛伦兹力计算结果。图 6a 给出了洛伦兹力分布图, 由感应洛伦兹力表达式(式(1))可知, 洛伦兹力值与速度成正比, 从图中也可发现表层洛伦兹力要大于熔池内部的洛伦兹力, 量级约为 10^4 N/m³, 与重力体积力

的量级为同一量级。在熔池前部及后部区域存在洛伦兹力较大区域, 该区域也是流体的高速区。图 6b 为洛伦兹力矢量方向与速度方向矢量图, 从图中可以发现洛伦兹力方向始终与流体运动方向相反, 说明感应洛伦兹力在熔池内是起阻尼作用的, 这也解释了外加磁场使熔池流速减慢的原因。

图 5 不同磁场条件下熔池流场分布图

图 6 洛伦兹力与流速分布结果

3.2 熔池黏度分布特征

由颗粒在熔池中所受的拖曳力公式可知, 颗粒在熔池中的运动能力与熔池黏度具有非常重要的联系。由上述仿真结果可知, 感应洛伦兹力在熔池中是起阻尼作用, 等效于流体内部的剪切摩擦力, 宏观反映为流体黏度增加。在磁场条件下, 熔池的黏度等效于自身黏度与磁场产生黏度的总和^[20], 如式(7)所示, 其中式(8)为磁场产生的黏度,

$$h_{\text{eff}} = h_f + h_{\text{Magnetic}} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{Magnetic}} = s B^2 L^2 \quad (8)$$

式中, η_{eff} 为熔池等效黏度, η_f 为流体黏度, η_{magnetic} 为磁场产生的黏度, L 为熔池直径。图 7 为磁场条件下的熔池内部总黏度分布, 从图 7 中可以发现当施加稳态磁场 1.2 T 后, 熔池表面总黏度约为未施加磁场黏度($0.006 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)的 5 000 倍, 同时在凝固前沿附近黏度达到未施加磁场度的 15 000 倍左右。

图 7 稳态磁场作用下熔池黏度分布图

3.3 无磁场条件下颗粒运动分析

为了研究颗粒在熔池中的运动过程, 本文定义熔池的前部($X=14.5 \text{ mm}$)、中部($X=15.5 \text{ mm}$)以及后部($X=16.5 \text{ mm}$)作为单颗粒注入的起始位置, 如图 8 所示。

图 8 颗粒注入过程图

从仿真计算结果可知, 颗粒在金属熔体拖曳力作用下跟随流体运动, 最后被凝固界面捕获, 保留在熔池内部。初始时刻竖直方向速度较大, 穿透熔池界面后首先为竖直运动。由于流体向上阻力的作用, 逐渐在竖直方向减速, 又由于熔池表面为高流速区, 在拖曳力及重力等作用下, 颗粒沿着流体方向运向熔池内部运动, 当靠近凝固界面时, 流体流速降低拖曳力减少。因此, 颗粒重新竖直下降, 直至被界面捕获。

3.4 静磁场条件下颗粒竖直运动分析

由第 3.3 节可知颗粒在注入熔池过程中, 初始时刻为竖直运动过程, 为了探究稳态磁场对此过程的影响, 对颗粒运动方程式(5)进行数值求解。由图 7 可知, 电磁黏度在熔池表层约为未施加外场的 5 000 倍, 因此定义运动方程黏度范围 1-1 000 倍。由于熔池表层主要为 Marangoni 流造成的水平运动, 因此在竖直方向上流体速度定义为 0 m/s , 颗粒初始注入速度为 0.4 m/s 。不同磁场黏度条件下, 注入深度计算结果如图 9 所示, 随着黏度增加, 颗粒达到稳定状态的深度及时间逐渐减少。此外, 当等效黏度超过未施加磁场的 100 倍时, 熔池注入深度未发生变化, 这主要是由于流体的黏滞阻力增加, 以至于颗粒难以运动。上述结果表明磁场对颗粒在初始时刻注入深度起到降低作用。

图 9 不同黏度条件下注入深度

3.5 静磁场条件下颗粒运动分析

为了进一步研究在颗粒竖直运动后, 磁场对颗粒在熔池内部运动的影响, 将不同稳态磁场作用下不同注入位置颗粒(熔池的前部, 中部及后部)的运动进行分析, 如图 10 所示。图 10a 为前部颗粒在磁场强度 0 T 条件下的轨迹图, 从图中可以发现颗粒在熔池内部运动是先竖直下降, 该阶段主要为流体的减速阶段, 又因为后部颗粒位于 Marangoni 流后部高速区, 颗粒在熔池流体的拖曳力作用下跟随流体

运动,直到被熔池凝固前沿所捕获。图 10b 为中部颗粒在在磁场强度 0 T 条件下的轨迹图,与前部颗粒相同的是先经历竖直方向的减速。由于中部位置熔池向上速度相对较低,因此未出现颗粒运动的反转,而是在流体的扰动下持续向下运动直到接触凝固前沿。图 10c 为后部颗粒在磁场强度 0 T 条件下轨迹图,颗粒经过竖直下降,而后在流体与重力共同作用下,向下运动。图 10d 为磁场强度 1.2 T 时颗粒运动轨迹图,相比于未施加磁场,颗粒起始阶段的竖直运动距离明显减少,同时颗粒在熔池中跟随流体呈环状运动直至被凝固前沿捕获。图 10e 注入深度较未施加磁场降低,随后运动出现反转,颗粒在 Marangoni 流作用下沿表层向后运动。图 10f 为后部颗粒运动轨迹图,颗粒在表层呈环状往复运动。对比施加磁场(图 10d、图 10e 与图 10f)与未施加磁场(图 10a、图 10b 与图 10c)的运动轨迹图,颗粒在竖直方向的注入深度减少,而且施加磁场后,颗粒向下的运动能力减弱。

图 10 不同磁场条件下不同位置颗粒运动轨迹图

3.6 静磁场颗粒界面捕获行为分析

颗粒在经历熔池内部运动后,在流体拖曳力、重力及浮力共同作用下靠近熔池凝固界面^[21],并在凝固前沿界面附近受到界面力的作用将产生排斥或者捕获的现象^[18]。由重力、界面力以及浮力得到平衡速度(如式(9)所示),当凝固速度超过该临界速度时,颗粒将被界面所捕获,反之将被排斥^[24]。

$$V_c = \frac{d}{3\eta\alpha} \left(\frac{\Delta\sigma_0}{R} \left(\frac{a_0}{a_0 + d} \right)^n + \frac{2R\Delta\rho g}{3\alpha} \right) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{K_p}{K_M} \quad (10)$$

式中, d 为界面与颗粒距离, η 为动力黏度, α 为热传导比, R 为颗粒半径, $\Delta\sigma$ 为界面能差, a_0 为原子间距, $\Delta\rho$ 为密度差。式中各变量计算值: $\Delta\rho = -7850 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ N/kg}$, $K_M \approx 75 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $K_p \approx 29.3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\eta \approx 0.006 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\alpha = 0.3907$, $a_0 = r_{\text{Fe}} + r_w \approx 2.825 \times 10^{-10} \text{ m}$, $\Delta\sigma_0 \approx 1$ 。由于熔池形状为弧形,所以 n 取 2, $d = a_0^{[22]}$, 因激光工艺要求,硬质相颗粒直径为 $50\text{--}150 \mu\text{m}$, 同时文中所用颗粒也在该粒径范围内,忽略较小项 $2R\Delta\rho g/3\alpha^{[22]}$, 得到临界捕获/排斥速度表达式

$$V_c = \frac{1.004 \times 10^{-8}}{R} \quad (11)$$

根据扫描速度为 4.25 mm/s , 可得到熔池凝固速度约为 $4.25 \text{ mm/s}^{[23]}$, 大于临界排斥速度。因此, 可得文中颗粒在凝固前沿被捕获固化。同时, 未施加外场试验结果也显示颗粒相在熔注层中分布均匀, 未出现聚集现象, 说明分析的正确性。图 11 为不同等效磁场黏度条件下临界速度曲线图, 随着熔池等效黏度增加, 颗粒被熔池界面捕获的临界速度逐渐减少。当黏度增加至未施加磁场 100 倍时, 临界凝固速度约为 0 mm/s , 这也说明了凝固界面在高黏度条件下, 具有极强的捕获颗粒能力。

图 11 不同磁场等效黏度下临界速度曲线

3.7 稳态磁场作用机理分析

仿真结果与试验结果均表明, 稳态磁场的施加可获得梯度分布的熔注涂层。虽然颗粒在熔池内部运动过程十分复杂, 但仍可简化为穿透熔池表面竖直下降, 在熔池内部跟随流体运动及被凝固界面捕

获三个过程,如图 12a 所示。图 12b 为颗粒受力分析,可得到颗粒所受的合力 ΣF ,如式(12)所示,

$$\Sigma F = F_D + F_g + F_{\text{Buoyancy}} \quad (12)$$

式中, F_D 为流体拖曳力, F_g 为重力, F_{Buoyancy} 为浮力。表 2 为各力在不同磁场条件下的量级。在稳态磁场条件下,流体拖曳力的量级是未施加磁场的 $10^3 \sim 10^4$ 倍。这主要是熔池流体内感应洛伦兹力的作用,使得熔池的等效黏度增加,进而 F_D 增加。颗粒在磁场条件下将会在更短的时间内跟流体的速度趋于一致。由于熔池表层流体流动方向与熔池界面保持平行,所以由于等效黏度的增加,导致颗粒在竖直注入阶段的深度不断减少,使得颗粒只能“浮于”熔池表层。另一方面,由于黏度增加,拖曳力也随之增大,从而使得颗粒更易跟随流体运动。但需指出的是,磁场的施加使得流体整体的流速降低,颗粒的运动范围将得到抑制,难以自由运动至熔池内部而大部分聚集在熔注层上部,直至靠近凝固界面,其附近高黏度流体更易捕获颗粒,将其保持涂层内部,所以获得向上聚集颗粒的复合涂层。

图 12 静磁场颗粒调控机理分析

表 2 无磁场及磁场条件各力的量级

条件	名称		
	流体拖曳力/N	重力/N	浮力/N
无磁场	$10^{-5}\Delta u$	10^{-7}	$1/2F_g$
磁场=1.2 T	$(10^{-2} \sim 10^{-1})\Delta u$	10^{-7}	$1/2F_g$

4 结论

(1) 稳态磁场内部感应产生时刻与流体运动相反的洛伦兹力,可有效抑制熔注熔池的流动并且随着磁场强度增加到 1.2 T 时,最高流速从 0.06 m/s 下降至 0.01 m/s,熔池表层等效黏度增加约为未施加磁场条件的 5 000 倍。

(2) 仿真及试验结果表明稳态磁场可有效调控颗粒分布,随着磁场强度从 0 T 增加到 1.2 T,颗粒向熔注层上部区域集中趋势越明显。

(3) 仿真结果及理论分析可知磁场引起的感应洛伦兹力增加了熔池“等效黏度”,使得颗粒跟随熔池能力增强,但因熔池流体被抑制,降低了颗粒的运动能力,难以运动至熔池内部,使得颗粒趋于表面。

参 考 文 献

- [1] 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.
LI Fuquan, CHEN Yanbin, LI Liqun. 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.
- [2] VEREZUB O, KÁ LAZI Z, BUZA G. In-situ synthesis of a carbide reinforced steel matrix nanocomposite by laser melt injection technology and subsequent heat treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 20(3): 49-57.
- [3] LI L, LIU D, CHEN Y, WANG C. Electron microscopy study of reaction layers between single-crystal WC particle and Ti-6Al-4V after laser melt injection[J]. Acta Materialia, 2009, 57(36): 06-14.
- [4] VEREZUB O, KÁ LAZI Z, SYTCHEVA A, et al. Performance of a cutting tool made of steel matrix surface nano-composite produced by in situ laser melt injection technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 750-758.
- [5] LI L, WANG D Z, SONG W J, et al. Microstructures and mechanical properties of WCP/Ti-6Al-4V composite coatings by laser melt injection and laser-induction hybrid melt injection[J]. Surface and Coatings Technology,

- 2020, 385: 125371.
- [6] VREELING J A, OCELÍK V, PEI Y T. laser melt injection in aluminum alloys: On the role of the oxide skin[J]. *Acta Mater*, 2000, 48(42): 25-33.
- [7] VOLPP J, DIETZ T, VOLLERTSEN F. Particle Property impact on its distribution during laser deep alloying processes[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56(10): 94-101.
- [8] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A. 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, 6(3): 9-21.
- [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: 6-65.
- [10] 王维, 刘奇, 杨光, 等. 电磁搅拌作用下激光熔池电磁场、温度场和流场的数值模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(02): 48-55.
- WANG Wei, LIU Qi, YANG Guang, et al. Numerical simulation of electromagnetic flow, temperature field and flow field in laser molten pool with electromagnetic stirring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(02): 48-55.
- [11] 帅三三, 林鑫, 肖武泉, 等. 横向静磁场对激光熔注增材制造 Al-12%Si 合金凝固组织的影响[J]. *金属学报*, 2018, 54(6): 918-926.
- SHUAI Sansan, LIN Xin, XIAO Wuquan, et al. Effect of transverse static magnetic field on microstructure of Al-12%Si alloys fabricated by powder-blow additive manufacturing[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(6): 918-926.
- [12] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 纵向稳态磁场对电弧增材成形零件表面质量和性能影响的研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(2): 84-92.
- ZHOU Yiangman, TIAN Qihua, DU Yixian, et al. Study of the influence of longitudinal static magnetic field on surface quality and performances of arc welding based additive forming parts[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2): 84-92.
- [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] HU Y, WANG L, YAO J H, et al. Effects of electromagnetic compound field on the escape behavior of pores in molten pool during laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 383: 125198.
- [15] WANG L, YAO J H, HU Y, et al. Influence of electric-magnetic compound field on the WC particles distribution in laser melt injection[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 315: 32-43.
- [16] 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): 69-76.
- SONG Shiyong, WANG Liang, HU Yong, et al. Graded coating produced by laser melt injection under steady magnetic field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 69-76.
- [17] YUAN W H, CHEN H, CHENG T, et al. Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser melting: Simulation and experiment[J]. *Materials & Design*, 2020, 189: 108542.
- [18] 钟云波. 电磁力场作用下液态金属中非金属颗粒迁移规律及应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2000.
- ZHONG Yunbo. Metalloid particles' migration in molten metals in an electromagnetic force field and its application [D]. Shanghai: Shanghai University, 2000.
- [19] 车德福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- CHE Defu, LI Huixiong. Multiphase flow and its application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [20] ZHANG N, LIU W W, DENG D W, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 108: 247-254.
- [21] PEI Y T, OCELIK V, HOSSON J T M D. SiCp/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 2035-2051.
- [22] KAPTAY G. Interfacial criterion of spontaneous and forced engulfment of reinforcing particles by an advancing solid/liquid interface[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32: 993-1005.
- [23] CHEN Y, LU F G, ZHANG K, et al. Investigation of

dendritic growth and liquation cracking in laser melting deposited Inconel 718 at different laser input angles[J]. Materials and Design, 2016, 105: 133-141.

- [24] SHANGGUAN D, AHUJA S, STEFANESCU D M. An analytical model for the interaction between an insoluble particle and an advancing solid/liquid interface[J]. Metallurgical and Materials Transactions

A, 1992, 23A: 669-680.

作者简介: 胡勇, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为激光加工数值模拟。

E-mail: zjuthuyong@foxmail.com

姚建华(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光加工技术。

E-mail: laser@zjut.edu.cn