

定向洛伦兹力对激光熔覆熔池排气的影响

胡勇^{1,2**}, 王梁^{1,2}, 李珏辉^{1,2}, 张群莉^{1,2}, 姚建华^{1,2*}, Volodymyr Kovalenko³

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;

³乌克兰国立科技大学激光技术研究所, 乌克兰 基辅 03056

摘要 采用稳态磁场和电场耦合形成定向洛伦兹力, 基于多物理场耦合原理及网格变形法建立了定向洛伦兹力作用下的熔池模型, 采用离散元法模拟了熔池内的气泡运动过程。与熔覆工艺条件相同但未施加外场时比较, 结果显示, 定向洛伦兹力具有优异的气孔调控能力。当洛伦兹力向上时, 熔池的最高流速被抑制了 62.5%, 气泡运动方向向下偏转, 熔覆层的气孔明显增多; 当洛伦兹力向下时, 熔池的最高流速被抑制了 25%, 但气泡因所受浮力增大而逸出加速, 熔覆层无气孔。仿真结果与实验结果吻合良好, 验证了仿真模型的可靠性。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 熔池; 气孔; 定向洛伦兹力; 多物理场

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0802001

Effect of Directional Lorentz Force on Molten Pool Exhaust in Laser Cladding

Hu Yong^{1,2**}, Wang Liang^{1,2}, Li Juehui^{1,2}, Zhang Qunli^{1,2},
Yao Jianhua^{1,2*}, Volodymyr Kovalenko³

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;

³Laser Technology Research Institute, National Technical University of Ukraine, Kiev 03056, Ukraine

Abstract The stationary magnetic and electric fields are coupled to form the directional Lorentz force. Based on the multi-physics field coupling theory and the mesh deformation method, the molten pool model under the effect of the directional Lorentz force is built, and the bubble movement process in molten pool is simulated by the discrete element method. The comparison of numerical results with and without directional Lorentz force but both under the same laser cladding process conditions indicates that the directional Lorentz force possesses an excellent ability to regulate pores. When the direction of the Lorentz force is upward, the maximum velocity of molten pool is suppressed by 62.5%, the gas bubble movement direction deflects downward, and the pores in cladding layers increase obviously. When the direction of the Lorentz force is downward, the maximum speed of molten pool is suppressed by 25%. Nevertheless, for the reason of the increase of the bubble buoyancy, the bubble is accelerated and escapes from the melting pool, and a dense cladding layer without any pores is obtained. The simulation results agree well with the experimental ones, which confirms the reliability of this simulation model.

Key words laser technique; laser cladding; molten pool; pores; directional Lorentz force; multi-physics field

OCIS codes 140.3900; 350.3390; 000.4430; 160.3380

1 引 言

激光熔覆作为一种表面改性和增材再制造的基

础工艺, 越来越多地被应用于工业生产中。日益发展的材料与激光装备技术以及日益恶劣的零件使用环境对熔覆涂层的质量提出了更高要求, 如对于汽

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-01-24; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103600)、国家自然科学基金面上项目(51475429)、高等学校学科创新引智计划(110000213920168001)、浙江省公益技术应用研究项目(2017C31048)

* E-mail: laser@zjut.edu.cn; ** E-mail: Zjuthuyong@126.com

轮机叶片这类承受交变载荷的工件,熔覆层内残留的气孔将严重影响其涂层的力学性能^[1-2]。为此,研究人员在熔覆过程中耦合稳态磁场和稳态电场,利用电-磁复合场所形成的定向洛伦兹力调节熔池内部气孔缺陷,以获得高质量的激光制造层。

电磁辅助激光加工是外能场辅助加工的一种应用,国内外众多研究人员对其组织、熔池流动以及缺陷调控等进行了研究^[3-5]。Schneider 等^[6]在铝合金上表面施加横向交变磁场,利用交变磁场产生的电涡流与磁场相互感应生成洛伦兹力,进而降低焊缝表面的气孔缺陷。Zhou 等^[7]采用流体体积函数(VOF)模型耦合电磁场的方法,对焊接匙孔的演变过程进行了模拟,发现电磁场对匙孔周围的流体具有加速作用,能加速匙孔的湮灭,降低焊接区域的孔隙率。赵剑锋等^[8]在脉冲电流辅助激光熔覆镍基高温合金的工艺研究中发现,脉冲电流可以降低熔覆层的孔隙率,主要原因是电磁力对熔池的压缩作用。王传琦等^[9-11]利用交变磁场辅助激光熔覆,加速了熔池的运动,降低了涂层的孔隙率。国内外学者对电磁场调控气泡的研究大多集中于交变磁场以及脉冲电流对气泡的调控,而对气泡在定向洛伦兹力作用下的运动状态研究鲜有报道。

本文基于多物理场耦合原理并结合网格变形技术,建立了定向洛伦兹力作用下激光熔覆的熔池模型,分析了气泡随熔池流体运动及熔池固化后形成

气孔的过程。模拟和实验结果均证实,定向洛伦兹力对熔覆层的气孔具有较强的调节作用,能有效降低熔覆层中的气孔数量。该方法不仅可应用于激光熔覆,还可拓展至焊接、熔凝和增材制造等过程中的气孔缺陷控制。

2 实验材料及方法

电磁辅助激光熔覆实验所用的激光器为 2 kW 光纤耦合半导体激光器,运动机构为瑞士 ABB 公司的 IRB2400/16 型 6 自由度机器人。通过在基体两侧施加稳态磁场(最大可调场强为 2 T),同时在基体两端施加恒定稳态直流电流(电流密度固定为 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$)以获得定向洛伦兹力,如图 1 所示。实验基材与熔覆粉末均为 Inconel 718(顺磁性),所用粉末为气雾化法制备的球形粉末,粒径范围为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,其表面附着少量的卫星球颗粒,如图 2(a)所示,同时粉末内部存在空心结构,如图 2(b)所示,其化学成分见表 1。试样尺寸为 $200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,实验前经砂纸打磨,用丙酮清除油污。将粉末置于 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度的保温箱干燥 2 h。激光能量密度为 $1.35 \times 10^8 \text{ W/m}^2$,扫描速度为 4.25 mm/s ,送粉量为 12 g/min ,保护气为氩气。将经过熔覆后的试样沿扫描方向切开,对其打磨抛光后在金相显微镜下观察纵截面的气孔分布。

表 1 Inconel 718 粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Inconel 718 powder (mass fraction, %)

Element	Fe	Cr	Ti	Al	Mo	Nb	C	Ni
Inconel 718 powder	18.4	19.7	1.04	0.64	3.0	5.17	0.33	Bal.

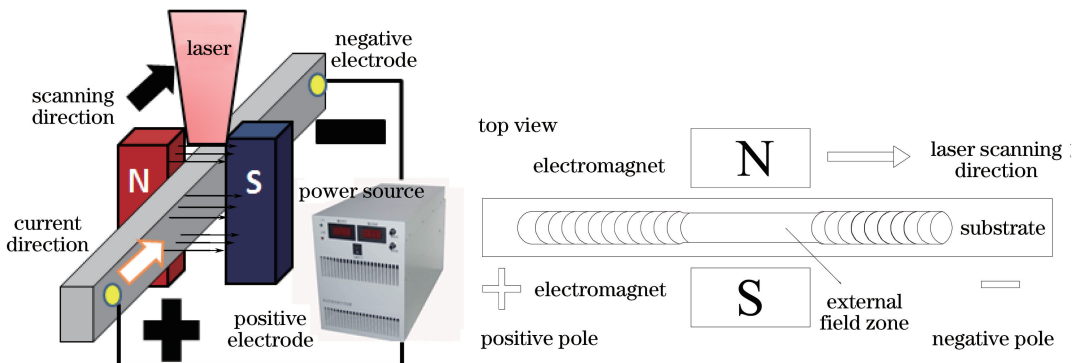


图 1 定向洛伦兹力辅助激光熔覆的示意图

Fig. 1 Schematic of laser cladding assisted by directional Lorentz force

3 模型的建立

3.1 电磁辅助熔覆熔池的基本假设和控制方程

电磁辅助激光熔覆过程中,基体发生熔化、增

材、流动、凝固等物理过程。在激光熔凝固液相变统一模型^[12]的基础上,边界处采用网格变形以模拟增材过程,同时在熔池中考虑电磁场的作用。采用二维(2D)瞬态有限元模型,求解域大小为

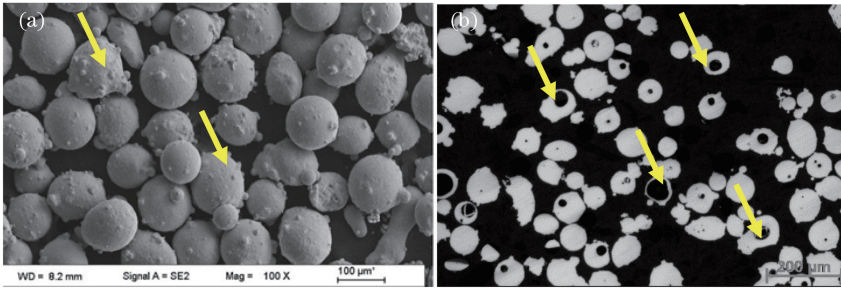


图 2 粉末形貌。(a)粉末微观结构;(b)内部空心结构

Fig. 2 Powder morphology. (a) Powder microstructure; (b) internal hollow structure

30 mm×5 mm,求解软件为 COMSOL 5.1[®]。为了提高计算效率,在合理的计算精度范围内,进行如下假设:

- 1) 熔池流体为不可压缩的牛顿流体,流动模型采用层流模型^[13];
- 2) 计算所选取的截面为基体的轴对称面,熔池厚度方向的传热可忽略,因此采用 2D 模型;
- 3) 熔池流体浮力采用 Boussinesq 假设^[14];
- 4) 由于保护气的密度远小于金属流体密度,因此不考虑环境气体对熔池表面的剪切应力。

计算模型所采用的控制方程如下。其中质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{u} 为流体速度。

动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \{-p\mathbf{I} + \eta[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T]\} + \mathbf{F}_{\text{Buoyancy}} + \mathbf{F}_{\text{Darcy}} + \mathbf{F}_{\text{Lorentz}}, \quad (2)$$

式中 ρ 为密度, p 为压力, \mathbf{I} 为单位矩阵, η 为动力粘度, ∇ 代表求转置, $\mathbf{F}_{\text{Buoyancy}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{Darcy}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{Lorentz}}$ 分别为热浮力源项、Darcy 源项、洛伦兹力源项。洛伦兹力源项由外部磁场、内部感应电流及外加电流共同作用产生,其表达式为

$$\mathbf{F}_{\text{Lorentz}} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) = \mathbf{j}_1 + \sigma \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (4)$$

式中 \mathbf{j} 为总电流密度矢量, \mathbf{j}_1 为外加电流密度矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度矢量, σ 为电导率, \mathbf{E} 为外加电场强度矢量。

能量守恒方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (5)$$

式中 C_p 为比热, T 为温度, t 为时间, k 为热传导系数。

3.2 熔池数学模型的建立

气泡运动计算过程中,单个离散气泡实时耦合熔池流体的速度,不考虑溶质元素的输运、气泡长大、气泡受到液体阻力产生的几何变形以及气泡间的相互融合。同时假设析出形状为球形,根据实验测量的 Inconel 718 空心粉的内部气孔直径以及实验气孔直径,并结合仿真结果的轨迹分析,以尺寸为 20~40 μm 的气泡为研究对象,研究洛伦兹力对熔池内气泡运动的影响。当气泡直径小于 1 mm 时,气泡如同固体球形颗粒一样在熔池中受到流体拖曳力、重力和压力梯度力等的作用^[15]。图 3 所示为气泡在熔池中的受力分析图,其中 OXY 为坐标系, θ 为气泡拖曳力与 X 轴正方向间的夹角。在熔池流体未受洛伦兹力的条件下,作用在气泡上的力有浮力、重力与周围流体对气泡的阻力(拖曳力),忽略流动不稳定引起的 Basset 力与气泡自身旋转产生的 Magnus 力等同浮力相比数量级很小的力^[15]。计算出气泡的相对雷诺数 $Re_g \ll 1$,符合低雷诺数 Stoke 定律,拖曳力公式^[16]为

$$\mathbf{F} = C_D \frac{\rho_1 u^2 \pi d_b^2}{2}, \quad (6)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_g}, \quad (7)$$

式中 ρ_1 为流体密度, u 为流体与气泡的相对速度, d_b 为气泡直径, C_D 为流体对气泡的拖曳力系数。

当熔池流体受到定向洛伦兹力体积力时,如图 3 蓝色箭头所示,根据流体与气泡的作用力与反作用力的关系,得到气泡的运动方程为

$$\frac{d(m_p \mathbf{V}_p)}{dt} = \mathbf{F}_{\text{BDrag}} + \mathbf{F}_{\text{BGgravity}} + \mathbf{F}_{\text{LBuoyancy}} - \mathbf{F}_{\text{LLorentz}} \cdot \mathbf{V}, \quad (8)$$

式中 m_p 为气泡质量, \mathbf{V}_p 为气泡的运动速度, $\mathbf{F}_{\text{BDrag}}$ 为流体拖曳力, $\mathbf{F}_{\text{BGgravity}}$ 为气泡重力, $\mathbf{F}_{\text{LBuoyancy}}$ 为浮力, $\mathbf{F}_{\text{LLorentz}}$ 为定向洛伦兹力体积力, \mathbf{V} 为气泡体积。

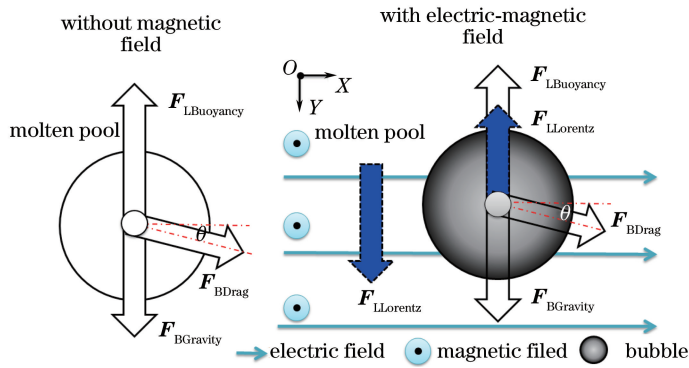


图 3 气泡受力分析示意图

Fig. 3 Schematic of bubble force analysis

3.3 边界条件

熔覆界面运动的计算采用网格变形方法,定义边界网格法向方向的变形速率等于材料的生长速率,熔覆层的表面控制方程^[17]可表示为

$$h_v = \beta \cdot v_p / \rho (\sqrt{2\pi} \delta) \exp \left[-\frac{(x - \mu)^2}{\delta^2} \right], \quad (9)$$

式中 h_v 为熔池界面的生长速率, v_p 为送粉率, μ 为喷嘴中心在 x 方向上的坐标, δ 为粉末落入熔池系数。模型中熔池传热边界与速度边界参考文献[5,18]。

3.4 网格以及求解设置

如图 4 所示,计算域采用四边形结构化网格,网格的最大尺寸为 0.4 mm,网格总数为 864,采用 PARDISO 直接求解器,时间步长采用向后差分

法(BDF)由软件自动调整,单道熔覆 30 mm 需要的总求解时间约为 6 h。仿真计算所用的金属物性参数与激光工艺参数^[19]见表 2。

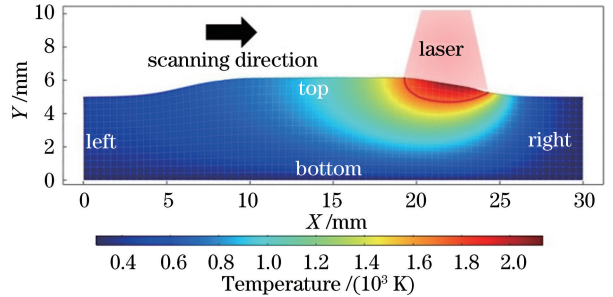


图 4 计算域网格的示意图

Fig. 4 Schematic of computation grids

表 2 仿真计算所用金属物性参数与激光工艺参数^[19]

Table 2 Physical parameters of metals and laser process parameters for simulation calculation^[19]

Property	Content
Melting temperature /K	1600
Mass density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7676
Conductivity of liquid /($\text{J} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$)	29.3
Specific heat of solid /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	625
Specific heat of liquid /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	725
Viscosity of liquid /($\text{kg} \cdot \text{ms}^{-1}$)	0.006
Temperature coefficient of surface tension /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	-0.11
Conductivity of solid /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$0.5603 + 0.0294T - 7.0 \times 10^{-6}T^2$
Laser scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.25
Laser power density /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.27×10^8

4 结果与讨论

4.1 熔池内部的洛伦兹力分布

洛伦兹力以体积力的形式作用于流体单元,对流体控制方程及气泡运动方程的求解至关重要。图 5(a)所示为输入电流密度为 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 磁场强度 B 为 0.6 T, 洛伦兹力方向向上(I号)条件下洛伦兹力的分布图;图 5(b)所示为输入电流密度为

$5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 磁场强度 B 为 0.6 T, 洛伦兹力方向向下(II号)条件下熔覆层洛伦兹力的分布图,其中白色实线为熔池轮廓线。如图 5(a)所示,熔池表层的洛伦兹力密度约为 $1.2 \times 10^5 \text{ N/m}^3$, 底部的洛伦兹力密度约为 $3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$, 从表层至底部逐渐降低。这是因为熔池流体所受的洛伦兹力由外加磁场与内部电流相互作用产生,高温流体集中于熔池表层,而熔体的电阻率约为常温固态时的 20 倍^[20-21],

造成表层的导电能力下降,使电流更易从熔池底部通过,故表层流体所受的洛伦兹力较小。如图 5(b) 所示,熔池表层的洛伦兹力密度约为 $1.1 \times 10^5 \text{ N/m}^3$,底部的电流密度约为 $3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 。尽管 I、II 号条件下洛伦兹力方向不同,但计算得到的

熔覆层熔池液体的洛伦兹力密度量级约为 10^5 N/m^3 ,而重力体积力为 $7.8 \times 10^4 \text{ N/m}^3$,故外加洛伦兹力体积力的影响不可忽略。该体积力使 I 号条件下的熔池流体处于“失重”状态,II 号条件下的熔池处于“超重”状态。

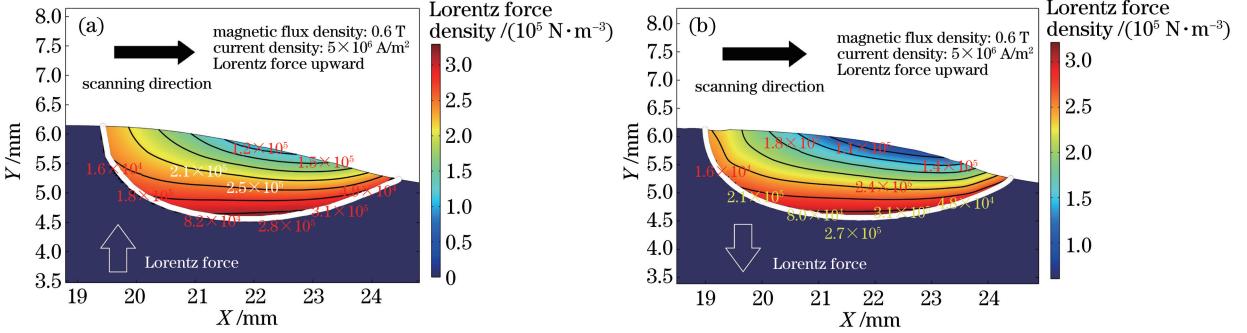


图 5 不同条件下熔池内部洛伦兹力的分布图。(a) 磁场强度 0.6 T, 电流密度 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 洛伦兹力向下;
(b) 磁场强度 0.6 T, 电流密度为 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 洛伦兹力向上

Fig. 5 Lorentz force distributions in molten pool under different conditions. (a) Magnetic field strength of 0.6 T, current density of $5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, upward Lorentz force; (b) magnetic field strength of 0.6 T, current density of $5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, downward Lorentz force

4.2 熔池流场的分布特征

根据上文分析结果可知,熔池流场的体积力状态发生变化时,气泡在熔池中将会受到流体拖曳力的作用,因此对熔池流场进行分析。图 6(a) 所示为无外场条件下,熔覆层纵截面速度场的分布图,其中箭头方向代表速度矢量方向,箭头长度代表速度大小,白色曲线代表熔池轮廓线。可以看出,熔池流体在表面张力梯度力的作用下,从中心沿熔覆层表面向左、右两个方向运动,在重力作用下沿固液界面运动至熔池底部,又由于受到热浮力作用向上运动,故形成左右环流,最高流速达 0.1 m/s,该流量值与文献[12, 21]中的一致,说明速度场模拟的可行性。

图 6(b) 所示为 I 号条件下熔池纵截面流场的分布,其中最高流速约为 0.03 m/s,较未施加外场的减小了 62.5%,主要原因是外加稳态磁场所产生的感应洛伦兹力提升了流体的粘滞效应,故熔池流场的速度减小^[18, 22]。图 6(c) 所示为 II 号条件下熔池纵截面流场的分布图,其中最高流速为 0.06 m/s,较未施加外场的减小了 25%,较施加向上洛伦兹力的增大 50%,这是因为熔池中外加电流产生的定向洛伦兹力与重力皆为体积力,当外加定向洛伦兹力向上时,熔池的自然对流能力变弱,不利于熔池表层流体沿凝固边界从表层输运至熔池底部。相反,当外加定向洛伦兹力向下时,内部自然对流能力增强,弥补

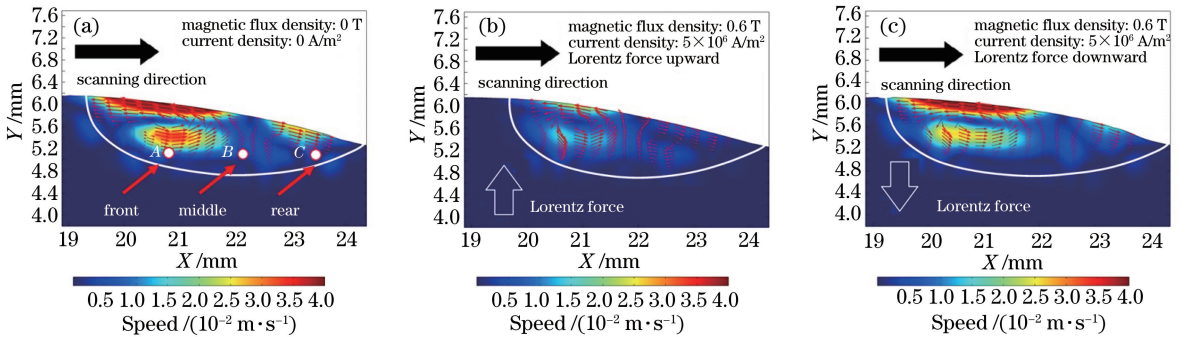


图 6 不同条件下熔覆熔池流场的分布图。(a) 磁场强度 0 T; (b) 磁场强度 0.6 T, 电流密度为 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 洛伦兹力向上; (c) 磁场强度 0.6 T, 电流密度为 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 洛伦兹力向下

Fig. 6 Flow field distributions in molten pool under different conditions. (a) Magnetic field strength of 0 T; (b) magnetic field strength of 0.6 T, current density of $5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, Lorentz force is upward; (c) magnetic field strength of 0.6 T, current density of $5 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, Lorentz force is downward

了因磁滞粘性阻力造成的速度降低。

4.3 无洛伦兹力条件下的气泡运动分析

在熔覆过程中,底部产生的气泡较表层的更难逸出,因此选取熔池底部的气泡作为研究对象,并分别定义底部区域的前部(A点)、中部(B点)及后部(C点)作为气泡起始点,如图6(a)所示。由于气泡在逸出过程中将不断长大,并存在气泡间的融合过程,因此有必要对无洛伦兹力条件下不同直径气泡的运动轨迹进行对比研究^[23-24]。图7所示为不同直径气泡的运动轨迹图,可以看出,气泡在熔池中并非沿直线上升,而是在流体拖曳力的作用下呈环状运动。图7(a)所示为A点的气泡轨迹图,当气泡直径为20 μm时,其在熔池内部呈往复螺旋运动,难以从熔池中排出。随着直径增大至30 μm和40 μm,气泡所受浮力增大,在流体拖曳力的共同作用下运动至熔覆表层的凝固界面,并被凝固界面捕获。图7(b)所示为B点的气泡轨迹图,当气泡直径为20 μm和30 μm时,其

在表层受到强烈的 Marangoni 对流作用,被“拖回”至熔池底部的凝固前沿,最终保留在熔覆层中。图7(c)所示为C点的气泡轨迹图,当直径为20 μm时,气泡在 Marangoni 对流作用下呈环状运动,最终停留在熔池底部。由于C点区域的流速相对较小,浮力的影响更大,故当直径超过30 μm时,气泡顺利从熔池中逸出(判断气泡逸出的标志位置为6~6.1 mm区间)。

图7(d)所示为气泡最后停留的位置图,可以看出,气泡直径越大,最后模拟所得到的Y坐标越靠上。分别统计各点最低与最高位置之差:A点的为0.13 mm,B点的为0.68 mm,C点的为0.95 mm,说明在20~40 μm的气泡直径范围内,A点气泡的停留位置对气泡直径的敏感程度最低,C点气泡对气泡直径的敏感程度最高,其主要原因是A点气泡位于熔池流体的高速区,流体拖曳力的作用占主导,而C点区域的流速相对较低,拖曳力作用的影响相对较小,故浮力的改变对C点气泡的影响更大。

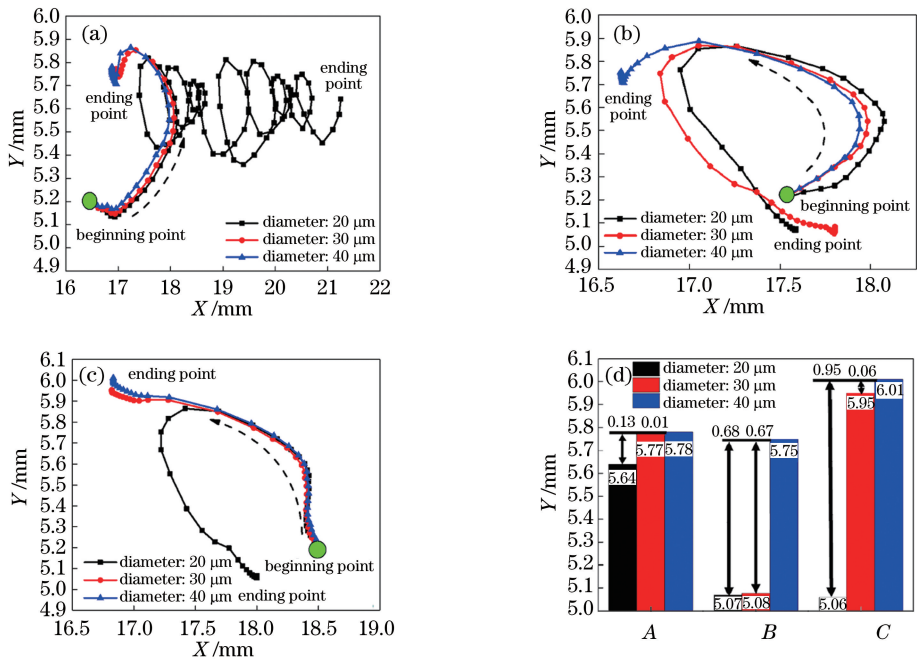


图7 不同直径气泡在不同位置条件下的轨迹图。(a)前部位置;(b)中部位置;(c)后部位置;(d)气泡停留位置的统计图

Fig. 7 Trajectory map of bubbles with different diameters at different positions.

(a) Front position; (b) middle position; (c) rear position; (d) statistical diagram of bubble park position

4.4 洛伦兹力对气泡轨迹的影响

根据无洛伦兹力条件下气泡轨迹的计算结果,选取直径为30 μm的气泡作为研究对象,对比不同的洛伦兹力对其运动的影响。图8(a)所示为A点气泡轨迹图,当洛伦兹力向下时,气泡向上运动的能力增强,随着磁场强度增大至0.6 T,气泡摆脱了表

层 Marangoni 对流的拖曳作用,从熔覆熔池中排出。其主要原因是稳态磁场的施加使流体表层的流速被抑制,降低了流体的拖曳作用。同时,向下的洛伦兹力增大了气泡“浮力”,使竖直方向向上的速度增大,有助于气泡从熔池中排出;施加向上的洛伦兹力时,气泡的运动方向发生改变,使其保留在熔覆层

中。图 8(b)所示为 B 点气泡轨迹图,当洛伦兹力向下时,随着磁场强度增大至 0.6 T, B 点气泡从熔池中逸出;当洛伦兹力向上时,特别是当磁场强度较小时,气泡在熔池中呈往复螺旋运动,其原因是向上洛伦兹力使气泡“浮力”降低,同时 B 点气泡位于熔池的环流区域,其受流体的拖曳力作用跟随流体运动,故不易被凝固前沿捕获。图 8(c)所示为 C 点气泡轨迹图,同样,向下的洛伦兹力增强了气泡的向上运

动能力,随着磁场强度增大,气泡的运动更偏向上方;洛伦兹力的方向向上时,气泡的运动方向随之改变。为了进一步说明洛伦兹力对气泡运动速度的调节作用,提取 A 点处气泡在磁场强度为 0.6 T 的条件下的竖直方向速度的分布图,如图 8(d)所示,可以看出,施加向下的洛伦兹力时,气泡在相同时刻点的速度值均较未施加洛伦兹力及施加向上洛伦兹力时的大,证实了向下定向洛伦兹力的加速作用。

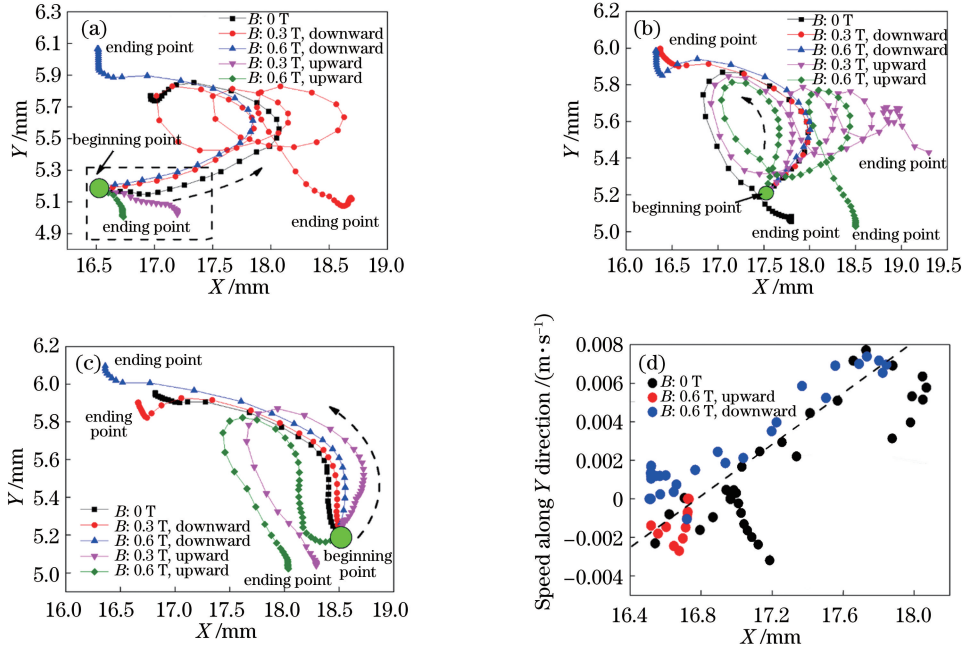


图 8 气泡在不同位置及不同洛伦兹力作用下的轨迹。

(a) A 点位置; (b) B 点位置; (c) C 点位置; (d) A 点气泡 Y 方向的速度图

Fig. 8 Trajectory map of bubbles at different positions and under different Lorentz forces. (a) Point A position; (b) point B position; (c) point C position; (d) speed map along Y direction of bubble at point A

图 9 所示为不同洛伦兹力条件下熔池 A、B、C 点气泡停留位置的分布规律图。在未施加外场的条件下,气泡在熔池中随机分布。但当洛伦兹力向下时,随着磁场强度从 0.3 T 增大到 0.6 T,气泡最后的停留位置均呈上升趋势,特别是当磁场强度为 0.6 T 时, A、B、C 点气泡都位于约 6 mm 位置,该处为熔覆层的最表层,上述规律也说明向下的洛伦兹力对熔池中整体区域的气泡均具有排气效应。当洛伦兹力向上时,其位置明显低于洛伦兹力向下及未施加外场条件下的气泡位置。综上所述,电磁场所产生的定向洛伦兹力具有优异的调节气泡位置的能力。

4.5 气孔分布的实验验证

为了验证上述分析的正确性,采用与仿真模型中相同的激光熔覆工艺和外加复合场参数进行激光

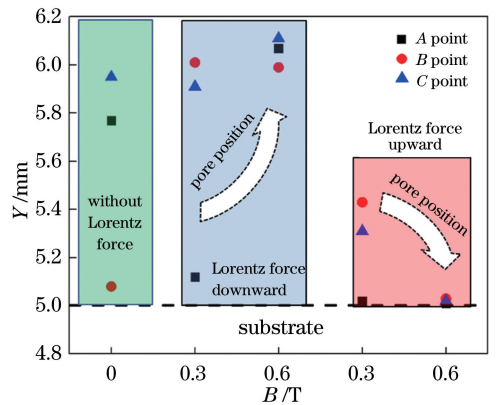


图 9 不同洛伦兹力及不同位置条件下气泡最终停留的位置。

(a) A 点位置; (b) B 点位置; (c) C 点位置

Fig. 9 Final park positions of bubble at different positions and under different Lorentz forces. (a) Point A position; (b) point B position; (c) point C position

熔覆实验。图 10(a)所示为无洛伦兹力条件下熔覆层纵截面气孔的分布图,可以看出,熔覆层中存在少量规则的圆形气孔,其分布位置无明显的特征规律,尺寸为 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 。激光熔覆层中的常见气孔有氮气孔、碳气孔与氢气孔等,氢气孔多呈螺钉状,与该气孔特征不符,根据气孔形貌和熔覆条件可判断 Inconel 718 熔覆层中气孔的成因如下:1)保护气与环境中及粉末粗糙表面粘结的一部分水汽和 O_2 等气体被搅入熔池,随着熔池的温度降低,气体在金属液体中的溶解度降低,由于熔池的冷却速度极快,析出的过饱和气体来不及上浮逸出而形成气孔,该类气孔的易生成位置一般位于熔池的固液界面处^[2,16];2)粉末中的空心粉如图 2(b)所示,内部气体在熔覆过程中一部分溶解到金属溶液中,部分气体因局部浓度较高,直接形成气泡,该类气孔的易生成位置位于熔池内部及固液界面处^[25];3) Inconel 718 中碳的质量分数约为 0.33% ,因此粉末内部的气孔可能由熔池表面的氧化物与碳反应生成,也可能是粉末粘结的 O_2 与碳反应生成的 CO 气孔,该类

气孔的生成位置一般位于熔池内部^[26]。图 10(b)、(c)所示分别为洛伦兹力向上条件下 $B=0.3\ \text{T}$ 和 $B=0.6\ \text{T}$ 时熔覆层纵截面气孔的分布图,随着磁场强度增大,纵截面气孔的数量由 37 个增至 80 个,特别是在 $B=0.6\ \text{T}$ 时,出现了多个直径大于 $80\ \mu\text{m}$ 的气孔,且气孔在熔池底部偏聚。这是由于静态磁场降低了熔池流速,对气泡的拖曳作用减小;另一方面向上的洛伦兹力抑制了气泡的上浮,在气泡形核长大过程中,大部分气泡被保留在熔覆层中。气泡核或微小气泡在熔池中的存在时间延长,增大了气泡相互融合的概率,使其在熔池中有充分的长大时间,故出现了气孔数量增多、直径增大的现象。图 10(d)、(e)所示分别为洛伦兹力向下条件下 $B=0.3\ \text{T}$ 和 $B=0.6\ \text{T}$ 时熔覆层纵截面气孔的分布图,随着磁场强度增大,气孔数量明显减少,当 $B=0.6\ \text{T}$ 时,可以得到无气孔、致密的熔覆层。该实验结果证实了上文的模拟分析结果,说明采用定向洛伦兹力辅助激光熔覆时,可有效调节熔覆层的气孔分布,获得无气孔缺陷的致密熔覆层。

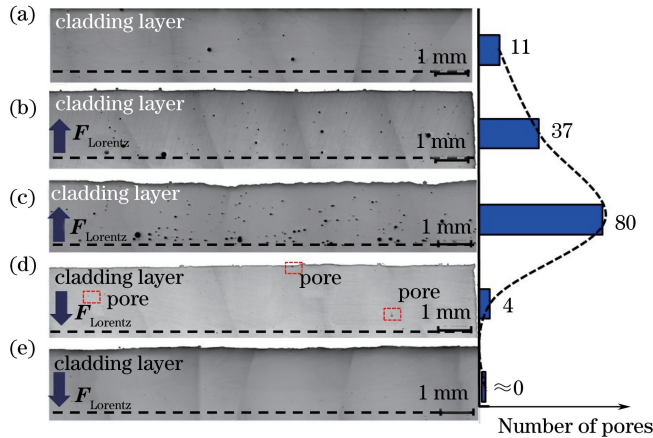


图 10 不同条件下熔覆层气孔的分布。(a) $B=0\ \text{T}$; (b) $B=0.3\ \text{T}$, 洛伦兹力方向向上; (c) $B=0.6\ \text{T}$, 洛伦兹力方向向上; (d) $B=0.3\ \text{T}$, 洛伦兹力方向向下; (e) $B=0.6\ \text{T}$, 洛伦兹力方向向下

Fig. 10 Distributions of pores in cladding layers under different conditions. (a) $B=0\ \text{T}$; (b) $B=0.3\ \text{T}$, upward Lorentz force; (c) $B=0.6\ \text{T}$, upward Lorentz force; (d) $B=0.3\ \text{T}$, downward Lorentz force; (e) $B=0.6\ \text{T}$, downward Lorentz force

5 结 论

建立了定向洛伦兹力作用下激光熔覆的熔池模型,计算了气泡随熔池流体运动及熔池固化后形成气孔的过程,得到以下结论。

1) 在激光熔覆工艺条件下,当磁场强度为 $0.6\ \text{T}$,电流密度为 $5\times 10^6\ \text{A}/\text{m}^2$ 时,定向洛伦兹力密度的量级达到 $10^5\ \text{N}/\text{m}^3$,并与重力体积力相互耦合,调控熔池的流动。当洛伦兹力的方向向下时,熔

池表面的最高流速较未施加外场的减小了 25% ;当洛伦兹力的方向向上时,熔池表面的最高流速较未施加外场的减小了 62.5% 。

2) 气泡在流体拖曳力的作用下呈环状运动,熔池前部为流体高速区,流体拖曳力主导气泡的运动;后部区域为流体低速区,拖曳力的作用相对较小,故后部气泡的停留位置对直径的敏感程度较前部气泡的高。

3) 当电流密度为 $5\times 10^6\ \text{A}/\text{m}^2$,洛伦兹力向下

时,随着磁场强度从 0 T 增大到 0.6 T,气泡向上的运动能力增强,得到了致密无气孔的熔覆层;洛伦兹力向上时,随着磁场强度从 0 T 增大到 0.6 T 时,气泡向上的加速度减少,抑制了气泡逸出,熔覆层的气孔数量明显增多。仿真计算及实验结果均表明,利用定向洛伦兹力的辅助时,无需调整激光熔覆工艺参数,即可有效调节熔覆层内的气孔分布。

参 考 文 献

- [1] Zhong C, Gasser A, Kittel J, *et al.* Improvement of material performance of Inconel 718 formed by high deposition-rate laser metal deposition [J]. *Materials & Design*, 2016, 98(1): 28-34.
- [2] Liu F C, Lin X, Yang G L, *et al.* Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel base super alloy Inconel 718 prepared in different atmospheres [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1047-1054.
刘奋成, 林鑫, 杨高林, 等. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel718 的显微组织和力学性能 [J]. *金属学报*, 2010, 46(9): 1047-1054.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wang L, Yao J, Hu Y, *et al.* Suppression effect of a steady magnetic field on molten pool during laser remelting [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 35(1): 794-802.
- [6] Schneider A, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Laser beam welding of aluminum alloys under the influence of an electromagnetic field [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 4-11.
- [7] Zhou J, Tsai H L. Effects of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 50(22): 17-35.
- [8] Xie D Q. The process research on pulsed current assisted laser rapid prototyping nickel-based super-alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
谢德巧. 脉冲电流辅助激光快速成形镍基高温合金的工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] Wang C Q, Liu H X, Zhou R, *et al.* Characteristic behaviors of particle phases in niCrBSi-tiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(2): 221-228.
王传琦, 刘洪喜, 周荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征 [J]. *金属学报*, 2013, 49(2): 221-228.
- [10] Qin L Y, Yang G, Bian H Y, *et al.* Experimental study on electromagnetic stirring assisted laser metal deposition titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0303004.
钦兰云, 杨光, 卞宏友, 等. 电磁搅拌辅助激光沉积成形钛合金试验研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0303004.
- [11] Wang W, Liu Q, Yang G, *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(2): 0202007.
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(2): 0202007.
- [12] Hoadley M P. Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool [J]. *International Journal of Numerical Methods For Heat & Fluid Flow*, 1994, 4(1): 61-83.
- [13] He X, Mazumder J. Transport phenomena during direct metal deposition [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(5): 053113.
- [14] Cho W-I, Na S-J, Thomy C, *et al.* Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 262-275.
- [15] Che D F, Li H X. Multiphase flow and its application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
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.
- [16] Yang Z, Wang A, Weng Z, *et al.* Porosity elimination and heat treatment of diode laser-clad homogeneous coating on cast aluminum-copper alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 321: 26-35.
- [17] Dong G. Numerical simulation of molten pool in coaxial powder-feed laser cladding [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
董敢. 同轴送粉激光熔覆熔池数值模拟 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [18] Wang L, Hu Y, Song S Y, *et al.* Suppression effect of a steady magnetic field on surface undulation

- during laser remelting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1103005.
- 王梁, 胡勇, 宋诗英, 等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103005.
- [19] Li S, Xiao H, Liu K, *et al.* Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel 718 during pulsed- and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study[J]. Materials & Design, 2017, 119: 351-360.
- [20] Iida T, Guthrie R I L. The physical properties of liquid metals[M]. New York: Oxford University Press, 1988.
- [21] Shuja S Z, Yilbas B S. Laser produced melt pool: Influence of laser intensity parameter on flow field in melt pool[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(4): 767-775.
- [22] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool control for laser beam welding[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 515-524.
- [23] Zhang H W, Li Y X. Study on bubble nucleation in liquid metal[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4865-4871.
- 张华伟, 李言祥. 金属熔体中气泡形核的理论分析[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4865-4871.
- [24] Ni B, Luo Z G, Zou Z S. Thermodynamics analysis on bubble attachment to solid wall in liquid[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(1): 140-143.
- 倪冰, 罗志国, 邹宗树. 固壁上液体内气泡附着的热力学分析[J]. 过程工程学报, 2008, 8(1): 140-143.
- [25] Zhong C, Gasser A, Schopphoven T, *et al.* Experimental study of porosity reduction in high deposition-rate laser material deposition [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75(1): 87-92.
- [26] Zhang K, Liu K Y, Ye Z T, *et al.* Effect of protective atmosphere on pores in the remelted zone during laser remelting gray cast iron [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102005.
- 张坤, 刘克元, 叶正挺, 等. 气氛保护对灰铸铁激光重熔区域气孔的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102005.