文章编号:1005-0523(2022)04-0074-10

基于热-流耦合模型研究激光熔覆速度场影响机制

赵明娟[1,2],李宝星[1],吴 涛[1],赵龙志[1,2],曾建邦[1],焦海涛[1],李 劲[3],宋立军[1,4]

(1. 华东交通大学载运工具先进材料与激光增材制造南昌市重点实验室,江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013;
3. 南昌铁路局通达工贸有限责任公司,江西 南昌 330002; 4. 湖南大学机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:激光熔池内部熔体的对流状况会直接影响到熔覆层内气孔、裂纹和内部热应力等缺陷的形成,这些缺陷会显著影响熔覆层的服役行为,分析熔池内部的对流状况对控制熔覆层质量具有重要意义。通过构建激光熔覆过程的热-流耦合模型,并利用其模拟不同激光功率和送粉率下的熔覆过程,研究熔池深度和宽度,模型模拟了激光熔覆过程中工艺参数对熔池温度场及速度场的影响。结果表明:工艺参数中的激光功率、光斑半径和扫描速度的改变,均会明显影响熔池内熔体流速峰值和峰值上升速度,而送粉率对熔池速度场几乎无影响。此外,表面张力系数对熔池内熔体速度场也有影响,熔覆材料的表面张力系数为负值时,熔池内熔体从激光照射区域向两边流动,使得熔池变浅变深;而含S等活性元素的熔覆材料具有正表面张力系数,熔池内流体从熔池两边向中间流动,使熔池变深变窄;随着表面系数绝对值的增大,熔池内流体速度峰值也会随之增大。

关键词:热-流耦合模型;速度场;工艺参数;表面张力系数

中图分类号:TG174.44;U216 **文献标志码**:A

本文引用格式:赵明娟,李宝星,吴涛,等. 基于热-流耦合模型研究激光熔覆速度场影响机制[J]. 华东交通大学学报,2022,39(4):74-83.

Study on the Effect Mechanism of Laser Cladding Velocity Field Based on Thermal-Fluid Coupling Model

Zhao Mingjuan[1], Li Baoxing[1], Wu Tao[1], Zhao Longzhi[1,2], Zeng Jianbang[1], Jiao Haitao[1], Li Jin[3], Song Lijun[1,4]

(1. Key Laboratory of Advanced Materials for Vehicles & Laser Additive Manufacturing of Nanchang City, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Tongda industry and Trade Co., Ltd., Nanchang Railway Administration, Nanchang 330002, China; 4. College of Mechanical and vehicle engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The velocity distribution in the molten pool has a significant impact on the cladding depth and width of the laser cladding layer and the surface morphology, which in turn affects the quality of the cladding layer. To this end, a thermal-fluid coupling model of laser cladding is constructed, and the cladding process under different laser power and powder feed rate is simulated by using it. Therefore, this paper uses this model to deeply study the effect of laser process parameters on the temperature field and the velocity field in the molten pool. It was found that as the laser power increases, the spot size or the scanning speed decreases, the peak value of the fluid flow velocity in the molten pool increases during the rising period, and the decline in the peak period of

收稿日期:2021-03-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51965022);江西省自然科学基金项目(20202BABL204046);江西省教育厅科技项目(200606)

the flow velocity decreases gradually or even stabilizes. while the change of the powder feed rate has almost no effect on the velocity field. In addition, the influence of the surface tension coefficient on the velocity field in the molten pool is also studied.For the cladding material with negative surface tension coefficient, It was found that the fluid in the molten pool flows from the laser irradiation area to both sides, which makes the molten pool shallower and deeper.The cladding material containing active elements such as S has a positive surface tension coefficient, and the fluid in the molten pool flows from both sides of the molten pool to the middle, which makes the molten pool deeper and narrower. As the absolute value of the surface coefficient increases, the fluid velocity peaks will increase with it.

Key words: thermal–fluid coupling model; velocity field; process parameter; surface tension coefficient

Citation format: ZHAO M J, LI B X, WU T, et al. Study on the effect mechanism of laser cladding velocity field based on thermal–fluid coupling model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 74–83.

激光熔覆工艺具有激光能量密度高、加工过程急热快冷、熔覆层界面结合强等显著特点，常用来制备服役寿命长、高耐磨耐腐蚀的熔覆层，在材料表面强化和关键部件的再制造领域具有广阔的应用前景[1]。工艺参数（如激光功率、光斑半径、扫描速度和送粉率等）的设置会极大影响熔覆过程中熔池的温度场、速度场和涂层应力场的分布，从而决定熔覆层中相的构成、形态和分布，并对熔覆层的服役性能造成重要影响[2–3]。选择合理的工艺参数和调节熔池内温度梯度及分布是提升熔覆层质量的重要途径。但是，现有设备难以对熔覆层内温度场和速度场分布进行实时的精确监测，单一的实验研究又会耗费大量物力人力，且周期较长，这也大大限制了人们对激光工艺参数与涂层性能关联性的有效研究。

随着计算机科学技术的快速发展，计算机技术的模拟运算能力得到极大的提升，从而大大减少了激光熔覆过程的模拟计算时间，同时也提高了计算结果的准确性。因而应用模拟仿真技术研究激光熔覆过程有利于人们深入理解激光熔覆机理，有利于制备出高质量的熔覆层[4–5]。

研究激光熔覆过程的现有数值模型主要有两大类：一类是热模型，该模型大多侧重于研究熔覆过程中的温度场分布，通过调整单一工艺参数（如激光功率、光斑半径、扫描速度和送粉率等）对激光熔覆过程中的温度、温度梯度分布及熔覆层形貌的影响[6–7]，但此类模型仅考虑了固体传热，忽略了固液相变和熔池内流体对流换热的影响。另一类是热–流耦合模型，此类模型不仅耦合了固体传热和流体流动，而且还考虑了固–液相变问题，因而这类模型可以更加精准地描述激光熔覆过程中所发生的物理冶金现象。目前模拟仿真在激光熔覆过程的研究中具有广泛的应用，然而，研究人员并未系统地阐述激光工艺对激光熔覆过程中熔池内速度场的影响，不能全面理解熔池的演变过程[8–14]。本文利用 COMSOL 有限元软件建立了激光熔覆多物理场模型，模拟了熔池内温度场和速度场的分布，采用模拟和实验相结合的方法，不仅研究了激光熔覆过程中激光功率、光斑半径、扫描速度、送粉率等工艺参数对熔池内温度及流速分布的影响，同时模拟了不同材料表面张力系数下熔池温度场和速度场的分布状况，对激光熔覆工艺的优化具有一定的理论价值。

1　模型构建

1.1　数学模型

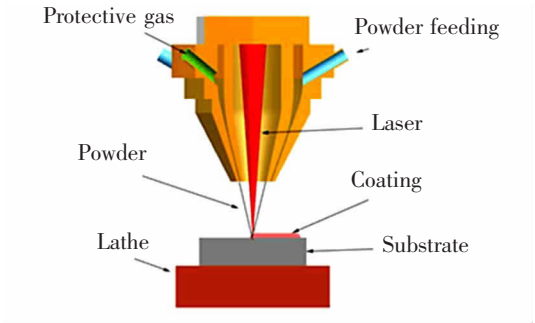
本文主要探讨激光工艺对熔池内温度场和速度场的影响，对激光熔覆过程的物理模型进行简化（图 1），并作如下假设：

1）熔池流体为牛顿不可压缩的层流流体；

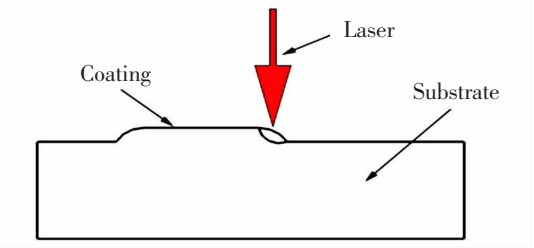
2）材料的热物性参数不随温度变化，但材料的比热、粘度除外，同时考虑表面张力和相变潜热；

3）熔池流体受热浮力与重力作用，并符合 Boussinesq 假设；

4）激光热源呈高斯分布。



(a) Physical model



(b) Simplified physical model

图1 激光熔覆物理模型

Fig.1 Laser cladding physical model

以上假设可得出熔池内流体必然遵守质量、能量和动量守恒方程,由此得出以下的控制方程。

(1) 质量守恒方程。熔覆材料受热,会发生固-液相变现象,熔池内流体的质量必须守恒,方程如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho u)=0 \tag{1}$$

式中:ρ 为材料密度,g/cm^3;u 为流体速度,m/s;t 为时间,s。

(2) 动量守恒方程。采用 Carman-Kozeny 方程描述固-液相变现象,其动量方程[15]表示为

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho(u\cdot\nabla)u=\nabla\cdot[-\rho I+\mu(\nabla u+\nabla u^{\mathrm{T}})-\frac{2\mu}{3}(\nabla\cdot u)I]+F_{\text{源项}} \tag{2}$$

式中:$F_{\text{源项}}$是熔池流体所受到的体积力项的总和,可表示为

$$F_{\text{源项}}=\rho(1-\beta(T-T_m))g-K\frac{(1-f_l)^2}{f_l^3+B} \tag{3}$$

式中:$F_{\text{源项}}$中第一项是流体热浮力与重力项;第二项是达西源项;I 为相变潜热,kJ/mol;μ 为流体动力粘度系数;β 为材料热膨胀系数;T 为热力学温度,K;T_m 为材料熔点,K;K 为某一常数;B 为避免分母为零的常数,此处设定为 0.001;f_l 为液相体积分数。

(3) 能量守恒方程。系统所遵守的能量守恒方程[16]为

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C u\nabla T=\nabla(k\nabla T)+Q \tag{4}$$

式中:C 为材料的比热;k 为热传导系数;Q 为激光热源项,本文采用高斯热源形式

$$Q=\frac{2\alpha(1-\beta)P}{\pi r_b^2}\exp\left(\frac{-2(x^2+y^2)}{r_b^2}\right) \tag{5}$$

式中:P 为激光功率,W;r_b 为光斑半径,mm;α 为激光吸收率;β 为粉末流对激光的遮蔽率。将上式绘制成图片,如图2所示,从图中看出热源的能量密度呈中心高周边低的轴对称高斯分布。

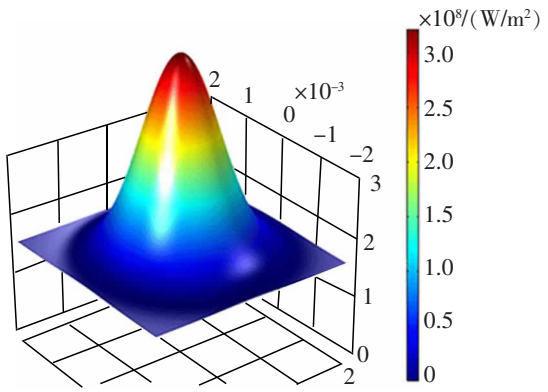


图2 高斯热源能量密度分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of Gauss energy density distribution

1.2 边界处理

将激光熔池内固相与液相之间的瞬间转化过程看作是多孔介质孔隙率的变化过程,其中液相在熔池所占比例按照平均分布的方式表示

$$f_l=\begin{cases}0 & T<T_s\\ \dfrac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s\leqslant T<T_l\\ 1 & T_l\leqslant T\end{cases} \tag{6}$$

式中:T_s,T_l 分别为固相和液相温度,K。

熔覆过程中,由于熔池内部温度不均匀,使其内部形成表面张力梯度,从而驱动熔池内部熔体流动。得出流体粘性力与表面张力平衡公式为

$$-\mu\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial\gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x} \tag{7}$$

$$-\mu\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{\partial\gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y} \tag{8}$$

工件表面存在热对流和热辐射,其换热公式为

$$k\frac{\partial T}{\partial x}=g(T-T_0)+\sigma\varepsilon(T^4-T_0^4) \tag{9}$$

式中：γ 为表面张力，N/m；u 和 v 均为流体速度，m/s；g 是换热系数；σ 是玻尔兹曼常数；ε 是辐射率。

1.3　数值模型

借助 COMSOL 仿真软件提供的流体传热模块，开发激光熔覆过程的热–流耦合模型。模型计算区域尺寸为 100 mm×10 mm，为保证计算准确度和合理运算时间，本文网格采用自由三角形网格，同时对整体网格进行区别划分，温度和流速变化剧烈的部分采用极细网格，其余部分采用细网格。其网格划分区域和边界条件如图 3 所示。

为了模拟出激光熔覆过程中不同阶段熔覆层外观形貌尺寸的变化，本文利用 COMSOL 软件中自带 ALE（Arbitrary lagrangian–euleian）的移动网格功能进行模拟，熔覆层界面移动速度公式如下[17-19]

$$V_x=\frac{2q_m\eta_m}{\rho\pi r_m^2}\exp\left(\frac{-2(x^2+y^2)}{r_m^2}\right)z \tag{10}$$

式中：q_m 为粉末质量流率，g/min；η_m 为粉末捕获率；r_m 是粉末流半径，mm。

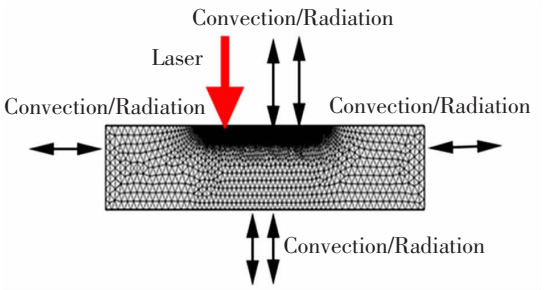


图 3　网格剖分及边界条件

Fig.3　Mesh division and boundary conditions

1.4　实验验证

模型计算的初始温度为室温，激光功率为 800 W，激光束半径为 2 mm，送粉率为 6 g/min，扫描速度为 5 mm/s，基板为 45 钢，粉末物性参数与基板一致。与模拟相同的实验参数在 10 mm 厚度的 45 钢基板上制备激光熔覆涂层，并对激光熔覆涂层横截面模型计算结果与实验结果进行对比（图 4）。从图 4 可以看出，实验与模拟所得到的熔覆涂层形貌尺寸结果较为吻合。

为进一步验证模型的正确性，本文还探讨了送粉速率和激光功率的改变对熔池深度（h）和宽度（l）的影响，并与实验结果进行对比（图 5）。如图 5 所示，激光功率对熔覆层尺寸影响的实验结果与仿真结果的误差在 10%以内，这是因为激光功率的增加使得系统单位时间内接受的能量更多，能量输入的增加会扩大熔池的成形区域，从而加大了熔覆层的尺寸。送粉率的实验与仿真吻合度在 80%左右，这是由于仿真模型不考虑粉末流的遮蔽作用对系统能量的影响。模型中单位时间内系统获得的能量输入不变，因而熔池的成形区域不会扩大，但熔池中心区域温度高，随着送粉率的增加，熔池中心所能获得熔化累积的熔体更多，熔覆层高度增加而宽度变化不大。

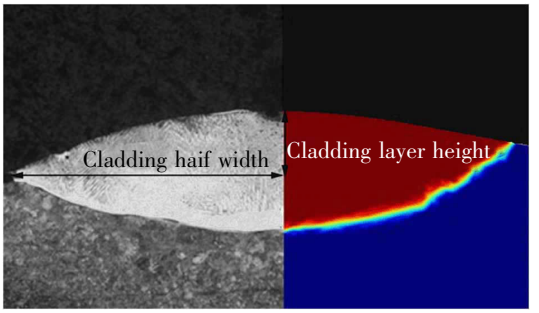
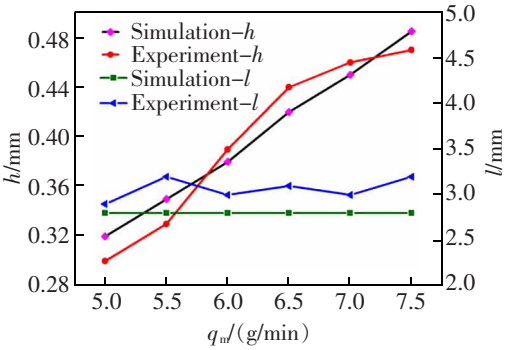
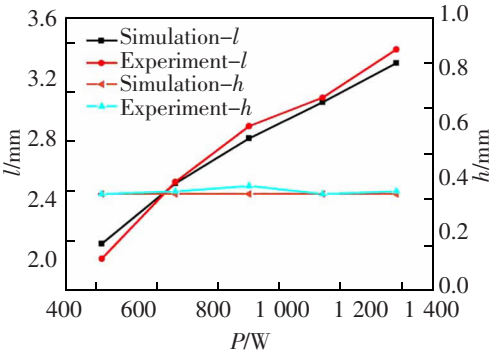


图 4　熔覆层的横截面尺寸实验与模拟结果对比示意图

Fig.4　Schematic diagram of cross–sectional dimension comparison between experiment and simulation results of cladding layer



(a) Effect of the feeding rate on the size of the cladding layer



(b) Effect of laser power on the size of the cladding layer

图 5　工艺参数对熔覆层横截面尺寸的影响

Fig.5　Effect of process parameters on the size of cross section sizes of laser cladding layer

2 仿真结果与分析

2.1 激光功率的影响

图6分别是740,800,860 W条件下温度场和速度场分布，图中颜色表示温度和速度的大小,箭头表示速度方向。由图6(a),图6(b),图6(c)可知,熔池中心温度最高,这是由于激光热源呈高斯分布,输出光源中间温度最高,并且激光功率增加,热输入量随着增大,熔池温度亦随着上升。由图6(d),图6(e),图6(f)可知,熔池表面流动的主要原因是由于温度梯度而形成的表面张力梯度，表面张力大的流体对表面张力小的流体具有拉力作用,使得熔体从表面张力小的区域流向表面张力大的区域,即形成了Marangoni效应[20-21]。熔池内部流动则由浮力和重力共同作用下形成,熔池内熔体最高流速主要出现在熔池表面边缘处。图7为熔覆过程中熔池内部最大流速在不同激光功率下的变化曲线,由图7可知,在激光熔覆开始初期,熔体内部流速峰值较小,当熔覆至第2 s时，熔体流速峰值快速上升至某一值并趋于平稳。当熔覆至第6 s时,第1层熔覆完成,激光返回初始点并在第1层熔覆层上进行第2层熔覆,而第1层熔覆层初始点处保留了热源一部分热量，从而使得熔池内部熔体流速峰值出现剧增。然而,随着激光熔覆的持续进行,激光输入能量逐渐增多,熔池内部温度梯度较小。从而熔体流速峰值缓慢降低。当激光返回初始点在第2层熔覆层进行第3层熔覆时,熔池内熔体流速峰值再次快速上升,流速峰值最高可达到0.23 m/s,然后再缓慢降低,同时熔体流速峰值的下降幅度逐渐变小。同时随着激光功率的上升,熔池流速峰值均会不断上升,同时激光功率的上升使得流速下降幅度逐渐缩小。这是由于进行多层熔覆时,激光能量持续输入熔池,而单位时间熔池与外界环境的热量交换有限,熔覆层会不断积累热量,这样使得熔池内部温度与熔覆区域间的温度梯度逐渐缩小,随着熔覆层数的增加,熔体流速峰值下降幅度也逐渐减小。

2.2 光斑半径的影响

在熔覆过程中,光斑尺寸越大,激光束内能量密度越低。图8为不同光斑半径下的温度场与速度场分布图,由图8可知:光斑半径的缩小不仅使得熔池温度及速度峰值均增大,同时熔池内整体流速

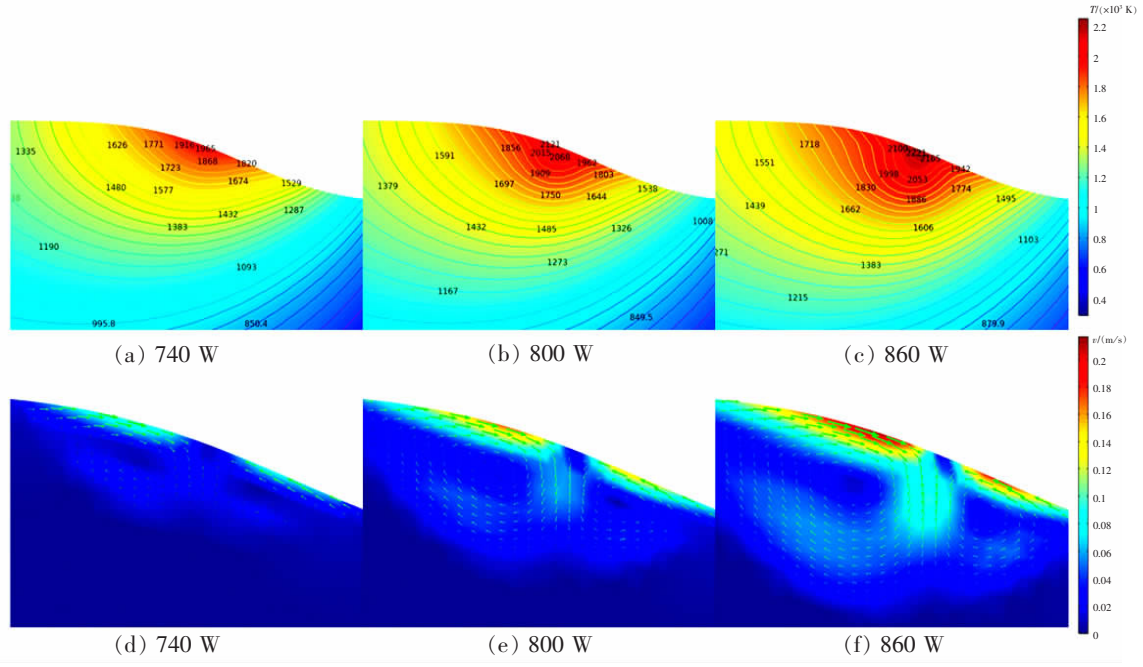


图6 不同功率下熔池温度场与速度场

Fig.6 Temperature field and velocity field of molten pool under different powers

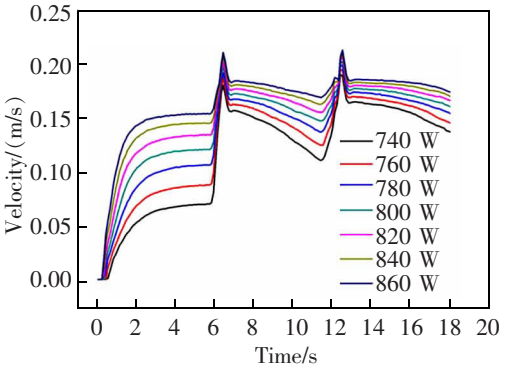


图 7　激光功率对熔体流速峰值影响

Fig.7　Effect of laser power on peak fluid velocity

和温度区域也增大。图 9 为不同光斑半径下熔池内流速峰值。由图 9 可知:随着光斑半径的缩小,不同阶段的熔池流速峰值均获得提升,同时使得熔体流速峰值在两次下降期的降幅逐渐减小,当光斑半径缩小至 1 mm 时降幅趋向于平稳。这是由于熔体流速主要由温度梯度所决定,随着光斑半径的缩小,能量总输入不变,但光斑内能量密度会增加,温度梯度也随之增大,从而导致上升期的熔体流速峰值就越高。并且由于光斑面积减小,激光加热区域与外界的换热区域减小,当能量输入与流失形成平衡时,从而使得熔池的熔体流速峰值趋于平稳状态。

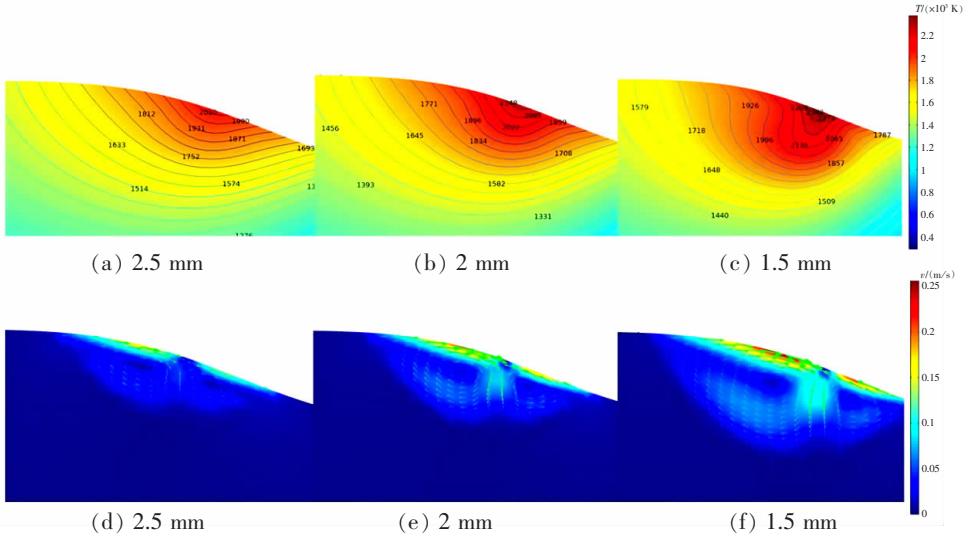


图 8　不同光斑半径下熔池温度场与速度场

Fig.8　Temperature field and velocity field of molten pool under different spot radius

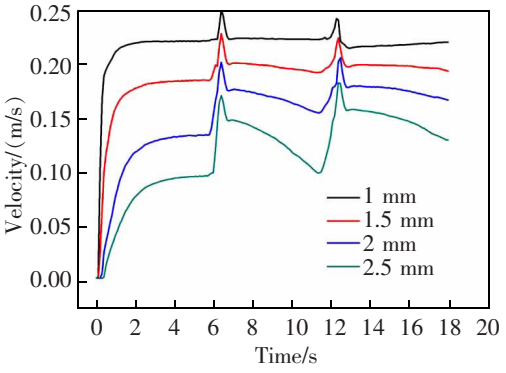


图 9　不同光斑半径下熔池流速峰值

Fig.9　Peak fluid velocity of molten pool under different laser spot radius

2.3　扫描速度的影响

除了激光功率以及光斑大小外,不同的扫描速度也会对熔池的温度场和速度场造成影响,扫描速度越慢意味着相同移动距离内输入熔池能量就越多。图 10 为不同扫描速度下熔池内温度场与速度场,由图 10 可知,随着扫描速度的降低,熔体的温度和流速峰值及高温和高流速区域的尺寸会逐渐增大。图 11 为不同扫描速度下熔池内部速度峰值随时间变化曲线,由图 11 可知,随着扫描速度的降低,当进行第一层熔覆时,熔池内部熔体流速峰值有明显的提升,当激光返回初始点时,熔体流速的下降幅度逐渐减小。这主要是因为随着扫描速度逐渐降低,熔池所获得输入能量升高,导致熔池内温度梯度增大,而熔池流速与温度梯度呈正比关系,从而导致熔池流速峰值在初始期有明显提升。同时累积在熔池的热量随着扫描速度降低迅速增加,但系统与外界的换热效率有限,这使得随着扫描速度降低,熔池内热量逐渐累积。当热量输入与损失趋向于平衡时,流体流速下降会逐渐缓和。

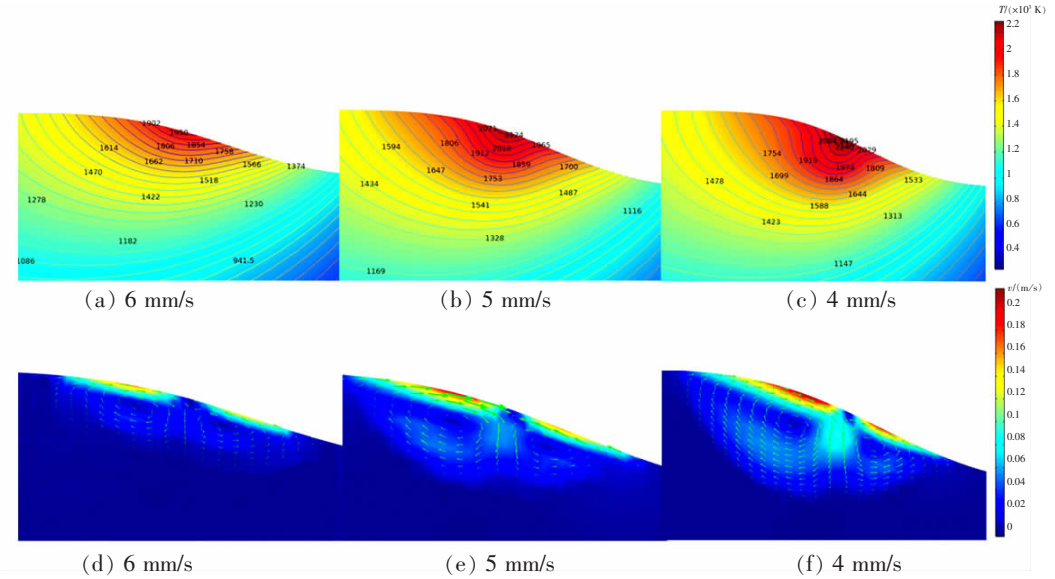


图 10　不同扫描速度下熔池温度场与速度场

Fig.10　Temperature field and velocity field of molten pool underdifferent scanning speeds

2.4　送粉率的影响

除了研究激光功率、光斑尺寸、扫描速度外，本文还研究了熔覆过程中送粉率对熔池温度场与速度场的影响。由图 12 和图 13 可知，送粉率的增大只会增大涂层的高度，对熔覆过程中的温度场和速度场的分布以及各个阶段熔池内速度峰值基本没有影响。这是由于送粉率的不同改变了单位时间内基板上粉末的堆积量，但激光输入的能量并没有改变。送粉率对熔覆层的形貌尺寸影响非常大，但对其过程中的温度场与速度场影响比较小。

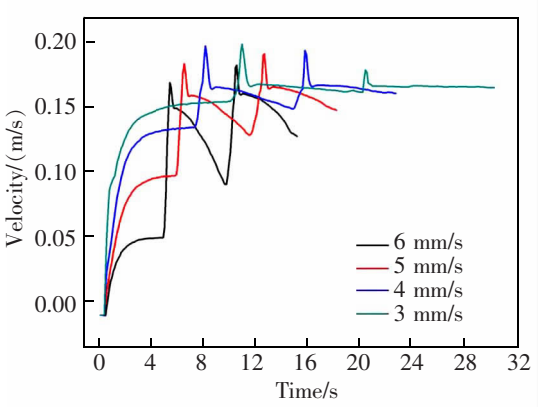


图 11　不同扫描速度下熔池流速峰值

Fig.11　Peak fluid velocity of molten pool under different scanning speeds

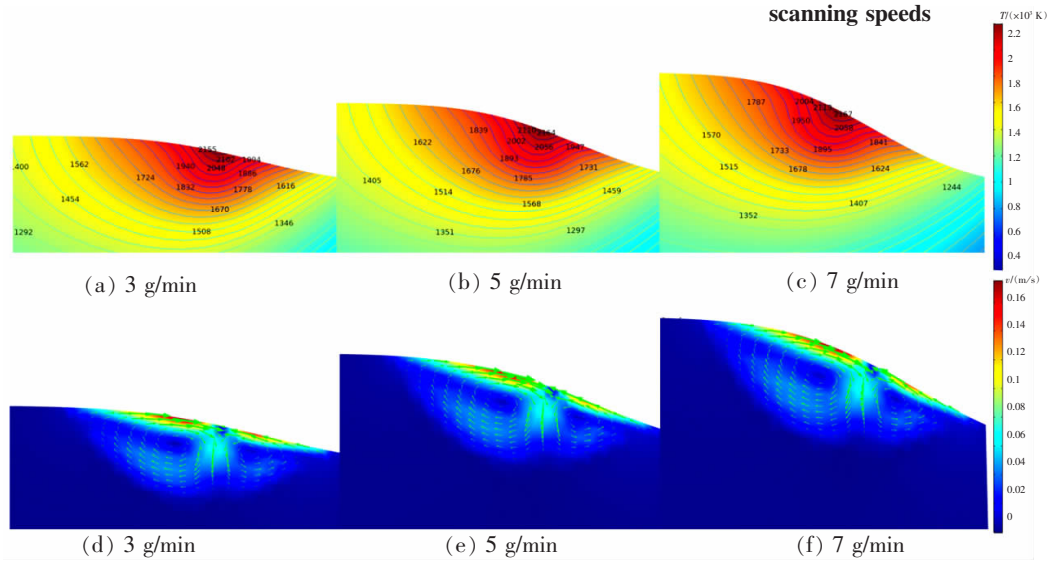


图 12　不同送粉率下熔池温度场与速度场

Fig.12　Temperature field and velocity field of molten pool under different powder feeding rate

2.5　表面张力系数的影响

在激光熔覆的过程中，除了激光工艺参数能对熔池的温度场和速度场产生影响外，材料的表面张力系数也会对熔池的温度场和速度场造成影响。在激光熔覆过程中，熔覆材料中活性元素的添加（如 S 元素等）会使其表面张力系数发生转变[22]，而材料表面张力系数会对熔池的流速和流动方向造成影响。如图 14(a)所示，当材料表面张力系数取值小于 0 时，熔池内熔体由激光中心区域向熔池边缘流动；材料表面张力系数取值大于 0 时，熔池内熔体由熔池边缘向激光中心区域流动，但是两者流体流速峰值均出现在熔池表面边缘位置。而熔池内流体的流动意味着热量的流动，如图 14(b)所示，表面张力温度系数为负时，熔池内的热量消耗在熔池宽度上的扩展，使得熔池变浅变宽；表面温度张力系数为正时，熔池内流体流动驱使能量消耗在熔池深度的扩展，使熔池变深变窄[23-24]。

图 15 为相同工艺参数的不同表面张力系数下熔池内部的熔体流速峰值。由图 15 可知，相同的表面张力系数下进行多层熔覆时，熔池内熔体流速相比前一层均会有一定程度的提升，同时熔池峰值增加的幅度变小，这是由于刚加工完的熔覆层会保留了一部分热源能量，当进行多层熔覆时，熔覆层积累的热量越多导致熔池温度峰值越高。此外，由于熔池温度与基体温度的差值缩小，从而熔池温度峰值的下降幅度越小。

表面张力系数取值正负不同情况下，两者形成的熔池形貌明显不同，系数为负值的熔池尺寸宽且浅，系数为正值的熔池尺寸深且窄，这是由于系数取值小于 0 时，熔体由熔池中心区域向周边流动，熔池与外界的接触增大，加速熔池能量的散失，从而降低熔覆层稀释率；而当系数取值大于 0 时，熔体由熔池边缘向熔池中心区域流动，熔池与外界接触面缩小，阻碍熔池能量的散失，从而增大熔覆层稀释率。综上所述，为制备优异质量的熔覆涂层，应选择表面张力系数为正值且取值较小的材料作为熔覆材料。

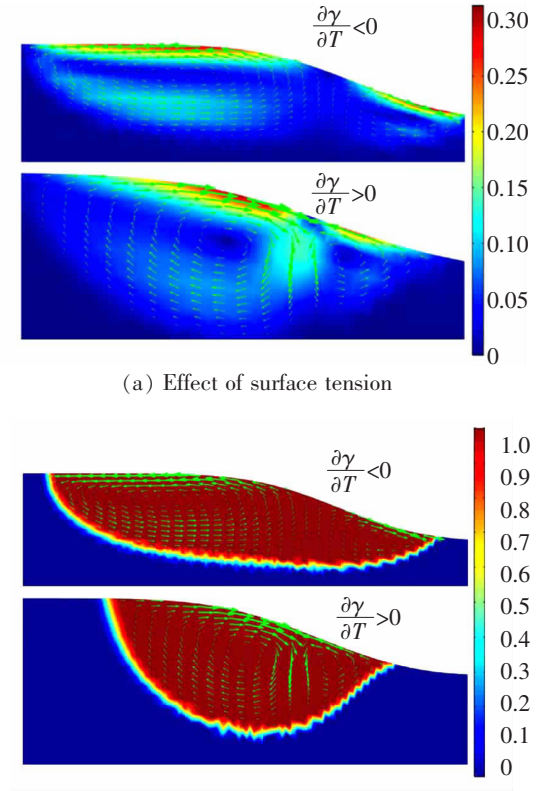


图 14　表面张力系数对熔池的影响

Fig.14　The effect of the surface tension coefficient on the molten pool coefficient on fluid flow direction

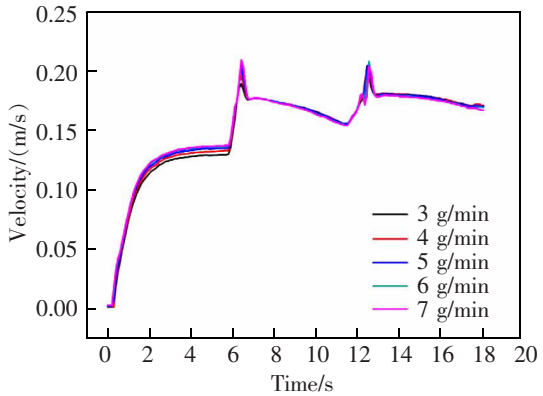


图 13　不同送粉率下熔池流速峰值

Fig.13　Peak fluid velocity of molten pool under different powder feeding rates

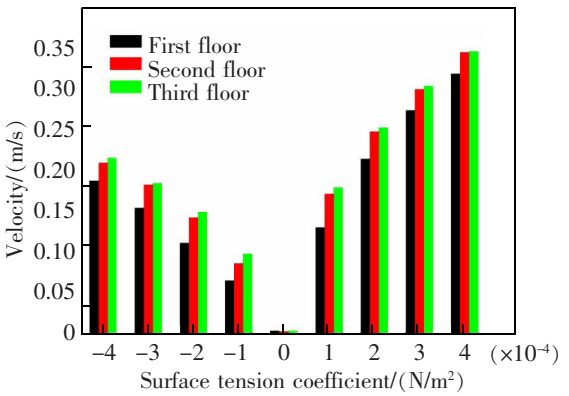


图 15　不同表面张力系数下熔池流速峰值

Fig.15　Peak fluid velocity of molten pool under different surface tension coefficients

3 结论

本文通过COMSOL多物理场软件建立热-流耦合模型,研究了激光熔覆过程中不同工艺参数和材料表面张力系数下熔池内部温度场和速度场的分布状况,并结合实验验证了COMSOL软件中移动网格法模拟的熔覆层形貌的准确性,得出以下结论。

1)采用移动网格法模拟出激光熔覆中熔覆层形貌,熔覆层的高度受送粉量的影响较大,熔池尺寸与激光功率呈正比关系,且模拟结果与实验结果吻合良好。

2)进行多层激光熔覆时,增大激光功率、缩小光斑半径和加快扫描速度,均会使得熔池内部热量增多,从而提升熔池内熔体流速峰值,同时流速峰值下降幅度也会逐渐缩小。

3)在激光熔覆过程中,熔覆材料的表面张力系数取值与熔体的流动方向具有重要关联性。当表面张力系数取值小于0时,熔池内熔体由熔池中心区域向熔池边缘流动,熔池与外界的接触增大,加速熔池能量的散失,从而降低熔覆层稀释率,使得熔池尺寸变浅变宽。当表面张力系数取值大于0时,熔池内部熔体由熔池边缘向熔池中心区域流动,熔池与外界接触面缩小,阻碍熔池能量的散失,从而增大熔覆层稀释率,使得熔池尺寸变深变窄。

参考文献:

[1] 舒林森,王家胜,白海清,等. 磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验[J]. 机械工程学报,2019,55(9):217-223.
SHU L S,WANG J S,BAI H Q,et al. Numerical simulation and experiment of laser cladding process on worn shaft surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2019,55(9):217-223.

[2] 李豪,王彦芳,石志强,等. 基于椭圆热源模型的激光熔覆温度场与流场数值模拟[J]. 应用激光,2017,37(2):68-72.
LI H,WANG Y F,SHI Z Q,et al. Numerical simulation of temperature and flow field of laser cladding based on elliptical heat source model[J]. Applied Laser,2017,37(2):68-72.

[3] 于天彪,宋博学,郗文超,等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(4):84-89.
YU T B,SONG B X,TONG W C,et al. Influence and optimization of laser cladding process parameters on morphology of cladding layer[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2019,40(4):84-89.

[4] 熊安辉,丁洁琼,刘延辉,等. 钛合金表面激光熔覆熔池的数值模拟[J]. 应用激光,2019,39(3):381-386.
XIONG A H,DING J Q,LIU Y H,et al. Numerical simulation of laser cladding molten pool on titanium alloy surface[J]. Applied Laser,2019,39(3):381-386.

[5] 李昌,于志斌,高敬翔,等. 激光熔覆工艺热-弹-塑-流多场耦合数值模拟与试验[J]. 中国表面工程,2019,32(1):124-134.
LI C,YU Z B,GAO J X,et al. Numerical simulation and experiment of thermo-elastic-plastic-flow multi-field coupling in laser cladding process[J]. China Surface Engineering,2019,32(1):124-134.

[6] 段爱琴,巩水利,刘飞. 激光焊接工艺参数对5A90红外温度场特征的影响[J]. 焊接学报,2017,38(11):97-102.
DUAN A Q,GONG S L,LIU F. Effect of laser welding process parameters on the characteristics of 5A90 infrared temperature field[J]. Transactions of The China Welding Institution,2017,38(11):97-102.

[7] 陈丽,陆祖辉,赵伟,等. 焊接工艺参数对焊接接头温度场的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(15):150-153.
CHEN L,LU Z H,ZHAO W,et al. Influence of welding process parameters on temperature field of welded joints[J]. Hot Working Technology,2019,48(15):150-153.

[8] 曾大文,谢长生. 激光熔覆熔池二维准稳态流场及温度场的数值模拟[J]. 金属学报,1999(6):604-610.
ZENG D W,XIE C S. Numerical simulation of two-dimensional quasi-steady-state flow field and temperature field of laser cladding molten pool[J]. Acta Metall Sin,1999(6):604-610.

[9] SHRESTHA S,CHOU K. Computational analysis of thermo-fluid dynamics with metallic powder in SLM[C]//Phoenix:2018 TMS Annual Meeting & Exhidition,2018.

[10] CHANG Q M,CHEN C J,CHEN X,et al. Modeling on laser cladding on In718 superalloy[J]. Applied Mechanics and Materials,2011(80/81):46-50.

[11] KONG F,KOVACEVIC R. Modeling of heat transfer and fluid flow in the laser multilayered cladding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B (Process Metallurgy and Materials Processing Science),2010,41(6):1310-1320.

[12] 王翔宇,王罡,罗升,等. T15高速钢异质材料激光熔覆过程的多相流模型[J]. 中国表面工程,2019,32(1):117-123.
WANG X Y,W Y,LUO S,et al. Multiphase flow model of

laser cladding process of T15 high speed steel heterogeneous material[J]. China Surface Engineering，2019，32(1)：117–123.

[13] 王维，刘奇，杨光，等. 钛合金激光熔凝熔池流场及温度场的数值模拟[J]. 应用激光，2014，34(5)：389–394.
WANG W，LIU Q，YANG G，et al. Numerical simulation of flow field and temperature field in laser melting pool of titanium alloy[J]. Applied Laser，2014，34(5)：389–394.

[14] 孙道金，刘继常，李钦栋. 激光熔覆纯镍熔池底部组织生长的相场法模拟[J]. 中国激光，2013，40(4)：0403005.
SUN D J，LIU J C，LI Q D. Phase field simulation of laser cladding microstructure growth at the bottom of pure nickel molten pool[J]. China Laser，2013，40(4)：0403005.

[15] 陈根余，廖生慧，周聪. 高功率激光焊接 SUS304 不锈钢数值模拟与试验研究[J]. 热加工工艺，2014(23)：166–170.
CHEN G Y，LIAO S H，ZHOU C. Numerical simulation and experimental study of high power laser welding of SUS304 stainless steel[J]. Hot Work Process，2014(23)：166–170.

[16] BEDENKO D V，KOVALEV O B. Modelling of heat and mass transfer in the laser cladding during direct metal deposition[J]. Thermophysics and Aeromechanics，2013，20(2)：251–261.

[17] REN Z，TIAN Y L，ZHOU M Y，et al. Simulation of temperature and stress field of titanium alloys under laser cladding[J]. Advanced Materials Research，2011(301/303)：87–92.

[18] CHAN K C. A generalized arbitrary Lagrangian–Eulerian method for incompressible flows with sharp interfaces[J]. Journal of Computational Physics，1975，17(3)：311–331.

[19] MORVILLE S，CARIN M，PEYRE P，et al. 2D longitudinal modeling of heat transfer and fluid flow during multilayered direct laser metal deposition process[J]. Journal of Laser Applications，2012，24(3)：032008.

[20] 练国富，姚明浦，陈昌荣，等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. 表面技术，2018，47(9)：229–239.
LIAN G F，YAO M P，CHEN C R，et al. Quality and efficiency control method of laser cladding multi–lap overlap forming[J] .Surface Technology，2018，47(9)：229–239.

[21] LE T N，LO Y L. Effects of sulfur concentration and marangoni convection on meltpoolformation in transition mode of selective laser melting process[J]. Materials and Design，2019，179：107866.

[22] MILLS K C. IN 718–Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys–ni[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology，2002，74(5)：181–190.

[23] LIAN G，YAO M，ZHANG Y，et al. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi–track overlapping laser cladding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，97(9)：2397–2407.

[24] 崔承云，方翠，张文龙. Marangoni 流对激光熔覆热行为和熔体流动行为的影响[J]. 应用激光，2018，38(3)：409–416
CUI C Y，FANG C，ZHANG W L. Influence of Marangoni flow on thermal behavior and melt flow behavior of laser cladding[J]. Applied Laser，2018，38(3)：409–416.



第一作者：李宝星(1989—)，男，硕士研究生，研究方向为激光熔覆数值仿真。E–mail：438007705@qq.com。



通信作者：赵明娟(1976—)，女，副教授，硕导，研究方向为金属基复合材料的计算模拟。E–mail：zhaomingjuan100@163.com。

(责任编辑：吴海燕　姜红贵)