激光熔覆熔池温度场及流场数值模拟研究进展

罗佳勤[a]，朱刚贤[a]，李加强[a]，谢光耀[a]，王丽芳[b]，石世宏[a]

（苏州大学 a.机电工程学院 b.工程训练中心，江苏 苏州 215137）

摘要：简述了激光熔覆熔池的受力，包括表面张力、黏性剪力、重力以及保护气压力等，并从组织生长和熔池流淌对熔覆层的形成机理作了简要分析。同时，对激光熔覆仿真模拟中采用的不同热源模型的能量分布规律和方程进行了归纳，包括表面高斯热源、表面环形热源、高斯体热源、椭圆球热源、组合体热源等。在此基础上，分类评述了近年来国内外激光熔覆熔池温度场及流场的数值模拟方面的研究进展，并分析了各种热源模型的优势及不足，总结了不同热源的适用环境及获得的温度场、流场分布规律。此外，对熔池自由液面的研究方法进行了总结，归纳了温度场流场数值模拟模型的验证方法。同时，针对激光熔覆熔池数值模拟研究存在的问题，分别从数值模型、边界条件等方面进行了归纳，最后对其未来的发展方向进行了展望。

关键词：激光熔覆；温度场；流场；热源模型；数值模拟

中图分类号：V261.8 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2023)04-0067-18

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.005

Numerical Simulation on Temperature Field and Flow Field of Molten Pool in Laser Cladding

LUO Jia-qin[a], ZHU Gang-xian[a], LI Jia-qiang[a], XIE Guang-yao[a], WANG Li-fang[b], SHI Shi-hong[a]

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering, b. Center of Engineering Training, Soochow University, Jiangsu Suzhou 215137, China)

ABSTRACT: The stress of laser cladding molten pool, including surface tension, viscous shear, gravity and shielding gas pressure, was briefly expounded, and the formation mechanism of cladding layer was briefly analyzed from the aspects of tissue growth and molten pool flow. Moreover, a reasonable heat source model was established to obtain accurate numerical simulation results. The energy distribution laws and equations of different heat source models used in laser cladding simulation were summarized, including surface Gaussian heat source, surface annular heat source, Gaussian body heat source, ellipsoid heat

收稿日期：2021–11–23；**修订日期：**2022–04–01

Received：2021-11-23；**Revised：**2022-04-01

基金项目：国家自然科学基金（52105387）；国家重点研发计划（2016YFB1100300）；中国博士后科学基金（2021M692349）；江苏省普通高校自然科学研究计划（21KJB460019）；“香江学者计划”（XJ2021032）；苏州市科技计划项目（SYC2022143）

Fund：The National Nature Science Foundation of China (52105387); The National Key Research and Development Plan (2016YFB1100300); China Postdoctoral Science Foundation (2021M692349); Natural Science Research Projects of General Universities in Jiangsu Province (21KJB460019); Hong Kong Scholars Program (XJ2021032); The Sci-Tech Plan of Suzhou Municipal of China (SYC2022143)

作者简介：罗佳勤（1996—），男，硕士研究生，主要研究方向为激光金属增材制造技术。

Biography：LUO Jia-qin (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: laser additive manufacturing for metal.

通讯作者：朱刚贤（1980—），男，博士，副教授，主要研究方向为激光金属增材制造及数值模拟。

Corresponding author：ZHU Gang-xian (1980-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: laser metal additive manufacturing and numerical simulation.

引文格式：罗佳勤，朱刚贤，李加强，等. 激光熔覆熔池温度场及流场数值模拟研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 67-84.

LUO Jia-qin, ZHU Gang-xian, LI Jia-qiang, et al. Numerical Simulation on Temperature Field and Flow Field of Molten Pool in Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 67-84.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

source, compound heat source, etc. Based on the depth analysis of their characteristics, the research progress of numerical simulation of temperature and flow fields of laser cladding pool in China and abroad in recent years was summarized respectively. In addition, the advantages, disadvantages and application scope of various heat source models were analyzed and the distribution laws of temperature field and flow field obtained by different heat sources were discussed, providing a reference for the selection of heat source models. Furthermore, the free surface of the molten pool directly determined the size profile of the cladding layer and the research methods of free surface of molten pool were summarized, including Level Set, Volume of Fluid, Coupled Level-Set with VOF, Phase Field, Arbitrary Lagrangian-Eulerian, etc. By reviewing the research progress of free surface tracking, the advantages and disadvantages of various methods were clarified. Then, while establishing a reasonable numerical analysis model, it was also necessary to verify the model, so the verification methods of flow and temperature fields were described in detail, including measurement and non-contact measurement, as well as in-situ detection and non-in-situ detection. At the same time, numerical simulation technology is mature and simulation of temperature field and flow field of laser cladding is beneficial to revealing metallurgical dynamics of molten pool, but there are still some deficiencies in the molten pool simulation. The problems existing in the numerical simulation of laser cladding pool are pointed out from the aspects of numerical model and boundary conditions, and a number of targeted responses and solutions are raised. Finally, based on the developing status of the simulation research, its future development direction is prospected: one of the future development trends of numerical simulation in laser cladding pool will be the free-form surface, and will give a scientific explanation of the flow behavior and morphology changes of the molten pool under non-planar condition.

KEY WORDS: laser cladding; temperature field; flow field; heat source model; numerical simulation

激光熔覆作为一种材料表面改性和修复新工艺，通过铺粉或送粉的方式在基体表面添加熔覆材料，同时利用高能激光束使熔覆层材料快速熔凝，在基体表面形成冶金结合良好的熔覆层，从而改变基体表面的组分，提高材料的表面性能[1]。在激光熔覆过程中，熔池是非稳态的，会受到 Marangoni 流动、粉末喷射、粉末输送和保护气体中的湍流以及可变加工参数的干扰[2]。大量研究表明，由表面张力驱动的 Marangoni 力对熔池流动起着重要影响[3-4]，这也是决定熔覆层形貌和稀释性的关键因素。熔池内的流淌行为会对材料组织的演变产生直接影响，液态熔池的流体动力学和几何演变与增材制造材料的力学性能直接相关。由于熔池是在极其短暂的时间内形成的，且熔池尺寸较小，几乎无法精确地在实验过程中实现对熔池瞬时演变的实时监控。因此，随着计算机技术的发展，通过有限元仿真的方法对熔池内部动态流淌行为进行数值模拟成为主流。在激光熔覆熔池数值模拟中，合理的热源模型是获得精确的数值模拟结果的关键。一般根据实际工况需求的激光热源建立对应的热源模型。材料消光长度大小主要取决于材料对某个特定激光波长的吸收系数，根据材料对激光的消光长度，激光熔覆过程中热源模型可分为表面热源和体热源。若激光作用于材料表面，激光能量传递较短距离后便衰减为 0，则可以假设能量在材料表面被完全吸收，基体材料对激光能量的吸收可称为面吸收；若传递深度较深，甚至超过材料厚度，则可称为体吸收[5]。

本文首先简述了激光熔覆熔池的形成机理，然后针对目前应用极为广泛的几种热源模型下激光熔覆熔池数值模拟研究进展进行分类评述，总结了不同热源下熔池温度场、流场数值模拟的研究现状，最后对激光熔覆的熔池模拟问题进行了展望。

1 激光熔覆熔池的形成机理

在激光熔覆过程中，激光输入的能量密度较高，热传导和对流控制着熔池物理演变过程，直接决定了熔池中的温度场及流场分布规律。激光熔覆熔池可以在极短的时间内达到平衡，其中存在较大的温度梯度和快速的循环对流。聚焦的激光束照射到金属基板上，基板温度升高，熔化形成熔池，喷嘴将金属粉末同步喷射到熔池中，熔池中的液态金属在 Marangoni 张力作用下发生对流，熔池内部温度逐渐分布均匀，熔体流向熔池的边缘，到达熔池表面，凝固形成熔覆层。Song 等[6]分析了熔池形成、内部对流模式以及熔覆层的凝固行为。

熔池中受力复杂，熔池内流体流动的主要驱动力是浮力和表面张力梯度与黏性剪切力相平衡所产生的 Marangoni 流[7]。史建军[8]分析了熔池三维空间受力情况。熔池的受力分析如图 1 所示，主要为表面张力 F_γ、黏性剪力 F_μ、重力 G 以及保护气压力 F_p，θ 为基板偏转角。熔融金属在表面张力、重力、黏性剪力和保护气压力的共同作用下，形成动态平衡的金属熔池。其中，表面张力对熔池的影响最大，熔池中流体的流动主要是受到表面张力驱动的 Marangoni 对流作用。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

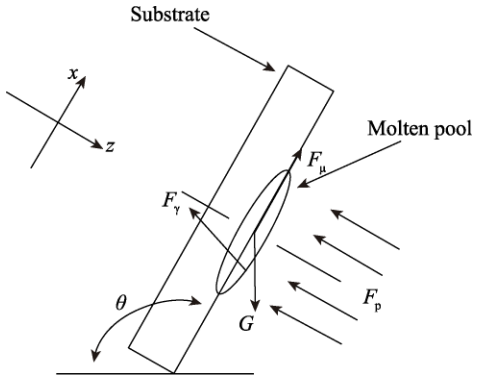


图 1 熔池受力分析[9]
Fig.1 Stress analysis of molten pool[9]

2 激光熔覆数值模拟热源模型研究进展

2.1 表面高斯热源

目前大多数激光熔覆数值模拟采用高斯热源模型，如图 2 所示。激光能量在空间呈正态分布的特点，中心多，边缘少，符合实际加工过程。但忽略了熔池深度方向上的能量分布，因此不适合熔池较深的工况。

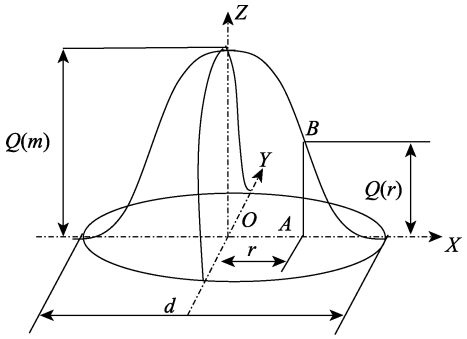


图 2　高斯热源模型[10]
Fig.2 Gaussian heat source model[10]

热流密度方程的表达式为[10]：

$$q(r)=q_{\mathrm{m}}\exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \tag{1}$$

$$q_{\mathrm{m}}=\frac{\eta Pc}{\pi} \tag{2}$$

式中：$q(r)$为半径为 r 处的表面热流密度，W/m^2；R 为距光斑中心的距离，m；c 为热流集中系数，m^2；q_{m} 为热源中心处热流密度最大值，W/m^2；P 为激光功率，W；η 为激光利用率。

高斯面热源适用于熔池宽度和深度、熔覆层厚度较小的加工条件。针对熔池温度场数值模拟，王志坚等[10]使用高斯面热源对 TC4 钛合金单道单层激光熔池的凝固过程进行了数值模拟，研究发现，单道激光熔覆中，由于尾部热量传递迅速，熔池前端相对后端热量更为集中，熔深更大。随着激光功率的增大，熔池熔深及热影响区范围由于能量输入增大而逐渐增大。Pant 等[11]基于有限元法建立了熔池混合模型，研究了激光沉积熔化过程中熔池的传热行为。结果表明，熔池呈前沿椭圆、尾部拉伸的彗星状，熔池宽度随激光功率的增加而增大（如图 3 所示）。冷却速率会随着扫描速度的增加而增加，而提高激光功率会对增大熔池内的温度梯度，冷却速率相应增加。

此外，也有学者对高斯面热源下的熔池三维形貌模拟进行了研究。Fallah 等[12]提出了一种有限元模型瞬态模拟预测激光粉末沉积过程中熔池的尺寸形貌演变，结果表明，仿真预测的熔池轮廓与实验相近，但并没有对熔池的温度场和流场做出具体分析。Gao 等[13]建立了激光熔覆过程中单道加工的三维数值预测模型，采用高斯分布热源，基于生死单元法，无需预设熔覆层的几何形状，同步计算熔覆层的瞬态温度场和几何结构，所得到的覆层形状和实验结果吻合良好，如图 4 所示。此外，他们还分析了工艺参数对熔覆层温度场和几何形状的影响。

部分学者在采用高斯面热源对熔池流场进行模拟时，会提前预设熔覆层的三维形状。刘晗等[14]在激光沉积立体成形过程的温度场与应力场数值模拟研究中，根据真实沉积层尺寸轮廓建立了三维模型。在此基础上，建立了丝粉同步激光沉积熔池有限元模型，得到了熔池流场分布规律。在熔池的横截面上形成 2 个对称分布的环流，径向产生 2 个前强后弱的环

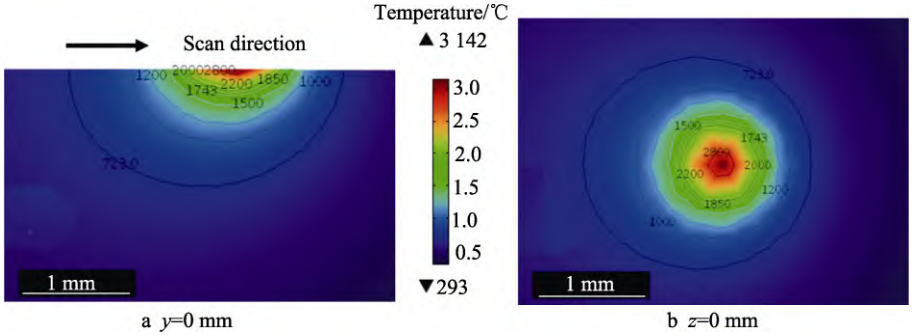


图 3　沿扫描方向的温度分布（Kelvin）[11]
Fig.3 Temperature (in Kelvin) distribution along scanning direction[11]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

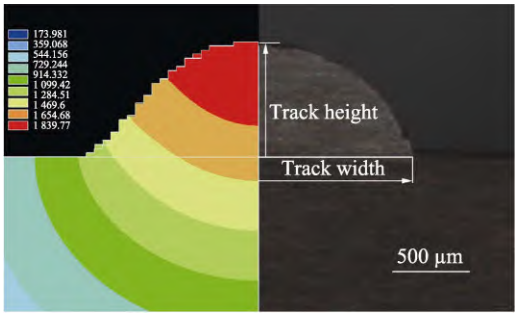


图 4　单道熔覆层横截面仿真与实验结果对比[13]

Fig.4 Comparison of cross sections of the single-track in numerical simulation and experiment[13]

流，熔池上表面的流体分布呈现由中心向边缘扩散的规律。Li 等[15]基于 COMSOL 软件建立了圆盘激光熔覆过程的多场耦合模型，并利用 CALPHAD 方法计算了材料的热物性参数。采用高斯面热源，综合考虑激光束和粉末之间的相互作用以及熔池内部的受力情况，得到了圆盘激光熔覆过程中温度场、流场的变化规律。熔池呈椭球形，最高温度出现在熔池中心靠后位置，在熔覆初期，熔池流速较低，热传导在熔池能量传递中起主要作用；随着熔覆过程的进行，熔池内熔融金属的流速加快，此时热对流起主要作用，如图 5 和图 6 所示。

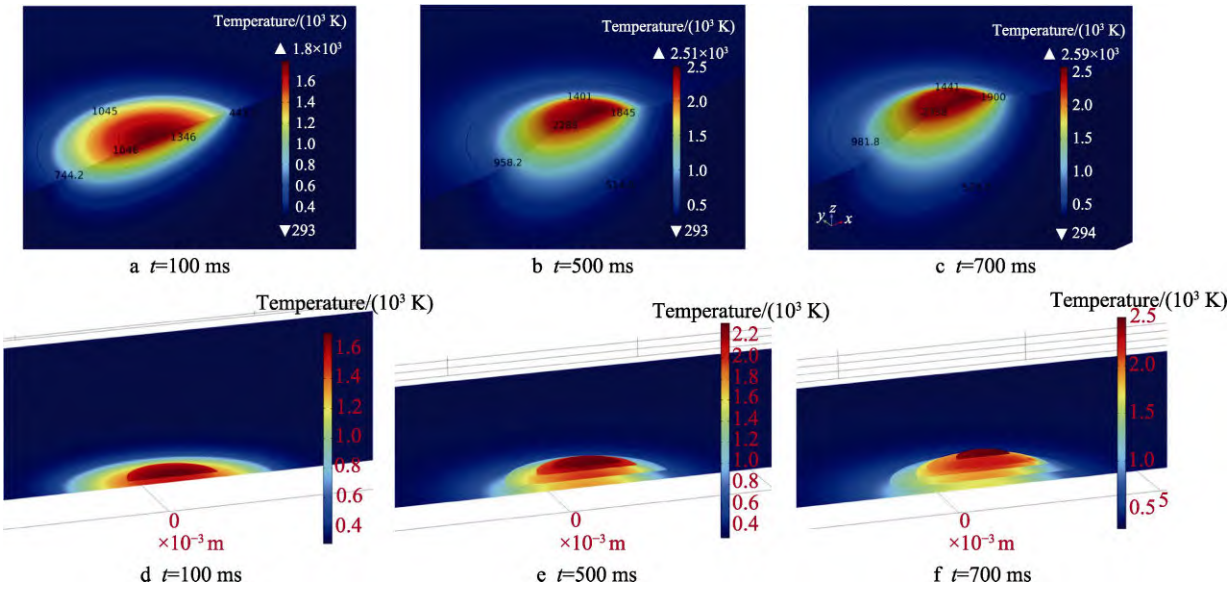


图 5　不同时刻熔池的温度场分布[15]

Fig.5 Temperature field of the molten pool at different time[15]

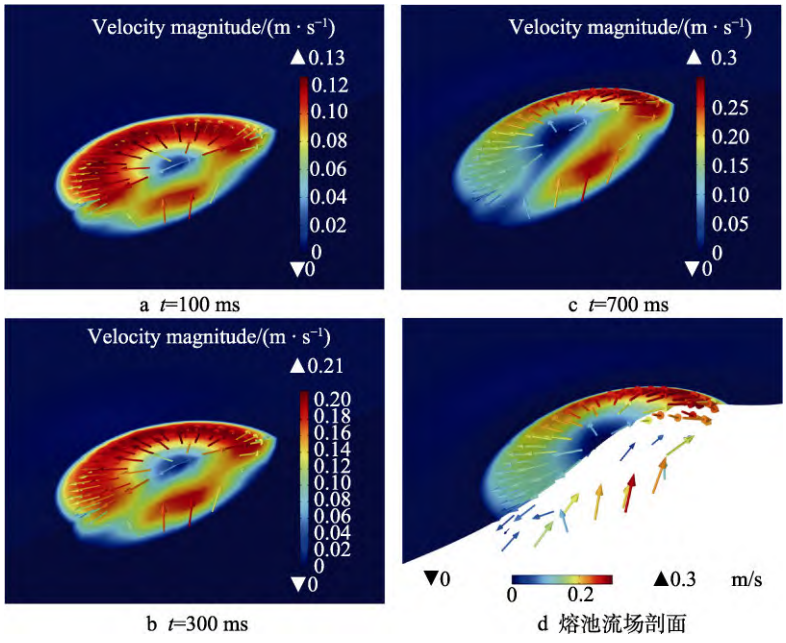


图 6　不同时刻熔池的流场分布[15]

Fig.6 Flow field of the molten pool at different time[15]: a) t=100 ms; b) t=300 ms; c) t=700 ms; d) flow field profile of the melt pool

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2　表面环形热源

表面环形热源是中空环形激光熔覆数值模拟特有的一种热源模型，基于“光束中空、光内送粉”的中空环形激光熔覆新工艺，相较于传统的“实心激光”熔覆有着独特优势。其基本原理是通过光束转换系统[16-17]将实心光束转换成中空环形光束，使能量分布集中区域由中心变为外缘（如图 7 所示），能够消除高斯实心激光熔覆时造成的熔道边缘熔不透现象，改善冶金结合性差的缺点[18]。

在其环形区域的能量分布也如类高斯分布，能量分布函数为[8]：

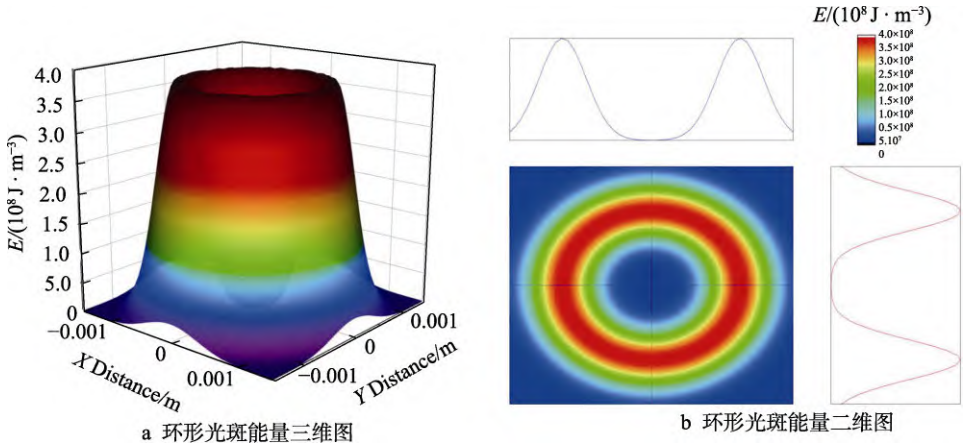
$$q_z(x,y)=\frac{2\eta P}{\pi(R_0^2+2R_0z\cot\varphi)}\exp\left\{-\frac{2\left[\sqrt{x^2+y^2}-(z\cot\varphi+\xi R)\right]^2}{R_0^2}\right\} \tag{3}$$

式中：R_0 为激光在焦点位置处的外径，mm；z 为离焦量，mm；φ 为中空激光束与水平方向夹角；ξ 为能量峰位置系数。

田美玲等[18]运用 ANSYS 有限元分析软件模拟了环形中空激光熔池温度场，并对三维流场分布进行了理论分析，中空激光熔覆熔池流场呈对称的四环流分布，如图 8 所示。石皋莲[20]采用 ANSYS 有限元软件，基于表面中空环形热源模型，对 45 钢试样熔覆 Fe313 合金的熔池瞬态温度场进行了模拟，得到了中空激光熔覆熔池温度场的演变规律。由于熔覆过程中的热积累效应，熔池内的温度随着扫描时间、高度的增加逐渐升高。熔池的形状、位置和能量密度的分布以及成形件的质量都会随占空比的改变而发生显著变化。李广琪等[21]基于 ANSYS 软件，利用 APDL 语言结合生死单元法模拟了中空环形激光的加载，得到了熔覆层温度场的分布规律。熔覆过程中温度场整体分布呈“彗星状”，扫描初始阶段，光斑呈现与理论能量分布相同的完整环形。随着扫描过程的推进，高温区域整体后移，逐渐由环形向马鞍形演变，如图 9 所示。这证实了中空环形激光能量“中间低、边缘高”的特点。此外，熔覆层温度场表层呈现出“深谷状”，两侧高、中间低，且在熔覆层深度方向，温度随深度增加逐渐降低，如图 10 所示。

2.3　高斯体热源

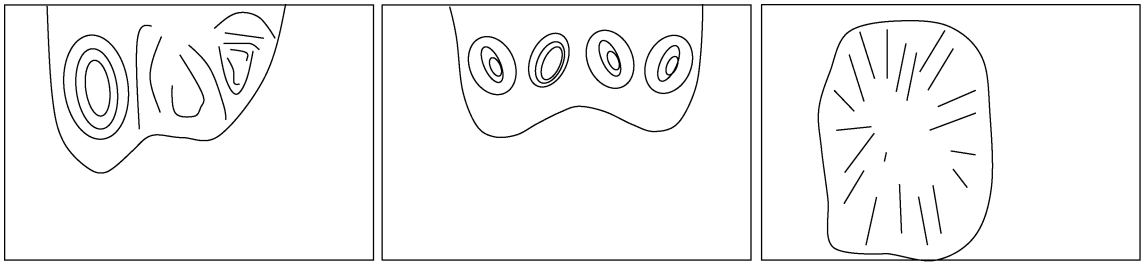
在激光熔覆实际加工过程中，激光光束以一定速度移动，且能量分布并不均匀，尤其是垂直于扫描方向的光源能量分布差异较大，而表面热源模型并不能深入到熔池内部。因此，体热源应运而生，体热源的激光能量不仅沉积在粉末层的表面，而且可以穿透到



a 环形光斑能量三维图　　b 环形光斑能量二维图

图 7　中空环形激光热源能量分布[19]

Fig.7 Energy distribution of annular laser heat source[19]: a) three-dimensional image of ring-shaped spot energy; b) two-dimensional image of ring-shaped spot energy



a *XZ*平面　　b *YZ*平面　　c *XY*平面

图 8　环形中空激光熔池内三维流场[19]

Fig.8 Three-dimensional flow field of the molten pool by annular laser[19]: a) flow distribution on *XZ* plane; b) flow distribution on *YZ* plane; c) flow distribution on *XY* plane

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

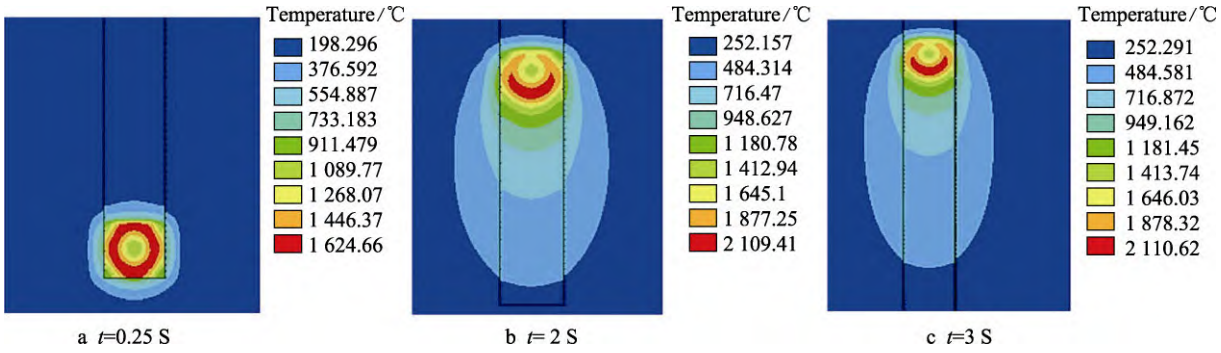


图 9　不同时刻中空环形激光的温度分布云图[21]

Fig.9 Distribution cloud chart of temperature field by annular laser at different time[21]

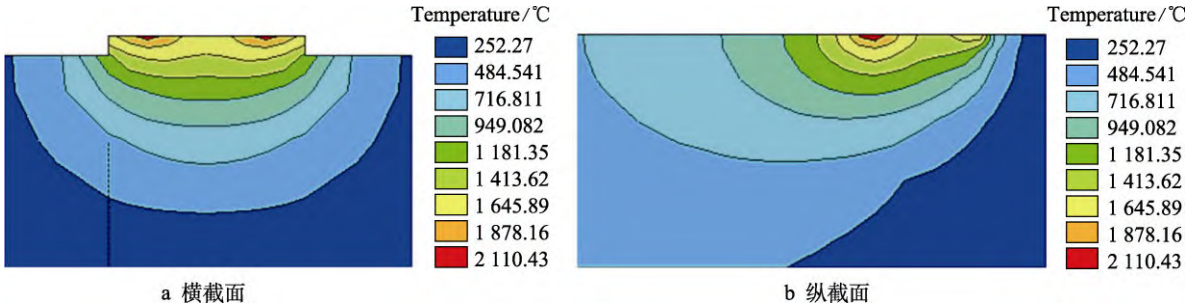


图 10　t=2.5 s 时刻熔覆层横、纵截面的温度分布云图[21]

Fig.10 Temperature distribution cloud chart of cladding cross section and longitudinal section at t=2.5 s[21]: a) cross section; b) longitudinal section

熔覆层内部，提高了熔池瞬态温度场或者流场的计算精度[22]。有学者基于高斯面热源模型，建立了旋转高斯体热源，如图 11 所示。旋转 Gauss 曲面体是将 Gauss 曲线围绕其对称轴旋转而形成的。假设热源能量全部分布在此曲面体内部，在截面热流密度呈 Gauss 分布。

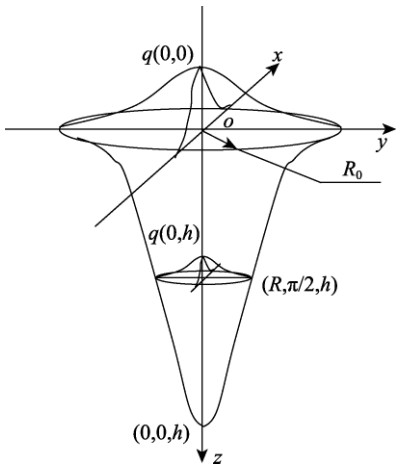


图 11　旋转高斯曲面体热源[23]

Fig.11 Rotary Gaussian curved surface body heat resource[23]

能量分布函数为[23]：

$$q(x,y,z)=\frac{3c_s Q}{\pi H\left(1-\frac{1}{e^3}\right)}\exp\left[\frac{-3c_s}{\lg\frac{H}{z}}(x^2+y)\right] \tag{4}$$

$$c_s=\frac{3}{R_0^2} \tag{5}$$

式中：e 为自然底数；R_0 为热源开口半径；H 为热源高度；Q 为热源功率。

高斯体热源是激光熔覆熔池数值模拟应用最为广泛的热源模型。张可容等[24]基于旋转高斯体积热源模型，对 TC4 钛合金激光深熔焊小孔进行了激光焊瞬态过程的数值模拟，结合实验进一步分析了不同工艺参数对小孔形貌的影响。研究表明，随着激光能量密度增大、激光功率增大或光斑直径减小，小孔深度加大、尺寸变宽，光斑直径是对小孔形貌影响最大的工艺参数。Sun 等[25]基于 fluent 软件，采用离散相模型对激光定向能量沉积的粉末颗粒进行了模拟，并结合高斯体热源模型，分析了粉末沉积层形貌以及温度场和速度场分布。结果表明，在高速激光能量直接沉积中，由于送粉引起的压力，在粉末作用区向下的流速占据主导，如图 12 所示。

在基于高斯体热源的熔池形貌数值模拟中。Chai 等[26]基于元胞自动机法建立了倾斜基板上激光熔覆的数值模型，模拟了不同倾斜角度对熔覆层相对截面积、宽度、高度以及顶点偏移量的影响，如图 13 所示。结果表明，相对截面积随基板倾角的增大先增加、后减小、然后趋于稳定；熔覆层的宽度随倾斜角度的增大不断增大，高度先增大、后减小；随着基板倾角的增大，熔覆层重力分量越来越大，顶点偏移量逐渐增加。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

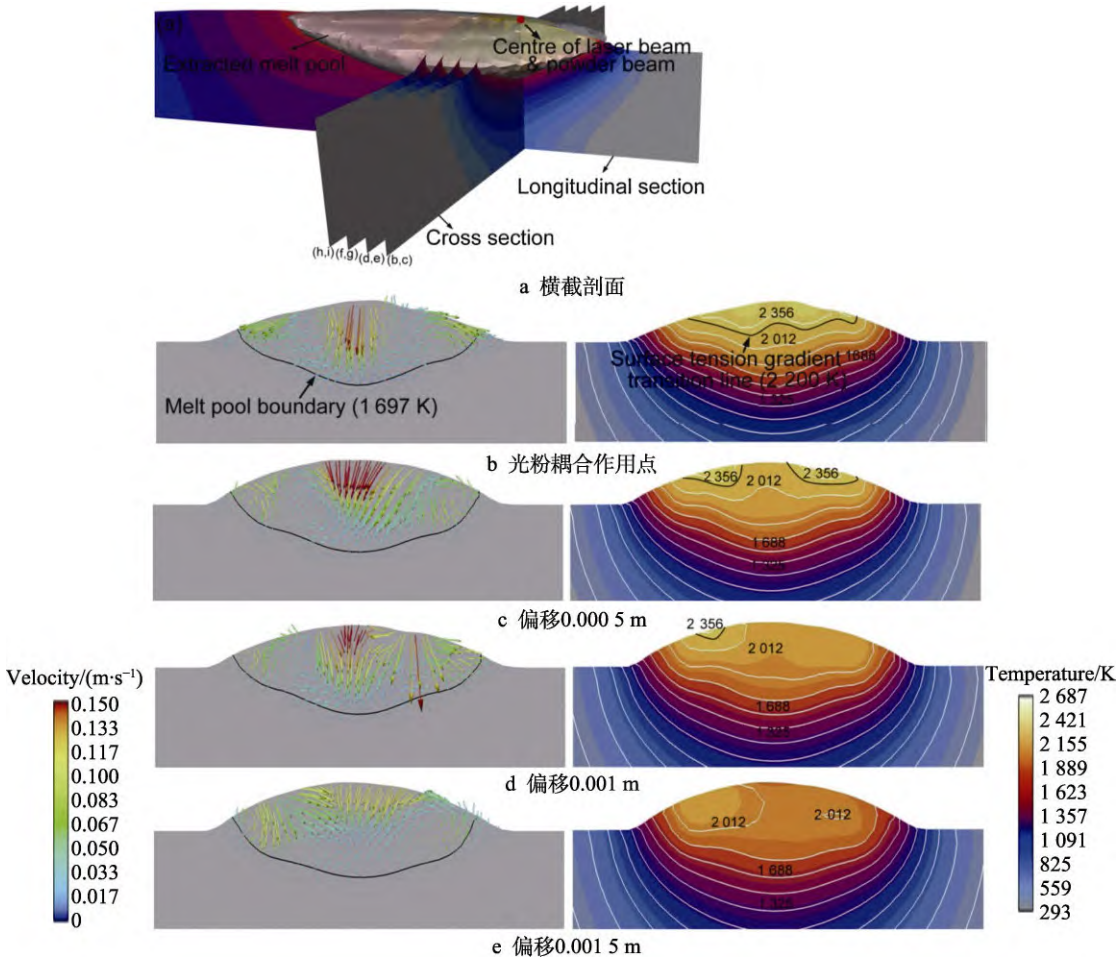


图 12　单道沉积层的速度场和流场分布[25]

Fig.12 Velocity and temperature distribution of single-track deposition layer[25]: a) cross-sectional profile; b) cross-section under the centre of laser beam and powder beam; c) offset 0.0005 m; d) offset 0.001 m; e) offset 0.0015 m

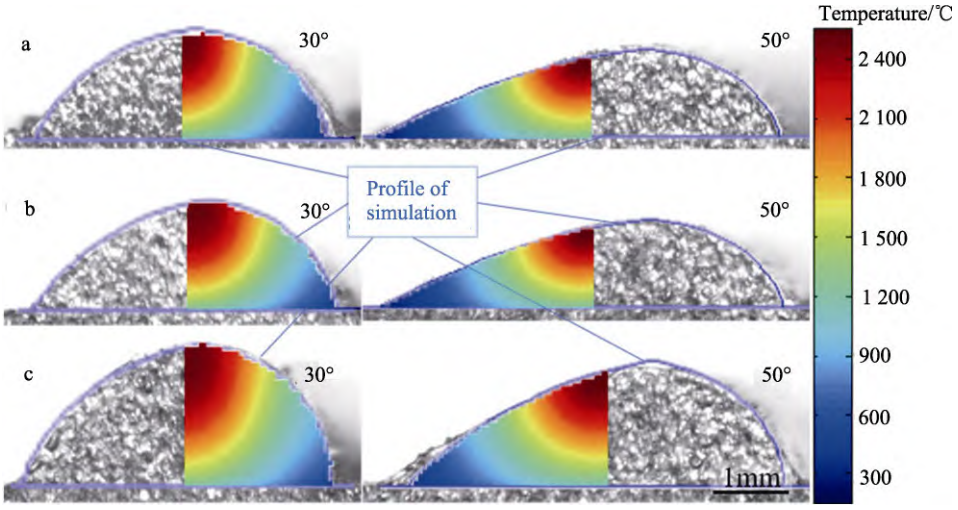


图 13　不同倾角下熔覆层的模拟与实验结果对比[26]

Fig.13 Comparison of cladding layer at different inclined angles in simulation and experiment[26]

2.4　椭圆球热源

激光熔覆中熔池内的能量分布往往不是三维高斯旋转体形，而为了更准确地模拟熔池尺寸及形状，提出了椭球分布体热源。椭圆球热源有前后对称的单椭圆球热源和前后能量分布不同的双椭圆球热源 2 种，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

早期就有学者提出半球体热源[27]，其能量分布函数为：

$$q(x,y,z)=\frac{6Q}{\pi c^3\sqrt{\pi}}\exp\left(\frac{-3x^2}{c^2}+\frac{-3y^2}{c^2}+\frac{-3z^2}{c^2}\right) \tag{6}$$

式中：$q(x,y,z)$为坐标系上点(x,y,z)的热流密度；c为球体半径；Q为热输入率。

根据大量实验观察发现，实际的热源并非前后对称分布。因此，研究人员提出双椭圆球热源（如图 14 所示），前、后部分分别是 2 个 1/4 的椭圆球。

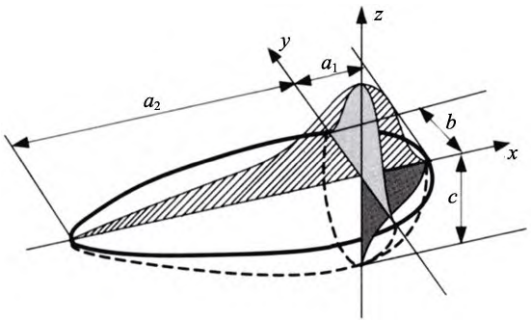


图 14　双椭球热源[28]

Fig.14 Double ellipsoid heat source[28]

其前、后能量分布函数为[28]：

$$\begin{cases} q_{\mathrm{f}}(x,y,z)=\dfrac{12\sqrt{3}f_{\mathrm{f}}Q}{a_{\mathrm{f}}b_{\mathrm{h}}c_{\mathrm{h}}\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\dfrac{3x^2}{a_{\mathrm{f}}^2}-\dfrac{3y^2}{b_{\mathrm{h}}^2}-\dfrac{3z^2}{a_{\mathrm{h}}^2}\right), x\geqslant 0 \\ q_{\mathrm{r}}(x,y,z)=\dfrac{12\sqrt{3}f_{\mathrm{r}}Q}{a_{\mathrm{r}}b_{\mathrm{h}}c_{\mathrm{h}}\pi\sqrt{\pi}}\exp\left(-\dfrac{3x^2}{a_{\mathrm{r}}^2}-\dfrac{3y^2}{b_{\mathrm{h}}^2}-\dfrac{3z^2}{a_{\mathrm{h}}^2}\right), x<0 \end{cases} \tag{7}$$

式中：q_{f}、q_{r}分别为前、后半椭球体内的热流分布；a_{f}、a_{r}分别为前后半椭球的半轴；b_{h}、c_{h}分别为前后半椭球的另外 2 个半轴，2 椭球的这 2 个短半轴分别相等；f_{f}、f_{r}分别为前后半椭球体内热输入的份额，$f_{\mathrm{f}}+f_{\mathrm{r}}=1$。

由于椭圆球热源产生的熔池尺寸较大，因此被广泛应用于激光焊接[29-30]、预置式激光熔覆等激光加工工艺的数值模拟。Hocine 等[31]分析了 3 种热源模型（椭球热源、双椭球热源、圆柱形热源）在模拟选区激光熔化的熔池温度场演变及熔池轮廓时的差异，结果表明，3 种热源模型在计算温度场和熔池轮廓时都有自己的独特优势，圆柱形热源适用于计算熔池温度场，而椭球热源在计算熔池轮廓时精度更高。罗心磊等[32]使用 ANSYS APDL 对单道选区激光熔化进行了温度场模拟，将高斯面热源和双椭球热源下的仿真结果进行了对比。结果表明，双椭球热源由于能量分布更接近实际激光热源，计算结果和实验结果的吻合性相较于高斯面热源更好。在选区激光熔化过程中，在不改变激光输入能量密度的情况下，提高激光功率和扫描速度会显著增大熔池的深度和宽度，如图 15 所示。

也有学者针对不同工艺参数下熔池的温度场变化做了深入研究。郝晓杰[33]采用 ABAQUS 软件分析了选区激光熔化过程中温度场的变化规律，采用双椭球热源，其将激光能量输入分布在一定的体积内，以热流密度的形式施加在材料模型的节点上，研究了不

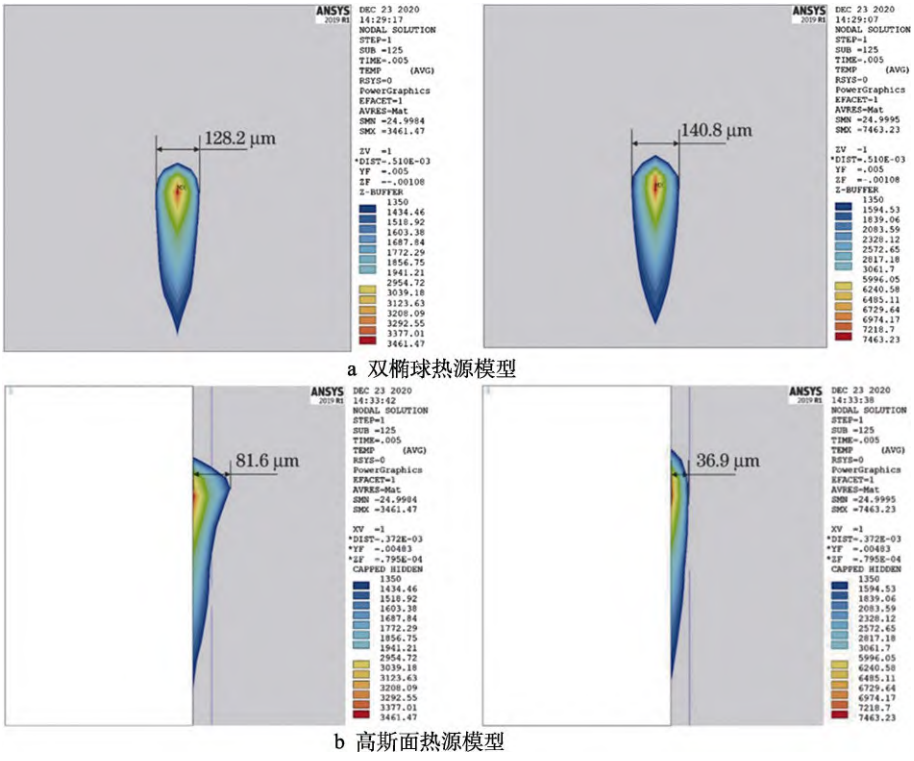


图 15　采用不同热源模型计算得到的熔池尺寸[32]

Fig.15 Molten pool sizes calculated by different heat source models[32]: a) double ellipsoid heat source model; b) Gaussian surface heat source model

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同工艺参数对激光熔化过程中温度场的影响规律。当只有激光功率增加时，熔池内平均升温速率和降温速率以及熔池尺寸随之增加；当只有扫描速度增加时，熔池内平均升温速率和降温速率稳定增加，而熔池尺寸会相对减小；扫描间距会对熔道之间的重熔效果产生影响，而铺粉厚度对扫描层间的结合效果产生作用。

2.5　组合体热源

单一的体积分布热源简化了热源在熔池深度方向的分布规律，并没有区分激光能量在熔池表面和内部的分布差异[34]。于是衍生出了组合体热源，如分段体热源、双椭球圆锥组合热源、高斯面热源和体热源相结合的组合热源等。组合热源结合了面热源和体热源的优点，更贴合实际工况，具有更高的模拟精度。在组合热源中，面热源一般取高斯型热流分布面热源，体热源一般取线性衰减高斯柱体热源或热流递减的旋转体热源[35]。

蔡海鹏等[36]在移动高斯热源的基础上，对焊接热源进行改进，建立了分段热源模型，利用粗网格与适当的热源分段计算了焊接变形问题，并结合局部细化网格技术模拟了应力演变。汪奇兵等[37]采用双椭球热源的上部和高斯旋转体热源的下部结合的组合热源对 Invar 钢激光–MIG 复合焊过程中的熔池热、流场进行了模拟，结果表明，采用该组合热源模拟得到的熔池温度场分布与实际实验结果基本相符。谢印开等[38]建立了抛物线旋转体热源（下半部）与圆柱体热源（上半部）的组合热源（如图 16 所示）对激光选区熔化加工过程中熔池尺寸、熔体流动以及气液自由界面具体扰动进行了模拟。在单道熔覆中，扫描速度和粉层厚度在气孔形成因素中占据主导。对于多道熔覆，影响气孔形成的因素主要为扫描间距，且气孔数量随着扫描间距的增加而增加。

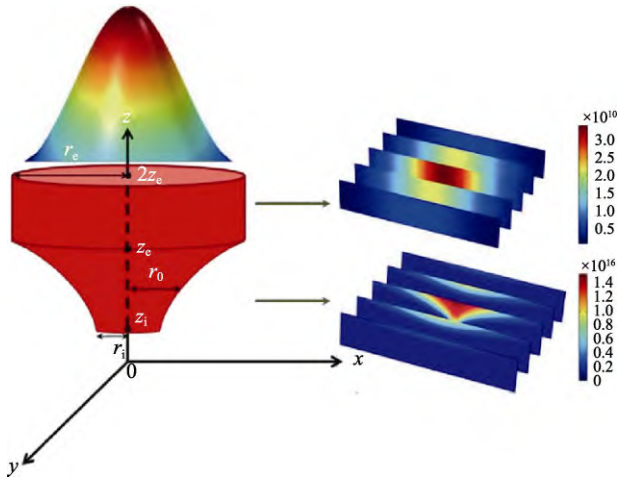


图 16　组合旋转体热源[38]

Fig.16 Combined rotary volumetric heat source[38]

王怡文等[39]基于 Fluent 软件，针对熔池瞬态运动和传热传质建立了三维对称数值模型，利用三维半球状的体高斯热源，分析了不同工艺参数下熔池液/气界面的演变过程以及流动行为，并建立了流动、温度与熔池尺寸、表面质量之间的关系，分别如图 17 及图 18 所示。结果表明，实验和仿真得到的单道熔覆层形貌相近，形成稳定的熔池后，熔池内流体是从高温区流向低温区，呈现放射状，且流速由中间向外逐渐增大，相机实时监测熔渣的流动和模拟仿真出的流场流向一致。

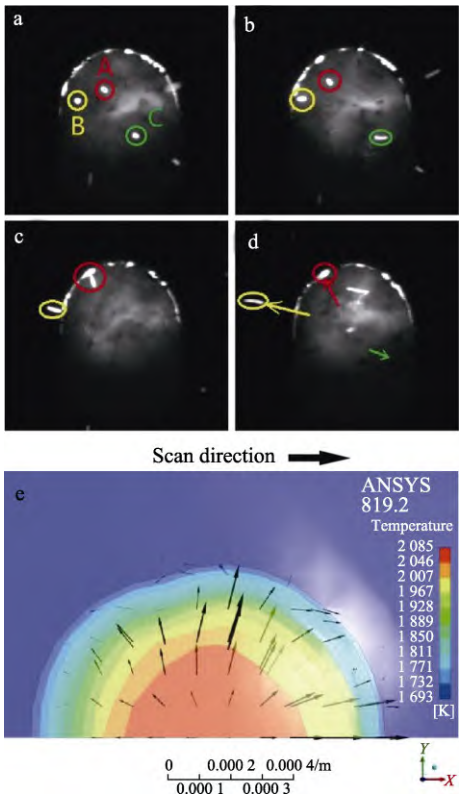


图 17　熔池内熔渣运动轨迹和流场分布[39]

Fig.17 Slag trajectory in molten pool and flow field distribution[39]

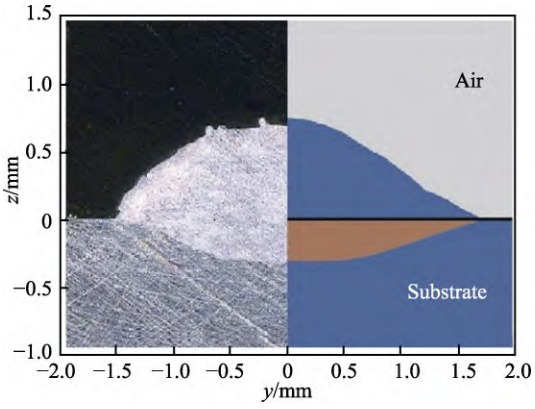


图 18　截面对比[39]

Fig.18 Comparison of cross sections[39]

2.6　其他热源模型

随着计算机技术的进一步发展，部分学者根据实

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

际工况对已有的热源模型进一步优化，建立了新型热源模型。此外，对于一些特殊加工条件下的数值模拟也可以通过特定的热源模型来实现，如宽带激光束热源模型、中空环形体热源模型等。

雷定中等[40]采用 TracePro 软件对光内送粉宽带激光熔覆喷头所形成的光路、聚焦光斑光通量 W 分布情况进行仿真分析，建立了镜面中空环形宽带激光三维数学模型。Tseng 等[41]基于 SYSWELD 软件，提出了一种激光热源模型，综合分析了激光束特性以及工艺参数对温度场和熔覆层形状的影响，并设计了激光熔覆实验验证数值模型，可以应用于其他激光加工过程的数值模拟。Liu 等[42]建立了一种宽带激光束热源模型，其能量分布函数为：

$$Q_{\text{laser}}(x,y,z)=\begin{cases} I_0\exp\left[-\dfrac{6(y-y_c)^2}{d^2}\right], & |x|\leqslant 0.26w \\ I_0\exp\left[-\dfrac{6(y-y)^2}{d^2}\right]\left[0.3+\dfrac{1-0.3}{0.24w}(0.5w-|x|)\right], & 0.26w\leqslant|x|\leqslant 0.5w \\ 0, & |x|>0.5w \end{cases} \tag{8}$$

式中：$I_0=\alpha\beta P/(wd)$。α 为激光吸收系数，α=0.75；β 为功率效率，β=0.98；P 为激光功率；d 为宽束激光光斑宽度，d=1.5 mm；w 为宽束激光光斑长度，w=15 mm。Liu 等[42]研究了宽光束激光熔覆单道熔覆层的温度场和应力场，其中温度场分布如图 19 所示。结合温度数据，计算得到了熔池的长度、宽度和深度。同时，讨论了激光功率和扫描速度等工艺参数对熔池尺寸、温度梯度、冷却速率、凝固速率的影响。此外，还对熔覆层在不同方向和不同路径上的热应力场分布进行了研究。

冯一琦[43]建立了一种选区激光熔化熔池流体力学模型，基于激光在粉床内部的能量衰减特性，在模拟中采用激光强度衰减体热源：

$$q(r)=\frac{2AP}{\pi\omega^2\delta}\exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right)\exp\left(-\frac{|z-z_s|}{\delta}\right) \tag{9}$$

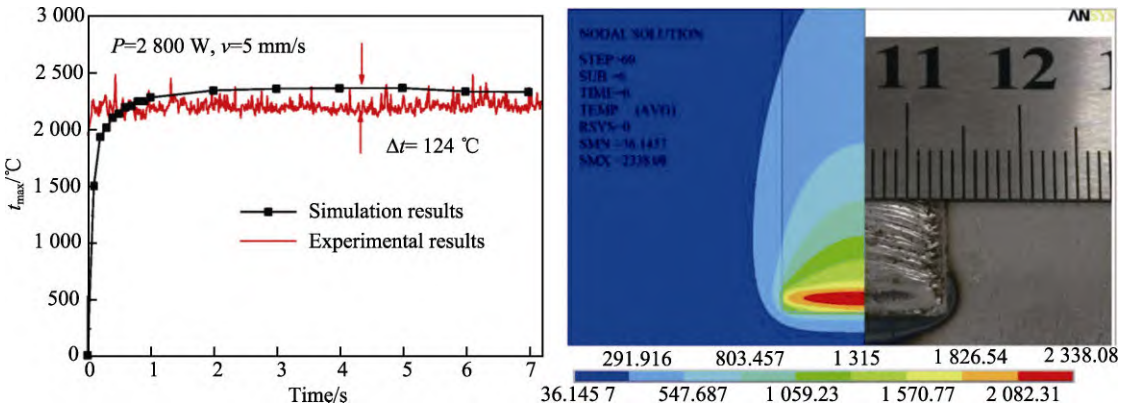
将铺粉模型模拟结果导入到熔池流体力学模型中，预测熔池的流动行为，对多道熔覆中熔池的流动行为、孔洞以及球化效应之间的关系做了深入分析。结果表明，增材底面相比平坦底面具有更致密的粉末分布，由于熔池流淌具有极大的不确定性，球化现象主要产生在增材底面，未熔合孔洞多产生在多道熔覆层之间的熔道颈缩处，如图 20 所示。

Song 等[44]综合考虑了粉末射流与激光相互作用的衰减效应以及未熔化粉末颗粒进入熔池的热沉效应，基于 COMSOL 软件建立了一种热源模型，模拟了熔池熔体流动和气液界面表面张力，其温度场及流场分布如图 21 所示，同时预测了熔池自由表面曲率和熔覆层尺寸。在 3 个不同的横截面方向上，模拟的温度梯度方向与晶粒生长方向一致。对熔覆层宽度、高度和熔池深度的实验验证表明，在考虑不同激光功率、激光扫描速度和送粉速率影响的工艺参数下，模拟结果和实验结果的最大误差为 10%。

徐加超等[45]结合几何回转体思想建立了中空环形激光热源的三维数学模型，获得其数学解析式为：

$$q(x,y,z)=\frac{3f_1Q}{\pi^2ac\mu}\exp\left[-\frac{3\left(\sqrt{x^2+y^2}-\mu\right)^2}{a^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right] \tag{10}$$

式中：f_1 为能量折算系数，$f_1\leqslant 1$；Q 为热输入功率，W；μ 为能量峰位置，取值通常位于环形区域中心，即 $\mu=(R+r)/2$；a 为圆环宽度的 1/2，即 $(R-r)/2$；R、r 分别为环形光斑外径、内径，mm；c 为光源作用深度，mm。通过实验测定热源模型相关参数，并基于 COMSOL 软件加载该模型，模拟得到了环形激光熔覆瞬态温度场分布以及热循环曲线。温度峰值和峰谷由于热积累和热传导的作用分别降低和升高。随着层高的增加，沉积层的温升区域平缓。



a 仿真和实验温度–时间曲线　　b 仿真温度场分布和实验熔覆层

图 19　实验与仿真结果对比[42]

Fig.19 Comparison of experimental results and simulation results[42]: a) simulation and experiment temperature-time curve; b) simulated temperature field distribution and experimental cladding layer

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

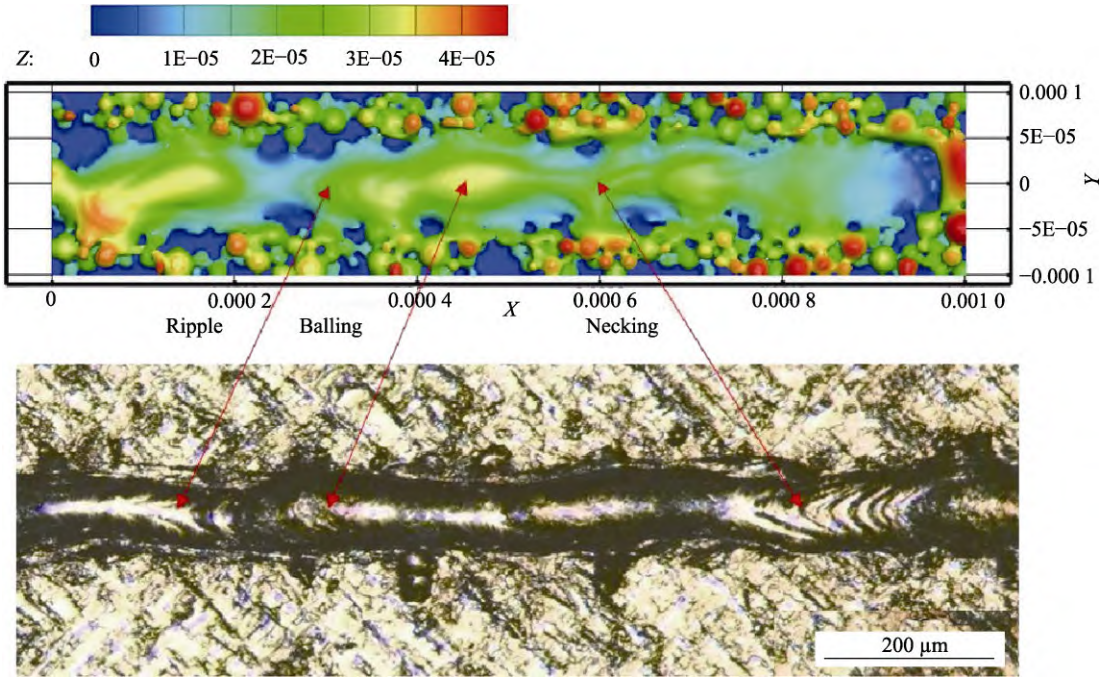


图 20　SLM 仿真结果与实验结果表面形貌对比[43]

Fig.20 Comparison of morphologies in SLM simulation and experiment[43]

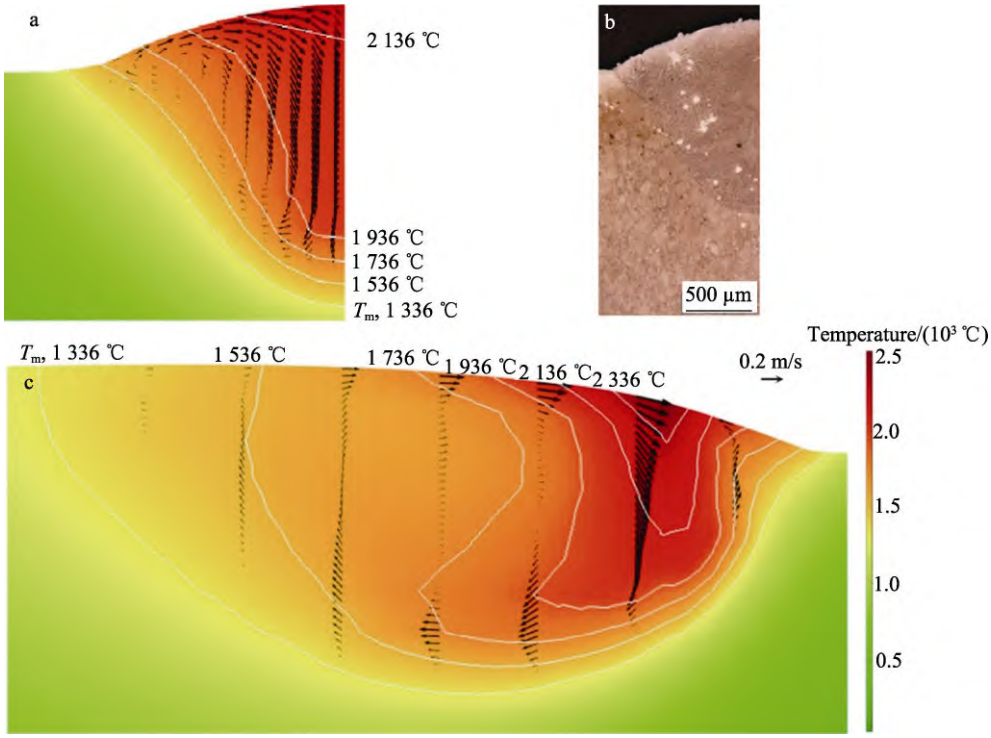


图 21　(a)横截面上的熔池的流场及温度分布，(b)实际熔池，(c)沿激光扫描方向纵截面上的熔池流场及温度分布[44]

Fig.21 (a) flow field of molten pool and temperature distribution on cross section, (b) actual molten pool, (c) flow field of molten pool and temperature distribution in longitudinal sectional view along the laser scanning direction[44]

综上所述，对应用较为广泛的几类激光热源模型适用环境的总结见表 1。在温度场模拟中，不同模型得到的温度场分布趋势类似，均呈椭圆彗星状，区别主要是高温区域不同；在流场模拟中，不同热源模型得到的熔池流场的整体分布类似，高速区域也都集中于熔池的中心，区别主要在于熔池尺寸不同，能量分布较为分散的热源模型得到的熔深、熔宽较小。因为实际熔覆过程中，工艺参数复杂，故表 1 只做参考，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 热源模型适用环境及温度场、流场规律

Tab.1 Applied environment of heat source models and the laws of temperature and flow fields

Heat source models		Characters and scope of application	The laws of temperature fields and flow fields
Surface heat source	Surface annular heat source	The working conditions with deep laser action cannot be calculated as the small depth of the energy distribution, this model apply to the hollow annular laser cladding process[46]	Temperature fields: The front is compressed and the tail is stretched in an elliptical comet shape, but the high temperature area is not concentrated in the center of the molten pool, but distributed in a saddle shape around the center of the molten pool
	Surface Gaussian heat source	It accurately describes the distribution of laser heat source energy on the surface of the molten pool, but ignores the energy loss caused by the laser beam penetrating inside the molten pool[47], so it is suitable for the working condition with thin cladding layers, shallow molten pools and low scanning speed.	Temperature fields: The front is compressed and the tail is stretched in an elliptical comet shape, and the high temperature area is concentrated in the center of the molten pool. Flow fields: The direction of the flow field diverges from the center of the molten pool to the edge, or converges from the edge to the center of the molten pool (it is related to the temperature coefficient of surface tension), and the high-speed zone is concentrated in the center of the molten pool
Volume heat source	Gaussian body heat source	The depth to width ratio of energy distribution is large, resulting in large molten pool size[33], which is applicable to describe solid laser heat source with high energy, and the heat source model can be amended by add correction factor[48]	
	Ellipsoid heat source	It is suitable for cladding process with high heat flux density and shallow molten pool	
	Compound heat source	It is applicable to complex process parameters or high-speed cladding	No

应根据实际的实验条件合理选择热源模型。

3 激光熔覆数值模拟自由液面研究进展

在激光熔覆过程中，熔池自由液面与空气直接接触，主要受到表面张力的影响，并直接决定了熔覆层的尺寸轮廓。目前研究熔池自由液面的主流方法有基于固定网格的水平集法（Level Set）、流体体积法（Volume of Fluid）、耦合水平集法和流体体积法（Coupled Levsel-set with VOF）、相场法（Phase Field），以及基于动网格的任意拉格朗日和欧拉法（Arbitrary Lagrangian-Eulerian）。

3.1 水平集法

Level Set（L-S）法又称等值面函数法[49]，采用距离场函数来描述动态界面。Level Set 法最初便是为了研究多相流界面而提出来的，现在也被应用于图像识别、界面重建等领域。Liu 等[50]采用 Level Set 法对选区激光熔化中熔融金属的自由表面进行了追踪，发现表面张力变化引起的不稳定扰动使得熔池表面产生局部凹陷，从而影响成形后的熔覆层表面粗糙度。但是 L-S 法在计算时的数值耗散较为严重，容易导致质量不守恒问题。

3.2 流体体积法

Volume of Fluid（VOF）法通过定义体积分数函数来描述自由界面，分别求解单个网格内的体积分数来重构界面。VOF 法相较于 L-S 法具有较好的质量守恒性。叶琛[51]基于 VOF 法对激光熔覆的熔覆层尺寸轮廓进行了模拟预测，并采用正交实验对仿真结果进行了验证，熔高、熔深、稀释率 3 组数据的比对结果偏差在 10%以内，证明了数值模型的准确性。但 VOF 法构建的自由界面精度不够高，且无法准确追踪界面法线方向的流动[52]。温饱贤等[53]基于 fluent 软件，基于光束在粉末介质中的传播规律，建立了激光能量在粉床分布的体热源模型，并对经典的 VOF 法进行了修正，提出一种可用于模拟粉末熔化后塌陷现象的 VOF 方法。计算结果表明，粉末层体积的变化会对熔池及其周围的温度场和速度场以及工件最终的形貌产生影响。

3.3 耦合水平集法和流体体积法

Coupled Level-set with VOF （CLSVOF）法结合了 L-S 法和 VOF 法的优点，界面重构精度和质量守恒性都较好。Wei 等[54]综合 L-S 法和 VOF 法，提出了一种耦合多相流模型，对激光热丝沉积过程中的传热传质以及自由表面的流动进行了研究，该模型可以捕捉到气/液界面最小约 0.03 mm 的细微波动。王翔宇等[55]采用 CLSVOF 法预测了熔池自由液面变化的同时，对熔池内部传质进行了分析，提出了一种多相流模型用于模拟异质材料激光熔覆的微流动，比对实验和仿真的偏差均在 9%以内。此外，在选区激光熔化方面，Thorsten Heeling 等[56]建立了基于 CLSVOF 法的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

熔池数值仿真模型，在对模拟和实验得到的熔池尺寸进行分析时发现，熔池深度的偏差随扫描速度的增加而提高，而横截面尺寸偏差随扫描速度的增加而减小。

3.4　相场法

Phase Field（PF）法基于 Ginzburg-Landau 理论，通过微分方程求解界面的瞬态变化[57]，区别于 VOF 法不需重构界面，相较于 L-S 法也不需要对距离函数进行繁琐的初始化，计算量相对较小，在处理较小尺度或表面张力敏感度较高的自由液面问题上具有独特优势。Jin 等[58]基于相场法建立了激光粉床熔化二维数值模拟模型，发现 Marangoni 效应会导致熔池内产生气泡，重熔过程和增大激光功率都有助于消除气孔，如图 22 所示。

3.5　任意拉格朗日和欧拉法

Arbitrary Lagrangian-Eulerian（ALE）法通过界面移动函数来追踪动态界面，兼具了 Lagrangian 和 Eulerian 这 2 种描述方法的优点，在处理高精度自由液面和流–固耦合问题有着明显优势。Tian 等[59]基于 ALE 法，采用 COMSOL 软件，建立了包含多个物理参数的传热和流体流动有限元模型，探讨了不同工艺参数对稀释率和熔池几何形状的影响。结果表明，在一定范围内，稀释率与相对能量质量比呈线性关系。此外，随着相对能量质量比的增加，伴随熔池内流体的流动，熔池底部弧形固液界面逐渐由浅变深，如图 23

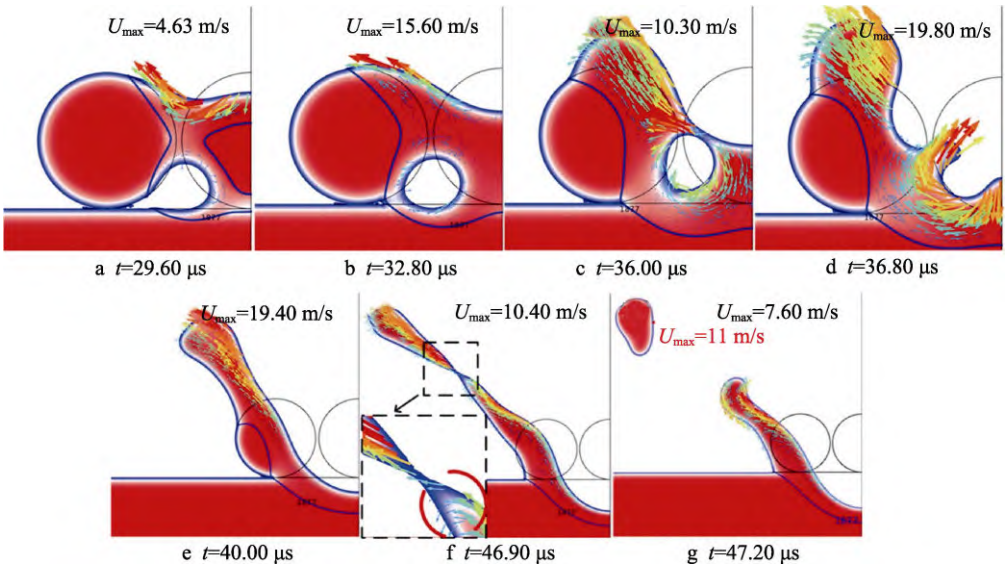


图 22　金属相速度矢量分布图[58]

Fig.22 Distribution map of the velocity vector in the metal phase under parameter[58]

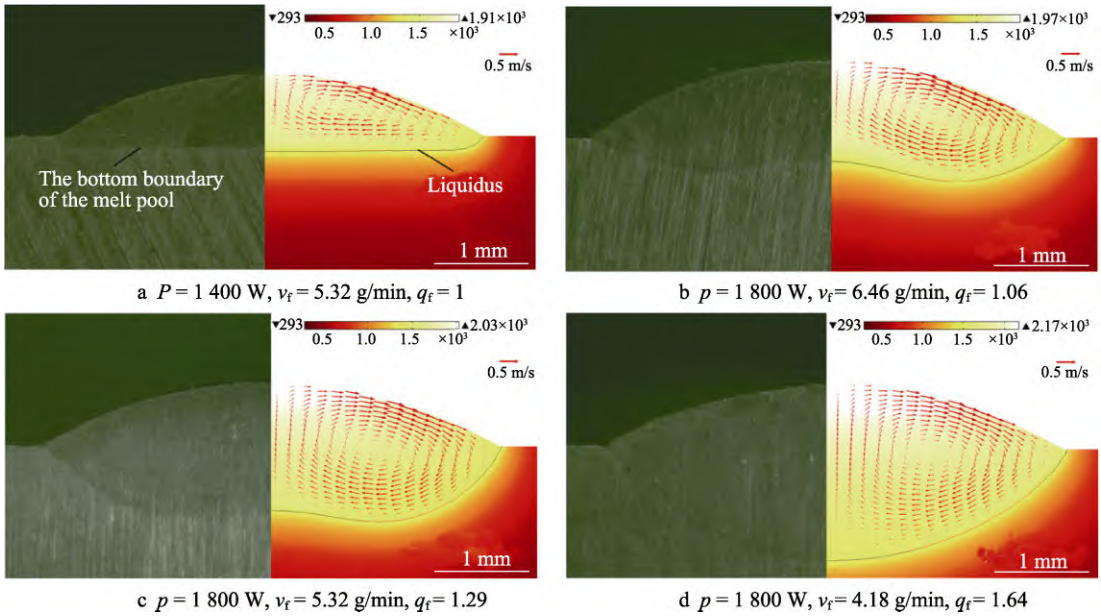


图 23　相对能量–质量比对熔池几何形状的影响[59]

Fig.23 Effect of relative energy-mass ratio on the molten pool geometry

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

所示。Gan 等[60]建立了激光直接沉积的多相流传热传质模型，采用基于动网格技术的 ALE 法追踪熔池表面的动态变化，计算得到熔池尺寸轮廓和成分分布，表明对流是合金元素在熔池内传质的主要机制。

综上所述，对以上几种自由液面追踪方法的优缺点进行总结，见表 2。

表 2　自由液面追踪方法的优缺点

Tab.2 Advantages and disadvantages of free surface tracking methods

Free-surface tracking methods	Advantages	Disadvantages
Level Set	High interface reconstruction accuracy	Serious numerical dissipation, poor mass conservation, and large amount of calculation
Volume of Fluid	Good mass conservation characteristics	Low interface reconstruction accuracy and large calculated amount
Coupled Level-set with VOF	Good mass conservation characteristics and high interface reconstruction accuracy	large calculated amount
Phase Field	No interface reconstruction, Low computation	Unable to process variable density problems, it needs to be corrected in combination with other models
Arbitrary Lagrangian-Eulerian	High interface reconstruction accuracy, good computational stability	Unable to process singular morphologic change problem[61]

4　激光熔覆熔池仿真模型的验证

在激光熔覆数值模拟研究中，建立合理的数值分析模型的同时，还需对模型进行验证。目前的模型验证主要通过对熔池温度、图像等信号进行采集，利用计算机技术进行信号处理，最终分别和温度场、流场仿真数据进行比对验证。

4.1　温度场验证

激光熔覆熔池温度检测分为接触式检测和非接触式检测[62]。常用的接触式温度检测主要通过热电偶测温，感温元件与被测目标直接接触，优势在于操作简单、检测精度高。李延民等[63]采用热电偶测量了基板的温度，并结合数值模拟对熔池内部的温度分布进行了分析，近似得到了熔池温度变化。由于激光熔覆熔池中心温度过高，感温元件无法对熔池中心的温度进行测量，且长时间的高温工作环境会极大地削减检测设备的使用寿命，因此目前主流的熔池温度检测采用非接触式测温。激光熔覆熔池的非接触式测温主要包括单色测温法、比色测温法以及通过 CCD 进行图像信号采集测温等[64]。彭程等[65]利用 ANSYS 软件模拟了钛合金薄壁墙熔覆成形过程中的温度场分布，采用双色测温仪设计了中空环形激光熔覆熔池温度在线检测系统，测量了实际温度，并对仿真结果进行了验证。结果表明，随着沉积层往上堆积，热累积现象越严重。Forien 等[66]利用高温二极管测温以及高速成像技术设计了一种激光粉床熔化过程熔池的原位检测系统，发现高温计信号变化与孔隙形成区域有关，高温信号过渡区域（5%~95%）孔隙生成概率急剧增加。

4.2　流场验证

熔池的流场验证主要有原位检测和非原位检测 2 种，原位检测主要通过 CCD 相机或 CMOS 相机获取激光熔覆加工过程中实时熔池的表面形态图像，经过图像处理后，与仿真数据对比验证。Wirth 等[67]设计了一种激光熔覆高速摄像机图像在线采集系统（如图 24 所示），获得了熔池表面流淌规律和粒子运动速度。分析发现，熔池局部的流动方向受到工艺参数的影响，且具有一定的随机性。在大多数数值模拟中，对熔池内流体为层流流动的假设会对仿真结果产生一定影响。黄健康等[68]在对 TIG 焊熔池表面流动行为研究中采用粒子示踪法结合熔池镜面成像系统，通过标定实际熔池宽度和视频数据的像素宽度之间的映射关系，计算出熔池表面的流动速度约为 12 mm/s（304 不锈钢）和 15 mm/s（Q235 碳钢）。非原位检测主要通过对实验得到的试样的尺寸轮廓、力学性能等进行检测，然后与仿真数据进行对比验证。吴家柱[68]在对激光直接金属沉积过程的热流传输机制研究中，通过测量实验得到的试样熔深和沉积层高，与仿真得到的熔池形状轮廓数据进行了对比，验证了模型的预测精度较高（≥95%）。

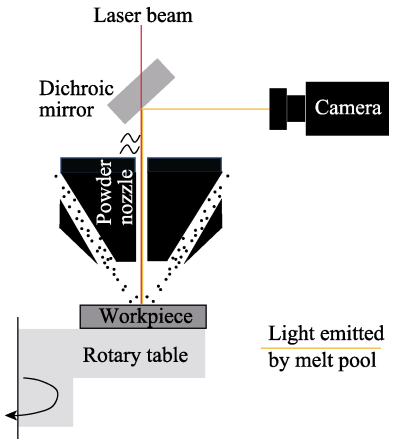


图 24　实验装置[66]

Fig.24 Experiment setup[66]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5　总结与展望

激光熔覆的温度场和流场模拟有利于揭示熔池冶金动力学特性，但是还存在以下几点问题：

1）在熔池流场模拟研究中，边界条件不够完善，对熔池内流体受力，一般仅考虑熔池表面张力、重力和浮力，对于保护气压力、粉末未熔颗粒对熔池表面的冲击等考虑得较少。

2）部分学者在熔池内部温度场、流场变化研究过程中，建立有限元模型时，会提前预设熔覆层的形状或假定熔池位于平面内，而忽略了熔池液/气自由表面，限制了这些模型用于熔池运动和液/气界面分析，以及研究熔池流动机理的准确性。

3）大多数研究都是基于水平基板上进行的，然而实际需要修复的零件往往形状复杂，处于非水平基面。因此，针对非水平基面激光熔覆需要进一步研究。

针对以上不足，提出以下改进措施。

1）完善边界条件。通过实验测定保护气压力，量化后作为边界条件添加在熔池表面。

2）改进数值模型。激光熔覆喷嘴粉末流场的仿真研究已经十分成熟，可以尝试结合离散相模型在仿真过程中同步添加粉末材料成形熔覆层，建立合适的多相流热、质传输模型。

3）应结合熔池内部受力分析熔覆层的形成机理和演化过程，对变姿态下熔池的流淌行为和形貌变化作出科学解释，将会是下一步的重点研究方向。

参考文献：

[1] 李文，关振中. 激光熔覆技术及其界面问题发展评述[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(2): 45-50.
LI Wen, GUAN Zhen-zhong. Review of Laser Cladding Technology and Interface Behaviour[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1997, 18(2): 45-50.

[2] SONG Li-jun, WANG Fang-hua, LI Si-meng, et al. Phase Congruency Melt Pool Edge Extraction for Laser Additive Manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 261-269.

[3] LEUNG C L A, MARUSSI S, ATWOOD R C, et al. In Situ X-Ray Imaging of Defect and Molten Pool Dynamics in Laser Additive Manufacturing[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1-9.

[4] LEE Y S, FARSON D F. Surface Tension-Powered Build Dimension Control in Laser Additive Manufacturing Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5): 1035-1044.

[5] 王根旺. 基于能量分布的激光热源模型建立及其仿真应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Gen-wang. Modeling and Simulation of Laser Heat Source Based on Energy Distribution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[6] SONG Bo-xue, YU Tian-biao, JIANG Xing-yu, et al. Development Mechanism and Solidification Morphology of Molten Pool Generated by Laser Cladding[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106579.

[7] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
LIU Zhen-xia. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting and Cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.

[8] 史建军, 石拓, 石世宏, 等. 激光光内送粉仰面熔覆工艺研究及优化[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 108-115.
SHI Jian-jun, SHI Tuo, SHI Shi-hong, et al. Process Study and Optimization of Upward Cladding by Laser Inside Powder Feeding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 108-115.

[9] 史建军. 悬垂结构激光内送粉熔覆成形工艺及机理研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
SHI Jian-jun. Process and Forming Mechanism of Non-supportive Overhang Part by Annular Laser Cladding[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.

[10] 王志坚, 王宗园, 宋鸿武, 等. TC4 钛合金激光熔覆熔池凝固传热研究[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 85-88.
WANG Zhi-jian, WANG Zong-yuan, SONG Hong-wu, et al. Study on Heat Transfer of Molten Pool in Laser Cladding of Titanium Alloy TC4[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(10): 85-88.

[11] PANT P, CHATTERJEE D. A Multi-Physics Way to Investigate some Aspects of Melt Pool during Laser Substrate Interaction in Laser Metal Deposition Process[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(11): 2843-2852.

[12] FALLAH V, ALIMARDANI M, CORBIN S F, et al. Temporal Development of Melt-Pool Morphology and Clad Geometry in Laser Powder Deposition[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(7): 2124-2134.

[13] GAO Jia-li, WU Cheng-zu, HAO Yun-bo, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation on Three-Dimensional Modelling of Single-Track Geometry and Temperature Evolution by Laser Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106287.

[14] 刘晗. 丝粉同步激光沉积增材制造熔池行为及成形控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LIU Han. Powder Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[15] LI Chang, YU Zhi bin, GAO Jing xiang, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Evolution of Multi-Field Coupling in Laser Cladding Process by Disk Lasers[J]. Welding in the World, 2019, 63(4): 925-945.

[16] 石世宏, 傅戈雁, 姚纯, 等. 激光精密熔覆光粉同轴装置: CN1814391A[P]. 2006-08-09.
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, YAO Chun, et al. Laser Precision Coated Powder Coaxial Device: CN1814391A[P]. 2006-08-09.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[17] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, WANG An-jun. et al. Technique for Manufacturing Inner-light Powder-Supplying by Laser Machining Forming and Inner-light Powder-supplying Spray Head: CN101148760A[P]. 2008-03-26.

[18] 田美玲, 石世宏, 傅戈雁, 等. 中空激光光内送粉熔覆技术的熔池流场与温度场模拟[J]. 电加工与模具, 2013(6): 62-66.
TIAN Mei-ling, SHI Shi-hong, FU Ge-yan, et al. Simulation of Flow and Temperature Field of the Molten Pool of Hollow Inside-Laser Coaxial Powder Feeding Cladding[J]. Electromachining & Mould, 2013(6): 62-66.

[19] 李广琪, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 扫描方式对中空环形激光熔覆层残余应力及基板变形的影响研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 158-170.
LI Guang-qi, WANG Li-fang, ZHU Gang-xian, et al. Influence of Scanning Patterns on Residual Stress of Cladding Layer and Substrate Deformation Produced by Hollow-Ring Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 158-170.

[20] 石皋莲. 变占空比中空激光光内送粉熔覆熔池温度场研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
SHI Gao-lian. Study on the Molten Pool Temperature Field of Laser Cladding under Variable Duty Cycle in Internal Hollow Laser Coaxial Powder Feeding Technology[D]. Suzhou: Soochow University, 2010.

[21] 李广琪, 朱刚贤, 赵亮, 等. 中空环形激光熔覆层温度场与应力场的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 319-328.
LI Guang-qi, ZHU Gang-xian, ZHAO Liang, et al. Numerical Simulation on Temperature Field and Stress Field of Cladding Layer by Hollow-Ring Laser[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 319-328.

[22] 吴甦, 赵海燕, 王煜, 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 91-94.
WU Su, ZHAO Hai-yan, WANG Yu, et al. A New Heat Source Model in Numerical Simulation of High Energy Beam Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 91-94.

[23] 张瑞华, 片山聖二, 内藤恭章, 等. 基于旋转 GAUSS 曲面体热源模型的激光焊接热过程的数值模拟[J]. 电焊机, 2007, 37(5): 51-54.
ZHANG Rui-hua, SEIJI Katayama, NAITOU Yasuaki, , et al. Numerical Simulation of the Laser Welding by Using the Rotary-Gauss Body Heat Source Model[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(5): 51-54.

[24] 张可荣, 张建勋. TC4 钛合金激光深熔焊小孔形貌特征的有限元精细分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 987-990.
Zhang Ke-rong, Zhang Jian-xun. Numerical Simulation for Keyhole Profile and Their Effect of TC4 Titanium Alloy during Laser Welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(6): 987-990.

[25] SUN Zhe, GUO Wei, LI Lin. Numerical Modelling of Heat Transfer, Mass Transport and Microstructure Formation in a High Deposition Rate Laser Directed Energy Deposition Process[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101175.

[26] CHAI Qing, WANG Zhan-dong, FANG Chen, et al. Numerical and Experimental Study on the Profile of Metal Alloys Formed on the Inclined Substrate by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 422: 127494.

[27] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.

[28] 区达铨, 王发展, 赵申, 等. 大型复杂框架结构焊接变形与应力控制仿真[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5): 616-622.
OU Da-quan, WANG Fa-zhan, ZHAO Shen, et al. Welding Deformations and Stress Simulations Control of Large-Scale Complex Structures[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(5): 616-622.

[29] 杨婕, 张志莲, 肖云峰, 等. 基于 Sysweld 的焊接接头热源模型二次开发[J]. 焊接技术, 2019, 48(7): 19-22.
YANG Jie, ZHANG Zhi-lian, XIAO Yun-feng, et al. Development of Heat Source Model of Welded Joint Based on Sysweld[J]. Welding Technology, 2019, 48(7): 19-22.

[30] 张世全, 韩永全, 郑宏伟, 等. 铝合金 LB-VPPA 复合焊应力场数值模拟[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2018(6): 6-13.
ZHANG Shi-quan, HAN Yong-quan, ZHENG Hong-wei, et al. Numerical Simulation of Stress Field of Aluminum Alloy LB-VPPA Hybrid Welding[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2018(6): 6-13.

[31] HOCINE S, VAN SWYGENHOVEN H, VAN PETEGEM S. Verification of Selective Laser Melting Heat Source Models with *Operando* X-Ray Diffraction Data[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101747.

[32] 罗心磊, 刘美红, 黎振华, 等. 不同热源模型对选区激光熔化 18Ni300 温度场计算结果的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 52-62.
LUO Xin-lei, LIU Mei-hong, LI Zhen-hua, et al. Effect of Different Heat-Source Models on Calculated Temperature Field of Selective Laser Melted $18Ni_{300}$[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 52-62.

[33] 郝晓杰. 选区激光熔化 316L 温度场研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
HAO Xiao-jie. Study on Temperature Field of Selective Laser Melting 316L[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.

[34] 谷京晨, 童莉葛, 黎磊, 等. 焊接数值模拟中热源的选用原则[J]. 材料导报, 2014, 28(1): 143-146.
GU Jing-chen, TONG Li-ge, LI Lei, et al. Selection Criteria of Heat Source Model on the Welding Numerical Simulation[J]. Materials Review, 2014, 28(1): 143-146.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[35] 贾雪. Inconel 718合金选区激光熔化流场及微熔池传质的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
JIA Xue. Research on The Flow Field and Mass Transfer of Tiny Molten Pool During Selective Laser Melting of Inconel718[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[36] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理, 等. 焊接数值模拟中分段移动热源模型的建立及应用[J]. 中国机械工程, 2002, 13(3): 208-210.
CAI Zhi-peng, ZHAO Hai-yan, LU An-li, et al. Establishment of Line-Gauss Heat Source Model and Application in Welding Numerical Simulation[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(3): 208-210.

[37] 汪奇兵. Invar 钢激光-MIG 复合焊接熔池流场形态研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
WANG Qi-bing. Research on Flow Field of Invar Steel-molten Pool by Laser -MIG Hybrid Welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[38] 谢印开. 激光选区熔化 Ti-6Al-4V 温度场与流场的数值模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
XIE Yin-kai. Numerica Investigation on Temperature Field and Flow Field During Selective Laser Melting of TI-6AL-4V[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.

[39] 王怡文. 脉冲激光熔化沉积熔池流动行为数值模拟与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WANG Yi-wen. Numerical Simulation and Experimental Study of Molten Pool Flow Behavior in Pulsed Laser Melting Deposition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[40] 雷定中, 石世宏, 傅戈雁, 等. 宽带激光内送粉熔覆工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 45-52.
LEI Ding-zhong, SHI Shi-hong, FU Ge-yan, et al. Research of Hollow Broadband Laser Cladding Method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 45-52.

[41] TSENG W C, AOH J N. Simulation Study on Laser Cladding on Preplaced Powder Layer with a Tailored Laser Heat Source[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 141-152.

[42] LIU Hua-ming, QIN Xun-peng, WU Meng-wu, et al. Numerical Simulation of Thermal and Stress Field of Single Track Cladding in Wide-Beam Laser Cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9): 3959-3976.

[43] 冯一琦. 选区激光熔化温度场与熔池流动行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
FENG Yi-qi. Thermal Field and Flow Behavior Research of Selective Laser Melting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[44] SONG Jie, CHEW Y, BI Gui-jun, et al. Numerical and Experimental Study of Laser Aided Additive Manufacturing for Melt-Pool Profile and Grain Orientation Analysis[J]. Materials & Design, 2018, 137: 286-297.

[45] 徐加超, 夏志新, 陈鹏, 等. 中空环形激光热源建模及温度场有限元模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 31-40.
XU Jia-chao, XIA Zhi-xin, CHEN Peng, et al. Modeling of Hollow Ring Laser Heat Source and Finite Element Simulation of Temperature Field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 31-40.

[46] 李广琪, 朱刚贤, 王丽芳, 等. 离焦量对中空环形激光熔覆层温度场及应力场的影响[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5): 587-593.
LI Guang-qi, ZHU Gang-xian, WANG Li-fang, et al. Influence of Defocusing Amount on Temperature and Stress Field of Hollow-Ring Laser Cladding Layer[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(5): 587-593.

[47] 张佳丽. 激光熔覆技术的温度场数值模拟分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
ZHANG Jia-li. Numerical Simulation of Temperature Field of Laser Cladding Technology Analysis[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019.

[48] 江尚霖. 2219 铝合金电子束熔丝沉积增材制造传热流动数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
JIANG Shang-lin. Numerical Simulation of Heat Transfer and Flow of 2219 Aluminum Alloy Produced By Electron Beam Wire Deposition Additive Manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[49] 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
PANG Sheng-yong. A Study on the Transient Keyhole and Moving Weld Pool Behaviors and Mechanisms of Deep Penetration Laser Welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[50] LIU L, HUANG M, MA Y H, et al. Simulation of Powder Packing and Thermo-Fluid Dynamic of 316L Stainless Steel by Selective Laser Melting[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(11): 7369-7381.

[51] 叶琛. 基于 VOF 法的激光熔覆层形貌预测与组织研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
YE Chen. Morphology Prediction And Microstructure Research Of Laser Cladding Layer Based on VOF Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.

[52] 张健. 基于 VOF 方法激光深熔焊接小孔行为的数值分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
ZHANG Jian. Based on the VOF Method Deep Penetration Laser Welding Holes Behavior of Numerical Analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

[53] 温宝贤. 激光选区熔化过程中传热与流动的数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
WEN Bao-xian. Numerical Research on Heat Transfer and Flow in Laser Selective Melting Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[54] WEI Shao-peng, WANG Gang, SHIN Y C, et al. Comprehensive Modeling of Transport Phenomena in Laser Hot-Wire Deposition Process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 1356-1368.

[55] 王翔宇, 王罡, 罗升, 等. T15 高速钢异质材料激光熔

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

覆过程的多相流模型[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 117-123.
WANG Xiang-yu, WANG Gang, LUO Sheng, et al. Multi-Phase Flow Modelling of Laser Cladding Process with T15 High Speed Steel Particles[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 117-123.

[56] HEELING T, CLOOTS M, WEGENER K. Melt Pool Simulation for the Evaluation of Process Parameters in Selective Laser Melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 14: 116-125.

[57] 郭珊. 流体系统的参数估计与状态重构[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
GUO Shan. Parameter Estimation and State Reconstruction of Fluid System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[58] JIN Peng, TANG Qian, SONG Jun, et al. Numerical Investigation of the Mechanism of Interfacial Dynamics of the Melt Pool and Defects during Laser Powder Bed Fusion[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107289.

[59] TIAN Hu-cheng, CHEN Xiang-dong, YAN Zhao-hua, et al. Finite-Element Simulation of Melt Pool Geometry and Dilution Ratio during Laser Cladding[J]. Applied Physics A, 2019, 125(7): 485.

[60] GAN Zheng-tao, YU Gang, HE Xiu-li, et al. Numerical Simulation of Thermal Behavior and Multicomponent Mass Transfer in Direct Laser Deposition of Co-Base Alloy on Steel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 28-38.

[61] 吴家柱. 基于光束形态特征的激光直接金属沉积热-流输运机理[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
WU Jia-zhu. Beam Profile Characteristic Based Investigation of Heat-fluid Transport Mechanism in Laser Direct Metal Deposition[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[62] 孙华杰. 基于彩色 CCD 的激光熔覆熔池温度闭环控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
SUN Hua-jie. Research on Close-loop Control of Molten Pool Temperature during Laser Cladding Process based on Color CCD[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.

[63] 李延民, 刘振侠, 杨海欧, 等. 激光多层涂敷过程中的温度场测量与数值模拟[J]. 金属学报, 2003, 39(5): 521-525.
LI Yan-min, LIU Zhen-xia, YANG Hai-ou, et al. Measurement and Simulation of Temperature Field during multi-Layer Laser Cladding[J]. Acta Metallrugica Sinica, 2003, 39(5): 521-525.

[64] 赵瑞恒. 激光熔覆熔池检测与工艺实验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
ZHAO Rui-heng. Experiment Research on Laser Cladding Molten Pool Detection and Process[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.

[65] 彭程, 石拓, 傅戈雁, 等. 中空激光光内送粉熔池温度控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 99-101.
PENG Cheng, SHI Tuo, FU Ge-yan, et al. Study on Temperature Control of Powdered Pool in Hollow Laser Light[J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(2): 99-101.

[66] FORIEN J B, CALTA N P, DEPOND P J, et al. Detecting Keyhole Pore Defects and Monitoring Process Signatures during Laser Powder Bed Fusion: A Correlation between *in Situ* Pyrometry and *ex Situ* X-Ray Radiography[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101336.

[67] WIRTH F, ARPAGAUS S, WEGENER K. Analysis of Melt Pool Dynamics in Laser Cladding and Direct Metal Deposition by Automated High-Speed Camera Image Evaluation[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 369-382.

[68] 黄健康, 孙天亮, 樊丁, 等. TIG 焊熔池表面流动行为的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 31-37.
HUANG Jian-kang, SUN Tian-liang, FAN Ding, et al. Study on the Surface Flow Behavior of TIG Weld Pool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 31-37.

责任编辑：刘世忠

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net