

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181026001

T15 高速钢异质材料激光熔覆过程的多相流模型

王翔宇^{1,2}, 王 罡^{1,2}, 罗 升³, 尤浩兴³, 融亦鸣³

(1. 清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学 精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084; 3. 南方科技大学 机械与能源工程系, 深圳 518055)

摘 要: 激光熔覆过程中熔池的演变包含能量输入、质量添加、高温金属液体流动、金属熔化凝固以及材料扩散等复杂过程。基于多相流理论, 建立了 T15 高速钢在 42CrMo 基板上激光熔覆的物质传输模型。其中, 质量添加与能量输入过程采用添加在熔池表面单元的源项模拟, 而气液界面的捕捉则采用了 CLSVOF 方法。通过试验获得的熔覆层关键形貌参数, 被用来验证数值模型的有效性。结果表明, T15 高速钢由于其自身含有较高的硫含量, 在激光熔覆熔池中, 在 Marangoni 力的驱动下具有明显内向流动的特征。高温液体向下流动, 形成较大的熔深。以熔覆层高度、深度、稀释率等 3 个形貌参数为比较依据, 验证了异质材料激光熔覆的多相流模型, 在不同工艺参数组合下试验值与仿真值均具有较好的一致性, 证明了该模型可准确反映激光熔覆过程熔池内的微流动与物质传输行为。

关键词: 激光熔覆; 多相流; 马朗戈尼效应; 表面活性元素

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)01-0117-07

Multi-phase Flow Modelling of Laser Cladding Process with T15 High Speed Steel Particles

WANG Xiangyu^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, LUO Sheng³, YOU Haoxin³, RONG Yiming³

(1. State Key Laboratory of Tribology & Institute of Manufacturing Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Mechanical and Energy Engineering Department, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: During the laser cladding process, the transport phenomenon in the molten pool are complex including intense energy input, mass addition, strong fluid flow, rapid solidification, melting and species transport. In order to simulate the process of depositing T15 powders on 42CrMo base steel through laser cladding, a multiphase species transport model was developed in which CLSVOF method was adopted to capture the gas-liquid interface and source terms were precisely added under the interface serving as the energy input and mass addition. The model was validated by several characteristic parameters of cladding layers obtained by single track cladding experiments. As the sulphur content of T15 was relatively high, which changed the direction of Marangoni force, the molten pool showed an obvious inward flow pattern. Results show that high temperature fluids are driven downward and consequently a deep fusion penetration is achieved. The consistence of characteristic parameters including cladding height, depth and dilution between experiment and simulation results under different process parameters indicate that the model is operative in investigating the laser cladding process.

Keywords: laser cladding; multiphase flow; marangoni effect; surface active element

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2019-01-24

通信作者: 王罡 (1976—), 男 (汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 数字化制造; E-mail: gwang@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (U1537202, 51535011); 十三五预研课题 (41423060102)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1537202, 51535011) and Pre-research Program in National 13th Five-year Plan (41423060102)

引用格式: 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, WANG G, LUO S, 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.

0 引言

通过表面工程的手段，可以在较低性能的材料表面涂覆一层高性能的材料，完成材料的表面改性。这是制备相对廉价而高性能的大型重载装备零件的重要途径^[1]。激光熔覆工艺是一种表面工程技术，其通过聚焦的激光束熔化基材的表面与同轴输送的粉体，在熔池凝固之后所形成的冶金结合的熔覆层就具备所需的高性能^[2-3]。

近年来，高速钢因其高硬度、强耐腐蚀、强耐磨的性能而被应用于激光熔覆工业中^[4]。不同于目前应用广泛的不锈钢类熔覆材料，高速钢中的硫含量较高。硫元素作为表面活性元素能够改变表面张力温度系数的符号，进而改变熔池的主要驱动力 Marangoni 力的方向，极大的影响熔池的演变^[5-6]。

激光熔覆金属熔池的演变对于最终熔覆层的性能有直接影响。熔池的演变涉及气液界面的推移，高温金属液体的流动，材料的熔化凝固，材料的增加与能量输入等繁多、复杂的物理过程。而且由于其熔池演变过程的时间短、温度高，很难通过试验的手段实时观测其演变过程。采用数值模拟的方法可以帮助理解这一过程^[7]。

激光熔覆过程的模拟，主要通过相关控制方程，依据工艺参数与材料参数的输入对熔覆层形状做预测^[8]。针对多相流模型，在熔覆气液界面的追踪或捕捉方面，有任意拉格朗日欧拉方法^[9-10]与基于欧拉描述的 VOF (Volume of fluid) 方法^[11]与 LS (Level-set) 方法^[12]等。其中，采用后两者的耦合方法，即 CLSVOF 方法，来捕捉气液界面，能够

同时兼顾了两者界面重构精度高、质量守恒性好的优点^[7]。在激光熔覆熔池内元素分布方面，高硫基体的硫元素向不含硫熔覆材料熔池的扩散，会使得熔池的流动形式由外向流动变为内向流动，即硫元素含量对熔池的演变作用十分关键^[10]。

在已有的激光熔覆模拟模型中，缺少强于描述熔覆层形貌同时兼顾物质传输的模型。针对高速钢粉末在中碳钢上熔覆的过程，需建立新的多相流物质传输模型用以深入探究其物理过程。新的数值模型采用 CLSVOF 方法捕捉气液界面，通过质量源项模拟熔覆粉末的添加，通过能量源项模拟激光能量的输入，通过扩散方程求解熔覆层的材料分布。并进行单道次激光熔覆试验，所得熔覆层的特征参数来验证模型的准确性。

1 试验

单道次激光熔覆试验选用平均粒径为 70 μm 的 T15 高速钢粉末为熔覆材料，尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm 的 42CrMo 板材为基板，采用 Laseline 的 LDM3000-100 型二极管激光器作为激光光源，光斑直径 1.5 mm，激光焦点距熔覆头末端 13 mm。42CrMo 与 T15 的材料元素组成如表 1 所示，T15 是铁基钨系高速钢，具有较高的硫含量，而 42CrMo 为中碳钢，其硫含量与 T15 相近。

熔覆前，对板材进行预处理，将 42CrMo 基板表面用磨抛机打磨，去除表面氧化层后，使用 180 μm (80 目) 砂纸打磨，降低其反射率。激光熔覆过程中，使用高纯 Ar 气作为粉末运输的载气与保护气，载气的流量为 6 L/min，保护气的流量为

表 1 42CrMo 与 T15 材料的元素组成
Table 1 Material composition of 42CrMo and T15

Element	Fe	C	Co	Cr	Mn	W	V	S
42CrMo	Bal.	0.42		0.9	0.8			0.04
T15	Bal.	1.60	5.00	4.0	0.3	12.0	4.9	0.04

20 L/min。如表 2 所示，在离焦量 1mm，若干激光功率、扫描速度、送粉量组合下，完成多组单道次激光熔覆试验。

熔覆后，通过线切割获取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的熔覆层样品。打磨抛光之后在光学显微镜观察其熔覆层形貌，并通过图像处理软件测量其特征参数。

表 2 单道次激光熔覆试验工艺参数

Table 2 Process parameters of single track experiments			
Sample	Laser power / W	Scan speed / (mm·s ⁻¹)	Feed speed / (g·min ⁻¹)
No.1	600	6	3.6
No.2	600	6	4.5
No.3	600	8	4.5
No.4	600	10	5.4

2 仿真模型

2.1 模型假设

由于激光熔覆过程中涉及复杂的物理过程, 为了保证数值模拟的收敛性与计算效率, 同时不失其代表性, 对模型进行如下简化: ①熔覆材料与基体材料均为各向同性的, 均一的材料; ②仅考虑金属熔池与金属基体的热传导, 忽略其他热过程; ③金属熔池的驱动力仅为重力与 Marangoni 力, 不考虑气流驱动与浮升力等其他熔池驱动力; ④金属熔池内的液态金属为不可压缩的牛顿流体, 流动形式为层流; ⑤由于物理过程, 几何形状, 边界条件的对称性, 建立 1/2 模型进行模拟分析。

2.2 控制方程

激光熔覆数值模型中, 主要有 4 大控制方程, 即质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、物质传输方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + S_{\text{mom}} \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + S_i \quad (4)$$

其中 ρ 为材料密度, $\mathbf{v}$ 为流体速度, t 为时间。在质量守恒方程中, S_m 为质量源项, 采用高斯分布近似的质量源项来模拟熔覆过程粉末的添加。

$$S_m = \frac{\lambda_M \dot{M}}{\pi R_M^2 h} \exp \left(-\frac{\lambda_M r^2}{R_M^2} \right) \quad (5)$$

$$\dot{M} = \rho A_{\text{cross}} V_{\text{scan}} \quad (6)$$

其中 λ_M 为质量的分布因子, R_M 为有效质量添加半径, r 为与激光束位置的距离, h 则为模型中最小单元的高度。 $\dot{M}$ 为单位时间添加的粉末质量, 其值由实际测得的熔覆层体积计算得到。

在动量守恒方程的右侧为压力梯度、重力以及动量源项 S_{mom} 引起的动量变化。其中动量源项主要包含熔池中液体凝固带来的动量损失 $S_{\text{sol}} i$ 以

及表面张力 $S_{\gamma-\text{mom}}$ 的影响。

$$S_{\text{mom}} = -S_{\text{sol}} i + S_{\gamma-\text{mom}} \quad (7)$$

$$S_{\text{sol}} i = \frac{(1 - f_L)^2}{(f_L^3 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} \mathbf{v} \quad (8)$$

$$S_{\gamma-\text{mom}} = - \left(\gamma \kappa \mathbf{n} - \nabla_s T \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \cdot \delta(\varphi) \quad (9)$$

在 $S_{\text{sol}} i$ 中 f_L 为液相分数; A_{mush} 是糊状区参数。 $S_{\gamma-\text{mom}}$ 中第一项为在表面张力作用下, 在表面法向上的约束力, 其中 κ 为界面的曲率, $\mathbf{n}$ 为界面的法向; 第二项则是表面张力因温度梯度而产生的 Marangoni 力。 $\delta(\varphi)$ 函数是阶跃函数的导数, 描述表面张力在气液界面上的连续过渡。

能量守恒方程中, c_p 为等效比热, k 为等效热导率, S_h 为能量源项。

$$c_p = c_p(T) + L_f \frac{\partial f_L}{\partial T} \quad (10)$$

$$S_h = \frac{\lambda \dot{E}}{\pi R^2 h} \exp \left(-\frac{\lambda r^2}{R^2} \right) \quad (11)$$

其中 $c_p(T)$ 为材料的比热, f_L 为材料在液化过程中所需要的潜热, 通过热力学计算软件计算得到。 $\dot{E}$ 为单位时间内输入的能量, 在该激光熔覆模型中, 共有两个能量输入源。

$$\dot{E}_1 = \alpha_i P \quad (12)$$

$$\dot{E}_2 = \left(\int_{300\text{K}}^{\text{liquidus}} c_p(T) dt + L_f \right) \dot{M} \quad (13)$$

能量源 $\dot{E}_1$ 用来表征熔池对照射在熔池上的激光能量的吸收。 α_i 为综合吸收率, P 为激光功率。而能量源 $\dot{E}_2$ 则用以表征所添加的质量源所携带的能量, 符合前文所述金属颗粒以液相加入熔池的假设。

扩散方程中, Y_i 为溶质的质量分数, $\mathbf{J}_i$ 为溶质的扩散通量, S_i 为外部质量添加带来成分变化的源项。在文中模型中, 针对 T15 材料, 其值即等于质量源项; 针对 42CrMo 材料, 其值等于 0。

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (14)$$

由于仅考虑成分不均带来的成分扩散, 所以扩散函数由式 (14) 定义, 其中 $D_{i,m}$ 为质量扩散

系数。模型中 λ_M 与 λ 取值为 3, R_M 与 R 取值 0.8 mm, $D_{i,m}$ 取值 5×10^{-8} 。

2.3 物理参数

在激光熔覆的数值模拟中,除了控制方程之外,相关物理参数的设置,对于模型的准确性也具有极大的影响。

金属熔池对激光能量的整体吸收率将极大的影响金属熔池的大小与内部液体流动的强度。在激光能量输入过程中,由于忽略了熔池对外的热辐射与热对流,整体能量吸收率可以近似表示为:

$$\alpha_t = \alpha(1 - R_p - A_p)$$

(15)

其中 α 为金属熔池对照射到其表面的激光能量的吸收率; R_p 与 A_p 分别为熔覆金属粉末流反射与吸收激光的比率。被熔覆金属粉末吸收的激光能量,会随着部分粉末掉入熔池而完成对熔池的能量输入。 α 的数值可以通过 Hagen-Rubens 公式计算得到^[13]:

$$\alpha(T) = 2\sqrt{2\varepsilon_0\omega\rho(T)}$$

(16)

其中 ε_0 为真空发射率,值为 $8.85\times10^{-12}\text{F/m}$; ω 为激光的角频率,对于所用的二极管激光器而言,其值约为 $1.88\times10^{15}\text{rad/s}$; $\rho(T)$ 为材料的电阻率,通过热力学计算软件计算得到。对于液态 T15 熔池,其吸收率约为 45%。

金属粉末流对于激光的反射与吸收,其作用机理较为复杂。在该模型中,简单的认为其反射与吸收率之和与单位时间的送粉量线性相关。对于试验中 3.6、4.5 和 5.4 g/min 这 3 种送粉速率,其相应的粉末对激光遮蔽效果为 17%、22% 和 26%。

在实际的激光熔覆金属熔池中,可能会有一些固体悬浮物影响液体的粘度^[14],熔池局部存在紊流影响其热导率。为了获得与试验更相符的模拟结果,在数值模型中应当使用等效粘度与等效热导率。根据 A. De 等的研究,激光能量输入的金属熔池中,等效粘度与等效热导率应为名义粘度与名义热导率的数倍^[15]。在该模型中,等效粘度与液相等效热导率的选取参考已有的数值模拟文献^[7,16]。

表面张力是材料成分与温度的函数,表面张

力的温度系数将直接影响高温梯度金属熔池的流动形式。Sahoo^[17]给出了若干二元体系下,表面张力的计算公式。但是激光熔覆过程中,除了材料中的硫元素,外部空气中的氧元素也进入熔池中。两者同时作用的机制较为复杂,表面张力难以通过理论计算得到。模型中表面张力的设置参考 Holtzer^[18]对于含硫铸铁表面张力的试验研究。设置为:

$$\sigma(T) = 1 + 0.0012 \times (T - T_{\text{sol}})$$

(17)

其中 $\sigma(T)$ 为温度为 T 时的表面张力系数,而 T_{sol} 则为材料的固相线温度。

其余的温度相关的材料参数通过热力学计算软件计算得到。部分材料参数如表 3 所示,对于 T15 与 42CrMo 的混合相,其材料参数的计算为两种相各自材料参数按照质量分数取加权平均。

表 3 T15 与 42CrMo 材料的热力学性能参数

Table 3 Thermophysical properties of T15 and 42CrMo

Properties	T15	42CrMo
Solidus temperature / K	1603	1690
Liquidus temperature / K	1630	1730
Density / (kg·m ⁻³)	7780	7780
Effective viscosity / (Pa·s)	0.06	0.06
Latent heat / (kJ·kg ⁻¹)	250	250
Effective thermal conductivity of solid / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	40	40
Effective thermal conductivity of liquid / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	209.2	209.2

2.4 边界条件与源项位置

如图 1(a) 所示,所建立的计算域尺寸为 16 mm×4 mm×8 mm。最小网格为 100 μm×100 μm×50 μm。其中 $z=4\text{ mm}$ 平面被设置为 Outflow 边界条件, $y=0\text{ mm}$ 平面被设置为对称边界条件,其余边界均设置为 Wall。

计算域以 $z=0\text{ mm}$ 平面为界被划分为金属相与空气相两个区域。其中金属相区中,42CrMo 的质量分数被置为 1。

如图 1(b) 所示,代表熔池直接吸收激光的能量源项 1 被添加在熔池表面的第一层单元中。而质量源项与代表粉末能量的能量源项 2,被添加在熔池表面的第二层单元中。添加能量源项 1 的单元,需在激光光束所在的圆柱体中,且需满足公式 (18)。

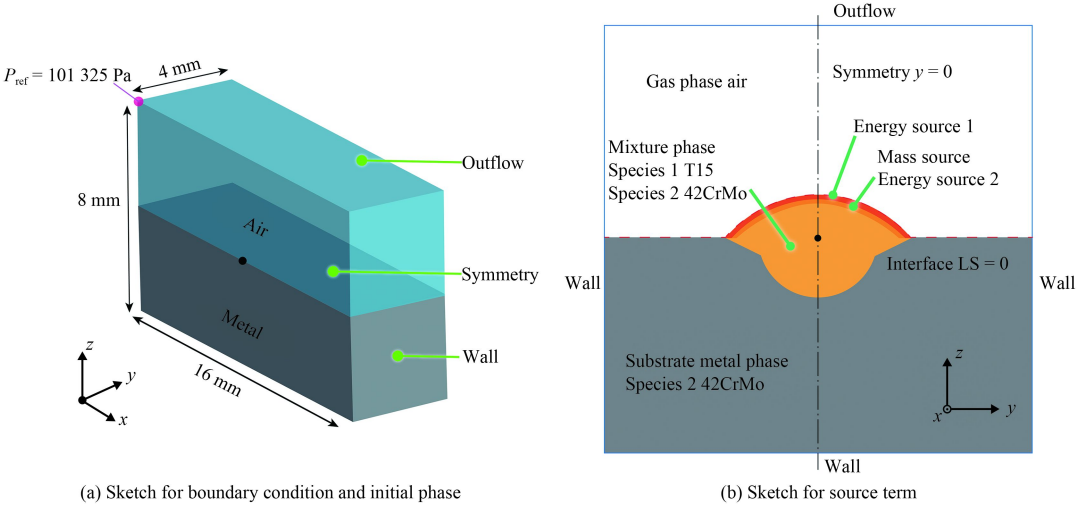


图 1 模型边界条件设置与源项位置

Fig.1 Sketch for boundary condition and source term

$$\frac{ls||\nabla ls||}{\left|\frac{\partial ls}{\partial z}\right|} \in [0,h) \tag{18}$$

其中 ls 为单元 level-set 值的标量函数, 其值表示单元中心距离气液界面的距离, 在液相为正, 气相为负。

类似的, 添加能量源项 2 与质量源项的单元需在激光光束所在的圆柱体中, 且需满足下式:

$$\frac{ls||\nabla ls||}{\left|\frac{\partial ls}{\partial z}\right|} \in [h,2h) \tag{19}$$

3 结果与讨论

3.1 熔池流动特性

No.1 样品的激光熔覆熔池的温度场与速度场数值模拟结果如图 2 所示。

T15 粉末在 42CrMo 基板上的激光熔覆过程中, 由于熔池表面表面活性元素硫元素聚集, 且受到空气中氧元素的影响, 表面张力温度系数为正。熔池中心的高温区域表面张力较大, 而熔池四周的表面张力较低, 形成指向中心的 Marangoni 力, 金属熔池呈现出明显的内向流动特征。针对内向流动最剧烈, 熔覆层深最大的 No.1 样品, 其内向流动的最大速率可达 0.72 m/s。

在熔池表面液体向中心流动的驱动下, 熔池表面中心的高温液体首先向熔池下方流动, 熔化基板表面的金属, 从而形成较大的熔深。因此在内向流动形式下, 熔覆层的稀释率较大。

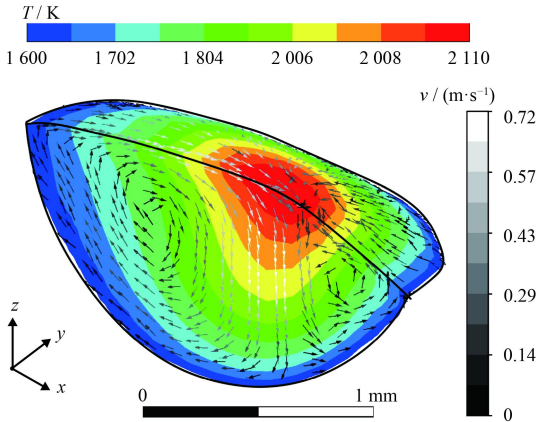


图 2 No.1 样品激光熔覆熔池的温度场与速度场模拟结果

Fig.2 Simulation results of temperature field and velocity field in molten pool for No.1 sample

3.2 激光熔覆数值模型验证

激光熔覆过程中, 熔覆材料与基体表面材料共同熔化再凝固, 形成最终的熔覆层。熔覆层中基体材料的质量分数被定义为稀释率。在基体材料与熔覆材料密度相近时, 可以采用体积分数代替。从图 3 的数值计算结果中可以看到, 经过金属熔池中充分的流动扩散, 熔覆材料与基体材料在熔覆层中分布基本较为均匀。因此, 在仿真结果的稀释率计算中, 采用 1 减去熔覆层中熔覆材料的质量分数。

表 4 中列出了单道次激光熔覆试验与数值模拟中熔覆层的高度、熔深、稀释率等特征参数的对比。对比表 4 中熔覆层高度与深度在 4 种工艺参数下的试验值与数值模拟值, 在熔覆层高度参数上, 4 种工艺参数下的样品, 仿真结果与试验

结果偏差均在 12% 以内，平均偏差 6%；在熔覆层熔深参数上，偏差均在 17% 以内，平均偏差 8.7%；在稀释率参数上，样本偏差均在 13% 之内，平均

偏差 6%。这验证了该模型的准确性。同时，在 4 种工艺参数下，模型均具有较好的预测能力，说明了该模型对激光熔覆过程具有一定的解释能力。

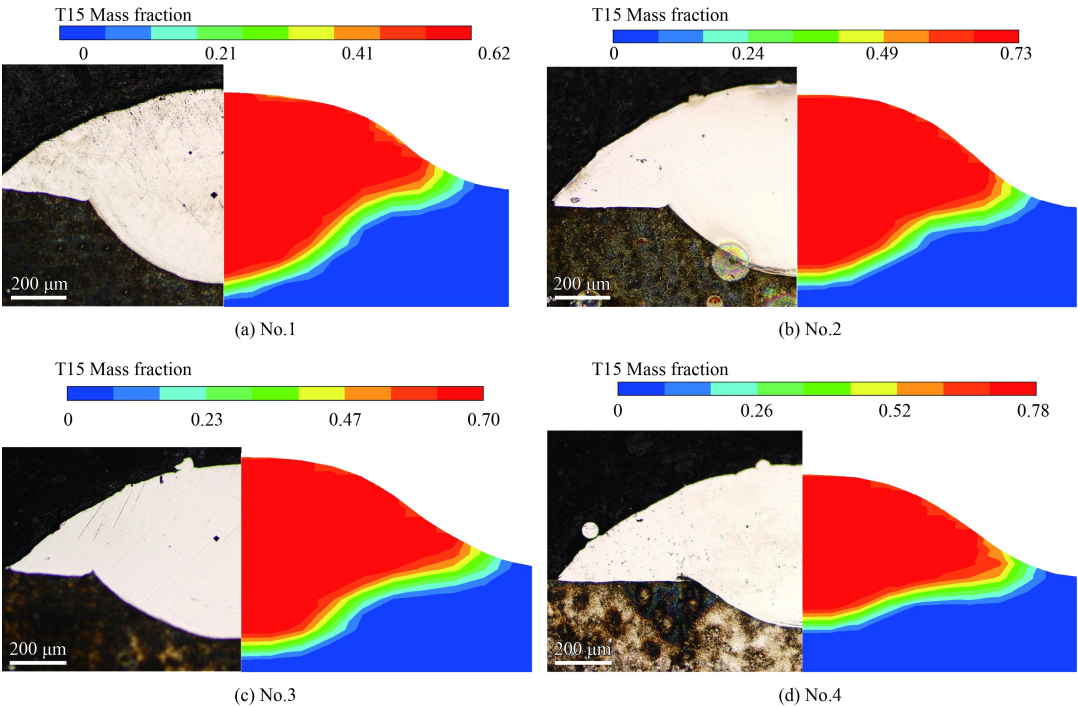


图 3 熔覆层垂直熔覆方向截面数值计算与试验结果对比

Fig.3 Comparison between simulation and experiment on the profile of cross section area for cladding layer

表 4 熔覆层特征参数试验结果与仿真结果对比

Table 4 Comparison of characteristic parameters between experiment and simulation results

Sample	Height			Depth			Dilution		
	Exp / μm	Sim / μm	Deviation / %	Exp / μm	Sim / μm	Deviation / %	Exp / %	Sim / %	Deviation / %
No.1	360	342	-5.0	343	361	5.2	39.7	38	-4.3
No.2	477	420	-12.0	238	251	5.5	23.9	27	13.0
No.3	386	396	2.6	245	262	6.6	29.5	30	1.7
No.4	386	368	-4.7	193	160	-17.0	23.2	22	-5.2

4 结 论

针对 T15 高速钢粉末在 42CrMo 基板上的激光熔覆过程，建立基于多相流的物质传输模型，同时展开单道次激光熔覆试验，对模型进行了验证。具体结论如下：

(1) 建立了包含激光能量输入、增材过程、金属熔池流动、凝固熔化过程与材料扩散的多相流激光熔覆数值模型。比对熔覆层的特征参数的试验结果与仿真结果，在不同工艺参数下 3 项特征参数的平均偏差分别在控制在 6%、9% 和 6%。说明了数值模型对激光熔覆过程具有一定的解释与

模拟能力。

(2) T15 高速钢激光熔覆熔池在表面活性元素的影响下，具有典型的内向流动特征。高温流体向下流动，将基板熔化，使得熔覆层熔深较大，稀释率相对较高。

参考文献

[1] 赵聪硕, 邢志国, 王海斗, 等. 铁碳合金表面激光熔覆的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(3): 418-426.
ZHAO C S, XING Z G, WANG H D, et al. Advances in laser cladding on the surface of iron carbon alloy matrix[J]. Materials Review, 2018, 32(3): 418-426 (in Chinese).

- [2] ZHONG M L, WEN J L. Laser surface cladding: the state of the art and challenges[J]. [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science](#), 2010, 224(5): 1041-1060.
- [3] THOMPSONS S M, BLAN L K, SHAMSAEI N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: transport phenomena, modeling and diagnostics [J]. [Additive Manufacturing](#), 2015, 8: 36-62.
- [4] TUOMINEN J, NAKKI J, PAJUKOSKI H, et al. Micro-structural and abrasion wear characteristics of laser-clad tool steel coatings[J]. [Surface Engineering](#), 2016, 32(12): 923-933.
- [5] KIDESS A, KENJERES S, KLEIJN C R. The influence of surfactants on thermocapillary flow instabilities in low Prandtl melting pools[J]. [Physics of Fluids](#), 2016, 28(6): 062106.
- [6] MILLS K C, KEENE B J, BROOKS R F, et al. Marangoni effects in welding[J]. [Philosophical Transactions-Royal Society of London Series A Mathematical Physical and Engineering Sciences](#), 1998, 15: 911-926.
- [7] WEI S P, WANG G, 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.
- [8] RAGHAVAN A, WEI H L, PALMER T A, et al. Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing[J]. [Journal of Laser Applications](#), 2013, 25(5): 052006.
- [9] GAN Z T, YU G, HE X L, 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.
- [10] GAN Z T, YU G, HE X L, et al. Surface-active element transport and its effect on liquid metal flow in laser-assisted additive manufacturing[J]. [International Communications in Heat and Mass Transfer](#), 2017, 86: 206-214.
- [11] LEE Y, FARSON D F. Simulation of transport phenomena and melt pool shape for multiple layer additive manufacturing[J]. [Journal of Laser Applications](#), 2016, 28(1): 012006.
- [12] QI H, MAZUMDER J, KI H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition[J]. [Journal of applied physics](#), 2006, 100(2): 024903.
- [13] XIE J, KAR A, ROTHENFLUE J A, et al. Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO₂, Nd: YAG and chemical oxygen-iodine lasers[J]. [Journal of Laser Applications](#), 1997, 9(2): 77-85.
- [14] BORIN D, ODENBACH S. Viscosity of liquid metal suspensions-experimental approaches and open issues[J]. [The European Physical Journal Special Topics](#), 2013, 220(1): 101-110.
- [15] DE A, DEBROY T. A smart model to estimate effective thermal conductivity and viscosity in the weld pool[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2004, 95(9): 5230-3240.
- [16] TAN W, BAILEY N S, SHIN Y C. Numerical modeling of transport phenomena and dendritic growth in laser spot conduction welding of 304 stainless steel[J]. [Journal of manufacturing science and engineering](#), 2012, 134(4): 041010.
- [17] SAHOO P, DEBROY T, MCNALLAN M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. [Metallurgical transactions B](#), 1988, 19(3): 483-491.
- [18] HOLTZER M, RETEL K. Effect of temperature and sulphur content on the surface tension of Fe-C (3.9%)-Si (1.6%) alloy[J]. [Canadian metallurgical quarterly](#), 2000, 39(3): 339-344.