

# 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的 三维数值模拟

刘昊 虞钢 何秀丽 李少霞 郑彩云 宁伟健 葛志福

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 针对送粉式激光熔覆的特点, 基于生死单元法建立了一种可以同时计算瞬态温度场及熔覆层几何形貌的三维数值模型, 模型中考虑了送粉过程中激光能量的衰减和粉末颗粒的温升。基于该模型对送粉式激光熔覆过程中的温度场分布和几何形貌特点进行了分析。结果表明, 在熔覆开始较短时间后, 工件的瞬态温度分布与熔覆层几何形貌基本保持稳定。进行了不同送粉速率下的送粉式激光熔覆试验, 对比了熔覆层横截面几何形貌的试验结果和计算结果, 熔覆层表面轮廓线与试验结果基本保持一致, 熔覆层的宽度、高度和熔深与试验结果基本吻合, 说明了所建立的激光熔覆层几何形貌计算模型的有效性和可靠性。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 数值模拟; 几何形貌; 瞬态温度场

中图分类号 TG174.4; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1203007

## Three-Dimensional Numerical Simulation of Transient Temperature Field and Coating Geometry in Powder Feeding Laser Cladding

Liu Hao Yu Gang He Xiuli Li Shaoxia Zheng Caiyun Ning Weijian Ge Zhifu

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** A three-dimensional numerical model based on the birth-death element method is developed on the basis of characteristics of powder feeding laser cladding. The model, which takes the laser power attenuation by the powder stream and the heating of powder particles in the powder feeding process into account, has the capability of predicting the transient thermal field and coating geometry. Temperature distribution and geometric characteristic of coating during laser cladding process are investigated. The results show that the temperature field and coating geometry keep stable after a short initial stage of the process. Experiments with different powder feeding rates are performed to validate the calculated results. The calculated coating width, height and depth, as well as outline of coating, agree with the experimental ones, so the reliability of the model is proved.

**Key words** laser technique; laser cladding; numerical simulation; coating geometry; transient temperature field

**OCIS codes** 140.3390; 240.6700; 350.3390

## 1 引言

激光熔覆是一种柔性化的先进制造技术, 适用于在金属表面制备特殊性能的涂层、零件修复与再制造、快速成形等多种场合<sup>[1-3]</sup>。根据熔覆材料输送方式的不同, 激光熔覆可以分为预置粉末法和送

粉法<sup>[3]</sup>。其中, 送粉式激光熔覆具有与基体结合强度高、稀释率低、组织均匀致密、工件热影响区与加工变形小、易于实现自动化控制等优势<sup>[2-3]</sup>。

激光熔覆层的几何形貌既是熔覆运动轨迹设计的参考因素, 也是影响最终工件尺寸精度的重要因

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11272316, 11272317)

作者简介: 刘昊(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光熔覆热防护涂层工艺方面的研究。

E-mail: Leonardo2008LH@163.com

导师简介: 虞钢(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光制造工艺学等方面的研究。

E-mail: gyu@imech.ac.cn(通信联系人)

素。而激光熔覆过程是多参数相互影响的化学冶金过程,激光功率、扫描速度、送粉速率等工艺参数对熔覆层的几何形貌都有直接影响<sup>[4-5]</sup>。利用线性回归分析<sup>[5]</sup>、神经网络和粒子群算法<sup>[6]</sup>等数学方法,可以拟合激光单道熔覆试验的工艺参数与熔覆层高度、宽度、熔深等几何形貌之间的函数关系。但表达式中的参数缺乏明确的物理含义,并且在不同环境条件下的试验,对相同工艺参数通常拟合出不同的表达式<sup>[4]</sup>,影响了这种试验拟合的方法对工艺优化的指导意义。

国内外学者在近些年来通过建立数值模型,对激光熔覆过程进行模拟计算,探究工艺参数对熔覆层质量的影响规律。激光熔覆数值模拟的其中一个关键点是对熔覆材料添加过程的考虑和描述,张永杰等<sup>[7-8]</sup>与 Wang 等<sup>[9]</sup>采用了生死单元法数值模拟单道多层成形热历程的演化规律,计算得到的热历程温度曲线与试验结果吻合良好。贾文鹏等<sup>[10]</sup>同样采用生死单元法,计算分析了激光快速成形航空发动机涡轮叶片过程的温度场与应力场。这些研究工作在使用生死单元法时,一个共同点是熔覆层或成形壁面的几何形状是建立几何模型时预先设定的,然后在每个时间步中,根据激光束的位置“激活”熔覆层单元来模拟熔覆材料的生长。利用这样的方法可以研究激光熔覆过程中材料的热历程规律,但难以模拟熔覆层几何形貌的形成过程。

采用生死单元法考虑激光熔覆中材料的动态添加过程,提出一种无需预先设定熔覆层几何形貌的三维数值模型。模型中在每个时间载荷步内,根据瞬态温度场计算结果捕捉熔池界面,然后依据熔覆材料的质量守恒关系,“激活”与熔池气液界面相邻的单元,参与下一载荷步的温度场计算,使模型具备同时计算温度场和熔覆层几何形貌的能力。进行了不同送粉速率下的送粉式激光熔覆验证试验,计算结果与试验结果基本吻合。

## 2 数学模型建立

如图 1 所示,送粉式激光熔覆物理过程可简要概括为:熔覆粉末通过载粉气体输送到金属基体表面,同时金属表面吸收经粉末流遮蔽衰减后的激光能量,迅速升温熔化,与落入该区域的粉末颗粒共同形成熔池。随着激光束与基体之间相对运动,熔池快速凝固冷却,形成熔覆层。从熔池快速形成、快速凝固的角度分析,熔覆层几何形貌受到粉末流分布、熔池表面张力、熔池内部流动等多方面的影响<sup>[5]</sup>。

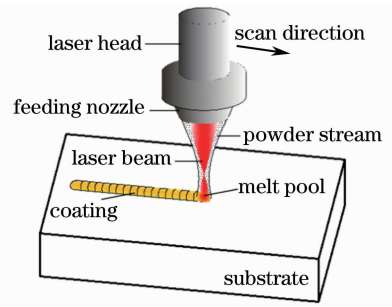


图 1 送粉式激光熔覆示意图

Fig. 1 Laser cladding with powder injection

### 2.1 基本假设

为了简化计算,对激光熔覆过程采用以下基本假设:

1) 假设激光束强度为高斯分布,表示为

$$I(r) = \frac{2P}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right), \quad (1)$$

式中  $P$  为激光功率,  $r_b$  为激光束半径,  $r$  为距激光束中心的距离。激光束能量以表面热源的形式加载在材料表面<sup>[7]</sup>。考虑到粉末流对激光能量的衰减和基体材料对激光束的吸收,表面热源表示为

$$q(r) = \alpha(1 - \beta) \frac{1}{\pi r_b^2} \int_0^{r_b} I(r) \cdot 2\pi r \cdot dr, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为基体材料对激光能量的吸收率,  $\beta$  为粉末流对激光能量的衰减率。

2) 输送至熔池自由表面范围内的粉末颗粒落入熔池,立即熔化、沉积,不考虑熔池的流动及由固态粉末颗粒进入熔池而带来的两相对流换热。

3) 基体与熔覆材料为各向同性材料,材料的热物性参数随温度变化。利用焓值法考虑材料的相变潜热<sup>[7]</sup>,忽略材料的汽化作用。

4) 由于金属表面通过对流和辐射方式与环境进行热交换,使得问题成为高度非线性问题,为综合考虑辐射和对流换热现象,模型中通过一个综合表面散热系数  $h_c$  来考虑<sup>[11]</sup>,即

$$h_c = 2.41 \times 10^{-3} \epsilon T^{1.61}, \quad (3)$$

式中  $\epsilon$  为材料表面发射率,  $T$  为材料表面温度。

### 2.2 数学模型

在激光熔覆过程中的温度分布  $T(x, y, z, t)$  可以通过数值求解热传导控制方程和一定的边界条件和初始条件得到。在求解域内的热传导控制方程表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}, \quad (4)$$

式中  $k$ 、 $\rho$ 、 $c_p$  分别为材料的热导率、密度和比热容,  $t$  为时间。

对于基体材料,其初始条件下温度为环境温度  $T_0$ ,表示为

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (5)$$

对于熔覆材料,根据假设 2),初始条件表示为

$$T(x, y, z, t_a) = T_a, \quad (6)$$

式中  $t_a$  为熔覆材料沉积在基体上的时刻,  $T_a$  为熔覆材料的初始温度,亦即粉末颗粒在送粉阶段的温升。

根据假设 1),移动的激光束通过表面热流边界条件加载,则在激光辐射区域表面的边界条件为

$$k(\nabla T \cdot \mathbf{n}) = q(r), \quad \text{if } S \in \Omega, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{n}$  为表面的法向量,  $S$  表示材料表面,  $\Omega$  表示激光辐射区域。

根据假设 4),模型与环境空气接触的表面的边

界条件为

$$k(\nabla T \cdot \mathbf{n}) = h_c(T - T_0), \quad \text{if } S \notin \Omega. \quad (8)$$

在模拟计算中,激光能量衰减率  $\beta$  与进入熔池的熔覆材料初始温度  $T_a$  是反映激光熔覆送粉过程中粉末激光相互作用的模型输入参数,也是熔覆层与基体温度场计算的边界条件与初始条件参数。采用一种简化的理论模型来考虑送粉速率对激光功率衰减率和粉末颗粒温度升高的影响<sup>[12]</sup>。激光能量衰减率表达式为

$$\beta = \frac{3Q_m}{4\pi v_p r_{jet} r_p \rho_p \cos \theta_{jet}}, \quad (9)$$

式中  $Q_m$  为送粉速率,  $v_p$  为粉末颗粒平均速度,  $r_p$  为熔覆粉末颗粒半径,  $\rho_p$  为熔覆粉末密度,  $r_{jet}$  为送粉头喷嘴半径,  $\theta_{jet}$  为送粉头喷嘴轴线与水平线夹角。可以看出,激光能量衰减率与送粉速率呈正比例关系。粉末颗粒在送粉过程中的温升表达式为

$$\begin{cases} T_a = T_0 + \frac{3r_b}{2\pi c_p \rho_p r_p v_p \cos \theta_{jet}} \left[ \frac{\alpha_p P}{r_b^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \right], & \text{if } T_a \leq T_m \\ T_a = T_0 + \frac{3r_b}{2\pi c_p \rho_p r_p v_p \cos \theta_{jet}} \left[ \frac{\alpha_p P}{r_b^2} - 4\pi \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \right] - \frac{l_p}{c_p}, & \text{if } T_a > T_m \end{cases} \quad (10)$$

式中  $c_p$ 、 $l_p$ 、 $T_m$ 、 $\alpha_p$  分别为粉末颗粒的比热容、熔化潜热、熔点温度和对激光能量的吸收率,  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数。

### 2.3 计算方法

在数值计算中,将激光熔覆时间离散化为一系列较短的时间载荷步处理。在计算中,上一载荷步的温度场计算结果作为下一载荷步计算的初始条件。生死单元方法的基本思想是在初始状态下将熔覆单元的刚度矩阵及质量矩阵元素乘以一个小因子使其处于“未激活”(“死”)状态,相当于单元不参与数值模型的计算。当“死”单元被“激活”后,单元的刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始数值,参与到数值模型的计算之中。

数值计算模型所建立的有限元网格如图 2 所示。基体材料的单元处于“激活”状态,始终参与数值模型的计算过程。根据激光束扫描轨迹范围,在基体表面建立起一块足够大熔覆层几何区域并划分单元,称之为熔覆区域单元。该区域内单元在计算前处于“未激活”状态,即表示激光熔覆开始前不存在熔覆层。在计算过程中,根据每个载荷步的温度场结果与熔覆材料的质量守恒,“激活”一部分熔覆区域单元,表示在此载荷步时间内沉积的熔覆材料。计算结束后,熔覆

层几何形貌由在所有载荷步中累积“激活”的单元构成的几何体来表征,而不是由预先划分的熔覆区域单元来表征。在这种方法下,计算结束后仍会有一部分熔覆区域单元处于“未激活”状态。

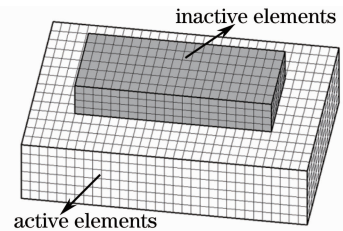


图 2 有限元网格划分及“生”、“死”单元示意图  
Fig. 2 Schematic of meshed geometry showing active and inactive elements

熔覆层几何形貌的计算具体过程如图 3 所示,图中示意了数值计算中前两个载荷步的过程。在每个载荷步中包含两个主要的步骤,如在第一个载荷步中:1) 激光直接作用在基体表面,根据控制方程、边界条件和初始条件求解出温度场分布。在这一时刻,瞬态温度大于基体材料熔点的区域认为是熔池,捕捉熔池的气液界面与固液界面;2) “激活”与熔池气液界面相邻的处于“未激活”状态的单元,模拟熔覆材料在基体上的沉积过程。根据激光熔覆过程中

的质量守恒来决定在每个载荷步中激活单元的总数,质量守恒表示为

$$\rho_v V_i = \eta Q_m \Delta t, \quad (11)$$

式中  $V_i$  为在第  $i$  个载荷步激活的单元总体积,  $\eta$  为粉末利用率,  $\Delta t$  为载荷步时间步长。

根据大量工艺试验结果,单道熔覆层上表面主要受表面张力控制,其截面形状可以用球冠近似<sup>[5]</sup>。在本模型中,每个载荷步中激活单元的分布采取这种球冠近似,则  $V_i$  可以表示为

$$V_i = \pi h_i^2 \left( R_i - \frac{h_i}{3} \right), \quad (12)$$

式中  $R_i$ 、 $h_i$  分别表示第  $i$  个载荷步中球冠的半径和高度,这两个参数与在第  $i$  个载荷步中捕捉到的熔

池半径  $r_{m,i}$  满足关系

$$r_{m,i}^2 + (R_i - h_i)^2 = R_i^2. \quad (13)$$

经第 1 个载荷步的计算与处理后,已经“激活”一部分熔覆区域单元,将参与第 2 载荷步的计算。图 3(c),(d)表示第 2 个载荷步中的主要步骤,激光束根据扫描速度与载荷步时间移动一定的距离,更新边界条件,以上一步的温度场计算结果作为初始条件,再次计算瞬态温度场分布,捕捉熔池界面,并在熔池气液界面沉积熔覆材料。以时间载荷步为单位持续进行上述循环,直至激光熔覆过程结束。上述建模过程及计算流程可以表示为图 4。

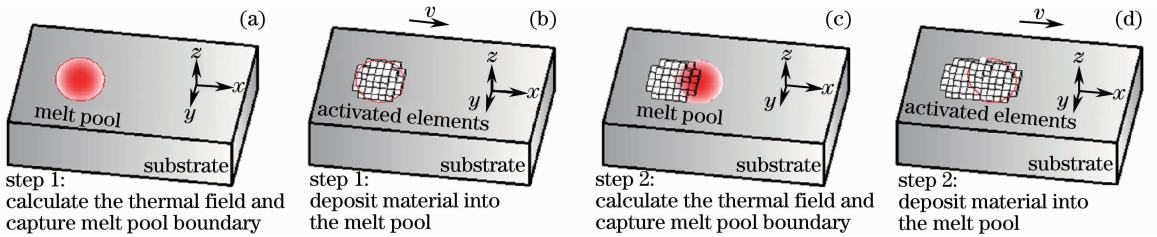


图 3 温度场与熔覆层几何形貌计算方法示意图

Fig. 3 Schematic of computational procedure for thermal field and laser track geometry

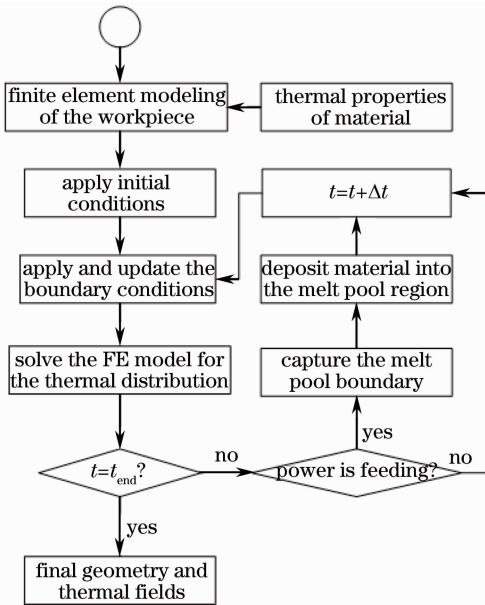


图 4 温度场及熔覆层几何形貌计算流程

Fig. 4 Flow chart showing main steps of calculation for thermal field and laser track geometry

## 2.4 模型描述

利用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 编程实现图 4 所示的计算流程,计算激光熔覆过程的瞬态温度场和熔覆层几何形貌。本文建立的三维几何模型及网格划分如图 5 所示,基体尺寸为 25 mm ×

10 mm × 6 mm,熔覆区域尺寸为 20 mm × 3 mm × 1 mm,激光束扫描长度为 18 mm。建立的直角坐标系原点位于激光扫描初始点, $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向分别与基体的长、宽、高方向平行。采用六面体 8 节点 SOLID70 单元对模型划分映射网格,为了较为准确描述熔覆层形貌,细化熔覆区域的网格, $x$ 、 $y$  方向网格长度为 0.1 mm, $z$  方向网格长度为 0.05 mm。基体远离熔覆区域的网格逐渐变大,以提高计算速度,节省计算时间。在计算初始状态,基体区域单元处于“激活”状态,熔覆区域单元处于“未激活”状态。

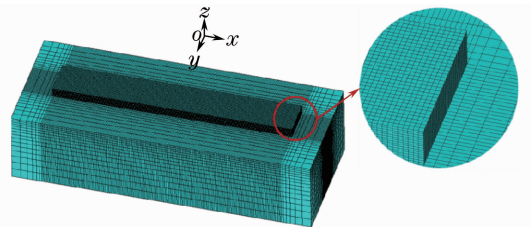


图 5 三维几何模型及网格划分

Fig. 5 Meshed geometry for calculation of laser cladding

激光熔覆采用的基体材料是蠕墨铸铁 (RT300A),熔覆粉末材料为合金粉末 (NiCoCrAlY),粉末粒径为 50~125  $\mu\text{m}$ 。基体材料与粉末材料随温度变化的热物性参数见文献<sup>[13-14]</sup>,模型中使用的主要参数见表 1。为保证计算过程中

熔覆层的连续性,载荷步时间步长设置为  $\Delta t = r_b/v$ ,  $v$  为激光束移动速度。

表 1 模型中使用的主要参数

Table 1 Main parameters used in model

Laser power /W	Absorptivity	Laser beam radius/mm	Travel speed /(mm/s)	Ambient temperature /°C	Fusion point /°C
900	0.36	1	3	25	1208

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 计算结果分析

将材料的热物性参数与熔覆工艺参数输入计算模型,根据上述方法计算模拟激光熔覆瞬态温度场与熔覆层沉积生长过程。在送粉速率为10.0 g/min的情况下,第6个载荷步( $t=2$  s)时温度场与熔覆层

沉积的计算结果如图6所示。图6(a)显示了此时激光熔覆瞬态温度场与熔覆层形貌的计算结果。在激光已经扫描过的路径上,形成了一道熔覆层,这是由前5个载荷步按照质量平衡的原则累积“激活”的单元所构成的。

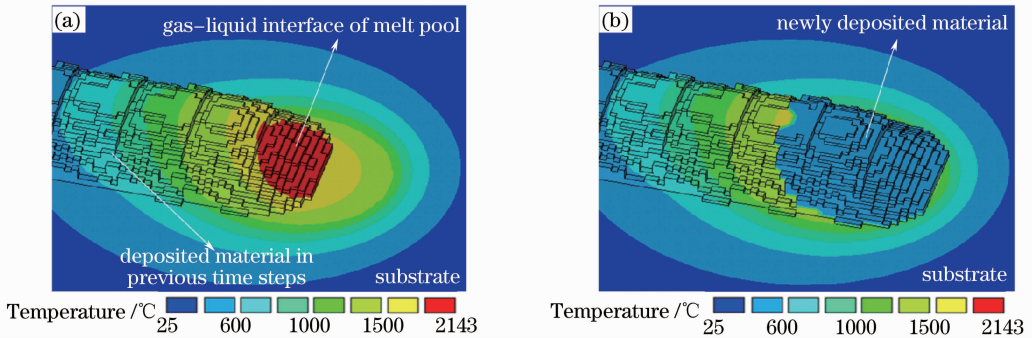


图6 激光熔覆计算中一个载荷步的(a)温度场与(b)熔覆层沉积

Fig. 6 Calculation results of (a) thermal field and (b) cladding layer depositing procedure in one time step

根据第6个载荷步的瞬态温度分布结果捕捉到的熔池形状如图7所示。熔池的宽度为2.3 mm,长度为3.0 mm,高度为1.4 mm,其中已形成的熔覆层的最大高度为0.75 mm。由于熔池的气液界面是熔覆材料沉积生长的界面,所以根据本文的计算方法,与熔池气液界面相接触的熔覆层“未激活”状态的单元被“激活”。其中被“激活”的单元一部分位于已形成的熔覆层之上,另一部分位于基体表面之上,使熔覆层随着激光束的扫描而不断向基体表面延伸。在该载荷步中被“激活”的单元如图6(b)所示,可以看到,被“激活”单元已完全覆盖在图6(a)的熔池气液界面之上,且初始温度为516 °C,表示粉末材料在进入熔池时已经因为激光辐射而升温到516 °C,此温度是根据(10)式计算得出。

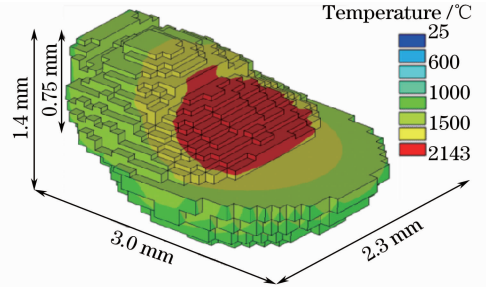


图7 根据温度场计算结果捕捉到的三维熔池形态

Fig. 7 3D melt pool captured based on thermal field calculation

基于本文模型对送粉式激光熔覆过程中的温度场和几何形貌特点进行分析。激光熔覆中不同时刻下温度分布与熔覆层几何特征如图8所示。在激光熔覆的初始阶段( $t=2$  s),熔池及温度分布从俯视方向看呈拖尾的彗星状,从纵截面方向看呈勺状,中心高温区域基本对应激光作用位置,最高温度已达到

2143 °C,而远离激光作用位置的基体仍保持初始温度。随着激光束的移动,基材中的温度分布以激光束为中心动态升高。激光束有效输入的能量一部分用于加热、熔化粉末材料,一部分用于加热基体。在激光束作用初期,基体温度较低,熔池内的最高温度较低,在激光移动方向上的熔池长度较小;随着激光能量的持续输入,基体温度升高,熔覆层与基体之间的热传导作用减弱,熔池最高温度升高,并且熔池的长度与宽度增大。当熔覆进行到一定阶段时,基体和熔覆层通过表面辐射、对流等方式散失的热量与吸收激

光束的热量基本保持平衡,则熔池进入准稳态过程,其最高温度与尺寸都趋于稳定。所述的激光熔覆中

熔池最高温度随时间的变化曲线如图 9 所示,可以看出熔池最高温度在 0.6 s 后就已基本稳定。

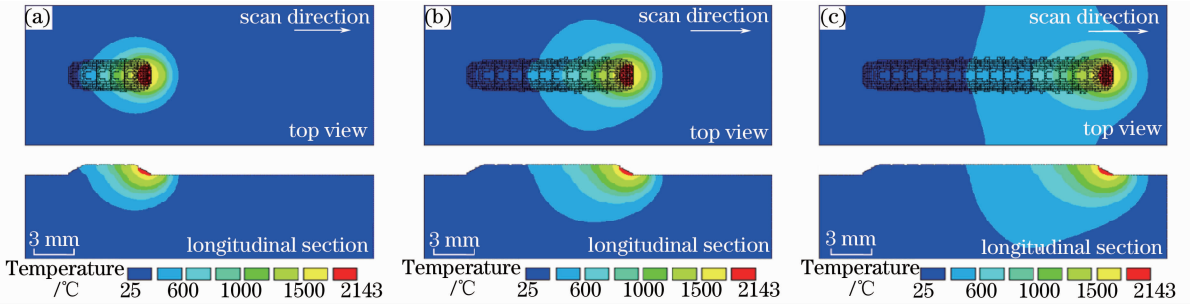


图 8 激光熔覆中不同时刻温度分布与熔覆层形貌特点。(a) 2 s; (b) 4 s; (c) 6 s

Fig. 8 Thermal field and geometrical characteristics of coating at different time in laser cladding. (a) 2 s; (b) 4 s; (c) 6 s

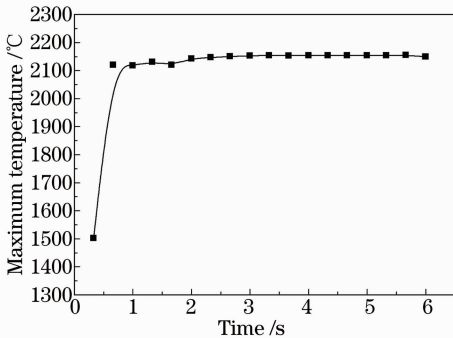


图 9 激光熔覆中的熔池最高温度随时间的变化曲线

Fig. 9 Maximum temperature of melt pool versus time in laser cladding

熔覆层的几何形貌与熔池的动态过程紧密相关,由于熔池在较短的时间内就已进入稳定阶段,所以熔覆层在整个熔覆阶段也保持一定的稳定性。从图 8 俯视图可以看出,熔覆层的长度随着激光的移动而增长,熔覆层总长度为 17.6 mm,约等于激光束扫描长度。熔覆层的宽度在起点附近为 1.8 mm,随着激光束的移动熔池宽度增大,熔覆层的宽度也随之增大并逐渐稳定在 2.3~2.4 mm 之间。从图 8 的纵截面图可以发现,熔覆层的起点和终点的轮廓线近似为弧线,从三维形貌上看应呈半球状,在中间阶段熔覆层的高度基本保持恒定。在熔覆层起点与终点激光持续作用时间短,熔池吸收并熔化的粉末量少,所以造成熔覆层宽度与高度在起点终点处与在中间阶段明显不同。

### 3.2 试验验证

在蠕墨铸铁表面进行合金涂层的激光单道熔覆试验,试验中采用不同的送粉速率。激光器选用 HLD1001.5 型 Nd:YAG 固体连续激光器,激光最大功率为 1000 W,为多模输出模式,光束强度包络线近似为高斯分布。熔覆后,用丙酮溶液对试样进行超声波清洗去污。由于熔覆层起点、终点的宽度

并不一致,在起点时基体温度较低,而到达终点时系统已达到热平衡状态,所以终点处的熔覆层宽度略大于起点处,而中间阶段的宽度较为稳定,故用线切割截取中间阶段的熔覆层横截面,在 Nephot-II 型显微镜下观测熔覆层横截面形状与尺寸。同时,利用本文的模拟计算方法,将激光熔覆工艺参数与材料热物性输入计算模型进行计算,对比熔覆层横截面形状、尺寸的试验结果与计算结果。

在激光熔覆试验中,所产生的熔覆层横截面几何形貌由两部分组成,如图 10 所示,分别为由粉末材料添加形成在基体表面之上的涂层区域与由基体受激光辐射熔化而形成的熔化区域。需要指出的是,这里是从几何上以基体表面为分界面划定涂层区域与熔化区域两部分,由于熔覆过程中的对流传热传质,这两部分在材料成分和性质上并没有明显区别。在本文的模拟计算方法下,涂层区域由在整个计算过程中累积激活的熔覆层单元构成,熔化区域的边界根据温度场的计算结果以基体材料熔点的等温面来表示。如图 10 所示,采用熔覆层宽度  $W$ 、高度  $H$  和熔深  $D$  作为特征参数,描述熔覆层的几何形貌。

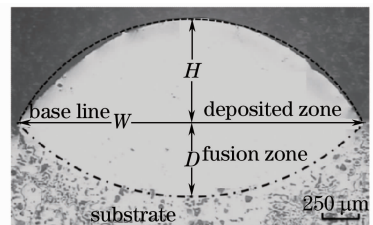


图 10 熔覆层横截面形貌

Fig. 10 Typical cross-section of cladding layer  
在不同送粉速率下试验与计算所得到的熔覆层横截面几何形貌对比如图 11 所示,3 组验证试验的送粉速率分别为 4.1、6.1、8.1 g/min。由于熔覆层

横截面的对称性,将试验结果与计算结果各取一半对比表示,图 11(a)~(c)中右侧部分为试验结果,左侧部分为计算结果,其中红色区域表示熔覆层。熔覆层表面轮廓线呈现出不完全连续的锯齿状。由于锯齿是由熔覆层激活单元的边界构成,所以这里

的单元尺寸越小,则表面轮廓线越光滑。为了更好地模拟熔覆层表面轮廓线,在该计算中已将单元 3 个方向的尺寸都细化到 0.05 mm。从图 11 可以看出,在不同送粉速率下模型计算出的表面轮廓线均呈圆弧状,且与试验结果基本一致。

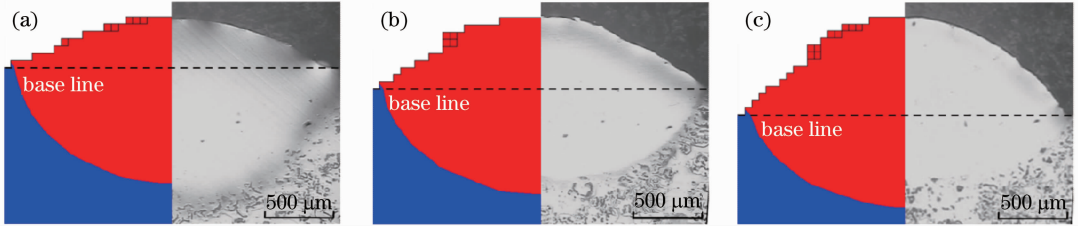


图 11 不同送粉速率下熔覆层横截面几何形貌试验与计算结果对比。(a) 4.1 g/min; (b) 6.1 g/min; (c) 8.1 g/min

Fig. 11 Comparison between experimental and simulated cross sections of coating under different powder feeding rates.

(a) 4.1 g/min; (b) 6.1 g/min; (c) 8.1 g/min

在与熔覆试验相同的参数下计算与试验的横截面特征参数对比结果如表 2 所示,  $\beta$ 、 $T_a$  表示根据 (9)、(10) 式所得的激光功率衰减率与熔覆材料初始温度, ER 和 SR 分别表示试验结果和计算结果。从试验结果数据来看,随着送粉速率从 4.1 g/min 增加到 8.1 g/min,熔覆层宽度基本保持不变,熔覆层高度从 0.34 mm 增加到 0.69 mm,熔化区域深度从 0.85 mm 减小到 0.47 mm。因为在其他参数一定的情况下,随着送粉速率的增大,激光头与基体之间的粉末浓度增大,吸收激光能量升温、熔化、进入熔池的粉末质量增加,而用于熔化基体材料的激光能量相对减少,所以有这种熔覆层高度增大而熔深

减小的变化趋势。从表 2 可以看出,在不同送粉速率下的熔覆层宽度和高度的计算结果和试验结果吻合良好,最大偏差小于 5%;熔深的计算结果在低送粉速率下与试验结果吻合较好,在高送粉速率下计算结果较试验偏大。这主要是因为,在计算熔覆阶段的瞬态温度场时,如图 6、7 所示,激光束作用区域一部分在已沉积的熔覆层上,另一部分在基体材料表面,由于模型中忽略了熔池流动对熔池气液界面的影响,所以在高送粉速率下,激光束作用在基体材料表面区域的比例较实际情况偏大,导致计算熔深比试验结果偏大。

表 2 熔覆层横截面特征参数的试验与计算结果对比

Table 2 Comparison of experimental and simulated of characteristic parameters of cross sections

Set	$Q_m / (\text{g}/\text{min})$	$\beta / \%$	$T_a / ^\circ\text{C}$	$W / \text{mm}$		$H / \text{mm}$		$D / \text{mm}$	
				ER	SR	ER	SR	ER	SR
A	4.1	4.5	516	2.36	2.30	0.34	0.35	0.85	0.83
B	6.1	6.6	516	2.34	2.30	0.51	0.50	0.64	0.75
C	8.1	8.7	516	2.31	2.30	0.69	0.70	0.47	0.66

综上所述,采用本文模型计算出的熔覆层表面轮廓线与试验结果基本一致,熔覆层横截面宽度、高度、熔深数据与试验结果基本吻合,并反映出了与试验结果相同的随送粉速率变化而变化的趋势,说明了本文模型计算熔覆层几何形貌的有效性和可靠性。采用本模型和计算方法可以进一步计算模拟多道单层、多道多层激光熔覆的瞬态温度场和几何形貌。

## 4 结 论

1) 根据送粉式激光熔覆的特点,提出一种可以同时计算温度场和熔覆层几何形貌的三维数值模型,模型中考虑了粉末输送过程中激光能量的衰减

和粉末颗粒的温升。使用生死单元法,由每个时间载荷步计算出的瞬态温度场来捕捉熔池界面,根据熔覆材料质量守恒,“激活”与熔池气液界面接触的单元,参与下一载荷步的温度场计算。计算结束后,在所有载荷步中累积激活的单元构成的几何体就表示熔覆层的几何形貌。

2) 基于本模型对送粉式激光熔覆过程中的温度场和几何形貌特点进行了分析。在激光功率为 900 W,光斑直径为 2 mm,送粉速率为 10.0 g/min 等工艺参数下,结果表明,熔池在熔覆开始后较短的时间内(0.6 s)即进入温度和大小相对稳定的阶段。熔覆层的几何形貌与熔池的动态过程关系密切,在

熔覆起始阶段(0.6 s内)熔覆层宽度较小,在随后的熔覆中间阶段熔覆层宽度、高度基本保持稳定。

3) 对比了不同送粉速率下送粉式激光熔覆的计算和试验结果。熔覆层表面轮廓线与试验结果基本保持一致,熔覆层横截面的宽度、高度、熔深与试验数据基本吻合,说明了本文模型计算不同参数条件下熔覆层几何形貌的有效性和可靠性。

### 参 考 文 献

- 1 R Vilar. Laser cladding[J]. Journal of Laser Applications, 1999, 11(2): 64-79.
- 2 E Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin. Laser Cladding [M]. Florida: CRC Press, 2005. 1-40.
- 3 Wu Yang, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Research on processing of laser cladding Ta-W alloy coatings[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803008.  
武 扬, 虞 钢, 何秀丽, 等. 激光熔覆 Ta-W 合金涂层工艺方法研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803008.
- 4 V Ocelik, U de Oliveira, M de Boer, *et al.*. Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: analysis of processing conditions and coating properties [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(12): 5875-5883.
- 5 H El Cheikh, B Courant, S Branchu, *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 413-422.
- 6 Ni Libin, Liu Jichang, Wu Yaoting, *et al.*. Optimization of laser cladding process variables based on neural network and particle swarm optimization algorithms[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(2): 0203003.  
倪立斌, 刘继常, 伍耀庭, 等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺优化[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203003

- 7 Zhang Yongjie, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Numerical study of thermal history in laser aided direct metal deposition process[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(8): 1431-1438.
- 8 Zhang Yongjie, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Numerical and experimental investigation of multilayer SS410 thin wall built by laser direct metal deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 106-112.
- 9 L Wang, S Felicelli, Y Gooroochurn, *et al.*. Optimization of the LENS process for steady molten pool size[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 474(1-2): 148-156.
- 10 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.  
贾文鹏, 林 鑫, 陈 静, 等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1308-1312.
- 11 M Alimardani, E Toyserkani, J P Huissoon. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(12): 1115-1130.
- 12 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 225-235.  
黄卫东, 林 鑫, 陈 静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 225-235.
- 13 Tan Zhen, Guo Guangwen. Thermophysical Properties of Engineering Alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 152-154.  
谭 真, 郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 152-154.
- 14 X C Zhang, B S Xu, H D Wang, *et al.*. Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded ZrO<sub>2</sub>/NiCoCrAlY coatings using finite elements method[J]. Materials & Design, 2006, 27(4): 308-315.

栏目编辑: 宋梅梅