

文章编号: 0258-7025(2007)07-1004-05

# 脉冲激光毛化加工的计算机流体动力学 数值模拟

万大平, 胡德金, 刘红斌, 蔡兰蓉

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要** 激光毛化的温度场和熔化过程流动状态的变化, 以及因辅助气体等导致的对流换热边界条件变化都会对材料表面成形质量和组织转变产生重要影响。于是建立了模拟激光毛化的三维瞬态模型, 该模型考虑了热传导、对流换热及熔池表面的形貌变化等因素, 采用焓法与流体体积 (VOF) 方法处理固液相变移动边界与自由表面的问题, 利用 Fluent 软件 and 用户自定义函数 (UDF) 方法求解, 处理了辅助气体的驱动作用及自由表面和相界面的演化, 得出了脉冲激光毛化过程中各种加工参数下熔池的形状、大小以及熔池内的温度、速度分布。实际毛化加工结果与数值模拟结果基本一致。

**关键词** 激光技术; 激光加工; 数值模拟; 计算机流体动力学; 三维模型

**中图分类号** TN 249; TG 331 **文献标识码** A

## Computational Fluid Dynamic Numerical Simulation for Pulse Laser Texturing Machining

WAN Da-ping, HU De-jin, LIU Hong-bin, CAI Lan-rong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The temperature field, molten flow and gas jet induced convection and heat exchange boundary conditions are important for material surface formation quality and tissue transformation in laser texturing. Then a three-dimensional transient numerical model is developed for the heat transfer, convection heat transfer and morphology evolution of the molten pool during laser surface texturing. Based on the software Fluent, the model adopts the enthalpy and volume of fluid (VOF) methods to solve the solid-liquid phase boundary and free surface flow numerically. The evolution of phase interface and free surface, and the effect of assist gas on the surface profile are analysed. The heat transfer and fluid motion, as well as the surface shape and scale of the molten pool are numerically approached for the pulse laser texturing with different processing parameters. The numerical simulation was consistent with the result of laser texturing experiments.

**Key words** laser technique; laser machining; numerical simulation; computational fluid dynamics; three-dimensional model

## 1 引 言

激光毛化是新近发展起来的冷轧钢辊毛化新技术。激光毛化轧辊时, 高能量密度、高重复频率的脉冲激光束, 聚集照射到轧辊表面, 形成若干微小熔池, 同时辅助气体侧吹熔池中的熔融物, 按指定要求堆积到熔池边缘。光脉冲作用停止后, 微坑熔融物

迅速冷却, 形成表面硬化的微坑和坑边凸台结构。激光毛化加工是一个瞬态的、非平衡、极不均匀的复杂物理化学过程, 所形成的温度场及熔化过程中的流动状态的变化, 以及因辅助气体等导致的对流换热边界条件变化都会对材料表面成形质量和组织转变产生重要影响<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2006-12-05; 收到修改稿日期: 2007-01-19

基金项目: 上海市重点科技项目 (05DZ2202) 资助课题。

作者简介: 万大平 (1974—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事特种加工及其装备技术的研究。E-mail: wdp@sjtu.edu.cn

导师简介: 胡德金 (1946—), 男, 四川人, 教授, 主要从事特种加工技术与光机电装备的研究。E-mail: djhu@sjtu.edu.cn

Vatsya 等<sup>[2]</sup>为了研究熔体对重熔表面微观结构的影响,通过所建的模型对熔体的流动进行了模拟。重要的是在纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程中考虑了熔液中压力的影响,以及对熔体流动过程和最终成形表面有重要影响的表面边界条件,计算结果与实测结果有着较强的相似性。Etsuji 等<sup>[3]</sup>在 Si 表面毛化时考虑了蒸发潜热、气体和流体界面的运动、蒸发反压,考虑了温度梯度的马兰戈尼(Marangoni)力,以及表面张力的作用。叶晓虎等<sup>[4]</sup>将熔池速度变化急剧的表面层区域和其余区域分开求解并相互耦合。席明哲等<sup>[5]</sup>考虑了材料相变过程对激光熔池温度场的影响。处理固液相变移动边界的斯特藩(Stefan)问题是数值模拟激光毛化熔池的关键<sup>[6,7]</sup>,对于高能束激光熔凝金属材料,相变发生在一个温度区间内,存在着固-液共存区,焓-多孔介质技术较之其他方法(多重线法、变分不等式法等)更适合求解这一过程,它稳定高效,易于扩展到三维问题。

在冷轧辊毛化时还需考虑辅助气体与熔池液面的相互作用,以及高速瞬态激光熔凝加工时的特殊条件。本文考虑了热传导、对流传热和熔池表面形貌变化等因素,采用焓法与糊状区处理固液相变问题,用流体体积(VOF)方法分析了自由表面的行为,利用计算流体动力学(CFD)软件 Fluent 和用户自定义函数(UDF)得出了脉冲激光毛化过程中辅助气体的驱动作用及自由表面和相界面的演化<sup>[8]</sup>。

## 2 理论模型

### 2.1 物理模型的建立

激光毛化材料表面时,温度升高而发生熔化,试样上存在固相区、液相区和糊状区三个不同的区域。因此应以熔化和凝固的相变过程为基础,采用对流/扩散固液相变统一模型,采用体积分数函数跟踪气液两相界面,通过求解同一控制方程计算两相的流场分布,添加相应的源项和边界条件进一步修正和完善数学模型。

模型只对激光束下一有限区域进行计算,图 1 为激光毛化过程熔凝示意图。假设激光束沿  $x$  轴正向,试样上表面沿径向轴  $r$ ,以速度  $v$  向左运动。 $T$  是液气自由边界, $T_s$ ,  $T_l$  和  $T_m$  分别表示固相区、液相区和糊状区。气流方向与  $z$  轴的夹角为  $\theta$ 。建立激光表面熔凝过程控制方程时,还需作以下假设:1) 激光的热流密度分布呈高斯分布;2) 激光熔池中液

态金属流动的驱动力为表面张力梯度和热毛细力;3) 不考虑熔池自由表面的气化热损失。

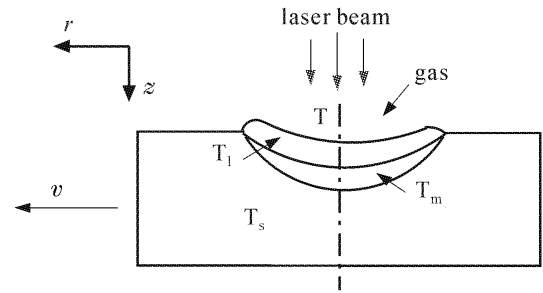


图 1 激光加工物理模型

Fig. 1 Laser processing model

### 2.2 数学模型的建立

采用焓-多孔介质技术处理固液相变移动边界问题<sup>[7]</sup>,材料的比焓  $H$  包括显焓  $h$  与潜焓  $\Delta H$

$$H = h + \Delta H, \quad (1)$$

其中

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT; \quad \Delta H = \beta L, \quad (2)$$

式中  $h_{\text{ref}}$  为基准比焓; $T$  为任意时刻的温度; $c_p$  为定压热容; $L$  为相变潜热;液相分数  $\beta$  定义为

$$\beta = \begin{cases} 0 & (T < T_{\text{sol}}) \\ 1 & (T > T_{\text{liq}}) \\ (T - T_{\text{sol}}) / (T_{\text{liq}} - T_{\text{sol}}) & (T_{\text{sol}} < T < T_{\text{liq}}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $T_{\text{sol}}$  与  $T_{\text{liq}}$  分别为固液相变温度。对于凝固/熔化问题,能量方程可以写作<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + S, \quad (4)$$

式中  $\rho$  为密度; $v$  为速度; $S$  为源项; $k$  为导热系数。Fluent 软件采用比焓法求解相变导热问题,其优点是将比焓和温度一起作为待求量,不需将液相和固相分开处理,通过对能量方程(4)和液相组分公式的迭代计算来求解相变温度,得到相变界面的位置,并可使能量方程很好地收敛。

Fluent 软件采用有限体积法来计算流场,用流体体积法求解气液界面。熔池流动属于气液分层两相流,适合采用流体体积法。流体体积引入体积分数  $\alpha_q$  表示第  $q$  种物质在单元格内所占有的容积率,文中, $q = 1$  和  $2$  分别表示气体和金属熔液。自由表面处  $\alpha_q$  应满足下列方程和计算控制条件

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v}_0 \cdot \vec{\nabla} \alpha_q = 0, \quad q = 1, 2 \quad (5)$$

式中  $v_0$  为该单元的平均速度,整个流场中不同部分

的密度是不一样的,流体体积模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积容积率来模拟两种不能混合的流体。

激光表面毛化有其自身的特点,为了能用通式对这类问题进行求解,必须给出动量方程和能量方程在所选定计算区域的边界条件的表达式。当考虑辐射和热通量时,温度边界条件为

$$-k \frac{dT}{dx} = q_{in} + h_a(T_f - T) + \epsilon\sigma(T_f^4 - T^4), \quad (6)$$

$$q_{in} = I_0(t) \frac{8}{\pi d^2} \exp\left(-\frac{8r^2}{d^2}\right), \quad (r < d/2) \quad (7)$$

式中  $q_{in}$  为吸收的激光能量分布,  $I_0(t)$  为入射激光的中心点强度,  $d$  为光斑直径,  $h_a$  为换热系数,  $T_f$  为室温,  $\epsilon$  为表面发射率,  $\sigma$  为斯特藩 - 玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数。沿表面法向的力平衡边界条件为

$$P_{gas} - P_{liq} - \gamma K + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial s} \mathbf{s} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (8)$$

式中  $\gamma$  为表面张力系数;  $K$  为表面曲率;  $P_{gas}$  与  $P_{liq}$  为气、液压强;  $\mathbf{n}$  与  $\mathbf{s}$  为表面法向与切向单位矢量。(8)式表明,在自由表面,气体压力、表面张力与热毛细力是平衡的。

### 3 计算机流体动力学数值计算

#### 3.1 几何模型及网格划分

先利用 Fluent 的前处理软件 Gambit 进行建模和网格划分,在 Gambit 的 mesh 模块中选用六面体单元,作计算域为  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$  的合金钢毛化试件的有限差分计算网格。由于是轴对称有限差分建模,沿对称轴取模型的一半计算以节省计算时间。考虑到热流和毛化温度梯度在热源附近较大,以及提高二相流的模拟精度,在加热中心、自由液面和主要边界处加密网格,图 2 所示为沿激光束的纵向剖分结果,最大单元格体积为  $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,最小单元格体积为  $1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$ ,共有 16480 个单

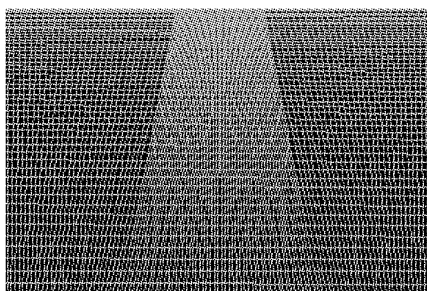


图 2 有限差分的计算网格

Fig. 2 Mesh of the finite difference solution

元格。

#### 3.2 计算参数的设置

将在前处理软件 Gambit 中生成的网格文件导入 Fluent 6.2 软件中,定义 solver 求解器为 3D 分离式、非稳态方式,采用压力速度耦合的 Simplec 算法求解非定常状态下的层流问题。定义 Fluent 的凝固/融化模型模拟毛化加工的熔凝过程;采用 Fluent 的流体体积模型模拟熔池自由界面的运动。在对通用控制方程求解的基础上,利用该软件提供的用户自定义函数接口技术,编程实现控制方程源项及边界条件与 Fluent 主程序的连接计算。主要的相变材料热物性参数和激光扫描参数见表 1,另外,材料密度定义为温度的多项式函数  $\rho = 8000 - 0.1T$ ,动力粘度  $\mu = 5430 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,选择马兰戈尼应力条件,表面张力梯度  $\partial\sigma/\partial T = -3.9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,环境温度定为 300 K,激光脉冲周期 0.1 ms。设定残差值为  $1 \times 10^{-6}$ ,选择合适的时间步长在最大的迭代步数内稳定收敛。

表 1 激光毛化计算参数

Table 1 Laser texturing processing parameters

Scanning speed $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5
Laser power $P / \text{W}$	1500
Focus diameter $d / \text{mm}$	0.2
Specific heat $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	690
Thermal conductivity $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	43
Liquidus temperature $T_{liq} / \text{K}$	1760
Solidus temperature $T_{sol} / \text{K}$	1570
Melting heat $L / (\text{J}/\text{kg})$	1650

### 4 计算结果与讨论

图 3(a)为毛化试件的三维温度场图,图 3(b)为激光表面熔凝时的沿轴向 ( $x-z$  截面)等温曲线图,

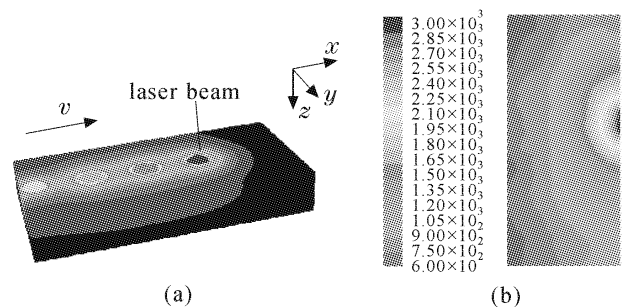


图 3 计算区域的温度场图

(a) 试件三维温度分布; (b) 纵向等温线图 ( $x-z$  截面)

Fig. 3 Contours of temperature of the substrate

(a) three-dimensional temperature distribution;

(b) longitudinal isotherm ( $x-z$  section)

中心最高温度达3504 ℃,超过了沸点(2730 ℃),熔池表面有少许蒸发。图 4(a)为毛化时固液界面的演化图,图 4(b)为熔池内速度场流线图,由于存在速度梯度,引起的压力差将对表面形貌产生影响。由于表面张力梯度为负,表面熔质在半径  $r$  为0.05 ~0.12 mm时由中心向边沿流动,熔液最大速度达 5 m/s,熔池直径约0.2 mm,深约0.08 mm。表面热量向边沿的传递使熔池呈扁平状,热量在底部的对流使熔池加深,这与实验基本相符。另外,扫描速度影响熔池内的环流,大的扫描速度导致前端温度梯度大,使后沿环流增大。

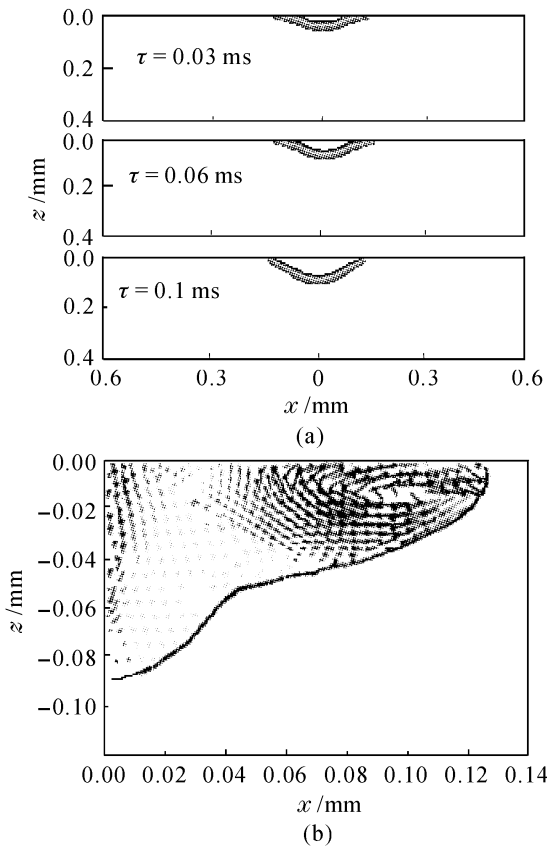


图 4 熔池的流场图

(a) 熔化演变图;(b) 熔池纵向速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector map of the molten pool

(a) molten pool evolution graph;

(b) axial velocity vector graph of molten pool

扫描速度、激光功率与毛化坑的表面形貌的参数关系如图 5 所示。由于熔池四周的表面张力强于熔池中心,以及辅助气体产生的切向应力,熔坑中间凹陷,四周凸起,熔池后方凸起较高,熔池表面凸起高约3.5 μm,凹陷约5.2 μm。激光功率密度和扫描速度影响着熔池的表面形貌,扫描速度高则凸起降低,当激光功率密度过大时,出现气化,蒸气压力增强,坑深变大,凸沿减小。改变气流的入射角度及气流速度,可抑制蒸气反压,显著地改变熔坑形貌。数

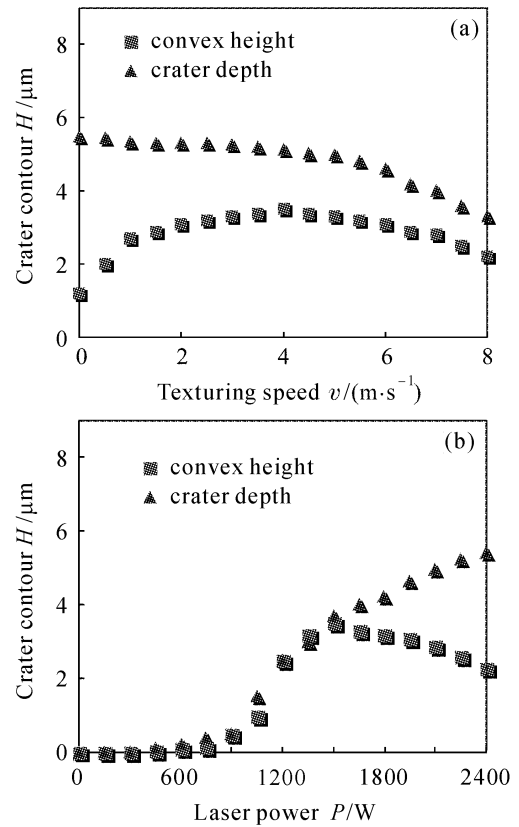


图 5 加工参数对熔坑尺寸的影响

(a) 扫描速度对熔坑尺寸的影响;

(b) 激光功率对熔坑尺寸的影响

Fig. 5 Crater morphology versus processing parameters

(a) crater morphology versus scanning speed;

(b) crater morphology versus laser power

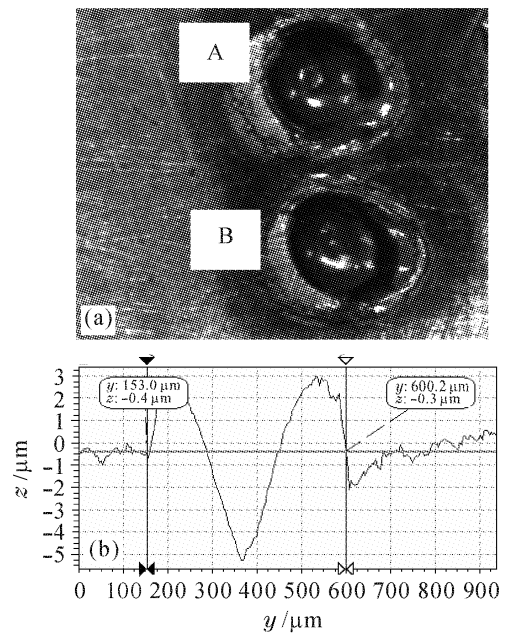


图 6 毛化加工实验结果

(a) 毛化坑外形图(50×);(b) 毛化坑测量结果

Fig. 6 Experimental result of texturing machining

(a) surface profile of craters (50×);

(b) measured result of craters

值模拟有助于激光毛化工艺的优化,比如激光功率密度和脉冲周期的选择。优化的激光毛化形貌的生成应选择合适的辅助气体流速、入射角,控制激光辐照时间,提高激光功率密度或单脉冲能量并尽可能减少脉宽,使金属表面在熔化后快速重凝,形成环状凸起,避免产生气化。毛化加工的熔坑形态照片及实际测量的外形尺寸如图 6 所示,实际测量结果与模拟结果相一致。因为图 6(a)毛化点 A 的输入功率大,扫描时间长,所以其熔坑尺寸比毛化点 B 稍大。

## 5 结 论

通过数值模拟,得出了各种加工参数下熔池内的温度、速度分布以及熔池的形状、大小。由于表面张力的影响,熔质由中心向边缘流动,在熔池内形成环流,受压强差和辅助气体等因素的影响,熔池表面中心凹陷,边缘凸起。数值模拟有助于激光毛化工艺的优化,实际毛化加工与模拟结果基本一致。通过选择合适的辅助气体流速、入射角,控制激光辐照时间和单脉冲能量,可使金属表面在熔化后快速重凝,形成环状凸起,避免产生气化。

## 参 考 文 献

- 1 M. Poterasu, T. Dascalu, A. Marian *et al.*. Nd:YAG laser surface texturing [C]. *SPIE*, 1998, **3405**:233~240
- 2 S. R. Vatsya, S. K. Nikumb. Modeling of fluid dynamical processes during pulsed-laser texturing of material surfaces [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(3):035410-1~035410-5
- 3 Etsuji Ohmura, Rina Murayama, Isamu Miyamoto. Thermohydrodynamics analysis on the mechanism of bump formation in laser texturing [C]. *SPIE*, 2000, **4088**:244~248
- 4 Ye Xiaohu, Chen Xi. Simulation of the fluid flow and heat transfer in laser heating melt pool using a region-dividing method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):855~858  
叶晓虎,陈熙. 激光加热熔池流动和传热的分区数值模拟[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9):855~858
- 5 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1527~1532  
席明哲,虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1527~1532
- 6 Huang Kezhi, Wang Ziqiang. Macro-Micro-Mechanics and Strengthening and Toughening Design of Materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 216~224  
黄克智,王自强. 材料的宏微观力学与强韧化设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 216~224
- 7 V. R. Voller, C. Prakash. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1987, **30**(8):1709~1719
- 8 Fluent Inc. FLUENT 6.2 User's Guide [M]. USA: Fluent Inc., 2005. 1567~1579