

激光立体成形粉末流输送的数值模拟研究

谭 华 张凤英 温如军 陈 静 林 鑫 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 激光立体成形(LSF)技术是一项基于同步送粉激光熔覆技术的先进增材制造技术。粉末流的输送对于沉积层的形成至关重要。通过建立载粉气流的湍流模型并基于粉末颗粒在气体湍流中的运动分析,采用数值模拟方法建立粉末流输送的数学模型,并利用 Fluent 软件进行求解,从而获得粉末流的质量浓度分布。将实验测量结果与模拟计算结果进行对比分析。结果表明,计算结果与实验测量结果比较吻合。对比粉末粒径范围为 50~240 μm 的粉末流和粉末粒径范围为 65~75 μm 的粉末流的模拟结果发现,在相同送粉工艺条件下,粒径分布范围不同则粉末流颗粒质量浓度有明显差异。

关键词 激光技术;激光立体成形;粉末流;数值模拟

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1003003

Numerical Simulation of Powder Feed of Laser Solid Forming

Tan Hua Zhang Fengying Wen Rujun Chen Jing Lin Xin Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Laser solid forming (LSF) is a promising manufacturing technology. During LSF process, powder flow plays an important role in the formation of deposition layer. A turbulent flow model is build, and based on the analysis of the movement of particles in the turbulent flow, a powder flow model is developed by the numerical method and solved by using the Fluent software, so the powder mass concentration of the powder flow can be obtained. Comparisons between the simulations and the experimental results are carried out. It is found that the simulations of the powder flow agree well with the experimental measurements. The powder mass concentrations have a few obvious differences with the change of particle diameter range, as proved by the simulation results of particle diameters of 50~240 μm and 65~75 μm .

Key words laser technique; laser solid forming; powder flow; numerical simulation

OCIS codes 140.3590; 140.3390; 350.49901

1 引 言

激光立体成形(LSF)技术是一项基于同步送粉激光熔覆的先进制造技术,能够直接从零件的计算机辅助设计(CAD)模型产生三维金属零件,因而大幅度缩减了零件的制造周期。同时,该技术也能应用于梯度材料零件的成形以及损伤构件的快速、高性能修复。近年来有许多机构对该技术展开了研究^[1~6]。

激光立体成形过程中,粉末颗粒由载粉气流输送进入激光熔池,并经历熔化、凝固的过程而形成最终的沉积层。显然,粉末流的输送特性对于沉积层的形成以及几何性能有非常重要的影响。一些研究^[7~12]建立激光立体成形过程的数学模型来研究成形过程。例如,Toyserkani等^[7]建立了同步送粉激光熔覆过程的三维瞬态有限元模型,研究脉冲激光波形对熔覆层形成的影响,并预测熔覆层几何形

收稿日期: 2011-05-12; **收到修改稿日期**: 2011-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(50871089)、中国博士后科学基金(20100470040)和凝固技术国家重点实验室基金(06-BZ-2010, SKLSP201102)资助课题。

作者简介: 谭 华(1979—),男,博士后,主要从事激光材料加工、激光立体成形技术等方面的研究。

E-mail: tanhua@nwpu.edu.cn

状;Liu 等^[8]建立了过程模型研究工艺参数对薄壁成形的影响。然而,这些模型通常直接假设粉末流质量浓度为均匀分布或高斯分布,这些假设缺乏理论和实验的验证。实际粉末输送过程中,粉末颗粒运动状态的影响因素非常复杂。在送粉喷嘴管道内,粉末颗粒主要受自身重力、气流作用力和与管壁碰撞的影响;送出喷嘴后,则主要受自身重力和气流作用力的影响。Lin^[13]考虑气体湍流对粉末颗粒运动的影响,建立了同轴送粉喷嘴外流场的二维气-粉两相流离散颗粒模型,计算过程中忽略了粉末颗粒之间以及粉末颗粒与喷嘴管道之间的相互碰撞。根据同轴送粉喷嘴结构设计需要,Pan 等^[14]建立了环形同轴粉末流三维数值模型,该模型中考虑了粉末颗粒与喷嘴管道的相互作用,建立了非球形粉末颗粒与喷嘴管道内壁碰撞随机模型。为简化计算,将粉末颗粒进入模型的初速度假设为零。

为了更深刻地理解粉末流的输送过程,本文针对实验用四路同轴喷嘴,考虑粉末颗粒自身重力、气流作用以及与管壁碰撞的影响,建立粉末流输送的数值模型,并与粉末流的实验测量结果进行对比分析。

2 粉末流输送模型

2.1 载粉气流模型

考虑载粉气体(氩气)的流动为湍流。湍流内部结构虽然复杂,但仍遵循连续介质的质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。这些定律在流体力学中的体现就是相应的连续性方程和动量方程(Navier-Stokes, N-S 方程)。对于具有稳定、不可压缩和恒温特性的湍流来说,流体连续性方程为

$$\frac{du_i}{dx_i} = 0, \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中 u_i 为第 i 方向的速度, p 为压力。目前大多数湍流都采用 $k-\epsilon$ 模型求解。为了在微分单元中进行数值

求解,速度参量引入时均值,则对于不可压缩气体来说, $k-\epsilon$ 模型形式为

湍流动能方程(k 方程)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_g \epsilon, \quad (3)$$

扩散方程(ϵ 方程)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g \epsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho_g \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (4)$$

式中

$$G_k = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

G_k 为由层流速度梯度而产生的湍流动能, σ_k 表示 k 方程的湍流 Prandtl 数, σ_ϵ 表示 ϵ 方程的湍流 Prandtl 数, C_1, C_2 为常量,而载粉气流的湍流黏度 ϵ_t 可表示为

$$\mu_t = \rho_g C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (6)$$

式中 ρ_g 为载粉气体密度, C_μ 为常量。参考文献[15], $k-\epsilon$ 模型中包含的经验常数分别为 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

2.2 气流中颗粒运动方程

由粉末颗粒的受力分析,粉末颗粒在气流中的运动方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_g - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p}, \quad (7)$$

式中 $F_D(u_g - u_p)$ 为载粉气流对颗粒的拖拽力

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (8)$$

式中 u_g 为颗粒周围载粉气速度, u_p 为粉末颗粒运动速度, ρ_p 为粉末颗粒材料密度, d_p 为粉末颗粒直径, Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺数),其定义为

$$Re = \frac{\rho_g d_p |u_p - u_g|}{\mu}, \quad (9)$$

拖拽力系数 C_D 可表示为

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}. \quad (10)$$

由 Haider 等^[16]的研究结果得到

$$\begin{cases} b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581 + 2.4486\phi^2) \\ b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi \\ b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \\ b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \end{cases}, \quad (11)$$

其中形状系数 ϕ 的定义为

$$\phi = \frac{a}{A}, \quad (12)$$

式中 a 表示与实际颗粒具有相同体积的球形颗粒的表面积, A 表示实际颗粒的表面积。因此, 对于球形颗粒而言, $\phi=1$ 。

当流动状态为湍流时, 计算采用流体的时均速度, 通过对(7)式积分可获得颗粒在运动轨迹上任一位置处的运动速度。根据

$$\frac{dx_i}{dt} = u_{pi}, \quad (13)$$

式中 x_i 为粉末颗粒在 t 时刻的位置坐标, 因此沿着各个坐标方向求解(13)式便可获得粉末颗粒的运动轨迹。

2.3 粉末颗粒尺寸分布

实际激光立体成形过程中, 在没有严格要求的条件下, 通常采用粒径分布较宽的粉末材料。因此, 本文除针对粒径范围很窄($65 \sim 75 \mu\text{m}$, 认为平均粒径为 $70 \mu\text{m}$)的粉末流外, 还进一步对粒径分布较宽($50 \sim 240 \mu\text{m}$)的粉末流输送进行研究。通常颗粒群尺寸满足典型的 Rosin-Rammler 分布, 特定颗粒直径 d^* 与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在指数关系^[17]

$$Y_d = \exp\left[-\left(\frac{d^*}{\bar{d}_p}\right)^n\right], \quad (14)$$

式中 \bar{d}_p 为尺寸分布的中位径($Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 时的颗粒直径), n 为颗粒尺寸分布指数。实验研究所用宽粒径范围(纯 Ti 粉末的颗粒直径分布)由激光粒度分布仪测量获得。图 1 显示了相应的 Y_d 随 d^* 的变化情况。根据测量数据估计 \bar{d}_p 约为 $144 \mu\text{m}$, 相应的 n 值为

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d^* / \bar{d}_p)}. \quad (15)$$

将不同 d^* 对应的 Y_d 值和 d^* / \bar{d}_p 值代入(15)式, 可获得一组 n 值, 取其平均值。对于本研究中的纯 Ti 粉末颗粒, n 的平均值为 5.12。从图 1 中可以看到 Rosin-Rammler 拟合曲线与原始数据点符合较好。

2.4 粉末颗粒初速度定义

粉末颗粒进入模型时的速度是粉末流数值计算重要的边界条件。由于输送管道足够长, 因而颗粒通过管道后的运动状态较为一致, 故不考虑粉末颗粒在输送管道中的运动情况, 仅建立粉末流进入喷嘴后的几何模型。利用输送管路出口处的高速摄影测量, 获得粉末颗粒的运动速度作为模型计算速度

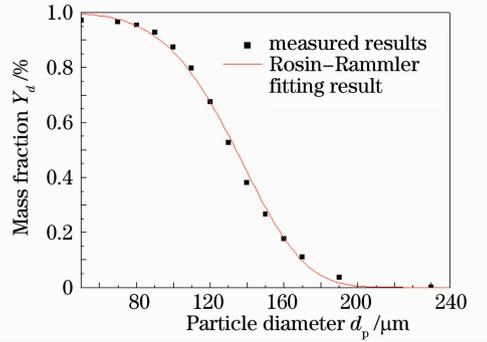


图 1 粉末颗粒直径尺寸分布

Fig. 1 Distribution of the particle diameter

入口的边界条件。

2.5 模型描述

研究采用 Fluent 软件求解流体控制方程。所研究四路同轴喷嘴的几何模型和边界条件设置如图 2 所示。粉末喷嘴内径为 1.5 mm , 喷嘴轴线与竖直方向成 25° 。载粉气体以初速度 v_{gin} 进入喷嘴, 且在速度入口气流入射方向与喷嘴轴线夹角为 35° (由送粉管路设计获得), 四路轴对称气流在送粉喷嘴下方汇合。载粉气体入射速度可近似获得:

$$v_{\text{gin}} = \frac{Q}{4\pi\left(\frac{d_s}{2}\right)^2} = \frac{Q}{\pi d_s^2}, \quad (16)$$

式中 d_s 为输送管路内径, Q 为载粉气流量。

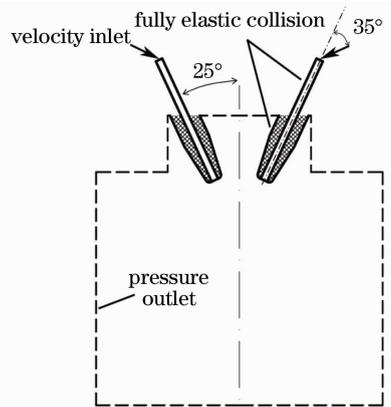


图 2 几何模型和边界条件设置示意图

Fig. 2 Schematic of the geometric model and boundary setting

粉末颗粒与喷嘴轴线成 35° 入射进入模型。在每个体积单元内求解粉末颗粒运动控制方程, 从而获得粉末颗粒的运动轨迹。定义求解场的边界条件为: 喷嘴管道内、外壁为完全弹性碰撞边界; 其他边界为压力出口界面($P=0$)。底面距离实体台面有足够远的距离, 因此也定义为该类压力边界。采用 Gambit 软件构建粉末流计算三维空间模型, 对几何

模型进行网格化并定义边界类型。对于粉末输送过程的全场求解而言,求解空间的网格划分非常重要。本研究中采用 BFC 网格划分系统划分空间。为了在保证足够计算精度的前提下,尽可能减小计算量,

提高计算速度,采用分区域网格划分。在喷嘴及其附近空间采用小尺度四面体单元结构划分,而在其他区域采用自定义渐变尺度五面体和六面体单元结构划分。模型结构及网格划分结果如图 3 所示。

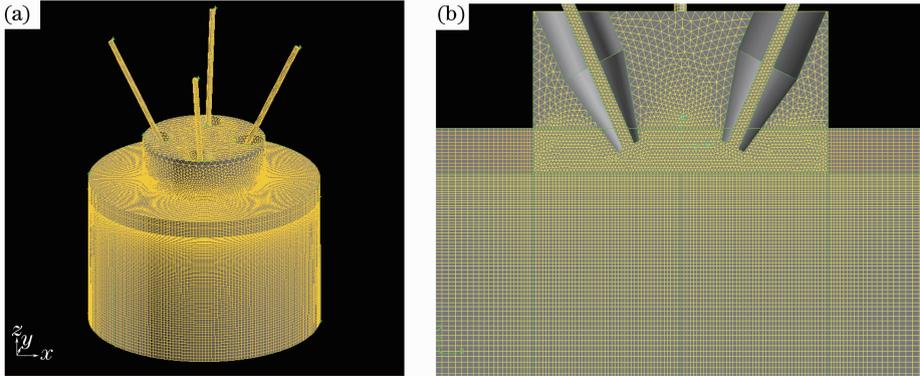


图 3 三维几何模型及网格划分。(a)几何模型及网格划分;(b)喷嘴出口附近区域网格划分
Fig. 3 3D model and gridding. (a) Summary of the grid; (b) gridding near the nozzle exit

由于不考虑粉末颗粒对气体流场的反作用,因此采用非耦合计算方法。首先计算载粉气流场,直到载粉气湍流控制方程收敛,即流场基本处于稳态;然后在离散相入口加载求解粉末颗粒,求解颗粒运动方程,直至求解域内粉末颗粒质量浓度基本保持不变(收敛)。

3.1 载粉气流场

载粉气流在进入喷嘴之前,由内径为 4 mm 的气管输送,本研究中将入射速度 v_{gin} 认为是气流在内径为 4 mm 的气管中的平均速度。载粉气流量 Q 为 250 L/h 和 550 L/h 时,由(16)式求得气流入射速度 v_{gin} 分别为 1.38 m/s 和 3.04 m/s。由气体湍流模型,在网格区域求解气流场。图 5 所示为 90° 截面上的载粉气流速度场。从中可以看出,气流在喷管内速度较快,离开喷管后,速度逐渐减小。 $Q=250$ L/h 时,喷嘴出口处载粉气流速度约为 10 m/s,而后逐渐减小,在汇聚区域速度略有增加。 $Q=550$ L/h 时,流体速度整体加快,喷嘴出口处载粉气流速度高达 22 m/s,之后逐渐减小,但气流发散程度较小流量条件明显减小。

3 计算结果及讨论

研究所用载粉气体为氩气,计算中所用氩气物性参数为:密度 $\rho_{Ar} = 1.6228 \text{ kg/m}^3$,动力学黏度 $\mu_{Ar} = 2.125 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。图 4 所示为四路同轴嘴的俯视图和侧视示意图。图 4(a)中 45° 和 90° 截面为重点分析的两个粉末流对称截面,图 4(b)中的点划线为重点分析的粉末流对称轴线以及距离喷嘴出口平面 $S=13.5 \text{ mm}$ 的水平线。

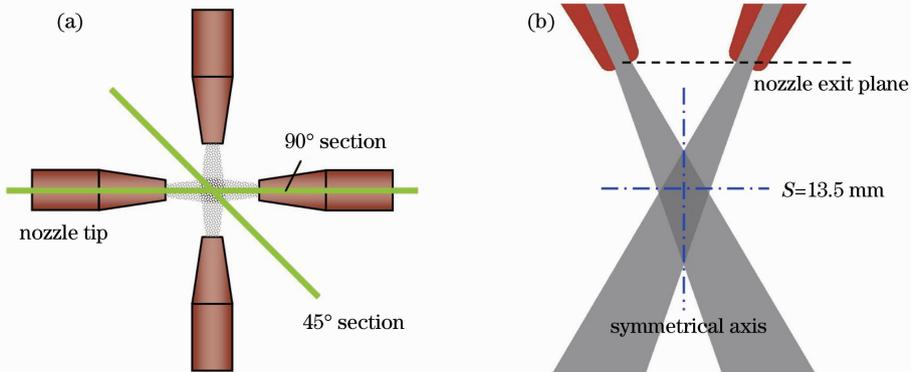


图 4 四路同轴嘴的示意图。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 4 Schematic of the coaxial nozzle with four tips. (a) Top view; (b) side view

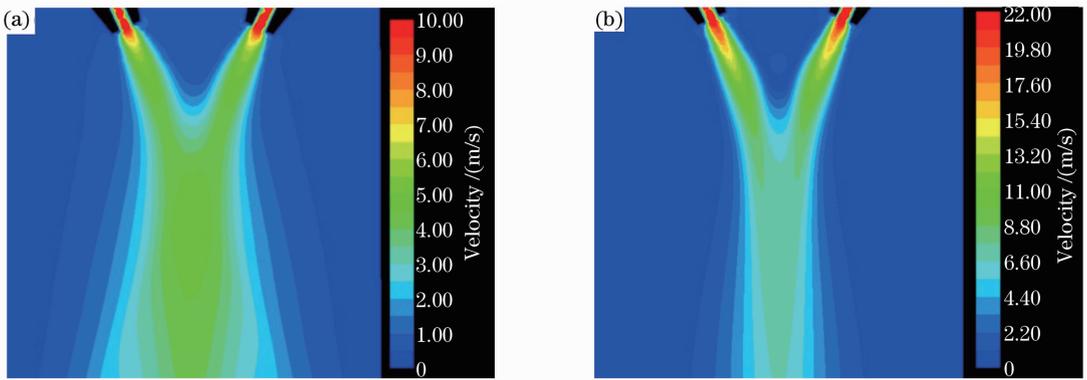


图 5 不同载粉气流量气流速度场。(a) 250 L/h; (b) 550 L/h

Fig. 5 Contours of the carrier gas velocity magnitude. (a) 250 L/h; (b) 550 L/h

3.2 粉末流颗粒质量浓度计算

以载粉气流量 $Q=250$ L/h, 送粉率 $m_p=5.3$ g/min(对应送粉盘转速 $n_p=3.5$ r/min), 粉末颗粒直径 d_p 为 $65\sim75$ μm (平均粒径 70 μm)的送粉条件为例, 对比纯 Ti 粉末流计算与实验拍摄结果(相机曝光时间为 0.5 s)。有限元模型中, 粉末颗粒在速度入口进入模型的速度 $v_{\text{pin}}=2.5$ m/s(粉末在进入喷嘴之前, 由内径为 4 mm 的管路输送, 通过对 4 mm 管路粉末流输出的高速摄影, 测量获得 4 mm 管路出口处粉末

颗粒的运动速度为 2.5 m/s。在本研究中, 将这一颗粒运动速度作为粉末颗粒进入喷嘴模型的初速度), 也就是说颗粒以初速度 v_{pin} 射入已获得的稳态载粉气流场, 进而求解粉末颗粒运动情况。

利用片光源照明对粉末流 90° 和 45° 截面进行拍摄, 可获得相应截面的粉末流图像。图 6 和图 7 分别显示了 90° 和 45° 截面上粉末流观察图像以及粉末流颗粒质量浓度的计算结果。从图中可以看出, 有限元数值模型所计算的粉末流形貌均与实际

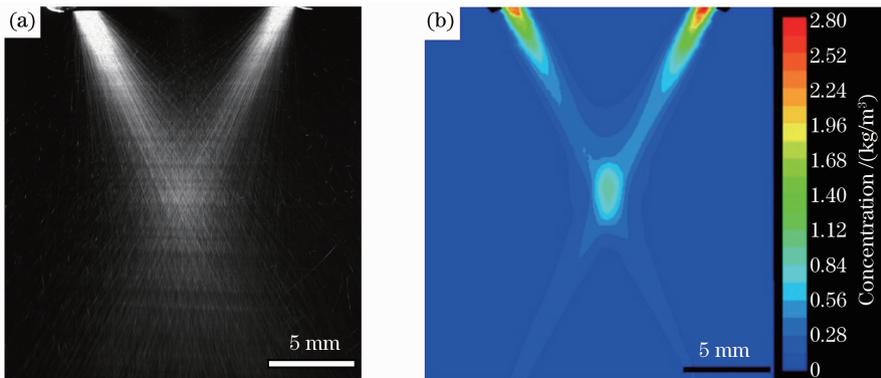


图 6 90° 截面粉末流。(a) 拍摄结果; (b) 计算结果

Fig. 6 Powder flow on the 90° section. (a) Experiment; (b) calculation

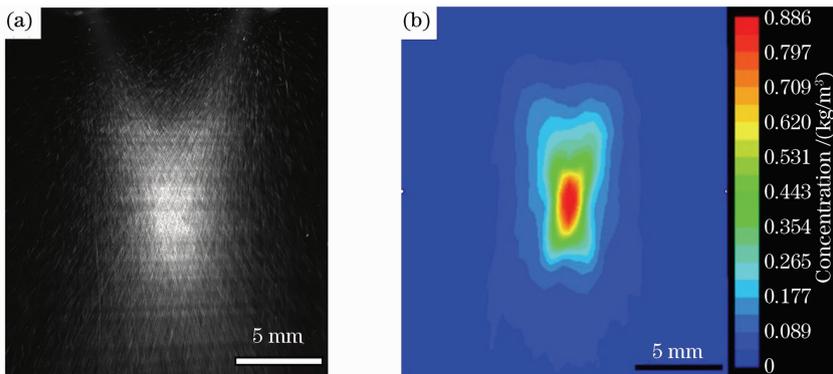


图 7 45° 截面粉末流。(a) 拍摄结果; (b) 计算结果

Fig. 7 Powder flow on the 45° section. (a) Experiment; (b) calculation

粉末流形貌非常相似。另外也可以看到,送粉喷嘴出口处粉末颗粒质量浓度大于汇聚区的粉末颗粒质量浓度,与粉末流图像灰度分布情况吻合。数值模拟计算结果与粉末流灰度图像相比,对称性和规则性有差异,这是由于管道内湍流造成颗粒运动随机性以及计算中粉末颗粒数量有限而引起的。

由于粉末流图像灰度与浓度成比例关系,通过标定实验获得比例常数后,即可获得粉末流的浓度分布。首先假设内径为 1.5 mm 的喷嘴管道内粉末流浓度均匀分布且喷嘴出口处与喷嘴管道内粉末流浓度近似相等。那么,喷嘴出口处的粉末质量浓度 c_0 可由方程 $c_0 = m_p / (4v_p \pi r_0^2)$ 获得,式中 $m_p/4$ 为单路粉末流的送粉量, v_p 为喷嘴出口处粉末颗粒的速度, r_0 为喷嘴管道半径。其中喷嘴出口处粉末颗粒的速度可由对喷嘴出口处粉末颗粒运动的高速摄影测量获得。最终,比例系数 C 可由方程 $C = c_0 / (\rho_p k_0)$ 计算获得,其中 ρ_p, k_0 分别为粉末材料密度和喷嘴出口处粉末流图像灰度。研究中通过标定实验计算获

得 $C = 1.01 \times 10^{-6}$ 。据此由粉末流灰度图像获得了粉末流的浓度分布。图 8 所示为粉末流对称轴线以及距离喷嘴出口平面 $S=13.5$ mm 水平线上的粉末流质量浓度分布。从图 8(a)中可以看出,在粉末流对称轴线上,随着距喷嘴出口平面距离 S 的增大,粉末颗粒质量浓度先急剧增大,而后缓慢减小。从图 8(b)中可以看到,在喷嘴出口平面下方 $S=13.5$ mm 水平线上,粉末颗粒质量浓度呈类似高斯分布。另外,从图 8 中也可以看到粉末颗粒质量浓度计算结果与实验测量结果吻合较好。与实验测量结果相比,数值模拟计算结果整体偏小,且峰值出现在 $S=13$ mm 处,而测量结果峰值大约在 $S=11.6$ mm 附近。分析导致该现象产生的主要原因是:由于建立有限元数值模型时,假设粉末颗粒与管壁作用不损失能量,为完全弹性碰撞,因而计算得到的颗粒运动速度偏大,并进一步导致粉末颗粒质量浓度有所下降,峰值向下偏移。

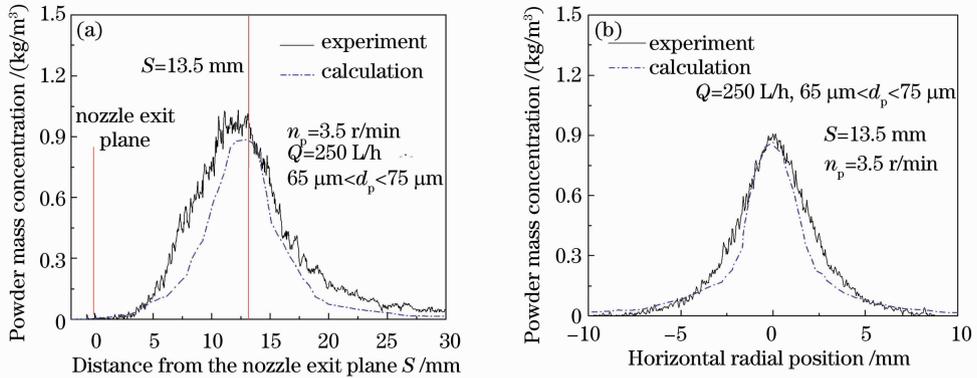


图 8 粉末流颗粒质量浓度分布情况。(a)对称轴线上的分布;(b)45°截面 $S=13.5$ mm 水平线上分布

Fig. 8 Powder flow mass concentration. (a) Symmetrical axial distribution; (b) $S=13.5$ mm horizontal distribution

3.3 粉末粒径范围对粉末输送性的影响

在送粉工艺条件为 $Q=250$ L/h, $m_p=4.65$ g/min (对应送粉盘转速 $n_p=3.5$ r/min)时,对宽粒径分布粉

末的输送进行模拟,并获得最终的粉末流颗粒质量浓度分布,结果如图 9 所示。

图 10 显示了不同粒径范围下粉末流对称轴线

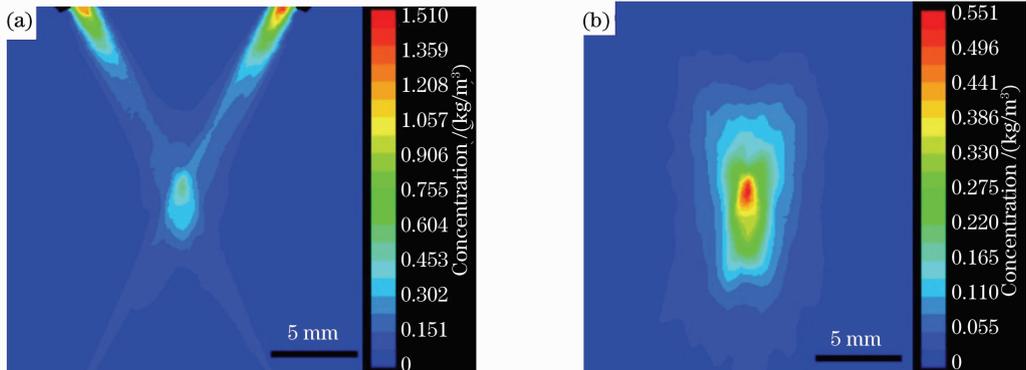


图 9 50~240 μm 纯 Ti 粉末流模型计算结果。(a) 90°截面;(b) 45°截面

Fig. 9 Calculation of the powder mass concentration with the particle diameter of 50~240 μm : (a) 90° section; (b) 45° section

和 45° 截面 $S=13.5$ mm 水平线上粉末颗粒质量浓度的计算结果。从中可以看出,与粉末颗粒直径为 $65\sim 75\ \mu\text{m}$ 的粒径范围较窄的纯 Ti 粉末流相比,大

粒径范围粉末流颗粒质量浓度明显整体下降,对称轴线上浓度峰值由 $0.89\ \text{kg}/\text{m}^3$ 减小到 $0.55\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

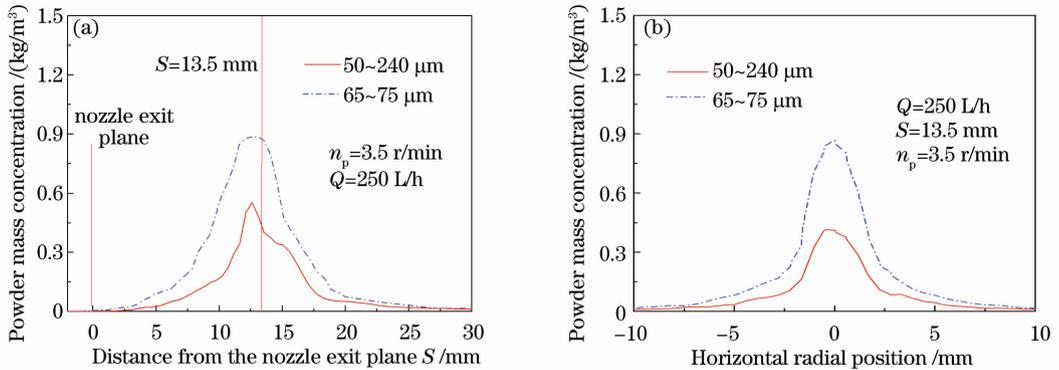


图 10 不同粒径范围下粉末流颗粒质量浓度分布计算。(a)对称轴线上分布;(b) 45° 水平截面 $S=13.5$ mm 水平线上分布

Fig. 10 Powder mass concentration calculation results for different particle diameter ranges. (a) Symmetrical axial distribution; (b) $S=13.5$ mm horizontal distribution

4 结 论

通过建立的载粉气流湍流模型及粉末颗粒在载粉气流湍流中的受力分析,建立了四路同轴粉末流输送的有限元数值模型。模拟结果显示,在粉末流对称轴线上,随着距喷嘴出口平面距离 S 的增大,粉末颗粒质量浓度先急剧增大,而后缓慢减小; 45° 截面上距离喷嘴出口平面 $S=13.5$ mm 水平线上粉末颗粒质量浓度呈类似高斯分布。粉末流外流场质量浓度分布计算结果与实验测量结果的对比分析表明,有限元数值模型计算的粉末流浓度分布与实际粉末流测量结果吻合较好。由于未考虑粉末颗粒与管壁碰撞造成的动能损失,因而粉末颗粒运动速度的计算值高于实际测量值,故数值模型获得的粉末流颗粒质量浓度整体略低于实际测量结果。粉末颗粒运动的随机性是导致有限元模拟粉末流浓度与实际测量结果存在差异的另一个原因。对比粉末粒径范围为 $50\sim 240\ \mu\text{m}$ 的粉末流和粉末粒径范围为 $65\sim 75\ \mu\text{m}$ 的粉末流的模拟结果发现,在相同送粉工艺条件下,粒径分布范围对于粉末流颗粒质量浓度有显著的影响。

参 考 文 献

- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming Technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 1~20
- 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. 1~20
- B. Vamsi Krishna, Amit Bandyopadhyay. Surface modification of AISI 410 stainless steel using laser engineered net shaping

- (LENSTM) [J]. *Materials & Design*, 2009, **30**(5): 1490~1496
- Robert Dicks, Fude Wang, Xinhua Wu. The manufacture of a niobium/niobium-silicide-based alloy using direct laser fabrication [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(4): 1752~1757
- Li Peng, Ji Shengqin, Zeng Xiaoyan *et al.*. Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control [J]. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 2007, **47**(6): 996~1002
- Chen Jing, Zhang Fengying, Tan Hua *et al.*. Alloying mechanics in moving melt pool during laser solid forming from blended elemental powders [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2154~2159
- 陈静,张凤英,谭华等.激光多层熔覆沉积预混合 Ti-xAl-yV 合金粉末在熔池中的熔化与偏析行为 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2154~2159
- R. Banerjee, P. C. Collins, D. Bhattacharyya *et al.*. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded α/β titanium-vanadium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**(11): 3277~3292
- Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2004, **41**(6): 849~867
- Jichang Liu, Lijun Li. Study on cross-section clad profile in coaxial single-pass cladding with a low-power laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2005, **37**(6): 478~482
- A. J. Pinkerton, L. Li. The development of temperature fields and powder flow during laser direct metal deposition wall growth [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*, 2004, **218**(4): 531~541
- O. O. Diniz Neto, A. M. Alcalde, R. Vilar. Interaction of a focused laser beam and a coaxial powder jet in laser surface processing [J]. *J. Laser Appl.*, 2007, **19**(2): 84~88
- Y. Huang, J. Liu, N. Ma. Three-dimensional analytical model on laser-powder interaction during laser cladding [J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(1): 42~46
- 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]. *Opt. Lasers Engng.*, 2007, **45**(12): 1115~1130

- 13 J. Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2000, **105**(1-2): 17~23
- 14 H. Pan, T. Sparks, Y. D. Thakar *et al.*. The investigation of gravity-driven metal powder flow in coaxial nozzle for laser-aided direct metal deposition process [J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2006, **128**(2): 541~553
- 15 Wu Jiangang, Han Qingshu. *Computational Fluid Dynamics: Theory, Method and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1988. 16~20
- 吴江航, 韩庆书. *计算流体力学的理论、方法及应用* [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 16~20
- 16 A. Haider, O. Levenspiel. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. *Powder Technology*, 1989, **58**(1): 63~70
- 17 Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Zhang Ningsheng. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, **29**(11): 1721~1726