

文章编号: 0258-7025(2010)06-1636-07

沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律

朱刚贤 李涤尘 张安峰 周志敏

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 为了探讨在成形过程中沉积层结构对粉末流场的影响规律,应用气固两相流理论研究了沉积层在不断变化过程中对粉末流场浓度分布规律及粉末流汇聚焦距的变化规律,采用 FLUENT 软件中的离散相模型计算了粉末流场分布。计算结果表明,同轴送粉喷嘴(CPFN)的粉末汇聚浓度在径向近似服从高斯分布,与自由射流相比粉末汇聚焦点上移,粉末汇聚焦距从 5 mm 减少到 4.6 mm,上移量为 0.4 mm。在沉积层宽度一定时,随沉积层高度增大,粉末汇聚点处的浓度变小,汇聚点稍微下移,汇聚特性基本不变;在沉积层高度一定时,随沉积层宽度增大,汇聚点处浓度值增大,汇聚焦点略微上移,粉末汇聚性较好。并对不同高度及宽度的沉积层进行单层沉积试验,试验结果与计算结果基本一致。说明在开环控制下制造壁厚不均且高度逐渐变化的金属零件时,由于制件结构变化而造成粉末流场变化,进而会促使沉积层高度增长的不均匀性,降低制造零件的表面成形质量。

关键词 激光技术;金属直接成型;同轴送粉喷嘴;气固两相流;数值模拟

中图分类号 TN249;TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1636

Influence of Deposited Layer's Structure on Flow Field of Coaxial Powder Feeding Nozzle

Zhu Gangxian Li Dichen Zhang Anfeng Zhou Zhimin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract In order to investigate the influence of parts' structure on coaxial powder flow in the process of forming, gas-solid two-phase flow theory is considered to analyze the effect of cladding layers in the ongoing process of growth on powder flow concentration distribution and focus distance from the nozzle outlet to convergence point varying. The discrete model in FLUENT software is used to evaluate the powder flow rule. The computed results indicate that the gathering concentration of powder the coaxial powder feeding nozzle (CPFN) in radial direction approximately obey the Gaussian distribution. Compared with free jet, the convergence point of the powder moves upward and the focus distance varies from 5 mm to 4.6 mm, while the variable quantity is 0.4 mm. When the width of cladding layers is invariable, the focal point concentration in the powder flow field gets smaller, the focus distance slightly longer, and the gathering characteristic keeps almost invariant by increasing the height of cladding layers. When the height of cladding layers is invariable, the focal point concentration gets bigger, the focus distance slightly shorter, and the gathering characteristic better by increasing the width of cladding layers. The effect on the additive height of cladding layer of single trace with different widths and heights of cladding layers is carried out by experimental investigations. The numerical results are in good agreement with the experimental observations. The results indicate that the additive height of cladding layer is nonuniform of the parts with uneven thickness or gradually increasing the height during the process, which causes that the surface of cladding layers is not smooth, and then reducing the surface forming quality of cladding layers.

Key words laser technique; directly metal forming; coaxial powder feeding nozzle; gas-solid two-phase flow; numerical simulation

收稿日期: 2009-09-25; 收到修改稿日期: 2009-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(50675171)、国家 973 计划(2007CB707704)、长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT0646)资助课题。

作者简介: 朱刚贤(1980—),男,博士研究生,主要从事复杂构件的高能束控形控性制造等方面的研究。

E-mail: gxzhu2005@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 李涤尘(1964—),男,博士,教授,主要从事快速成形制造、生物制造和复合材料成形等方面的研究。

E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn

1 引言

激光金属直接成形技术^[1~3]能够成形任意复杂的零件及实现对零件的外形尺寸控制等优点,近年来已成为国内外智能化制造技术的研究热点。在载气式同轴送粉激光成形过程中,同轴送粉喷嘴(CPFN)中粉末流场分布直接影响了沉积层的尺寸精度和性能,也引起学者们的广泛关注。衡量粉末流场的汇聚特性的两个主要评价指标为粉末汇聚焦点的浓度及汇聚焦距(喷嘴出口距粉末汇聚点的距离)。因为粉末汇聚焦点的浓度大小直接决定沉积时沉积层的尺寸,浓度越大,表明在沉积时粉末利用率越高,汇聚特性越好。而在沉积时设定的喷嘴出口距基材或沉积层的距离由粉末汇聚焦距决定,所以在沉积时,让沉积点与粉末汇聚点重合。若两者不重合或加工过程中粉末汇聚点发生变化,造成在汇聚处粉末浓度变化,导致沉积层尺寸发生变化,进而影响成形精度,所以需要对其进行深入的研究。Zekovic等^[4]借助 FLUENT 软件计算得出气固两相流三维浓度场分布,并得出喷嘴粉末流场的最佳汇聚范围及浓度最大值;Lin^[5]研究了喷嘴在不同结构布置下的粉末浓度分布,得出粉末汇聚焦距及浓度最大值;杨楠等^[6,7]研究了激光成形中粉末流场

中粉末的速度分布规律及浓度分布规律;张安峰等^[8]研究了 CPFN 在不同结构设计下对粉末浓度场的影响。

本文重点研究在实际成型过程中,随着沉积层层数的增加,沉积层宽度及高度将对气体流场和粉末颗粒流场产生的影响。建立沉积层变化的物理模型进行求解,从而使粉末流场数值计算模型更符合实际激光金属直接成形制造工况,并就不同沉积层高度及宽度对单层沉积高度影响进行了实验研究,计算结果与实验结果基本一致。

2 建立沉积层不同结构模型

2.1 物理模型

颗粒流场的扩散聚集等各种运动都是气体流对颗粒作用及颗粒与沉积层的碰撞相互作用的结果。由于流体对颗粒的作用机理较为复杂,颗粒与沉积层发生碰撞,然后再扩散。当粉末汇聚处与沉积层碰撞时,颗粒浓度扩散规律发生变化。为了获得粉末与沉积层发生碰撞后粉末流场的分布规律,假设基材为平板,成形零件为薄壁件。建立的物理模型如图 1(b)所示。

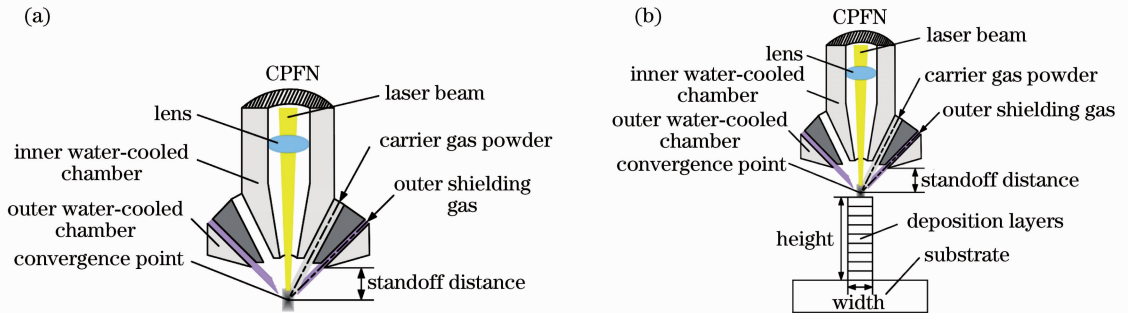


图 1 CPFN 物理模型。(a) 自由射流;(b) 存在沉积层

Fig. 1 Physical model of CPFN. (a) free jet; (b) deposited layers under the nozzle

2.2 数值计算模型

载气粉末在锥环空间内的流动物理模型是气固两相流动^[9],气相流场中加入颗粒相,必然引起气相质量、动量和能量的变化,因此气固两相流动模拟的关键在于颗粒相的模拟。本文选用 FLUENT 软件中的离散相模型进行研究,利用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对气相进行求解;而离散相的求解则是通过建立颗粒轨道模型,求解颗粒运动学方程获得。

2.2.1 气相湍流控制方程

在计算模型中,气相被看作为理想气体。气相湍流基本控制方程包括质量方程、动量方程和能量

守恒方程(不考虑能量变化)。湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 模型。该模型由 Launder 等^[10]于 1972 年提出。在模型中, k 方程和 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (2)$$

式中 μ_t 为湍流黏度, G_k 为由于平均速度梯度而引起的湍流动能的产生项, G_b 为浮力引起的湍流动能 k

的产生项, Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, σ_k , σ_ϵ 分别为湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的湍流普朗数, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 为经验常数, ρ 为气体的密度, μ 为流体的动力黏度, S_k, S_ϵ 为用户自定义的源项, 下标 i 和 j 为采用张量指标形式表示的时均连续方程。根据 Launder 等的推荐值及后来的试验验证, 其值为 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$, 不考虑源项则 $S_k = 0, S_\epsilon = 0$, 气相主流方向与重力方向平行时, $C_{3\epsilon} = 1^{[8,11]}$ 。

2.2.2 颗粒相轨迹计算方程

在 FLUNT 软件中, 通过积分拉格朗日坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨道。颗粒的作用力平衡方程在笛卡儿坐标系下的形式为

$$\frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \frac{f}{\tau}(\mathbf{V} - \mathbf{V}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F, \quad (3)$$

式中 ρ, \mathbf{V} 分别为颗粒所在气相密度及速度矢量, $f = 1 + 0.15Re_p^{0.687}$ 为颗粒阻力系数的修正因子, $Re_p = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_p|d_p/\nu$ 为颗粒雷诺数, ν 为气相流体的运动粘度, $\tau = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$ 为颗粒松弛时间, μ 为气相流体的动力粘度, $\mathbf{V}_p, d_p, \rho_p$ 分别为粉末的速度矢量、直径、密度, g 为重力加速度, F 为其他作用力。忽略热泳力、布朗力和 Saffman 升力, 只考虑气相场的 Stokes 阻力和颗粒自身的重力作用^[8,12]。

3 CPFN 粉末流场的数值求解

在 FLUENT 软件计算中可做如下假设:

1) 基材相对于喷嘴为无限大平面, 则计算区域内基材为平面; 2) 在计算中沉积层的横截面为矩形; 3) 沉积层距喷嘴下端 5 mm (由粉末汇聚焦距决定)^[8]; 4) 不考虑激光对粉末的热影响, 计算在冷态下进行; 5) 粒子与沉积层碰撞为弹性碰撞, 碰撞过程中动能无损失; 6) 只考虑气相场的 Stokes 阻力和重力的影响, 忽略附加质量力、升力等; 7) 不考虑颗粒之间的碰撞, 不存在颗粒压力和颗粒粘性; 8) 粉末颗粒为均匀球体, 具有相同的直径。

3.1 沉积层高度及宽度参数设计

为研究沉积零件形状为薄壁时, 不同高度和不同宽度的沉积层对粉末流场的影响, 需将沉积层高度和宽度综合考虑。研究中, 沉积层宽度和高度的设计参数如表 1, 2 所示。选择 4 种不同高度的沉积层及 4 种不同宽度沉积层进行计算。

表 1 沉积层高度的设计参数

Table 1 Different computation parameters for height

Number	Width B / mm	Height H / mm
1	∞	0
2	2	5
3	2	10
4	2	20

表 2 沉积层宽度的设计参数

Table 2 Different computation parameters for width

Number	Width B / mm	Height H / mm
1	0.5	10
2	1	10
3	2	10
4	4	10

3.2 网格划分及边界条件的设定

由于模型为轴对称模型, 在计算时只对其中 1/2 区域进行计算, 二维计算区域为 $50 \text{ mm} \times (20 \sim 40) \text{ mm}$, 几何尺寸如图 2(a) 所示, 对其网格划分如图 2(b) 所示。

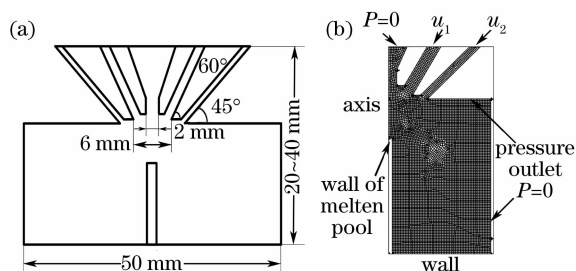


图 2 几何模型及网格划分。(a) CPFN 几何模型;

(b) 网格划分及边界

Fig. 2 Geometry model and grid boundary condition

(a) geometric domain of CPFN;

(b) grid and boundary condition

采用离散相模型计算时, 颗粒运动轨迹及流体相是通过其颗粒轨道基本方程进行求解获得的。 u_1, u_2 分别为载气流速和保护气流速。其边界条件可设为:

1) 速度进口边界 (Velocity Inlet); 2) 自由出口边界 (Outflow); 3) 壁面边界 (Wall)。其中颗粒相冲击处其壁面边界为反弹 (Reflect), 颗粒碰撞后经过喷嘴的反弹落到基材上, 基材边界为逃逸 (Escape); 4) 轴对称边界 (Axis)。

在应用离散相模型求解时, 颗粒到达边界时可分为反弹、逃逸、吸收 (Trap) 等状态。在本计算模型中, 主要研究汇聚点与基材或沉积层的相互作用, 研究其碰撞后的轨迹运动规律。

4 计算结果与分析

4.1 沉积层不同高度对粉末流场的影响

激光直接制造是逐层形成的。对于薄壁零件成形,随着层数的增加,高度不断增加,对气固两相流的流场阻碍作用也发生变化。设定计算参数为:载

气速度 $u_1=1\text{ m/s}$,外层保护气体速度 $u_2=2\text{ m/s}$,送粉量 $G_p=12\text{ g/min}$,平均粒径 $d_p=45\text{ }\mu\text{m}$ 。沉积层高度为 0 和 10 mm 的粉末浓度分布的计算结果如图 3 所示。

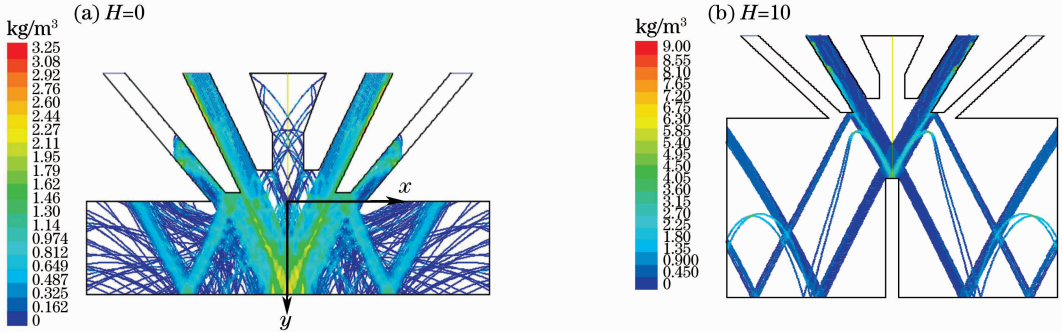


图 3 粉末浓度分布云图

Fig. 3 Contours of powder concentration distribution for CPFN

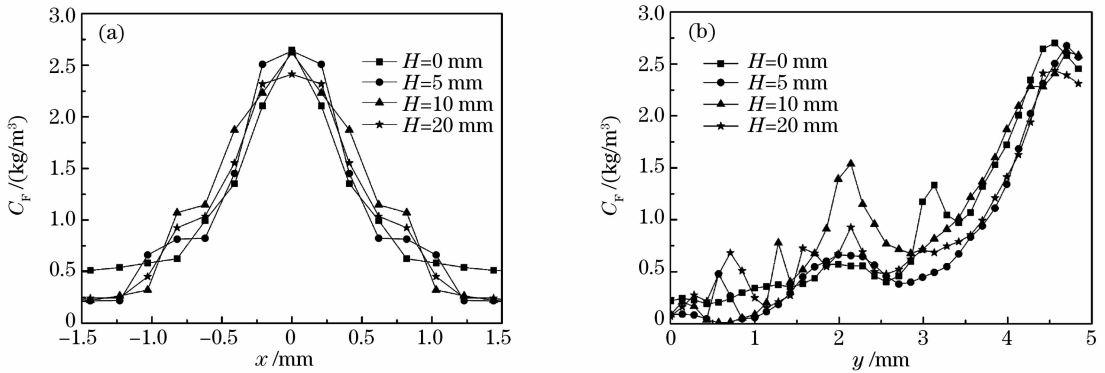


图 4 不同高度沉积层对径向及轴向粉末浓度分布的影响

Fig. 4 Powder concentration distribution with different heights of deposition layer in two directions

分别计算了沉积层高度为 0,5,10 和 20 mm 时的浓度分布,沿 x 方向(以粉末区域中心为原点的圆周)和 y 方向(以喷嘴出口为原点沿轴线向下)的浓度分布规律的计算结果如图 4 所示,不同高度对粉末汇聚处的最大浓度 C_{Fmax} 的影响及粉末汇聚焦距如表 3 所示。

致;在 y 方向,随着沉积层高度增加,粉末汇聚处最大质量浓度 C_{Fmax} 值逐渐降低,从 2.702 kg/m^3 降到 2.436 kg/m^3 ;在沉积点处粉末浓度由 2.454 kg/m^3 降到 2.311 kg/m^3 ;与自由射流相比粉末汇聚焦点上移,粉末汇集焦距由 5 mm ^[8] 减少到 4.6 mm ,上移量为 0.4 mm ;随沉积层高度增加,粉末汇聚焦距由 4.6 mm 增至 4.7 mm ,粉末汇聚特性基本不变。

表 3 不同高度沉积层对应粉末汇聚最大浓度 C_{Fmax} 及焦距的影响

Table 3 Peak powder concentration C_{Fmax} and focus distance f with different heights

Height H /mm	Width B /mm	C_{Fmax} /(kg/m^3)	f /mm
0	∞	2.702	4.6
5	2	2.676	4.6
10	2	2.623	4.7
20	2	2.436	4.7

比较 4 种不同结果可知,在 x 方向的粉末浓度分布近似服从高斯分布,与 J. M. Lin 等^[13,14] 的一

这主要是由在沉积过程中,进入熔池的粉末反弹造成的。在自由射流时无反弹现象,而当喷嘴下端有沉积层时,被输送的粉末与基材或沉积层发生相互作用,部分粉末发生反弹,进而造成粉末与喷嘴下端也存在碰撞。随沉积层高度的增加,粉末颗粒与基材碰撞强度减小,一部分颗粒与沉积层碰撞,经碰撞后的反弹颗粒脱离沉积层,造成汇聚点及沉积点处粉末浓度降低。

4.2 沉积层不同宽度对粉末流场的影响

为了研究不同宽度沉积层对粉末流场分布的影

响规律,设定沉积层高度为10 mm时,分别计算沉积层宽度为0.5,1,2和4 mm时粉末浓度的分布规律,不同宽度沉积层对粉末汇聚的影响规律计算结果如图5所示,对粉末汇聚最大浓度及焦距的影响如表4所示。

由表4及图5可看出,随沉积层宽度增加,粉末汇聚点处浓度增大,最大质量浓度 C_{Fmax} 值由1.993 kg/m³增大到2.769 kg/m³;粉末沉积处质量浓度由1.864 kg/m³增大到2.649 kg/m³。与自由射流相比粉末汇聚焦点也上移,粉末汇集焦距由5 mm减少到4.6 mm,上移量为0.4 mm;随沉积层宽度增

加,汇聚焦点略微上移,粉末汇聚焦距由4.9 mm降低至4.6 mm,粉末汇聚性变好。

表4 不同宽度沉积层对粉末汇聚最大浓度 C_{Fmax} 及焦距的影响

Table 4 Peak powder concentration C_{Fmax} and focus distance f with different widths

Width B /mm	Height H /mm	C_{Fmax} / (kg/m ³)	f /mm
0.5	10	1.993	4.9
1	10	2.263	4.7
2	10	2.578	4.7
4	10	2.769	4.6

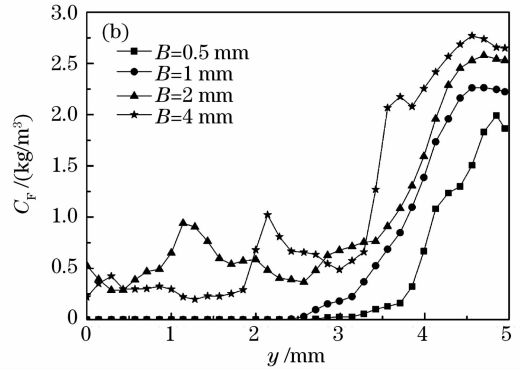
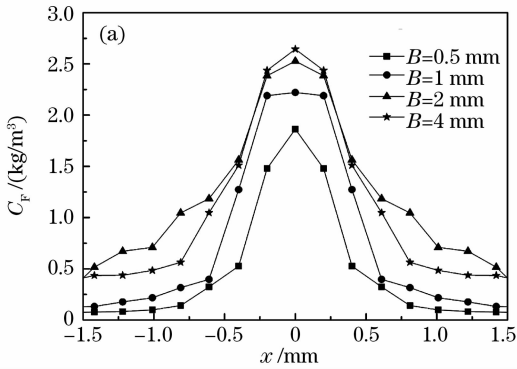


图5 不同宽度沉积层对径向与轴向粉末浓度分布的影响

Fig. 5 Powder concentration distribution with different widths of deposition layer in two directions

主要原因是当粉末粒子与沉积层或基材碰撞后,一部分颗粒逃出碰撞区域,一部分颗粒又回到沉积层上发生二次碰撞;当宽度变大时,碰撞粒子数目越多,反弹后的粒子经过与喷嘴下边缘碰撞后与沉积层发生二次碰撞的几率越大,颗粒浓度变高,造成汇聚浓度值升高且焦点位置沿轴线上移。

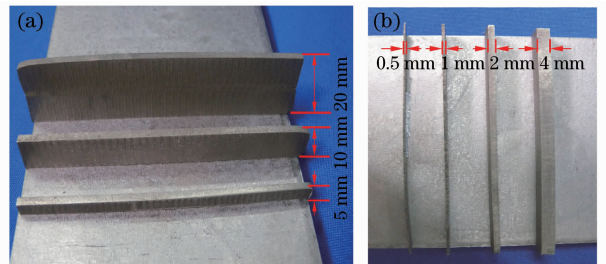


图6 沉积层试样制备。(a) 不同高度;(b) 不同宽度
Fig. 6 Samples of deposited layers. (a) with different heights; (b) with different widths

5 实验结果与模拟结果对比分析

为了验证数值计算的正确性和合理性,采用与模拟参数完全相同的工艺参数进行实验。选用相同材料的不同宽度及不同高度沉积层,把薄壁零件放置在距喷嘴正下方5 mm处,试样如图6所示。因为利用 CCD 相机拍摄需根据光强的强度去确定粉末浓度大小,而光强不能准确地标定,并且还需要一些图像处理方面的知识才能分辨出具体粉末浓度^[15],操作起来较困难。所以选用间接的方法去验证熔覆层变化对粉末流场汇聚的影响。利用在激光能量足够时,粉末浓度越大则沉积层的高度也相应地越大的原理,通过在选定试样上面熔覆一单层轨迹,进行测量单层熔覆层高度与宽度,通过高度与宽度的变化反映出零件结构对粉末汇聚的影响,实验工艺参

表5 单层激光熔覆工艺参数

Table 5 Process parameters of laser cladding experiment

Parameter name	Value
Laser power /W	250
Traverse speed /(m/s)	0.006
Beam diameter /m	0.0005
Powder mass flow rate /(kg/s)	0.0002
Shielding gas /(m ³ /h)	0.43
Materials (powder, thin-walled parts, substrate)	316L (stainless steel)
Carrier gas flow rate /(m ³ /h)	0.48

数如表5所示。沉积层高度为0,宽度为∞时所获得的轨迹截面如图7所示,并设成形轨迹的宽度为

w ,高度为 h 。用 KEYENCE VH-600 显微镜进行测量,具体的测量结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随沉积高度增加,单道熔覆层高度由 0.1 mm 降至 0.055 mm,呈下降趋势,单道宽度几乎稳定在 0.54 mm 左右;随沉积宽度的增加,单道熔覆层高度呈上升趋势,从 0.064 mm 增至 0.076 mm,单道宽度也保持在 0.53 mm 左右不变。实验结果与模拟结果趋势基本一致,表明计算模型的正确性。所以在沉积壁厚不均高度逐渐变化的薄壁零件时,会出现沉积层高度增长不均匀的现象,进而造成沉

积层表面不平整,降低沉积层的表面成形质量。

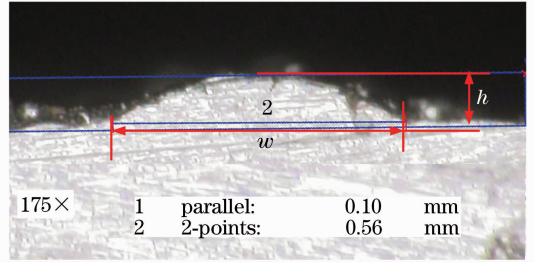


图 7 单层成形轨迹截面形貌

Fig. 7 Cross-section topography of the single track

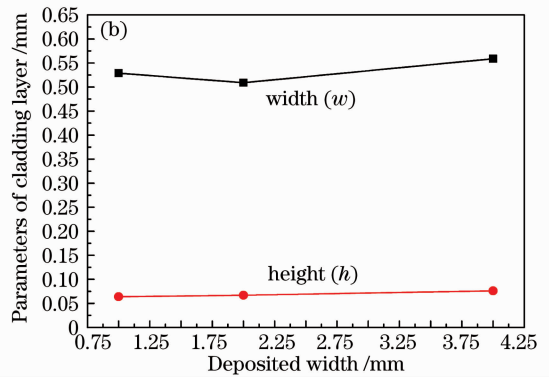
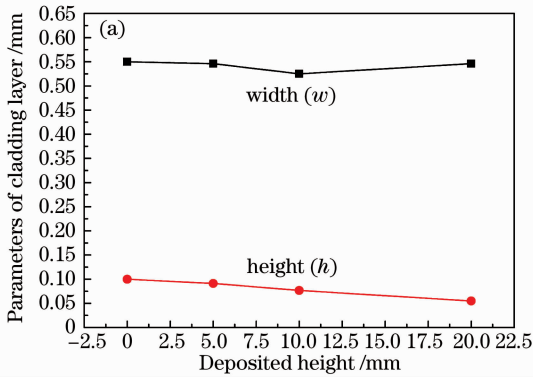


图 8 沉积层尺寸变化对单道熔覆层尺寸的影响。(a) 不同高度;(b) 不同宽度

Fig. 8 Relationship between parameters of cladding layer and heights or widths of deposition layer

(a) with different heights; (b) with different widths

6 结 论

采用气固两相流理论对载气式 CPFN 粉末流场进行了数值模拟,应用 FLUENT 软件中的离散相模型对载气式同轴送粉粉末在沉积层不同结构时对粉末汇聚特性的影响进行了数值计算,且对于不同沉积层结构进行单层熔覆试验,模拟结果与实验结果基本一致。在喷嘴下端存在沉积层与自由射流相比粉末汇聚焦点上移,粉末汇集焦距由 5 mm 减少到 4.6 mm,上移量为 0.4 mm。在沉积层宽度一定时,随沉积层高度增加,粉末汇聚处质量浓度逐渐降低,从 2.702 kg/m³ 降到 2.436 kg/m³;在沉积点处粉末质量浓度由 2.454 kg/m³ 降到 2.311 kg/m³,粉末汇集焦距由 4.6 mm 增至 4.7 mm,粉末汇聚特性基本不变。在沉积层高度恒定时,随沉积层宽度的增加,粉末汇聚点处质量浓度增大,由 1.993 kg/m³ 增大到 2.769 kg/m³;粉末沉积处质量浓度也由 1.864 kg/m³ 增大到 2.649 kg/m³;汇聚焦点上移,粉末汇集焦距由 4.9 mm 降低至 4.6 mm,粉末汇聚性变好。所以在沉积壁厚不均高度逐渐变化的薄壁零件时,会导致沉积层高度增长不均匀的现象,进而

造成沉积层表面不平整,降低沉积层的表面成形质量。

参 考 文 献

- Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1653~1659
钟敏霖,刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11):1653~1659
- T. T. Wohlers. Wohlers Report [M]. USA: Wohlers Associates, Inc. 2006. 13~43
- Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Development of research on laser direct metal rapid prototyping technology [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2007, **30**(5): 68~72
张安峰,李涤尘,卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2007, **30**(5):68~72
- S. Zekovic, R. Dwivedi, R. Kovacevic. Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition [J]. *Int. J. Mach. Tool. & Manuf.*, 2007, **47**:112~123
- J. Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Mater. Proc. Technol.*, 2000, **105**:17~23
- Yang Nan, Yang Xichen. Numerical simulation of flow field of nozzle in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 452~455
杨楠,杨洗陈. 激光熔覆中粉嘴流场的数值模拟 [J]. *中国激*

- 光, 2008, **35**(3):452~455
- 7 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng Liwei *et al.*. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(5):161~166
靳晓曙, 杨洗陈, 冯立伟 等. 激光制造中载气式同轴送粉粉末流场的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(5):161~166
- 8 Zhang Anfeng, Zhou Zhimin, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field on coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2008, **42**(9):1169~1173
张安峰, 周志敏, 李涤尘 等. 同轴送粉喷嘴气固两相流场的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2008, **42**(9):1169~1173
- 9 T. Tanaka, Y. Tsuji. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe [J]. *Gas-Solid Flows ASME*, 1991, **121**(2):123~128
- 10 B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [M]. London: Academic Press, 1972. 127~133
- 11 Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis-Principles and Application of CFD Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 120~124
王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 120~124
- 12 Li Wenchun. Direct numerical simulation of three-dimensional gas-solid two-phase wake of a circular cylinder [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 32~34
李文春. 三维气固两相圆柱绕流的直接数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 32~34
- 13 J. M. Lin. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**(3): 251~257
- 14 A. J. Pinkerton, L. Li. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling [J]. *J. Manu. Science and Engineer.-Trans. ASME*, 2004, **126**(1):33~41
- 15 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):993~997
杨洗陈, 雷剑波, 刘运武 等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):993~997