

文章编号: 0258-7025(2008)03-0452-04

# 激光熔覆中粉嘴流场的数值模拟

杨楠 杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 建立了激光熔覆中由粉嘴输出的保护气体-金属粉末两相流场计算模型,应用 FLUENT 软件进行计算。该模型中考虑了两相流中动量和质量的传输。分析了金属粉末流场的水平方向和中心线上的速度分布规律,以及粉嘴内外粉末流的速度矢量分布规律。计算结果表明,中心线处粉末流速度分布先呈现微小的增大减小过程,而后单调递增,大约从粉嘴下方 100 mm 后呈线性递增;速度水平分布先在中心线附近达到最大而后在径向距离 6~11 mm 区间内线性递减至零。在相同的工艺参数下,应用数字粒子图像测速(DPIV)技术对同一流场进行检测,计算值和测量值吻合较好。结果表明,所建立的保护气体-金属粉末流速度场模型是可靠的,该模型对掌握流场参数分布和进一步指导粉嘴尺寸设计有一定的参考作用。

**关键词** 激光技术;粉末流速度场;数字粒子图像测速技术;粉嘴

**中图分类号** TN 249;TF 124 **文献标识码** A

## Numerical Simulation of Flow Field of Nozzle in Laser Cladding

Yang Nan Yang Xichen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** A numerical model of velocity distribution of shielding gas-metal powder two phases flow field output from the nozzle in laser cladding is established, and it is calculated by FLUENT software. In this model, the influences of momentum and mass transmission on the two phases flow are taken into consideration. The metal powder flow field velocity distribution on horizontal and center line is analyzed, as well as the velocity vector distribution of powder flow inside or outside the nozzle. The results show that powder velocity magnitude on center line increases first, then decreases, finally it keeps linearly increasing from the stand-off distance 100 mm below the nozzle; powder velocity magnitude on horizontal line reaches its maximum near the center line, then linearly decreases to 0 from the radial distance 6 mm to 11 mm. Under the same process parameters, the same flow field is measured with digital particle image velocity (DPIV) technique. The calculated result agrees well with the measured result, which indicates that the established model is reliable. The model can be used to obtain flow field parameters and further design the nozzle size.

**Key words** laser technique; velocity field of powder flow; digital particle image velocity technique; nozzle

## 1 引 言

随着快速制造技术的发展,激光熔覆技术已成为一种新兴的直接制造三维实体金属零件和修复重金属零部件的先进制造方法<sup>[1]</sup>,它已广泛应用于航天航空、石油化工、电子信息、能源环境等行业。在同轴送粉条件下,金属粉末由惰性气体输送并和高功率激光同时由同轴粉嘴输出,在计算机数控机

床和 CAD/CAM 软件的控制下逐层熔覆堆积制造三维实体零件。对此过程的数值模型已有学者进行了研究<sup>[2~6]</sup>,但是对于特定粉嘴下同时考虑气固两相流中的能量、动量和质量传输的数值模拟研究较少。本文利用欧拉两相流理论建立了激光熔覆中粉嘴流场速度分布的计算模型,并采用数字粒子图像测速(DPIV)技术对同工艺参数下流场进行检测,获

收稿日期:2007-08-07;收到修改稿日期:2007-09-23

基金项目:国家自然科学基金(60478004)资助项目。

作者简介:杨楠(1979—),男,天津人,博士研究生,主要从事激光应用方面的研究。E-mail:gracey79n@yahoo.com.cn

导师简介:杨洗陈(1941—),男,吉林人,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。E-mail:yangxich@126.com

得的实验结果和模拟结果进行比较。

## 2 气固两相流计算模型

激光同轴送粉嘴输出的保护气体-金属粉末流视为定常流动的气/固两相流,保护气体使用氩气。从粉嘴射出的圆环状气/固两相流在粉嘴出口交汇如图 1 所示。粉嘴是围绕中心线的环形结构,其内外壁不平行,两相流沿着粉嘴内外壁出射可以产生聚焦效应,两相流相遇后发生碰撞而发散。

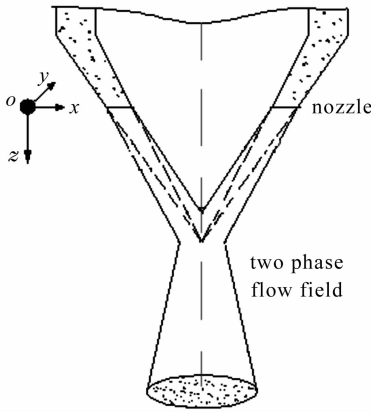


图 1 粉嘴输出的气固两相流

Fig. 1 Gas-solid two phase flow output from nozzle

激光同轴送粉嘴输出的保护气体-金属粉末两相流的能量、动量和质量传输过程可以采用欧拉两相流理论描述<sup>[7]</sup>。为简化起见,对两相流作如下假设:

- 1) 氩气和金属粉末都视为连续介质流体;
- 2) 两相流充分混合并以相同速度输入粉嘴;
- 3) 气固间不存在热量交换,所以可以忽略能量方程。

气体/金属粉末两相流的质量和动量控制方程可写为:

气相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_g \rho_g u_{gj}) = 0, \quad (1)$$

粉末颗粒相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_s \rho_s u_{sj}) = 0, \quad (2)$$

气相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_g \rho_g u_{gi} u_{gj}) = -\alpha_g \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \Delta \rho_g g_i, \quad (3)$$

粉末颗粒相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_s u_{si} u_{sj}) = \rho_s g_i, \quad (4)$$

式中下标  $i, j$  为坐标系的矢量方向;下标  $g, s$  为气固两相流; $\alpha_g, \alpha_s$  为气固两相的体积分,且  $\alpha_g + \alpha_s =$

$1; \rho_g, \rho_s$  为气体密度和金属粉末颗粒密度; $u_g, u_s$  为气体和粉末颗粒速度; $p$  为压力; $g_i$  为重力加速度; $\Delta \rho g_i$  为考虑浮力影响的重力项; $\tau_{ji}$  为气相的压力应变张量,可表示为

$$\tau_{ji} = \mu \left( \frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{gj}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j} \delta_{ij}, \quad (5)$$

其中,当  $i = j$  时  $\delta_{ij} = 1$ , 否则  $\delta_{ij} = 0$ ;  $\mu$  为流体动力黏性系数。

## 3 气固两相流速度场边界条件

如图 2 所示,粉嘴内径和缝宽分别为  $r = 18 \text{ mm}$  和  $w = 1.2 \text{ mm}$ ;内外壁与水平线夹角分别为  $\alpha = 75^\circ, \phi = 65^\circ$ ;粉嘴上下部分的高分别为  $15 \text{ mm}, 55 \text{ mm}$ 。流场区域尺寸取为  $80 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。

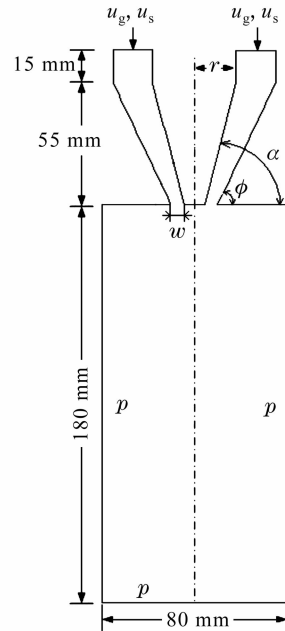


图 2 粉嘴和流场区域

Fig. 2 Nozzle and flow field region

在粉嘴入口边界,载流气体和粉末粒子具有相同的流速

$$u_s = u_g, \quad (6)$$

在粉嘴内外壁上的流体速度方向和内外壁的延伸方向一致:

在粉嘴上半部内外壁有

$$u_{sy} = u_{gy} = 0, \quad (7)$$

在粉嘴下半部外壁有(以右半粉嘴为例)

$$\frac{u_{sy}}{u_{sr}} = \frac{u_{gy}}{u_{gr}} = \tan \phi, \quad (8)$$

在粉嘴下半部内壁有

$$\frac{u_{sy}}{u_{sr}} = \frac{u_{gy}}{u_{gr}} = \tan \alpha, \quad (9)$$

式中  $u_{sx}, u_{sy}$  分别为粉末微元速度的纵横分量;  $u_{gx}, u_{gy}$  分别为保护气体微元速度的纵横分量;

气流量与气体速度关系、体积分数与送粉量关系分别为

$$V = u_g S, \tag{10}$$

$$\alpha_s = M_p / \rho_s u_s S, \tag{11}$$

式中  $S$  为流体通过的面积;  $V$  为气流量;  $M_p$  为送粉量。

采用 FLUENT<sup>[8]</sup> 商用软件定义的非耦合二维定常流隐式算法求解, 在欧拉两相流模型中, 设主相为氩气, 第二相为金属粉末; 设定求解参数: 重力加速度为  $9.81 \text{ m/s}^2$ , 在流场区域左、右和下三个边界上环境气体压强为  $p = 101325 \text{ Pa}$ , 环境空气密度为  $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , 金属粉末密度为  $\rho_s = 8314 \text{ kg/m}^3$ , 粉末平均尺寸为  $D_s = 50 \mu\text{m}$ 。粘性系数为  $\mu = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ , 输入气流量为  $V = 406.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 送粉量为  $M_p = 6.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 。

图 3 是粉嘴流场二维有限元计算模型的右半侧粉嘴及流场区域。粉嘴和流场区域的网格划分由 FLUENT 的前处理软件 GAMBIT 完成。在粉嘴出口 CH 附近, 为获得较高的计算精度而采用致密的有限元网格; 在远离粉嘴出口的地方采用稍疏的网格以减少计算时间。经过 GAMBIT 进行网格划分, 得到 4933 个节点, 4716 个单元, 其中最大单元面积为  $7.0833 \text{ mm}^2$ , 最小单元面积为  $0.8824 \text{ mm}^2$ 。通过 2230 次迭代而收敛。

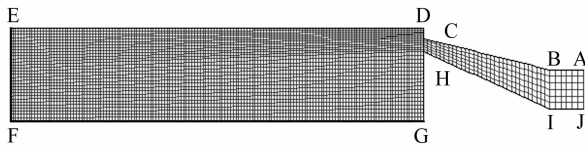


图 3 粉嘴流场二维有限元模型

Fig. 3 Two-dimensional (2D) finite element model of flow field of nozzle

### 4 模拟结果分析与实验验证

图 4 为计算机模拟的粉末流速度矢量场。在粉嘴内, 粉末流沿内外壁的方向流动, 呈现层流特征。在出口, 由于横截面积减小粉末流的速度骤然上升, 两股流体在出口附近相遇、碰撞 (参看局部放大图), 互相抵消了对方的水平速度而随着重力和气流推力向下喷射, 粉末粒子速度逐渐递增。并且在粉嘴外靠近粉末流体边界的粒子速率由于环境气体的阻力作用而低于中间的粒子 (参看局部放大图)。

为验证数值模拟的正确性, 采用数字粒子图像测速技术<sup>[9]</sup>在与数值模拟相同的工艺参数下进行金

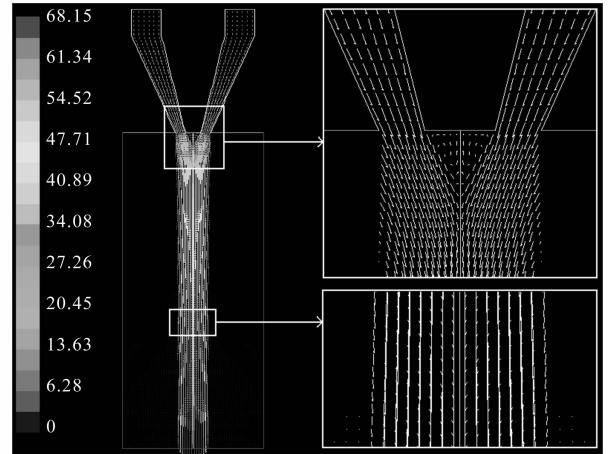


图 4 金属粉末流速度矢量场的局部放大图

Fig. 4 Velocity vector field of metal powder flow

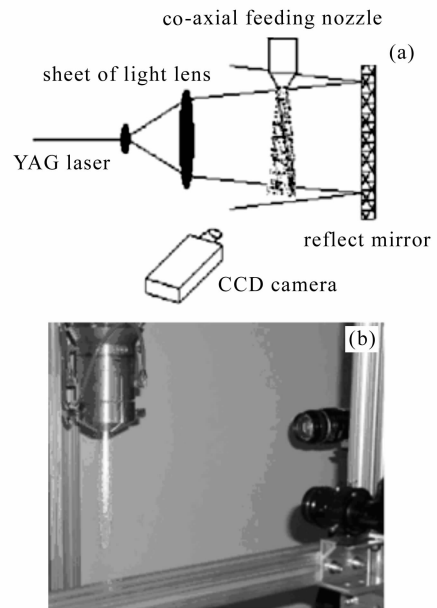


图 5 (a) 数字粒子图像测速检测原理; (b) 实验装置

Fig. 5 (a) principle of DPIV measurement; (b) device of experiment

属粉末流速度分布的检测实验。

图 5 所示为金属粉末速度场检测原理图及实验装置图。检测系统组成部件包括:  $\text{Nd}^+ : \text{YAG}$  脉冲激光器、二维片光源光学器件和 CCD 相机等。YAG 脉冲激光器发出的激光经二维片光源光学器件片状化并经反光镜反射加强, 照亮由同轴送粉嘴输出的金属粉末流, 与此同时高速跨帧 CCD 相机拍摄相隔  $\Delta t$  的 (即曝光时间, 设为  $0.001 \text{ s}$ ) 金属粉末流照片, 由专用软件进行相关运算<sup>[10]</sup> 处理数字图像, 得到某粒子 (团) 速度为

$$u_{sx} = [x(t + \Delta t) - x(t)] / \Delta t, \tag{12}$$

$$u_{sy} = [y(t + \Delta t) - y(t)] / \Delta t, \tag{13}$$

式中 $(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t))$ 和 $(x(t), y(t))$ 分别为该粒子(团)在不同时刻下的位置坐标。最终得到金属粉末流在粉喷嘴中心线(沿图3中DE)和水平方向(沿图3中EF)的速度分布。

图6中心线处金属粉末速度分布计算值所示:在交汇处,粒子速度先呈现一个小的增大—减小过程,然后持续单调增加。这是由于两股流体在粉嘴外交汇时产生了涡流(仔细观察图4中的粉嘴出口放大图),在中心线上沿重力方向:一部分粒子相遇后由涡流携带向上运动,一部分发生对心碰撞,另一部分向下运动,发生对心碰撞的粒子速度损耗较大产生速度谷值;然后在重力和气流的加速作用下,速度持续增大,大约100 mm之后的速度增加近似为线性变化。

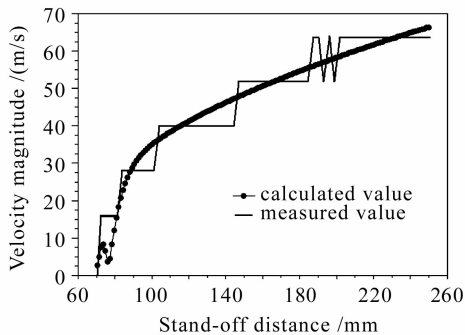


图6 中心线上粉末速度计算值和测量值的比较

Fig. 6 Comparison between calculated value and measured value of powder velocity magnitude on center line

计算值和测量值进行比较:在80 mm以前两者相差比较大,模拟曲线的“增大—减小”的波动,在测量曲线里并不明显;在80 mm以后,测量曲线始终围绕模拟曲线波动,两者吻合得比较好。可以设想,如果测量步长取得足够短,两曲线的吻合程度会更好。

图7水平方向金属粉末速度分布计算值所示:中心线附近的速度达到最大,随着接近气固两相流

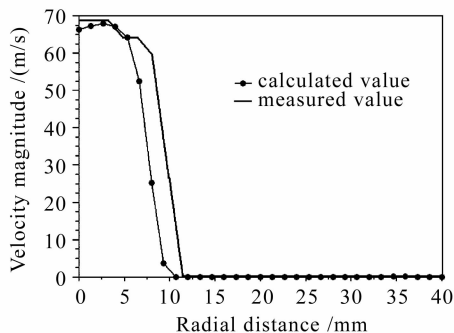


图7 水平方向粉末速度计算值和测量值的比较

Fig. 7 Comparison between calculated value and measured value of powder velocity magnitude on horizontal line

的自由边界,大约在6~11 mm区间内粒子速度由于环境空气阻力而呈线性递减,在边界以外粒子速度为零。

计算值和测量值比较:在粉末流的自由边界内,两者吻合得较好;但在边界附近,由于实际的物理过程更为复杂,流体边界不再连续,故计算值和测量值存在差异。

## 5 结论

利用FLUENT软件建立了激光熔覆中粉嘴流场的气固两相流模型,计算中考虑了两相流中动量和质量的传输,给出了金属粉末流的速度矢量场、中心线和水平方向金属粉末流的速度分布。在相同的工艺参数下,计算值和测量值吻合较好。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao *et al.*. Directly rapid fabrication of metal components by laser cladding [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2002, **20**(4):234~238  
杨森,钟敏霖,张庆茂等. 金属零件的激光直接快速制造[J]. 粉末冶金技术, 2002, **20**(4):234~238
- 2 Jehming Lin. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**:233~238
- 3 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing [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
- 4 Jehming Lin. Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Laser Applications*, 2000, **12**(1):28~33
- 5 Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):562~566  
席明哲,虞钢,张永忠等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. 中国激光, 2005, **32**(4):562~566
- 6 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):567~570  
刘振侠,黄卫东,万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(6):567~570
- 7 Zhang Yuanjun, Wang Huiyu, Zhang Zhenpeng. Basic Principles and Engineering Applications of Two-Phase Dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 1987. 212~481  
张远君,王慧玉,张振鹏. 两相流体动力学基础理论及工程应用[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1987. 212~481
- 8 Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. Examples and Applications of FLUENT in Fluid Engineering Simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. 27~199  
韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT——流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004. 27~199
- 9 Wang Xishi, Wu Xiaoping, Liao Guangxuan. A method of extending DPIV and its application in spray droplet size measurements [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(12):1045~1049
- 10 Yang Nan, Yang Xichen. A new algorithm on digital image processing technology of powder flow field [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):368~371  
杨楠,杨洗陈. 粉末流场数字图像处理技术的一种新算法[J]. 中国激光, 2007, **34**(增刊):368~371