

# 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型

杨楠 杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 为了对同轴激光熔覆过程中运动的金属粉末粒子的速度和温度进行理论分析,并研究各工艺参数的影响,建立了运动中金属粉末粒子的运动模型和热模型。模拟结果表明,粉嘴几何尺寸、粒子直径以及气/粉两相流初始速度是影响粒子运动行为的重要因素;粉嘴几何尺寸、激光焦点位置、激光发散角、激光功率、粒子直径以及气/粉两相流初始速度是影响粒子热行为的重要因素。在相同的工艺参数下(粉嘴出口内径  $r=2$  mm, 粉嘴倾角  $\alpha=60^\circ$ , 初始气流速度  $v_0=0.8$  m/s),基于数字粒子图像测速(DPIV)技术,对 316L 不锈钢粉末粒子运动模型进行了实验验证。结果表明,运动理论模型是可靠的,该模型是掌握同轴激光熔覆过程中金属粉末粒子运动行为的有效工具;同时,热模型也是分析粉末粒子温度随不同参数变化的重要工具。

**关键词** 激光技术; 粉末粒子; 速度; 温度; 数字粒子图像测速技术; 数值模拟

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082809.1745

## Model of Interaction between Metal Powder Particle and Laser Beam in Laser Cladding

Yang Nan Yang Xichen

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

**Abstract** In order to analyze the velocity and temperature of moving metal particles in coaxial laser cladding, and to study the influence of process parameters, the movement model and thermal model of moving metal powder particle were proposed. The simulated results show that the nozzle geometric structure, particle size and initial velocity of the shield gas /powder two-phase flow are important parameters to affect movement behavior of the powder particles, and the nozzle geometric structure, position of laser beam focal point, divergent angle, laser power, particle size and initial velocity of the shield gas /powder two-phase flow are important parameters to affect thermal behavior of the powder particles. Under the same process parameters (the inner radius of nozzle exit  $r=2$  mm, the nozzle angle  $\alpha=60^\circ$ , initial gas velocity  $v_0=0.8$  m/s), based on digital particle image velocimetry (DPIV), the movement model of 316L stainless steel powder particle was proved by experiment. Results show that the movement model is reliable, and it is an efficient tool to understand the movement behavior of metal powder particles in coaxial laser cladding, and the thermal model is also an important tool to analyze the temperature change of powder particles with different parameters.

**Key words** laser technique; powder particle; velocity; temperature; digital particle image velocimetry; numerical simulation

## 1 引言

激光熔覆已经成为一种直接成形 3D 零件和修复贵重零件的新方法。在激光熔覆过程中,高功率激光、金属粉末和保护气体从粉嘴同轴输出,激光束

在粉末流中通过,一部分激光能量被粉末吸收,一部分辐射到工件基体表面,进一步熔化粉末粒子。在数控机床的控制下,随着被加工工件的移动,冷却后快速凝固在基体表面,形成熔覆层<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2007-12-04; 收到修改稿日期: 2008-01-28

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,博士研究生,主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: gracey79n@yahoo.com.cn

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,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等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

由于激光与粉末、粉末与基材、基材与激光之间复杂的相互作用,同轴激光熔覆比其他激光表面处理过程更加复杂。尽管在此领域已经有过一些研究报道<sup>[2~7]</sup>,但是运动粒子的运动模型与热模型仍然不常见。本文建立同轴激光熔覆中金属粉末粒子2D运动与热的较为精确的模型,对比说明了不同工艺参量对粉末粒子速度、温度的影响,并采用基于数字粒子图像测速 DPIV 技术对模拟结果进行实验验证。为送粉嘴的设计和工艺参量的选择提供了科学的理论依据。

## 2 粉末粒子运动模型

图 1 为某一粒子由保护气体(氩气)输送从粉嘴喷出的示意图。其中  $h_0$  为激光焦点到粉嘴出口的距离; $\theta$  为半激光发散角; $w$  为粉嘴出口宽度; $r$  为粉嘴出口内径; $\alpha$  为粉嘴倾角; $H$  为粉嘴出口与基材之间的距离。为建立粉末粒子运动模型提出一些假设:1) 粉末粒子始终在保护气体中运动,在粉嘴出口粒子初速度等于气流速度;2) 忽略粉末粒子间的碰撞;3) 在较短喷射区(Short stand-off distance)内保护气流速度和方向恒定。

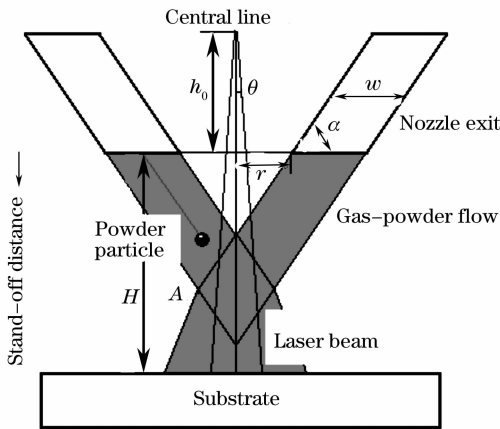


图 1 从粉嘴射出的粉末粒子

Fig. 1 Powder particle spraying from nozzle

粒子速度可由(1)式解出<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{18\mu(1 + 0.15\text{Re}^{0.687})(u_x - v_x)}{\rho_p d_p^2}, \\ \frac{dv_y}{dt} = \frac{18\mu(1 + 0.15\text{Re}^{0.687})(u_y - v_y)}{\rho_p d_p^2} + g, \\ \text{Re} = \frac{\alpha d_p}{\mu} \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2}, \\ v_{x0} = v_0 \cos \alpha, \quad v_{y0} = v_0 \sin \alpha, \\ u_x = u_0 \cos \alpha, \quad u_y = u_0 \sin \alpha, \\ v(t) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $v_x, v_y$  分别为粒子速度的横纵分量;  $u_x, u_y$  分别为保护气体速度的横纵分量;  $v_0, u_0$  分别为粒子和保护气体在粉嘴出口的初始速度;  $v(t)$  为粒子的合速度;  $\mu, \rho$  分别为气体的黏度和密度;  $d_p, \rho_p$  分别为粒子的直径和密度;  $\text{Re}$  为雷诺数,  $g$  为重力加速度。

(1)式的计算结果以及各工艺参量对粒子速度的影响如图 2~图 4 所示。图 2 为粒子速度初值决定整体速度值:速度初值较大的粒子在运动过程中速度依然大,并且由 5 条曲线几近相互平行可以看出在同一位置不同曲线上的速度值呈等差(此差取决于速度初值的差)。图 3 为同样速度初值的条件下,直径较大的粉末粒子更容易获得较大的速度值,这是由于较大的粒子较重,它抵抗气体阻力的能力更大。图 4 为从较大倾角的粉嘴射出的粒子由于具有较大的竖直方向的起始速度,受重力作用合速度增加较快,但它对粒子速度的影响并不十分明显。

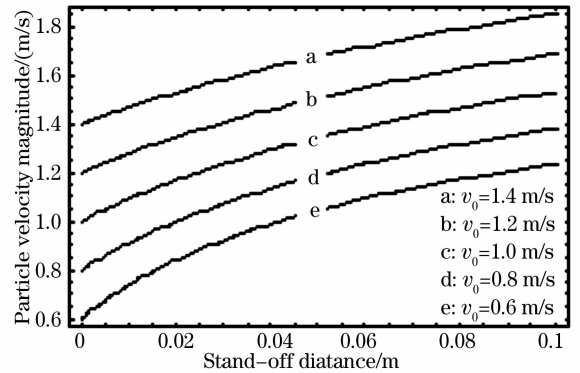


图 2 不同的粒子初速度对粒子速度的影响  $d_p = 75 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 60^\circ$

Fig. 2 Effects of initial particle velocity on the velocity magnitude with  $d_p = 75 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 60^\circ$

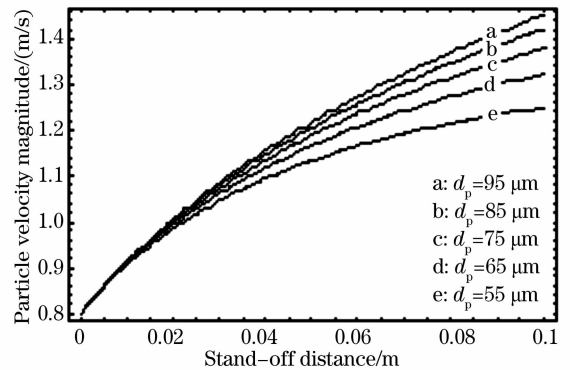


图 3 不同的粒子直径对粒子速度的影响  $\alpha = 60^\circ$ ,  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}$

Fig. 3 Particle diameter effects on the velocity magnitude with  $\alpha = 60^\circ$ ,  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}$

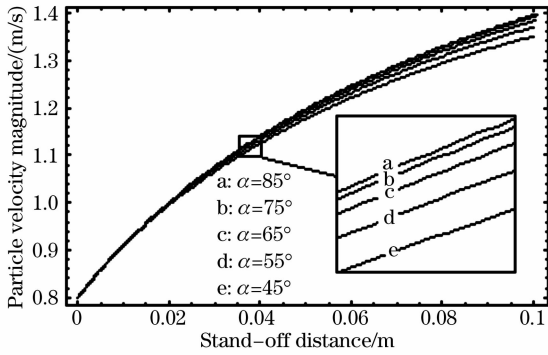


图4 不同的粉嘴倾角对粒子速度的影响  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $d_p=75\text{ }\mu\text{m}$   
Fig. 4 Effects of nozzle angle on the velocity magnitude with  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $d_p=75\text{ }\mu\text{m}$

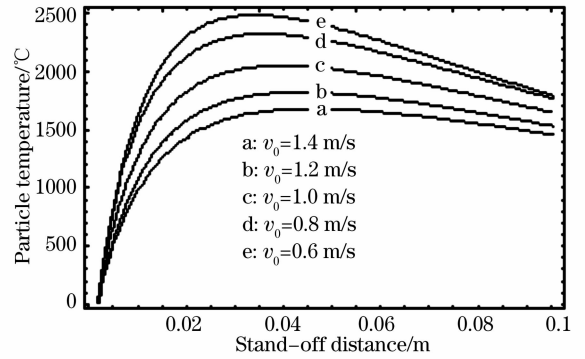


图5 初始速度对粒子温度的影响  $\theta=4^\circ$ ,  $h_0=10\text{ mm}$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$   
Fig. 5 Effects of initial velocity on the temperature of the particle with  $\theta=4^\circ$ ,  $h_0=10\text{ mm}$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$

### 3 运动粉末粒子的热模型

为简化复杂的热过程,提出一些假设:

1) 由于粒子颗粒很小并且激光功率较强,故假设粒子的每一部分同时升温。

2) 保护气体和环境气体的温度变化忽略不计。

粉末粒子温度值  $T(t)$ 可由(2)式解出<sup>[8]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{6[2 + 0.6\text{Re}^{0.5}(\mu c_p/k)^{0.33}](T_g - T)}{d_p^2 \rho_p c_p} + \frac{3\beta P}{2\pi d_p \rho_p c_p [(h_0 + y) \tan \theta]^2}, \\ T_0 &= 20\text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中  $c_p$  为粉末粒子比热;  $k$  为热传导系数;  $T_g$  为气体温度;  $\beta$  为粒子表面热吸收率;  $P$  为激光功率;  $y$  为运动粒子的纵向位置;  $T_0$  为粉末粒子起始温度, 设为室温。

令某粒子(粒子直径  $75\text{ }\mu\text{m}$ )由左侧粉嘴的外壁出射,(2)式计算结果如图5~图10所示。图5是由于强激光的照射,开始粒子温度升高很快;然后,由于周围较冷的气流以及逐渐衰减的激光强度,其温度开始下降。尽管较慢的粒子较晚地进入激光照射区域,其温度升高却较快,运动较快的粒子由于匆忙地经过高激光强度区域,迅速地进入低激光强度区域,故升温较慢。如图6和图7所示,如果减小半激光发散角  $\theta$  或减小激光焦点与粉嘴出口的间距  $h_0$ ,会影响粒子进入激光照射区域时当地的激光强度,由于粒子所处位置上激光强度的增大,其温度升高将较快。图8表示,激光功率增大则粒子温度升高加快。图9~图10表示,减小粉嘴出口宽度或者粉嘴倾角可以改变粒子进入激光区域的位置,使得粉末粒子更早进入激光区域并且温度升高较快。

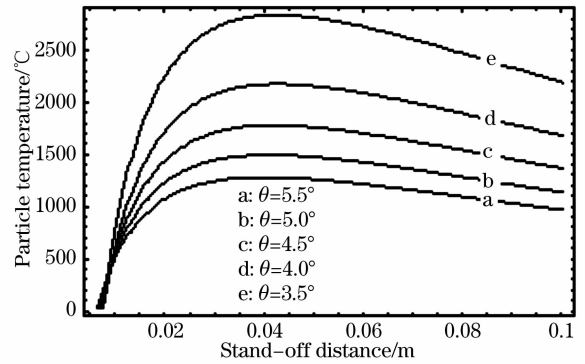


图6 激光发散角  $\theta$  对粒子温度的影响。  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $h_0=10\text{ mm}$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$   
Fig. 6 Effects of half laser beam divergence angle  $\theta$  on the temperature of the particle with  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $h_0=10\text{ mm}$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$

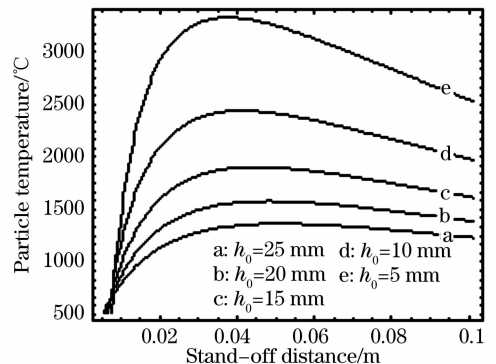


图7  $h_0$  对粒子温度的影响。  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $\theta=4^\circ$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$   
Fig. 7 Effects of  $h_0$  on the temperature of the particle with  $v_0=0.8\text{ m/s}$ ,  $\theta=4^\circ$ ,  $P=1\text{ kW}$ ,  $\omega=3\text{ mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$

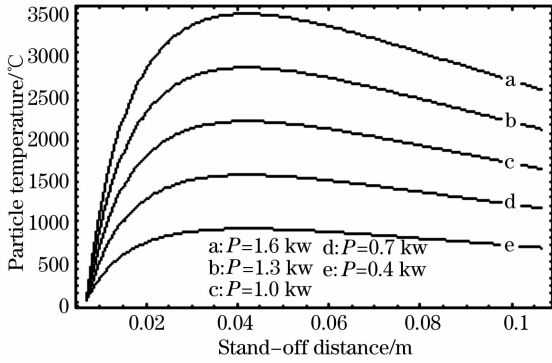


图 8 激光功率对粒子温度的影响  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, \tau = 3 \text{ mm}, \alpha = 60^\circ$

Fig. 8 Effects of laser power on the temperature of the particle with  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, \tau = 3 \text{ mm}, \alpha = 60^\circ$

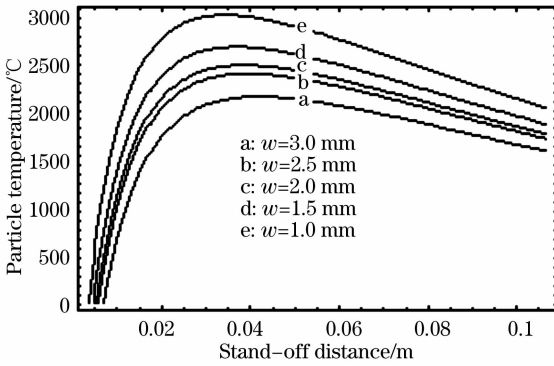


图 9 粉嘴出口宽度对粒子温度的影响  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \alpha = 60^\circ$

Fig. 9 Effects of nozzle exit width on the temperature of the particle with  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \alpha = 60^\circ$

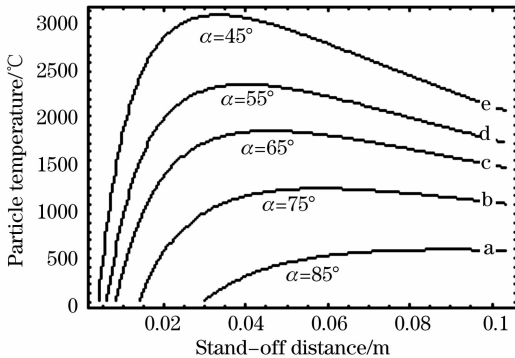


图 10  $\alpha$  对粒子温度的影响  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \tau = 3 \text{ mm}$

Fig. 10 Effects of nozzle angle  $\alpha$  on the temperature of the particle with  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \tau = 3 \text{ mm}$

粉末粒子的直径对粒子温度的影响如图 11 所示,由于直径较大的粒子具有较大的热惯性,其升温 and 降温过程都很缓慢,反之,较小的粒子升温和降温过程都比较迅速。

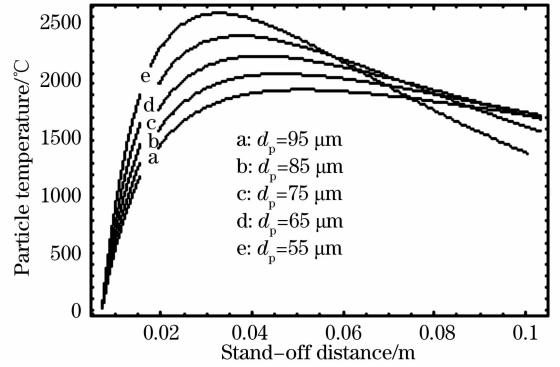


图 11 不同的粒子直径对粒子温度的影响  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \tau = 3 \text{ mm}, \alpha = 60^\circ$

Fig. 11 Effects of particle diameter on the temperature of the particle with  $v_0 = 0.8 \text{ m/s}, \theta = 4^\circ, h_0 = 10 \text{ mm}, P = 1 \text{ kW}, \tau = 3 \text{ mm}, \alpha = 60^\circ$

在本例中,粉末采用 316L 不锈钢,根据热模型的计算,粒子大约在喷嘴下方 13.5 mm 处(在激光照射区域内)温度达到 1471 °C,超过其液化温度 1434 °C,说明它在到达基材前已被融化。粉末材料热参量见表 1<sup>[5]</sup>,其他常量参量请见表 2。

表 1 316L 不锈钢在不同温度下的导热系数和比热  
Table 1 Coefficient of heat conductivity and specific heat of 316L stainless steel at different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	200	400	800	1200
$c_p / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	536	569	644	669
$k / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	18	20.8	26.3	31.9

表 2 其他常量参量

Table 2 Other constant parameters

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	$\rho = 1.6228 \text{ kg/m}^3$
$\rho_p = 8000 \text{ kg/m}^3$	$\beta = 0.2$
$\mu = 1.789 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$	$r = 2 \text{ mm}$

### 4 实验验证

目前有很多光学测速理论的研究<sup>[9,10]</sup>和图像、视频处理方面的研究<sup>[11,12]</sup>。本文采用 DPIV 技术对金属粉末粒子速度进行检测,实验原理和装置图<sup>[3]</sup>如图 12 所示。检测系统组成部件包括:YAG 脉冲激光器、2D 片光源光学器件、反射镜和 CCD 相机等。

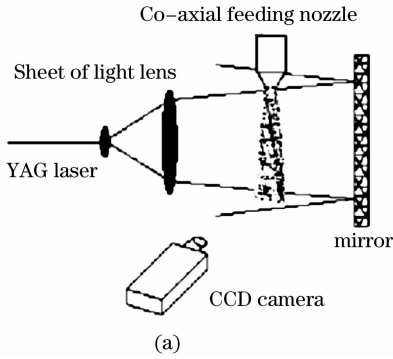


图 12 (a) DPIV 原理图, (b) 实验装置图

Fig. 12 (a) Principle of DPIV, (b) experimental setup

Nd:YAG 脉冲激光器发出的激光经 2D 片光源光学器件片状化并经反射镜反射后,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(曝光时间设为 0.001 s)金属粉末流照片。

图 13 是根据所拍相邻时刻的两张流场照片计算粒子速度的示意图。首先要找到某一粒子(团)各自在两图片中的位置,即:寻找  $G_1$  和  $G_2$  分别在各自图片中的位置,它们在视觉上相似,称为相关区域。相关区域指的是同一粉末粒子(团)在不同图片中相关系数最大的两个区域。两个同阶灰度矩阵的相关系数定义为

$$Rs(m, n) = \frac{\sum_j \sum_i G_1(i, j)G_2(i + n, j + m)}{\sqrt{[\sum_j \sum_i G_1^2(i, j)][\sum_j \sum_i G_2^2(i + n, j + m)]}}, \quad (3)$$

式中  $G_k(x, y)$  指在第  $k$  个灰度矩阵中,坐标为  $(x, y)$  的像素点的灰度值。 $m, n$  分别表示  $x$  与  $y$  方向上的位置偏移量。 $Rs$  表示相关系数。

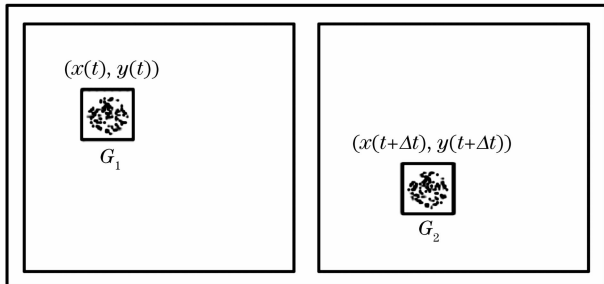


图 13 粒子速度测量值计算

Fig. 13 Calculation of the measured value of particle velocity

相关系数能良好地定量描述两灰度矩阵的相似程度,两者呈现单调对应关系:相似性越强,相关系数越大,反之亦然。由于  $G_k(x, y) \in [0, 255]$ ,故可知,

$Rs(m, n) \in [0, 1]$ ,因此,子块  $G_1$  的速度测量值可用(4)式、(5)式估计:

$$v_x = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \quad (4)$$

$$v_y = \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

式中  $x(t), y(t)$  和  $x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)$  分别是  $G_1$  和  $G_2$  的坐标。所测得子块  $G_1$  的速度实为粒子群的速度,但是由于  $G_1$  足够小,故可以此速度估计  $G_1$  内各个粒子的速度。

图 14 是同工艺参量下,  $r = 2 \text{ mm}, \alpha = 60^\circ, v_0 = 0.8 \text{ m/s}$ , 316L 不锈钢粉末粒子速度测量值和计算值的比较线图。如图所示,测量值呈阶梯状递增分布,在较短的喷射距离内,测量值和计算值吻合较好,但是随着喷射距离的增加测量值和计算值之间的差距也在增加。

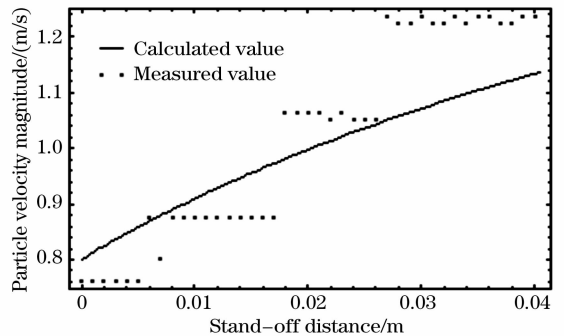


图 14 粒子速度测量值和计算值的比较

Fig. 14 Comparison of measured value and calculated value of the particle velocity

## 5 结 论

建立了在同轴激光熔覆中运动粉末粒子的二维运动模型和热模型。计算结果表明,粉嘴几何尺寸、粒子直径以及气/粉两相流初始速度是影响粒子运动

行为的重要因素,粉嘴几何尺寸、激光焦点位置、激光发散角、激光功率、粒子直径以及气/粉两相流初始速度是影响粒子热行为的重要因素。运动模型和热模型是描述粉末粒子运动行为和热行为的重要工具。

在相同的工艺参量下,对粉末粒子的速度模型进行实验验证。结果表明:运动模型是可靠的,是掌握同轴激光熔覆中金属粉末粒子运动行为的有效工具。

### 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 Jehnming Lin. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 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]. *Chin. 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 Jehnming 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]. *Chin. 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]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 567~570  
刘振侠,黄卫东,万柏涛 等. 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 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng Liwei *et al.*. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing[J]. *Chin. 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 Kong Long. *Two-Phase Fluid Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. 92~94  
孔 珑. *两相流体力学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 92~94
- 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 Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 190~194  
陆 敏,王 鸣,郝 辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 190~194
- 11 Jianfeng Sun, Qi Li, Wei Lu *et al.*. Correlation recognition for range image of laser radar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 77~78
- 12 Liu Guixi, Shao Mingli, Liu Xianhong *et al.*. Video moving object auto-extraction in real scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1150~1155  
刘贵喜,邵明礼,刘先红 等. 真实场景下视频运动目标自动提取方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1150~1155