

文章编号: 0258-7025(2008)11-1664-16

激光制造中同轴粉末流动量和质量传输

杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 激光制造同轴粉末/载流气体两相流中存在动量、质量和能量传输等物理过程, 它们直接决定激光制造的质量和精度。重点报道国内外粉末流中动量和质量输运方面的综合研究结果: 提出了激光同轴送粉二相流物理模型; 根据气体/固体两相流理论建立了动量质量传输方程, 开发了基于 FLUENT 的计算机模拟专用软件; 建立了基于 DPIV(Digital Particle Image Velocimetry)的气体/金属粉末两相流的速度场和浓度场检测方法, 开发了图像处理专用软件; 完成了气体/金属粉末两相流的速度场和浓度场的数值模拟和试验检测。结果表明: 理论模拟和试验检测结果基本一致。

关键词 激光技术; 同轴送粉熔覆; 两相流; 浓度场和速度场; 数值模拟; CCD 检测; 图像处理

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083511.1664

Momentum and Mass Transferences of Coaxial Powder Stream in Laser Manufacturing

Yang Xichen

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

Abstract In carrying gas/powder two phases flow from laser coaxial nozzle there are three main physical processings of energy, momentum and mass transferences, which directly affect the quality and accuracy of the parts by laser manufacturing. Comprehensive results researched on momentum and mass transferences of the two phases flow have been reported: Physical model of the two phases flow from laser coaxial nozzle is presented. A set of governing equations of mass and momentum conversation for each phase are established based on Euler theory for two-phase flow. FLUENT 6.0 software is developed to solve the momentum equation and continuity equations. DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) with special image processing software is developed to measure concentration and velocity fields in the gas/powder stream. It is shown that there are good identical results between numerical simulation and DPIV measurement.

Key words laser technique; coaxial powder cladding; two phases flow; concentration and velocity fields; numerical simulation, CCD camera; image processing

1 引 言

自 1997 年 W. W. Steen 等^[1]首次提出采用同轴送粉熔覆进行激光直接制造概念以来, 基于同轴送粉熔覆的激光直接制造与激光再制造已发展成快速制造金属实体零件和修复贵重零部件的重要先进技术。十年来国内外已开发出多种类型的激光制造技术: Sandia 国家实验室开发出 LENS (Laser Engineering Net Shaping) 技术^[2], Los Alamos 国家

实验室开发出 DLF (Directed Light Fabrication) 技术^[3], Michigan 大学开发出 DMD (Direct Metal Deposition) 技术^[4]等。国内已有清华大学等单位^[5~10]开展了激光直接制造技术的研究, 天津工业大学^[11,12]等单位开展了激光再制造技术的研究。该项技术具有一系列独特的优点: 它克服了早期侧向送粉单向性的缺点, 实现二维(2D)全方向熔覆; 生成的金属组织细小, 结构均匀致密, 其力学性能和

收稿日期: 2008-09-08; 收到修改稿日期: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)资助课题。

作者简介: 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

耐磨耐腐蚀性能比常规金属成形技术均有大幅度提高;可进行激光成形的合金材料适用面广泛,不仅铁基镍基钴基材料,而且钛合金、铝合金、铜合金等有色金属以及钽铌等稀有金属甚至陶瓷材料均能进行激光熔覆成形,成形速度快,不需要模具。

虽然激光直接制造和再制造技术获得了若干重要应用,但该项技术许多基础理论问题尚需开展深入研究。由于激光制造的核心技术是激光同轴送粉熔覆,同轴送粉的性能直接决定激光制造的质量和精度。激光同轴送粉熔覆效果取决于粉嘴参数(尺寸、聚焦性能)、激光参数(功率、波长、模式、聚焦性能)、激光熔覆工艺参数(功率、送粉量、气流量)以及粉末流物理场分布(浓度场、速度场、温度场)。一句话,取决于激光与金属粉末流的相互作用物理过程。从宏观理论看来,在激光作用下金属粉末/载流气体两相流中存在动量、质量和能量传输等主要物理过程,它们决定了金属粉末/载流气体两相流中速度场、浓度场和温度场的分布和大小。

激光与金属粉末流的相互作用物理过程研究受到国内外广泛关注,已有多位学者开展了这方面的研究^[13~18],但多侧重于理论或试验的单项研究。由于在载流气体和金属粉末构成的气粉两相流中粉末粒子数量众多、尺寸微小(微纳米级)且流速很高,高功率激光与金属粉末/载流气体两相流相互作用物理过程十分复杂,给浓度场,速度场和温度场的研究带来很大困难,理论模拟和试验检测难度都很大。为此,需要开展深入的理论模拟与试验检测相结合方面的研究工作。英国 University of Liverpool 的 W. W. Steen 研究小组^[19~23]、美国 University of Missouri-Roll 的 Frank Liou 研究小组^[24~26]和中国天津工业大学的杨洗陈研究小组^[27~53]分别在各自国家自然科学基金的资助下开展了深入系统的理论和试验研究。主要研究内容集中在五个方面:激光同轴送粉粉末流的物理模型,同轴送粉粉末流的浓度场和速度场的数值模拟,同轴送粉粉末流的温度场的数值模拟,同轴送粉粉末流的浓度场和速度场的试验检测,同轴送粉粉末流的温度场的试验检测。通过这些研究工作,基本搞清了激光同轴送粉粉末流的分布特性,粉末流物理场分布(浓度场、速度场、温度场)与粉嘴设计参数(几何尺寸、聚焦性能)、激光束参数(功率、波长、模式、聚焦性能)和激光熔覆工艺参数(功率、送粉量、气流量)之间的相互作用关系,得到了理论模拟和试验检测基本一致的结果。在研究过程中所建立的粉末流中速度场、浓

度场和温度场的数值模拟方法和试验检测手段,不仅为激光制造奠定重要的理论基础,而且能直接指导激光同轴熔覆工艺优化和同轴送粉嘴的设计优化;所开发的粉末流中速度场和浓度场 DPIV 检测方法和温度场 CCD 检测方法,可发展成激光制造的有效检测和控制技术。这些研究工作的开展,不仅具有重要的理论意义,而且具有很高的实用价值,推动了激光制造技术的发展和應用。作为激光制造中激光与金属粉末流的相互作用物理过程研究一部分,本文重点报道国内外关于激光同轴送粉粉末流中动量和质量输运方面的综合研究结果,粉末流中能量输运方面的研究结果将另文报道。

2 激光同轴送粉粉末流物理模型

基于同轴送粉熔覆的激光直接制造与激光再制造技术工作原理如下:高功率激光与金属粉末/载流气体同轴从粉嘴输出,一部分激光能量被粉末流吸收形成一支“激光弧”,其余部分激光能量通过粉末流后输出到基体,用于熔化落下的粉末和基体材料。数控机床按 CAD/CAM 程序驱动“激光弧”逐层熔覆,最后生成三维实体零件。图 1(a)和(b)分别为激光同轴送粉工作时 CCD 相机直接拍摄的粉末流的未通激光冷图像和粉末流的通激光热图像-激光弧。

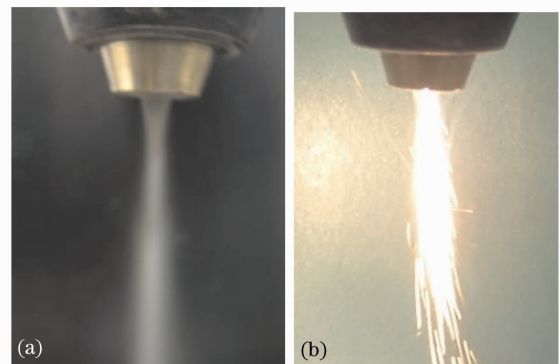


图 1 CCD 相机直接拍摄的激光同轴送粉粉末流图像
(a)未通激光的冷粉流;(b)通激光的热粉流-激光弧

Fig.1 Images of laser coaxial powder stream by CCD camera. (a) cooling powder stream without laser; (b) heat powder stream with laser-laser arc

激光同轴送粉嘴的主要功能为:使聚焦激光束沿粉嘴中心轴线入射,并和金属粉末/载流气体两相流从粉嘴出口同步输出,共同在 Z 轴上聚焦。激光同轴送粉嘴的几何结构主要由激光束腔、载气粉末流腔、内气体保护腔和水冷腔组成,根据不同的工作需要,可加外气体保护腔。到目前为止,激光同轴送粉嘴的几何结构已发展成如图 2 所示的三种基

本类型:

1)带倾斜外保护气的同轴送粉嘴: W. W. Steen 小组提出的一种类型^[1], 主要用于激光直接沉积制造, 直接保护激光沉积熔池, 避免在大气下激光熔覆产生氧化。由于激光沉积熔池尺寸小, 外气嘴呈倾斜形。

2)带垂直外保护气的同轴送粉嘴: Frank Liou

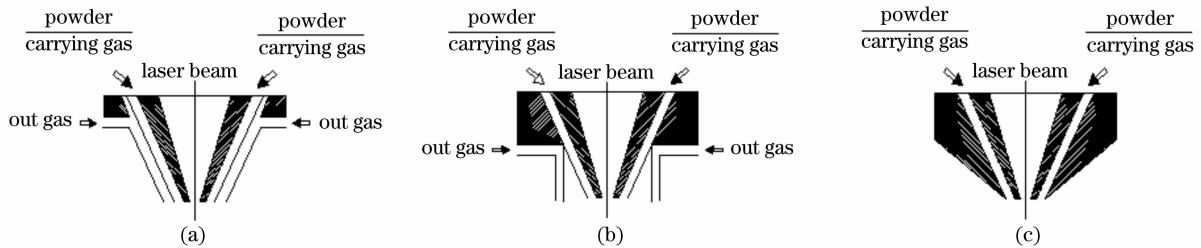


图 2 激光同轴送粉嘴的三种几何结构

Fig. 2 Three kinds of geometrical structure for laser coaxial powder nozzle

物理模型是研究激光粉末流三种物理场(浓度场、速度场、温度场)的基本出发点,也是激光同轴送粉嘴设计的理论基础。针对激光同轴送粉嘴的几何结构,首先要建立激光同轴送粉粉末流空间分布的物理模型。同轴送粉中粉末流空间分布的特性,主要由同轴送粉嘴的角度、宽度和高度等几何结构决定,外保护气的存在不影响它的基本空间分布特征。因此,杨洗陈小组^[27]建立的如图 3 所示激光再制造同轴送粉嘴物理模型,可作为研究激光粉末流三种物理场的基础。在这个模型中提出了粉末流聚焦概念,定义了粉末流聚焦参数,导出了同轴送粉中粉末流浓度场解析表达式,揭示了三区分布特征,并在后面的 DPIV 检测试验中得到证实。为简化起见,对载流气体/金属粉末两相流运输的物理模型作如下假设:

1)高功率聚焦激光束从送粉嘴中心轴线 Z 轴通过,在工件表面聚焦。

2)金属粉末在雾化腔内与载流气体作用形成均匀雾化的气/粉两相流,由粉嘴内外壁之间的粉末腔出口喷出,在 Z 轴上聚焦形成粉末流焦点。激光熔覆时,应使激光束焦点与粉末流焦点相匹配。

3)为使粉末流形成聚焦效应,送粉嘴的几何形状选为以 Z 轴为中心的环状结构,而且粉腔内外壁不平行。气/粉两相流沿粉腔内外壁延长线方向流出,形成一个锥形粉末流环,在 Z 轴上汇聚。

4)由于重力作用及其他因素,粉末腔出口喷出的粉末流会产生发散,形成发散角,因而在中心轴线

小组提出的一种类型^[25], 主要用于普通的激光熔覆,保护大气下激光熔覆易氧化的粉末材料,它需要较大的保护空间,外气嘴呈垂直形。

3)不带外保护气的同轴送粉嘴: 杨洗陈小组提出的一种类型^[27], 主要用于普通的激光再制造。由于此工况条件下多使用自熔性合金粉末,大气下激光熔覆可产生自造渣保护,不需要外保护气。

上粉末流形成上、下焦点,在聚焦区形成一个粉末流焦柱。

5)粉末流聚焦后,又以新的发散角开始发散,产生锥状粉流区。

6)粉腔出口附近,载流气体和金属粉末以相同的速度 $V_p = V_g$ 流出。

图 3 中有关符号意义如下: r 为粉咀内壁半径, w 为粉咀出口宽度, α 为粉腔内壁与中心轴线 Z 夹角, ϕ 为粉腔外壁与中心轴线 Z 夹角, θ 为聚焦前的粉末流发散角, β 为粉末流聚焦后的发散角, f_{p_1} 为粉末流的上焦点, f_{p_2} 为粉末流下焦点, R_{f_1} 为粉末流上焦点半径, R_{f_2} 为粉末流下焦点半径, L_f 为粉末流焦距 ($f_{p_2} - f_{p_1}$)。从图 3 可以得出关系式

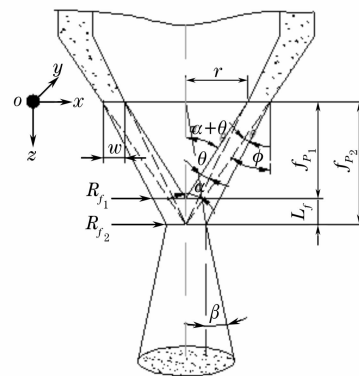


图 3 激光同轴送粉中粉末流物理模型

Fig. 3 Physical model of powder stream in laser coaxial cladding

$$f_{p_1} = \frac{r}{\tan(\theta + \alpha)}, \tag{1}$$

$$f_{p_2} = \frac{r + \omega}{\tan(\phi - \theta)}, \tag{2}$$

$$L_f = f_{p_2} - f_{p_1} = \frac{r + \omega}{\tan \phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)}, \tag{3}$$

$$R_{f_1} = (r + \omega) - f_{p_1} \tan(\phi - \theta) = (r + \omega) - r \frac{\tan(\phi - \theta)}{\tan(\theta + \alpha)}, \tag{4}$$

$$R_{f_2} = R_{f_1} - L_f \tan(\phi - \theta) = R_{f_1} - \left[\frac{r + \omega}{\tan \phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)} \right] \tan(\phi - \theta), \tag{5}$$

根据上述 6 点假设,金属粉末流浓度场呈现三个不同的分布区域:

1) $0 < z < f_{p_1}$ 环状粉流区

在此区间,粉末流与激光束不存在相互作用。在 xy 截面上,粉末流呈环形分布。令 S 为环流截面积, $C(z)$ 为粉末流浓度, M_p 为粉末流质量流率, V_p 为粉末流平均速度,则

$$C(z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p \{ [(r + \omega) - z \tan(\phi - \theta)]^2 - [(f_{p_1} - z) \tan(\alpha + \theta)]^2 \}}, \tag{6}$$

2) $f_{p_1} < z < f_{p_2}$ 粉流聚焦区

在此区间,粉末流形成聚焦,激光束与粉末流间形成良好耦合,粉末流在 xy 截面上呈高斯分布:

$$C(z) = C_0(z) \exp \left\{ - \frac{x^2 + y^2}{[r_f(z)]^2} \right\},$$

其中:

$$C_0(z) = \frac{M_p}{V_p S(z)} = \frac{M_p}{\pi V_p [R_{f_2} + (f_{p_2} - z) \tan(\phi - \theta)]^2}, \quad r_f(z) = R_{f_2} + \frac{L_f}{R_{f_1} - R_{f_2}} (f_{p_2} - z), \tag{7}$$

3) $z > f_{p_2}$ 锥形粉流区

在此区间,聚焦后的粉末流开始发散,形成发散角为 β 的圆锥形粉流。

$$C(z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p \left(z \frac{R_{f_2}}{f_{p_2}} \right)^2}, \tag{8}$$

由此给出粉末流沿粉嘴中心轴线的浓度分布曲线,如图 4 所示。可以看出,粉末流场浓度分布是送粉嘴几何参数($r, \omega, \phi, \theta, \alpha$)、送粉工艺参数(粉末流质量流率 M_p , 流速 V_p) 和粉末流轴向距离 z 的函数。

经优化的激光同轴送粉嘴参数为: $r = 3 \text{ mm}$,

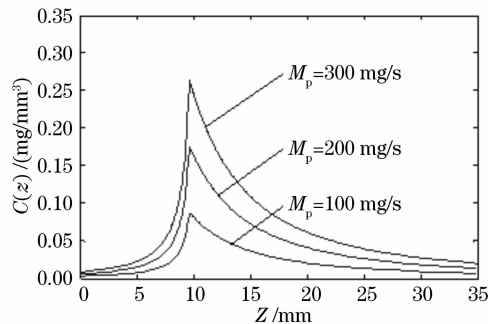


图 4 沿 z 轴方向不同 M_p 下的粉末流浓度分布

Fig. 4 Concentration distribution of powder stream along z axis at different M_p

$\omega = 1.5 \text{ mm}, \alpha = 15^\circ, \phi = 25^\circ$ 。计算条件: 流速 $V_p = 1000 \text{ mm/s}$; 送粉量分别为 $M_p = 100 \text{ mg/s}, 200 \text{ mg/s}$ 和 300 mg/s 。从图 4 可以看出,在环状粉流区,从粉嘴出口原点开始沿 z 轴向下,粉末流浓度随着 z 增加由零逐渐增大;进入粉流聚焦区后,粉末流浓度在焦点处达到最大值。在粉末流聚焦后,进入发散的锥形聚焦区,粉末流浓度随着 z 增加而缓慢降低。粉末流质量流率 M_p 越大,对应的粉末流浓度也越大。

Lin Li 研究小组^[54]在不考虑外保护气流存在

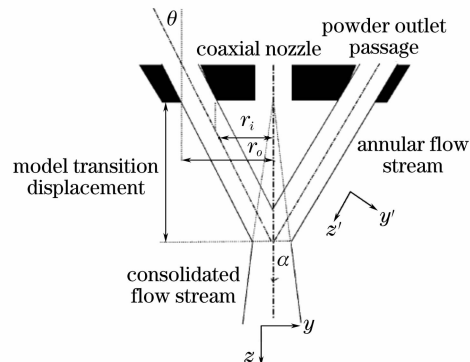


图 5 Lin Li 研究小组粉末流模型

Fig. 5 Physical model of powder stream by Lin Li group

条件下,在直角坐标系下建立了如图 5 所示的激光同轴送粉嘴物理模型。

由 Lin Li 小组的模型,可推导出粉末流浓度分布解析表达式。

粉末流交汇点前

$$C(y, z) = \frac{4m'}{Q\sqrt{\pi}\text{erf}[1]} \exp\left[-\frac{(r_i + r_o - 2y - 2z\tan\theta)^2}{(r_i - r_o)^2}\right], \quad (9)$$

粉末流交汇点

$$C\left(y, \frac{r_i + r_o}{\tan\theta}\right) = \frac{4m'}{Q\sqrt{\pi}\text{erf}[1]} \exp\left[-\frac{4y^2}{(r_i - r_o)^2}\right], \quad (10)$$

粉末流交汇点后

$$C^*(0, z) = \frac{2(r_i + r_o)m'}{\sqrt{\pi}\text{erf}[1]Qz\tan\theta}. \quad (11)$$

由(9)式~(11)式绘出粉末流沿粉嘴中心轴线浓度空间分布,如图 6 所示,得到了与杨洗陈小组相似的结果。

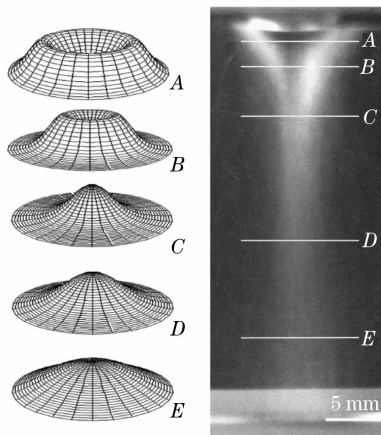


图 6 Lin Li 研究小组的粉末流沿粉嘴中心轴线浓度空间分布图

Fig. 6 Concentration distribution of powder stream along Z axis by Lin Li group

3 激光同轴送粉二相流动量和质量传输的数值模拟

3.1 两相流动量和质量传输的数值模拟模型

上述模型是在一级近似下建立的解析模型,虽然它形象直观给出了粉末流沿粉嘴中心轴线浓度场空间分布特征,但为了更精细研究激光同轴送粉中载流气体/金属粉末气粉两相流中动量和质量传输,必须建立基于 Navier-Stokes 方程组的流体动力学模型。W. W. Steen 小组^[20], Frank Liou 小组^[25]和杨洗陈小组^[40,49],分别建立了激光同轴送粉条件下载流气体

与粉末两相流的动量和质量传输的数值计算模型,三种数值计算模型都是基于欧拉两相流理论。为简化起见,仅对三种模型进行共同的综合介绍。

对气粉两相流的数值模型作如下假设:气流和金属粉流都视为连续流体;两相流互相共存以相同速度从粉嘴口输出;气粉之间不存在热量交换,所以能量方程可以忽略。

每一相的质量和动量守恒控制方程组可表示为气相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g \rho_g u_{gj}) = 0, \quad (12)$$

粉末颗粒相质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_s \rho_s u_{sj}) = 0, \quad (13)$$

气相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g \rho_g u_{gj} u_{gj}) = -\alpha_g \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \Delta \rho_g g_i, \quad (14)$$

粉末颗粒相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s u_{sj} u_{sj}) = \rho_s g_i, \quad (15)$$

式中下标 i, j 为坐标系的矢量方向;下标 g, s 为气、粉; α_g, α_s 为气粉两相的体积分数,且 $\alpha_g + \alpha_s = 1$; ρ_g, ρ_s 为气体密度和金属粉末颗粒密度; u_g, u_s 为气体和粉末颗粒的速度; p 为压力; g_i 为重力加速度; $\Delta \rho_g g_i$ 为考虑浮力影响的重力项; τ_{ji} 为气相的压力应变张量,可由(16)式给出

$$\tau_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{gj}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_{gj}}{\partial x_j} \delta_{ij}. \quad (16)$$

式中 μ 为流体动力黏性系数。

气/粉两相流的计算区域和边界条件如图 7 所示。在图 7 计算区域左、右和下三个边界上,气体压力 $p=0$ 。在上边界,即送粉喷嘴出口,在初始时刻载流气体和粉末粒子具有相同的流速:

$$u_g = u_s, \quad (17)$$

$$L = u_g S, \alpha_s = M_p / \rho_s u_s S,$$

式中 L 为气流量。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: $\alpha = 75^\circ$ 和 $\phi = 65^\circ$ 。粉嘴上下部分的高度分别为 15 mm 和 55 mm 。流场区域尺寸取 $80 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。

在粉嘴上半部内外壁

$$u_{sy} = u_{gy} = 0, \quad (18)$$

在粉嘴下半部外壁有(以右半粉嘴为例)

$$u_{sy} / u_{sr} = u_{gy} / u_{gr} = \tan \phi, \quad (19)$$

在粉嘴下半部内壁有

$$u_{sy} / u_{sr} = u_{gy} / u_{gr} = \tan \alpha, \quad (20)$$

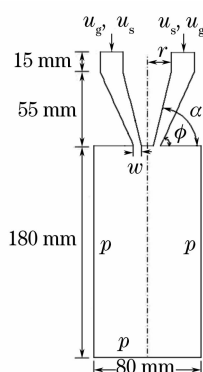


图 7 同轴粉嘴气粉两相流计算域和边界条件

Fig. 7 Computing region and boundary conditions in two phase stream

式中 u_{sx}, u_{sy} 分别为粉末粒子速度的纵横分量; u_{gx}, u_{gy} 分别为载流气体速度的纵横分量。

3.2 计算模拟方法及软件开发

采用有限元方法进行计算模拟。以流体力学通用软件 FLUENT 6.0 为基础,求解每一相的动量方程及连续性方程。网格的选取对提高计算精度很重要。在使用 FLUENT 软件中有两种网格划分方法。对无边界或曲线的简单区域,可以采用笛卡儿坐标系;反之,采用体拟和坐标(BFC)格点系统。计算中可利用 FLUENT 程序并根据收敛余数来检查网格生成的正确可用性。应该指出:根据多流体模型理论,控制体的尺寸 l 应远远小于流场计算域流场几何尺寸 L ,但同时应远远大于颗粒尺寸 D_p ,即 $D_p \ll l \ll L$,仅在这一条件下控制体才具有宏观流场中微体的性质,控制体中各变量的当地值才能表达流场的宏观性质,而不是反映每一颗粒周围的流场细节。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 mm^2 ,最小单元面积为 0.8824 mm^2 。通过 2230 次迭代而收敛。考虑这一条件网格划分如图 8 所示。

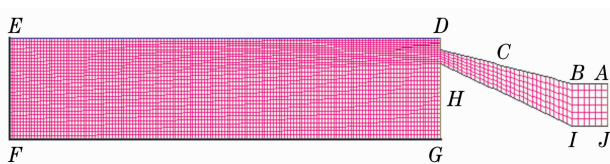


图 8 粉末流场的网格划分

Fig. 8 Grid selection for different computation domains

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 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 $\rho_s=8314 \text{ kg/m}^3$ 。 u_{sx}, u_{sy} 分别为粉末粒子速度的纵横分量, u_{gx}, u_{gy} 分别为载流气体速度的纵横分量,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 $L=406.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,送粉量为 $M_p=6.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 。

3.3 浓度场分布的数值模拟结果

杨洗陈小组^[49]给出了沿送粉嘴中心轴线上粉末流浓度场分布的数值模拟结果,如图 9 和图 10 所示。

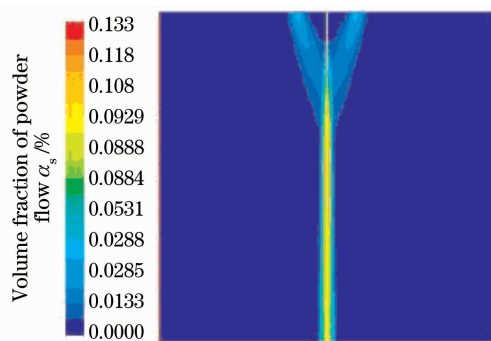


图 9 粉末流浓度场数值模拟结果

Fig. 9 Concentration distribution of powder stream by numerical simulation

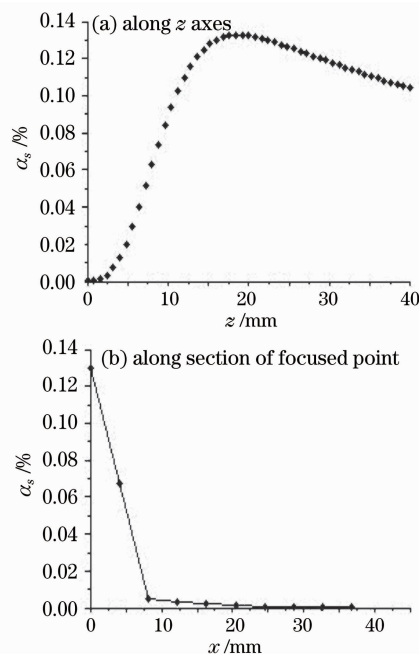


图 10 计算机数值计算的粉末流浓度分布曲线。

(a) 沿中心轴线; (b) 沿焦点横截面

Fig. 10 Concentration distribution curves of powder stream by numerical simulation. (a) along z axes, (b) along section of focused point

由图 9 可以看出:在同轴送粉喷嘴出口口是环状粉流区,粉末浓度为零;之后粉末流浓度逐渐增加,在粉末流焦点区达到最大,之后随着粉末流的发散粉末流浓度又逐渐变小。图 10(a)为沿送粉嘴中心轴线上粉末流浓度分布的数值计算的体积分数曲线。算得粉末流上焦点位于 15.8 mm,下焦点位于 20.6 mm,聚焦深约为 5 mm。图 10(b)为采用计算机数值模拟得到的金属粉末流焦点横截面上的浓度分布,其位置在焦长为 16 mm 处。在焦点中心位置粉末流的体积分数达到最大值,粉末流聚焦直径大约为 1.7 mm。远离焦点中心,体积分数逐渐递减,而且在粉末聚焦区边界处,体积分数突然减小到零。

3.4 速度场分布的数值模拟结果

图 11 为杨洗陈小组^[40]计算机模拟的沿粉末流中心纵向截面速度矢量场分布图。获得了与几何模型基本一致的结果,可以清楚地显示出粉末流中存在三个粉流区:环状区、焦柱区和锥状发散区。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,粉末流的速度骤然增大。两股流体在出口下方附近相遇,形成粉末流的焦点。由于碰撞互相抵消了对方的水平速度,在重力和气流推力共同作用下粉末流向喷射,但仍呈现层流特征。焦点下方,由于碰撞,粉末流呈现一定的发散,粉末粒子速度逐渐递增。在粉嘴外靠近粉末流体边界,由于环境气体的阻力作用,粉末粒子速率明显低于中心处的粒子。

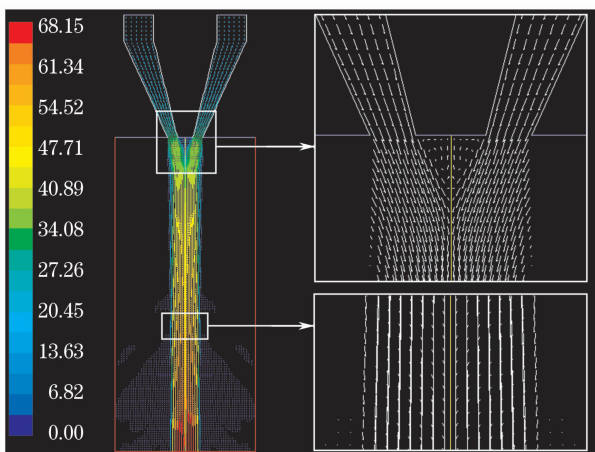


图 11 计算机模拟的沿粉末流中心纵向截面速度矢量场分布图

Fig. 11 Velocity vector field distribution of powder stream along z axes by numerical simulation

图 12 为计算机计算的沿粉末流中心纵向轴线上粉末流速度分布曲线。可以看出,在中心轴线上,

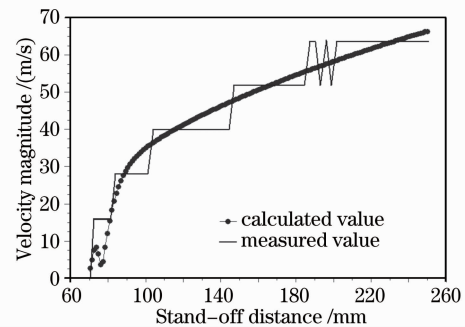


图 12 沿中心纵向轴线上粉末流速度分布曲线

Fig. 12 Velocity distribution curves of powder stream in z axes by numerical simulation

粉嘴出口处粉末流速度为零,以后速度增大到粉末流上焦点处有出现一个下降后反弹。在交汇处粒子速度先呈现一个小的增大—减小过程,这由于两股流体在粉嘴外交汇时产生了涡流,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。焦点过后,在重力和气流的加速作用下,粉末流速度急剧增大;大约在粉嘴下方 100 mm 之后,粉末流速度增加近似于单调线性变化。图 13 为沿焦点水平方向计算机计算的金属粉末流速度分布曲线。可以看出,在焦点中心附近的速度达到最大;随着接近气固两相流的自由边界,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。

3.5 粉嘴几何参数的影响

Frank Liou 小组^[25]研究了粉嘴几何参数对浓度场和速度场的影响。两组粉嘴倾斜角分别选择为 $\alpha=60^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$, 每组粉嘴各有三种不同的粉嘴宽度和高度几何配置,如图 14 所示。

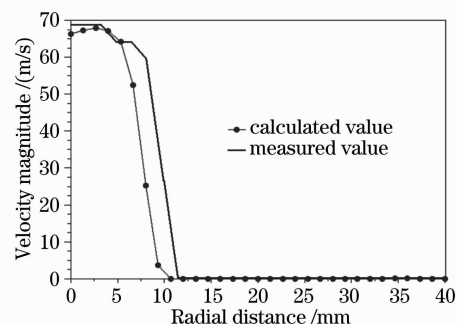


图 13 沿焦点水平方向金属粉末流速度分布曲线

Fig. 13 Velocity distribution curves of powder stream in focused section by numerical simulation

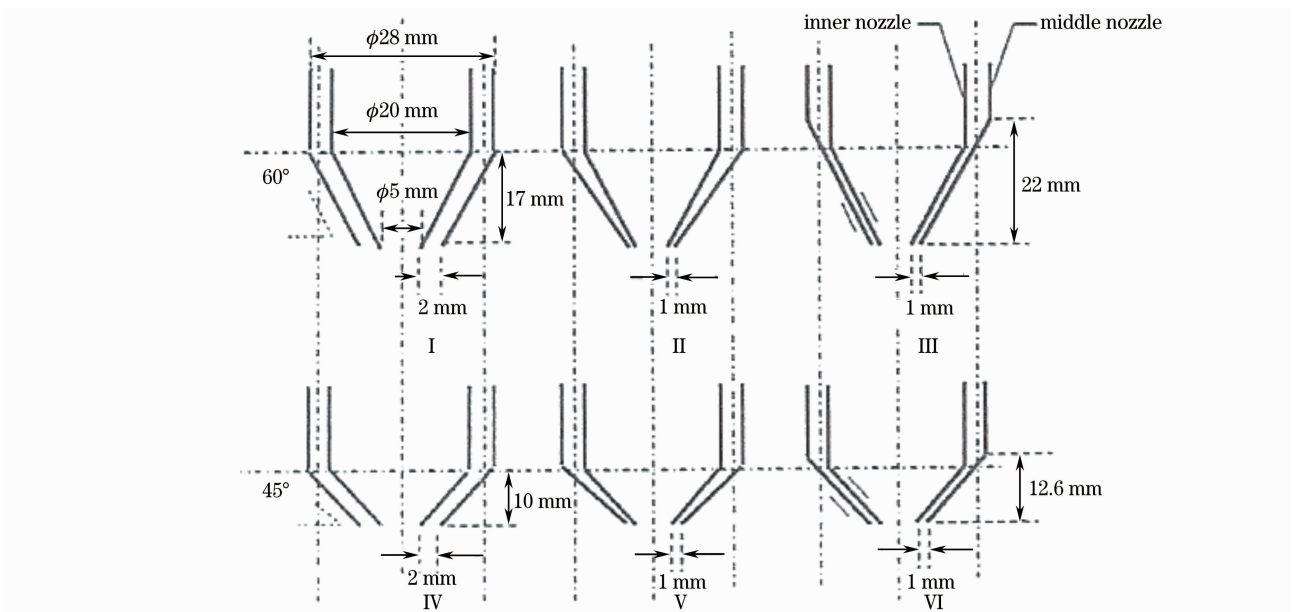


图 14 6 种不同几何配置粉嘴

Fig. 14 Six kinds of geometrical constructure of laser coaxial powder nozzle

图 15 是 6 种不同几何配置粉嘴的粉末流浓度场分布的数值模拟结果。上列为倾斜角为 $\alpha=60^\circ$ 的三种粉嘴 (I, II, III), 下列为倾斜角为 $\alpha=45^\circ$ 的三种粉嘴 (IV, V, VI)。图 16 是 6 种不同几何配置粉嘴的粉末流浓度沿中心纵向轴线上分布曲线。可以看出, 粉嘴倾斜角对粉末流焦点影响很大, 粉嘴倾斜角越大, 粉末流焦点越下移。图 16(c) 表明 $\alpha=45^\circ$ 粉嘴焦点位于 5 mm, $\alpha=60^\circ$ 粉嘴焦点位于 8 mm, 焦

点越下移 3 mm。图 16(a) 和 (b) 表明: 在粉嘴倾斜角和粉末焦点高度相同条件下, 粉嘴宽度对粉末流焦点浓度影响很大, 当粉嘴宽度从 1 mm 变为 2 mm, 粉末流的焦点体积分数增大 30%~50%; 在粉嘴倾斜角和粉嘴宽度相同条件下, 粉末流焦点高度对粉末流焦点浓度影响也很大, 当粉末流焦点高度从 17 mm 变为 22 mm, 粉末流的焦点体积分数增大 20%。

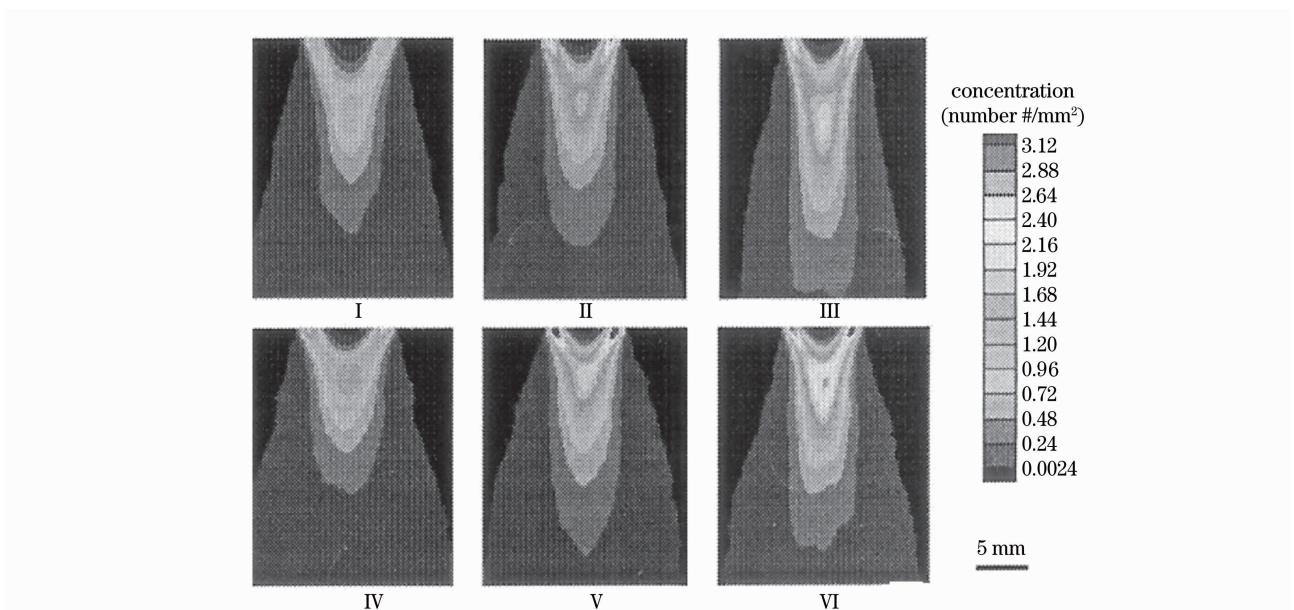


图 15 6 种不同几何配置粉嘴的粉末流浓度场分布的数值模拟结果

Fig. 15 Concentration distribution of powder stream for six nozzles by numerical simulation

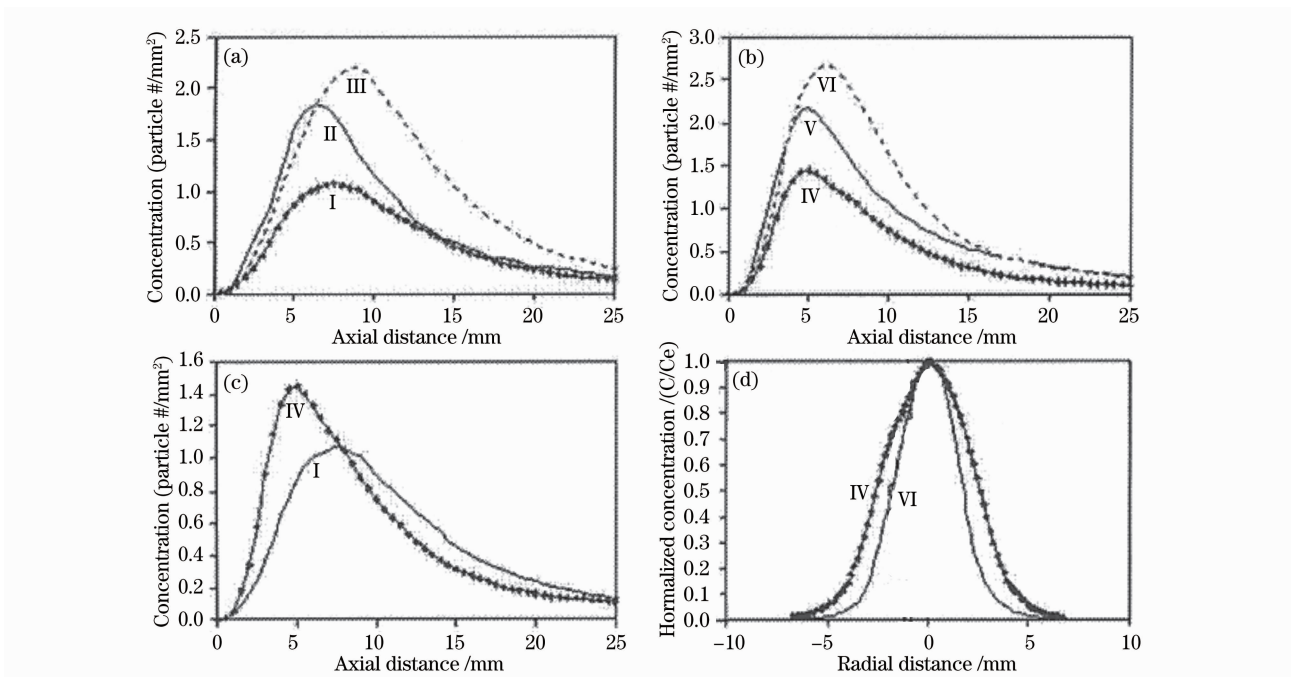


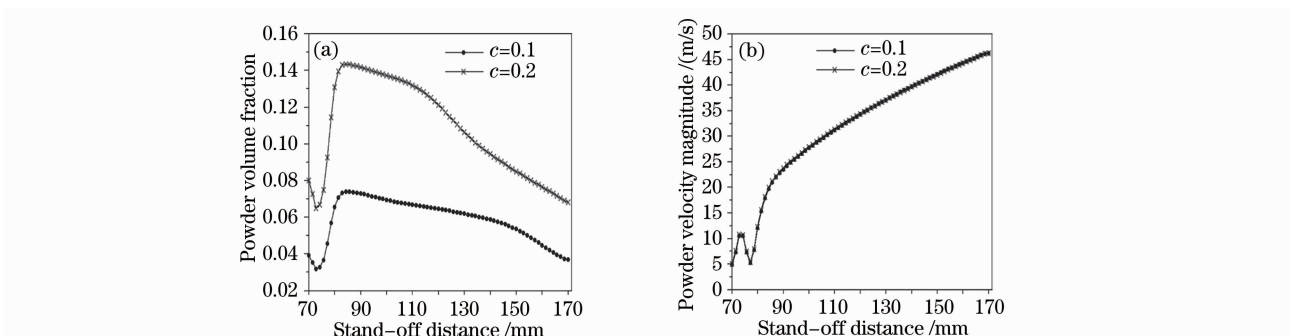
图 16 6 种不同几何配置粉嘴的粉末流浓度沿中心纵向轴线上分布曲线

Fig. 16 Concentration distribution curves of powder stream in z axes for 6 nozzles

3.6 送粉工作参数的影响

杨洗陈小组^[38]研究了送粉工作参数送粉量 M_p 和载气流量对浓度场和速度场的影响。图 17(a) 和 (b) 分别是不同送粉量 M_p 对粉末流浓度场分布和速度场分布的影响曲线。计算条件如下: 粉嘴几何参数取为宽度 $w=1$ mm, 粉嘴倾角 $\alpha=82^\circ$ 和 $\phi=68.5^\circ$, 粉末流初始气体流速度取为 3 m/s。粉末流中粉末初始浓度的体积分数分别取为 0.1, 0.2。可以看出: 送粉量 M_p 对粉末流浓度分布影响很大, 粉末初始浓度 0.2 的焦点是粉末初始浓度 0.1 的 2 倍。但是送粉量 M_p 对粉末流速度分布影响很小, 粉末初始浓度 0.2 和 0.1 的二者速度分布几乎没有变化。

图 18(a) 和 (b) 分别是不同载气流量 (粉末流速 $u=3$ m/s, $u=6$ m/s) 对粉末流浓度场分布和速度场分布的影响曲线。计算条件如下: 粉嘴几何参数取为宽度 $w=1$ mm, 粉嘴倾角 $\alpha=82^\circ$ 和 $\phi=68.5^\circ$ 。粉末初始浓度的体积分数取为 0.1。可以看出: 载气流量即初始粉末流速对浓度分布是有影响的, 粉末流速增大可使粉末流的焦距变长向下移动, $u=6$ m/s 的焦点比 $u=3$ m/s 后移约 4 mm; 而粉末流速增大可使焦点浓度有所增高。载气流量即初始粉末流速对速度分布的影响比较显著, 在整个流场内, 载气流量即初始粉末流速 $u=6$ m/s 的速度值几乎是 $u=3$ m/s 的 2 倍。

图 17 送粉量 M_p 对粉末流浓度场分布 (a) 和速度场分布 (b) 的影响曲线Fig. 17 Concentration curves (a) and velocity curves (b) of powder stream in z axes at different M_p

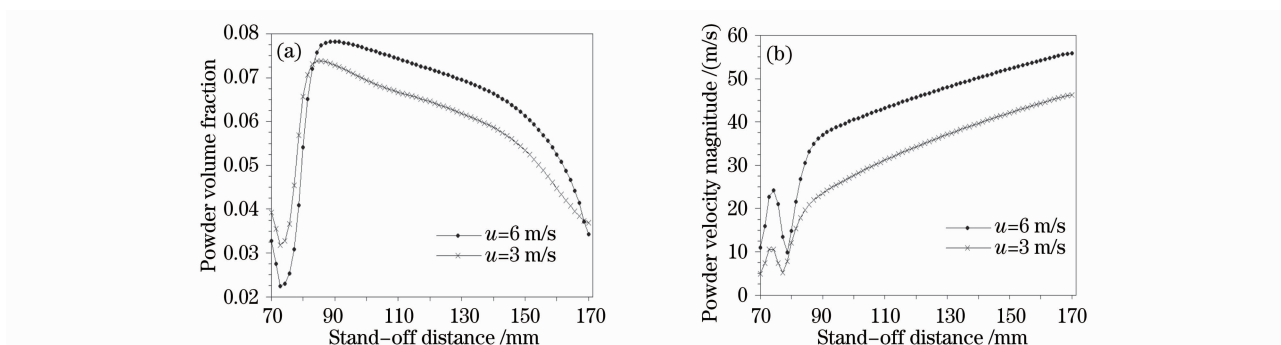


图 18 不同载气流量下粉末流浓度场分布(a)和速度场分布(b)曲线

Fig. 18 Concentration curves (a) and velocity curves (b) of powder stream in z axes at $u=3$ m/s and $u=6$ m/s

4 激光同轴送粉二相流速度场和浓度场检测技术

在激光同轴送粉中,由载流气体和金属粉末粒子构成的气粉两相流的粒子数量众多、尺寸很小且流速很高,其浓度场和速度场的检测具有较大的挑战性。国内外曾采用多种方法进行检测,如陈静等^[18]采用的高速摄影法,Massah等^[14]和Fan等^[55]采用激光多普勒测速仪(LDA)法等。但这些方法的共同缺点:只能获得空间单点或多点信息,不能提供整个流场的瞬时信息。W. W. Steen小组^[19~23], Frank Liou小组^[24~26]和Lin Li小组^[54]分别开发了一种简易的粉末流浓度场的观测方法;其中Lin Li小组选择了一种碘钨灯作为照明光源, W. W. Steen小组^[19~23]和 Frank Liou小组^[24~26]都选择了一种激光二极管(LD)作为照明光源,采用CCD数字相机直接拍摄粉末流图像。这种简易的观测方法虽然成本相对较低,但缺乏双曝光功能,粒子图像所含信息仅能用于粉末流浓度场的观测,不能实现粉末流浓度场和速度场的计算重建。随着流体动力学PIV粒子图像检测技术的发展,杨洗陈小组采用Nd⁺:YAG双脉冲激光器作为照明光源,开发了一种DPIV数字粒子检测系统,它与CCD高速数字相机同步瞬时拍摄,能同时捕捉粉末流场的三维信息,同时测量金属粉末流的浓度场和速度场,经数字图像处理,粒子图像高清真实,能实现粉末流的浓度场和速度场的重建。不仅给出粉末流的聚焦参数和三维空间分布,还可以用来评价同轴粉咀的性能和工艺状态;检测速度快,属非接触测量;进一步发展后,有望成为激光制造中的一个有用器件。这种检测技术主要包括三大部分:用于照明粉末流的高亮光源,CCD高速数字相机,计算机数字图像处理系统。为简化起见,下面重点介绍杨洗陈小组

DPIV数字图像检测工作^[27~52]。

4.1 DPIV检测原理及试验装置

DPIV数字图像系统检测金属粉末流浓度场的主要原理如下:Nd⁺:YAG激光经过柱面镜组转换为二维片光源,照亮由同轴送粉咀输出的金属粉末流。高速跨帧CCD相机拍得金属粉末流照片,经过数字图像处理卡输入到计算机,由专用软件进行处理。图19是粉末流浓度场和速度场检测试验装置照片。

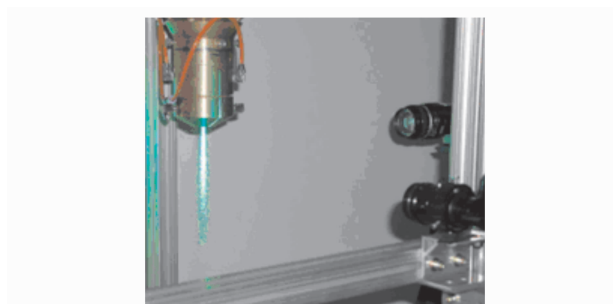


图 19 粉末流浓度场和速度场检测 DPIV 试验装置

Fig. 19 DPIV experimental set up for measuring concentration and velocity fields of powder stream

DPIV数字粒子检测系统组成如下:

1) 双路Nd⁺:YAG脉冲激光器:光束直径7 mm,波长532 nm的脉冲相干激光,激光脉冲间隔 Δt 根据粉末流速、激光光强和摄像方位进行调整,可调范围为200 ns~0.5 s。脉冲重复频率为10 Hz,脉冲持续时间为10 ns,单脉冲能量可达到300 mJ。

2) 照明片光源:激光经过导光臂以及片光源透镜组形成片光源,光强足以保证粒子能被清晰拍摄为宜,片光厚度约1 mm。

3) CCD相机:双曝光功能的跨帧CCD相机,1018 pixel×1008 pixel,图像采集频率为30 Hz。

4) 同步器:同步系统产生信号,控制激光与相

机同步工作。

5) 分析显示系统:包括图像分析处理硬件和软件。自主开发了基于 Visual C++ 6.0 可视化图像计算处理软件,包括图像显示、预处理、图像处理、浓度场显示等几部分。

4.2 粉末流速度场和浓度场的重建方法

采用图像处理方法和自相关算法,进行粉末流速度场和浓度场的重建,如图 20 所示。

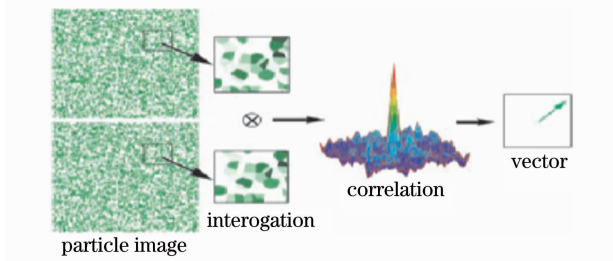


图 20 DPIV 自相关算法重建粉末流速度场和浓度场
Fig. 20 Cross correlation algorithm for reconstruction concentration and velocity fields of powder stream by DPIV

粉末流速度场和浓度场的重建方法如下:

1) 图像灰度化:使用 Mathematica5.0 软件将 CCD 相机拍摄的相隔 $\Delta t(1 \mu s)$ 的两幅流场二维图像,转化为灰度矩阵。

2) 图像分割:将灰度矩阵均匀划分为个子矩阵,每个子矩阵为阶矩阵。

3) 图像搜寻:对前一幅图片中的一个子矩阵,在后一幅图所有阶数的子矩阵中寻找一个和它具有最大相关系数的子矩阵。

4) 速度场重建:将这两个子矩阵的首元素所分别对应的在母矩阵中位置向量的差,视为同一目标粒子群的位移矢量,除以两次拍照的时间间隔,获得这一区域速度矢量的近似值。

5) 浓度场重建:以粉末流的体积分数表示其浓度,测得微区当地流速后,即可算出微区当地相对浓度。

4.3 粉末流浓度场 DPIV 检测结果

图 21(a)是采用 DPIV 技术得到的金属粉末流中心纵截面浓度场图像,图 21(b)为粉末流焦点处放大图像。将图 21 与图 1 和图 6 进行比较可以看出,在图 1 和图 6 中 CCD 相机直接拍摄的粉末流图像,只能显示粉末流整体轮廓,不能显示金属粉末粒子;而 DPIV 数字图像技术可以清晰地显示金属粉末粒子瞬态分布,明显地显现了三个粉流区:环状区、焦柱区和锥状发散区。由图 21 可测得粉末流参

数:上发散角 $\theta_1 = 5^\circ$,下发散角 $\theta_2 = 15^\circ$,上焦点 $f_{p_1} = 9.11 \text{ mm}$,下焦点 $f_{p_2} = 12.38 \text{ mm}$;与理论模型数据($\theta_1 = 3^\circ, \theta_2 = 12^\circ, f_{p_2} = 11.14 \text{ mm}$)比较,可以看出 DPIV 技术具有良好的检测精度。

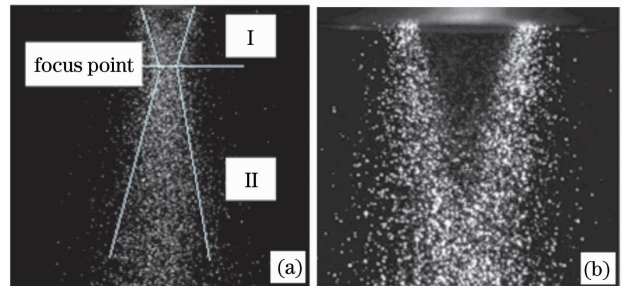


图 21 粉末流中心纵截面浓度场 DPIV 图像
Fig. 21 Images of concentration field of powder stream along Z axes by DPIV

图 22 为 DPIV 测得的粉末流沿中心轴线方向上的相对浓度分布。在环状区中心轴线上从出口到焦点粉流浓度由零逐渐增大,一直到焦柱粉流区,金属粉末浓度达到最大,之后随着粉末流的发散,金属粉末流浓度逐渐降低。与图 10 对比可以看出, DPIV 测得的金属粉末流沿同轴粉咀中心轴线的浓度分布和理论模型计算结果基本一致。

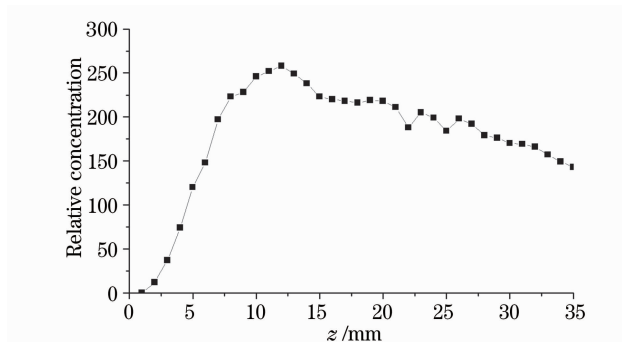


图 22 DPIV 实验中测得的粉末流沿中心轴线上的浓度分布
Fig. 22 Concentration distribution of powder stream along z axes by DPIV

粉末流焦点横截面浓度场分布:为检测金属粉末流横截面浓度场,CCD 相机拍摄角度和粉末流中

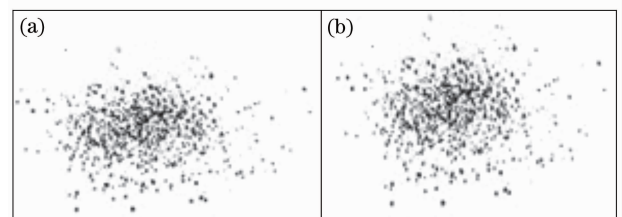


图 23 校正前(a)和后(b)的粉末流横截面浓度场 DPIV 图像
Fig. 23 DPIV images of concentration distribution of powder stream before correction (a) and after correction (b)

心应呈 45° 夹角, 因而拍摄得到的图像会产生畸变, 需要进行标定校正。图 23 为校正前和校正后的金属粉末流焦点横截面浓度场 DPIV 图像。

经过专用图像处理软件处理后, 校正后的金属粉末流图像便可以转换为二维和三维等浓度场图形

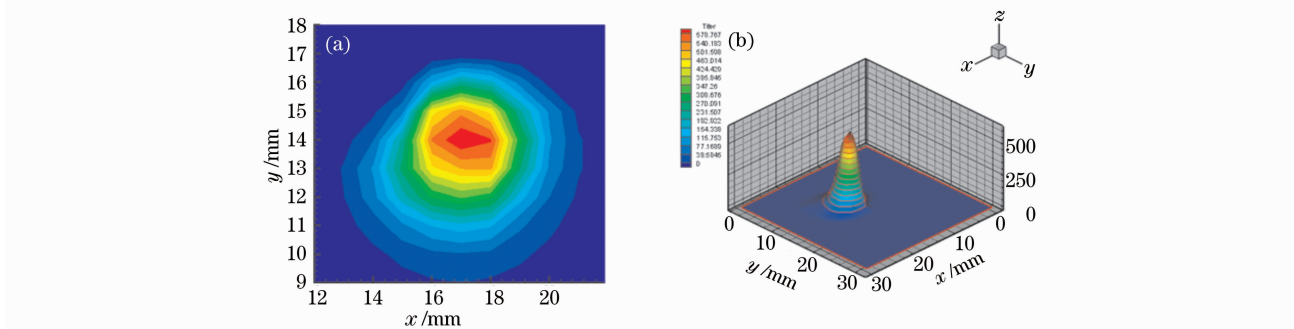


图 24 粉末流焦点处横截面的等浓度分布。(a)二维, (b)三维

Fig. 24 Isoconcentration distribution of powder stream in cross section of focused point. (a) 2D, (b) 3D

图 25 是 DPIV 测得的金属粉末流焦点横截面浓度分布曲线。与图 10 对比, 可以看出 DPIV 测得的金属粉末流浓度分布和理论计算模型二者结果基本一致。

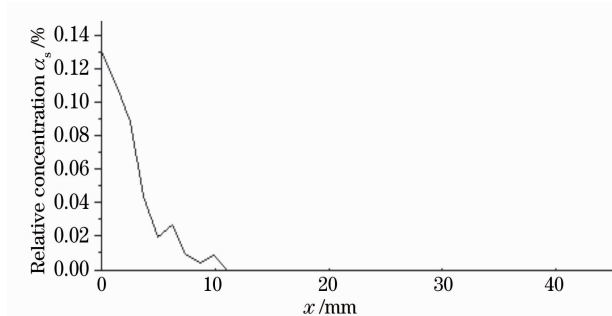


图 25 粉末流焦点横截面 DPIV 浓度分布曲线

Fig. 25 Concentration distribution curve of powder stream in cross section of focused point by DPIV

4.4 不同送粉参数下粉末流浓度场 DPIV 图像

图 26~图 28 分别为在送粉量 500 mg/s , 300 mg/s , 150 mg/s 下的 DPIV 测得的粉末流图像, 气流速度分别为 0.8 m/s , 1.0 m/s , 2 m/s , 3 m/s 和 6 m/s 。从图 26~图 28 可以看出: 在送粉量相同条件下,

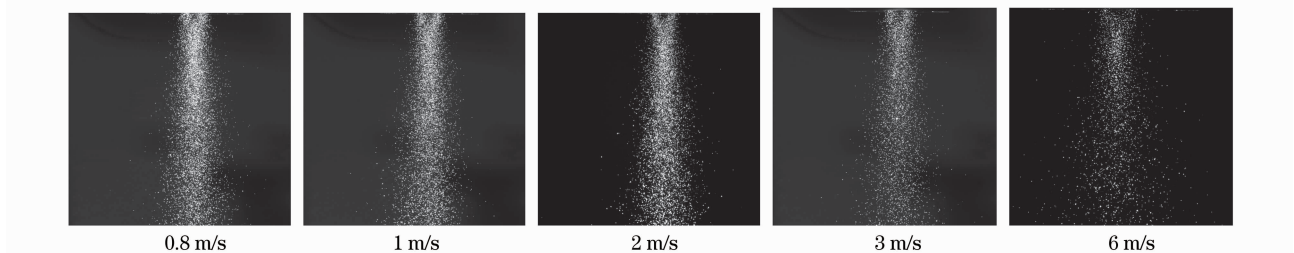


图 26 送粉量 500 mg/s 时在不同气流速度下粉末流浓度场 DPIV 图像

Fig. 26 DPIV images of powder stream concentration in different flow velocities at 500 mg/s

分布, 如图 24 所示。可以看出, 金属粉末流浓度场分布与高斯分布相似, 而 TEM_{00} 模 CO_2 激光光斑也呈现高斯分布, 这样金属粉末流场可以和 TEM_{00} 模 CO_2 激光产生良好的耦合。

随着气流速度的增大, 粉末流变得越来越稀薄, 粉末流浓度越来越小; 在气流速度相同条件下, 随着送粉量的减少, 粉末流变得越来越稀薄, 粉末流浓度越来越小。

4.5 粉末流速度场 DPIV 检测结果

图 29 为在粉嘴中心纵截面上 DPIV 检测的粉末流速度场分布图(a)和流线矢量族(b)。(a)图用以显示粒子运动速度大小, (b)图用以显示粒子运动轨迹。(a)图和(b)图可以清楚地显示出粉末流三个不同的速度分布区形貌: 粉嘴附近显示粒子速度很低, 流线矢量族从粉嘴出口相下中心聚拢, 对应环状分流区。在 $z=12\sim 17 \text{ mm}$ 区域速度值变大, 但变化比较平稳, 说明该区域有一定的碰撞, 且流线矢量族聚拢成平行线, 因而清楚表明此区为粉末流聚焦柱区; 在 $z=17\sim 45 \text{ mm}$ 区, 随着距离出粉口中心线越远, 粒子运动速度急剧增大, 越往下变得越快; 流线矢量族开始出现向下发散, 显然对应粉末流聚焦锥状区。由图可以得到粉末流聚焦参数如下: 聚焦柱长 4.65 mm , 焦点半径 3.83 mm , 上发散角 9.43° , 下发散角 3.19° 。

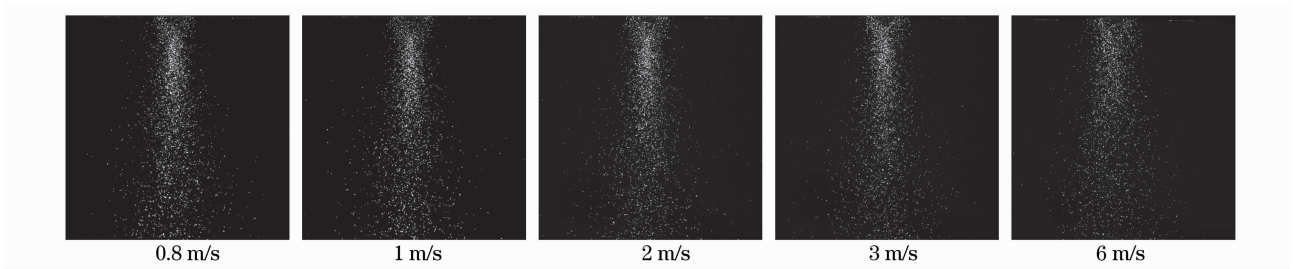


图 27 送粉量 300 mg/s 时在不同气流速度下粉末流浓度场 DPIV 图像

Fig. 27 DPIV images of powder stream concentration in different flow velocities at 300 mg/s

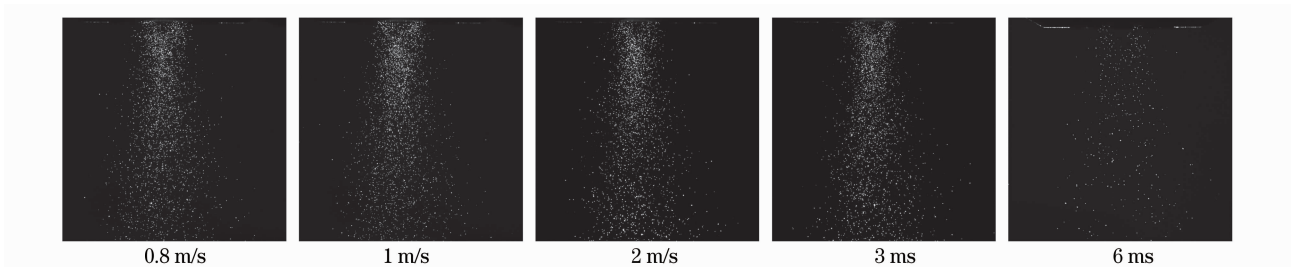


图 28 送粉量 150 mg/s 时在不同气流速度下粉末流浓度场 DPIV 图像

Fig. 28 DPIV images of powder stream concentration in different flow velocities at 150 mg/s

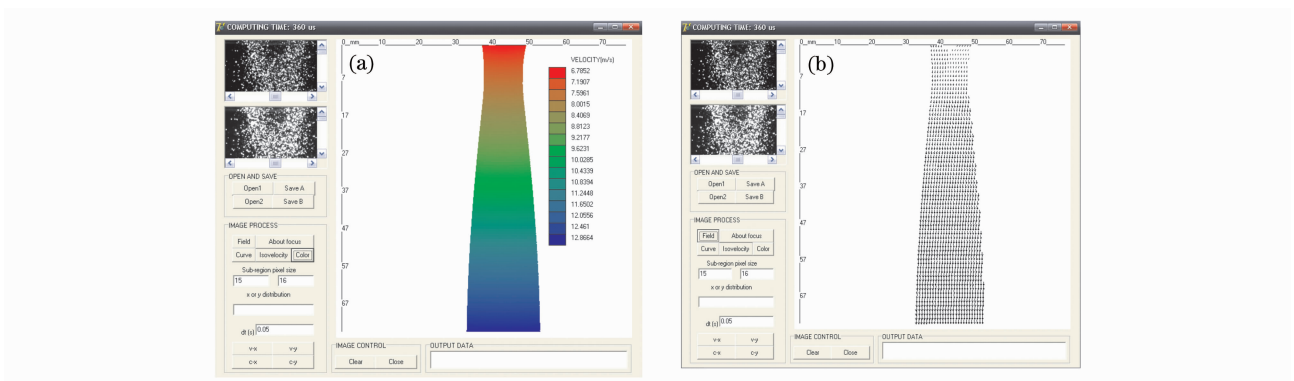


图 29 沿粉嘴 z 轴粉末流速度场 DPIV 图像(a)和流线矢量簇(b)

Fig. 29 Velocity field distribution of powder stream along z axes of nozzle from DPIV images (a) and flowline vector cluster (b)

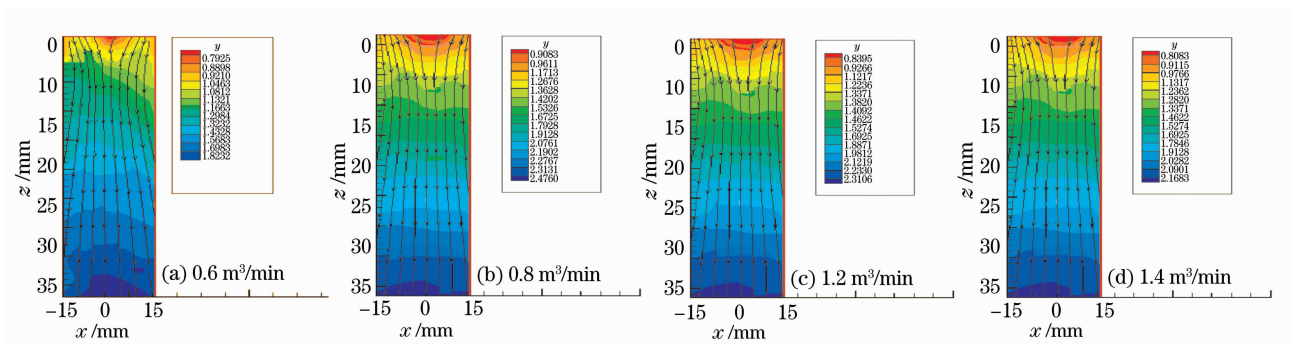


图 30 不同气流下 DPIV 检测的沿粉嘴 z 轴粉末流速度场分布

Fig. 30 Velocity field distribution of powder stream along z axes of nozzle from DPIV at different flow velocities

4.6 不同送粉参数下粉末流速度场 DPIV 图像

图 30(a)~(d)为在粉嘴中心纵截面上 DPIV 检测的粉末流速度场分布。试验条件:在相同粉末粒子

送粉量 $M_p = 0.67 \text{ g/s}$ 下,气体流量分别为 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$, $0.8 \text{ m}^3/\text{min}$, $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 和 $1.4 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

可以看出,在中心纵截面上,粒子流的速度值随

气体流量的增大而增加。在 $z=32$ mm 处, 气体流量为 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$, 对应速度为 1.82 m/s ; 气体流量为 $0.8 \text{ m}^3/\text{min}$, 对应速度为 2.16 m/s ; 气体流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$, 对应速度为 2.31 m/s ; 气体流量为 $1.4 \text{ m}^3/\text{min}$, 对应速度为 2.47 m/s 。显然由于气体流量的增加, 气相动能增加, 带动粉末粒子速度的增加。对于任一横截面, 其中心处的速度最大; 距离中心线 ($x=0$) 越远, 粒子速度变化越大。其原因是两相流出口的倾斜, 流动速度增大后, 该角度引起的汇聚以及粒子间碰撞等物理现象更加突出。由于粒子速度区别较大, 汇聚发散区别比较明显。但总体看粉末粒子基本落入加工区域。

5 结 论

根据国内外进展综合报道, 在激光同轴送粉中金属粉末流/载流气体两相流动量和质量传输研究方面, 已取得以下几点进展:

1) 建立了激光同轴送粉粉末流的物理模型, 给出同轴送粉粉末流解析表达式, 定义粉末流聚焦参数, 能形象直观地描述同轴送粉中粉末流三区分布特征。

2) 基于气/固两相流理论, 建立了激光同轴送粉中金属粉末流/载流气体两相流动量和质量传输数值模拟模型, 开发了专用模拟软件, 并对浓度场和速度场进行了计算机模拟。数值模拟能给出粉末流物理场分布(浓度场、速度场、温度场)与激光参数(功率、波长、模式、聚焦性能)、粉嘴设计参数(几何尺寸、聚焦性能)和激光熔覆工艺参数(功率、送粉量、气流量)相互作用关系。数值模拟的结果对基于同轴送粉的激光制造具有指导作用。

3) 基于数字粒子图像检测技术的 DPIV 方法, 是激光同轴送粉中粉末流浓度场和速度场中较先进的检测技术, 检测速度快, 非接触测量, 能同时捕捉粉末流场的三维信息, 给出粉末流的聚焦参数和三维空间分布, 可以用来评价同轴粉嘴的性能和工艺状态。进一步发展后, 有望成为激光制造中的一个有用器件。

为了将这些成果用于激光直接制造和再制造生产实际, 实现产业化, 需要进一步做如下发展工作:

1) 完善数值模拟方法, 编制专用的激光同轴送粉制造物理过程仿真软件, 做到实用化、系列化、模块化和工程化。

2) 继续探索检测方法, 完善基于数字粒子图像检测技术的 DPIV 方法。结合近年来快速发展的

光纤激光超短脉冲技术, LD 脉冲技术, CCD 智能相机技术和数字粒子图像技术, 开发出小型化商品化的在线检测和控制系統。

3) 该项研究目前多半是由物理学和材料学专业人员在实验室完成的, 为实现产品化, 需要有计算机、自动化、测控和激光精仪等专业技术人员和企业参加。

参 考 文 献

- 1 W. W. Steen, M. A. McLean, G. J. Shannon. Shaping by laser cladding [C]. *Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE '97*, 1997. 115~127
- 2 D. M. Keicher, W. D. Miller, J. E. Smugersky *et al.*. Laser engineered net shaping (LENS+TMS) beyond rapid prototyping to direct fabrication [C]. *TMS Annual Meeting*, 1998. 369~377
- 3 J. O. Milewski, G. K. Lewis, D. J. Thoma *et al.*. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis power deposition [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1998, (75): 165~172
- 4 Jyoti Mazumder. Past present and future of art to part by direct metal deposition (CD-W0152_301) [C]. *Proc. 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*, Melbourne Australia, 2004. 11~19
- 5 Zhang Kuiwu. Industrial applications of laser clad and laser deposited metal parts and graded materials [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2002, 27(9): 1~4
张魁武. 国外激光熔覆应用和直接熔覆金属零件及梯度材料制造 [J]. *金属热处理*, 2002, 27(9): 1~4
- 6 Zhong Minlin, Yang Sen, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(4): 482~486
钟敏霖, 杨森, 刘文今等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器 [J]. *中国激光*, 2004, 31(4): 482~486
- 7 Li Yanmin, Li Jianguo, Yang Haiou *et al.*. Laser direct forming of metal components [J]. *Appl. Laser*, 2002, 22(2): 140~144
李延民, 李建国, 杨海欧等. 金属零件激光直接成形 [J]. *应用激光*, 2002, 22(2): 140~144
- 8 Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi *et al.*. Research on laser direct deposition of nickel base superalloy [J]. *J. Aeronautical Materials*, 2002, 22(1): 22~25
张永忠, 石力开, 章萍芝等. 激光快速成形镍基高温合金研究 [J]. *航空材料学报*, 2002, 22(1): 22~25
- 9 Deng Qilin, Hu Dejin. Rapid prototyping densified metal components by laser cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28(2): 33~38
邓琦林, 胡德金. 激光熔覆快速成型致密金属零件的试验研究 [J]. *金属热处理*, 2003, 28(2): 33~38
- 10 Ji Shengqin, Li Peng, Zeng Xiaoyan *et al.*. Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 130~132
姬生钦, 李鹏, 曾晓雁等. 激光熔覆直接制造金属零件的组织及力学性能分析 [J]. *激光技术*, 2006, 30(2): 130~132
- 11 Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application [J]. *Chinese Surface Engineering*, 2003, 16(4): 43~46
杨洗陈, 李会山, 刘云武等. 激光再制造技术及其工业应用 [J]. *中国表面工程*, 2003, 16(4): 43~46
- 12 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40

- (10): 53~57
 杨洗陈,李会山,王云山等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. 激光与光电子学进展, 2003, **40**(10): 53~57
- 13 M. Di. Angioletti, R. M. Tommaso, E. Nino *et al.*. Simultaneous visualization of flow field and evaluation of local heat transfer by transitional impinging Jets[J]. *International J. Mass Transfer*, 2003, **46**(10): 1703~1713
- 14 H. Massah, M. Shahnam, F. Shaffer *et al.*. A comparative application of a particle tracking velocity and laser doppler velocimetry for particle-wall collision measurements[J]. *FED (Am. Soc. Mech. Eng.)*, 1995, **218**: 145~150
- 15 Y. D. Thakar, H. Pan, F. Liou *et al.*. Numerical and experimental analysis of the powder flow streams in the laser aided material deposition process[C]. *Proc. 15th Conference on Solid Freeform Fabrication*, Austin, TXpp, 2004. 512~522
- 16 H. Pan, Y. D. Thakar, F. Liou. Numerical and experimental study of shielding gas orientation effects on particle stream concentration mode in coaxial laser aided material deposition Process[J]. *ASME International Design Engineering Technical Conferences DETC*, 2004-57049
- 17 G. Buresi, A. Talamelli, P. Petagna. Experimental characterization of the velocity field of a coaxial jet configuration [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1994, **9**(2): 135~146
- 18 Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(3): 442~446
 陈静,谭华,杨海欧等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 442~446
- 19 J. Lin, W. W. Steen. Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding[J]. *J. Laser Application*, 1998, **10**: 55~63
- 20 Lin Jehnming. Numerical simulation of the focused powderstreams in coaxial laser cladding [J]. *J. Material Processing Technology*, 2000, **105**(1~2): 17~23
- 21 Lin Jehnming. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 251~257
- 22 Lin Jehnming. Laser attenuation of the focused powder stream in coaxial laser cladding[J]. *Laser Applications*, 2000, **12**(1): 28~33
- 23 Liu Jichang, Li Lijun. Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(4): 287~292
- 24 Heng Pan, G. Robert Landers, Frank Liou. Dynamic modeling of powder delivery systems in gravity-fed powder feeders[J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2006, **128**(1): 337~345
- 25 Heng Pan, Todd Sparks, Yogesh Thakar *et al.*. The investigation of gravity-driven metal powder flow in coaxial nozzle for laser-aided direct metal deposition process [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2006, **128**(2): 541~553
- 26 J. Pinkerton, Andrew, Li Lin. Modeling powder concentration distribution from a coaxial deposition noddle for laser-based rapid tooling[J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**: 33~41
- 27 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu. Theoretic model and experimental evaluation of powder fluid in laser manufacturing (I): Research on the concentration field [C]. *Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005
- 28 Ji 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
- 29 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
- 30 Yang Xichen, Li Huishan, Lei Jianbo *et al.*. DPIV method of measurement of powder stream of co-axial feeding for laser manufacturing [C]. *International Society for Optical Engineering*, Bellingham, WA 98227-0010, United States, 2005, **5629**: 93~102
- 31 Yang Nan, Yang Xichen. A new algorithm on digital image processing tecnology 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
- 32 Yang Xichen, Wang Jianjun, Liu Yunwu *et al.*. Research on new coaxial feed laser cladding without carrying gas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 120~124
 杨洗陈,王建军,刘运武等. 非载气式激光同轴送粉试验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 120~124
- 33 Yang Xichen, Wang Yunshan, Lei Jianbo *et al.*. Laser re-fabricating of expensive parts of the equipment in oil-field on the sea [C]. *International Society for Optical Engineering*, Bellingham, WA 98227-0010, United States, 2005, **5629**: 23~31
- 34 Ji Xiaoshu, Yang Xichen. Directly rapid fabrication and refabrication of metallic components[J]. *Mathinery Design & Manufacture*, 2006, **6**: 96~98
 靳晓曙,杨洗陈. 金属零件的直接快速制造和再制造[J]. 机械设计与制造, 2006, **6**: 96~98
- 35 Ji Xiaoshu, Yang Xichen. Development of application software for laser direct manufacturing and re-manufacturing [J]. *Manufactuing Automation*, 2006, **28**(4): 18~23
 靳晓曙,杨洗陈. 激光直接制造和再制造技术应用软件开发[J]. 制造业自动化, 2006, **28**(4): 18~23
- 36 Feng Liwei, Yang Xichen. Experimental study of ultrafine powder-feeder for laser refabrication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(suppl.): 346~349
 冯立伟,杨洗陈. 激光再制造超细粉送粉器的试验研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(增刊): 346~349
- 37 Feng Liwei, Yang Xichen, Lei Jianbo *et al.*. Experimental study of double-hopper powder-feeder for laserrefabrication[J]. *Appl. Laser*, 2006, **26**(6): 389~392
 冯立伟,杨洗陈,雷剑波等. 激光再制造双料斗载气式送粉器的试验研究[J]. 应用激光, 2006, **26**(6): 389~392
- 38 Yang N., Yang X. C.. Powder flow field distribution with different parameters in coaxial laser cladding[C]. *Conference on Lasers in Material Processing and Manufacturing III*, Beijing: Lasers in Material Processing and Manufacturing, 2008. 1~9
- 39 Yang X. C., Wang Y., Yang N.. Ceramics reinforced metal base composite coatings produced by CO₂ laser cladding [C]. *Conference on Lasers in Material Processing and Manufacturing III*, Beijing: Lasers in Material Processing and Manufacturing III, 2008. 1~9
- 40 Yang Nan, Yang Xichen. Numerical simulation of flow 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
- 41 Yang Nan, Yang Xichen. A new algorithm on digital image processing tecnology 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

- 42 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction of metal powder particle and laser beam in laser cladding[J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, **28**(8): 1745~1750
杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1745~1750
- 43 Yang Nan, Yang Xichen. Digital image measurement of velocity field of powder fluid in laser manufacturing [J]. *J. Computational and Theoretical Nanoscience*, 2008, **5**: 1~4
- 44 Yang Xichen, Yang Nan. Numerical simulation of the concentration field of powder stream in coaxial laser cladding[J]. *J. Computational and Theoretical Nanoscience*, 2008, **5**: 5~9
- 45 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu. Theoretic model and experimental evaluation of powder fluid in laser manufacturing: research on the concentration field [C]. *Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005, Munich, Germany, 2005. 355~359
- 46 Yang Bo, Yang Xichen, Luo Tao. 3D-computer simulation of physical transfer process in laser molten pool[C]. *Proc. Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 2005, Munich, Germany, 385~388
- 47 Yang Nan, Yang Xichen. Digital image processing technology in powder stream field [C]. *Technology of Information OE and Photonics for the Academy Forum of Doctoral Candidates*, Beijing, 2006. 43~50
杨楠, 杨洗陈. 粉末流场的数字图像处理技术[C]. 北京: 光电子与信息技术全国博士生学术论坛论文集, 2006. 43~50
- 48 Yang Xichen, Yang Nan. Testing of velocity field of powder fluid in laser manufacturing[C]. *LAMP*, Japan, 2006. 16~19
- 49 Ji Xiaoshu, Yang Xichen. Computer simulation of the concentration fields of powder flow in laser manufacturing[C]. *LAMP*, Japan, 2006. 16~19
- 50 Yang Xichen, Ji Xiaoshu, Yang Nan. Physical simulation of the concentration field of powder stream in coaxial laser cladding[C]. *The 5th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS 2007)*, 2007
- 51 Yang Nan, Yang Xichen. Digital image measurement of velocity field of powder fluid in laser manufacturing [C]. *The 5th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS 2007)*, 2007
- 52 Yang Xichen, Yang Nan, Feng Liwei. New development of far distance coaxial powder feeding system[C]. *Proc. 3th Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics (PICALEO 2008)*, 2008
- 53 Yang Xichen, Jin Xiaoshu, Yang Nan. Numerical simulation of the concentration field of powder stream in coaxial laser cladding [J]. *Comput. Theor. Nanosci*, 2008, **5**(8)
- 54 A. J. Pinkerton, Li Lin. Modeling power concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling[J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**: 33~41
- 55 J. Fan, H. Zhao, K. Cen. An experimental study on two-phase turbulent coaxial jet[J]. *Exep. Fluids*, 1992, **13**(4): 279~287