

文章编号: 0258-7025(2006)07-0993-05

激光制造中金属粉末流浓度场的检测

杨洗陈, 雷剑波, 刘运武, 王云山

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 研究激光同轴送粉中金属粉末流场的分布特性,对指导激光制造技术应用具有直接指导意义。重点研究了激光制造中同轴送粉条件下金属粉末流的浓度场,建立了同轴送粉嘴金属粉末流的浓度场理论模型,开发了一种新型数字粒子图像检测系统检测粉末流浓度场。该系统主要包括 Nd³⁺:YAG 激光器和 CCD 相机。它具有非接触测量、检测速度快、能同时给出流场的三维信息等特点。实验结果表明,粉末流的聚焦参数和浓度场分布可以通过数字粒子图像检测技术进行检测,为指导同轴粉嘴设计和激光制造粉末流参数测定提供了新的手段。

关键词 激光技术;激光制造;粉末流;浓度场;数字粒子图像检测

中图分类号 TN 249;TG 665 **文献标识码** A

Experimental Measurement of Metal Powder Stream Concentration Field in Laser Manufacturing

YANG Xi-chen, LEI Jian-bo, LIU Yun-wu, WANG Yun-shan

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

Abstract The research on the distributions of metal powder stream from co-axial nozzle is very interested in laser manufacturing. The paper was focused in the concentration field of powder stream. Theoretic model of concentration field of powder stream from the co-axial nozzle has been established. A new digital particle image measurement technique has been developed to measure the concentration field of powder stream. The system mainly consists of Nd³⁺:YAG laser and charge coupled device (CCD) camera. It is shown that focus parameters and concentration distribution of powder stream can be measured by the technique. The system could be a useful device for laser manufacturing after further developed.

Key words laser technique; laser manufacturing; powder stream; concentration field; digital particle image measurement technique

1 引言

近年来,随着快速原型技术的发展,基于激光熔敷的激光快速制造技术和再制造技术在国内外受到广泛关注,已发展为激光直接制造三维金属实体零件和高精度修复再制造重大装备中贵重零部件的有效手段^[1~5]。然而,该项技术仍处在发展之中,激光制造中许多基础理论问题尚待深入研究^[6]。该项技术核心是激光同轴送粉熔敷。在激光制造过程中,高功率激光作用下的金属粉末流中存在能量、动量和质量输送物理过程,它们直接决定激光制造零件的尺寸、精度和性能。因此,深入开展激光同轴送粉

中金属粉末流的温度场、速度场和浓度场研究,不仅具有重要的科学价值,而且对激光制造技术和工业应用具有直接的指导作用。作为系列研究的一部分,本文重点报道激光同轴送粉中金属粉末流的浓度场。同轴粉嘴设计及性能测试已有初步报道^[7~10]。本文提出了一种新的数字粒子图像检测技术,不仅能用于测量金属粉末流的浓度场,而且还可以测量其速度场。

2 金属粉末流浓度场理论模型

2.1 金属粉末流的几何参数

同轴送粉嘴与金属粉末流的相互关系如图 1 所

收稿日期:2005-11-04;收到修改稿日期:2006-01-20

基金项目:国家自然科学基金(60478004)和天津市科委重点攻关项目(033188011)资助课题。

作者简介:杨洗陈(1941—),男,吉林省长春市人,天津工业大学激光技术研究所教授,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

示。为简化起见,对载流气体/金属粉末两相流运输的物理模型和送粉嘴的几何设计作如下假设:

1) 高功率聚焦的激光束从送粉头内嘴沿中心轴线 z 轴通过,在工件表面聚焦。

2) 金属粉末在送粉头雾化腔内与载流气体作用形成均匀雾化的气/固两相流,由粉末腔出口(内外嘴间)喷出,在 z 轴上聚焦,形成粉末流焦点。激光熔敷时,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,送粉嘴的几何形状为以 z 轴为中心的环状结构。而且粉嘴腔内外壁不平行。气/固两相流沿腔粉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,粉末流会产生发散,形成发散角,因而中心轴线上粉末流产生上、下焦点,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,金属粉末/载流气体两相流以相同的速度 $V_p = V_g$ 流出。令 L 为载气流量, S 为粉嘴出口截面积,则有 $L = V_p S$ 。因此,在下面讨论中,仅以 V_p 来表征粉末流浓度分布,而不用 L 。在粉腔内,气体和粉末的体积分数分别为 α_g 和 α_p ,且有 $\alpha_g + \alpha_p = 1$,令 ρ 为金属粉末比重, M_p 为粉末流质量流率(g/s),则 $\alpha_p = M_p / \rho V_p S$ 。

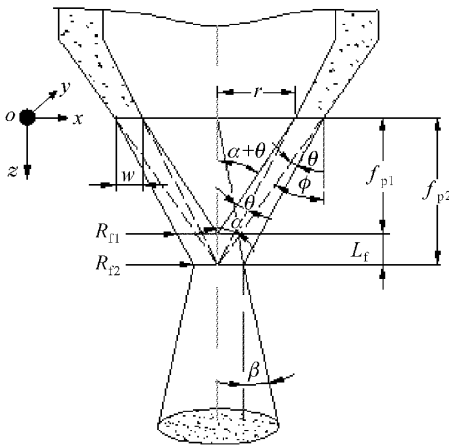


图 1 激光同轴送粉中粉末流与粉嘴的几何关系

Fig.1 Relationship of powder stream and nozzle in co-axial laser powder feeding

图 1 中 r 为粉嘴内壁半径, w 为粉嘴出口宽度, α 为粉腔内壁与中心轴线 z 的夹角, ϕ 为粉腔外壁与中心轴线 z 的夹角, 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_{p1} 为粉末流的上焦点位置, f_{p2} 为粉末流下焦点位置, R_{f1} 为粉末流上焦点半

径, R_{f2} 为粉末流下焦点半径, L_f 为粉末流焦距 ($f_{p2} - f_{p1}$), z 为环形粉嘴中心对称轴线。

从图 1 可以得出如下关系式

$$f_{p1} = \frac{r}{\tan(\theta + \alpha)}, \tag{1}$$

$$f_{p2} = \frac{r + w}{\tan(\phi - \theta)}, \tag{2}$$

$$L_f = f_{p2} - f_{p1} = \frac{r + w}{\tan\phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)}, \tag{3}$$

$$R_{f1} = (r + w) - f_{p1} \tan(\phi - \theta) = (r + w) - r \frac{\tan(\phi - \theta)}{\tan(\theta + \alpha)}, \tag{4}$$

$$R_{f2} = R_{f1} - L_f \tan(\phi - \theta) = R_{f1} - \left[\frac{r + w}{\tan\phi} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)} \right] \tan(\phi - \theta). \tag{5}$$

2.2 金属粉末流的浓度分布

2.2.1 $0 < Z < f_{p1}$ 环状粉流区 (Z 为粉末流的轴向距离)

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 $C(Z)$ 为粉末流浓度,则有

$$C(Z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p \{ [(r + w) - Z \tan(\phi - \theta)]^2 - [(f_{p1} - Z) \tan(\theta + \alpha)]^2 \}}. \tag{6}$$

2.2.2 $f_{p1} < Z < f_{p2}$ 粉流焦柱区

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

$$C(Z) = C_0(Z) e^{-\frac{x^2 + y^2}{[r_f(Z)]^2}}, \tag{7}$$

其中

$$C_0(Z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p [R_{f2} + (f_{p2} - Z) \tan(\phi - \theta)]^2}, \tag{8}$$

$$r_f(Z) = R_{f2} + \frac{L_f}{R_{f1} - R_{f2}} (f_{p2} - Z). \tag{9}$$

2.2.3 $Z > f_{p2}$ 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

$$C(Z) = \frac{M_p}{V_p S} = \frac{M_p}{\pi V_p \left(Z \frac{R_{f2}}{f_{p2}} \right)^2}. \tag{10}$$

由(6) ~ (10) 式可以看出,粉末流场浓度分布是送粉嘴几何参数 ($r, w, \phi, \alpha, \theta$)、送粉工艺参数

(M_p, V_p) 和粉末流轴向距离 Z 的函数。经过优化, 研制了一套激光同轴送粉头, 其参数为: $r = 3 \text{ mm}$, $w = 1.5 \text{ mm}$, $\alpha = 15^\circ$, $\phi = 25^\circ$ 。图 2 给出了该同轴送粉头的金属粉末流场沿 z 轴理论浓度分布曲线, 条件为 $V_p = 1000 \text{ mm/s}$; $M_p = 100 \text{ mg/s}$, 200 mg/s 和 300 mg/s 。

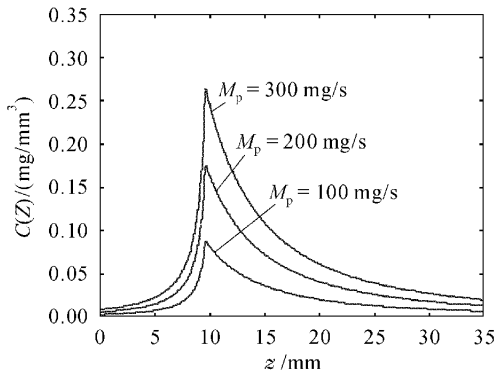


图 2 沿 z 轴方向不同 M_p 情况下的粉末流浓度分布
Fig. 2 Distribution of concentration of powder stream along z axis at different M_p

由图 2 可以看出, 在粉嘴出口附近环状粉流区, z 轴方向上粉末流浓度由零逐渐增大, 一直到聚焦点, 达到最大的粉末浓度, 粉末流焦点处对应粉末流浓度最大值。在粉末流聚焦后, 在发散的锥形焦柱区, 粉末流浓度随着 z 增加而缓慢降低。

3 数字图像检测原理及实验方法

3.1 数字图像检测原理

数字图像检测系统检测金属粉末流浓度场的主要原理为: $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器发出的激光经过二维片光源镜组, 转换为二维片光源; 该二维片光源照亮由同轴送粉嘴输出的金属粉末, 在粉末被照亮的同时, 由高速跨帧 CCD 相机拍得金属粉末流照片, 拍得的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。为了减少由于金属粉末流反射等导致激光强度减弱, 在片光源过来的方向放置一面反射镜, 从而利用反射光增强金属粉末流的亮度。图 3 所示为测量金属粉末浓度场原理及实验装置图。

3.2 实验系统构成

各组件主要技术参数为:

1) 双路 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 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、摄像方位进行调整, 可

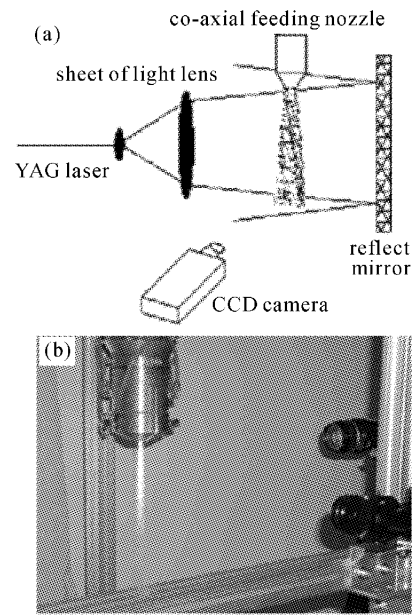


图 3 粉末流浓度场检测原理及实验装置图
(a) 原理图; (b) 实验装置图

Fig. 3 Scheme of measuring concentration fields of powder stream

(a) scheme of principle; (b) picture of experimental devices

调范围为 $200 \text{ ns} \sim 0.5 \text{ s}$, 脉冲重复频率为 10 Hz , 脉冲持续时间为 10 ns , 每次脉冲能量可达到 300 mJ 。

2) 照明用片光源光学元件: 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 , 这样就只记录在这一层片光内运动的粒子, 测量所得的流场信息就包含在这个片光束内。

3) CCD 相机: 有双曝光功能的跨帧 CCD 相机, 1018×1008 像素, 256 个灰度级, 图像采集频率为 30 Hz 。

4) 同步器: 为采集图像的核心控制部分。同步控制系统产生周期信号, 通过内部延时输出 2 台激光器的氙灯及 Q 开关的控制信号, 同时输出 CCD 相机触发信号。在激光与相机同步前提下, CCD 拍摄粉末流粒子图像, 送入计算机进行分析处理。

5) 分析显示系统: 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 编制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。

3.3 实验方法

测量中选用的送粉嘴参数为: $r = 3 \text{ mm}$, $w = 1.5 \text{ mm}$, $\alpha = 15^\circ$, $\phi = 25^\circ$, $M_p = 200 \text{ mg/s}$, $V_p = 1000 \text{ mm/s}$ 。为减小粉末颗粒流动过程不稳定对测

量结果的影响,在每一测量工况下连续采集 20~30 个图像。在每一个工况测量前后都对一标准网格在相同条件下成像,一方面用于对粒子图像进行几何校正提供参考,并由其比较精确地得到每一工况测量时成像区域的大小,进而可为浓度分析时得到的绝对大小提供数据,即确定单位像素对应物平面的实际大小;另一方面用于考核实验前后系统的稳定性。

4 实验结果及分析

4.1 粉末流中心纵截面浓度场分布

采用片光源由 CCD 相机拍摄得到的金属粉末流沿中心纵截面照片如图 4(a)所示,图 4(b)所示为粉末流焦点处放大照片。图 5 为实验中测得的粉末流沿中心轴线方向上的相对浓度分布。

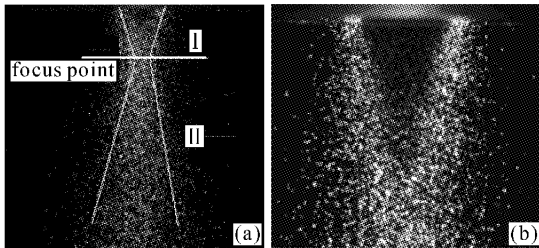


图 4 粉末流沿中心纵截面方向图片
Fig. 4 Pictures of powder stream in center longitudinal section

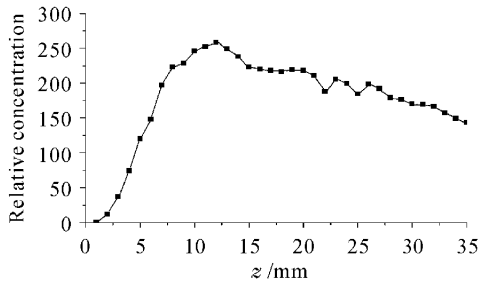


图 5 粉末流沿中心轴线上的浓度分布
Fig. 5 Concentration distribution along center axis of powder stream

从图 4 和图 5 的实验结果可看出,金属粉末流沿同轴粉嘴中心轴线的浓度分布和理论计算模型基本一致,明显地显现了三个粉流区:环状区、焦柱区和锥状发散区。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。通过对图 4 的实际测量,测得粉

末流参数为:上发散角 $\theta_1 = 5^\circ$,下发散角 $\theta_2 = 15^\circ$,上焦点 $f_{p1} = 9.11 \text{ mm}$,下焦点 $f_{p2} = 12.38 \text{ mm}$,聚焦后发散角 $\beta = 12^\circ$ 。理论模型中, $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 3^\circ$, $f_{p1} = 9.23 \text{ mm}$, $f_{p2} = 11.14 \text{ mm}$ 。理论模型中上下发散角假设是一致的,但在实际中,由于重力、载流气体、粉末间相互碰撞等因素,使上下发散角不相等,而且下发散角要大于上发散角。粉末流在聚焦后,通过相互之间的碰撞,载气流的带动,及重力的影响,形成有一定发散角 β 的锥状粉流。

4.2 粉末流焦点附近横截面浓度场分布

为了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 6 所示为校正前和校正后的金属粉末流焦点横截面图像。

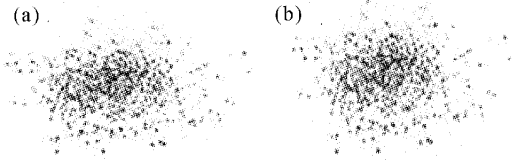


图 6 粉末流场横截面的浓度分布原始图像(a)和校正图像(b)

Fig. 6 Image of concentration distribution in transverse section near focused point
(a) original image; (b) corrected image

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分布,如图 7 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。

5 结 论

建立了激光制造中同轴送粉条件下金属粉末流输送的理论模型,并通过数值计算得到其在 z 轴方向上的浓度场分布。建立了测量金属粉末流浓度场的数字图像检测系统,它可以瞬间得到金属粉末流浓度场的纵向、横向分布和焦点参数。测试结果和理论分析对比表明,开发的粒子数字图像检测系统检测到的金属粉末流浓度场分布与理论计算获得比较好的一致,进一步发展后,该技术可用于激光制造中的粒子浓度实时检测。

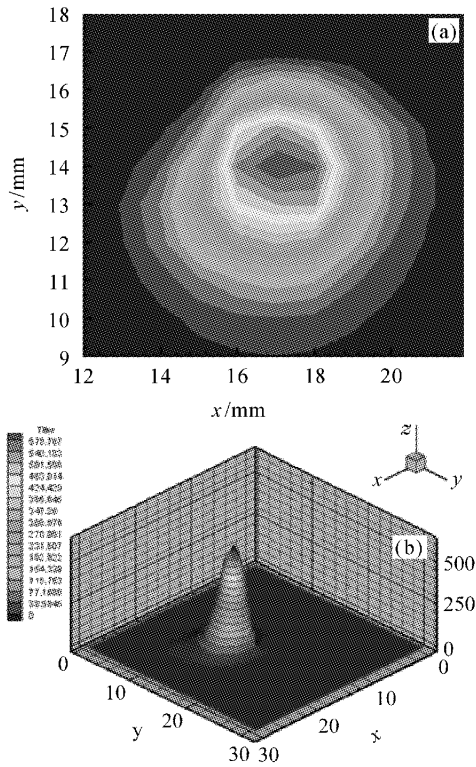


图 7 粉末流焦点处横截面的等浓度线分布

(a) 二维等浓度线分布; (b) 三维等浓度线分布

Fig. 7 Iso-concentration distribution of powder stream in transverse section near focused point

(a) 2D iso-concentration field; (b) 3D iso-concentration field

参 考 文 献

- 1 R. Vilar, Laser cladding [J]. *Journal of Laser Applications*, 1999, **11**(2): 64~79
- 2 Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486
- 3 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin *et al.*. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1441~1444
- 4 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 5 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating technology for repairing some of expensive and important equipment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10): 53~57
- 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
- 7 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
- 8 Yang Xichen, Wang Jianjun, Gao Shuying *et al.*. A new coaxial powder feeder without carrying gas for laser direct materials deposition [C]. *SPIE*, 2002, **4915**: 153~161
- 9 Jehnming Lin. A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 233~238
- 10 J. lin, W. M. Steen. Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding [J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, **10**(2): 55~63