

# 激光制造中同轴粉末流场分析与检测

刘立峰<sup>1,2</sup> 董丽莹<sup>3</sup> 董玲<sup>2</sup> 王云山<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387

<sup>2</sup>天津工业大学激光技术研究所, 天津 300387

<sup>3</sup>天津金山电线电缆股份有限公司, 天津 300402

**摘要** 激光同轴送粉头喷出的粉末汇聚和分布特性直接影响激光制造的质量和精度。研究了同轴送粉时粉末分布规律和汇聚情况,提出了同轴送粉式粉末分布理论模型,开发了一种粉末流场检测系统,对喷嘴喷出的粉末汇聚情况和分布形貌进行了实时检测,结果表明,计算结果与实验测量结果比较吻合。通过系统观察和分析粉末流的汇聚和分布的实时变动行为,有利于更好地优化设计送粉头和控制激光制造过程。

**关键词** 激光技术;粉末流;同轴送粉;COMS检测

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081405

## Research of Coaxial Powder Stream Field in Laser Manufacturing

Liu Lifeng<sup>1,2</sup> Dong Liying<sup>3</sup> Dong Ling<sup>2</sup> Wang Yunshan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

<sup>2</sup>Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

<sup>3</sup>Jinshan Electric Wire and Cable Co., Ltd., Tianjin 300402, China

**Abstract** Distribution of powder stream from coaxial nozzle directly affects the quality and accuracy of the parts by laser manufacturing. The convergent distribution of powder flow and powder convergent performance is researched. A theoretical model of coaxial powder nozzle is established. And a detecting system of powder stream field is developed to real-time measure morphology and concentration distribution of powder stream. The results show that the simulations of the powder flow agree well with the experimental measurements. The systemic studies on the behaviors of powder stream morphology and concentration distribution of powder stream help to optimize the design of coaxial powder feeding head and control laser manufacturing better.

**Key words** laser technology; powder stream; coaxial powder feeding; COMS detection

**OCIS codes** 140.3390; 350.4990; 120.4630

## 1 引言

同轴送粉技术是激光制造的核心技术之一,同轴送粉实现了粉末流与激光同轴输出,其输出的粉末流具有各向同性的特点,克服了侧向送粉的单向性缺点<sup>[1-2]</sup>,具备激光制造所需要的各向同性的特性。近年来有许多研究单位对该技术展开了研究<sup>[3-5]</sup>。

在同轴送粉激光制造中,粉末粒子经同轴送粉头均匀分散、汇聚后进入激光熔池,并经历熔化、凝固过程而形成最终的熔覆层。显然,粉末流物理场分布(浓度场、速度场、温度场)的性能直接决定激光制造零件的质量和精度,因此充分认识和掌握粉末流输送、分布规律及其对熔覆层宏观质量的影响规律,是正确选择工艺参数以获得高质量熔覆层的前提<sup>[6-7]</sup>。为了更深刻地理解粉末流的输送过程,本文对激光制造过程中粉

收稿日期: 2014-02-14; 收到修改稿日期: 2014-03-22; 网络出版日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1333121)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(12JCQNJC02800)

作者简介: 刘立峰(1975—),男,博士,讲师,主要从事激光制造理论及应用、信号处理与系统等方面的研究。

E-mail: liulif2005@126.com

末输送和分布方面进行了一些研究工作。

## 2 粉末流输送和分布分析

粉末流的分布和形貌由同轴送粉头的结构和尺寸以及激光制造工艺参数决定,在前期的理论研究及数值模拟工作基础上,提出了一些假设并建立同轴送粉粉末分布模型如图1所示。

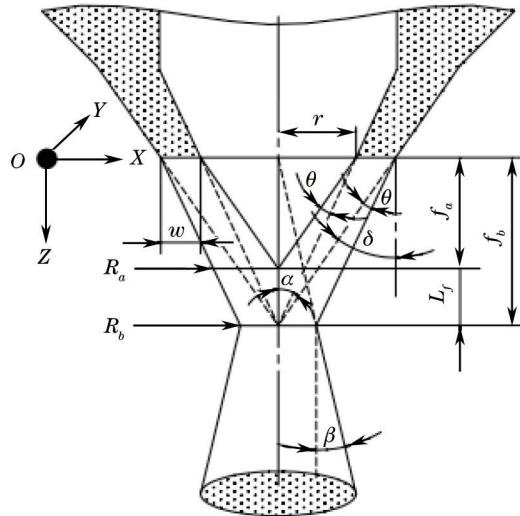


图1 同轴送粉粉末分布模型

Fig.1 Distribution model of coaxial powder

假设如下:

- 1) 在同轴粉嘴出口附近,粉末粒子与载气已经充分混合流动达到一个平衡状态,认为气、粉具有相同的速度,是均匀流场。
- 2) 粉末粒子在气/粉射流中的体积分数很低,忽略粉末颗粒间的压力、粘性及碰撞。
- 3) 在同轴粉嘴出口处较短喷射区域内,忽略颗粒受到的摩擦力、阻力等,气/粉沿腔粉壁延长线方向射出,在Z轴上汇聚。

图1中  $r$  是粉腔出粉口内边缘到轴心的径向距离,  $w$  是粉腔出粉口通道的宽度,  $\theta$  是理论粉末流束的发散角,  $\delta$  是粉腔外壁与Z轴方向夹角,  $\alpha$  是粉腔内壁与Z轴方向夹角,  $\beta$  是粉流汇聚后的扩张角。  $f_a$  是粉末流束的上焦距,  $f_b$  是其下焦距,  $R_a$  是上焦点处的焦半径,  $R_b$  是下焦点处的焦半径,  $L_f$  是粉末流束的焦深。

由各参数间的几何关系可以得出:

$$f_a = \frac{r}{\tan(\theta + \alpha)}, \quad (1)$$

$$f_b = \frac{r + w}{\tan \delta}, \quad (2)$$

$$L_f = f_b - f_a = \frac{r + w}{\tan \delta} - \frac{r}{\tan(\alpha + \theta)}, \quad (3)$$

$$R_a = (r + w) - f_a \tan(\delta - \theta) = (r + w) - r \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan(\theta + \alpha)}, \quad (4)$$

$$R_b = (r + w) - f_b \tan(\delta - \theta) = (r + w) \left[ 1 - \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan \delta} \right]. \quad (5)$$

根据同轴粉末分布模型可以得到:粉末喷出后呈环形分布,粉末粒子在惯性作用下趋于汇聚,汇聚后形成粉末流焦点,然后粉末粒子发散分布呈圆锥状。

粉末流场浓度分布呈现以下特点:

- 1)  $0 < z < f_a$  区间,在粉嘴附近呈环状分布。

在此区间,粉末粒子分布在激光束周围,粉末粒子与激光不存在相互作用。粉末流的截面面积为

$$S(z) = \pi[(r+w) - z \cdot \tan(\delta - \theta)]^2 - \pi[(f_a - z) \cdot \tan(\theta + a)]^2. \quad (6)$$

其浓度为

$$C(z) = \frac{Q}{uS(z)} = \frac{Q}{\pi u \{ [(r+w) - z \cdot \tan(\delta - \theta)]^2 - [(f_a - z) \cdot \tan(\theta + a)]^2 \}}. \quad (7)$$

2)  $f_a < z < f_b$  区间, 粉末粒子汇聚, 粉末粒子与激光发生相互作用, 此时粉末流的截面面积为:

$$S(z) = \pi[R_b + (f_b - z) \cdot \tan(\delta - \theta)]^2. \quad (8)$$

其浓度分布:

$$C(z) = \frac{Q}{uS(z)} = \frac{Q}{\pi u [R_b + (f_b - z) \cdot \tan(\delta - \theta)]^2}. \quad (9)$$

3)  $z > f_b$  区间, 聚焦后的粉末粒子开始发散, 粉末流的截面面积为

$$S(z) = \pi[R_b + (z - f_b) \cdot \tan\beta]^2. \quad (10)$$

其浓度分布:

$$C(z) = \frac{Q}{uS(z)} = \frac{Q}{\pi u [R_b + (z - f_b) \cdot \tan\beta]^2}. \quad (11)$$

在粉末流从送粉头喷射出后 40 mm 内, 粉末浓度随着送粉量增加而增加, 与送粉量的比例大致相当; 送粉量  $Q$  是影响粉末浓度的重要因素, 但是粉末浓度峰值的位置基本不变, 如图 2 所示。随着粉末粒子初始速度增加, 其浓度相应减少, 如图 3 所示。粉末流随着出粉口宽度的增加, 粉末焦点处粉末浓度减小, 并且粉末焦点的位置下移, 如图 4 所示。粉末流随着  $\delta$  的增加, 其粉末焦点处粉末浓度增加, 并且粉末焦点的位置上移, 焦距变短, 如图 5 所示。

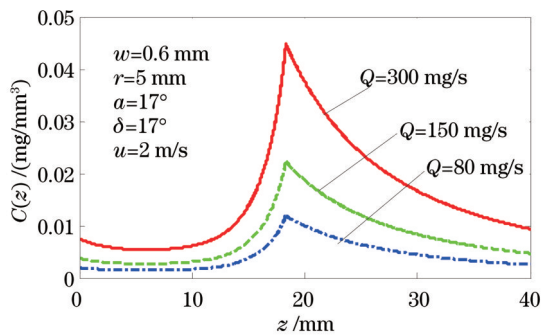


图 2 不同送粉量时粉末浓度分布

Fig.2 Distribution of powder concentration at different powder feeding amounts

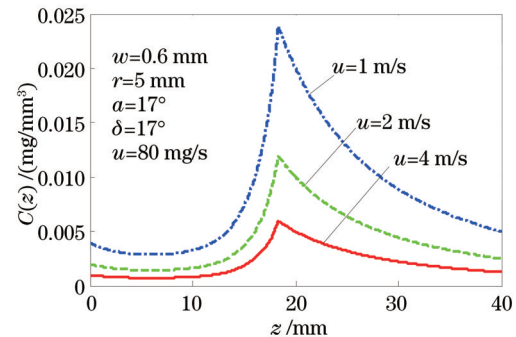


图 3 不同送粉初始速度时粉末浓度分布

Fig.3 Distribution of powder concentration at different powder speeds

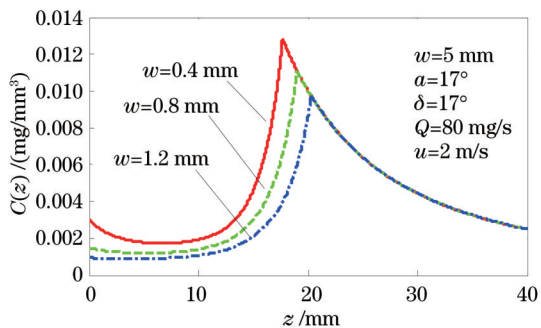


图 4 不同出粉口宽度时粉末浓度分布

Fig.4 Distribution of powder concentration at different widths of powder outlet

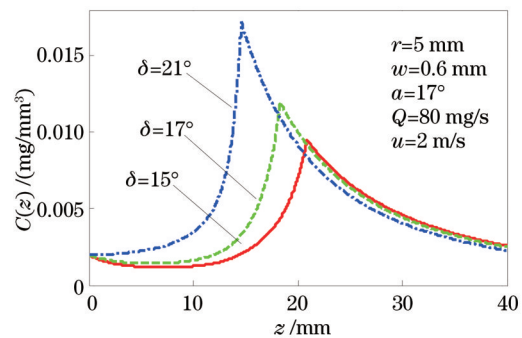


图 5 不同倾角时粉末浓度分布

Fig.5 Distribution of powder concentration at different angles

从数值模拟分析, 粉末粒子浓度分布是送粉头几何参数 ( $r$ 、 $w$ 、 $\delta$ 、 $a$ 、 $\theta$ )、激光制造工艺参数 (送粉量  $Q$ 、流速  $u$ ) 的函数, 同轴送粉头的出粉口宽度和光束通道对粉末流的分布具有一定影响, 当出粉口的宽度

大于 3 mm 时,由于粉末发散而不能实现汇聚,反之,当其宽度值太小时,熔覆粉末又容易产生堵塞现象。

在数值模拟基础上设计了一套同轴送粉头,如图 6 所示,主要包括四路分粉器、粉嘴、进粉口、进气孔、内锥体、外锥体、进水口、粉腔和出粉口等,每个模块均可单独拆装,可以根据激光制造工艺要求很方便地进行更换,以满足不同材料、厚度以及工艺的加工要求。



图 6 同轴送粉头照片

Fig.6 Picture of coaxial powder feeding head

### 3 粉末分布的检测

根据微粒光散射理论,拍摄区域的亮度正比于该区域发生散射的粉末浓度,因而区域的亮度值可以直接用来检测该区域的粉末浓度<sup>[8]</sup>。开发了一套粉末流场检测系统,主要包括半导体线光源激光器、CMOS 相机及其配套的工业镜头和计算机,如图 7 所示。使半导体激光器发出的二维光平面穿过粉末流的中心轴线,将照亮的一层粉末流凸显出来,采用高性能 CMOS 相机将拍摄的粉末图像传输至计算机,由专用粉末流场检测软件进行实时观察与分析。

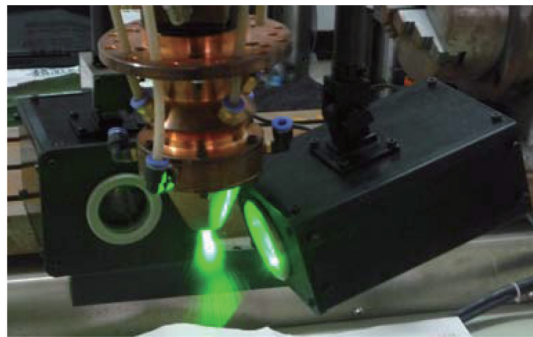


图 7 粉末流检测现场照片

Fig.7 Picture of powder flow detection

实验粉末为 Stellite Ni25,目数为 140~325。图 8~11 为重力送粉时不同送粉量的粉末分布照片,送粉头喷射出的合金粉末分布明显存在的三个粉流区:环状粉流区、焦柱粉流区、锥形粉流发散区。由于没有载气,粉末流发散明显,但仍保持一定的汇聚性地倾斜向下运动。另外随着送粉量的增加,粉末流中心的汇聚浓度逐渐增大,送粉量增大,焦点浓度变大,但粉末汇聚焦点位置以及焦点半径基本不变;同时在粉末流场边界处的浓度随送粉量的增大而增大,但并不与送粉量呈线性关系。实验获得粉末流形貌符合理论模型所分析的结果。

在激光制造中一般通过载气实现远程送粉,通过调整载气的流量来改变粉末的运动速度以获得不同的粉末喷射效果,满足加工工艺的要求。因此需要研究载气对同轴送粉的影响。

图 12 不同载气流量时的粉末分布照片,可以看到随着气体流量的增大,粉末流汇聚焦点略上移,汇聚效果得到改善,汇聚焦点直径变小;当速度达到一定值时焦点位置和汇聚焦点直径基本保持不变。随着载气流量增大使粉末流的拘束性增强,但是汇聚后即出现分叉现象,说明气流的层流长度较短,在相交位置出现从层流到紊流的转折,致使焦柱区较短。汇聚后粉末流开始发散,浓度降低,这与理论分析情况相符合。

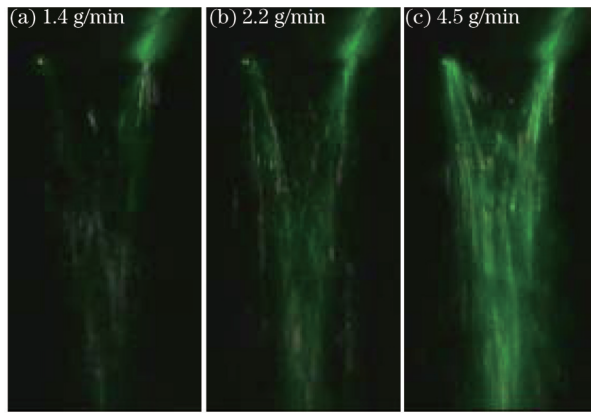


图8 不同送粉量时粉末分布照片

Fig.8 Pictures of powder distribution at different powder feeding amounts

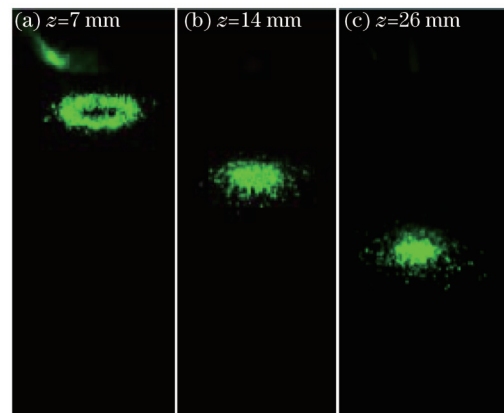


图9 送粉量为 1.4 g/min 时粉末流横截面照片

Fig.9 Pictures of powder flow cross section at 1.4 g/min powder feeding amount

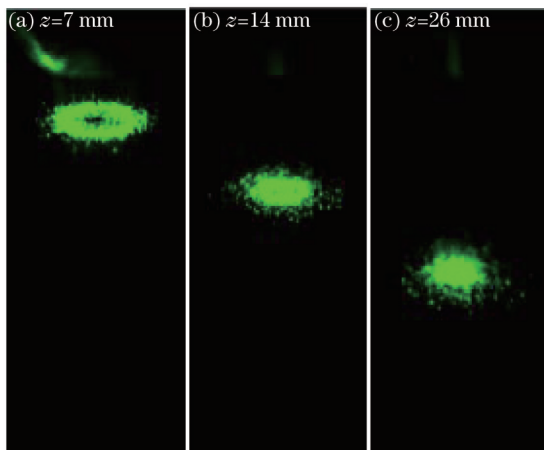


图10 送粉量为 2.2 g/min 时粉末流横截面照片

Fig.10 Pictures of powder flow cross section at 2.2 g/min powder feeding amount

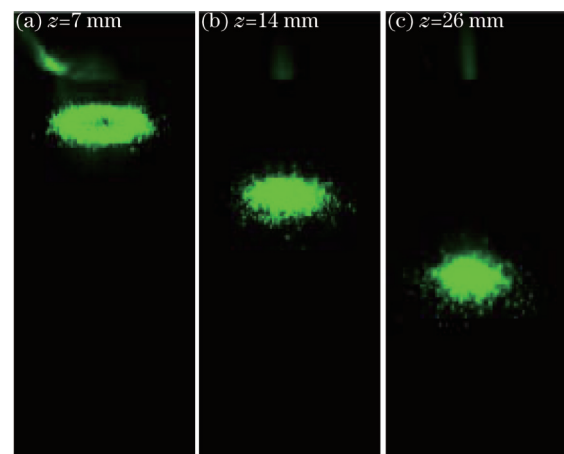


图11 送粉量为 4.5 g/min 时粉末流横截面照片

Fig.11 Pictures of powder flow cross section at 4.5 g/min powder feeding amount

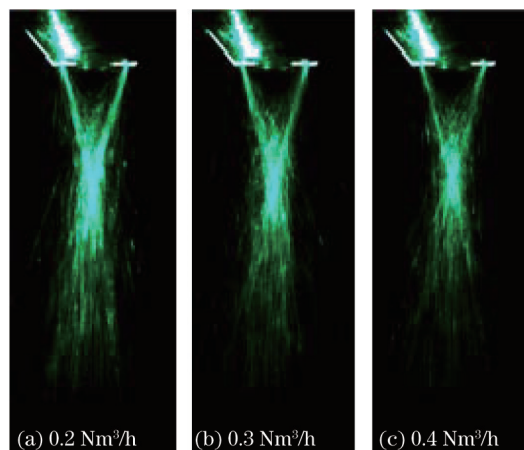


图12 不同载气流量时粉末分布照片

Fig.12 Pictures of powder distribution at different carrier gas flows

## 4 结 论

在激光制造过程中同轴送粉研究基础上,提出了同轴送粉式粉末分布模型,并且给出其解析表达式。通过数值模拟分析了粉嘴设计参数(几何尺寸)和工艺参数(送粉量、气流量)对粉末流的影响规律,进一步

优化设计了一套可模块化拆装组合的激光同轴送粉头。

基于 COMS 的粉末流检测系统可以非接触、实时捕捉粉末流场的三维信息,给出粉末流的汇聚情况和三维空间分布,能直观地观察和分析同轴送粉中粉末流三区分布特征,可以用来评价同轴送粉头的性能和激光制造工艺状态。

随着载气量的增加,粉末流速度也增大,对粉末流的拘束性增强使粉末流汇聚程度提高。但随着载气量的增大,所受惯性力增大,相汇后即出现分叉现象,粉末焦柱区变短。

### 参考文献

- 1 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng Liwei, *et al.*. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing [J]. *Journal of 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.
- 2 Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.*. Research on the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403003.  
王 维, 才 磊, 杨 光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403003.
- 3 Guijun Bi, Bert Schürmann, Andres Gasser, *et al.*. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(3): 555-561.
- 4 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. 激光熔覆中喷嘴流场的数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 452-455.
- 5 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.
- 6 Jehnming Lin. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31 (1): 251-257.
- 7 Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng, *et al.*. Machine vision in laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0601008.  
杨洗陈, 张海明, 刘立峰, 等. 激光再制造机器人光电视觉技术进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601008.
- 8 He Jinjiang, Zhong Minlin, Liu Wenjin, *et al.*. Observation and analysis on behaviors of powder stream concentration and molten pool in laser deposition process in controlled environment chamber [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(2): 283-288.  
何金江, 钟敏霖, 刘文今, 等. 保护箱中激光沉积的粉末流、熔池观测与分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 283-288.