

保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究

王丽芳¹ 朱刚贤² 石世宏² 傅戈雁²

(¹ 苏州大学工程训练中心, 江苏 苏州 215021; ² 苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要 为了提高激光金属直接成形中光内同轴送粉喷嘴粉末流场的汇聚性, 获得大的聚焦焦距、小的聚焦直径及小的发散角, 对卸载及载气两种方式下不同保护气压力对粉末流聚焦参数的影响规律进行了实验研究。结果表明: 在卸载方式下, 随保护气体压力逐渐增大, 粉末聚焦焦距逐渐增大, 粉末聚焦直径变小, 发散角减小, 粉末汇聚效果变好; 在载气方式下, 随保护气体压力逐渐增大, 粉末聚焦焦距先增大后减小, 聚焦直径逐渐变小, 发散角逐渐降低。因此, 在载气方式下应选择保护气压力与载气压力大小接近为宜。研究结果对光内送粉激光金属直接成形工艺优化具有指导意义。

关键词 激光金属直接成形; 光内送粉; 粉末汇聚性; 保护气压力

中图分类号 TN249; TG39 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103007

Influence of Shielding Gas Pressure on Flow Field of Inside-Laser Powder Feeding Nozzle

Wang Lifang¹ Zhu Gangxian² Shi Shihong² Fu Geyan²

(¹ *Engineering training center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China*
² *School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China*)

Abstract In order to improve the powder convergent characteristics of flow field of the inside-laser powder feeding nozzle in laser metal direct forming (LMDF) and obtain longer converging focal length, smaller converging diameter and divergence angle, the powder converging parameters are studied by experiments with different shielding gas pressure under unloading and carrier gas conditions. The experimental results indicate that the powder converging focal length increases, converging diameter and divergence angle decrease with the growth of shielding gas pressure under unloading conditions. The powder convergent characteristics gets better. The powder converging focal length firstly gets longer then gets shorter, converging diameter and divergence angle decrease with the shielding gas pressure increasing under carrier gas state. The effect is preferred when the shielding gas pressure is equal to the carrier gas pressure. It has an important guiding significance for process optimization during LMDF with the inside-laser powder feeding way.

Key words laser metal direct forming; inside-laser powder feeding; powder convergent characteristics; shielding gas pressure

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 000.2170

1 引 言

激光金属直接成形(LMDF)技术是以激光为热源, 金属粉末/丝材为原料, 在基体上逐层堆积直接制造出满足一定功能需求的金属零件, 是近二十年来制造技术的发展方向及研究热点^[1-3]。在 LMDF 送粉方式中, 由于同轴送粉法无方向性影响, 熔道质量可达到各向同性, 在激光熔覆特别是成形领域获

得了广泛应用^[4]。同轴送粉喷嘴是实现 LMDF 的关键部件, 它的主要作用是把金属粉末均匀、稳定地送入熔池中, 其汇聚效果直接决定零件的成形精度及性能^[5]。好的粉末汇聚效果主要体现为粉末聚焦焦距尽可能大, 而粉末聚焦直径及发散角尽可能小。

目前, 同轴送粉装置大多通过“多路送粉喷嘴”及“圆锥环形送粉喷嘴”来实现, 而这种送粉装置是

收稿日期: 2013-09-10; **收到修改稿日期**: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(61078019)、中国博士后科学基金(2012M521117, 2013T60556)、江苏省自然科学基金(BK2012183)、苏州市应用基础研究计划(SYG201236)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201106)

作者简介: 王丽芳(1979—), 女, 助理实验师, 主要从事激光快速成形技术方面的研究。E-mail: lfwang@suda.edu.cn

将粉末在激光束外侧进行汇聚送入激光所产生的熔池中,这种方法通称为“光外送粉法”^[6]。所谓的同轴实质上只是各粉管轴线共同的几何中心与光束同轴,而各粉管的轴线仍然相对光束倾斜,导致各路粉末束皆呈抛物线状抛射至成形表面上的熔池中,汇聚精度差^[7-8]。另外,多粉末束汇聚后的粉斑尺寸较大,且粉末发散,造成粉末利用率较低。同时抛洒的粉末一部分形成未熔颗粒粘附于工件表面,影响熔覆层表面粗糙度^[9]。为解决“光外送粉”LMDF 技术出现的不足,本课题组利用激光束易变换的特点,提出了一种“光束中空,光内送粉”的创新方案^[10]。单粉管与聚焦光束的光轴真正同轴安装,粉粒由粉管下部喷嘴喷出后受自身惯性力、气载压力和重力的作用方向一致,运动轨迹为直线状,粉末束中心线与光轴始终重合(光斑离焦也重合),因此实现了真正意义上的光粉同轴^[4]。

本文重点研究光内送粉方式下,在卸载及载气两种方式下外层保护气压力对粉末流聚焦参数(聚焦直径、聚焦焦距及发散角)的影响规律,找出满足良好汇聚特性条件下合理的保护气压力范围,为光内送粉激光直接成形工艺的优化提供指导。

2 实验材料与方法

实验材料选用 Fe313 粉末,粒度范围 15 ~ 45 μm ,粉末预先放在干燥箱中干燥以去除水分,增强其流动性。光内同轴送粉喷嘴与粉末聚焦参数测量示意图,如图 1(a)所示。其中 f 为粉末聚焦焦距(指粉末从喷嘴出口处到粉末不发散的距离); d 为粉末聚焦直径(指在粉末聚焦焦距处的粉末聚焦尺寸); θ 为粉末发散角。为观察粉末颗粒汇聚状态,采用加拿大 Qimaging 公司生产的 MicroPublisher 5 RTV 型高速摄像机对粉末流场进行拍摄,可实时记录颗粒运动轨迹。对拍摄出的图片进行图像处理,可获得不同外层保护气压力下粉末聚焦直径、聚焦焦距及发散角大小。试验时,采用双侧体光源(选

用了 1300 W 的卤钨灯)作为辅助光源,均与摄像机镜头成 45°方向放置,高速摄像机放置于同轴送粉喷嘴正前方,照射到粉末的光经过散射作用进入摄像机中,安装位置如图 1(b)所示。

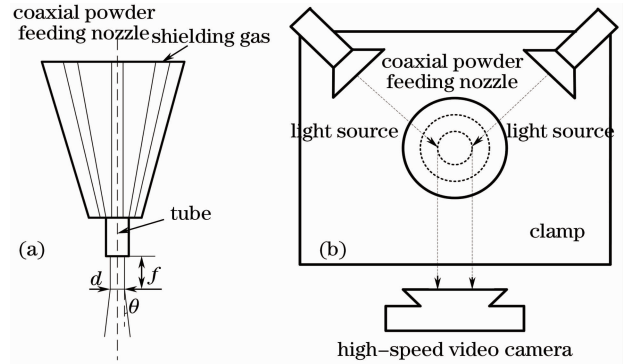


图 1 实验装置示意图。(a) 喷嘴及测量值;
(b) 安装位置

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.
(a) Nozzle and measured value; (b) installation position

3 实验结果与分析

为了获得外层保护气体压力对粉末汇聚特性的影响规律,在送粉量 $M_p = 10.2 \text{ g/min}$,载气流量 $Q_c = 2 \text{ L/min}$ 及输送粉末的载气压力 $P_c = 0.2 \text{ MPa}$ 条件下,在卸气及载气两种方式下选取不同外层保护气体压力对粉末汇聚参数的影响规律展开研究。

所谓卸载方式是指:通过优化的喷嘴结构在粉末进入同轴喷嘴的粉管前把输送的气体卸载掉,这样既可以很好地进行载气式粉末的进粉和输送,又可以显著地减小喷射汇聚时载气对粉末的扰动发散作用^[11]。

3.1 卸载方式下保护气压力对粉末汇聚特性的影响规律

选取外层保护气体压力分别为 $P_p = 0, 0.1, 0.2, 0.3 \text{ MPa}$ 时对粉末汇聚特性的影响规律,拍摄结果如图 2 所示。对粉末聚焦焦距、聚焦直径及发散角进行测量,其测量结果如表 1 所示。

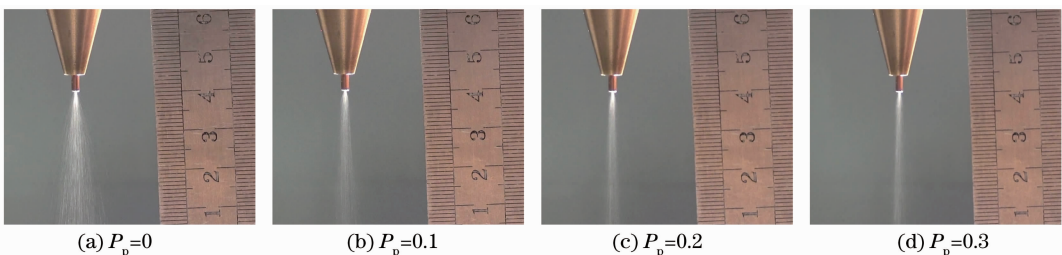


图 2 不同保护气压力下粉末汇聚特性

Fig. 2 Powder focusing characteristic with different shielding gas pressures

表1 不同保护气压力下粉末汇聚参数

Table 1 Powder convergent parameters with different shielding gas pressures

Shielding gas pressure P_p /MPa	Focal length f /mm	Divergent angle θ /($^\circ$)	Focus diameter d /mm
0	0	8.95	—
0.1	7.38	6.15	1.85
0.2	17.79	4.50	1.38
0.3	22.56	3.18	1.24

从图2及表1可看出,在卸压方式下,当外层保护气压力逐渐增大时,粉末聚焦焦距逐渐增大,聚焦直径逐渐减小,发散角逐渐降低,粉末汇聚特性变好。主要原因是外层保护气除防止金属粉末在激光制造过程中发生氧化外,更对金属粉末的汇聚起到规整作用,可显著提高粉末汇聚性。所以从聚焦特性角度考虑,在卸载方式下,外层保护气压力越大越有利于粉末的汇聚,可选择较大的外层保护气压力。

当然在实际成形过程中,外层保护气体的压力也不能过大,否则会吹散激光产生的熔池,使之不能形成稳定的熔池,进而影响熔覆层成形质量。所以不能一味追求粉末汇聚特性而不断增大外层保护气

体压力。因此,在卸压方式下应选择合适的外层保护气压力范围:在保证不影响激光所产生熔池的前提下,保护气压力应尽可能大。

3.2 载气方式下保护气压力对粉末汇聚特性的影响规律

为找出保护气压力与承载粉末的气体压力的耦合关系,分别选取四种外层保护气压力 $P_p=0$ 、 $P_p=0.1$ MPa $<P_c$ 、 $P_p=0.2$ MPa $=P_c$ 和 $P_p=0.3$ MPa $>P_c$ 时对粉末汇聚特性的影响规律,其拍摄结果如图3所示。对粉末聚焦焦距、聚焦直径及发散角进行测量,其测量结果如表2所示。

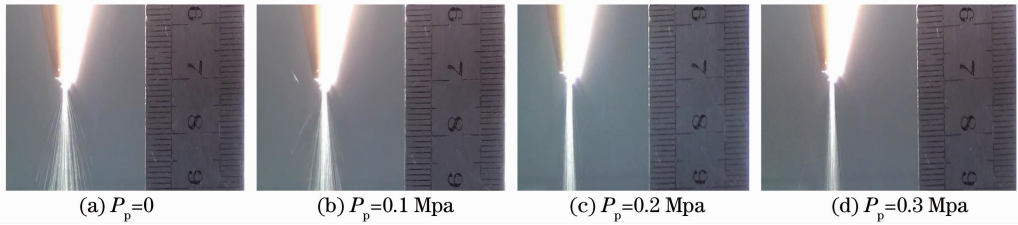


图3 不同保护气压力下粉末汇聚特性

Fig. 3 Powder focusing characteristic with different shielding gas pressures

表2 不同保护气压力下粉末汇聚参数

Table 2 Powder convergent parameters with different shielding gas pressures

Shielding gas pressure P_p /MPa	Focal length f /mm	Divergent angle θ /($^\circ$)	Focus diameter d /mm
0	0	10.15	—
0.1	3.17	7.33	1.09
0.2	7.75	6.09	1.07
0.3	4.89	4.76	0.86

同理,从图3及表2可看出,在载气方式下,当保护气压力小于载气压力时,随着外层保护气压力逐渐增大,粉末聚焦焦距逐渐增大,发散角减小,聚焦焦距几乎不变。当保护气压力大于载气压力时,聚焦焦距变小,发散角及聚焦焦距显著变小。

主要原因是当外层保护气压力小于载气压力时,保护气压力对粉末流场的规整效果不明显,粉末相对发散,随保护气压力增大,粉末汇聚效果明显,汇聚状态变好。同时,当外层保护气压力大于载气压力时,粉末聚焦焦距显著变小,粉末聚焦焦距变小会导致在实际熔覆过程中,喷嘴距离激光所产生的

熔池较近,不仅会造成反弹的粉末进入喷嘴污染透镜,而且会造成粉管出口堵塞^[12]。所以外层保护气体压力也不能过大,应选择与载气压力接近为宜。因此综合考虑,在载气方式下应选择保护气压力与载气压力接近为最佳保护气压力大小。

4 结 论

本文研究分析了在LMDF过程中,在卸压及载气两种方式下不同外层保护气压力对光内送粉同轴送粉喷嘴汇聚特性的影响规律。实验结果表明:在卸压方式下,随外层保护气体压力逐渐增大,粉末聚

焦焦距逐渐增大,聚焦直径逐渐减小,发散角逐渐降低,粉末汇聚特性变好。在不影响激光所产生熔池的前提下保护气压力应尽可能大以有利于粉末汇聚;在载气方式下,当保护气压力小于载气压力时,随外层保护气压力逐渐增大,粉末聚焦焦距逐渐增大,发散角减小,聚焦焦距几乎不变。当保护气压力大于载气压力时,聚焦焦距变小,发散角及聚焦焦距显著变小。在载气方式下应选择保护气压力与载气压力接近为最佳保护气压力大小为宜。

参 考 文 献

- 1 Li Dichen, He Jiankang, Tian Xiaoyong, *et al.*. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 129-135.
- 2 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3204-3209.
- 3 Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4-6): 397-414.
- 4 Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long, *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 266-270.

- 石世宏, 傅戈雁, 李 龙, 等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 266-270.
- 5 Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1636-1642.
朱刚贤, 李涤尘, 张安峰, 等. 沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1636-1642.
 - 6 Wang Mingdi. Research on Mechanism and Process of Laser Cladding Rapid Manufacturing Using Coaxial Inside-Beam Powder Feeding[D]. Nanjing: Nanjing University of Astronautics, 2008. 1-15.
王明娣. 基于光内送粉的激光熔覆快速制造机理与工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008. 1-15.
 - 7 Wen G, Greenville S C. Compact coaxial nozzle for laser cladding [P]. US Patent, 7259353, 2007-8-21.
 - 8 Harris J G, Brandt M. Powder delivery nozzle[P]. US Patent, 7605346, 2009-10-20.
 - 9 Wu X. A review of laser fabrication of metallic engineering components and of materials [J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 23(6): 631-640.
 - 10 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser Forming Manufacturing Process and Nozzle of Inside-Laser Power Feeding [P]. Chinese Patent, 200610116413.1, 2006-9-22.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头[P]. 中国专利, 200610116413.1, 2006-9-22.
 - 11 Tian Fengjie. Development on coaxial feeding with unloading carrier gas for laser manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(19): 2298-2302.
田凤杰. 卸载式激光同轴送粉喷嘴的研制[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(19): 2298-2302.
 - 12 Guijun Bi, Bert Schurmann, 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: 555-561.

栏目编辑: 宋梅梅