

文章编号: 1001-3806(2010)03-0300-03

基于图像的激光熔覆粉末粒子运动行为分析

王春娴¹, 李会山², 王凤忠²

(1. 天津工业大学 计算中心, 天津 300160; 2. 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161)

摘要: 为研究送粉参量(送粉量和送粉气流量)变化对激光熔覆过程同轴载气粉末粒子运动行为的影响,建立了数字粒子图像测速试验装置,开发了图像处理软件,得到了不同送粉参量精确的速度场云图以及 z 轴方向(垂直方向)浓度分布情况。结果表明,在送粉量一定的情况下,随送粉气流量的增加,粉末粒子的初始速度呈线性增大,并使 z 轴方向速度的增加值加大,而对粉末流浓度影响较小。在气流量一定的情况下,送粉量与粒子速度在一定范围内有一定比例关系,超出送粉量 $0.33\text{g/s} \sim 0.83\text{g/s}$ 范围,其影响将减弱。由于粉嘴结构的原因,沿出粉方向存在粉末发散汇聚再发散的变化。汇聚的实现与气体流量关系较大。

关键词: 激光技术;激光溶覆;图像处理;粉末粒子;数字粒子图像测速

中图分类号: TG156.99; TP391

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.004

Analysis of powder stream motive behavior in laser cladding based on images

WANG Chun-xian¹, LI Hui-shan², WANG Feng-zhong²

(1. Computer Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. Department of Auto Engineering, Military Traffic Academy, Tianjin 300161, China)

Abstract: In order to study the effect of powder feed parameters on the motive behavior of coaxial carrier-gas powder in laser cladding process, a digital particle image velocimetry (DPIV) test device was constructed, a special image processing software was designed for this system. Lots of tests were performed on powder transport with carrying gas. The precision of velocity vector map of the powder particles in the coaxial was determined, and distribution of powder concentration at longitudinal axis from the nozzle exit was measured with the varied powder feed rate parameters by means of DPIV. Experiments show that the velocity metal-powder particle is linear with the powder mass flow rate. The powder concentration hardly changes with various gas fluxes and constant feeding powder amount. Outside the powder mass flow rate range ($0.33\text{g/s} \sim 0.83\text{g/s}$), the effect is lessened obviously. Because of the nozzle configuration of powder feed unit, powder flow has phenomena of expansion, focus and reexpansion along the nozzle exit. The focus distance and powder stream radius at the focus point also increase and focus depth decreases with increasing the gas flux.

Key words: laser technique; laser cladding; image processing; powder particles; digital particle image velocimetry

引言

在同轴载气激光熔覆过程中,送粉装置提供的载气金属粉末气固两相粒子流参量(速度、浓度)对熔覆层的质量有一定影响,特别是对涂层宏观形貌有决定性的作用^[1-4]。已有的研究成果主要关注送粉器、送粉嘴结构以及送粉量等参量对粉末粒子运动行为的影响,并在理论分析基础上进行计算数值模拟^[5-6],但缺少实际工作状态粉末流变化影响规律的试验验证和定量分析。本文中以激光熔覆加工粉嘴出口处为研究区

域,采用数字粒子图像测速(digital partical image velocimetry, DPIV)技术对粉末粒子流参量进行了试验研究,重点研究了与激光熔覆工艺相关的送粉参量(送粉量、气体流量)的条件下粉末流参量的分布变化。

1 试验系统及方法

1.1 试验系统

建立了如图1所示的粉末粒子流场测试试验台,

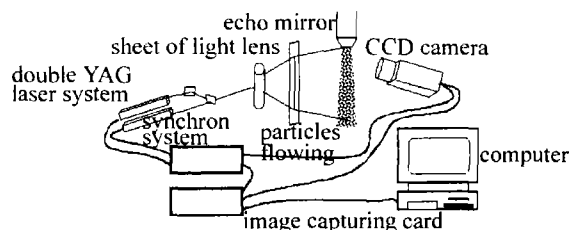


Fig. 1 Schematic view of the DPIV experimental set-up

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60478004)

作者简介:王春娴(1966-),女,副教授,主要从事计算机图形图像处理与应用研究。

E-mail: wchunxian@163.com

收稿日期:2009-05-05;收到修改稿日期:2009-05-26

整个试验的 DPIV 系统主要包括成像子系统和分析显示子系统。本工作中载气-粉末粒子流速度、浓度的试验测量是在该装置上完成的。选用了粉末材料 Ni60 镍基合金,其化学成分见表 1。气体为普通工业氮气。粉末粒子的运动是由载气送粉器、4 路分粉至同轴送粉嘴后所形成^[7]。

Table 1 Chemical composition of Ni60 alloy and physical properties

chemical composition(mass fraction)					
Ni	Cr	B	Si	Fe	C
other	0.1600	0.0380	0.0420	≤0.0500	0.0084

1.2 试验方法

以粉嘴中心为坐标原点(0,0,0),垂直向下为 z 轴方向即速度方向,取 y=0 截面区域为成像区域,大小约为 35mm×35mm(与激光加工状态相同)。由于成像系统针对不同工况成像时焦距与视场角均可能有一些小的调节,因此,在每一个工况测量的前后都需对一标准网格进行相同条件下的成像,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,可为速度、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。试验过程中分别考虑了不同送粉量和不同气体流量工况条件下的粉末流速度、浓度分布情况,共完成实验测量 64 个工况。为了减小粉末粒子流动过程中的不稳定对测量结果的影响,在每一测量工况下连续采集 20 个~30 个图像,因而共获取图像数据文件约 1600 个。图 2 为测量结果示意图。

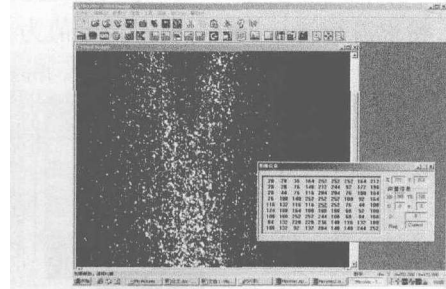


Fig. 2 Velocity vectors field for powder flow with DPIV

2 结果和讨论

2.1 不同送粉气体流量下粉末流速度、浓度的分布

在粉末流量 $m_p = 0.67\text{g/s}$ 、气体压力 $p_0 = 0.2\text{MPa}$ 一定的情况下,图 3 是不同气体流量下 DPIV 系统计

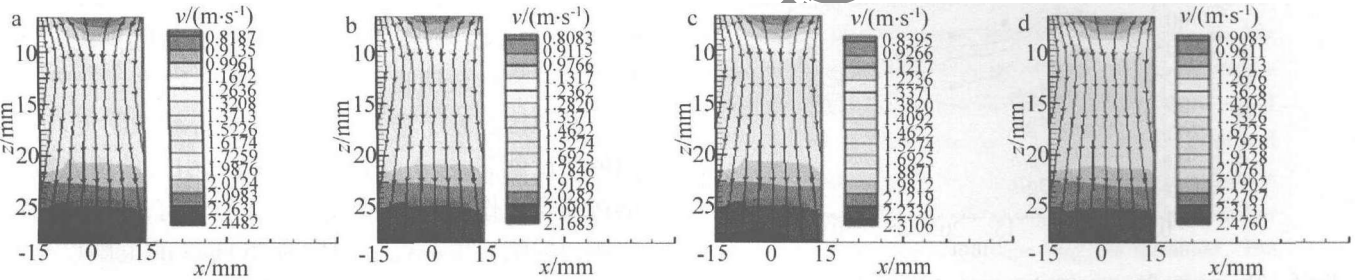


Fig. 3 Velocity field of the powder particles with different gas flow

a—gas flow value $Q = 0.6\text{m}^3/\text{min}$ b—gas flow value $Q = 0.8\text{m}^3/\text{min}$ c—gas flow value $Q = 1.2\text{m}^3/\text{min}$ d—gas flow value $Q = 1.4\text{m}^3/\text{min}$

算得到粉末流速度分布云图(x 为水平方向, $x \in [-12, 12]$)。从图中可以看到,粒子流的速度向量沿 z 轴正方向逐渐增加。起始和末端速度的具体值见表 2。显然由于气体流量的增加,使气相动能增加,对粉末粒子速度增加起到一定作用。气体流量大则同一位置(z 方向)的速度值也相应大,并使粒子速度梯度值增大。在 $z = 10\text{mm} \sim 32\text{mm}$ 区域粒子的速度彼此差别较大,显然大于由于气体流量变化所引起的差异。在 $z = 12\text{mm} \sim 17\text{mm}$ 区域速度值变化比较平稳,也说明该区域有一定的碰撞,影响 z 方向的速度值增加。对于 z 方向任一横截面,其中心处的速度最大;距离粉嘴出口中心线($x = 0$)越远,粒子速度变化越大。

Table 2 The velocity Ni metal particle with different gas flow

gas flow value/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	velocity($z = 0\text{mm}$)	velocity($z = 32\text{mm}$)
0.6	0.793m/s	1.82m/s
0.8	0.803m/s	2.16m/s
1.2	0.839m/s	2.31m/s
1.4	0.901m/s	2.47m/s

在粉末流量 $m_p = 0.67\text{g/s}$ 、 $p_0 = 0.2\text{MPa}$ 一定的情况下,取 x-y 截面的中心点(0,0,z)相邻区域为参考,变化气体流量,计算得到图 4 所示的浓度变化曲线。

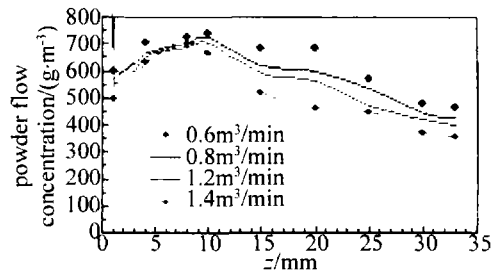


Fig. 4 The powder flow concentration curves with different gas flow in the z axis (the longitudinal section x-y center)

沿 z 轴方向,存在发散汇聚再发散的变化,第 1 发散区域在 $z = 0\text{mm} \sim 3\text{mm}$ 范围内,汇聚区域为 $z = 3\text{mm} \sim 12\text{mm}$,第 2 次发散在 $z = 12\text{mm}$ 以后的范围,但其发生的区间随气体流量的增加,不同程度的存在沿 z 轴方向下移,可见随气体流量的增加相对应的浓度有一定

的减少。发散汇聚再发散的变化是由于粉嘴结构及粉末参量综合作用的结果。

2.2 不同送粉量粉末流速度、浓度分布

图5为同一气体流量 $L = 1.2\text{m}^3/\text{min}$, $p_0 = 0.2\text{MPa}$ 条件下,不同送粉量、粉末粒子流动的速度分布云图。在同一种工况条件下,其速度值随远离粉嘴距离而增加,其增加幅度略大于重力加速度 g ,在 $z = 32\text{mm}$ 处,粉末流量为 0.33g/s 对应速度值为 2m/s ;

粉末流量为 0.50g/s 对应速度值为 2.16m/s ;粉末流量为 0.67g/s 对应速度值为 2.31m/s ;粉末流量为 0.83g/s 对应速度值为 2.38m/s 。由于粉末流量增加,粉末粒子势能起到一定作用,因而所转化的动能略有所增强。在中心区域(z 轴方向 $15\text{mm} \sim 20\text{mm}$),粒子间相互碰撞作用也相对增强(耗散增加),从而使粒子速度梯度减小(速度变化率减小)。

在气体流量为 $L = 1.2\text{m}^3/\text{min}$, $p_0 = 0.2\text{MPa}$ 条件

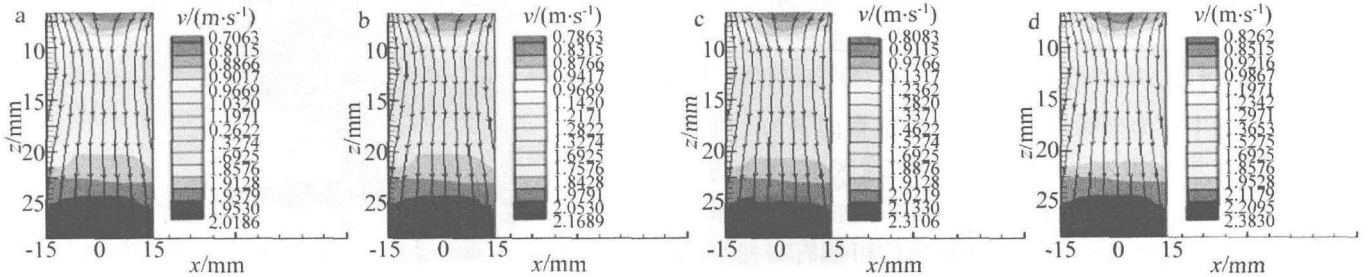


Fig. 5 Velocity field of the powder particles with different powder flow

a—feeding powder amount $m_p = 0.33\text{g/s}$ b—feeding powder amount $m_p = 0.50\text{g/s}$ c—feeding powder amount $m_p = 0.67\text{g/s}$ d—feeding powder amount $m_p = 0.83\text{g/s}$

下,取 $x-y$ 截面的中心点 $(0,0)$ 相邻区域为参考,变化送粉量,计算得到图6所示的浓度曲线。从图中可见,

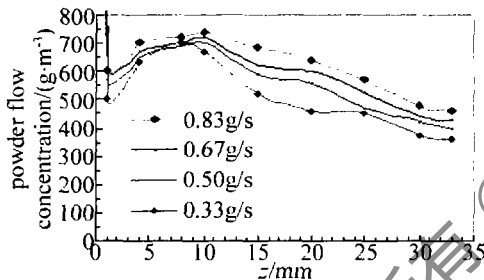


Fig. 6 The powder flow concentration curves with different powder flow in the z axis ($x-y$ section center)

随 z 轴方向存在发散汇聚在发散的变化,第1发散区域在 $z = 0\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 范围内,汇聚区域为 $z = 3\text{mm} \sim 10\text{mm}$,第2次发散在 $z = 10\text{mm}$ 以后的范围,随粉末流参量的变化,该区域变化不大,可见汇聚的实现与气体流量关系较大,而粉末流量的增加仅是浓度变化明显。

气体流量 $L = 1.2\text{m}^3/\text{min}$ 及 $p_0 = 0.2\text{MPa}$ 条件下,取 $z = 32\text{mm}$ 为参考截面(激光加工位置),图7为出粉口中心线($y = 0$)粒子浓度具体变化情况。由该测量结果可以看出,在距中心 x 轴线 $(-15, +15)\text{mm}$ 的范

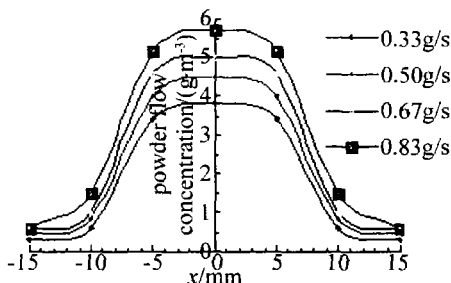


Fig. 7 The powder flow concentration curves of $x-y$ section at $z = 32\text{mm}$

围内,随着距粉嘴口中心线距离的增加,单位面积粉末粒子的数目有所减小,呈发散趋势。主要原因是同轴粉嘴出口的倾斜结构,导致粒子流汇聚以及粒子间碰撞等物理现象更加突出。由于粒子数量区别较大,汇聚发散区别比较明显。

其原因是粒子群主要聚集在中心轴线附近,近距离的浓度就高,由于气动及运动方向引发的粉末粒子的碰撞合力作用,粉末流主体的边缘也有一些粒子,结果距离粉嘴口中心线 $(-15, +15)\text{mm}$ 的范围以外的浓度很低。粉末流浓度逐渐减小。

3 小结

设计了 DPIV 试验装置,利用自主开发的 DPIV 图像处理软件,对气载粉末粒子流进行了测试研究。测量了气体流量、送粉量与粉末流参量之间定量关系,其结果与参考文献[8]~参考文献[10]中的数值模拟结果基本吻合。对指导送粉装置的设计,为进一步研究激光作用下粒子流与基体的结合特性提供试验依据,无疑具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] HU Q W, YANG T P, LI P, et al. Fabrication and affecting of metallic parts by means of laser freeforming[J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 403-405 (in Chinese).
- [2] LI P. Direct laser fabrication of 3-D metal parts based on laser cladding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005: 60-90 (in Chinese).

(下转第319页)

器之间接一个光隔离器时,观察不到光强的变化,从而说明前面观察到的信号确实是自混合散斑干涉信号。在耦合器与光纤自聚焦透镜之间加入一段10m左右的光纤跳线后,仍能观察到自混合散斑干涉信号,说明该系统的工作距离至少大于10m;而自由空间自混合散斑干涉系统的工作距离受聚焦透镜焦距的限制,通常只有厘米量级。由于采用了全光纤设计,光路更加灵活多变,系统抗干扰能力得到了极大的提高。

5 结论

基于自混合散斑干涉的原理,设计了一套全光纤自混合散斑干涉系统;从理论上分析了采用光纤传光,自聚焦透镜收集反馈光进行自混合散斑干涉的可行性;搭建了实验光路进行了实验研究,获得了较为理想的自混合散斑干涉信号,信号形式与传统的自由空间自混合散斑干涉形式一致;该系统的工作距离大于10m。该系统具有光路灵活多变、抗干扰能力强、工作距离远等优点。

参考文献

- [1] TOH S L, QUAN C, WOO K C, *et al.* Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique[J]. *Optical and Laser Technology*, 2001, 33(6):427-434.
- [2] LI E B, TIEU A K, WANG K F. Dynamic laser speckle method for determining the relative velocity between two objects[J]. *Opt Commun*, 2003, 219(1/6):1-8.
- [3] ZHOU J P, WANG M, HAN D F. Experiment observation of self-mixing interference in distributed feedback laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12):5301-5306.
- [4] WANG X J, ZHANG Sh L, TAN Y D. Development of optical feedback technology of LD pumped microchip lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1):9-13 (in Chinese).
- [5] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al.* Interference of two beams in a He-Ne laser with optical feedback[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5):470-472 (in Chinese).
- [6] SHIBATA T, SHINOHARA S, IKEDA H, *et al.* Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2):499-503.
- [7] SHIBATA T, SHINOHARA S, IKEDA H, *et al.* Automatic measurement of velocity and length of moving plate using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(6):1062-1067.
- [8] OZDEMIR S K, TAKASU T, SHINOHARA S, *et al.* Simultaneous measurement of velocity and length of moving surfaces by a speckle velocimeter with two self-mixing laser diodes[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(10):1968-1974.
- [9] OZDEMIR S K, ITO S, SHINOHARA S, *et al.* Correlation-based speckle velocimeter with self-mixing interference in a semiconductor laser diode[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(33):6859-6865.
- [10] NORGIA M, DONATI S, D'ALESSANDRO D. Interferometric measurement of displacement on a diffusing target by a speckle tracking technique[J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(6):800-806.
- [11] LU M, WANG M, HAO H. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2):190-194 (in Chinese).
- [12] LU M, WANG M, HAO H, *et al.* Self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9):1229-1236 (in Chinese).
- [13] WANG M, LU M, HAO H, *et al.* Statistics of the self-mixing speckle interference in a laser diode and its application to the measurement of flow velocity[J]. *Opt Commun*, 2006, 260(1):242-247.
- [14] HUANG W, LÜ L, GUI H Q, *et al.* Analysis on the laser self-mixing vibration signal transmitted through optical fiber[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2006, 33(1):50-53 (in Chinese).
- [15] de GROOT P J. Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(7):1199-1214.

(上接第302页)

- [3] SHEN X F, WANG Y, YAO J, *et al.* Finite element simulation of thermal stress distribution in direct metal laser sintering [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4):343-346 (in Chinese).
- [4] LIU Zh X, HUANG W D, WAN B T. Investigation of basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(6):567-570 (in Chinese).
- [5] LIN J M. Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding[J]. *Journal of Laser Application*, 2000, 12(1):28-33.
- [6] XI M Zh, YU G, ZHANG Y Zh, *et al.* Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4):562-566 (in Chinese).
- [7] YANG X Ch, LI H Sh, LEI J B, *et al.* DPIV method of measurement of powder stream of co-axial feeding for laser manufacturing[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5629:93-102.
- [8] LI H Sh, YANG X Ch, LEI J B, *et al.* A numerical simulation of movement powder flow and development of the carrier-gas powder feeder for laser repairing[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5629:557-564.
- [9] YANG X Ch, LEI J B, LIU Y W, *et al.* Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7):993-997 (in Chinese).
- [10] JIN X Sh, YANG X Ch, FENG L W, *et al.* Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(5):161-166 (in Chinese).