

激光熔覆中金属粉末流的参数检测

杨楠¹ 董华军²

(¹天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)
²大连交通大学机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要 在激光熔覆中, 金属粉末粒子的运动情况直接影响熔覆的效果。由于金属粉末粒子的平均直径只有 50 μm , 同时因为其相互间碰撞, 运动行为极其复杂, 所以粒子的运动很难测量。讨论了应用数字粒子图像测速来对粒子的运动进行测量的方法, 采用这种方法, 可以通过两张具有一定时间间隔的图片来确定粒子流的位移矢量场。速度场可以通过位移场除以时间间隔得到, 从而确定粉末流的汇聚角、发散角以及纵横方向的速度分布。结果表明, 粒子测速方法可以满足粉末测速的需要, 对激光熔覆工艺具有指导作用。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 速度矢量场; 粒子测速

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100108

Parameters Mensuration of Metal Powder Flow in Laser Cladding

Yang Nan¹ Dong Huajun²

¹ Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

² School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China

Abstract In laser cladding, the movement of the metal powder particles influences the cladding results directly. However, the movements of the metal powder particles are too hard to measure because the average diameter of the particles is about 50 μm and the movement behavior is very complex (collision of each other). The image process method based on digital particle image velocimetry (DPIV) technology is used to recognize the most particles. By this means, two images of the particle stream with a time interval are provided to determine the displacements of particles. Therefore, the velocity-vector field of the whole powder stream is obtained. Then, the convergence angle and the divergence angle of the powder flow can be measured by the velocity vectors, and the convergence region can be determined by the region of the maximum intensity of light. Results show that DPIV meets the needs of laser cladding and plays the role of guidance.

Key words laser technique; laser cladding; velocity vector field; particle image velocimetry

OCIS codes 140.3390; 350.4990; 020.2649

1 引 言

近年来, 激光熔覆作为一项新兴的制造技术而被广泛应用于航天航空、石油化工、机械电子和能源环境等领域。激光熔覆可以被概括为如下过程: 金属粉末粒子由载流气体携带从同轴粉嘴喷至基材表面, 在空中被一束与粉嘴共轴的激光加热至熔融状态, 同时基材表面也被激光加热, 局部形成熔池, 金属粉末的熔融物进入该熔池与其内的金属液混合,

随着基材与激光的相对移动该熔池冷却, 便形成熔覆层, 用以弥补基材缺陷或提高基材的各项力学性能。

在激光熔覆过程中, 粒子流的运动参数对覆层的形成有重要的影响, 因此有必要开发出一套系统对运动参数进行检测。目前, 发展起来的粒子测速技术恰恰可以满足这种需要。田文栋等^[1]建立了一套数字粒子图像测速 (DPIV) 系统用于对近千平方

收稿日期: 2010-07-10; 收到修改稿日期: 2010-12-06

作者简介: 杨楠(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光再制造中参数设计方面的研究。

E-mail: gracey79n@yahoo.com.cn

米区域内流体表面流场进行快速测量,并提出了改进算法。王延颀等^[2]阐述了 DPIV 的实验原理和实现方法,实现了流体从点测量到场测量的突破。高殿荣等^[3]介绍了 DPIV 技术及其在流场中的应用,并给出了矩形腔内流场的测试结果。孙鹤泉等^[4]研制了双 CCD 单镜头 DPIV 系统,并对图像数据进行了分析处理。吴龙华等^[5]依据采样定理提出了确定相关分析窗口尺寸的新依据。田晓东等^[6]提出了一种极快速又精确的 DPIV 方法。Olcay 等^[7]应用 DPIV 技术研究了喷嘴射流的涡流环问题。Natrajan 等^[8]在不同的雷诺数下应用加入微观示踪粒子的微观 DPIV 技术对毛细管流的迁移性质进行的研究。Peng 等^[9]根据 DPIV 测量方法进行了因游水动物而产生的不稳定流体的力、速度和质量传递的定量研究。Mao 等^[10]应用粒子图像测速技术研究了平行板结构周围流体湍流的振动特性。本文主要研究了冷粉末流速度场检测的原理和方法。

2 检测原理

检测系统如图 1 所示,组成部件包括:YAG 脉冲激光器、2D 片光源光学器件、反射镜、计算机和 CCD 相机等。激光由激光器输出后经过 2D 片光源光学器件,变为厚度仅有 1 mm 的平面光,照射正在下落的粉末流,之后被反射镜反射,再次照射粉末流。CCD 相机采取正入射方式(CCD 轴线 a 与喷嘴轴线相交并垂直于平面光)拍摄在平面光内的粉末粒子,所得照片如图 2 所示。图 2 为从粉嘴喷出的粉末流在两个时刻(很短的时间间隔)的照片,由于粉嘴是环形的,所以照片显示两股粉末相交。

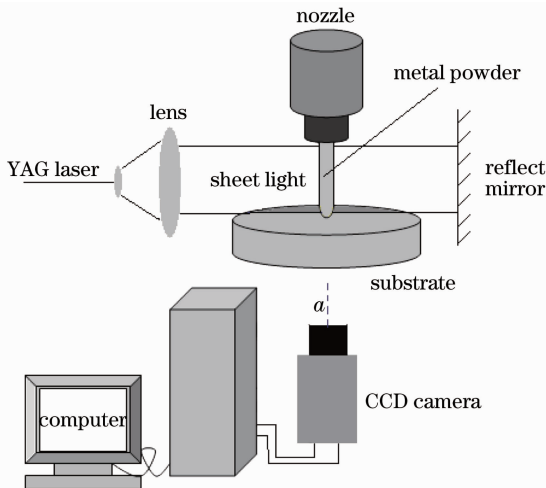


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental setup

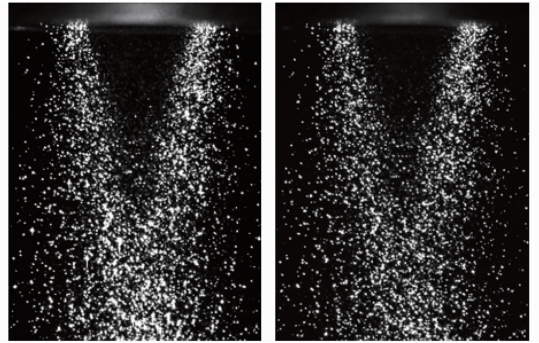


图 2 CCD 所得粉末流照片(喷粉速度 0.5 m/s)
Fig.2 CCD images of the powder flow (powder spraying velocity is 0.5 m/s)

3 数字图像处理算法

如果直接采用图片像素处理命令操作图片内参数的话,容易使运算时间变得较长,因此在相邻某个时间段的两张粉末流图片拍好后,最好将图片的灰度值存在与之对应的两个整形数组内,今后对图片的处理就等同于对数组的处理,实验证明对数组的处理速度非常快。

转化后的两个数组被分成大小相同的若干子块,这样,寻找两张图片中的同一粒子的任务就变成了寻找两数组中相关系数最大的诸多子块对。如果被寻找的某一子块内没有粒子,而是呈现黑色的背景,这时候就不需要在第二个数组中寻找与之匹配的子块。判断某一子块中是否有粒子,可以采取统计这子块中超过某一灰度阈值的像素个数的方式,一旦统计出的像素数目达到或超过规定阈值便认为其中存在粒子,反之则认为没有粒子。

为了提高搜索的效率,在第二个数组中采取局部搜索的方法。如图 3 中灰色区域即为搜索区域,由于粒子不可能向上运动,所以搜索区域不包括 G_1 上方像素的矩形。

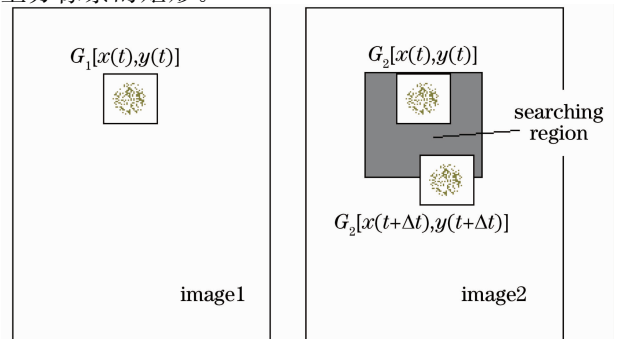


图 3 粒子速度测量值计算
Fig.3 Calculation of the measurement value of particle velocity

所得到的对应子块在两数组中位置坐标的差便是粒子位移矢量的两个分量,它们分别除以拍摄的时间间隔便得到两个速度分量,形成速度场。

相关系数的计算式为

$$R_s(m, n) = \frac{\sum_j \sum_i G_1(i, j) G_2(i + n, j + m)}{\sqrt{[\sum_j \sum_i G_1^2(i, j)] [\sum_j \sum_i G_2^2(i + n, j + m)]}}, \quad (1)$$

式中 $G_k(x, y)$ 指在第 k 个灰度矩阵中,坐标为 (x, y) 的像素点的灰度值, m, n 分别表示 x 与 y 方向上的位置偏移量, R_s 表示相关系数。

速度分量的计算式为

$$v_x = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} d, \quad (2)$$

$$v_y = \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} d, \quad (3)$$

式中 $[x(t), y(t)]$ 和 $[x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)]$ 分别是 G_1 和 G_2 的像素坐标, d 为单位像素所对应的实际尺寸 Δt 为拍摄时间间隔。所测得子块 G_1 的速度实为粒子群的速度,但是由于 G_1 足够小,故可以此速度估计 G_1 内各个粒子的速度。

各个粒子的速度计算流程图如图 4 所示。

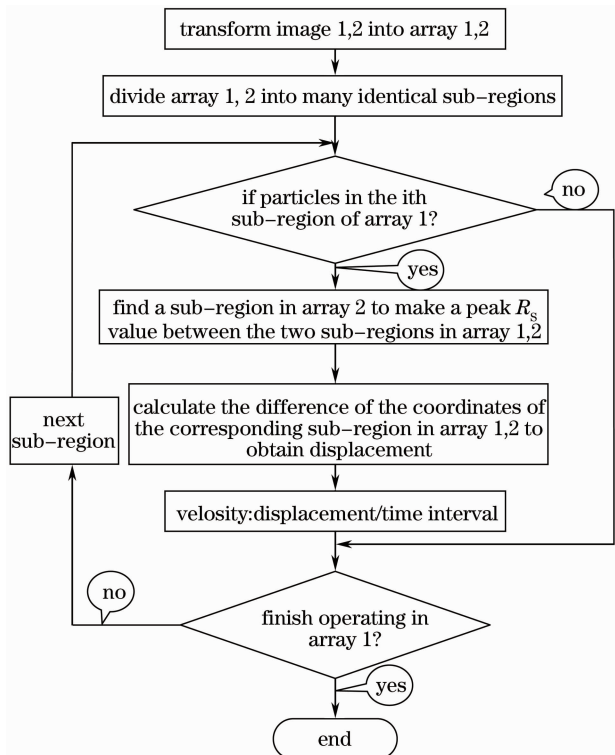


图 4 各粒子的速度计算流程

Fig. 4 Velocity calculation flow chart of the various particle

4 检测结果和分析

采用以上算法编制相应程序对图 2 照片进行数字图像处理,获得粒子在两照片中的对应位置,并选择其中 3 个粒子对,如图 5 所示。可见,在肉眼观测的角度,左侧 3 个方框中粒子的排布形态和右侧的排布形态相似,它们都具有最高相关值。

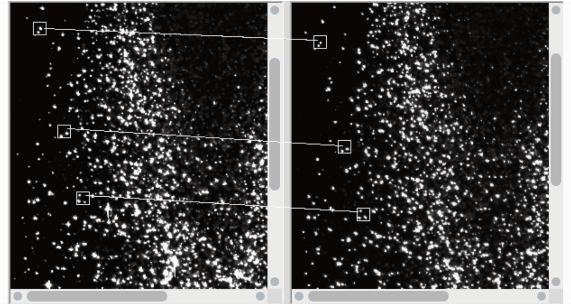


图 5 粒子在两照片中的对应位置

Fig. 5 Corresponding position of the same particle in two images

对照片中每一个子块进行同样的处理,就可以得到粉末流的位移场,如图 6 所示,箭头的方向代表该子块移动的方向,长短代表位移的大小。从图中可以看出,粉嘴喷出后,粒子做扩散运动,即:粒子在水平方向上互相远离,这是被粉嘴外静止的环境空气“打散”的结果。随着高度的降低,粒子位移的水平分量慢慢变为零,这是环境气体的阻碍造成的;由于重力的作用,竖直分量逐渐增大。并且位移场体现出存在粉末子块的位移,无粉末的子块没有位移。值得指出的是:有一些杂乱的箭头,它们的指向和四周箭头的指向很不一致,可能是对子块的错误识别造成的,在今后的研究中可对其进行插值优化^[11]。但是有规律的矢量还是非常具有价值的,可以以此辨别出粒子的走向。

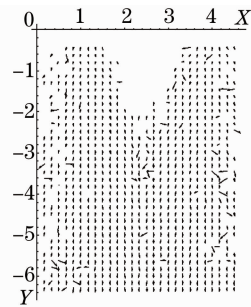


图 6 粉末流位移场

Fig. 6 Displacement field of powder flow

图 8~11 为图 7 中 4 条直线上粒子速度分布的测量值。在图 7 中,线 1 为通过粉嘴出口的竖直线,线 2 为粉嘴轴线,线 3(在 A、D 中点位置)为会聚区

域上方的水平线,线4(在D、E中点位置)为会聚区域下方的水平线。

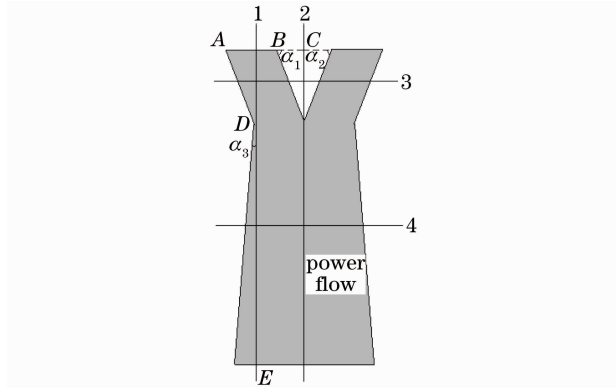


图7 速度分布位置

Fig. 7 Position of velocity distribution

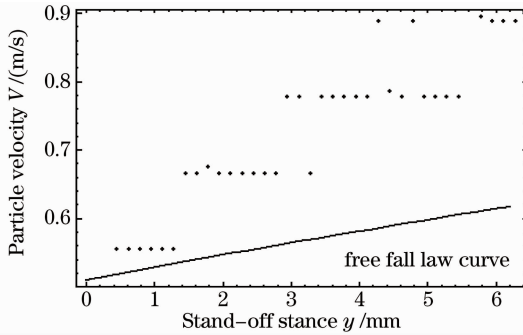


图8 线1上粒子测量速度与自由落体曲线比较

Fig. 8 Comparison of measuremental velocity and free fall law curve of particles on line 1

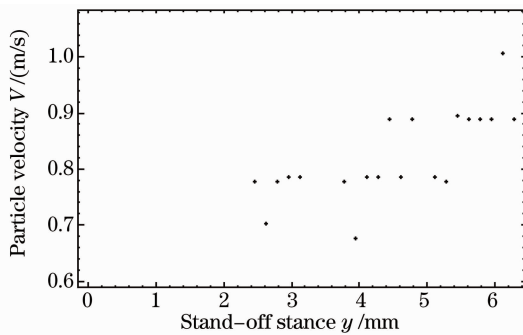


图9 在线2上粒子速度分布测量值

Fig. 9 Measurement value of velocity distribution of particles on line 2

如图8所示,线1上粒子速度呈阶梯状递增分布,在计算粒子的像素位移时,发现有一些相邻子块的像素位移值相同,所以按(2)、(3)式计算得到的速度值也就相同,形成阶梯状。此外,阶梯的数目取决于子块划分的大小,子块很小时阶梯数目增多,更接近于连续曲线,但是太小的子块容易造成识别率的降低。图中连续曲线为粒子做自由落体时,速度随高度变化(实为抛物线),可以看出由于载流气体的

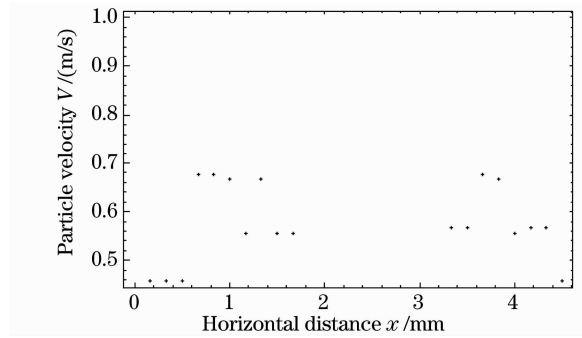


图10 在线3上粒子速度分布测量值

Fig. 10 Measurement value of velocity distribution of particles on line 3

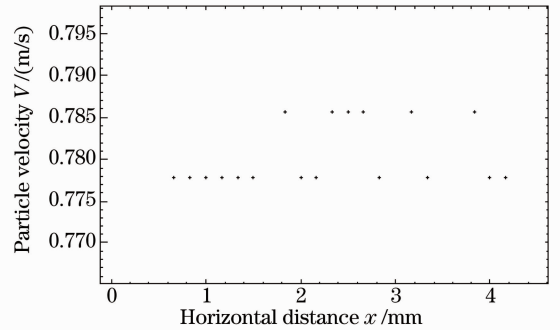


图11 在线4上粒子速度分布测量值

Fig. 11 Measurement value of velocity distribution of particles on line 4

推动,粒子速度远大于自由落体的速度。图9中线2上粒子速度分布测量值也有类似规律,大约在0~2 mm区间内,粉末还没有交汇,所以该区间内没有粉末速度值。

如图10所示,线3上粒子速度分布测量值在0~2 mm和3~5 mm区间内各有一个速度峰值,这是由于在粉末流的边缘受环境空气阻碍作用的粒子速度较低,中间速度较高。2~3 mm区间由于粉末尚未交汇,所以没有速度值。图11是交汇区域下方粒子速度水平分布测量值,同样遵循中间高、两端低的速度分布原则。此外,还可以在照片中测得图7中相应位置的参数:左侧粉嘴出射的粒子汇聚角约为 $\alpha_1 = 78.3^\circ$,右侧约为 $\alpha_2 = 71.3^\circ$ 。左右两侧粉末交汇后形成一股粉末流,没有发现明显的发散角 $\alpha_3 \approx 0$ 。

5 结 论

介绍了应用数字图像处理技术测量激光熔覆过程中金属粉末流参数的原理和方法。先得到某一子块在另一照片中的相关子块,继而得到了金属粉末的速度场测量值分布。测量结果表明,粒子刚被喷

出时,从粉嘴口分散而出,之后水平速度分量逐渐趋零,竖直分量逐渐增加,速度呈现阶梯状分布。在竖直方向,由于气流和重力作用粒子速度逐渐增加;在水平方向,由于环境空气的阻碍作用,粉末流边缘处和环境空气接触部位的粒子速度较低,中心处粒子速度较高。

参 考 文 献

- 1 Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi. Application of DPIV measurement system in physical model tests [J]. *J. Hydrodynamics*, 2001, **16**(2): 211~213
田文栋, 魏小林, 盛宏至. DPIV 系统在河工模型试验中的应用研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2001, **16**(2): 211~213
- 2 Wang Yanting, Zhang Yongming, Liao Guangxuan *et al.*. The principle and realization of digital particle image velocimetry[J]. *J. China University of Science and Technology*, 2000, **30**(3): 302~306
王延颀, 张永明, 廖光焯 等. 数字粒子图像速度测量原理与实现方法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2000, **30**(3): 302~306
- 3 Gao Dianrong, Wang Yiqun, Shen Gongxin. DPIV technique and its application in flow field measurement[J]. *Hydr. Pneum and Seals.*, 2001, **89**(5): 30~33
高殿荣, 王益群, 申功妍. DPIV 技术及其在流场测量技术中的应用[J]. *液压气动与密封*, 2001, **89**(5): 30~33
- 4 Sun Hequan, Kang Haigui. Processing of DPIV data[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, **40**(3): 364~367
孙鹤泉, 康海贵. DPIV 流场测试技术中的数据处理的[J]. *大连理工大学学报*, 2000, **40**(3): 364~367
- 5 Wu Longhua, Yan Zhongmin, Tang Hongwu. Determination of the correlation window sizes in correlation analysis of DPIV[J]. *Advances in Water Science*, 2002, **13**(5): 594~598
吴龙华, 严忠民, 唐洪武. DPIV 相关分析中相关窗口大小的确定[J]. *水科学进展*, 2002, **13**(5): 594~598
- 6 Tian Xiaodong, Li Yuliang, Chen Jiafan. A new method to improve the technique of DPIV[J]. *Advances in Water Science*, 2000, **11**(1): 59~63
田晓东, 李玉梁, 陈嘉范. 一种新改进的 DPIV 方法[J]. *水科学进展*, 2000, **11**(1): 59~63
- 7 A li B. Olcay, Paul S. Krueger. Measurement of ambient fluid entrainment during laminar vortex ring formation [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, **44**(2): 235~247
- 8 V. K. Natrajan, K. T. Christensen. Microscopic particle image velocimetry measurements of transition to turbulence in microscale capillaries[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, **43**(1): 1~16
- 9 Jifeng Peng, John O. Dabiri. A potential-flow, deformable-body model for fluid-structure interactions with compact vorticity: application to animal swimming measurements[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, **43**(5): 655~664
- 10 Xiaoran Mao, Artur J. Jaworski. Application of particle image velocimetry measurement techniques to study turbulence characteristics of oscillatory flows around parallel-plate structures in thermoacoustic devices [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(3): 035403
- 11 L. B. Fore. Reduction of peak-locking errors produced by Gaussian sub-pixel interpolation in cross-correlation digital particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(3): 035402