

数字全息技术应用于气固两相流测量

薛志亮 吴学成 赵华锋 王 肖 陈玲红 樊建人 邱坤赞 岑可法

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室,热能工程研究所,浙江 杭州 310027

摘要 激光数字全息技术具有三维、非接触测量流场的能力,在颗粒场三维诊断领域具有巨大的应用潜力。对数字全息技术同时测量气固两相流场中固相大颗粒和气相示踪小颗粒进行了模拟和实验研究。模拟研究了大颗粒的存在对小颗粒检测成功率及精度的影响,以及全息对小颗粒的测量能力。在利用小波函数重建颗粒全息图和识别定位的基础上,获得流场中颗粒粒径及空间分布。利用所搭建的双光路激光数字全息系统对颗粒场进行实验测试,系统成功地对被测流场区域的颗粒场进行了重建,获得的颗粒粒径分布与实际情况基本吻合。结果表明:应用该系统测量多相流流场颗粒粒径、三维位置是可行性的。

关键词 全息;气固两相流;颗粒粒径;空间分布

中图分类号 TB877.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s209001

Gas-Solids Flow Measurement by Digital In-Line Holography

Xue Zhiliang Wu Xuecheng Zhao Huafeng Wang Xiao

Chen Linghong Fan Jianren Qiu Kunzan Cen Kefa

*Institute of Thermal Power Engineering, State Key Laboratory of Clean Energy Utilization,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

Abstract For multiple-phase flow measurement, digital in-line holography has the advantages of three-dimensional (3D) and non-contact. It has been found to be a powerful tool in 3D diagnostics of particle field. A study on large and small particles in gas-solids flow field using a digital holographic system is presented. Firstly, the numerical simulation is conducted to study the precision influence of small particles measurement when large particle is existed in the flow field, and the capability of holography measurement on small particles. Secondly, the recorded particle hologram is numerically reconstructed by using wavelet transform algorithm. The size and spatial distribution of particles are obtained based on identification and 3D location of particles. In the experiments, by using digital in-line holographic measurement system, the particle fields are tested. It is found that the particles in the measurement volume are successfully reconstructed, and the measurement results of particle size distribution agree with the actual parameter. This indicates the feasibility that digital in-line holography is used to measure particle sizing and 3D position with different particle sizes and concentration distribution in multiple-phase flow.

Key words holography; gas-solids flow; particle sizing; special location

OCIS codes 090.1995; 200.4740; 100.2960

1 引 言

多相流在能源、环境、化工和生物等领域应用广泛,如煤粉颗粒气力输送^[1],液体燃料雾化燃烧^[2],沙尘暴迁移^[3],城市污水治理^[4],人体血液循环等^[5]。尤其在能源领域,煤粉粒径、浓度的在线测量可以保证磨煤机的优化运行,燃烧器给粉的均匀性,是合理组织炉内煤粉燃烧、提高燃烧效率降低污染物排放的基础。为

收稿日期: 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51390491)、中央高校基本科研业务费专项基金(2014FZA4012)

作者简介: 薛志亮(1990—),男,硕士研究生,主要从事气固两相流边界层测量方面的研究。E-mail: xuezhiliang1314@163.com

导师简介: 吴学成(1978—),男,博士,副教授,主要从事多相流光学诊断技术等方面的研究。E-mail: wuxch@zju.edu.cn

(通信联系人)

了清洁高效地利用能源,研究多相流中颗粒粒径、浓度分布具有重要意义。目前,对于多相流的测量方法主要有流动显示法^[6],粒子图像测速(PIV)^[7-8],相位多普勒测速(PDA)^[9-10]等。激光数字全息技术^[11]可以测量多相流中颗粒的粒径、浓度分布,以及三维位置信息,在多相流流场诊断领域具有巨大的应用潜力。

国内外学者对应用激光数字全息技术测量多相流中颗粒的粒径分布、三维位置进行了大量的研究。其中有非规则的固体颗粒^[12-14]、雾化液滴^[15-16]、气泡^[17-18]以及火焰中燃烧着的颗粒^[19],颗粒粒径多分布在 20~100 μm ,结合显微全息技术,测量的颗粒可以小到几个微米,甚至纳米级^[20]。对于气固两相流,气相的示踪粒子一般为几微米,固相颗粒粒径为几十微米,甚至上百微米。要获得气相和固相的速度分布,就要求全息技术能够同时识别几微米和几十微米的颗粒。在这方面,学者们研究较少。为了探究该方法的可行性,本文模拟研究了大颗粒的存在对颗粒检测成功率及精度的影响,以及全息对小颗粒的测量能力。搭建了双光路激光全息测量颗粒粒径、三维位置的实验系统,对不同粒径范围的实验样品进行了测试,证实了该方法的可行性。

2 数字全息测量理论

数字全息技术包含两个步骤,全息图记录与波前重建。平行光照射条件下,数字同轴全息记录示意图见图 1。经准直扩束的平行激光束照射到目标颗粒上,光线发生散射产生物光波(颗粒散射光)。由于和参考光的光程不同,当存在的相位差满足一定条件时,物光波与参考光二者发生干涉,干涉条纹图最后被 CCD 平面记录,形成全息图。全息图波前重建以标量衍射理论为基础,采用小波重建算法对记录图进行重建再现,从而获得流场中颗粒的粒径与三维位置信息。

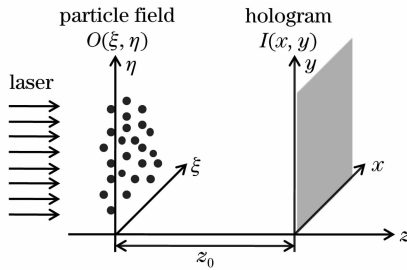


图 1 数字全息记录示意图

Fig. 1 Schematic of digital holographic recording

2.1 全息记录

图 1 表示在平行光束照射条件下,流场颗粒全息记录过程的示意图。假设流场中物平面上颗粒光强函数为 $O(\xi, \eta)$, z_0 为颗粒场平面与全息记录平面之间的距离,则 CCD 阵列面记录的干涉条纹光强 $I_{z_0}(x, y)$ 可表示为

$$I_{z_0}(x, y) = 1 - \frac{2}{\lambda z_0} O(x, y) \otimes \sin \left[\frac{\pi}{\lambda z_0} (x^2 + y^2) \right], \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波波长, \otimes 是对函数作二维卷积运算。

2.2 全息重建

数字全息图数值重建以标量衍射理论为基础,目前主要有菲涅耳近似^[21]、衍射积分卷积、小波变换^[22]以及分数傅里叶变换^[23]等算法。研究表明基于小波变换的全息图重建算法具有重建图像信噪比高、图像背景均匀等优点^[24]。本文采用小波变换算法来对全息图进行重建。

考察一个小波基函数 $\Psi(x, y) = \sin(x^2 + y^2)$ 和尺度参数 $\alpha = (\lambda z_0 / \pi)^{1/2}$, 构造小波函数可表示为

$$\phi_\alpha(x, y) = \frac{1}{\alpha^2} \sin \left(\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2} \right), \quad (2)$$

则(1)式可表示为

$$I_{z_0}(x, y) = 1 - \frac{2}{\pi} O(x, y) \otimes \phi_\alpha(x, y), \quad (3)$$

可以看出,全息图的光强分布函数可以被描述为物函数的小波变换。

全息图的光学重建过程等同于全息图记录的逆过程。由于衍射过程和全息图的形成过程均能用小波变换来表征,因此可以用全息图 $I_{z_0}(x, y)$ 的小波变换来表示:

$$\text{WT}_{I_z}(k, x, y) = I_{z_0}(x, y) \otimes \phi_k(x, y). \quad (4)$$

由于构造的小波函数还不足严格意义上的小波函数,需要适当调整。一方面,引入调零参数 M_ϕ ,使 $\phi_k(x, y)$ 均值为零;另一方面,引入一个高斯窗函数,在空域和频域对小波函数进行限制,使其在偏离中心点的区域迅速趋零。则校正的小波函数可以表示为

$$\phi_k(x, y) = \frac{1}{k^2} \left[\sin\left(\frac{x^2 + y^2}{k^2} - M_\phi\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{k^2 \sigma^2}\right), \quad (5)$$

式中

$$M_\phi = \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^4}, \quad (6)$$

其中 σ 代表窗口函数的宽度,它依赖于帧采集特性,可表示为

$$\sigma = \min\left[\frac{N\delta_{\text{ccd}}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda z} \ln(\epsilon^{-1})}, \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \lambda z}{\ln(\epsilon^{-1})}}\right]. \quad (7)$$

以上是基于小波变换的全息图重建算法,当颗粒场全息图被数码相机拍摄后,首先选定图像重建平面的位置 z ,生成对应该平面的小波函数,对全息图和小波函数进行卷积,即得到该平面的重建图像。对间隔为 Δz 的多个平面进行上述重建,不同位置的颗粒会在相应的重建平面上聚焦,颗粒所在聚焦平面的位置即颗粒 z 轴位置,结合图像二值化确定颗粒的 x, y 方向坐标,可获得颗粒的三维空间位置。其中 Δz 是重建采样间隔。

与传统的菲涅耳近似和衍射积分卷积重建算法相比,小波变换的重建图像具有图像信噪比高且图像背景均匀的优点,其主要原因是空域和频域均受限的合适尺度的小波函数充分利用了粒子干涉图像信息的同时也很好地屏蔽了噪音的干扰。

3 数值模拟

基于 Lorenz-Mie 理论,模拟生成不同粒径大小颗粒全息图,采用小波变换方法重建颗粒场图像,研究大、小颗粒粒径和位置对重建图像中颗粒的识别,形状测量及定位的影响。对全息图的处理过程主要由以下几个步骤组成:

1) 采用基于 Lorenz-Mie 理论的程序产生不同粒径大小的颗粒全息图;

2) 运用小波变换法对颗粒全息图进行重建,获得重建区域内一定间距的重建平面光强图。采用景深扩展的方法,将各个截面上聚焦的颗粒整合到景深扩展图。设定合适的灰度阈值,对重建图像进行二值化处理,将颗粒从背景中识别出来。基于二值化后颗粒面积和聚焦截面的位置,获得颗粒的粒径和空间位置;

3) 基于最邻近匹配原则来匹配模拟颗粒和重建颗粒。

假设 H, R 分别表示全息记录图和重建图, $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 表示全息图上各颗粒的位置坐标, $\{P_1', P_2', \dots, P_n'\}$ 表示重建图上各颗粒的位置坐标,可表示为

$$\begin{aligned} \{P_1, P_2, \dots, P_m\} &= \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}, \\ \{P_1', P_2', \dots, P_n'\} &= \{(x_1', y_1'), (x_2', y_2'), \dots, (x_n', y_n')\}. \end{aligned} \quad (8)$$

模拟颗粒 P_i 通过查找其重建全息图上最近距离的颗粒 P_j' 来进行匹配,且要求距离要小于模拟颗粒粒径的 $1/3$,可表示为

$$D_{ij} = D(P_i, P_j') = \sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2} \leq \frac{1}{3} d_i, \quad (9)$$

式中 d_i 是第 i 颗模拟颗粒的粒径。

4) 计算颗粒重建效率 R_p , 颗粒粒径误差 E_d , z 轴定位误差 E_z , 可表示为

$$R_p = \frac{N_e}{N_h},$$

$$E_d = \left| \frac{d_h - d_e}{d_h} \right|,$$

$$E_z = \left| \frac{z_h - z_e}{z_0} \right|,$$
(10)

式中 N_h 、 N_e 、 d_h 、 d_e 、 z_h 和 z_e 分别表示全息记录图和重建图上颗粒数、粒径和 z 轴位置。

3.1 大颗粒对显微全息测量精度影响

利用数字显微全息测量颗粒空间位置及粒径分布,已有学者模拟研究了入射波长、颗粒浓度、样本空间深度、记录距离及 CCD 分辨率等参数对重建结果的影响^[25]。用双光路法测量气固两相流颗粒位置及粒径分布时,难免会有大颗粒出现在显微全息的视场中。为了研究大颗粒的存在对颗粒检测成功率及精度的影响,分析数字显微全息测量气固两相流场中颗粒粒径及其空间分布的能力,分别以颗粒粒径和距离为变量,模拟计算颗粒的重建率、粒径误差和 z 轴定位误差。

模拟实验的模型如图 2 所示。首先模拟单个大颗粒存在的情况,其次是小颗粒场的模拟,最后模拟大颗粒存在对周围小颗粒重建的影响,具体的模拟参数见表 1。主要模拟计算了 $40 \mu\text{m}$ 颗粒周围不同距离处小颗粒的重建误差,以及 6 个 $5 \mu\text{m}$ 小颗粒中间存在 $8, 20, 40 \mu\text{m}$ 颗粒时,颗粒的重建误差。

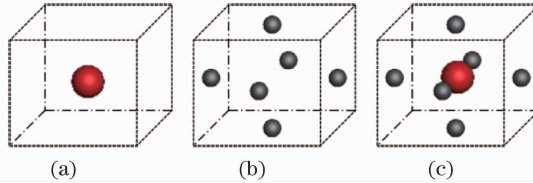


图 2 颗粒场模拟模型

Fig. 2 Simulation model of particle field

表 1 不同颗粒大小的颗粒场模拟参数

Table 1 Simulation parameters of particle field with different particle sizes

Parameters	Values
Wavelength	532 nm
Resolution	1024 pixel×1024 pixel
Pixel size	0.45 μm
Sample space	$X=460 \mu\text{m}$
	$Y=460 \mu\text{m}$
	$Z=0\sim500 \mu\text{m}$
Refractive index	1.5

距离大颗粒($40 \mu\text{m}$)不同距离的小颗粒($5 \mu\text{m}$)模拟结果见图 3。分析颗粒场的重建率、粒径误差、 z 轴定位误差随颗粒之间距离的变化,表明当距离小于 $40 \mu\text{m}$ 时,小颗粒不能识别,而且导致大颗粒的粒径测量误差急剧增大。当距离大于等于 $40 \mu\text{m}$ 时,大、小颗粒都能够被识别,粒径测量误差稍有波动。

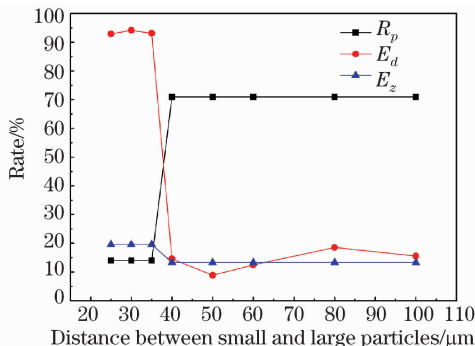


图 3 距离大颗粒($40 \mu\text{m}$)不同距离的小颗粒($5 \mu\text{m}$)的模拟结果

Fig. 3 Simulated result of the small particles ($5 \mu\text{m}$) with different distances of large particles ($40 \mu\text{m}$)

不同粒径大小的颗粒以及其周围的小颗粒的模拟结果见表 2。随着粒径的增加,单个大颗粒的粒径测量误差减小, z 轴定位误差增大;对于小颗粒,由于大颗粒的存在,使得其粒径测量误差增大,而对 z 轴定位影响不大。通过模拟发现,沿着光的传播方向,颗粒位置会对颗粒的识别、粒径测量造成很大的影响。例如,两个 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒位于同一条直线上,相距 $100\ \mu\text{m}$,结果只能重建出光先照到的颗粒,而且后一个颗粒的存在使粒径测量误差增加 20% , z 轴定位误差增加 12% ;当一个大颗粒($8, 20, 40\ \mu\text{m}$)前后分别有小颗粒($5\ \mu\text{m}$)时,小颗粒基本不能识别,还会使大颗粒的 z 轴定位误差增大,但对大颗粒的粒径测量误差影响较小。以上模拟结果表明在数字显微全息测量颗粒场时,大颗粒浓度过高会对小颗粒的测量结果造成影响,实际测量过程中,应选择大颗粒较少或小颗粒距离大颗粒较远的全息图进行重建,以提高数据的准确性。

表 2 大颗粒以及其周围的小颗粒的模拟结果

Table 2 Simulated result of large particles and the surrounding small particles

Diameter / μm	Model a			Model b			Model c		
	R_p	E_d	E_z	R_p	E_d	E_z	R_p	E_d	E_z
8	1	0.027	0.059	0.83	0.083	0.140	0.71	0.106	0.143
20	1	0.015	0.098	0.83	0.083	0.140	0.71	0.164	0.147
40	1	0.013	0.385	0.83	0.083	0.140	0.71	0.189	0.133

3.2 全息测量小颗粒的能力

前面讨论了显微全息中大颗粒的存在对小颗粒测量准确性的影响。下面探讨全息测量小颗粒的能力。

颗粒场模拟的模型如图 4 所示,具体的模拟参数见表 3。为了反映光波场之间的干涉情况,引入干涉条纹可见度这一物理量,其定义为

$$V = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max} + G_{\min}}, \quad (11)$$

式中 G_{\max} 和 G_{\min} 分别代表干涉条纹中亮条纹的最大光强和暗条纹的最小光强。实际上可见度也反映了颗粒能否被识别,随着可见度的降低,颗粒的干涉条纹将变得模糊,从而引起重建误差增大。

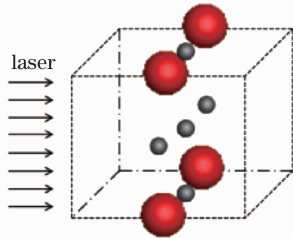


图 4 颗粒模拟模型

Fig. 4 Simulation model of particle field

表 3 小颗粒的模拟参数

Table 3 Simulation parameters of the small particles

Parameters	Values
Wavelength	532 nm
Resolution	1024 pixel \times 1024 pixel
Pixel size	$6.45\ \mu\text{m}$
Sample space	$X=6.6\ \text{mm}$
	$Y=6.6\ \text{mm}$
	$Z=8\sim 12\ \text{cm}$
Refractive index	1.5

首先模拟了不同大小颗粒距离 CCD 像平面 $10\ \text{cm}$ 处的全息图,如图 5 所示。对于 $6.45\ \mu\text{m}$ 的颗粒,其干涉条纹很模糊,增强处理后见图 5(a);模型中 9 个颗粒(4 个 $40\ \mu\text{m}$ 的大颗粒,5 个 $6.45\ \mu\text{m}$ 的小颗粒)模

拟全息图见图 5(b)。通过对比,距颗粒场 10 cm 处,小颗粒的干涉条纹光强很弱,所记录的颗粒基本不能被识别。

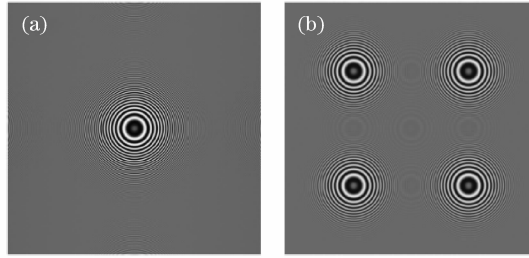


图 5 颗粒模拟全息图

Fig. 5 Simulated hologram of particle field

其次模拟计算了单个颗粒的可见度与粒径及距 CCD 像平面距离的关系。距离 CCD 像平面 8, 10, 12 cm 处不同大小颗粒的可见度如图 6 所示。从图中可以发现,当颗粒距离 CCD 像平面越远时,其可见度越小;随着粒径的增大,颗粒的可见度也随之增大,呈指数变化。距离 CCD 像平面 10 cm 处不同大小颗粒的全息干涉条纹如图 7 所示。明显地,距离 CCD 像平面 10 cm 处 5 μm , 10 μm 颗粒的干涉条纹都非常模糊。进一步观察发现,随着粒径的增大,颗粒的全息图由模糊变清晰。

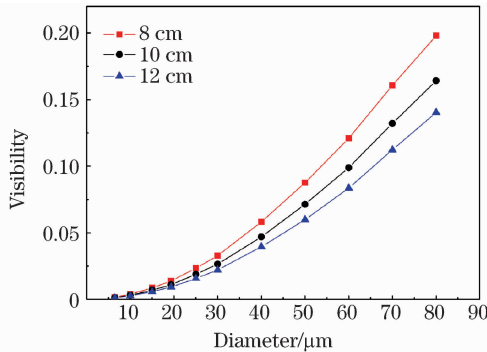


图 6 距离 CCD 8, 10, 12 cm 处颗粒可见度随粒径变化

Fig. 6 Visibility changed with particle size 8, 10, 12 cm away from CCD

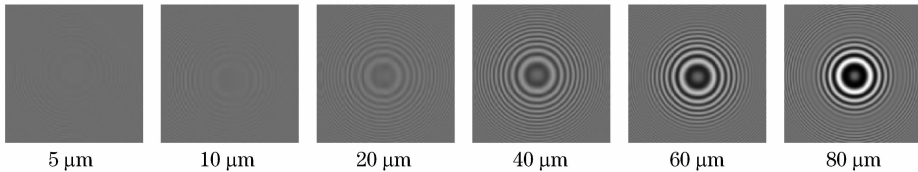


图 7 距离 CCD 10 cm 处不同大小颗粒的全息图

Fig. 7 Holograms of different particle sizes 10 cm away from CCD

最后通过对颗粒场及单个颗粒可见度与粒径关系的模拟计算,确定了基于 CCD 像素尺寸 6.45 μm 全息测量的颗粒粒径下限为 15 μm ,可见度大于 0.01,粒径测量误差小于 10%。

4 实验及结果分析

4.1 实验系统

激光数字全息实验测试系统如图 8 所示,由激光器、空间滤波器、物镜、CCD 相机、实验室自行开发的处理软件和螺旋给料机构成。研究对象是螺旋给料机均匀给出的金刚砂微粉被气流携带形成的气固两相颗粒流。固体激光器(波长 532 nm)和 He-Ne 激光器(波长 632.8 nm)发射的激光经准直扩束后照射颗粒场,形成的全息图分别被 CCD 1 和 CCD 2 记录。CCD 1 分辨率为 1620 pixel \times 1220 pixel,像素尺寸为 4.5 μm \times 4.5 μm ,等效放大倍数 12 \times ; CCD 2 分辨率为 1392 pixel \times 1040 pixel,像素尺寸为 6.45 μm \times 6.45 μm 。螺旋给料机为实验室自行设计,通过控制步进电机的转速,实现精确、稳定的给料,进而保证颗粒场的均匀性。

4.2 全息实验

图 9 为激光全息测量实验图。两束激光束相交处为测量区域,在该区域形成干涉条纹,多相流场粒子通过该区域,CCD 记录颗粒场的全息图,经过数据处理,得到颗粒粒径和三维位置信息。实验样品为 3 种不同粒径分布的金刚砂微粉,不同粒径颗粒质量比见表 4。实验时,螺旋给料机稳定、均匀的将金刚砂微粉输运到所测流场,通过调节步进电机的转速来控制颗粒场的浓度。对不同粒径分布,不同浓度颗粒场粒径的测量,研究双光路数字全息系统同时测量气固两相流中气相示踪粒子及固相颗粒场的可行性。

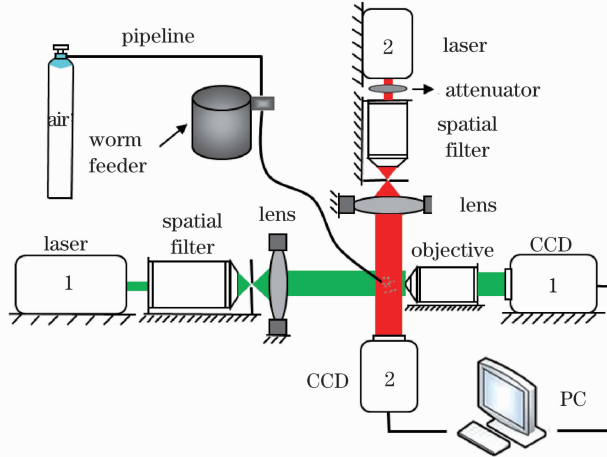


图 8 激光数字全息实验测试系统

Fig. 8 Experimental setup of digital in-line holographic system

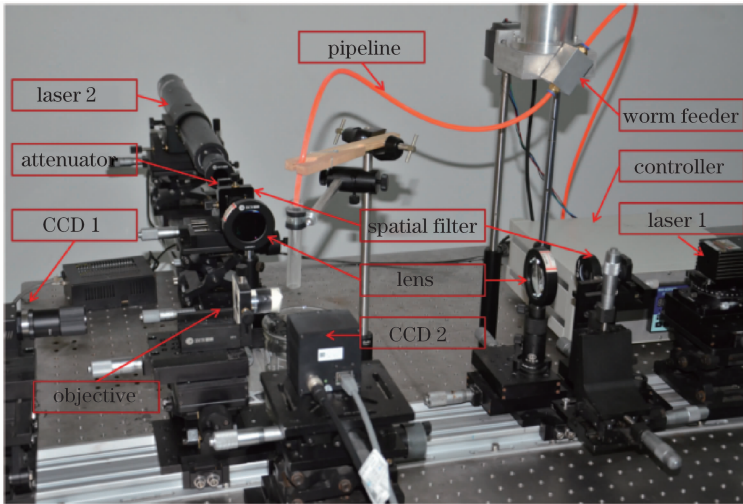


图 9 激光全息测量实验

Fig. 9 Laser holography measurement test

表 4 不同粒径颗粒的质量比

Table 4 Mass ratio of different size particles

Sample	Mass ratio
Sample 1	Ratio of 3000 mesh:400 mesh is 1:0
Sample 2	Ratio of 3000 mesh:400 mesh is 0:1
Sample 3	Ratio of 3000 mesh:400 mesh is 1:1

4.3 结果与分析

4.3.1 颗粒的粒径分布

本文利用双光路数字全息系统对 3000 目、400 目以及二者按照质量 1:1 均匀混合的颗粒粒径进行了测量。图 10 是 400 目金刚砂微粉颗粒流的全息图和重建图。通过比较图 10(a)和 10(c),减掉背景可以去掉

一些背景噪声,颗粒场全息图条纹更清晰。由图 10(d)可知,金刚砂微粉颗粒场经小波变换重建后,颗粒光强明显高于背景光强,具有很高的识别度。比较重建图 10(b)和 10(d),减掉背景的重建图颗粒与背景光强对比更明显,背景噪声更少,可以优化颗粒的识别和三维定位。

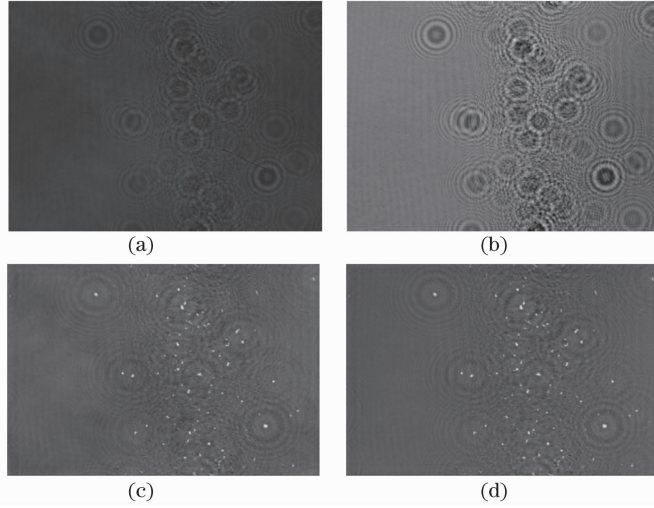


图 10 气固颗粒场全息图和重建图。(a)颗粒场全息图;(b)减掉背景的颗粒场全息图;
(c)颗粒场重建图;(d)减掉背景的颗粒场重建图

Fig. 10 Recorded and reconstructed hologram of gas-solids field. (a) Hologram of particle field; (b) background deducted hologram of particle field; (c) reconstructed hologram of particle field; (d) reconstructed back ground deducted hologram of particle field

在利用小波函数重建颗粒全息图后,用灰度阈值自动判定的方法实现颗粒图像与背景的分隔。颗粒等效粒径 D 通过计算二值化图像内颗粒的像素数量得到:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} n d_{pix}^2}, \quad (12)$$

式中 n 为二值化图像内颗粒的像素个数, d_{pix} 为 CCD 的像素尺寸。颗粒等效直径的测量精度受 CCD 像素尺寸限制。当颗粒尺寸较小时,例如与像素尺寸为同一数量级,相对误差非常大。为了提高颗粒粒径的测量精度以及测量范围,本文设计了双光路颗粒粒径测量系统,可以同时测量几微米到一百多微米的颗粒粒径。图 11 是对试样 1,2 和 3 的颗粒粒径测量结果。通过对 3000 目颗粒的测量,其粒径主要分布在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$,有时可以测到几百个纳米的颗粒。对 400 目颗粒的测量结果表明,其粒径主要分布在 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,分布较宽,存在一百多微米的大颗粒。试验主要测量了质量比为 1:1 均匀混合的金刚砂微粉颗粒流,其粒径的概率密度分布如图 11c 所示,颗粒粒径主要分布在 $5 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 左右,与实际情况基本吻合。其中有少量的大颗粒,通过分析颗粒的形状特征可以发现,见图 12,大颗粒实际上是几个颗粒粘在一起的颗粒团,多为非球形,颗粒 1 的等效粒径为 $77 \mu\text{m}$,明显是两个颗粒。颗粒 2 的等效粒径为 $51 \mu\text{m}$,接近球形。试验材料为抛光用的金刚砂微粉,球形度较高。故均匀分散颗粒,是精确获得样品粒径分布的重要环节。

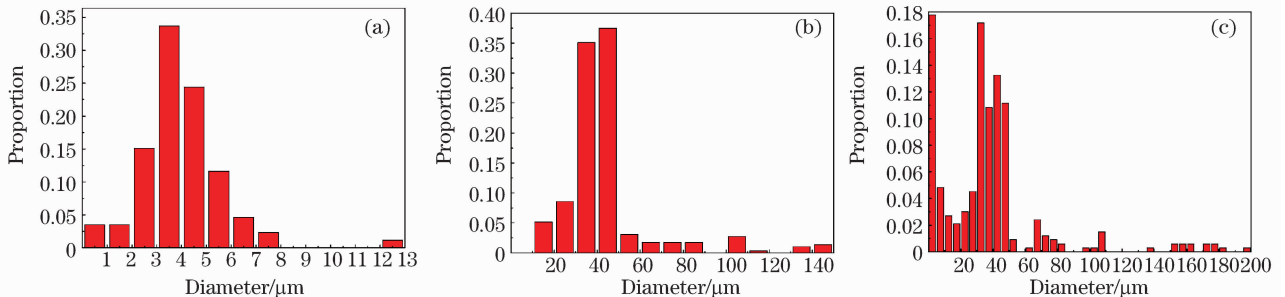


图 11 试样颗粒的粒径分布。(a) 试样 1; (b) 试样 2; (c) 试样 3

Fig. 11 Particle size distribution of the samples. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

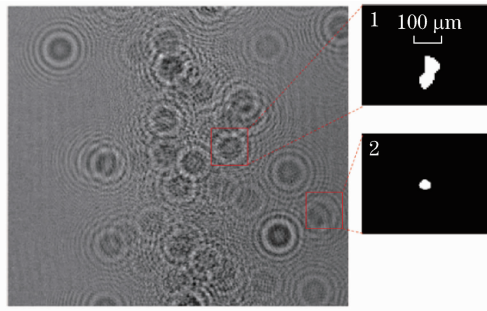


图 12 颗粒的形貌特征

Fig. 12 Morphology of the different size particles

4.3.2 颗粒的三维位置

全息术是一种真正的三维照相技术。通过对记录物光波振幅和相位的干涉条纹的全息图进行小波重建,用灰度阈值自动判定方法识别颗粒,可以获得流场中颗粒的三维位置和粒径信息。图 13 是试样 3 流场中颗粒的三维位置和粒径分布,图 13(a)是 CCD2 记录区域 15~100 μm 颗粒的空间位置分布,图 13(b)是 CCD1 记录区域 3.6~6.5 μm 颗粒的空间位置分布,CCD1 记录区域是 CCD2 记录区域的一部分。实验时,当试样 3 的浓度较低时,CCD1 记录到的颗粒很少,甚至有时全息图中没有颗粒。

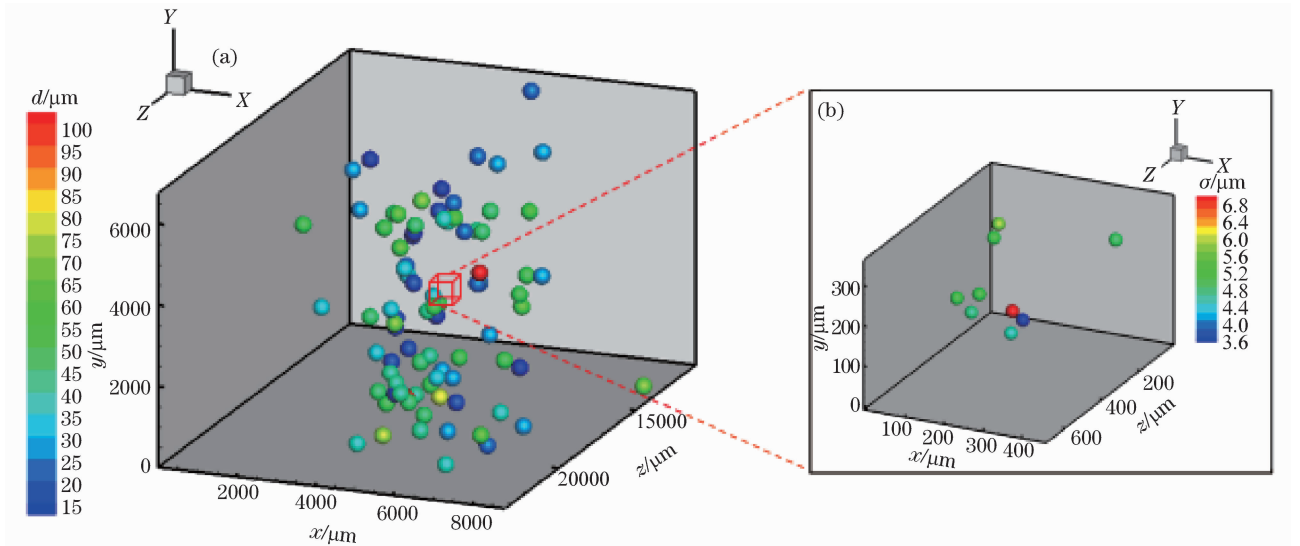


图 13 流场中颗粒的空间位置和粒径分布

Fig. 13 Spatial distribution of particles and their sizes in gas-solids flow

通过实验发现,在显微全息中,大颗粒出现在视场中的概率很小,主要是因为相对于小颗粒,大颗粒的数浓度较低,显微全息记录到的大部分是大颗粒之间的区域。对于全息而言,重建结果中会有几微米的颗粒,基于模拟结果,认为这是背景噪声造成的。

5 结 论

本文基于模拟和实验研究,探讨了激光数字全息技术测量不同粒径、浓度分布的多相流场颗粒粒径、三维位置的可行性,分析了粒径分布、浓度对颗粒粒径、空间位置测量的影响。应用数字全息技术测量几微米到几十微米颗粒的粒径分布和空间位置是可行的。得出以下结论:

- 1) 显微全息测量时,大颗粒的存在会影响小颗粒的粒径测量和 z 轴定位的准确性;
- 2) 颗粒可见度太小时,颗粒的测量误差增大,甚至不能被识别;
- 3) 双光路测量系统成功的对被测流场区域的颗粒场进行了重建,获得的颗粒粒径分布与实际情况基本吻合。

4) 通过对测量结果的分析,得出大颗粒的数浓度要高于小颗粒以及对样品颗粒的均匀分散,是精确获得样品粒径分布和空间位置的重要环节。

5) 实现 CCD1 和 CCD2 的同步记录,可以研究流场中不同大小颗粒的相对位置,结合数字全息粒子示踪测速(DHPTV)技术,可以同时获得流场的速度信息。

参 考 文 献

- 1 Chu K W, Kuang S B, Yu A B, *et al.*. Prediction of wear and its effect on the multiphase flow and separation performance of dense medium cyclone[J]. Minerals Engineering, 2014, 56: 91–101.
- 2 Arienti M, Sussman M. An embedded level set method for sharp-interface multiphase simulations of Diesel injectors[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 59: 1–14.
- 3 Wu Shengzhi, Ren Chunyong. Numerical simulation of wind blown sand based on the Eulerian model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(1): 104–107.
武生智,任春勇. 基于欧拉双流体模型的风沙运动模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012, 48(1): 104–107.
- 4 Miloslav Hartman, Michael Pohoiely, Otakar Trnka. Fluidization of dried wastewater sludge[J]. Powder Technology, 2007, 178(3): 166–172.
- 5 Stühle S, Wendt D, Jakob H, *et al.*. Numerical simulation of hemodynamics in the ascending aorta induced by different aortic cannulas[J]. Minimally Invasive Therapy, 2011, 20(2): 125–131.
- 6 Fu Jia, Yi Shihe, Wang Xiaohu, *et al.*. Experimental study on flow visualization of hypersonic flat plate boundary layer[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(1):014704.
付 佳,易仕和,王小虎,等. 高超声速平板边界层流动显示的试验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(1):014704.
- 7 Li Jing, Wang Hanfeng, Liu Zhaohui, *et al.*. Experimental investigation on turbulence modulation in the boundary layer of a horizontal particle-laden channel flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(7):1157–1160.
栗 晶,王汉封,柳朝晖,等. 气固两相槽道湍流拟序结构变动的 PIV 测量[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(7):1157–1160.
- 8 Kussin J, Sommerfeld M. Experimental studies on particle behavior and turbulence modification in horizontal channel flow with different wall roughness[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33 (1):43–159.
- 9 Lavezzo V, Soldati A, Gerashchenko S, *et al.*. On the role of gravity and shear on inertial particle accelerations in near-wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 658: 229–246.
- 10 Righetti M, Romano G P. Particle-fluid interactions in a plane near-wall turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 505:93–121.
- 11 Yan Yang, Bo-seon Kang. Digital particle holographic system for measurements of spray field characteristics[J]. Opt & Lasers in Eng, 2011, 49(11):1254–1263.
- 12 Yingchun Wu, Xuecheng Wu, Zhihua Wang, *et al.*. Coal powder measurement by digital holography with expanded measurement area[J]. Appl Opt, 2011, 50(34): H22–H29.
- 13 Boucherit S, Bouamama L, Benchickh H, *et al.*. Three-dimensional solid particle positions in a flow via multiangle off-axis digital holography[J]. Opt Lett, 2008, 33(18): 2095–2097.
- 14 Emmanouil Darakis, Taslima Khanam, Arvind Rajendran, *et al.*. Microparticle characterization using digital holography[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(2): 1037–1044.
- 15 Huanhuan Shen, Marc Brunel, Sebastien Coetmellec, *et al.*. Glare point reconstruction in digital holographic microscopy for droplet characterization[C]. Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, 2011: 567–570.
- 16 Yan Yang, Boseon Kang. Measurements of the characteristics of spray droplets using in-line digital particle holography[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009,23(6): 1670–1679.
- 17 Lei Tian, Nick Loomis, José A, *et al.*. Quantitative measurement of size and three-dimensional position of fast-moving bubbles in air-water mixture flows using digital holography[J]. Appl Opt, 2010,49(9): 1549–1554.
- 18 Siddharth Talapatra, James Sullivan, Joseph Katz, *et al.*. Application of in-situ digital holography in the study of particles, organisms and bubbles within their natural environment[C]. SPIE, 2012, 8372:837205.
- 19 Yingchun Wu, Xuecheng Wu, Binwu Zhou, *et al.*. Coal particle measurement in a pulverized coal flame with digital inline holography[C]. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, 2013:DW3A. 3.
- 20 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Wang Zhihua, *et al.*. Measurement of microchannel flow with digital holographic microscopy by integrated nearest neighbor and cross-correlation particle pairing[J]. Appl Opt, 2011, 50(34): H297–H305.
- 21 Yoshikawa H, Kameyama H. Integral holography[C]. SPIE, 1995,2406: 226–234.
- 22 Anderson W L, Diao H. Two-dimensional wavelet transform and application to holographic particle velocimetry[J]. Appl Opt, 1995, 34 (2): 249–255.
- 23 Naveen K N, Joby J, Kehar S. Securing information using fractional Fourier transform in digital holography[J]. Opt Commun, 2004, 235 (4): 253–259.
- 24 Zhao Huafeng, Wu Xuecheng, Zhou Binwu, *et al.*. Measurement of a single coal particle in an acoustic levitation field by digital holography [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10):1008003.
赵华锋,吴学成,周斌武,等. 单颗粒煤粉声悬浮全息测量实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008003.
- 25 Zhou Binwu, Wu Xuecheng, Wu Yingchun, *et al.*. Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204203.
周斌武,吴学成,吴迎春,等. 数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204203.

栏目编辑: 何卓铭