

激光干涉成像两相流粒径空间分布测量

浦世亮, 卢志民, 浦兴国, 袁镇福, 黄镇宇, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了实现两相流粒径空间分布的测量, 研究了激光干涉成像测量技术. 激光干涉成像测量技术利用片状脉冲激光束照射粒子场, 用数码相机拍摄粒子的散射光干涉图像, 并从粒子干涉图像中获取粒子空间位置和粒径分布信息. 利用激光粒度仪验证激光干涉成像测量技术的粒径测量精度. 实验证明, 该技术有较高的测量精度. 对水喷雾场的不同片状区域进行测量, 从而获得两相流的空间粒径分布. 结果显示, 所测喷雾场平均粒径由中心区域向边缘区域逐渐变小, 大粒子基本集中在中心区域, 小粒子基本集中在边缘区域. 该方法为研究两相流流场特性提供了一种有效的测量手段.

关键词: 光学测量; 干涉; 成像; 粒径

中图分类号: TK314

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2006)10-1801-04

Application of interferometric laser imaging technique for spray spatial diameter distribution measurement

PU Shi-liang, LU Zhi-min, PU Xing-guo, YUAN Zhen-fu, HUANG Zhen-yu, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Interferometric laser imaging technology was studied to measure the diameter spatial distribution of two-phase flow. A pulsed laser sheet was used to illuminate the two-phase flow. A digital camera was used to record the interferometric pattern of the light scattered by particles. The spatial position and diameter of individual particle were estimated from the interferometric pattern. The precision of size measurement by the method was checked by a diffraction particle sizer. The experiment proved that the method had high precision for particle size measurement. Different planar regions of a water spray were measured. The experimental results showed that the mean diameter of particles decreases from the spray center to its edge, and that most big particles are concentrated at the spray center, while most small particles are concentrated at the spray edge. The technology is a potential tool for studying the characteristic of two-phase flow.

Key words: optical measurement; interference; imaging; diameter

激光干涉成像测量技术(interferometric laser imaging)是近年出现的多相流测量前沿技术, 它利用透明粒子的侧向散射光干涉原理用高速数码相机拍摄两相流中颗粒的干涉图像, 并从干涉图像中提取粒子空间位置、粒径等信息^[1-4]. 不同于基于信号统计原理的测量技术, 该技术可以获得单个粒子的

信息, 从而获得粒径空间分布信息. 为了从干涉图像中提取颗粒空间分布及粒径信息, 笔者在前期提出的基于卷积定位和傅里叶变换频率提取的图像处理方法, 能使有效粒子信息提取率高于 90%, 粒子定位及粒径计算误差小于 5%, 较好地解决了该技术的图像处理问题^[4-6]. 本文利用激光干涉成像测量技

收稿日期: 2006-07-29.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576086)

作者简介: 浦世亮(1977-), 男, 浙江杭州人, 博士生, 主要从事激光测量技术及图像处理技术的研究.

E-mail: pushiliang@yahoo.com.cn

术对喷嘴喷雾场不同区域进行粒径分布测量,以研究喷嘴的雾化及喷雾特性。

1 激光散射光干涉粒子测量技术的原理

激光干涉成像测量技术的光学原理是基于透明粒子的散射特性,根据 Lorenz-Mie 理论,当透明球形粒子被相干光源照射时,其散射光光强将随着散射角的变化而振荡,这种光强振荡是由粒子衍射光、反射光及折射光之间的干涉现象引起的,光强振荡的频率与粒子直径相关,因此可以根据粒子的散射光振荡频率得到粒子直径。图 1 是利用 Lorenz-Mie 理论计算得到的粒径 $d=100\ \mu\text{m}$ 的水粒子被波长 $\lambda=532\ \text{nm}$ 的光源照射下在不同散射角的散射光光强分布,由图可见粒子散射光光强在散射角为 $10^\circ\sim 100^\circ$ 的区间规则振荡。在散射角为 $20^\circ\sim 80^\circ$ 的区间粒子的反射光及一阶折射光占绝对主导地位,因此可以忽略衍射光与高阶折射光的影响,认为散射光光强振荡是由反射光及一阶折射光之间的干涉造成的,可以用仅考虑反射光及一阶折射光的几何光学理论代替 Lorenz-Mie 理论分析粒子散射光的振荡规律,以获得散射光振荡频率与粒子直径之间的关系^[7]。

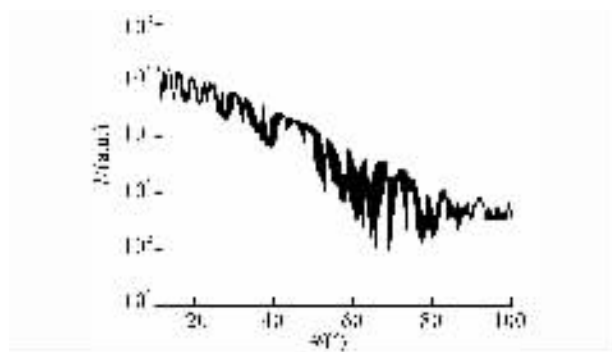


图 1 散射光强分布

Fig. 1 Scattered intensity distribution

激光干涉成像测量技术利用高干涉性片状激光照射气液两相流,激光与粒子相遇并发生散射,在一定的散射角用光学透镜收集并汇聚散射光成像,由于折射光与反射光之间的相位差,在成像系统的失焦平面上散射光会形成干涉条纹图。散射光成像光路图如图 2 所示。

根据几何光学可推导得到粒径 d 与粒子干涉图像条纹数 N 之间存在以下关系式:

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + m \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \times$$

$$\left(m^2 - 2m \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长; m 为液相与气相之间的相对折射率; α 为收集角, θ 为散射角,其中收集角和散射角可以通过调整数码相机位置来调节。因此只要从干涉图像中提取粒子干涉条纹数即可计算得到粒子直径。

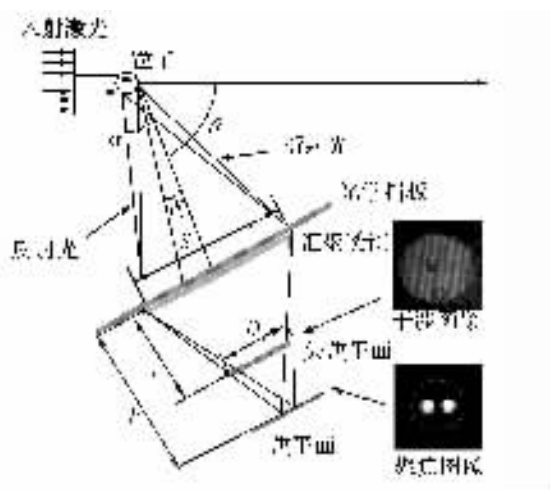


图 2 散射光成像图

Fig. 2 Scattered light imaging

2 粒子干涉图像自动辨读

为了从两相流干涉图像中提取粒子的空间位置和粒径,需要对干涉图像进行图像处理和信号分析。重叠图像的辨认和分离是图像测量技术的难点^[8]。本文利用图像边界卷积实现重叠粒子图像的辨认及定位。由于粒子干涉图像的大小和形状由实验参数决定且各个粒子图像的大小和形状一致,粒子的直径只影响其干涉条纹振荡频率,可以依据实验参数生成粒子卷积参考图,卷积参考图的尺寸、形状和粒子干涉图像相一致。对两相流干涉图与粒子卷积参考图进行二维卷积,计算两者之间的重叠值,提取卷积峰值处坐标作为粒子图像中心坐标,得到粒子的空间位置,实现粒子定位,并根据粒子的中心坐标、粒子图像的尺寸及形状参数将单个粒子的图像提取出来。然后利用二维离散傅里叶变换将粒子干涉图像从空域转换到频域,得到粒子干涉频域图像。由于干涉条纹的规律振荡,在频域图像中对应粒子干涉条纹变化频率处会产生峰值,从而可以获得干涉条纹振荡频率,计算得到粒子直径。文献^[4~6]对该图像处理部分的具体内容和在实验中的应用结果作了详细介绍。实际应用结果表明,开发的图像处理方法能自动精确提取两相流干涉条纹信息,对有较高重叠度的干涉图像的有效干涉信息提取率达92.3%,

粒子定位及粒径计算的误差小于 5%。

3 实验结果及分析

本文的测量对象为小型机械喷嘴的气液两相流喷雾场,即扩散角为 60° 的实心锥体,用小型气泵作为雾化动力,出口颗粒喷射速度大约为 20 m/s,实验以水作为测量介质对喷嘴喷雾场粒径空间分布进行定性分析.实验系统如图 3 所示,用功率为 10 W、波长为 532 nm 的 YAG 激光器作为激光源,并用透镜将激光调节成厚度为 2 mm 的片状激光束,照射喷嘴喷射的气水两相流,将高速数码相机调节至失焦状态并拍摄流场的干涉图像,设定散射角 θ 为 70° ,收集角 α 为 4.5° .图 4 为数码相机拍摄的气液两相流的一幅干涉图像.

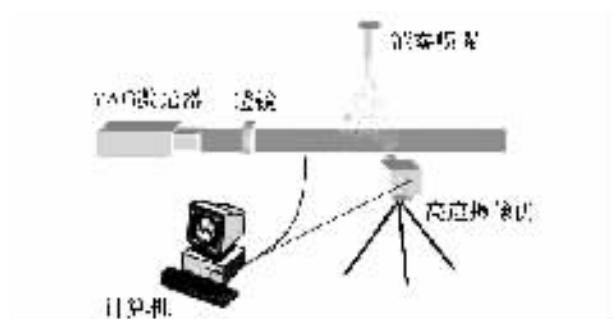


图 3 实验布置图

Fig. 3 Geometry of experimental setup

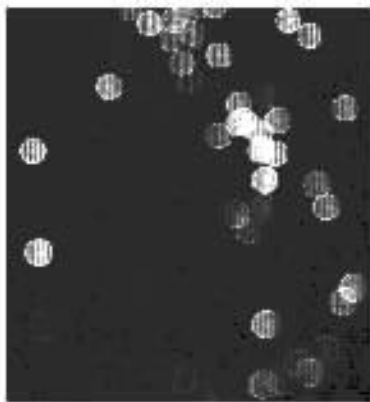


图 4 两相流散射光干涉图像

Fig. 4 Interferometric pattern of spray

3.1 粒径测量比对

为了检验激光干涉成像测量技术的测量精度,利用激光干涉成像测量技术和激光粒度仪对喷雾场同一区域进行粒径分布测量,并将两种测量方法获得的结果进行比对.图 5 是利用激光干涉成像测量技术获得的粒径分布结果,由图可见雾化粒子的粒径在 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ 区间,近似呈正态分布,平均粒径为 $112 \mu\text{m}$,图中 N 为粒子数.图 6 为利用激光粒度

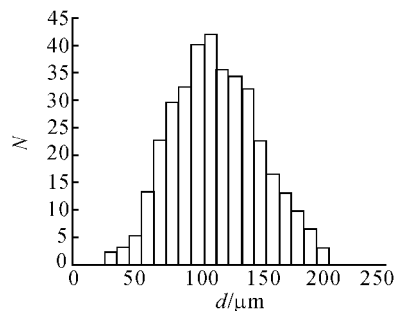


图 5 粒径分布图(激光干涉成像技术)

Fig. 5 Particle diameter distribution by ILIDS

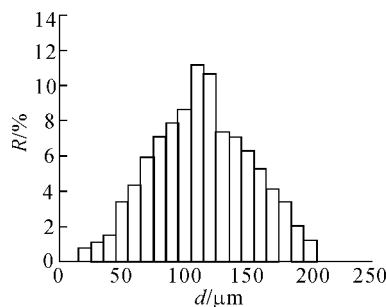


图 6 粒径分布图(粒度仪)

Fig. 6 Particle diameter distribution by diffraction sizer

仪获得的粒径分布图,测量结果显示粒径在 $15 \sim 200 \mu\text{m}$ 区间,近似呈正态分布,平均粒径为 $116 \mu\text{m}$.两种方法得到的粒径分布及平均粒径基本一致,证明激光干涉成像测量技术对颗粒直径测量有较高测量精度.

3.2 喷雾场空间区域测量结果

为了研究喷雾场的粒径空间分布,分别对喷嘴出口正下方 25 cm 的中轴位置、距离中轴 5 cm 处和距离中轴 8 cm 处等 3 个切面进行了测量,并获得粒径分布信息.

测量结果如图 7 所示.由图 7(a)可见在喷嘴中轴线处粒子主要分布于 $35 \sim 200 \mu\text{m}$ 区间,平均粒径为 $118 \mu\text{m}$;图 7(b)显示在距离中轴线 5 cm 处,粒子主要分布于 $30 \sim 175 \mu\text{m}$ 区间,平均粒径为 $102 \mu\text{m}$;图 7(c)显示在距离中轴线 8 cm 处,粒子主要分布于 $15 \sim 160 \mu\text{m}$ 区间,平均粒径为 $94 \mu\text{m}$.实验结果表明,喷雾场中轴处平均粒径要大于喷雾场边缘处平均粒径,其中大粒子($170 \sim 200 \mu\text{m}$)基本都集中在喷雾场中心区域,而小粒子($15 \sim 30 \mu\text{m}$)基本都集中在喷雾场边缘位置.造成这种粒径在空间位置中的不均匀分布主要是因为小粒子由于惯性较小受离心作用的影响较易偏离中心区域进入边缘区域,而粒径较大的粒子由于惯性较大易保持向下的运动方向而停留在中心位置.

实验结果证明,粒径分布图反映出颗粒粒径在

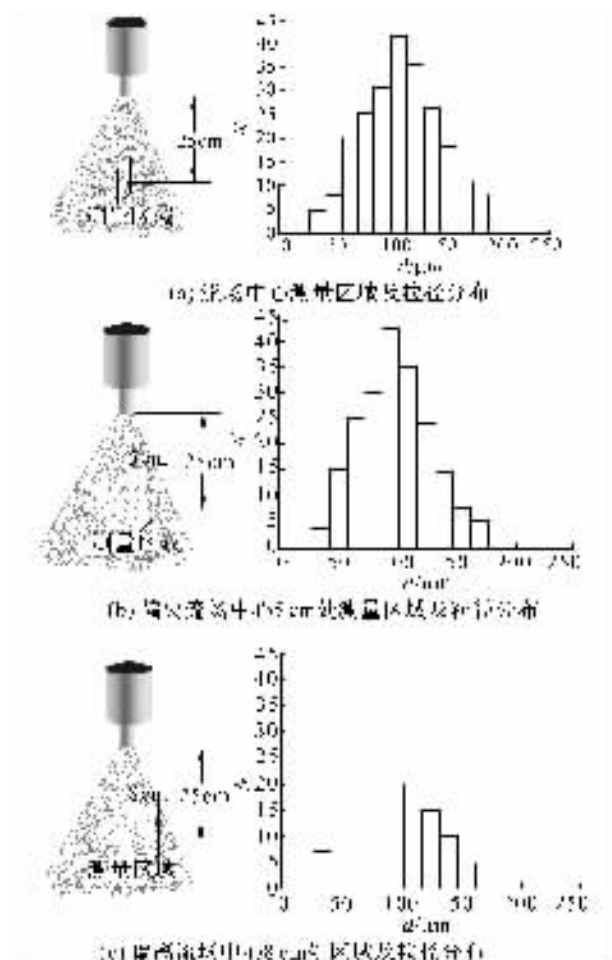


图7 喷雾场不同区域粒径分布图

Fig. 7 Diameter distributions at different regions

流场不同区域处的不同分布,由于重力影响,流场边缘处的平均粒径明显小于流场中央处。

4 结 语

本文研究的激光干涉成像测量方法具有不干扰流场、粒径测量精度高及测量区域较大等优点。本文利用该测量技术对机械喷嘴喷雾场进行测量,得到了喷雾场的粒径分布,并分析了粒径在空间中的不均匀分布,并利用激光粒度仪对测量结果进行评价。对气水两相流喷雾场各个区域的测量结果发现,本技术可以直观地反映两相流流场的粒径在不同区域的分布规律,是一种很有前途的两相流测量技术。如果结合使用高功率脉冲激光器和高速摄像机,该技术还可以对工业喷嘴流场进行测量,例如水煤浆喷嘴及汽车引擎喷嘴流场。

参考文献 (References):

- [1] HESS C F. Planar particle image analyzer [C]// **The 9th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics**. Lisbon, Portugal: [s. n.], 1998.
- [2] GLOVER A R, SKIPPON S M, BOYLE R D. Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems [J]. **Applied Optics**, 1995, 34(36): 8409 - 8421.
- [3] MAEDA M, KAWAGUCHI T, HISHIDA K. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows [J]. **Measurement Science and Technology**, 2000, 11: 13 - 18.
- [4] 浦世亮, 浦兴国, 袁镇福, 等. 激光干涉气液两相流测量图像自动辨识方法的研究 [J]. **中国电机工程学报**, 2004, 24(2): 201 - 205.
PU Shi-liang, PU Xing-guo, YUAN Zhen-fu, et al. An automatic image processing method for the interferometric laser image droplet sizing (ILIDS) technique [J]. **Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering**, 2004, 24(2): 201 - 205.
- [5] 浦兴国, 浦世亮, 袁镇福, 等. 激光干涉气液两相流颗粒速度矢量测量的研究 [J]. **中国电机工程学报**, 2004, 24(11): 237 - 240.
PU Xing-guo, PU Shi-liang, YUAN Zhen-fu, et al. Research of the interferometric laser imaging droplet velocimetry technique [J]. **Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering**, 2004, 24(11): 237 - 240.
- [6] PU Shi-liang, MEES L, PU Xing-guo, et al. Size and velocity measurement by interferometric laser imaging droplet sizing [C]// **The 4th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows**. Beijing: Beijing Word Publishing Corporation, 2004.
- [7] VAN DE HULST H C. **Light scattering by small particles** [M]. New York: Wiley, 1957.
- [8] 尤育赛, 于慧敏, 刘圆圆. 基于粒度测量的重叠圆形颗粒图像分离方法 [J]. **浙江大学学报: 工学版**, 2005, 39(7): 962 - 966.
YOU Yu-sai, YU Hui-min, LIU Yuan-yuan. Separating algorithm for overlapping circular granule image based on granulometry [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2005, 39(7): 962 - 966.