

文章编号: 1001-3806(2003)03-0268-03

有机玻璃板对 PDA 测量结果影响的研究

徐祥开 刘应征 罗次申 陈汉平
(上海交通大学动力及能源学院, 上海, 200030)

摘要: 激光相位多普勒技术 PDA 测量时对激光光束光路调整要求很高,但在大多数 PDA 实验测量中其激光光程常常布置有透明玻璃。理论上,有机玻璃的存在必定给实验测量带来了系统误差。通过 PDA 喷雾实验对有无有机玻璃以及改变玻璃板的厚度几种情况进行了对比测量,发现有机玻璃板的存在对实验结果的影响较大,并对其产生原因进行了理论分析。

关键词: 相位多普勒技术; 喷雾; 折射率

中图分类号: V211.1⁺7; TN247 **文献标识码:** A

Effect of organic glass on PDA measurement result

Xu Xiangkai, Liu Yingzheng, Luo Cishen, Chen Hanping
(Power & Energy School, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

Abstract: The beam alignment is very strict in laser phase Doppler particle analyzer (PDA) measurement, and transparent organic glass is usually placed in the experiment. In theory, the organic glass can induce system error. Based on PDA spraying experiment with or without organic glass, with various thickness of organic glass, the effect of organic glass on PDA measurement result was found. Then the reason was analyzed.

Key words: phase Doppler particle analyzer; spraying; refractive index

引言

在气固、气(汽)液或两相流动的实验研究,如盐雾分离、喷油雾化、饱和器(喷水雾化)、流化床(气固两相流)中,一般都需要获得透明或非透明粒子在实验中的大小、分布、浓度及其流动情况等。由粒子和浓度可以导出通流量,因此,粒径尤其是透明粒径的测量,在动力工程实验中占有重要的地位。在这些实验研究中常常采用激光相位多普勒技术 PDA 测量获得喷雾的粒子直径分布、速度大小以及浓度等信息,并且 PDA 越来越广泛。PDA 是目前公认的测量球形或者接近球形分布粒子的速度和尺寸的最有效方法。PDA 对激光光束光路调整要求很高,但在大多数 PDA 实验测量理论上,有机玻璃的存在必定给实验测量带来了系统误差。在下面的 PDA 实验研究中,通过对有无有机玻璃以及改变玻璃板的厚度几种情况进行了对比测量,发现有机玻璃板的存在实际上对实验结果的影响较大,并对其产生原

因进行了理论分析。

1 PDA 技术基本原理

激光多普勒测速的基本原理是多普勒效应。它利用流体中跟随流体一起运动的粒子的散射光的频移(或相位变化)来测量速度,因为粒子散射光的频移包含有速度的信息。由相位变化可以求得球形粒子的粒径。

1.1 2π 周期模糊性问题

2π 周期模糊性问题是 PDA 系统在采用两个光接收器测量多普勒信号相位差得出球形粒子直径时产生的一种粒径无法唯一确定的问题。

测量时,需要做到一方面要满足高灵敏度和短测量距,另一方面却要以损失灵敏度作为代价增加测量距离。为此,目前一般使用不对称三探测器结构来处理。如图 1 所示,图为不对称放置的 U_1, U_2, U_3 三探测器结构。由 U_1 和 U_2 形成具有相对间隔较大的接收探测器对,给出高的粒径分辨率和小的测量距离,得到的相位差为 φ_{12} 。由于 U_1 和 U_3 形成距离较近的接收探测器对,得到的相位差为 φ_{13} 。通过灵敏度不高的 φ_{13} ,可以确定 φ_{12} 发生的周期,从而确定出粒径大致范围,再通过 φ_{12} 来精确地确

作者简介:徐祥开,男,1977年10月出生。硕士。主要从事激光相位多普勒测试技术方面的研究。

收稿日期:2002-05-27;收到修改稿日期:2002-08-10

定出粒子的直径。因此, 采用三探测器结构, 往往可以提高测量范围, 并能较为准确地测量出粒径^[1]。

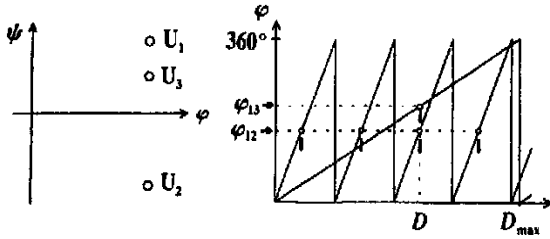


Fig. 1 Detector disposal and 2π cycle vague

1.2 粒子的球形度问题

由 PDA 测试技术原理可知, 被测粒子假设为球形。而事实上, 喷雾模拟中的雾化粒子一般也只是接近球形的椭球体。

三探测器结构除了能解决 2π 周期的模糊问题外, 还能一定程度地检查粒子的非球形度。对应每一个探测器对的相位差结构所形成的两个探测器对可以给出粒子表面两处不同位置的曲率。若粒子绝对球形, 则两个探测器对所给出的曲率应该相等。这就是 PDA 进行球形检查的原理: 相位 φ_{12} 和 φ_{13} 应该指向同一个直径 D 。对于非球形粒子, 两处位置的曲率有一定差别, 则 φ_{12} 和 φ_{13} 所指向的直径将会相差 ΔD ^[2]。如图 2 所示, 一般在信号处理软件 (Size Ware) 中给出最大允许的球形度偏差, 当 $\Delta D/D$ 大于由使用者给出的百分比, 则此粒子被认为是无效的^[3]。

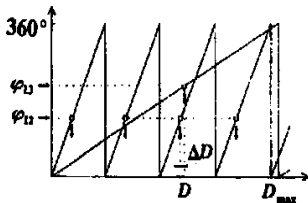


Fig. 2 Particle pphericity

2 有玻璃隔板时的光路图及理论分析

在 PDA 测量中, 假定激光直接照射到被测量体上, 实际上, 被测量颗粒往往在玻璃仪器内, 则激光从空气到玻璃再到空气的过程中要发生折射, 折射时, 会影响相位的变化。根据 PDA 的原理, 相位的变化就影响最后测量的粒径大小, 为了清楚知道最后的影响到底有多大, 作者做了玻璃厚度为 0mm, 3mm, 5mm 的实验。图 3 是有玻璃隔板的激光光路示意图。

假设玻璃的折射率为 k , 玻璃厚度为 h , 两束相同频率、相同相位的光束夹角为 2β , 两束光束和玻璃隔板的夹角分别为 α, γ , 直线 CE 和 DF 平行直

线 MN 。令 $AC = l_1, BD = l_2, AE = l'_1, BF = l'_2$ 。

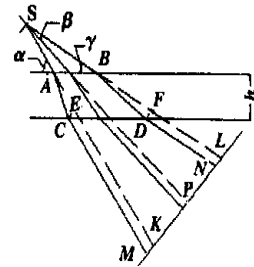


Fig. 3 Laser line through organic glass

对于光路 1, 由折射定律及正弦定理, 增加了玻璃隔板, 光路增加的路径长度为:

$$\Delta l_1 = l_1 - l'_1 = \frac{h}{\sin \arccos(\cos \alpha / k)} \times \left\{ 1 - \frac{\cos[\arccos(\cos \alpha / k) - \alpha + \beta]}{\cos \beta} \right\} \quad (1)$$

同理, 对于光路 2, 光路增加的路径长度为:

$$\Delta l_2 = l_2 - l'_2 = \frac{h}{\sin \arccos(\cos \gamma / k)} \times \left\{ 1 - \frac{\cos[-\arccos(\cos \gamma / k) + \gamma + \beta]}{\cos \beta} \right\} \quad (2)$$

在玻璃内部, 激光通过的路径差:

$$\Delta l' = l_2 - l_1 = \frac{h}{\sin \arccos(\cos \gamma / k)} - \frac{h}{\sin \arccos(\cos \alpha / k)} \quad (3)$$

由于不加玻璃隔板时, 激光 1, 2 的光线路径相等。所以在空气中激光通过的路径差为:

$$\Delta l'' = \frac{h}{\cos \beta} \left\{ \frac{\cos[\arccos(\cos \alpha / k) - \alpha + \beta]}{\sin \arccos(\cos \alpha / k)} - \frac{\sin[\beta + \gamma - \arccos(\cos \gamma / k)]}{\sin \arccos(\cos \gamma / k)} \right\} \quad (4)$$

当 $\Delta l'' > 0$ 时, 说明在空气中激光 2 路径大于激光 1 路径; 当 $\Delta l'' = 0$ 时, 则说明空气中激光 2 路径等于激光 1 路径; 当 $\Delta l'' < 0$ 时, 说明在空气中激光 2 路径小于激光 1 路径。

激光 2 相对与激光 1 总的延迟时间为:

$$t = t' + t'' = \frac{\Delta l'}{c/k} + \frac{\Delta l''}{c} \quad (5)$$

因为时间延迟引起的相位差为:

$$\Delta \Phi = 2\pi f t = \frac{2\pi}{\lambda} (k \Delta l' + \Delta l'') \quad (6)$$

蓝光的波长为 $488\mu\text{m}$, 玻璃的折射率为 k 为 1.47, $\Delta \Phi = (-0.7259)^\circ$

当 $h = 3\text{mm}$ 时, $\Delta \Phi = -2.177^\circ$; $h = 5\text{mm}$ 时, $\Delta \Phi = -3.6295^\circ$ 。

从理论上来看, 由于常量参数为 $2.0935\text{deg}/\mu\text{microm}$, 当测量时加了厚度为 3mm 有机玻璃隔板,

增加的颗粒直径为 $4.5590\mu\text{m}$; 当测量时加了厚度为 5mm 玻璃隔板, 增加的颗粒直径为 $7.5984\mu\text{m}$ 。

3 实验数据及其分析

实验中采用 DANTEC 公司生产的粒子动态分析仪 (Dual PDA) 作为流场测量手段。该设备是基于激光多普勒测速技术及在此基础上扩展的相位多普勒 (PDA) 技术开发的。激光测速方法是根据相应的多普勒频移得出, 而粒径测量是建立在与检测区成不同角度的 2 个光探测器所收集的散射光信号比较得出的。

实验中的一些实验台参数如下: 喷嘴与测点距离为 300mm ; 水槽水位高为 42mm ; 喷射压力为 $3.0\text{kg}/\text{cm}^2$; 气温为 18.7°C 。测量经过固定点 S 的喷雾粒子的速度和粒径大小, 改变玻璃隔板的厚度, 使它们分别为 0mm , 3mm , 5mm 。由于玻璃隔板的折射, 在测量中要调整测量仪器的位置。

实验中无玻璃时粒子平均速度为 $18.9540\text{m}/\text{s}$, 3mm 的玻璃时粒子的平均速度为 $18.1690\text{m}/\text{s}$, 5mm 的玻璃时粒子的平均速度为 $18.0350\text{m}/\text{s}$ 。玻璃板为 3mm 时, 速度误差为 4% , 5mm 时速度误差为 5% 。在实验误差容许的范围内, 可以认为工况没有改变。

从试验数据及图 4, 图 5, 图 6 可以看出, 没有玻璃隔板时, 颗粒的平均速度为 $18.9540\text{m}/\text{s}$, 算术平均直径 $D_{10} = 10.3510\mu\text{m}$; 玻璃隔板厚度为 3mm 时, 颗粒的平均速度为 $18.1690\text{m}/\text{s}$, 算术平均直径

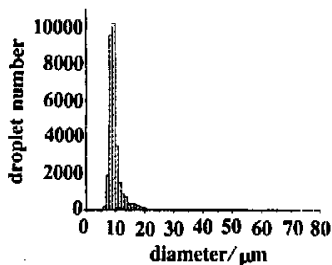


Fig. 4 Particle distributing in no glass

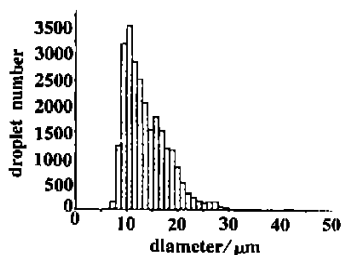


Fig. 5 Particle distributing in 3mm glass

$D_{10} = 14.3710\mu\text{m}$, 理论上 $D_{10} = 14.91\mu\text{m}$, 误差为 3.75% ; 玻璃隔板厚度为 5mm 时, 颗粒的平均速度为 $18.0350\text{m}/\text{s}$, 算术平均直径 $D_{10} = 16.1880\mu\text{m}$, 理论上 $D_{10} = 17.9494\mu\text{m}$, 误差为 10.88% 。从实验数据和理论分析可以看出, 理论上计算结果和实验结果基本符合, 比较可以看出, 3mm 玻璃隔板吻合好一些, 这是由于速度误差小, 更符合同一工况条件, 所以说玻璃隔板对实验有影响, 这种影响随玻璃隔板的厚度增加而变大。从实验数据还可以看出, 粒子的速度为 $18.0350\text{m}/\text{s}$ 至 $18.9540\text{m}/\text{s}$ 间, 在误差允许的范围内, 有玻璃隔板对速度没什么影响。玻璃板影响相位, 因此, 也影响粒子的球形度, 统计时扔掉了一些球形粒子, 所以, 加上玻璃板时, 数据减少。

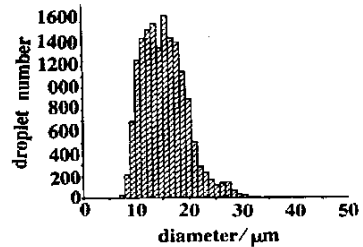


Fig. 6 Particle distributing in 5mm glass

4 实验结论

(1) 在误差允许的范围内, 玻璃隔板对实验有影响, 这种影响随玻璃隔板的厚度增加而变大。当所测量的颗粒的直径比较小, 而玻璃隔板厚度又很大时, 这种影响是致命的。

(2) 从实验数据可以看出, 在误差允许的范围内, 有玻璃隔板对速度没什么影响。

(3) 玻璃的折射率趋于 1 时, 即接近于空气折射率时, 相位差接近 0, 影响就越小, 当折射率等于 1 时, 没发生折射, 无影响。当折射率远离 1 时, 影响越大。

(4) 玻璃板影响相位, 因此影响粒子的球形度, 统计时扔掉了一些球形粒子, 所以加上玻璃板时, 数据减少。

参考文献

- [1] 刘应征, 罗次申. 船舶工程, 1998, 5(1): 45~48.
- [2] Dual PDA Manual. Denmark: Dantec Measurement Technology GmbH, 1996.
- [3] SizeWare Manual. Denmark: Dantec Measurement Technology GmbH, 1999.