

# 气固两相自由射流中颗粒相粒度、浓度和速度测量装置

盛德仁 朱伊杰

(浙江大学能源系, 杭州, 310027)

**摘要:** 为对喷嘴出口内径为 42mm 的气固两相自由射流进行实时测量, 研制成一台颗粒粒度、浓度和速度的测量装置。论述了根据 Mie 散射理论的渡越时间测量技术进行颗粒粒度和平均速度测量的基本原理, 对粒径范围在 10~ 105 $\mu\text{m}$  氧化铝粉末进行了一系列试验, 所得结果进行了分析讨论。

**关键词:** 光散射 渡越时间 粒度测量 浓度

## A system for simultaneously measuring of particle size, concentration and velocity in air-solid two-phase free jet

Sheng Deren, Zhu Yijie

(Department of Energy Sources, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract:** A measurement system has been established to measure the size, concentration and velocity of particles in a horizontal air-particle free jet from a nozzle of 42mm ID. The principles of evaluation of the particle size and average velocity, which is based on Mie scattering theory and transit timing technique, is presented in this paper. According to the evaluation, a series of the experiments are made to prove the agreement between the evaluation and experimental results, using the powder of aluminum oxide of 10~ 105 $\mu\text{m}$ . The measurement system has the features of the relatively simple optical system, low cost and high space discriminability.

**Key words:** light scattering transit-timing technique particle sizing concentration

## 引 言

两相流动中的颗粒场的测量是许多应用领域感兴趣的课题。在环境污染监测、改善燃烧效率、气象分析、农业和许多工业应用中都需要准确地测量颗粒相的粒度、速度和浓度。

颗粒相的测量有各种方法, 如显微摄影法、库太尔计数器、电气悬浮粒子分析仪、光学计数器、光散射测粒仪及激光多普勒测速仪等。其中许多测量方法都需要取出样品才能进行分析, 有些则必须将传感器插入被测流场, 对流场有干扰。

本文作者建立了一台非插入式测量颗粒相粒度、浓度和速度的测量装置(PSCVMS)。该装置应用两种光学诊断技术: 根据 Mie 前向散射理论设计的单颗粒计数器技术和渡越时间测速技术, 两种测量技术共用一套光学系统和信号检测器, 可同时测量两相流中的颗粒相粒度、浓度和平均速度。

## 一、测 量 原 理

图 1 所示为光学系统的原理图。光源为氦氛激光器, 由激光器射出的光束经扩束会聚形成束腰, 由入射光束腰和接收透镜构成测量区, 当颗粒流经测量区时散射光被接收透镜所收

集,然后会聚到光电倍增管上转换成电信号,此信号波形呈高斯型,其峰值与颗粒尺寸成正比,而其宽度与颗粒的运动速度有关。

1. 颗粒速度测量

TEM<sub>00</sub>He-Ne 激光束,在入射光传播方向任一垂直截面上的光强分布可表示为:

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \quad (1)$$

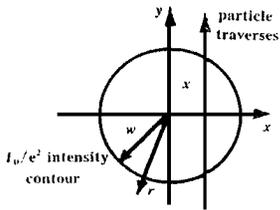


Fig. 2 Particle traverses in a plane normal to the laser beam axis

式中,  $I(r)$  是离光轴径向距离为  $r$  处的光强;  $I_0$  是光束中心的光强;  $w$  是  $1/e^2$  光强处的光束半径。

在直角坐标系中,当颗粒在垂直于光束的平面,平行于  $y$  轴和  $x = x_t$  处流过时,如图 2 所示,其光强分布为<sup>[1]</sup>:

$$I(x_t, y) = I_0 \exp(-2x_t^2/w^2) \exp(-2y^2/w^2) \quad (2)$$

假定颗粒直径远小于光束直径,而且光散射和检测是瞬时响应的,则颗粒在垂直平面( $x$ - $y$ )中的恒速  $v_{\perp}$  运动时,瞬时入射光强为:

$$I(x_t, y) = I_0 \exp(-2x_t^2/w^2) \exp(-2v_{\perp}^2 t^2/w^2) \quad (3)$$

由于上式右边第一项指数与时间无关,则颗粒以恒速运动时其散射光信号也具有高斯型,因此只需要测量出散射光信号的  $1/e^2$  光强处两点的渡越时间  $2t_t$ ,即可唯一地确定垂直于光束平面的颗粒速度分量,而与横向位置  $x_t$  无关,  $v_{\perp} = w/t_t$

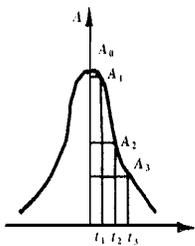


Fig. 3 Signal sampling for particle mean velocity evaluation

实际上,准确地测量渡越时间  $2t_t$  是相当困难的,在本实验中颗粒运动速度按下列方法确定:选取三个采样时间  $t_1, t_2$  和  $t_3$ ,并使采样间隔  $\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$  为常数,于是由信号波形图(图 3)中获得的三个信号幅值  $A_1, A_2$  和  $A_3$  可以表示成:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 \exp(-2y_1^2/w^2) = A_0 \exp(-2v_{\perp}^2 t_1^2/w^2) \\ A_2 &= A_0 \exp(-2y_2^2/w^2) = A_0 \exp(-2v_{\perp}^2 t_2^2/w^2) \\ A_3 &= A_0 \exp(-2y_3^2/w^2) = A_0 \exp(-2v_{\perp}^2 t_3^2/w^2) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $w$  为束腰直径,事先由实验确定。解方程(5)求得在采样间隔  $\Delta t$  内,颗粒以恒速流过测量区的距离  $\Delta y = |y_1 - y_0|$ 。由此得出平均速度

$$v_{\perp} = \Delta y / \Delta t \quad (6)$$

2. 颗粒粒径分布和浓度的测量

按 Mie 散射理论,球形颗粒受到单色平面偏振光照射时,其散射光强与入射光光强、波长和偏振度、颗粒尺寸、复折率以及散射角有关<sup>[2,3]</sup>。对于图 1 所示的光学系统,当入射光特性和散射角一定时,则散射光强信号单值地决定于颗粒尺寸,而与复折率几乎无关<sup>[4,5]</sup>(条件是颗粒直径大于  $5\mu\text{m}$ )。

由于按  $1/e^2$  光强值定义的测量区,一部分取决于具有高斯型入射光光强的分布,另一部分受光学接收元件的几何参数的影响,被检测到的信号峰值不仅是颗粒尺寸的函数,而且与颗粒通过测量区的轨迹有关。为了解决这一问题,本文采用了光强重叠合法<sup>[4]</sup>求解。

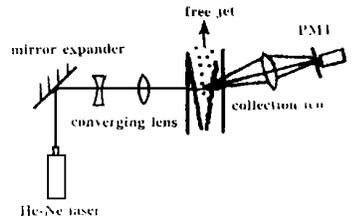


Fig. 1 Optical components arrangement

定义测量区函数  $J(x, z, \alpha)$ , 送往信号峰值分析电路的被测信号幅值可表示成:

$$A = G[\mathcal{N}(4\pi^2)]J \cdot J(x, z, \alpha) \cdot F(\alpha) \quad (7)$$

式中,  $G$  表示探测器灵敏度和增益常数;  $F(\alpha)$  是光响应函数;  $\alpha$  为被测颗粒的无量次直径。

将函数  $J, F$  和  $A$  按其最大值归一化, 定义:

$$J = J/J_m \quad (0 \leq J \leq 1) \quad (8)$$

$$F = F/F_m \quad (0 \leq F \leq 1) \quad (9)$$

式中,  $F_m$  是相应于最大颗粒的响应函数的最大值;  $J_m$  是测量区函数的最大值。

$$\text{相应于最大值 } F_m \text{ 和 } J_m \text{ 的信号最大幅值: } A_m = G[\mathcal{N}(4\pi^2)]J \cdot J_m \cdot F_m \quad (10)$$

$$\text{再定义: } A = A/A_m \quad (0 \leq A \leq 1) \quad (11)$$

$$\text{由(7)式可表示成归一化形式: } A = J \cdot F \quad (12)$$

将函数  $A$  和  $F$  离散化, 并令  $C(A_i) = C_i$  是信号峰值在  $A_i$  到  $A_i + \Delta A_i$  范围内的计数率;  $N(F_j) = N_j$  是响应函数在  $F_j$  到  $F_j + \Delta F_j$  范围内的颗粒浓度(数密度);  $\Delta S(A_i, F_j) = \Delta S_{ij}$  是响应函数为  $F_j$  到  $F_j + \Delta F_j$  产生  $A_i$  到  $A_i + \Delta A_i$  信号峰值、垂直于流动方向的测量区横截面积。

假定颗粒通过测量区任意微元体的概率相同, 而且所有颗粒具有相同的平均速度  $U$ , 则计数率分布可表示成:

$$\begin{aligned} C_1 &= \sum_{j=1}^m U \cdot \Delta S_{1j} \cdot N_j \\ &\vdots \\ C_i &= \sum_{j=1}^m U \cdot \Delta S_{ij} \cdot N_j \\ &\vdots \\ C_m &= \sum_{j=1}^m U \cdot \Delta S_{mj} \cdot N_j \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{上式写成矩阵形式为: } C = U \cdot \Delta S \cdot N \quad (14)$$

由于产生某档响应函数  $F_j$  的颗粒, 不可能使信号幅值大于  $A_j$ , 因此, 截面矩阵的元素  $\Delta S_{ij}$  在  $i > j$  时均为零。于是(14)式可写成:

$$\begin{aligned} \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_i \\ \vdots \\ C_m \end{matrix} &= U \cdot \begin{matrix} \Delta S_{11} & \Delta S_{12} & \cdots & \Delta S_{1i} & \cdots & \Delta S_{1m} \\ 0 & \Delta S_{22} & \cdots & \Delta S_{2i} & \cdots & \Delta S_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta S_{ij} & \cdots & \Delta S_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \Delta S_{mm} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_i \\ \vdots \\ N_m \end{matrix} \end{aligned} \quad (15)$$

$\Delta S$  矩阵由颗粒尺寸和浓度受控的颗粒发生器产生的单分散颗粒系标定, 标定后的数据送入计算机, 颗粒平均速度  $U$  按上节所述测定。由信号峰值分析电路输出的计数率分布  $C_i$  自动地存入计算机中, 因在测定  $C$  的  $\Delta S$  中含有实验不确定度, 因此不能直接用矩阵求逆方法求解(15)式。本文用非负最小二乘法求解各档尺寸的数密度。

## 二、试验台架

气固两相试验台架如图4所示, 其中: 1 为鼓风机, 2 为给粉机, 3 为直流电源, 4 为喷嘴, 5

为测量室, 6 为旋风除尘器, 7 为除尘器, 8 为引风机, 9 为光学窗口, 10, 11, 12 为 PSCVMS, 13 为计算机。由鼓风机出来的气流进入管道, 携带由给粉机送入被测颗粒, 气粉混合后流入内径为 42mm 的水平喷嘴。由于测量室 (2000mm × 600mm × 800mm) 的尺寸远大于喷嘴出口直径, 故认为是气固两相自由射流。测量室壁面设有光学窗, 用气流冲刷装置防止颗粒吸附在光学窗。

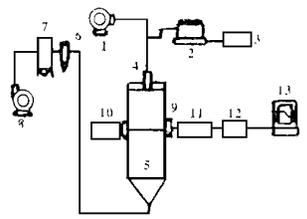


Fig. 4 Experiment unit

PSCVMS 光学系统原理图示于图 1。5mW 氦氖激光器射出的光束, 由焦距为 -83mm 透镜扩束, 并由焦距为 146mm 的透镜会聚, 测量区的束腰直径为 270mm, 接收透镜的焦距为 398mm。挡光片遮挡入射光束, 并与接收透镜光轴的夹角为 10°, 此角度决定着散射光响应函数。PSCVMS 安装在测量室两侧, 可两维移动的刚性台架上, 可测量任一射流截面上颗粒的粒度、浓度和平均速度。被测颗粒为氧化铝粉末, 粒径范围为 10~105μm。

### 三、试验结果与分析

图 5 所示为  $X/D=10$  截面上颗粒平均速度分布,  $X$  为离射流出口的距离;  $D$  为喷嘴内径, 环境温度  $T=286\text{K}$ 。图 6 为  $X/D=10$  截面上颗粒浓度分布。随着进气阀门的开度  $F$  增加, 颗粒的平均速度增加, 而颗粒浓度下降, 这是由于给粉量保持不变。

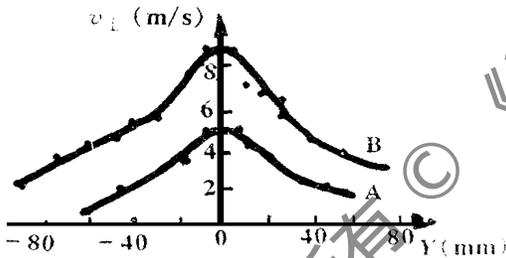


Fig. 5 Particle velocity distributions  
 $X/D=10, T=286\text{K}$ , A—valve opening 5mm  
B—valve opening 6.7mm

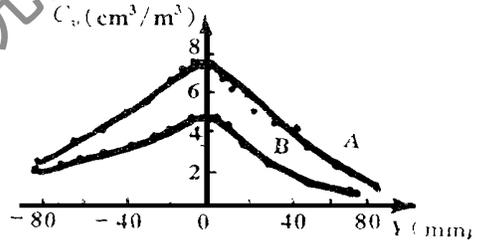


Fig. 6 Particle concentration distributions  
 $X/D=10, T=286\text{K}$ , A—valve opening 5mm  
B—valve opening 6.7mm

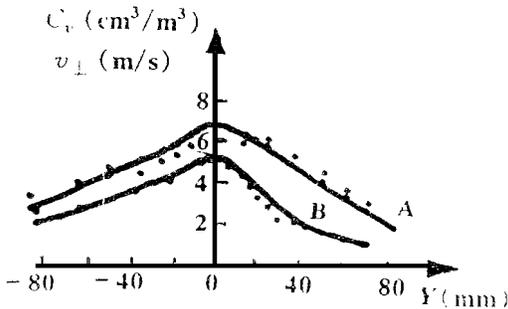


Fig. 7 Particle velocity and concentration distributions  
 $X/D=10, T=270\text{K}$ , valve opening 6.7mm

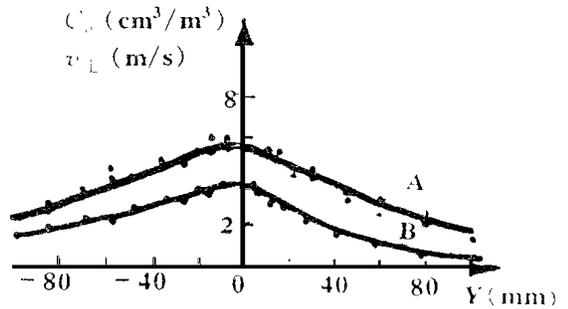


Fig. 8 Particle velocity and concentration distributions  
 $X/D=15, T=270\text{K}$ , valve opening 6.7mm

图7所示为  $X/D=10$  截面上颗粒平均速度和颗粒浓度分布,环境温度  $T=270\text{K}$ ; 阀门开度  $F=6.7\text{mm}$ , 由于环境温度较低, 颗粒的平均速度和浓度比环境温度  $T=286\text{K}$  时低(图5和图6)。

图8为  $X/D=15$  截面上颗粒平均速度和颗粒浓度分布。由于颗粒相的扩散过程继续发展, 与图7相比, 显然颗粒平均速度和颗粒浓度分布曲线趋向平坦。

附表为  $X/D=5$  截面中心( $y=0$ )处颗粒的粒度分布。

Table Particle size distribution, velocity and concentration at  $X/D=5, y=0$

particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	particle size ( $10^8/\text{m}^3$ )	particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	particle size ( $10^8/\text{m}^3$ )	particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	particle size ( $10^8/\text{m}^3$ )
10.0~23.1	0.5674	23.1~27.3	10.3743	27.3~32.3	9.0
32.3~38.2	20.0	38.2~45.2	0.1	45.2~53.8	14.0
53.8~63.3	2.5338	63.3~74.9	1.659	74.9~86.7	0.5027
88.7~105.0	0.0	particle mean velocity (m/s)	9.8887	particle concentration ( $\text{cm}^{-3}/\text{m}^3$ )	91.5

#### 四、结 论

1. PSCVMS 适用于两相流动中同时测量颗粒粒度、浓度的速度。

2. 本测量装置用于研究气固两相自由射流, 测量结果与作者以前应用其它测量技术所得结果比较, 分布趋势相符。

3. PSCVMS 最大可测速度为  $18\text{m/s}$ , 粒径范围为  $10\sim 105\mu\text{m}$ 。如需扩大测量范围, 可采用高速模数转换器。

4. 与其它激光测量技术如激光多普勒测速仪和激光衍射法相比, PSCVMS 的显著优点是光学系统结构简单, 造价低, 并具有很高的空间分辨率。

#### 参 考 文 献

- 1 Hirlean E D. AIAA 83-1514, 1983
- 2 Van de Hulst H C. Light scattering by small particles. New York: Willy, 1957
- 3 Craig F B, Donald R H. Absorption and scattering of light by small particles. New York: Willy, 1983
- 4 Holve D J, Self S A. Appl Opt, 1979; 18(10): 1632~1645
- 5 胡柱国, 盛德仁. 光学学报, 1989; 19(12): 1119
- 6 胡柱国, 盛德仁, 蔡颐年. 西安交通大学学报, 1990; 24(1): 71
- 7 Zhu Y J, Sheng D R, Jiang W Jet al. The Second Int. Con. on Measurement and Control of Granular Materials, 1991: 109~114

作者简介: 盛德仁, 男, 1960年2月出生。副教授。从事两相流激光测量和发电厂在线监控等研究。

收稿日期: 1996-11-12 收到修改稿日期: 1997-01-10

请向邮局订阅 1998 年度《激光技术》

国内刊号: CN51-1125/TN, 邮发代号: 62-74