

文章编号: 0258-7025(2002)07-0616-05

细水雾测量中 APV 的光路布局

秦 俊, 廖光焯, 王喜世, 刘江虹, 姚 斌

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230026)

提要 结合细水雾的特点和粒子的光散射理论, 通过模拟计算和实验研究, 对 APV(Adaptive Phase/Doppler Velocimeter)光路系统设计了合适的参数, 并进行了合理布局。对细水雾雾场中粒子的特性参数进行了实验测量研究, 对细水雾雾场的速度分布、滴径分布以及雾通量的测量等都得到了合理的实验结果。

关键词 粒子散射理论, 细水雾测量, 光学系统布局, 模拟实验

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Study on APV Optical Road Arrangement in Measurement Water Mist

QIN Jun, LIAO Guang-xuan, WANG Xi-shi, LIU Jiang-hong, YAO Bin

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026)

Abstract On the basis of the light scattering theory of spherical particles and the characteristic of the water mist, by theoretical computation and experiment study, the lay-out parameters of the APV (adaptive phase/Doppler velocimeter) system are given. Experiment measurement and analysis are carried out to study the characteristic parameters of the particles in the water mist flow field. The particle size and the velocity distribution and the water mist volume flux flow field are obtained from the experiments.

Key words light scattering theory of spherical particles, measurement of the water mist flow field, overall arrangement optical road of the APV system, modelling and experiment

1 引 言

超细水雾作为消防灭火剂的替代品, 具有清洁、高效、无环境污染等优点。对于各种不同类型火灾, 需要选择合适的细水雾才能达到较好的灭火效果。不同方式产生的细水雾有不同的压力流量关系、速度滴径分布及浓度等参数, 而且在真实条件下基本上都是三维湍流多相流场。细水雾灭火是用雾化器喷出很小的水滴, 形成隔氧层罩在火焰上面; 同时, 由于水滴很小, 极易气化, 迅速吸收热量, 从而使火焰温度降低。如何严格控制水雾灭火器水雾的喷出量, 使其产生的水雾既可以罩住火焰达到灭火的目的, 又可以防止通电的电器由于遇水而漏电或短路。这是利用细水雾灭火时必须解决的关键问题之一, 因此对细水雾雾场中雾粒特性的研究尤为重要。

APV 系统是应用自适应的相位/多普勒技术, 使微粒材料的识别、微粒的尺寸及速度测量成为可能。对于直径小到 20 nm 的金属微粒, 亚微米范围的透明、半透明微粒, 以及折射率很接近周围介质的微粒都可进行测量^[1, 2]。

激光相位多普勒 LDV/APV(Laser Doppler and Adaptive Phase/Doppler)方法为研究细水雾雾场的特性提供了有力的手段。为了测量细水雾三维雾场的特性, 需要搞清楚细水雾颗粒的光学特性, 才能得到合理的结果。作为 APV 技术的具体应用, 本文作者进行了细水雾流场的特性参数测量。根据微粒对光的散射特性, 并通过计算机数值模拟和实验研究, 选择和布局 APV 光路系统, 指导光学系统中各参数的设定, 提高 APV 系统测量的数据率和有效性^[3]。

收稿日期 2001-05-14; 收到修改稿日期 2001-08-20

基金项目 国家自然科学基金(编号 59876038)资助项目。

作者简介 秦俊(1951.1—)男, 安徽来安人, 副教授, 硕士学位, 主要从事火灾科学与技术研究以及流场测量研究工作。

E-mail: qinjun@ustc.edu.cn

2 水雾粒子的散射特性模型

这里给出不导电的球形粒子散射模式(见图1)。对于如细水雾液滴直径 d_p (几百微米)远大于入射光波长(几百纳米)的情况,可近似采用几何光学的散射理论,散射光就可以看作是由反射光线、折射光线和一次内反射光线的叠加。

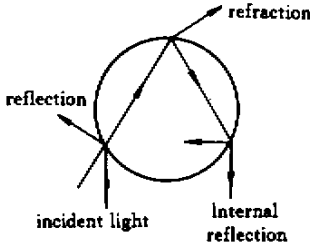


图1 球形粒子光散射模式

Fig.1 Specify the light scattering mechanism of the transparent particle

对沿主流方向运动的粒子,多普勒漂移频率较高的散射波称为引进波,较低的称为尾随波,它们的瞬时相位可表示为^[2]

$$\begin{aligned}\phi_A &= \phi_{oA} + \phi_s + \phi_{aA} \\ \phi_T &= \phi_{oT} + \phi_s + \phi_{aT}\end{aligned}\quad (1)$$

其中下标 A 和 T 分别代表引进波和尾随波。每个散射波总相位由三部分组成,粒子中心入射波相位 ϕ_o ,粒子中心到检测器的相位漂移 ϕ_s ,以及粒子的有限尺寸引起的各向异性漂移 ϕ_a 。由于大粒子的各向异性散射特点, ϕ_{aT} 不等于 ϕ_{aA} 。瞬时信号频率则由相位差 ϕ_A 和 ϕ_T 的时间导数差决定。外差信号相位可表示为^[2,3]

$$\phi_h = \phi_A - \phi_T = (\phi_{oA} - \phi_{oT}) + (\phi_{aA} - \phi_{aT}) \quad (2)$$

对水雾液滴而言,它的相对折射率为1.33,光学衰减系数很小,在平行偏振状态下,折射光在 $30^\circ \sim 80^\circ$ 散射角内占主导地位。此时各向异性相位可表示为

$$\phi_a = -Kd_p \sqrt{1 + m^2 - m \sqrt{\chi(1 + \cos\theta)}} \quad (3)$$

其中 K , d_p , m 和 θ 分别为波数、粒径、粒子相对折射率和散射角。

在假定入射波为平面波的情况下,可得到信号相位表达式

$$\phi_{PD} = F_{PI}(m)d_p \quad (4)$$

其中 $F_{PI}(m)$ 为转移函数,当光学布局参数确定后只与粒子材料折射率有关,从而可得到相位粒径关系。由于各向异性相位与测量体内粒子位置无关,所以由方程(2)求得得到的各向异性频率项为0,信号频率与粒子速度之间的关系唯一确定,且该频率与粒子速度的探测方向分量线性相关。

对于雾粒直径 d_p 远大于入射光波长的情况,可近似采用几何光学的散射理论(在这种 d_p 范围,与Mie散射理论很接近),那么散射光就可以看作是以下几种散射光线的叠加:反射光线、折射光线和一次或多次内反射光线。本文对于内反射光线的讨论只限于经过一次反射后即射出微粒的光线。这三种光线在不同的散射角所占的比例是不一样的。根据Snell法则和菲涅耳(Fresnel)反射率定律,可得到它们的计算关系式。

根据引入波与尾随波的 H 的相位的不同来计算微粒直径。下面给出相位-粒径的关系^[2]。

1) 反射

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{\pi d_p}{\lambda} [\sqrt{\chi(1 - \cos\theta_a)} - \sqrt{\chi(1 - \cos\theta_t)}] + \Phi_0 = \\ &= \frac{2\pi \sin\alpha \sin\psi}{\sqrt{\chi(1 - \cos\alpha \cos\psi \cos\varphi)}} \frac{d_p}{\lambda} + \Phi_0\end{aligned}\quad (5)$$

对于一般的反射, $\Phi_0 = 0$;全反射时, Φ_0 不为0。当两入射光束电矢量垂直于光束面时($\psi_{pa} = \psi_{pt} = 90^\circ$),则有

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= 2 \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{m^2} \sqrt{\frac{\cos\theta_a - 2m^2 + 1}{1 - \cos\theta_a}} \right) - \right. \\ &\quad \left. \tan^{-1} \left(\frac{1}{m^2} \sqrt{\frac{\cos\theta_t - 2m^2 + 1}{1 - \cos\theta_t}} \right) \right]\end{aligned}\quad (6)$$

如果电矢量平行于光束面,则有

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= 2 \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{\cos\theta_a - 2m^2 + 1}{1 - \cos\theta_a}} - \right. \\ &\quad \left. \tan^{-1} \sqrt{\frac{\cos\theta_t - 2m^2 + 1}{1 - \cos\theta_t}} \right)\end{aligned}\quad (7)$$

2) 折射

$$\Phi = -\frac{2\pi d_p}{\lambda} (l_a - l_t) = -\frac{2\pi m \sin\alpha \sin\psi}{\sqrt{\chi(1 + \cos\alpha \cos\psi \cos\varphi)} [1 + m^2 - m \sqrt{\chi(1 + \cos\alpha \cos\psi \cos\varphi)}]} \frac{d_p}{\lambda} \quad (8)$$

式中 l 为折射光线的无量纲光程,此式只适用于

$m > 1$ 的情况,否则等式右边的符号要变。

基于 Mie 散射理论的严谨数学公式,对不同物质不同大小的微粒进行散射过程的模拟,计算出相位偏移 Φ , 散射功率 P_s 及能见度 ν 。准确选择最佳光路布局。

3 细水雾流场测量的 APV 光路布局及控制参数

三维 LDV/APV 系统的典型装置由氩离子激光光源、光纤传输光路、接收光路、信号处理器、以计算机为中心的测控与流场诊断数据分析系统和三维坐标架位移机构等部分组成。由氩离子激光器产生的激光束经光束成形组合件 Colorburst 分成绿、蓝、紫三色六束单色光(波长依次为 514.5 nm, 488 nm, 476 nm)并被耦合进单模保偏传输光纤,送入发射探头,聚集在一点,形成测量体积。当粒子通过该测量体积时产生的散射光,经接收器传送到 Colorlink,与 Colorburst 中直接传输过来的光信号进行分光耦合,并通过光电转化器转化为电信号后传送到信号处理器和计算机处理分析,进行该点的三维速度和粒径的测量,通过三维坐标架位移机构的移动就可以得到全场的信息。

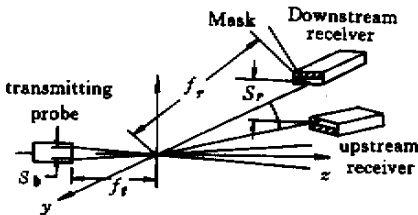


图2 APV 系统布局

Fig.2 Hardware lay-out parameters of the APV system

对于细水雾三维雾场的测量,平行偏振入射光结合 $30^\circ \sim 80^\circ$ 散射角条件,折射光将在散射光中占主导地位,可望得到线形的相位粒径关系。在如图2所示的标准布局条件下,测量灵敏度近似与光束夹角及接收器仰角的正弦成正比,即决定于光束间距 S_b , 接收器重心距离 S_r 以及发射和接收部件的聚焦长度 f_i, f_r , 这些参数应满足以下关系^[4,5]

$$\frac{f_i \times f_r}{S_b \times S_r} \geq \frac{\Delta d_p}{\lambda F_s(\theta, m)} \quad (9)$$

不等式右侧表达式称为范围函数,对细水雾这样的折射粒子,函数 F_s 取为

$$F_s(\theta, m) = \frac{4 \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + m^2 - 2m \cos \frac{\theta}{2} \right)}{m} \quad (10)$$

选定了合适的系统硬件布局参数和合适的测量控制参数,可以得到较高的数据有效率和精确的测量结果。

水是无色透明的,其衰减级别为 1,折射率为 1.33,待测粒径范围在 $10 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间,入射光在真空中波长 $\lambda_0 = 514.5 \text{ nm}$ 。对于我们现有设备,一般情况下,两入射光束间距 $S_b = 17 \text{ mm}$,入射光束焦距 $f_i = 310 \text{ mm}$,接收光束焦距 $f_r = 310 \text{ mm}$,两接收元件之间的距离 $S_r \leq 61.2 \text{ mm}$ 。激光光束直径为 1.7 mm ,半圆接收透镜直径 70.1 mm ,高 35 mm ,通过数值模拟选定其中两个分离的接收器夹角为 12° ,偏轴角均为 48° ,接收透镜上不加 Mask。由于入射光两光束夹角很小,则散射角 θ 近似等于偏轴角 φ 。

因为粒子直径远大于激光波长,Mie 散射理论可以用几何光学散射理论来代替而不会有明显差别,利用光散射的数值模拟软件 SIMAP,对该布局参数进行验算。

对于细水雾粒径 $d_p < 120 \mu\text{m}$ 时,在折射区域进行测量,相位-粒径的线性关系要好于在反射区的情况^[5]。

当粒径接近 $400 \mu\text{m}$ 时,改变 APV 光路布局,令 $f_i = 1000 \text{ mm}$, $f_r = 1000 \text{ mm}$ (其他不变),计算得到的结果,线性关系仍然很好,测量所得的数据与实据相符^[5]。不过,当 f_i, f_r 都很大时,在实际测量中,光路的校准具有一定的难度^[3]。

雾通量是通过测得微粒的速度和大小计算出来的。可以根据测得的雾粒尺寸和速度以及测量体内的雾粒个数,计算获取该测量点的雾通量^[4]。

下面给出 $d_p < 160 \mu\text{m}$ 时的测量结果。细水雾颗粒的最大直径约为 $160 \mu\text{m}$,最小直径假设为 0,激光光束直径为 1.7 mm ,光束间距 17 mm ,发射探头与接收器的焦距均为 500 mm ,其中两个分离的接收器夹角为 6° ,偏轴角均为 60° ,半圆接收透镜直径 70.1 mm ,高 35 mm 。由于光束夹角很小,偏轴角近似等于散射角,绿光波长为 515 nm ,在此条件下,范围函数约为 256,而(9)式左侧约为 279,条件基本满足,且接近最大分辨率。

经计算测量体直径约为 $200 \mu\text{m}$,与最大粒径之比约为 1.25,在相对折射率为 1.33 和 60° 散射角条件下,反射光与折射光光强之比约为 0.006,因此粒径测量将覆盖 15:1 的动态范围而不会导致明显的

轨道相对误差。

因为粒子直径远大于激光波长, Mie 散射理论可以用几何光学散射理论来代替而不会有明显差别, 利用光散射的数值模拟软件 SIMAP 中的几何光学散射理论对该布局参数进行验算, 得到的线形相位粒径关系如图 3 所示, 其中加标注的曲线是三维 LDV /APV 系统实测时的相位粒径转化函数, 仅考虑折射机理的作用, 二者吻合较好, 可见在该种条件下, 折射光在散射光中的确起主导作用。这时 APV 系统的测量灵敏度为 $2.25^\circ/\mu\text{m}$, 条纹质量也很好。

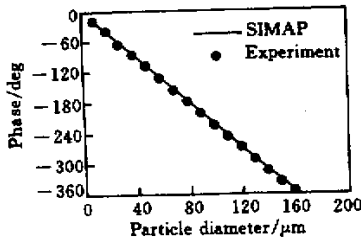


图 3 相位粒径关系

Fig.3 Particle diameter vs phase of the APV system

在实际测量中, 考虑流场的稳定性, 测量腔是用有机玻璃板围成的一方体, 超细水雾喷头安装在测量腔体的上部, 自上而下喷出超细水雾。激光束需要通过 2 mm 厚的有机玻璃板, 由于折射率的影响, 需要模拟通过一块实际厚度的有机玻璃片, 再利用显微镜, 做精细的调节, 使发射探头和接收器的焦点相交于一点。在放置测量腔时要注意光的反射特性, 使接收探头能正常接收信号。

4 实验结果与讨论

我们对粒径范围为 $70 \sim 180 \mu\text{m}$ 的水雾进行了测量, 得出了典型实验结果。实验中使用的是离心式机械喷嘴, 进水压力为 10 bar, L 为喷嘴到测量截面的距离。

图 4 则是对应喷头下方 20 cm 雾场的 APV 直方图分布, 其中 (a) 是液滴瞬时速度和滴径的关联, 中等速度及滴径的液滴数目较多 (b) 是各种瞬时量及统计平均量的分布, 绘出了面积平均滴径、体积平均滴径和轴向平均速度与滴径关联的分布。(c) 是轴向速度的直方图。(d) 是液滴滴径的直方图。正上部直观地给出了一些初步统计结果。

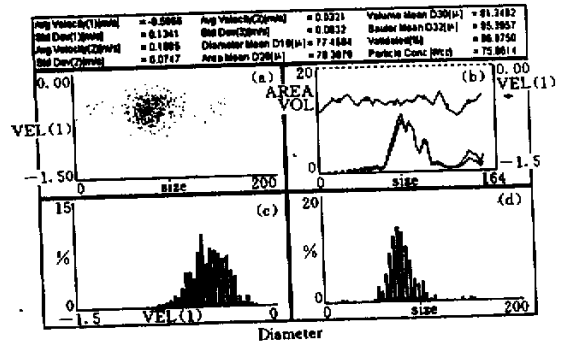


图 4 细水雾粒径分布

Fig.4 Particle diameter distribution of the water mists (velocity : m/s , particle size : μm)

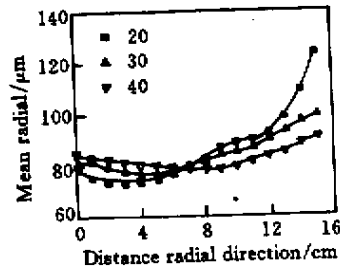


图 5 细水雾体积平均直径沿径向的分布

Fig.5 Mean diameter distribution along the sprayer radial direction

图 5 是喷头不同断面的细水雾体积平均直径沿径向的分布, 从中心线到雾场边缘, 液滴的滴径是不断增加的, 到边缘处达到最大, 这与大粒子具有较大的惯性有关, 沿轴向看, 在近中心线处, 滴径随出口距离的增加而增加, 这是因为雾化的小液滴在运动过程中相互碰撞, 凝结成较大的液滴, 这种粒子碰撞复合效应在多喷头共同作用区域或有障碍物时较为突出, 对细水雾控制和扑灭火灾的性能有影响, 在实际利用细水雾防治火灾时应予以重视, 在近边缘处, 滴径随出口距离增加而减小, 这是因为该区域的液体与气体的相互作用较大, 导致液滴的进一步雾化。工作压力小于 1.5 MPa 时, 离心式喷头的体积平均滴径的常用准则关系式为^[6]

$$d_{32} = \frac{23\nu_f^{0.2}\sigma_f^{0.6}G_f^{0.25}}{\Delta p^{0.4}} \quad (11)$$

其中 d_{32} 为 SMD 直径(μm), ν_f 为液体的运动粘度 ($10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$), σ_f 为液体的表面张力系数(dyne/cm),

Δp 为喷头压降(lbf/in^2), G_f 为液体流量(lb/h)。对于常温下的水来说,上式可简化为

$$d_{32} = \frac{300 G_f^{0.25}}{\Delta p^{0.4}} \quad (12)$$

代入本文实验条件,压力 1.0 MPa,流量 1.6 ml/s,可得细水雾 SMD 直径约为 80 μm ,与本文实验所测 VMD 结果相符合。

通过计算和模拟实验研究,利用上述 APV 系统光路参数的设计和硬件系统布局,对雾场中粒子的特性参数进行了有效的测量,为研究超细水雾雾场特性以及细水雾与火焰相互作用的机理研究提供了有效手段和方法。利用 LDV/APV 对离心式雾化喷头产生的三维细水雾雾场进行了实验研究,利用散射理论结合细水雾的特点对系统的光学系统设计了合适的参数,得到线性的相位滴径关系并接近最大分辨率,得到了合理的实验结果。细水雾的速度分布、滴径分布以及雾通量的测量都得到实验的验证。

致谢 本文得到了吴鸿兴教授的指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 W. D. Bachlor. Experimental methods in multiphase flows [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1994, **20**, Suppl 261 ~ 295
- 2 Amir A. Nagwi, Franz Durst, Gabriele Kraft. Sizing of submicrometer particles using a phase-Doppler system [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(33) 4903 ~ 4913
- 3 Yao Bin, Qin Jun, Liao Guangxuan. The hardware lay-out parameters to measure the large scale spray feed by the 3D LDV/APV system and its application [J]. *Journal of China University of Science and Technology* (中国科学技术大学学报), 1997, **27**(4) 471 ~ 476
- 4 Qin Jun, Yao Bin, Liao Guangxuan. Study on volume flux measurement of the water mist field with APV [J]. *Journal of China University of Science and Technology* (中国科学技术大学学报), 1999, **29**(3) 322 ~ 325 (in Chinese)
- 5 Qin Jun, Liao Guangxuan, Wang Xishi *et al.*. Study on optical arrangement of numerical value experimentation in measure large water mist drop diameter [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 1999, **16**(1) :90 ~ 96 (in Chinese)
- 6 Chen Shuyi, Zhang Liling. Fuel Bruning Equipment [M]. Beijing : Metallurgical Industry Press, 1991 (in Chinese)