

激光多普勒细水雾雾场特性实验研究 *

秦 俊 廖光焯 王喜世 姚 斌 杨远智

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,合肥,230026)

摘要: 结合细水雾的特点和粒子的光散射理论,对三维 APV (adaptive phase/Doppler velocimeter) 的光路系统设计了合适的参数,并进行了合理地布局。对细水雾雾场进行了实验研究,细水雾的速度分布、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: 激光相位多普勒 粒子散射理论 细水雾雾场测量

Study on the flow field of water mist with laser Doppler

Qin Jun, Liao Guangxuan, Wang Xishi, Yao Bin, Yang Yuanzhi

(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, the optimum optical path for 3D APV (adaptive phase/Doppler velocimeter) and reasonable layout of the system are designed. The particle size, the velocity distribution and the water mist volume flux of the water mist flow field are obtained through experiments.

Key words: laser phase Doppler light scattering theory of spherical particles measurement of the water mist flow field

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。90 年代发展起来的三维激光相位多普勒 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,需要搞清细水雾颗粒的光学特性,才能得到合理的结果。

* 国家自然科学基金资助。

- 10 Mitsui T, Hosoe K. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987; 2(1): 87 ~ 93
- 11 Norimatsu M, Shirasaki M. 压电与声光, 1989; 11(1): 46 ~ 49
- 12 谢克诚. 电压与声光, 1991; 13(1): 23 ~ 26
- 13 Gruden A, Richardson ZJ. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995; 10(3): 1217 ~ 1223
- 14 Crystal Products. Fujian Castech Crystals, Inc.
- 15 Williams P A, Rose A H, Lee K S *et al.* Appl Opt, 1996; 35(19): 3562 ~ 3569

作者简介: 李开成, 男, 1962 年出生。博士, 副教授。主要从事自动检测技术、信号处理、智能仪器等研究。

收稿日期: 2000-06-29 收到修改稿日期: 2000-08-17

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)

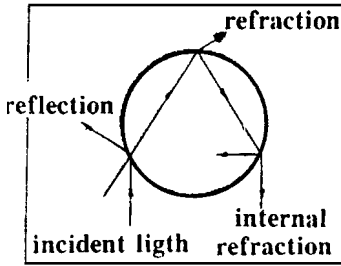


Fig. 1 The light scattering mechanism of the transparent particle

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(在这种 d_p 范围,与 Mie 散射理论很接近),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。

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^[1]:

$$A = \omega_A + s + a_A$$

$$T = \omega_T + s + a_T \tag{1}$$

式中,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 3 部分组成,粒子中心入射波相位 ω ,粒子中心到检测器的相位漂移 s ,以及粒子的有限尺寸引起的各向异性漂移 a 。由于大粒子的各向异性散射特点, $a_T \neq a_A$ 。瞬时信号频率则由相位差 A 和 T 的时间导数差决定。外差信号相位可表示为^[2,3]:

$$h = A - T = (\omega_A - \omega_T) + (a_A - a_T) \tag{2}$$

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:

$$a = -Kd_p \sqrt{1 + m^2 - m \sqrt{2(1 + \cos \theta)}} \tag{3}$$

式中, 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,可推出信号相位表达式: $\phi_{PD} = F_{PD}(m) d_p$ (4)

式中, $F_{PD}(m)$ 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)求导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。

1 测量光路及实验装置

1.1 测量光路布局及控制参数

在三维 LDV/APV 系统中,由氩离子激光器产生的光束经成形组合件 Colorburst 分成三色六束单色光(波长依次为 515nm, 488nm, 476nm),送入发射探头,聚焦于一点,形成测量体,粒子通过该测量体时产生的散射光,经接收器传送到 ColorLink,与 ColorBurst 中直接传输

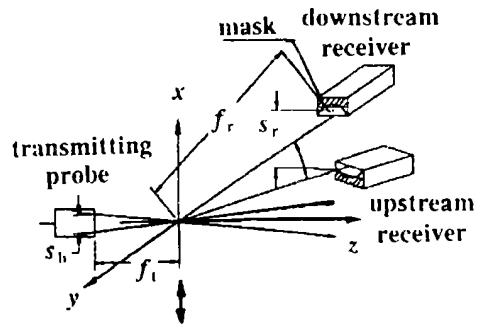


Fig. 2 The hardware layout parameters of the APV system

过来的光信号进行分光耦合,并通过光电转换器转化为电信号后传送计算机处理分析,进行该点的三维速度和粒径的测量。不同研究对象,需要确定的是主导散射机制、入射光偏振状态、光束夹角、接收器的偏轴角和仰角等硬件布局参数及频率搜索范围、频移量等实验控制参数。

在测量细水雾三维雾场时,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,也即决定于光束间距 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_t, f_r , 这些参数应满足以下关系^[4,5]:

$$(f_t \times f_r) / (S_b \times S_r) \quad d_p / F_s(, m) \tag{5}$$

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:

$$F_s(, m) = 4\cos(\ / 2) [1 + m^2 - 2m\cos(\ / 2)] / m \tag{6}$$

由于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 1.7mm ,光束间距 17mm ,发射探头与接受器的焦距均为 500mm ,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 70.1mm ,高 35mm 。由于光束夹角很小,偏轴角近似等于散射角,绿光波长为 515nm ,在此条件下,范围函数约为 256,而(5)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。

1.2 实验装置

细水雾发生装置如图 3 所示,该装置最大设计压力为 8MPa ,最大水容量 30L ,全套管线均为不锈钢制成,并配有过滤器,以防堵塞喷头。高压空气从气瓶中经减压阀达到所需压力,对储水装置中的蒸馏水加压,打开截止阀后,通过雾化喷头喷出,形成细水雾。通过针形调压阀微调管线压力,并有流量计和压力表监测;通过注水装

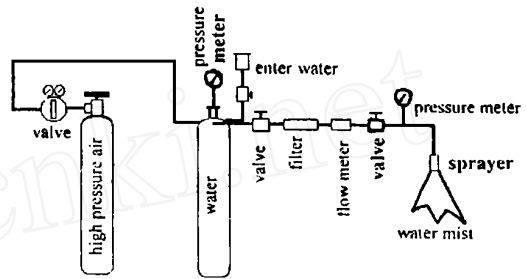


Fig. 3 The water mist generator

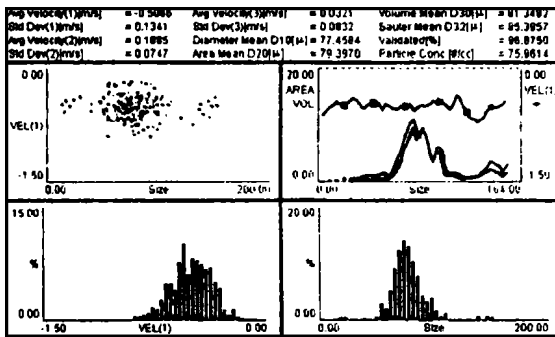


Fig. 4 Particle distribution of the water mists (velocity m/s, particle size μm)

置可以方便地向储水装置内重新灌装蒸馏水,储水装置上装有压力表和安全阀。由于实验所用喷头的流量都很小,在较长时间内压力可以保持稳定,得到平稳的细水雾雾场。

我们利用三维 LDV/APV 系统对该装置产生的细水雾雾场进行了测量,选用大小两种流量的离心式压力雾化喷头,型号分别为 LN2 和 LN1。该喷头旋流数较小,能在较低压力下产生滴径 $100\mu\text{m}$ 以内的细水雾,且具有轴向、径向和切向的三维速度。

将喷头竖直向下置放于三维 LDV/APV 系统的测量腔内,并采用上述硬件布局参数和测量控制参数,利用智能化坐标位移机构对雾场沿中心线及横截面逐点测量。

2 实验结果与讨论

图 4 是对应喷头下方 20cm 雾场的 APV 直方图分布,其中左上图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,右上图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。左下图是轴向速度的直方

图。右下图是液滴滴径的直方图。图4的正上部给出了一些初步统计结果。图5得到小喷头在1MPa压力条件下产生的细水雾的三维平均速度沿喷头轴向的分布(其中平均速度已取绝对值,以下相同),主流方向平均速度在出口段是剧烈衰减的,但在发展段却逐渐增加,这是重力及气动力互相作用的结果,直到二者相互平衡为止,径向平均速度及切向平均速度沿轴向都逐渐衰减。液流在喷头中旋转,从喷口小孔射出时,雾化角较大,径向扩张速度和切向旋流速度也相应较大;在远离喷口时,由于摩擦等相互作用,二者都会逐渐减小。图6得到了该条件下细水雾的三维平均速

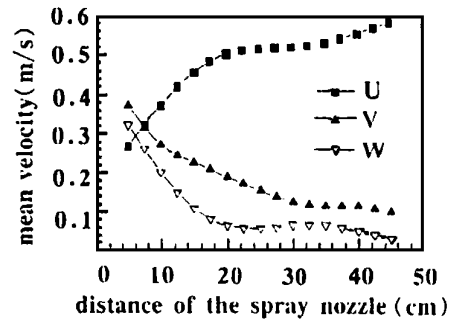


Fig. 5 The mean velocity of water mist on the axial direction

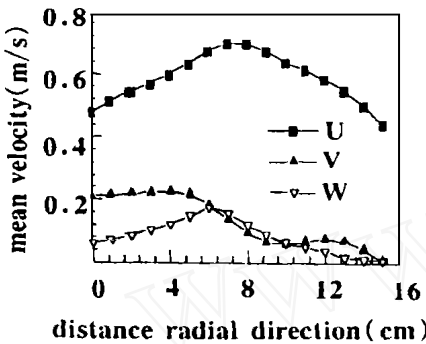


Fig. 6 The mean velocity of water mist along the sprayer radial direction

度沿径向的分布,三者均有极大值,这是因为离心式喷头产生的雾滴沿雾化锥角射出,并在一定角度内发散,离轴线一定距离时的速度较大,浓度也较大,相应的体积通量也较大。从图7可得到小喷头不同断面的轴向平均速度沿径向的分布,在距喷头出口较近处,轴向平均速度为山峰型分布随着距离的增加逐渐过渡到边缘处达到最大值,这时雾场已接近充分发展。

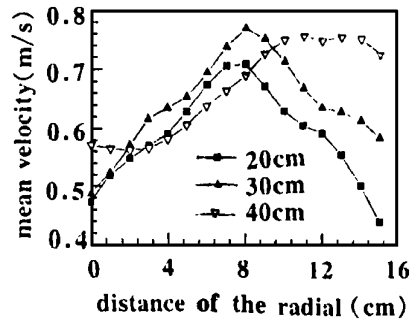


Fig. 7 The mean velocity of water mist on the radial along the sprayer axial direction

滴径是细水雾雾场的另一重要参数,各种平均滴径之间可以互相转化,我们将用研究细水雾与火焰相互作用时常用的体积平均直径(VMD)来表示液滴平均滴径。图8是小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如下^[6]:

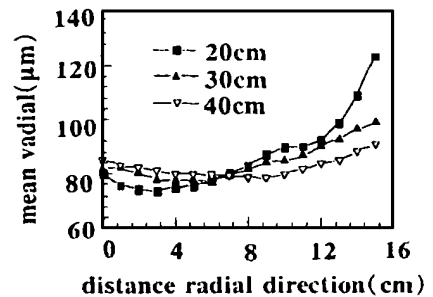


Fig. 8 The mean diameter distribution along the sprayer radial direction

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如下^[6]:

$$d_{32} = 23 v_f^{0.2} f^{0.6} G_f^{0.25} / p^{0.4} \tag{7}$$

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

(dyne/cm), p 是喷头压降 (lbf/in^2), G_f 是液体流量 (lb/h)。对于常温下的水来说, 上式可简化为:

$$d_{32} = 300 G_f^{0.25} / p^{0.4} \quad (8)$$

代入本实验条件, 压力 1.0MPa, 流量 1.6mL/s, 可得细水雾 SMD 直径约为 $80\mu\text{m}$, 与我们实验所测 VMD 结果相符合。

图 9 和图 10 分别给出了小喷头在不同压力条件下轴向平均速度沿轴向及径向的分布, 压力增大时, 轴向平均速度也相应增大, 但在远离出口处, 轴向平均速度受压力的影响远小于近出口处。

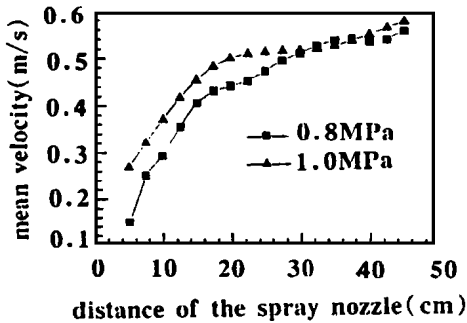


Fig. 9 The mean velocity of water mist on the axial direction along the sprayer axial direction

激光多普勒方法对超细水雾流场的测量, 为研究超细水雾雾场特性提供了有效手段, 为研究超细水雾与火焰相互作用的机理研究提供了有效方法。利用三维 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布局参数, 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其它实验的验证。通过实验研究, 对细水雾的特性参数有了进一步的认识, 为进行细水雾与火焰的相互作用研究以及数值模拟打下了基础。

参 考 文 献

- 1 Naqwi A. Experiment in Fluid, 1996; 20(5) : 328 ~ 334
- 2 Naqwi A, Durst F. Particle & Particle Systems, 1991; 8(4) : 245 ~ 258
- 3 Naqwi A. Particle & Particle Systems, 1994; 11: 7 ~ 21
- 4 Qin J, Yao B, Liao G X. J University of Science and Technology of China, 1999; 29(3) : 322 ~ 325
- 5 Qin J, Liao G X, Wang X Sh et al. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1999; 16(1) : 90 ~ 96
- 6 陈树义, 章丽玲. 燃料燃烧及燃烧装置. 北京: 冶金工业出版社, 1991

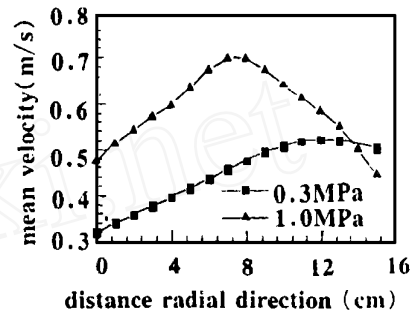


Fig. 10 The mean velocity of water mist on the axial direction along the sprayer radial direction

作者简介: 秦 俊, 男, 1953 年出生。硕士, 副教授。从事火灾科学与技术领域的研究、流场测量、火灾探测及扑救等工作。

收稿日期: 2000-04-05 收到修改稿日期: 2000-05-24