

LDV/APV 系统研究纵向通风作用下 细水雾雾场特性

刘江虹¹, 朱伟², 廖光焯³

(1. 上海海事大学海洋环境与工程学院, 上海 201306; 2. 北京城市系统工程研究中心, 北京 100036;

3. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 构建了小型低速风洞, 利用三维激光多普勒测速计和自适应相位多普勒速度计系统(三维 LDV/APV 系统), 通过观察和测量超声雾化细水雾在不同纵向风速影响下的运动特性, 获取了细水雾的平均速度、平均粒径和雾流量等特性参数, 实验结果表明, 实验空间内同一截面上雾滴速度分布与风速呈两段式的线性变化, 增加通风后雾滴粒径显著增大并趋于稳定, 而雾流量也呈线性增长; 雾滴速度和粒径受雾滴运动距离的影响很小, 但是雾流量会随着运动距离的增加明显减小。实验结果对纵向通风条件下细水雾灭火设计具有一定的指导意义。

[关键词] 细水雾; 纵向通风; LDV/APV; 雾场特性

[中图分类号] X932 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0075-07

1 前言

细水雾以其无毒害、灭火迅速、耗水量小等显著优点, 已成为传统哈龙(Halon)灭火系统的主要替代品之一, 已在许多高新技术领域和重大工业危险源得到应用, 并不断拓展应用领域^[1-3]。即使在较弱的通风作用下, 气体灭火系统也容易受到外界气流的影响而导致灭火失败^[4], 因此在一些灭火阶段仍需要保持通风的场合, 已经考虑采用细水雾灭火技术, 并已有工程使用^[5-8]。

纵向通风是一种常见的强制通风形式, 目前开展的全尺度实验表明细水雾在这样的情况下能够有效抑制火灾^[6,7], 但是纵向通风对细水雾的影响也是比较显著的, 尤其是气流扰动导致雾滴飘移对细水雾雾滴速度的影响, 可以改变细水雾的作用范围、雾流量等参数, 从而影响细水雾与火相互作用的过程。因此对细水雾速度场特性进行研究, 有助于提高对细水雾在纵向通风作用下灭火机理的认识。由

于一般的接触式速度测量方法会对流动产生干扰, 在细水雾雾场诊断方面, 已有应用激光多普勒测速仪(LDV)进行非接触式速度测量^[9-11]。

然而纵向通风通常存在于相对封闭的狭长空间内, 这使得与以往的开放空间下细水雾速度场的 LDV 测量有所不同。因此, 本文将利用小型低速风洞形成较为稳定的纵向通风, 同时在风洞内施加细水雾, 通过调整光路在风洞狭长空间内形成测量体进行 LDV 测量, 采用逐点测量的方法获取全场信息, 从而研究在不同的纵向通风作用下气流对细水雾运动特性的影响。

2 实验装置

实验装置可以分为三维 LDV/APV 系统、雾发生系统和小型低速风洞 3 个部分, 如图 1 所示。

2.1 三维 LDV/APV 系统

实验中采用的三维 LDV/APV 系统为美国 TSI 公司的双镜头式三维激光多普勒测速系统, 激光光

[收稿日期] 2012-03-30

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50676092); 上海市教委科研创新项目(11YZ131)

[作者简介] 刘江虹(1966—), 男, 安徽贵池市人, 上海海事大学教授, 博士后, 主要从事船舶火灾动力学演化机理及防治技术研究工作;
E-mail: liujh@shmtu.edu.cn

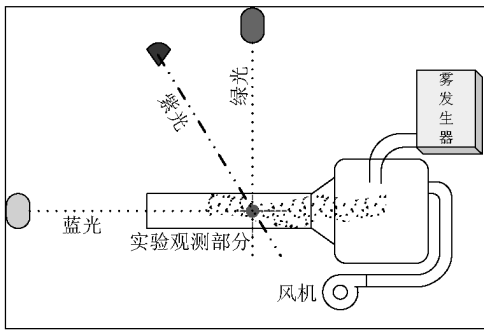


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

源为 1 W 氩离子激光器,通过光分束分色器将光束分为 3 对平行的发射光。要实现三维速度测量,必须保证这 3 对发射光束的焦点能汇聚一点,形成一个椭圆的测量体。粒子通过该测量体时产生散射光,经接收器传送并进行光电信号转换,自动分析后实现三维速度的实时测量。

所测速度和多普勒频率的关系为

$$v = (F_d - F_{\text{shift}}) \times D_f \quad (1)$$

式(1)中: F_d 为多普勒频率,Hz; F_{shift} 为频移,Hz; D_f 为光学条纹间距,mm。由瞬时速度再结合有效测量时间,就可以得到速度场的有关统计量。为了使 3 对发射光能够相聚在一点,还需要合理调整系统布局。实验采用的细水雾雾滴粒径范围在 10 ~ 100 μm ,远大于入射光波长($\sim 0.1 \mu\text{m}$),因而可以近似采用几何光学散射理论来确定光路布局参数,主要包括入射光束和接收光束的焦距均为 310 mm,两个分离的接收器夹角为 12° ,偏轴角均为 48° 。该系统还有智能化三维坐标位移机构,通过对其的操纵可以准确定位改变测量点,实现全场速度测量。

2.2 雾发生系统

细水雾由 YC-LA 型超声波细水雾发生器产生,其原理是利用高频超声波振动,产生雾滴尺寸小而均匀的细水雾。发生器有 9 个喷雾口,产生的细水雾通过连接喷雾口的软管进入一个收集容器,再由一个出口导出进入测量空间。这样可以通过调节使用的喷雾口数量改变雾通量,也便于控制进入空间的喷雾方向。

2.3 小型低速风洞

风洞是一种使用动力装置驱动一股可控制的气流的管道系统,它可以提供稳定的、可测的速度场,能够准确改变风洞内的气流参数。在研究中,设计

了一个低速小型风洞作为细水雾运动的狭长空间。风洞装置可分为动力及输送段、整流段、收缩段和实验段 4 部分,再通过变频风机可得到稳定可调的纵向气流。由于速度比较低,Mach 数一般小于 0.02,因此气体可以看作不可压的^[12]。在不可压气体流动实验中,Reynolds 数 (Re) 是最主要的相似准则数,另外风洞的湍流度不能超过一定的限度。风洞的实验段横截面积为 $15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,长 80 cm。由于雾滴粒径远小于实验空间,并假设洞壁足够光滑,因而可以忽略流动受到风洞本体的干扰。

为了使 LDV/APV 系统的发射光能在风洞内汇聚,同时保证空间的相对封闭性,在风洞的一侧设置一个观察窗口。观察窗口采用折射率接近为 1 的透明 PE 聚乙烯薄膜作为介质。

3 实验结果与分析

利用上述实验装置对通风影响下的细水雾雾滴运动特性进行了实验研究。通过改变风机电机频率调节风洞内的纵向风速,分别为 0、0.25 m/s、0.5 m/s、0.75 m/s、1 m/s、1.25 m/s、1.5 m/s、1.75 m/s、2 m/s、2.25 m/s、2.5 m/s,每个风速条件下选取不同轴向等距离的几个截面中的测量点进行数据采集,与进风口的距离为 0、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 的截面分别记为 A、B、C、D、E,采集时间为 60 s。然后对这个时间段采集到的数据进行分析,得到通过该点的细水雾雾滴速度和粒径统计分布。

3.1 速度分布

以进流截面至出流截面的方向为 z 方向,垂直向下为 y 方向。图 2 和图 3 分别给出了各个测量点下不同风速情况下细水雾雾滴 z 方向和 y 方向速度沿轴向的变化情况。从图 2 可看出,在各个风速情况下,在同一轴心线上雾滴沿着纵向飘移的速度都比较一致,这是由于雾滴颗粒细小,受气流运动的影响相对就比较大,而风洞内气流的纵向速度比较稳定,因而雾滴能够随着气流沿着通风方向稳定地运动。但是在实验采用的风速范围内,随着气流速度的增大,雾滴轴向运动速度总体上呈现上升的趋势,这与气流携带下整个雾场的颗粒密度、悬浮时间等条件有关。

从图 3 可看出,无通风情况下,在进风截面附近的测量点上,雾滴下落速度较大,而后迅速降低,而在有通风情况下,雾滴垂直向下的速度一直都比较小,这也说明粒径小的雾滴受气流运动影响较大,气

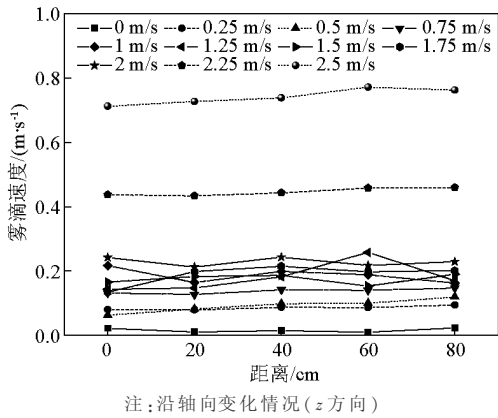


图2 不同风速情况下细水雾雾滴速度

Fig. 2 Water mist velocity under different wind velocity

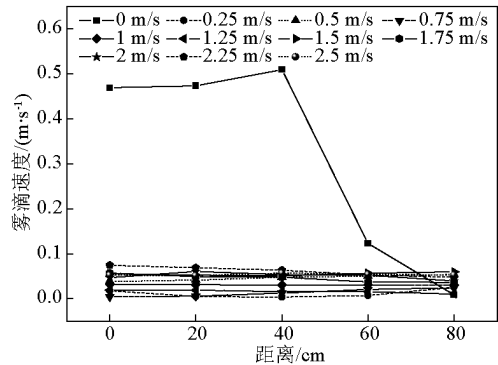


图3 不同风速情况下细水雾雾滴速度

Fig. 3 Water mist velocity under different wind velocity

流的运动也增加了雾滴下落所受到的阻力系数,使得在有通风情况下大多数雾滴都随着气流的运动方向而运动。下落速度小,可以减少由于重力作用影响到达空间底部的雾滴数量,使得更多的雾滴弥漫在空间或蒸发,而这样可以有效增强细水雾的吸热能力。

图4a~图4e是不同截面采样点的平均雾滴纵向速度随风速变化的情况。如果设气流速度为 v_g , 雾滴纵向速度为 v_f , 那么 v_g 和 v_f 之间近似存在如下的线性关系

$$v_f = a + bv_g \quad (2)$$

式(2)中: a 和 b 为系数。虽然前面假设雾滴经出口垂直向下喷出,但实际上总会存在一定的纵向速度,因此在 $v_g = 0$ 的情况下,也存在一定的初始 v_f , a 即与此有关。 b 则是主要与风洞内流动情况,尤其是阻尼系数 C_d 有关的一个量。雷诺数 Re 与阻尼系数 C_d 之间的关系可以用下式表示^[13]

$$C_d = \begin{cases} 24/Re & Re \leq 1 \\ 24/Re^{0.646} & 1 < Re \leq 1\ 000 \\ 0.47 & 1\ 000 < Re \leq 3 \times 10^5 \\ 0.20 & Re > 3 \times 10^5 \end{cases} \quad (3)$$

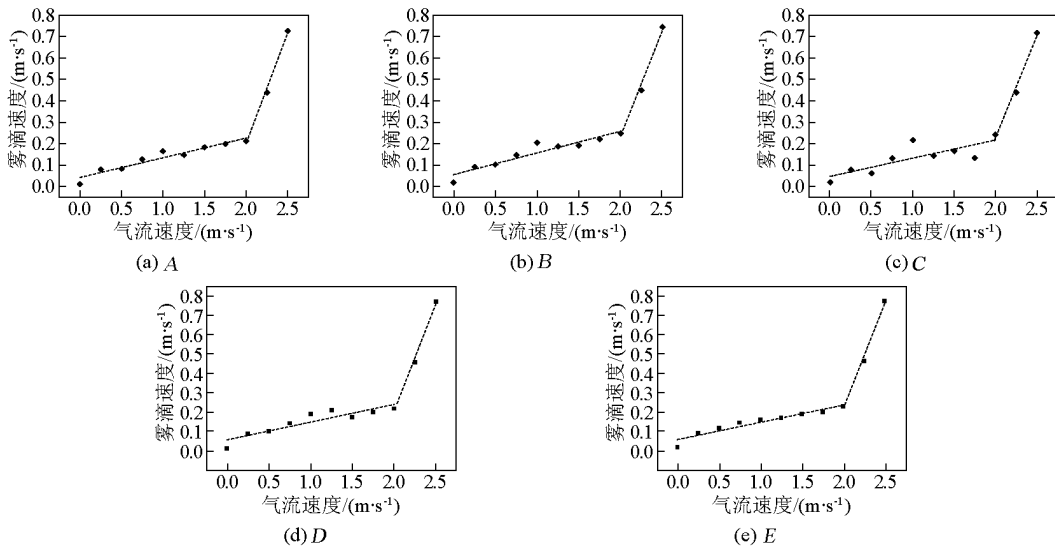


图4 各个测量点雾滴速度与气流速度的变化关系(z方向)

Fig. 4 Relationship between water mist velocity and wind velocity at different measure points(z direction)

拟合得到的系数见表1, $v_g < 2.0$ m/s 的系数为 a_1 、 b_1 ; $v_g > 2.0$ m/s 的系数为 a_2 、 b_2 。可以看出,在 $v_g < 2.0$ m/s 的情况下,雾滴的轴向速度呈缓慢上升的趋势,而在 $v_g > 2.0$ m/s 后,雾滴速度显著上升。这是因为气流速度增大,风洞内气体流动的雷诺数 Re 也增大,达到一定程度后,可能导致流动湍流程度的急剧增加,从式(3)可以看出,在 Re 变化到一定程度后,阻尼系数 C_d 的趋势突然变化,并在一定的 Re 值区内趋近于一个稳定值。 C_d 减小,那么气流携带的雾滴运动也随之加快,因此式(2)中的 b 值与阻尼系数 C_d 的变化趋势存在相反的关系。同时,由于风洞内沿轴线方向的流动比较均匀,几个采样点的测量结果拟合曲线的系数都比较接近。

表1 各个测量点拟合曲线的系数

Table 1 Fitting curve coefficient of different measure points

测量位置	a_1	b_1	a_2	b_2
A	0.049 22	0.084 1	-1.649 72	0.939 4
B	0.041 55	0.092 31	-1.857 13	1.029 6
C	0.051 03	0.100 97	-1.752 57	0.99
D	0.055 12	0.091 77	-2.010 52	1.107 8
E	0.061 39	0.087 24	-1.916 15	1.066 6

3.2 粒径分布

为了进一步研究雾滴在风洞内的运动特性,还需要对不同风速下雾滴在风洞内的粒径分布进行分析。在本文细水雾运动特性研究中,采用的粒径分布是 Sauter 平均粒径(SMD)^[14]。

超声波细水雾发生器产生的雾滴粒径在30 μm 左右,由于粒径小,当水雾的浓度比较大时,雾滴之间容易粘接。因此利用三维 LDV/APV 系统对雾滴粒径进行测量和统计分析,就可以从雾滴凝并导致粒径改变这个角度来分析其运动特性。不同风速下几个截面的中轴线上测得的雾滴粒径结果如图5所示。

在没有通风的情况下,雾滴粒径在30~40 μm ,这是由于水平速度较慢,气流运动相对静止,而且多数雾滴在较短的轴向距离内即已沉降,有一些稍大于30 μm 粒径的颗粒存在,说明在雾滴运动过程中只是发生了少量的凝并。而在施加通风后,雾滴的平均粒径显著增大。这说明加入通风后,气流运动明显加剧,大大增加了细小雾滴之间的碰撞几率,也就提供了更多雾滴凝并的机会,而在凝并过程中,粒径的变化有以下关系

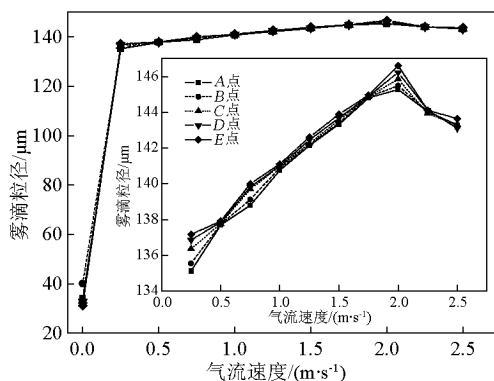


图5 各个采样点风速与雾滴粒径的关系

Fig. 5 Relationship between water mist velocity and wind velocity at different measure points

$$d_i = (d_j^3 + d_k^3)^{1/3} \quad (4)$$

式(4)中: d_i 为凝并后的雾滴粒径; d_j 和 d_k 为参与凝并的两个雾滴的粒径。

在实验采用的风速范围内,雾滴 Sauter 平均粒径一直趋于比较稳定的值。但是对其变化情况深入分析可以看出,在 $v_g < 2.0$ m/s 的情况下,雾滴的 SMD 随着风速 v_g 的增加而增加,而当 $v_g > 2.0$ m/s 后,SMD 则会随之减小。之所以出现这样的情况,可见除了风速导致风洞内气流状态的改变之外,雾滴的凝并现象还受到雾滴密度、生存时间等参数的共同影响。虽然风速越大雾滴凝并的机会越大,但是从前面的分析可以看出细小雾滴的生存时间也就在1 s左右,气流运动加快后还可以加强雾滴表面的热交换,从而在雾滴凝并和雾滴沉降加快的同时会降低风洞内的雾滴密度,这从另一方面对雾滴的凝并产生负面影响。因此,当风速达到一定程度后,可能使得雾滴的统计平均粒径反而略微降低。另外,即使雾滴沿轴向运动过程中凝并现象会一直发生,然而沿着轴线方向雾滴的粒径也只是呈略有增加的趋势,这是由于雾滴密度和雾滴沉降也在产生影响的原因。

3.3 雾通量分布

雾通量不能通过三维 LDV/APV 系统直接测量得到,需要综合分析速度场和粒子场的测量结果。本节讨论的雾通量是面积雾通量 V_F ,可以用下面的公式表示

$$V_F = \frac{1}{6} \frac{\pi d^3 N}{S \cdot \Delta t} \quad (5)$$

式(5)中: N 为所测的粒子数; S 为测量面积; t 为采样时间,即60 s。由于 APV/LDV 系统中, S 即为两

束激光的交汇区域在纵截面上的投影面积。本实验中采用的焦距是 300 mm, 两束激光发射源相距 170 mm, 激光光束的直径为 1.6 mm, 可以得到 $S = 7.37 \text{ mm}^2$ 。

利用 LDV/APV 系统测量得到不同风速下通过几个测量点的粒子数 N 分布情况。通过式(5)计算可以得到 A ~ E 各个截面的雾通量情况。为了能够避免不同实验初始雾通量对实验结果的影响, 在这里定义一个无量纲雾通比率 η , 表征细水雾雾滴通过某个纵截面的雾通量占初始雾通量的比率, 以定量的分析细水雾在通风影响下随气流携带下纵向运动的飘移特性。雾通比率 η 的表达式如下

$$\eta = \frac{V_F}{V_{F0}} \quad (6)$$

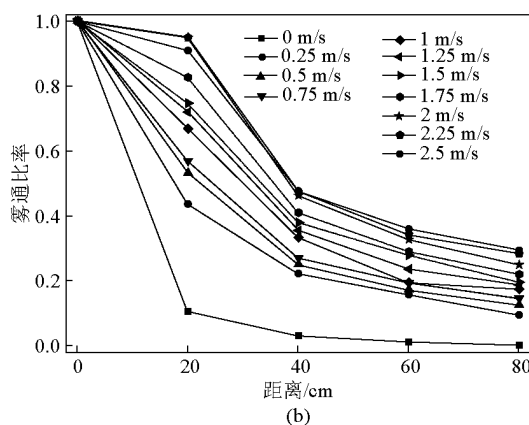
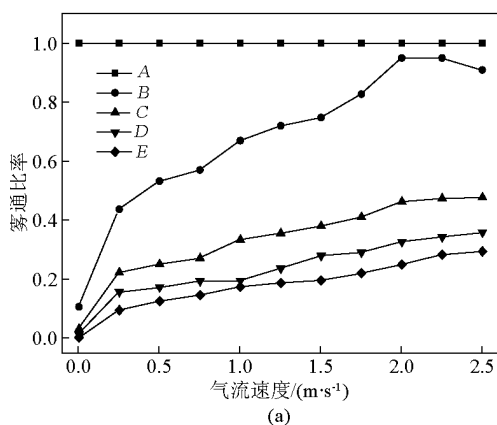


图 6 不同影响因素与雾通比率的关系

Fig. 6 Effects of different wind velocity and moving distance on water mist flux

表 2 不同运动距离雾通比率与风速之间的线性相关性

Table 2 Linear correlation between wind velocity and water mist flux under different moving distance

运动距离/cm	相关系数 R
20	0.97
40	0.99
60	0.99
80	0.99

为了考察它们对雾通比率各自的影响程度, 假设如下方程来回归求出两个变量各自的权重

$$\eta = \alpha v_g + \beta L + \gamma \quad (7)$$

式(7)中: α 和 β 为系数, γ 为常数。为了消除不同量纲给数据带来的不稳定性, 采用式(8)对数据进行标准化处理^[15]。

根据这个定义, 可以计算各个纵截面在不同风速下的雾通比率, 图 6a 是风速对雾通比率的影响, 图 6b 则是运动距离对雾通比率的影响。细水雾自出口喷出后, 沿着轴向方向雾通量不断减少, 这是雾滴运动过程中在壁面粘附以及蒸发的结果。在没有通风作用的情况下, 雾滴的水平移动比较缓慢, 因而能够到达 B ~ E 的雾滴非常少, 从而雾通量也急剧降低。而有了通风的作用, 能够携带相当数量的雾滴运动, 而且风速越大, 雾通量也越大。从两个图的曲线形状来看, 除了无通风情况, 风速和运动距离都与雾通比率有一定的线性关系, 其相关性如表 2 和表 3 所示, 可以看出都能够比较好地接近线性关系。

表 3 不同风速下雾通比率与运动距离之间的线性相关性

Table 3 Linear correlation between moving distance and water mist flux under different wind velocity

风速 / (m • s ⁻¹)	相关系数 R
0.25	0.90
0.5	0.92
0.75	0.93
1	0.95
1.25	0.96
1.5	0.96
1.75	0.96
2	0.95
2.25	0.95
2.5	0.96

$$X_{ij}^* = x_{ij} / \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (8)$$

式(8)中: x_{ij} 为测量的原始样本,为一列数据的平均值; x_{ij}^* 为测量数据标准化值。然后采用二元线性回归方法,得到回归参数和回归方程的显著性,结果如表4所示。

表4 回归参数值和显著性

Table 4 Regression parameter values and significant

参数	参数值	t 值	显著性 p
α	0.414	2.518	$0.0005 < p < 0.001$
β	-0.818	-4.976	$p < 0.0005$
γ	2.056	—	—

从表4可看出,参数 α 和 β 的显著性均小于0.001,回归效果显著,变量风速和运动距离对雾通过率都有重要的影响。另外,由于 β 的t值大于 α 的t值,可见运动距离的影响相对更大。也说明,即使增大相当的风速,但如果在相对喷雾出口较远的距离处,细水雾的雾通量仍不能达到与喷雾出口处相当的水平,因为距离增加对雾通量所造成的影响要强于风速改变所造成的影响。

4 结语

本文对利用三维LDV/APV技术对不同纵向风速下风洞内的细水雾运动特性进行了测量,通过对实验数据分析可得出以下几点结论。

1)雾滴速度与风速呈线性变化,但是由于风速增大会使风洞内的空气阻力系数发生变化,因此在测量范围内可以看到,两者之间的线性关系出现了两种不同的斜率。但不同运动距离雾滴的速度仍非常接近。

2)由于通风对雾滴运动的剧烈扰动,增加通风后雾滴凝并现象显著,使得雾滴平均粒径也显著增加,但风速增大和运动距离的增加对整体平均粒径影响不大。

3)雾通量同时受到风速和运动距离的影响,经过对实验数据进行二元线性回归发现,运动距离对雾通量分布的影响更大。

4)从实验结果来看,增加通风后雾滴作用范围

增大,在空间的运动时间增长,这对细水雾降低空间温度抑制火灾有着促进作用,但同时使雾滴粒径增大,即表面积增大,这将降低细水雾的吸热能力。通风对偏离喷雾出口位置的细水雾灭火性能的促进作用也是有限的。

参考文献

- [1] 刘江虹,廖光焯,厉培德. 细水雾灭火技术研究与进展[J]. 科学通报,2003,48(8):761-767.
- [2] Jones A, Nolan P F. Discussion on the use of fine water sprays or mists for fire suppression [J]. Journal of Loss Prevention in Process Industries, 1995, 8(1):17-22.
- [3] NFPA committee. NFPA 750 Water Mist Fire Suppression System Committee [C]// NFPA 750, 2000.
- [4] Dundas R E. Experience with external fires in gas turbine installations and implications for fire protection [J]. ASME Paper No: 1990:90-GT-375.
- [5] Scott D, Pankahnia N. Will water mist improve fire safety? [J]. World Tunnelling, 2001, 14(8):384-385.
- [6] Hainzl M, Reichsthaler G. Fire fighting system for tunnels-A report about the practical experience with our water mist tunnel system [C]// A International Conference of Tunnel Safety and Ventilation, Austria, 2002.
- [7] Stahl P. A thermodynamic examination of the extinguishing properties of water spray and water mist [C]// 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Korea, 2004:1038-1053.
- [8] Tuomisaari M. Water mist fire suppression systems concepts for roadway tunnels [C]// International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, Sweden, 2003.
- [9] 秦俊,姚斌,廖光焯,等. APV激光流场诊断系统及其应用[J]. 火灾科学, 1999, 8(2):37-42.
- [10] 刘江虹,廖光焯,秦俊,等. 细水雾与射流卷吸现象的LDV/APV测量研究[J]. 激光杂志, 2000, 21(6):58-60.
- [11] 秦俊,廖光焯,王喜世,等. 激光多普勒细水雾雾场特性实验研究[J]. 激光技术, 2001, 25(4):297-301.
- [12] 王勋年. 低速风洞实验[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- [13] Li Y F, Chow W K. Modelling of water mist fire suppression systems by a one-zone model [J]. Combustion Theory and Modelling, 2004(8):567-592.
- [14] Jukka Vaari. A transient one-zone computer model for total flooding water mist fire suppression in ventilated enclosures [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37:229-257.
- [15] 任若恩,王惠文. 多元统计数据分析——理论、方法、实例[M]. 北京:国防工业出版社, 1997.

Experimental study on the water mist under longitudinal ventilation using LDV/APV system

Liu Jianghong¹, Zhu Wei², Liao Guangxuan³

(1. Ocean Environmental and Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. Beijing Research Center of Urban System Engineering, Beijing 100054, China; 3. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science Technology of China, Hefei 230026, China)

[**Abstract**] The Laser Doppler Velocimetry (LDV) or Adaptive Phase Doppler Velocimetry (APV) system was used to study the water mist flow field under longitudinal ventilation. The water mist characteristics: mean velocity, volume mean size and volume flux were obtained. The results indicate that in the same cross section mean velocity of water mist increases as airflow velocity increases, but displays as two step linear fitting. Experiments deepened the understanding of the mechanics of water mist induced by a jet and provided better conditions for experiment of water mist induced by flame in the next step.

[**Key words**] water mist; longitudinal ventilation; LDV/APV; mist characteristic