

细水雾有效雾通量的称重法测量研究

刘益民, 秦俊, 廖光焯, 谭家磊

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:雾通量是影响细水雾灭火性能的关键参数之一,前人研究它对灭火性能影响时,通常分析的是细水雾的总通量.为了将与火焰或燃料发生相互作用的细水雾从总量中加以区分,定义这部分雾通量为有效雾通量.测量雾通量主要有两种方法,一种是量杯收集法,另一种是间接测量积分算法.在量杯收集法的基本思路上,提出了有效雾通量的称重测量法.通过建立细水雾发生系统与电子天平实时称重系统,实验验证了称重法测量的可行性.结果表明:称重法可以实时、有效获得细水雾的有效雾通量;且不同高度平均雾通量随高度变化的规律与一定假设前提下的理论推导结果能够较好地吻合,由此得到了有效雾通量空间分布的近似计算方法.在计算获得了有效雾通量空间分布的基础上,如果通过实验得到有效雾通量与细水雾灭火性能的对应关系,就可以分析出不同雾场不同区域的灭火性能分布,有效减少灭火实验次数.

关键词:有效雾通量;细水雾;电子天平;雾流密度

中图分类号:X932 **文献标识码:**A

Measurement of effective water mist flux by electronic balance

LIU Yi-min, QIN Jun, LIAO Guang-xuan, TAN Jia-lei

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Water mist flux is one of the key factors in flame extinguishment, so total flux was usually discussed in former research works. In order to distinguish the portion of water mist that has a direct influence on the flame or fuel, effective flux was defined based on the current conception of water mist flux. Collecting tubes and the APV (adaptive phase/ Doppler velocimeter) system are two ways currently employed to measure water mist flux. In order to measure the unstable water mist flux and improve the tube-collection method, a water mist generating system and an electronic balance were set up to validate the means of using electronic balance to measure the flux. It was proved that electronic balance can measure flux density effectively and in real-time. Meanwhile, fluxes of different heights have a good correspondence with the results of theoretic calculation. Ununiformity of the water mist field is the reason for the slight difference in results between the experiments and calculation. Some expressions were presented to calculate the dimensional distribution of effective flux density. A lot of fire suppressing experiments can be omitted using the calculation.

Key words: effective flux; water mist; electronic balance; flux density

0 引言

作为哈龙灭火剂的理想替代,细水雾灭火技术得到了世界各国的普遍重视^[1~3]。影响细水雾灭火性能的关键参数有很多,雾流量是其中之一^[4]。雾流量是指整个喷头(嘴)在某个工作压力下,喷射出的细水雾单位时间内通过一定面积的水流量,而通过单位面积的雾流量即为雾流密度。

前人研究雾流量对灭火性能影响时,通常分析的是细水雾的总流量,重点研究了喷头的特性,却忽略了细水雾与火焰之间的相互作用。而实际能够影响灭火性能的却是可以与火焰或燃料直接发生相互作用的细水雾。研究表明,燃料冷却是细水雾灭火的主要机理之一^[5~7],因此,在研究细水雾与火焰相互作用中的燃料冷却机理时,与灭火性能相关性更大的不是雾流量的总量,而是能够直接喷射到燃料表面的雾流量。

为了区别于传统意义上的雾流量,定义燃料表面面积为有效面积,直接喷射到燃料表面的那部分雾流量为有效雾流量。有效雾流量的提出,可以去除无关细水雾流量对灭火机理分析的影响,得以更加清楚地研究雾流量与灭火效率的关系。为了对有效雾流量进行测量,在调研总结前人测量方法的基础上,提出了电子天平称重测量法。

1 测量方法分析

对于雾流量的测量,美国防火协会(National Fire Protection Association)发布的水雾防火系统国家标准 NFPA750 中采用的是量杯收集法。将量杯按照一定方位布置,在一段时间内收集细水雾,将收集的水量除以持续时间就可以计算出这段时间内的平均雾流量分布^[8]。

由于喷头(嘴)的工艺影响,细水雾流量很难在空间内均匀分布。为了对雾场内的流量进行细致测量,秦俊等^[9~11]使用 APV(adaptive phase/ Doppler velocimeter)系统对细水雾液滴的速度、滴径和粒子数浓度沿径向的分布进行了测量,并由这些结果计算出了雾流量的径向分布。

在量杯收集测量法和 APV 测量法这两者之中,APV 测量法是通过测量细水雾的粒径、速度以及浓度分布,使用一系列公式计算获得雾流量的。从那些计算公式可以看出:这种方法虽然较为精确,测量系统却很复杂;而且测量值为一段时间内的统计

值,无法测量非稳态雾场的流量;另外,雾流量是通过其他量间接计算获得,所以这种方法将可能产生累积误差,降低测量值的可信度。

与 APV 测量法相比,量杯测量法虽然避免了累积误差,但测量却是基于这样一个基本假设:一段时间内的雾流量恒定不变。在这个前提下,使用量杯收集细水雾一段时间,将收集到的水量除以收集的时间和量杯开口面积获得雾流密度。可以看出,这种方法同样无法测量非稳态雾场的流量。

从大量细水雾灭火实验的结果可以发现:某些工况下火焰被很快扑灭,而另外一些工况下,火焰却需要喷射细水雾很长时间才能扑灭。要分析这种现象,仅考虑稳态雾流量将很难给出合理解释。对于不同细水雾系统而言,除了稳态雾流量,细水雾施加初始时刻的瞬间非稳态雾流量更应该决定细水雾灭火时间长短的重要参数。而量杯收集法和 APV 测量法均无法测量雾流量的瞬态值。

为了能够测量非稳态雾场的有效雾流量,在有效雾流量定义的基础上,只要做出一个横截面与燃料表面形状相同的量杯,将量杯置于电子天平之上,使用电子天平对量杯内收集的水进行实时称重,称重结果传输到电脑,通过数据采集程序记录数据就能得到重量—时间关系(式(1));将式(1)对时间进行求导,求导结果再除以量杯面积,即可在实验时实时得到雾场内的雾流密度 $q(t)$ (式(2))及其变化过程。可以看出,这种测量法简单易行,而且对于流量实时变化过程能够有效反应。

$$\text{Weight}(t) = f(t) + f(0) \quad (1)$$

$$q(t) = \frac{\text{Weight}'(t)}{A} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{A \Delta t} \quad (2)$$

式中, A 为有效面积; t 为时间; $f(0)$ 为天平初始值。

2 实验模型及工况

有效雾流量称重法测量的模拟实验系统由两部分组成,如图 1 所示。其中,实线框内的是细水雾产生系统,虚线框内是数据采集系统。

细水雾系统由 50 L 高压二氧化碳钢瓶、减压阀、11 L 中压水罐、球阀、三通、1.5 MPa 量程压力表与细水雾喷头(单喷嘴喷头,0.7 MPa 时的 K 系数为 0.317)及连接管路构成。实验时,水罐排气口关闭,5 MPa 的二氧化碳通过减压阀,以 0.7 MPa 的压力进入水罐,水罐中的水从另一管道流出,通过球阀控制细水雾喷射的开启,到达三通,三通的另外

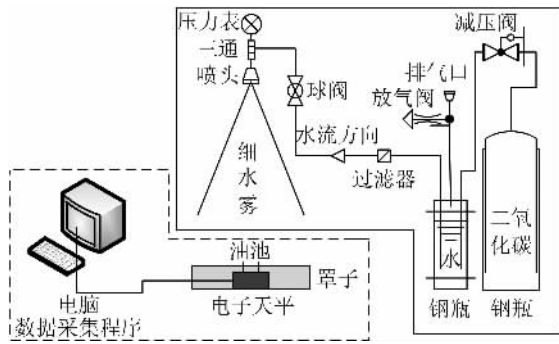


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Sketch of experimental system

两头分别是压力表和细水雾喷头, 压力表的读数即为喷头实际工作压力。

数据采集系统由量程为 3.2 kg、最小精度为 0.01 g 的电子天平(型号为 Sartorius CP3202S), 长、宽、高分别为 10.0 cm, 10.0 cm, 1.0 cm 的不锈钢油池, 铁皮罩子, 数据线, 电脑以及数据采集程序构成。罩子顶面有 10.2 cm×10.2 cm 方形开口, 油池放置在电子天平上之后, 罩子将天平罩住, 并使油池从顶面开口露出。电子天平信号输出通过串口线传送到电脑, 数据采集程序使用 Visual Basic 6 编制。

实验时, 细水雾喷头固定在一定高度的架子上, 油池置于喷头正下方。开启电脑、电子天平, 将天平清零, 开启数据采集程序。调整好细水雾系统工作压力后, 开启球阀喷射细水雾 15~30 秒之后关闭阀门。天平再次清零, 清零后重新开启球阀, 继续喷射细水雾。每个高度重复测量喷射三次, 一共在 5 个高度下进行了测量。喷头距离油池表面的距离分别是: 40.5, 70.0, 99.0, 128.0, 145.0 cm。

3 实验结果与讨论

根据不同高度下有效面积内收集到的细水雾质量随时间的变化, 可以得到各个高度的质量—时间变化曲线, 使用式(2)可求得雾流密度随时间变化的过程曲线, 将称重与雾流密度曲线画在同一个坐标系中, 可以得到图 2。

图 2 中, 每个图上半部分曲线为该高度下雾流密度随时间的变化过程, 对应的纵坐标在右边; 下半部分存在波动的曲线为该高度下细水雾质量随时间变化的过程, 对应的纵坐标在左边。从图 2 的有效雾通量实时变化曲线可以看出: 细水雾持续喷射过程中, 雾通量相对稳定。因此, 使用方程 $Y=A+Bx$ 对各图中的称重曲线中间稳定段进行线性拟合, 拟合

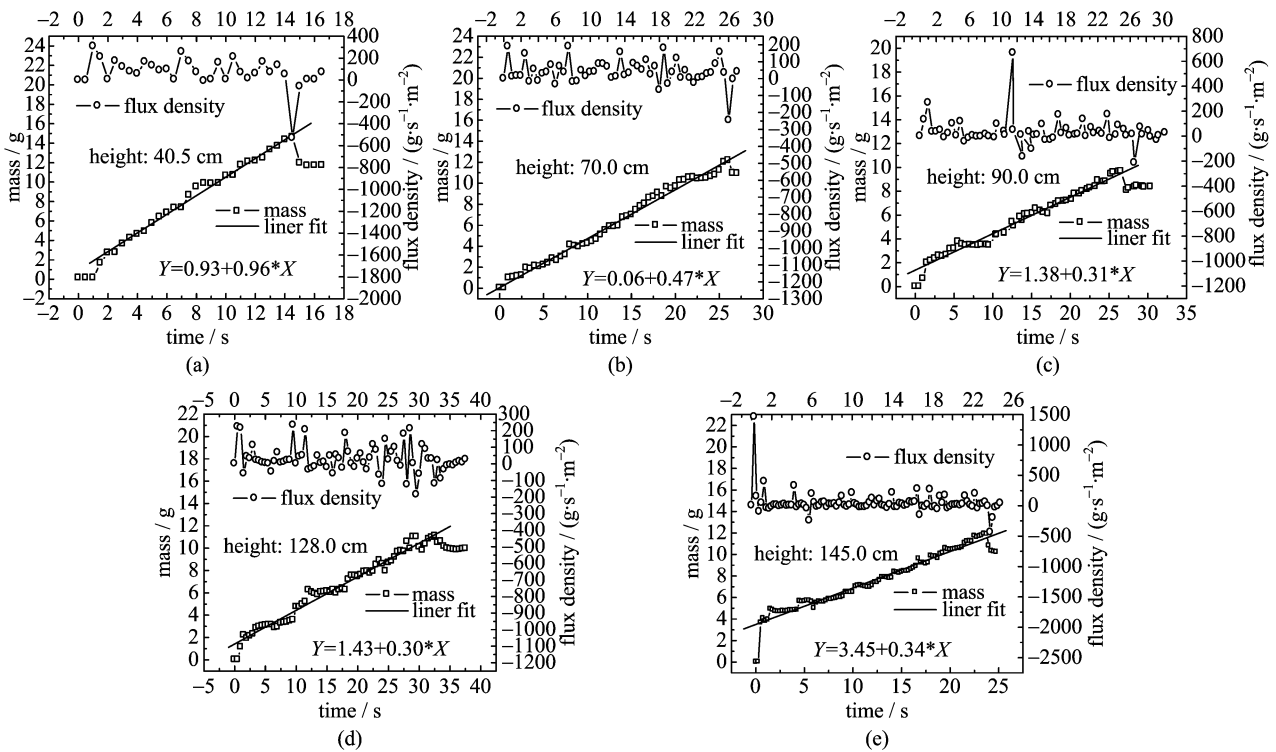


图 2 称重与雾流密度曲线

Fig. 2 Mass and water mist flux density

直线的斜率就是不同高度下喷头在稳态时的平均有效雾通量. 将同一高度的有效雾通量进行算术平均, 可以得到高度与有效雾通量关系, 其变化过程如图 3 实心菱形标示连接的折线所示.

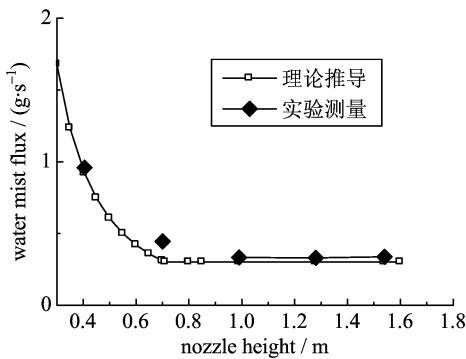


图 3 有效雾通量随高度变化曲线

Fig. 3 Effective water mist flux vs height

图 4 左侧为实验中的细水雾照片, 使用图 4 右侧的锥形加柱形雾场对实际雾场进行近似, 并假设右侧雾场中雾流密度在高度 h 的横截面的径向分布满足公式 $q = g(r)$, $0 \leq r \leq R$, 其中 R 为雾场在该水平面的最大半径. 设雾锥角为 α , 整个喷头的水流量为 Q , 有效面积为 A . h_{\min} 为细水雾可以覆盖有效面积的最小喷射高度, 那么 $0 \leq h \leq h_{\min}$ 时, 有效面积内的雾通量 $Q_c = Q$; h_1 是锥体高度, 在 $h_{\min} \leq h \leq h_1$ 高度的范围内, 有效雾通量 Q_c 与喷头高度 h 的关系式可以通过式(3)计算获得.

$$Q_c(h) = \int_A g(r) dA \quad (3)$$

式中, R 为距离喷头垂直距离 h 处的雾场半径. 在 $h_1 \leq h$ 高度的范围内 Q_c 与高度 h 的关系为式(4). 此时, Q_c 在整个 h 范围内为常数.

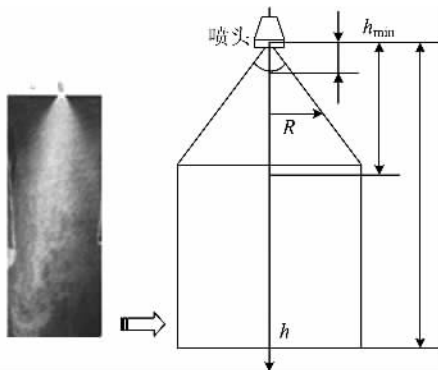


图 4 雾场形状示意图

Fig. 4 Photo and figure of water mist field

$$Q_c(h | h = h_1) = \int_A g(r) dA \quad (4)$$

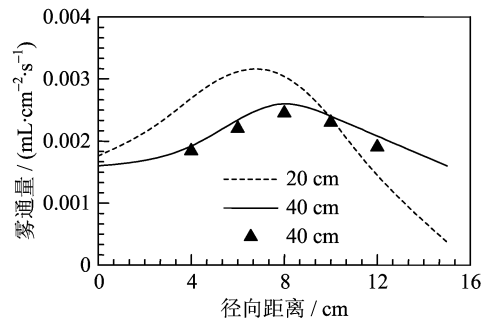
当同一水平面内的通量分布均匀时, 将 $q = g(r) = K$ (K 为常数) 代入方程(3), (4), 即可得到 $h_{\min} \leq h \leq h_1$ 和 $h_1 \leq h$ 范围内有效雾通量的计算公式(5), (6):

$$Q_c = KA = \frac{Q}{\pi R^2} \times A = \frac{QA}{\pi \left(h \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2} = \frac{QA}{\pi \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \times \frac{1}{h^2} \quad (5)$$

$$Q_c = \frac{QA}{\pi \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \times \frac{1}{h_1^2} \quad (6)$$

因此理论推导的雾通量随喷头高度变化曲线为分段函数. 根据实验测量获得的 $\alpha = 57.0^\circ$, $Q = 14.0$ g/s, $A = 0.10$ m \times 0.10 m = 0.01 m², $h_{\min} = 0.14$ cm, $h_1 = 0.71$ m 可以计算出雾流密度随喷头高度的变化曲线(图 3 中空方框标示连接起来的分段曲线), 对比计算曲线和称重测量法获得的曲线, 可以看出, 两者之间可以较好吻合.

文献[9]分别采用 APV 测量法和量杯收集法对细水雾通量随径向的分布进行了测量, 测量结果如图 5 所示, 图中虚线为距离喷头下方 20.0 cm 处雾通量随径向距离的变化过程, 实线为 40.0 cm 处的变化曲线, 三角形的数据点则是 40.0 cm 处使用试管收集法测量获得的通量分布. 从图 5 可以看出, 细水雾的有效雾通量并不是如上分析所假设的那样均匀分布, 而是随着径向距离的增大出现了一个先增大后减小的过程. 正是这个原因, 不同高度下实验测量值比理论计算值平均大 12.9%.



▲ 试管收集法数据

图 5 雾通量沿径向分布

Fig. 5 Radial distribution of the water mist volume flux

4 结论

细水雾通量是细水雾灭火机理研究和影响灭火性能的关键参数,在常规通量定义的基础上,提出有效面积和有效雾通量的概念,由于细水雾灭火过程中与火源发生作用的往往是直接喷射到燃料表面的那部分细水雾,所以,有效雾通量的提出可以更好地分析雾通量对灭火性能的影响,且方便分析细水雾施加瞬间对燃料与火焰的影响.在量杯收集雾通量测量法的基础上进行改进,提出了电子天平称重测量法,建立实验系统验证了这种方法的可行性.实验结果表明称重法雾通量测量操作简单,可以对有效雾通量进行测量,且测量结果具有很好的可重复性.有效雾通量随喷头高度的变化可用一个三段函数进行拟合,实验结果比拟合结果平均大 12.9%,雾通量的非均匀分布造成了这种误差.从雾流密度随时间变化曲线可以看出,称重法通量测量有较好的实时性,可以用来测量非稳态雾场中的通量.在精度要求不高的情况下,可以在获得了喷头总通量、锥角、通量径向分布以及 h_1 之后使用本文给出的分段曲线求出雾通量的空间分布.

参考文献(References)

- [1] Grant G, Brenton J, Drysdale D. Fire suppression by water sprays[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26: 79-130.
- [2] Ndubizu C C, Ananth R, Tatem P A, et al. On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame[J]. Fire Safety Journal. 1998, 31: 253-276.
- [3] Kim A, Mawhinney J R, Su J. Water-mist system can replace halon for use on electrical equipment [J]. Canadian Consulting Engineer, 1996, 5: 30-35.
- [4] HUANG Dong-lai, WANG Qing, DONG Wu-yi, et al. Investigation on the factors that effect water mist suppression efficiency [J]. Fire Technique and Productions Information, 2006, 9: 3-6.
黄东来,王庆,董五义,等.细水雾灭火有效性的影响因素研究[J].消防技术与产品信息,2006,9: 3-6.

- [5] YU Yong-gang, FENG Jin-li. Small-scale experiments and simplified model on water mist interaction with liquid pool fires[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6 (1): 85-90.
余永刚,冯金莉.细水雾与液体燃料火焰相互作用的小尺度实验研究及简化模型[J].热科学与技术,2007,6(1): 85-90.
- [6] LIANG Qing-shui, LIANG Qing-quan, XU Wen-yi. Water mist characteristics and its fire suppression mechanism[J]. Fire Science and Technology, 2005, 24 (4): 447-450.
梁清水,梁清泉,徐文毅.细水雾特性及其灭火机理分析[J].消防科学与技术,2005,24(4): 447-450.
- [7] LU Qiang, LIAO Guang-xuan, QIN Jun, et al. Analysis of relative significance of several influential factor for fire suppression by water mist [J]. Fire Safety Science, 2002, 11(3): 164-169.
陆强,廖光焯,秦俊,等.细水雾灭油池火时各种影响因素的相对重要度分析[J].火灾科学,2002,11(3): 164-169.
- [8] NFPA. NFPA750-2003, Standard on water mist fire protection systems[S]. Quincy: NFPA, 2003.
- [9] QIN Jun, YAO Bin, LIAO Guang-xuan. Study on volume flux measurement of water mist field with APV [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1999, 29(3): 322-325.
秦俊,姚斌,廖光焯,等.细水雾流场雾通量的 APV 测量研究[J].中国科学技术大学学报,1999,29(3): 322-325.
- [10] LIU Jiang-hong, LIAO Guang-xuan, Qin Jun, et al. Experimental study on the water mist induced by a jet with 3D LDV/APV system [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(4): 220-222.
刘江虹,廖光焯,秦俊,等.三维 LDV/APV 系统研究细水雾与射流卷吸现象[J].激光与红外,2000,30(4): 220-222.
- [11] QIN Jun, LIAO Guang-xuan, Wang Xi-shi, et al. Study on the flow field of water mist with laser Doppler [J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 297-301.
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.