

细水雾与油池火相互作用的尺度模拟实验

刘志强¹, 黄鑫²

(1.包头市消防支队, 内蒙古 包头 014000;

2.公安部天津消防研究所, 天津 300381)

摘要: 首先讨论无细水雾时火焰的尺度关系及细水雾施加时细水雾相关特性的尺度关系, 然后选择符合尺度关系的喷头, 在线性尺度比为 3.33 的两个空间内进行细水雾灭火实验, 测量不同火源功率下的临界灭火水流量, 最后分析实验结果, 考察尺度模拟方法的可靠性。

关键词: 细水雾; 尺度模拟; 几何相似; 灭火

自 1987 年《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》签订以来, 国际安全领域一直将细水雾作为哈龙灭火剂的潜在替代物进行研究。然而迄今为止, 由于细水雾灭火机理的复杂性, 细水雾灭火系统的设计还不能完全依赖一般性原则或称优先原则。2003 版的 NFPA750 附录 C 中建议, 预先设计的系统, 其可靠性需要由国际公认的火灾实验室进行全尺度实验来证明。但是, 这种“实验设计”方法成本太高, 限制了细水雾灭火系统的发展。因此, 如何确定细水雾灭火系统的相关设计准则以简化系统设计、降低成本, 已成为拓展细水雾系统应用领域的关键。

从经济角度而言, 一个较好的尺度模拟方法对于研究细水雾灭火技术是有利的, 至少它有助于全尺度实验前的系统设计和性能参数确定, 因为如果在某尺度下系统被证明有效, 那么应用尺度原则可以将结果外延至较大的尺度。目前, 较大尺度的系统设计倾向于采用同样的雾发生装置, 不同的是增加喷头的数量, 而尺度模拟方法能够通过被保护空间的几何相似布置(如喷头尺寸、喷射压力等)取代这种设计方法。细水雾与火焰相互作用的尺度模拟研究始于 20 世纪 70 年代, 不过迄今为止还没有实验可以严格证明这些尺度关系的准确性。本文通过细水雾灭油池火的尺度模拟实验对细水雾与火焰相互作用的尺度模拟关系进行了研究, 分析了细水雾灭火的尺度模拟方法的可行性及存在的问题。

1 细水雾与火焰的尺度模拟

1.1 室火的尺度模拟

Thomas、Waterman 以及 Heskestad 等人对受限空间内无细水雾施加条件下

的火焰尺度模拟进行了大量研究，主要集中在恒定压力下给定的燃料/空气系统。在恒定温度和压力下，不同尺度的火焰其 Re 和 Fr 很难同时相等，而这对于模型的建立又是必要的，在这种情况下对 Re 相等的要求可以放松，即忽略粘度对流动的影响（在火焰边界处 Re 一般较高），严格保持 Fr 恒定。

速度的尺度关系见式（1）：

$$u_0 \propto L^{1/2} \quad (1)$$

式中 u_0 为速度（m/s）， L 为空间尺度（m）。

火焰热释放速率的尺度关系见式（2）：

$$Q \propto m_f \propto L^{5/2} \quad (2)$$

式中 Q 为火焰热释放速率（kW）， m_f 为质量燃烧速率（kg/s）。

流动时间的尺度关系见式（3）：

$$t_0 \propto L/u_0 \propto L^{1/2} \quad (3)$$

式中 t_0 为流动时间（s）。

压力的尺度关系见式（4）：

$$\Delta P_0 \propto \rho u_0^2 \propto L \quad (4)$$

式中 ΔP_0 为压力差（Pa）， ρ 为气体密度（kg/m³）。

1.2 细水雾的尺度模拟

当细水雾施加时，在不考虑雾滴蒸发的情况下，要模拟雾滴与上升气流的相互作用，则在不同尺度下最初的雾滴轨迹必须保持不变，雾滴的初始速度必须按照 $L^{1/2}$ 的尺度关系进行模拟，而雾滴粒径和雾通量密度也同样必须按照此尺度关系进行模拟，即：

$$d \propto u_0 \propto L^{1/2} \quad (5)$$

$$E \propto (u_0 d)^{3/2} / L \propto L^{1/2} \quad (6)$$

式中： d 为雾滴粒径（ μm ）， E 为雾通量密度（kg/sm²）（标单位……）

对雾滴蒸发的模拟已有研究，不同学者的研究结果均表明模拟结果依赖雾滴的质量损失速率与气体上升速度。假定液相均为水，气相均为空气，两者的温度均保持不变，则雾滴的质量损失速率可以用式（7）表示：

$$\dot{m} \propto u_0^{1/2} d^{3/2} \propto L \quad (7)$$

式中： \dot{m} 为雾滴的质量损失速率（kg/s）。

为保证模拟方法的一致性，雾滴生存时间必须按照流动时间的尺度进行模拟，即按照 $L^{1/2}$ 的尺度进行模拟，且细水雾的整体蒸发速率必须与火焰的热释放

速率保持恒比，即必须按照 $L^{5/2}$ 的尺度关系进行模拟。

根据式 (5) 和式 (7)，雾滴生存时间模拟关系见式 (8)：

$$t_L \propto m / \rho \propto d^3 / \rho \propto L^{3/2} / L = L^{1/2} \quad (8)$$

式中： t_L 为雾滴生存时间 (s)。

由此可知，雾滴生存时间满足按照流动时间模拟的要求。整体蒸发速率也满足模拟要求，见式 (9)：

$$\dot{M} \propto (EL^3 / d^3 u_0) \rho \propto L^{5/2} \quad (9)$$

式中： \dot{M} 为整体蒸发速率 (kg/s)。

目前，热辐射对细水雾与火焰相互作用的影响还无法很好地模拟。对于那些雾滴对辐射的衰减在 10% 以上的场景，辐射传输分数较为准确的表达式见式 (10)：

$$Tr = e^{-4.0 f_v s / d} \quad (10)$$

式中： s 为辐射方向上的距离 (m)， f_v 为雾滴的体积分数，由于雾滴的体积分数为定值，因而根据模拟要求 s/d 必须为恒量。然而如前所述，在实际模拟中 s 正比于 L ， d 正比于 $L^{1/2}$ ，因此 s/d 正比于 $L^{1/2}$ ，即整体而言，随着尺度增加，辐射的衰减程度将上升，同时由于辐射吸热而蒸发的雾滴量也将上升。在不同的火灾场景下，辐射衰减模拟的重要性也不同，对于受限空间内较大尺度的火焰，其误差可能较大。

模拟喷雾源时由于大多数雾场是属于多向分散的，因此定义雾滴粒径为体积平均粒径 d_m 。模拟必须满足雾滴粒径的几率密度分布 d/d_m 和 $f(d/d_m)$ 保持不变，即在不同尺度条件下细水雾喷头必须几何相似，同时要求保证雾滴初始轨迹相同，而实际上这两个要求往往很难同时满足。

要使不同尺度下喷头满足几何相似条件，则喷口直径的尺度关系见式 (11)：

$$D_n \propto L \quad (11)$$

式中： D_n 为喷口直径 (mm)。

Dombrowski 和 Wolfsohn 发现，对于压力式细水雾喷头，其喷射的雾滴粒径与 $Q_w^{1/3} / u_n$ 成正比。对于笔者的模拟而言，可以按照式 (12) 进行：

$$d / D_n \propto (\Delta p_w D_n)^{-1/3} \quad (12)$$

因为 $D_n \propto L$ ， Δp_w 为水的压差 (Pa)， $\Delta p_w^{1/2} \propto u_n \propto L^{1/2}$ ，可得式 (13)：

$$d \propto L^{1/3} \quad (13)$$

而根据式 (5)， $d \propto L^{1/2}$ ，即与几何相似相比，尺度模拟要求的粒径变化相对更快，

不过在尺度变化不太大的情况下该差异并不明显。按照尺度模拟关系得到的细水雾喷头尺度其实际雾滴平均粒径较之几何相似要求相差 $S^{1/6}$ 倍，其中 S 为尺度关系，即对于 3:1 尺度，相差 1.2 倍，对于 10:1 尺度，则相差至 1.47 倍。

综上所述，在模拟中对于受限空间应要求其几何相似，这种相似性包括火源位置、通风口和喷头位置。在不同尺度下雾滴的初始轨迹必须相同。假设尺度比 S 为两个受限空间特征长度的比值，如屋顶高度、喷头高度或喷口直径，则相应的尺度关系见表 1。

表 1 尺度关系

特征参数	比值
火焰热释放速率	$Q_2 / Q_1 = S^{5/2}$
温度	$\Delta T_2 / \Delta T_1 = S^0 = 1$
气体浓度	$C_{i2} / C_{i1} = S^0 = 1$
通风速率	$\dot{V}_2 / \dot{V}_1 = S^{5/2}$
发展时间	$t_2 / t_1 = S^{1/2}$
水流率	$Q_{w2} / Q_{w1} = S^{5/2}$
雾滴粒径	$d_2 / d_1 = S^{1/2}$
雾滴初速度	$u_{p2} / u_{p1} = S^{1/2}$
雾通量	$F_2 / F_1 = S^{1/2}$
体积雾密度	$C_{w2} / C_{w1} = S^0 = 1$

由于喷头几何相似和雾滴初始轨迹相同难以同时满足，即在按照尺度模拟要求得到的喷头流量下，雾滴的初始速度不符合尺度模拟的要求，因此大多数情况下，采用根据实际的水流率、初始雾动量和雾通量定义的有效喷口直径 D_{ne} 来表征喷头的几何相似性。当细水雾喷头的有效喷口直径满足尺度关系，且喷头产生的细水雾雾形和雾锥角相同时，可以认为喷头是几何相似的。

有效喷口直径的计算如下：

$$\text{水的质量流量: } \dot{m} = \rho_w (\pi D_{ne}^2 / 4) u_p \quad (14)$$

$$\text{雾动量: } M = \dot{m} u_p \quad (15)$$

式中： u_p 为雾滴的初始速度 (m/s)，将上面两式联立并消去 u_p 后得到式 (16)：

$$D_{ne} = \left[4 \mu^2 / (\pi M \rho_w) \right]^{1/2} \quad (16)$$

2 尺度模拟实验研究

2.1 实验方法

为了验证尺度模拟的可靠性，选择两个不同大小的受限空间进行细水雾灭油池火实验，比较实验结果。小尺度实验（简称“尺度 1”）在 3 m×3 m×2.5 m 的受限空间进行，大尺度实验（简称“尺度 2”）在 10 m×10 m×5 m 的受限空间进行，尺度比值 S 为 3.33；实验所用燃料均为煤油；尺度 1 中，油盆直径分别为 0.2、0.26、0.34 m，火焰热释放速率分别为 26、50、106 KW，尺度 2 中，油盆大小分别为 0.59 m×0.59 m、0.59 m×1.18 m、1.18 m×1.18 m，火焰热释放速率分别为 514、1 000、2 000 KW。根据前面的计算，火焰热释放速率的尺度关系必须符合 $S^{5/2}$ ，即 19.8，设定的火焰功率均大致符合该尺度条件。实验中，喷头均安装于屋顶，垂直向下喷射，油盆位于喷头正下方，尺度 1 喷头与油盆的垂直距离为 1 m，尺度 2 喷头与油盆的垂直距离为 3.33 m，满足尺度要求。

尺度 1 中选取一个较小的喷头作为喷雾源，尺度 2 中选取一个较大的喷头作为喷雾源。两个喷头产生喷雾的雾锥角均为 60°，喷射细水雾均为实心锥类型。为确定有效喷口直径，采用三维激光多普勒粒子分析仪对喷头在各种压力下的水流率与雾动量进行冷态测量。结果显示，尺度 1 中喷头有效喷口直径为 0.58 mm，尺度 2 中喷头有效喷口直径为 1.86 mm，两者比值为 3.2，与喷头和油盆间距离的尺度关系（3.33 倍）符合较好，因此可以认为其满足几何相似。

在设定的工作压力下，测量尺度 1 喷头喷射细水雾雾滴的粒径分布，其 sauter 平均粒径为 190 μm，水流率为 0.6 L/min。而后根据水流率的尺度要求（ $S^{5/2}$ 即 20.2）确定尺度 2 喷头所需的水流率为 12 L/min，此时其工作压力为 1.0 MPa，sauter 平均粒径为 300 μm。尺度模拟要求雾滴平均粒径的尺度比为 $S^{1/2}$ ，对于本实验设定即为 1.82。而根据喷头几何相似性的要求，尺度 2 的雾滴平均粒径应为尺度 1 的 1.49 倍（ $S^{1/3}$ ）。而上面的测量结果显示，实际工况下尺度 2 的雾滴平均粒径为尺度 1 的 1.58 倍，更接近几何相似的要求，而与尺度模拟的要求有些差距。

实验目标是确定可以用式 (17) 表征实验结果的范围：

$$Q_w / D_{ne}^{5/2} = fn(Q / D_{ne}^{5/2}, H / D_{ne}) \quad (17)$$

式中： Q_w 为灭火时水的体积流率 (m³/s)， Q 为火焰自由燃烧时的热释放速

率 (kW), H 为喷头距油盆的高度 (m), 实验中保持不变。

2.2 实验结果与尺度模拟比较

为保证实验的可靠性, 每组工况均进行多次重复性实验。图 1 显示了在标准化距离 ($H/D_{ne} \approx 1.750$) (喷头与火焰间距) 一定时两种尺度下的实验结果, 纵坐标为灭火时的标准水流率 $Q_w / D_{ne}^{5/2}$, 单位为 $\text{ml} / (\text{s} \cdot \text{mm}^{5/2})$, 横坐标为标准火焰热释放速率 $Q / D_{ne}^{5/2}$, 单位为 $\text{KW} / \text{mm}^{5/2}$ 。每个工况下均列出了三组重复实验的结果。

实验结果显示, 随着水流率的增加, 火焰开始处于不稳定状态, 其大小和形状发生变化, 最后熄灭。当细水雾与火焰的相互作用处于稳定状态时, 随着时间的延长, 其灭火的概率随之增大。灭火过程中, 在两相流场、热场和化学反应区内既有一个平均组分浓度又有一个随机波动的组分浓度。在这种场景下, 灭火被认为是一种极端的情况, 其发生的概率随着细水雾与火焰相互作用时间的增加而增加。对于该灭火实验, 大约每隔 1 min 增压一次以最终达到灭火效果。而理论上湍流脉动的时间尺度应该按照尺度比的平方根增长。因此, 实验中如果存在着相互作用时间对灭火过程的影响, 那么在相同的标准火焰功率下, 标准灭火水流率应该随着实验尺度的增大而增大, 但是图 1 并没有显示出这一点。此外, 在模拟雾滴粒径尺度上的近似性也有可能造成标准化灭火水流率的增加, 然而在实验数据中并不能确定雾滴粒径模拟的近似性所造成的影响。

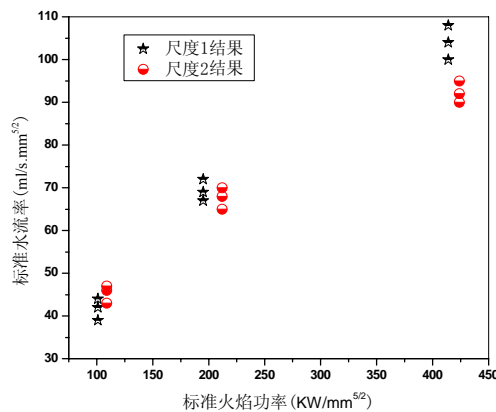


图 1 两种尺度下的灭火实验结果

图 1 两种尺度下的灭火实验结果关于细水雾辐射衰减以及喷雾源模拟方面的近似性之所以未对实验结果产生较大的影响, 主要是因为这两方面的模拟偏差产生了部分抵偿。如前所述, 在喷雾源模拟中为了照顾喷头的几何相似性, 两种尺度下喷口物理直径之差较尺度模拟的要求要小一些, 这样图中显示的灭火标准

水流率就应当偏大。另一方面，随着实验尺度的增加，由于 $s/d \propto L^{1/2}$ ，根据式（10）可知此时细水雾对于辐射的衰减程度将上升，与此同时由于辐射吸热而蒸发的雾滴量也将上升，从而降低了灭火的水流率要求。这两方面作用的相互抵消使得模拟上的近似性并未对模拟结果产生较大的影响。

对于受限空间内较大尺度的火焰，由于雾滴气化产生的水蒸气能够通过置换氧气而影响燃烧，采用这种有缺陷的雾滴粒径尺度模拟方法就有可能产生较大的误差。此时辐射衰减模拟方面的缺陷同样可能会对模拟结果的准确性产生较大的影响。从图 1 可以看到，随着火焰尺度的上升，尺度模拟结果的误差也逐渐增大，总体而言此时小尺度实验的结果与大尺度实验结果相比偏大。

3 结 论

首先对细水雾灭火的尺度模拟要求进行总结和分析。对细水雾灭火过程进行尺度模拟主要考虑几何相似性、火焰的热释放速率和水流率（按照 $S^{5/2}$ 的尺度模拟）、雾发生装置和雾滴初始速度（按照 $S^{1/2}$ 的尺度模拟）以及雾滴的初始轨迹（按照 S 的尺度模拟）等参数满足要求。此外，标准化雾滴粒径的几率分布函数必须保持恒定。特征尺度可以选择受限空间高度和喷头高度。

由于对雾发生装置进行较为精确的模拟非常困难，对于那些非几何相似的细水雾喷头，如果它们具有相似的初始雾锥角和雾形，即可以将其近似看作几何相似。使用有效喷口直径这一概念可以保证喷头流量与雾滴在喷口处的初始速度均能满足尺度模拟要求。

为验证尺度模拟对细水雾灭火流量预言的正确性，在两种尺度下分别进行细水雾扑灭油池火的模拟灭火实验，其尺度比为 3.33。当喷头高度与有效喷口直径比约为 1 750 时，两种尺度下的标准化灭火数据吻合较好。实验结果表明，对于雾滴衰减辐射方面模拟的不合理性以及在雾滴平均粒径模拟上的近似性并未造成显著的误差。但是，当受限空间内火焰尺度较大时，上述模拟缺陷的影响逐渐变大。

参考文献

1. Thomas, P.H., Studies of Fires in Buildings Using Models[J]. Combustion and Flame, 1960, 22: 87-99.
2. Waterman, T.C., Room Flashover Scaling of Fire Conditions[J], Fire Technology, 1969, 5 (1):

32-65.

3. Heskestad, G., Physical Modeling of Fire[J]. Journal of Fire and Flammability, 1975, 6: 254–273.
4. Heskestad G., SFPE handbook of fire protection engineering[M]. Society of Fire Protection Engineering, 1995.
5. Croce, P. A., Modeling of Vented Enclosure fires Part 1: Quasi-Steady Wood-Crib Source Fire[R]. Norwood; Factory Mutual Research Corporation, 1978.
6. Schlichting, H., Boundary Layer Theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1955.
7. Frossling, N., On the Evaporation of Falling Drops[M]. Columbus: Battelle Memorial Institute, 1951.
8. Crowe, C.T., Drag Coefficient of Inert, Burning, or Evaporating Particles[D]. Michigan; University of Michigan, 1962.
9. Eisenklam, P., Evaporation Rates and Drag Resistance of Burning Drops[C]. 11th Symposium (International) on Combustion, 1967.
10. Dembele. S., Analysis of the Two-Flux Model for Predicting Water Spray Transmittance in Fire Protection Applications[J], Journal of Heat Transfer, 2000, 122(1): 183–196.
11. Dombrowski, N., The Atomization of Water by Swirl Spray Pressure Nozzles[J]. Transactions of the institution of chemical Engineers, 1962, 50: 259-275 .
12. Dundas, P. H., The Scaling of Sprinkler Discharge: Prediction of Drop Size[R]. Norwood: Factory Mutual Research Corporation, 1974.

——本文发表于《消防科学与技术》（2011年第2期）