

# 细水雾与热烟气相互作用数值模拟研究

叶 栋, 蒋 勇

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**[摘要]** 使用 CFD 软件 Fluent 对火灾中热烟气与细水雾的相互作用过程进行了数值模拟研究。比较了灭火过程中不同粒径细水雾在流场中的运动及其对灭火效果的影响, 并研究了细水雾对着火房间火焰辐射的散射作用及细水雾的聚合破碎过程对灭火效果的影响。模拟结果表明辐射是火灾中主要的热传递过程, 粒径较大的水雾比较容易离开回流区到达燃烧反应区。房间细水雾的通过吸收和散射作用减弱辐射强度, 水雾在喷射初期可能使燃烧速率增大, 这些结果与实验事实相符。

**[关键词]** 细水雾; Fluent; 热辐射; 散射; 聚合; 破碎

**[中图分类号]** O411.3, TU976.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2007) 02-0084-06

20 世纪 90 年代对细水雾的数值模拟研究主要集中在用 PISO 和 PIC 等数值方法模拟上升的烟气羽流与细水雾的相互作用, 火灾场景多为火源位于喷头正下方<sup>[1~3]</sup>; 目前细水雾灭火数值模拟研究的内容主要为模拟离散相液滴的动力学过程<sup>[4,5]</sup>、水雾或喷头与燃烧或烟气的相互作用<sup>[6~8]</sup>和利用不同的辐射模型研究喷雾过程中的各种辐射现象<sup>[9~11]</sup>。由于离散相的散射、动力学过程和辐射换热都是极为复杂的过程, 特别是辐射换热的精确计算非常困难。目前可以使用 Mie 方法<sup>[12]</sup>对离散相水雾液滴的散射性质进行理论计算, 各种辐射模型精度逐步提高, 基本满足工程需要; 要达到更高的精度, 必须与准确、完备的物质辐射特性数据结合起来, 建立物质辐射的窄带模型<sup>[11]</sup>, 并假设吸收及发射在这些频带上均匀或按某种函数关系光滑变化, 划分的频段越窄计算也越准确。作者利用 CFD 软件提供的喷雾动力学模型和辐射模型研究了细水雾灭火的机理及其与热烟气相互作用过程中的各种参数。在喷口附近由于细水雾比较密集, 而且速度较高, 碰撞、聚合与破碎过程将会影响水雾的粒径分布, 并且消耗动能, 从而减慢细水雾的运动速度及其扩散过程, 间接影响了灭火效果。水雾离开喷口后,

在湍流空气的作用下朝火源运动, 其间将会吸热蒸发。与较大液滴相比, 较小水雾液滴容易随气流绕过障碍物流向燃烧区, 较大液滴则由于具有较大质量, 能够克服气流作用, 经历蒸发过程而最终达到火源。

## 1 数学模型

单室火灾是一个包括湍流流动、燃烧及辐射换热的非常复杂的过程。喷入的离散相水雾与热烟气的相互作用, 是一个典型的两相流过程, 两相之间通过交换质量、动量和能量相互影响。作者使用 Finite-rate/Eddy-dissipation 模型模拟气相湍流燃烧, 使用带浮力修正的 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟燃烧过程中的湍流运动, 使用 P1 模型计算辐射换热, 壁面函数采用标准壁面函数。计算区域采用 GAMBIT 软件生成的二维四边形网格划分。模拟的火灾场景为腔室角落发生火灾后生成的热烟气与顶棚喷头释放出的细水雾相互作用的过程。

### 1.1 气相湍流模型

使用 RNG  $k-\epsilon$  模型, 包括浮力产生/消耗项, 并且假设气体为理想气体。气相输运方程的一般形式为

[收稿日期] 2005-07-07

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50676091, 50536030)

[作者简介] 叶 栋 (1981-), 男, 湖北武汉市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\phi u_j) = \frac{\partial}{\partial t}\left[\Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right] + S_{\phi} + S_{p\phi} \quad (1)$$

$\phi$  是输运量 (质量分数, 两个速度分量之间的动量, 湍动能, 耗散率, 平均焓);  $\Gamma_{\phi}$  和  $S_{\phi}$  为各种输运量的扩散交换系数和  $\phi$  的源/汇项。 $S_{p\phi}$  表示液相和气相相互作用, 从液相到气相输运量的净流量。

1.2 液滴颗粒的质量、动量和能量输运方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) &= -S_m + \dot{m}_{inj} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{inj}) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) &= -\frac{\partial p_d}{\partial x_i} + \rho g_i \left[1 - \frac{\rho_{\infty}}{\rho}\right] + \\ &F_i - S_{mvi} + \dot{m}_{inj} v_{inj,i} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{inj}) \quad (2) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h v_j) &= Q_{conv} + Q_{radk} - S_h + \\ &\dot{m}_{inj} h_{inj} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{inj}) \end{aligned}$$

$\mathbf{r}_{inj}$  是喷嘴的位置坐标,  $S_m$ ,  $S_{mvi}$  和  $S_h$  分别表示蒸发引起的在气液界面之间的质量、动量和能量输运。 $F_i$ ,  $Q_{conv}$  和  $Q_{radk}$  分别表示相对运动引起的阻力, 气液界面对流传热和辐射换热。

1.3 反应模型

组分  $i$  的生成速率由以下两式计算结果的较小值给出:

$$\begin{aligned} R_{i,r} &= v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min\left[\frac{Y_R}{v_{R,r}} M_{w,R}\right] \\ R_{i,r} &= v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (3) \end{aligned}$$

$Y_R$  反应物的质量分数,  $Y_p$  是产物的质量分数,  $\frac{k}{\epsilon}$  为扩散时间尺度经验参数  $A=4$ ,  $B=0.5$ 。

1.4 辐射模型

利用 Fluent 提供的 P1 模型, 该模型适于计算流体与颗粒的辐射换热作用,

$$\begin{aligned} q_r &= -\frac{1}{3(a + a_p + \sigma_p)} \nabla \cdot G - \nabla \cdot q_r = \\ &-4\pi \left[ \alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right] + (a + a_p) G \quad (4) \end{aligned}$$

其中  $q_r$  为辐射热通量,  $G$  为入射辐射强度,  $\sigma$  为波尔兹曼常数,  $\sigma_p$  为液滴的散射因子,  $a$ ,  $a_p$  分别为热烟气和水雾液滴的吸收系数。

2 边界条件

边界条件有 2 类: 固壁边界条件和出口边界条

件, 固壁边界条件又分 2 种。

2.1 固壁 A 边界条件

固壁 A 为燃烧区 B 之外的其他固壁, 假设为对流传热固壁, 外流温度为 300 K, 流系数为  $5 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ , 对离散相的边界条件为反射边界条件。

2.2 固壁 B 边界条件

固壁 B 为燃烧区, 即图中火源处, 固壁 B 处有一功率为 100 kW 的热源, 并且该固壁处的柴油的质量分数为 100%。离散相的边界条件也为反射边界条件。

2.3 出口边界条件

为压力出口边界条件。在该处必须给定相关参数, 即回流温度, 回流压力、湍流条件、化学组分等。湍流条件使用默认的设置, 即  $k$  和  $\epsilon$  都为 1。

3 初始条件及数值模拟结果与分析

全场的初始条件: 压力为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 初始流场速度为 0, 温度为 300 K。

使用气体的体积燃烧化学反应 (volumetric reaction) 模型, 湍流与化学反应的相互作用为 Finite-rate/Eddy-dissipation 模型。燃料为煤油, 生成产物为二氧化碳和水蒸气。辐射模型使用 P1 模型, 因为它适用于颗粒状物质与流体的辐射换热。火灾场景如图 1 所示, 生成均匀四边形网格, 为了保证计算速度和精度, 取网格尺寸为 0.1 m, 即图中每个小方格的尺寸为  $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 。求解守恒方程, 扩散项使用二阶中心差分, 对流项使用二阶迎风格式。压力、速度关联项的求解使用 Fluent 提供的 PRESTO 格式, 适当调节松弛因子以保证较快的收敛速度, 同时也保证稳定性。

首先计算了充分发展的火灾在腔室内的稳态分

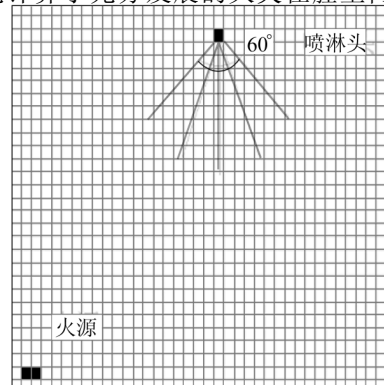


图 1 火灾场景

Fig.1 Fire scenario

布, 分别给出了温度、速度和辐射的分布图。火灾达到稳态后开始向腔室内喷射水雾, 分析了雾滴在腔室中的运动及其与火源的相互作用。喷嘴离左端墙壁 2 m, 离地 2.7 m, 实心锥角为  $60^\circ$ 。在这种布局下, 研究了火场中不同粒径粒子的运动特性, 离散相设置为 Fluent 提供的 group 模型, 假设喷嘴释放的水雾液滴粒径满足 Rossin-Rammler 分布<sup>[4]</sup>, 颗粒直径最小为 0.01 mm, 最大为 0.1 mm, 平均粒径 0.04 mm, 并打开聚合、破碎模型。释放的水雾温度为 300 K, 流量 0.05 kg/s, 出口处液滴  $x$  轴向速度为  $-12.5 \sim 12.5$  m/s,  $y$  轴向速度为  $-22$  m/s。使用非稳态求解器, 为了保证计算速度和精度, 时间步长取为 0.1 s, 火灾发生后 60 s, 火场基本达到稳定, 这时喷嘴开始响应。

从图 2 可以看出, 火灾充分发展后腔室内的烟气分成 2 层: 上部为由燃烧产物和卷吸空气组成的热烟气层, 下部为冷空气层。随着热烟气沿墙壁的上升, 冷空气被卷吸到烟羽流中, 并沿顶棚向右运动。而细水雾破坏了热烟气的分层, 喷嘴喷射的细水雾改变了烟气运动的状态。在喷嘴附近, 顶棚下的热气体被细水雾向下卷吸并被细水雾冷却。这种情况下, 细水雾起着水幕的作用<sup>[10]</sup>, 既阻挡了部分火焰的辐射, 又阻止了烟气向右的输运, 同时把热烟气分成左右两部分, 向下运动的水雾引起的地面射流对右方的空气来流也造成了一定的障碍。

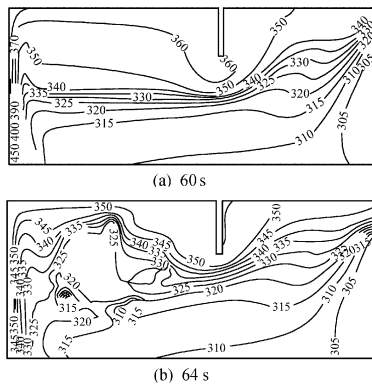


图 2 腔室内温度等值线分布

Fig.2 Temperature contours in the closure

喷嘴下方的热烟气很快被冷却, 拱腹附近卷吸的空气, 在 60 s 时大概为 360 K, 2 s 后温度下降到 340 K。水雾通过传导、对流、辐射和蒸发等过程吸收大量热量, 降低了腔室内气体混合物的温度, 同时在雾滴表面附近产生大量的水蒸气。水蒸气向热烟气/空气的混合物中扩散并与之混合, 降低了

烟气中可燃物、氧气的质量分数。雾滴和冷却后的气体混合物下降, 并于右边压力出口的空气来流混合一起向火源运动。在湍流空气的作用下, 水雾颗粒会发生碰撞和破碎, 形成新的水雾颗粒。

图 3、图 4 给出了 70 s 水蒸气,  $\text{CO}_2$  的摩尔浓度分布图。由于液滴的快速蒸发, 产生了大量的水蒸气。顶棚下一部分  $\text{CO}_2$  被细水雾卷吸并且进入回流区。在 70 s,  $\text{CO}_2$  充满了大部分房间。高浓度的水蒸气和  $\text{CO}_2$  稀释了氧气和燃料蒸气, 从而降低了燃烧速率, 在缺氧情况下对燃料的稀释还能减少回燃发生的可能性<sup>[13]</sup>。

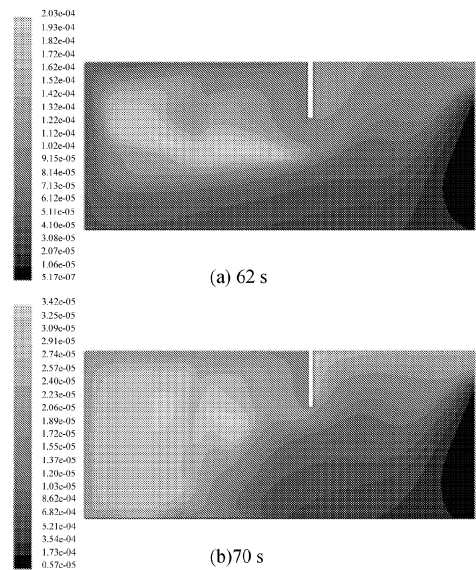


图 3 腔室内  $\text{CO}_2$  分布

Fig.3  $\text{CO}_2$  distribution in the closure

可以观察到图 5 中左边墙壁和喷嘴之间出现涡旋区, 并且这个涡旋区在 70 s 时占了腔室的一大部分。顶棚下热气体的流动把细水雾带向拱腹。水雾主要跟随涡旋区而达到反应区, 当雾滴进入火焰区, 将会彻底蒸发或者随着沿左壁羽流上升。因为水蒸气降低了燃料/氧气在混合气中的分数, 所以降低了火焰熄灭后发生回燃或爆炸的可能性。该回流区源源不断的将细水雾输运到燃烧区, 直到火焰熄灭。喷雾与地板的射流一部分携带水雾向火源方向流动, 另一部分则在地面附近喷头右边形成一个回流区, 阻挡了冷空气朝火源的流动, 冷空气只能绕开回流区随水雾进入燃烧区。

从图 6 中可以发现由于惯性, 粒径较大的液滴可以比较容易地离开回流区到达燃烧区, 然后蒸发掉, 粒径较小的液滴则很难脱离涡旋区, 只能跟随

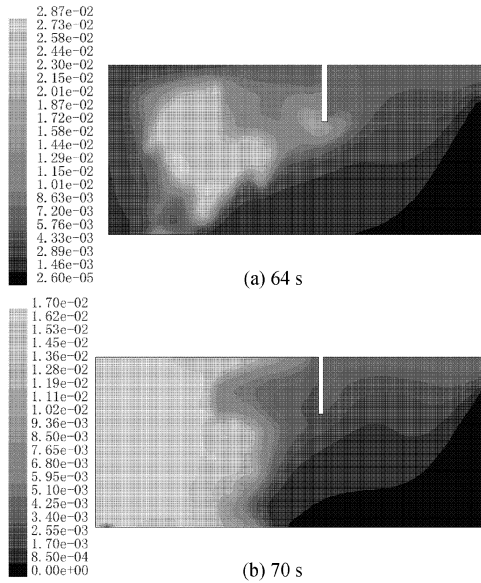


图 4 64、70 s 时腔室内水蒸气分布  
Fig.4 H<sub>2</sub>O distribution in the closure

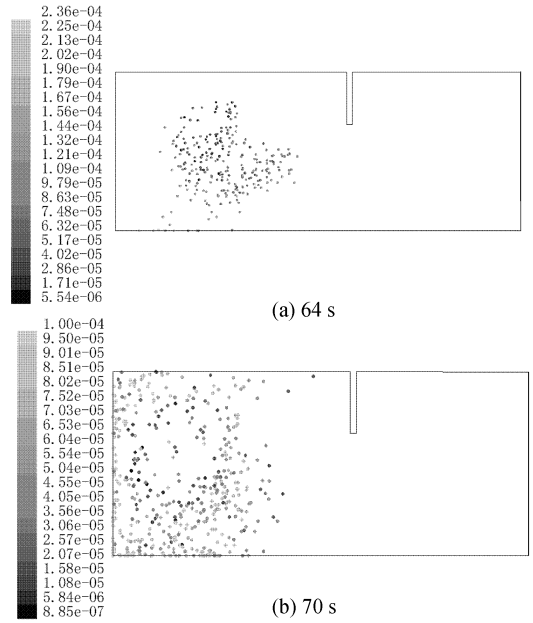


图 6 64、70 s 时腔室内离散相水雾分布图  
Fig.6 Droplets distribution in the closure

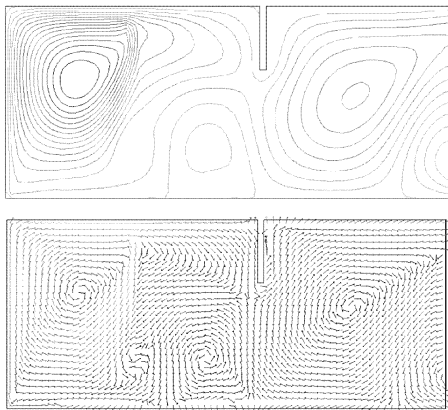


图 5 72 s 时腔室内流线和速度矢量图

Fig.5 Streamline and velocity distribution in the closure

涡旋气体运动，但是小液滴具有更大的吸热表面，选择适当的粒径以达到较好的灭火效果是目前正在研究的一个课题。

60, 70 s 时沿顶棚的辐射入射热通量示于图 7 (在 Position 数值较小处 Incident Radiation 有较大值的为地面辐射入射热通量)。

从图中可以看出，细水雾射入腔室后 10 s，顶棚的入射辐射热通量大幅降低，这是由于细水雾使上层烟气温度降低，从而减小了对流传热。另外，细水雾对火焰的散射作用，也使火焰对顶棚释放的辐射热流减小，在此过程中有部分能量被细水雾吸收掉，这几种作用相互耦合，降低了顶棚温度。

模拟过程中可发现，在细水雾喷出的初期，燃

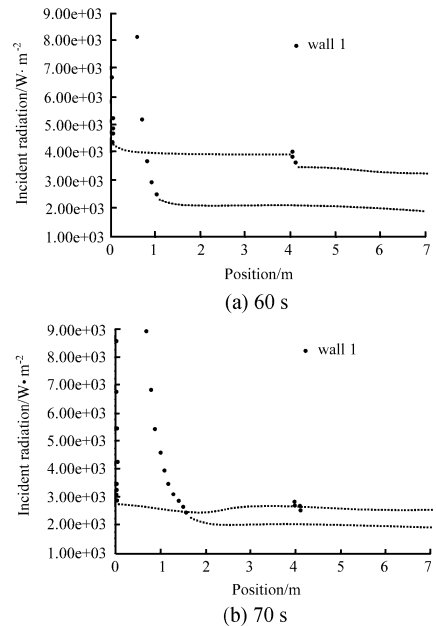


图 7 60、70 秒时顶棚和地面的辐射热流分布  
Fig.7 Heat flux at the ceiling and floor

烧反应速度有小幅的增强 (图 8)，这是由于喷雾引起空气的流速加快，促进了燃料与空气的混合从而加快了燃料的化学反应速率，这个模拟结果与实验事实相符，解决办法是不使用连续喷射而使用周期性脉冲喷射细水雾<sup>[14~16]</sup>，从而在不增加空气流速的情况下，达到较好的灭火效果。

图 9 与图 10 是分别不考虑水雾散射和液滴碰

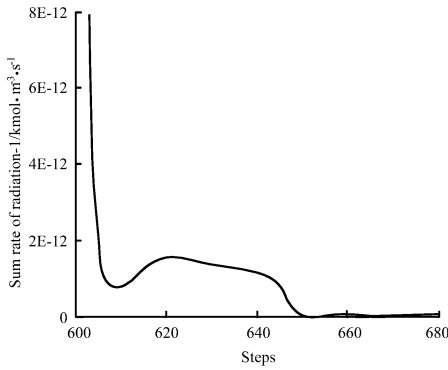


图 8 喷射初期壁面化学反应速率随时间步的变化  
Fig.8 Profile of reaction rate changing with increasing time steps at initial stage

撞破碎时的壁面入射辐射热流和温度分布图。与图 7 比较，可以看出，无散射水雾使地面入射辐射热流稍微降低，这是由于火源到水雾的辐射能量没有被散射的缘故。无碰撞破碎的水雾在同时刻把热烟气撕开的裂口比存在碰撞破碎的水雾撕开的裂口大，这是由于水雾除受烟气阻力作用外，不受其他水雾对本身的影响，拘束变小，自由度变大，因而可以扩散到更广阔的空间。

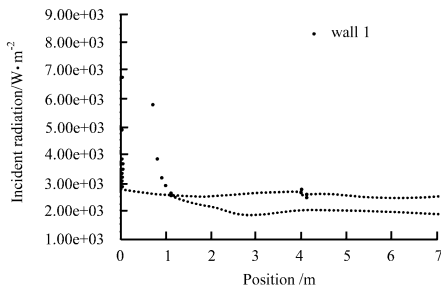


图 9 70 s 时顶棚和地面的辐射热流分布 (无散射)

Fig.9 Radiative heat transfer at the ceiling and floor (without scattering of radiation)

### 4 结论

1) 热辐射是火灾中的主要热交换形式。当发生大火灾时，起火房间火源的释热功率很大，是主要的辐射源，热辐射与温度的四次方成正比，而热传导和对流是温度的拟线性函数，所以在大释热功率情况下，辐射是能量传递的主要方式。细水雾通过吸收和散射两种途径降低热辐射强度，其中吸热作用占主导地位。

2) 喷头离顶棚不能过近，太近则与存在于湍

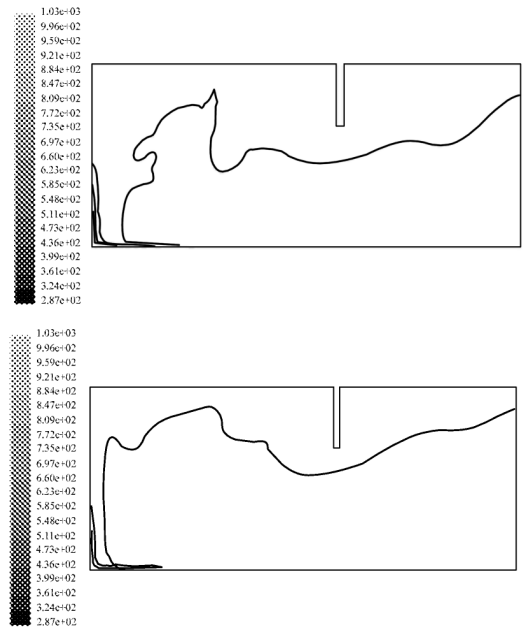


图 10 64 s 时 (有碰撞破碎) 及 64 秒时 (无碰撞破碎) 腔室内温度分布

Fig.10 Comparison of temperature distribution in the closure at 64 s (with and without droplets collision and breakup models)

流边界层中的涡旋的相互作用减弱，液滴倾向于聚合成滴，而不易破碎。水雾的碰撞破碎，聚合过程产生新的水雾液滴，同时也消耗了水雾的动能，使细水雾向远处扩散的速度减慢。

3) 当流量为 0.05 kg/s 时，研究了不同粒径水雾对灭火效果的影响。发现对于非常小的液滴，较难脱离回流区而到达火源，粒径较大的水雾在重力作用下则可以摆脱回流区而进入燃烧反应区。

4) 水雾喷射的初期，水雾与地板的射流一方面加快了顶棚下方空气向左的输运，也就加快了燃料与空气的混合，从而短时间内增强火灾；另一方面也阻碍了右方开口空气来流向左的输运，解决办法是不使用连续喷射而使用周期性脉冲喷射细水雾，从而在不增加空气流速的情况下达到较好的灭火效果。

5) 水雾引起的流动把上层热烟气卷吸到下方，因而增大了腔室中的燃烧产物的浓度 (烟气毒性)，着火房间的人员应该尽快疏散。

### 参考文献

[ 1 ] Downie B, Polymeropoulos C, Gogos G. Interaction of a water mist with a buoyant methane diffusion flame[J]. Fire Safety Journal, 1995,24(4): 359~381

- [ 2 ] Nam S. Numerical-simulation of actual delivered density of sprinkler spray through fire plumes[J]. *Atomization and Sprays*, 1994, 4(4): 385~404
- [ 3 ] Bill R G. Numerical-simulation of actual delivered density (Add) measurements[J]. *Fire Safety Journal*, 1993, 20(3): 227~240
- [ 4 ] Yoon S S, et al. Numerical modeling and experimental measurements of a high speed solid-cone water spray for use in fire suppression applications [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30(11): 1369~1388
- [ 5 ] Parra T, et al. Extinction of premixed methane-air flames by water mist[J]. *Fire Safety Journal*, 2004, 39(7): 581~600
- [ 6 ] Hua J S, et al. A numerical study of the interaction of water spray with a fire plume[J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37(7): 631~657
- [ 7 ] Kim S C, Ryou H S. The effect of water mist on burning rates of pool fire[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2004, 22(4): 305~323
- [ 8 ] Nam S. Numerical simulation of the penetration capability of sprinkler sprays[J]. *Fire Safety Journal*, 1999, 32(4): 307~329
- [ 9 ] Consalvi J L, Porterie B, Loraud J C. Dynamic and radiative aspects of fire-water mist interactions [J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176(5-6): 721~752
- [10] Berour N, et al. Radiative and conductive heat transfer in a nongrey semitransparent medium. Application to fire protection curtains [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 86(1): 9~30
- [11] Consalvi J L, Porterie B, Loraud J C. On the use of gray assumption for modeling thermal radiation through water sprays[J]. *Numerical Heat Transfer Part a—Applications*, 2003, 44(5): 505~519
- [12] Collin A, et al. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 92(1): 85~110
- [13] Zhou F B, Wang D M. Backdraft in descensionally ventilated mine fire[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2005, 23(3): 261~271
- [14] Armada-da-Silva P A S, Woods J, Jones D A. The effect of passive heating and face cooling on perceived exertion during exercise in the heat [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, 91(5-6): 563~571
- [15] 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(3): 567~592
- [16] Liu Z G, Kim A K, Su J Z. Examination of the extinguishment performance at a water mist system using continuous and cycling discharges[J]. *Fire Technology*, 1999, 35(4): 336~361

## Numerical Simulation of the Interaction Between Smoke and Water Mist in Fire

Ye Dong, Jiang Yong

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

[**Abstract**] This paper presents a numerical simulation of the interaction between smoke and water mist in a fire using CFD software package Fluent. Motion of droplets of different size in the flow field is studied and their fire extinguishing ability is compared according to whether they can reach the combustion zone. Scattering of thermal radiation from fire by water mist and the effects of breakup and coalescence of droplets at initial stage are also studied. Modeling results demonstrate that radiation is the main heat transfer process; bigger droplets are easier than smaller one to get away from the circumfluence zone and to arrive at the combustion zone. Water mist attenuates thermal radiation by absorbing and scattering, and it may enhance combustion reaction rate at initial stage. These results agree with experimental result.

[**Key words**] water mist; Fluent; thermal radiation; scattering; coalescence; breakup