

细水雾与火灾烟气相互作用的 实验和数值模拟研究

林霖, 房玉东, 翁韬, 张永丰, 廖光煊

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 通过模拟实验研究了细水雾与火灾烟气的相互作用, 揭示了细水雾作用下烟气温度及组分浓度的变化规律。同时利用 FDS 程序计算了细水雾作用下烟气温度和组分浓度随时间的变化规律, 利用实验数据对计算结果进行了准确性验证。结果表明只要计算网格匹配合理, FDS 可以较为准确地预测细水雾作用下烟气温度和组分浓度的变化规律。在实际的细水雾灭火系统工程应用中, 可以利用 FDS 场模拟方法预测灭火过程中火场温度及组分浓度等特性参数的变化规律, 这对灭火系统的优化设计具有一定指导意义。

[关键词] 火灾烟气; 细水雾; FDS

[中图分类号] X932 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)10-0072-06

1 前言

火灾危害主要是由热量、烟气和缺氧三种因素共同作用造成的。其中烟气的毒性和窒息作用造成人员伤亡比例最大。统计结果表明, 火灾中 70% 以上的人员死亡是烟气造成的, 其中大部分是吸入了烟颗粒及有毒气体昏迷后致死的。烟气中各种有毒害成分、腐蚀性成分、颗粒物等以及火灾环境的高温缺氧, 对生命财产以及生态环境都造成很大破坏。

细水雾灭火技术对环境友好, 拥有优良的电绝缘性, 能有效冲刷烟气, 降低烟气的危害, 近年来在哈龙替代技术中越来越受到人们的青睐^[1-3]。目前国际上关于细水雾灭火方法与技术的研究取得了不少新的进展^[4-9], 国内关于细水雾也进行了不少研究^[10,11]。但细水雾与火灾烟气相互作用的研究却依然相对薄弱。香港理工大学的周允基将烟气和空气看成是两种准稳态的层, 建立了水喷雾与烟气层相互作用的一维数学模型, 预测了水喷雾作用下烟气特性参数的变化规律, 给出了一些使用水喷雾最小化烟气所造成损失的物理准则^[12]。Xiang X. D.

等人研究了带电水雾作用下烟气浓度变化规律^[13]。V. Novozhilov 等人采用区域模拟的方法建立数学模型, 研究了水喷雾作用对火灾轰然发展的影响^[14]。Jukka, Vaari 等人进行了全淹没细水雾灭火的单区数值模拟研究工作, 建立了通风条件下细水雾全淹没灭火的数学模型^[15]。从上述回顾可以看出, 目前国内外关于细水雾与火灾烟气相互作用的数值模拟多集中在区域模拟上, 场模拟研究工作开展得很少。笔者通过模拟实验研究了细水雾与火灾烟气的相互作用, 利用 FDS 建立模型, 利用场模拟计算细水雾作用下烟气温度和组分浓度等特性参数, 并用实验数据对场模拟结果进行准确性和可靠性验证。

2 实验模型

实验在 3 m × 3 m × 3 m 受限空间内进行, 在火源对面一角布设烟气采样探头, 高度 1.7 m, 烟气分析仪每秒采样一次。实验中采用柴油作为发烟材料, 在火源近远端各布置一热电偶, 高度为 2.7 m。细水雾喷头位于受限空间顶棚的中心位置, 喷头距离顶棚 0.2 m。实验系统布局如图 1 所示。实验中利用两种不同类型的细水雾

[收稿日期] 2007-03-15; 修回日期 2007-05-18

[基金项目] 国家自然科学基金重点资助项目(50536030)

[作者简介] 林霖(1978-), 男, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

喷头产生细水雾。表1给出了喷头1和喷头2的特性参

数,均为生产商提供。实验工况如表2所示。

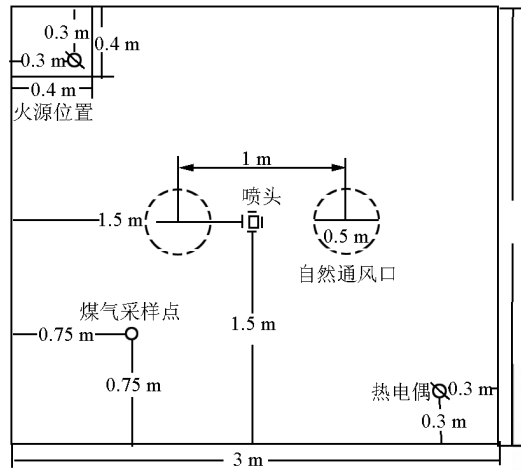
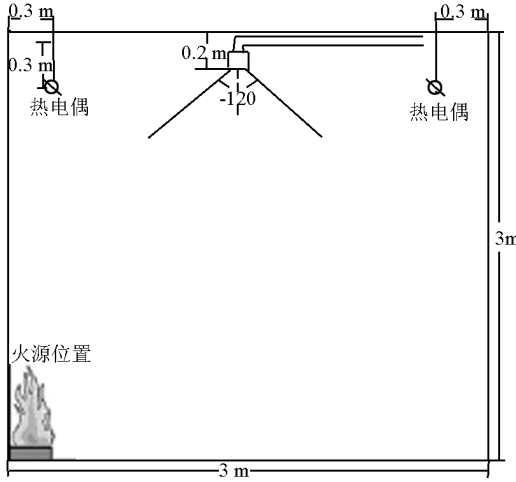


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic view of experimental set-up

表1 细水雾喷头特性参数

Table 1 Specifications of the tested nozzles

特性参数	喷头1	喷头2
工作压力/MPa	7~10	1~4
流量系数	0.5	3
流量/L·min ⁻¹	4.2~5	9.5~19
雾化锥角/(°)	90	120
喷雾直径/m	1.5	2
雾滴粒径/μm	50	300

表2 实验工况

Table 2 Specifications of the tested cases

工况	喷头类型	工作压力/MPa	施加时间/s	通风状况
1	1	7	60	无
2	2	1	60	无
3	1	7	60	自然通风

学反应和湍流效应。

按照上面的理论,为了很好地解析室内火灾发展过程及细水雾触发后与烟气的相互作用,网格尺度应取 $0.05D^*$,但在实验房间中采用 $0.05D^*$ 的格点配置时,计算的格点数目已超过百万,计算上需要配合强大的电脑硬件,也需要更多的运算时间,已不是一般现有计算机可以完成。所以在综合考虑计算时间和准确度的前提下,整体计算区域的格点配置选择 $0.1D^* \approx 0.05\text{ m}$ 为基准,在火源的附近采取局部格点加密方式,格点尺寸 $0.05D^* \approx 0.025\text{ m}$ 。图2给出了实验空间的网格划分。

3 计算网格尺寸及其匹配

研究表明,对场模拟结果的准确度有重大影响的主要因素是网格的尺寸及其匹配条件。相关学者对FDS的网格划分进行了详细研究,结果表明火灾最小长度尺寸可以用火源特征直径 D^* 表示如下:

$$D^* = \left[\frac{Q}{\rho_0 C_0 T_0 \sqrt{g}} \right]^{2/5} \quad (1)$$

式中, Q 为热释放速率,W; ρ_0 为环境空气密度, kg/m^3 ; C_0 为空气比热, $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; T_0 为环境温度,K; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

当网格尺度小于 $0.1D^*$ 时,FDS可以很好地模拟建筑物发生火灾时烟气沉积与流动,当网格尺度小于 $0.05D^*$ 的时候可以精确地解析火焰区中的化

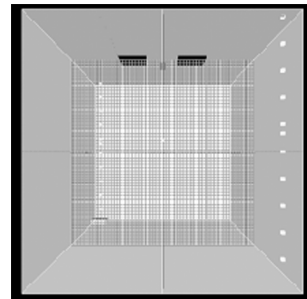


图2 实验空间计算网格

Fig. 2 Computational domain

4 实验结果与分析

4.1 烟气温度计算结果分析

从图3~图5可以看出,施加细水雾之后烟气温度变化过程主要由一个快速降温段和一个缓慢降温段组成。这主要是因为,在细水雾作用的初始阶段,烟气温度较高,细水雾在与烟气相互作用过程中吸收了大量的热量,快速蒸发,同时细水雾有效的阻

隔了热辐射,降低了对流传热的强度,造成环境中烟气温度快速下降;经过快速降温阶段后,由于烟气层与细水雾的温差大大缩小,细水雾蒸发吸热的速率随之大大降低,烟气温度开始进入缓慢下降阶段并逐渐降低至室温。从图3~图5可以看出,利用FDS场模拟计算方法可以较为准确地预测细水雾作用下烟气层温度随时间的变化规律。从图3和图4的比较可以看出,在无通风的条件下,喷头1的快速降温时间段在细水雾施加的前10s内,之后为缓慢降温过程,而喷头2的快速降温时间段在细水雾施加的前20s内,约为喷头1情况下的2倍,之后为缓慢降温过程。这主要是由于小粒径的细水雾(喷头1)相比大粒径的细水雾(喷头2),雾滴比表面积大大提高,蒸发更为迅速,提高了吸热速率。从图3和图5的比较可以看出,自然通风下烟气温度快速下降的时间段有所增加,烟气温度下降速度要明显慢于无自然通风时的速度,这主要是因为通风提高了火场氧气浓度,有利于维持燃烧和烟气的产生,而数

值计算结果较为准确地验证了自然通风对细水雾的降温速率的影响。从上面的分析看出,利用FDS场模拟可以较为准确地预测细水雾作用下烟气温度场的变化规律,计算误差基本在5℃,在实际的细水雾工程应用当中,可以利用FDS场模拟手段来预测细水雾作用下烟气温度的变化规律,评价细水雾灭火系统对烟气的冷却效率,为细水雾灭火系统的优化设计提供必要的依据。

4.2 烟气特性参数计算结果分析

图6给出了不同工况下采样点火场氧气浓度计算曲线和实验测量值。从中可以看出,细水雾作用下氧气浓度不断回升,后期趋于稳定。这是因为单位质量的细水雾比表面积大,能有效地吸收热量,有效地冷却烟气温度,降低烟气对火源的辐射热反馈并抑制燃烧,大大降低了耗氧量,因此在灭火过程中氧气浓度得到了提高。在数值计算结果体现了这一实验现象,与实验测量值的变化趋势基本一致。

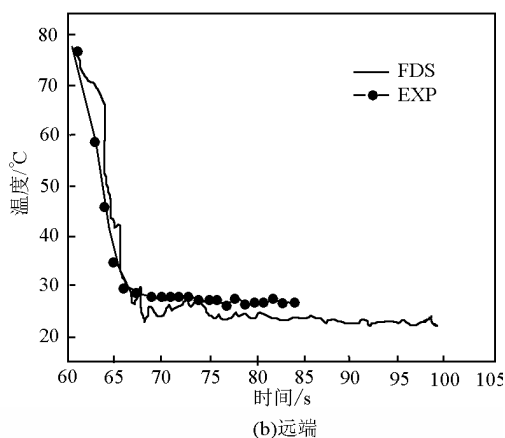
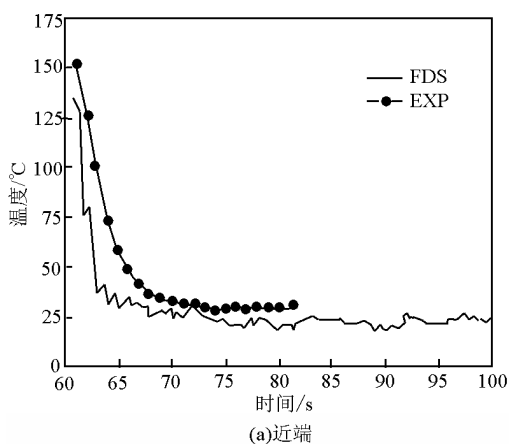


图3 工况1的2.7 m高处的烟气温度

Fig. 3 Variations of temperature with time for case 1 at the height of 2.7 m

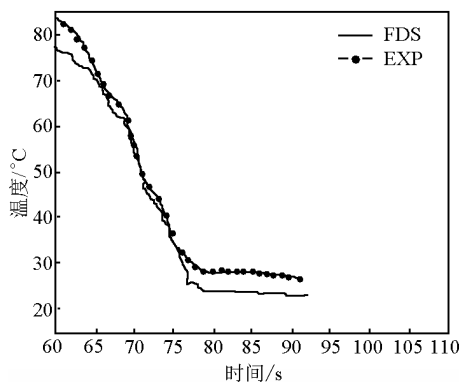


图4 工况2远端2.7 m烟气温度

Fig. 4 Variation of temperature with time for case 2 at the height of 2.7 m

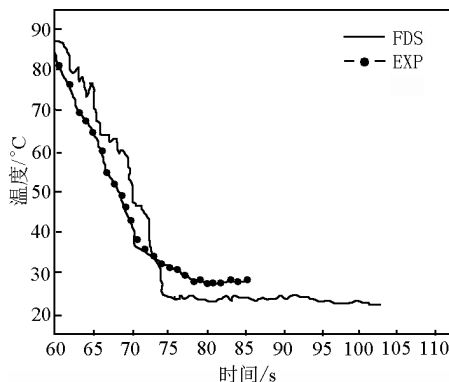


图5 工况3远端2.7 m烟气温度

Fig. 5 Variation of temperature with time for case 3 at the height of 2.7 m

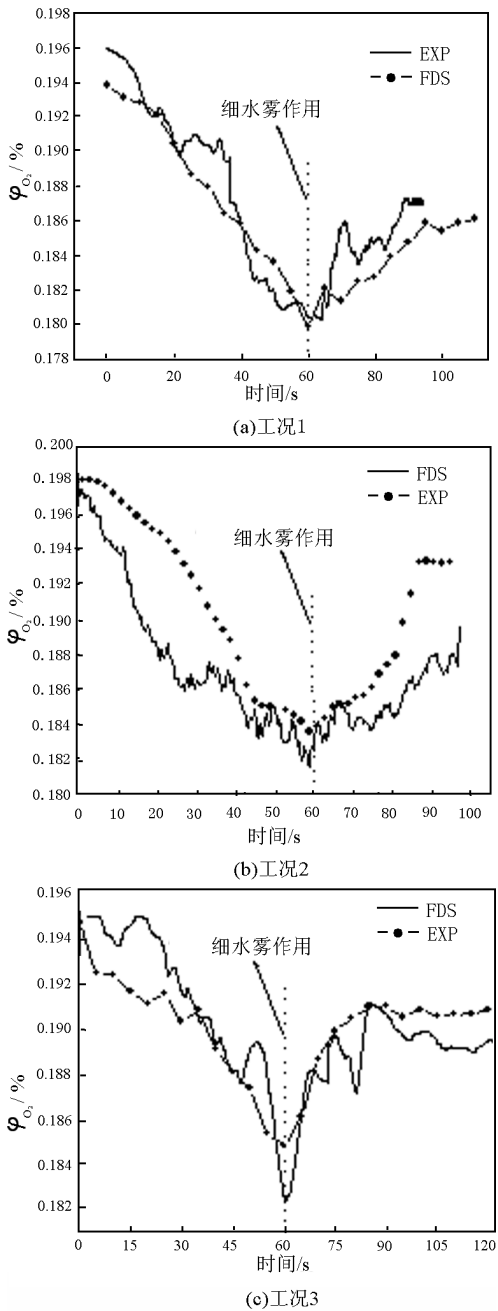


图6 氧气浓度曲线
Fig. 6 Variations of Oxygen with time

发现,施加细水雾后,工况1情况下二氧化碳下降速率较工况2更为迅速,这主要是由于工况1中使用的细水雾喷头产生的水雾粒径($50\ \mu\text{m}$)远小于工况2中喷头产生的水雾粒径($300\ \mu\text{m}$)所造成。小粒径的水雾在空间更容易蒸发,能更有效地抑制燃烧,减少二氧化碳的产生,计算曲线较准确地体现了这一趋势。最后,比较图7(a),图7(c)可以发现细水雾开启后工况3中二氧化碳的下降速率比工况1要平稳,这主要是由于工况3处于自然通风情况,进入

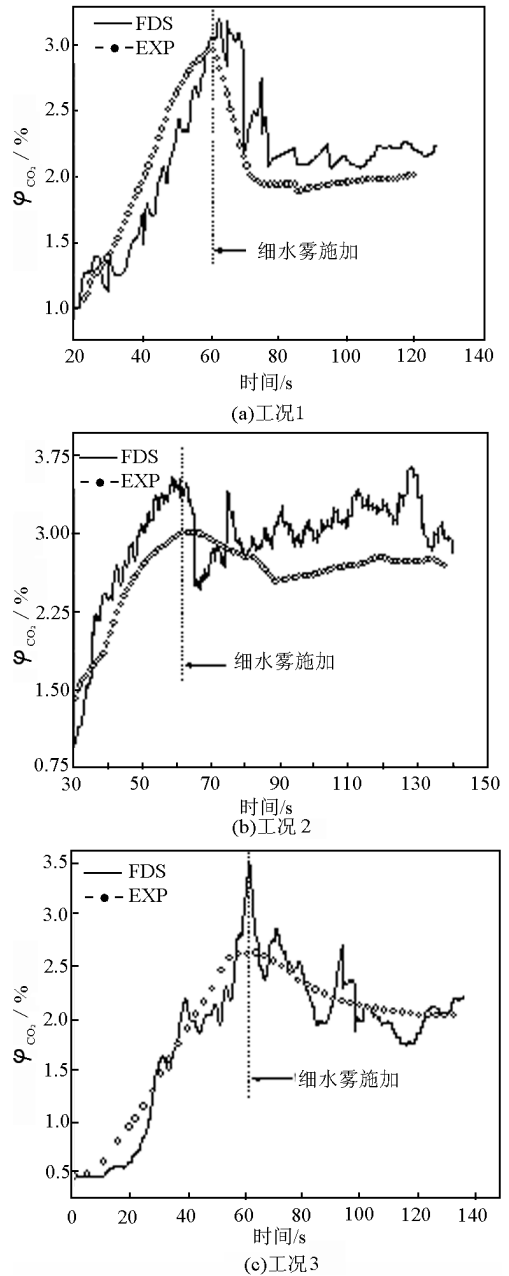


图7 二氧化碳浓度曲线
Fig. 7 Variations of Carbon dioxide with time

图7给出了实验空间不同工况的二氧化碳浓度计算曲线和实验测量值。从中可以看出,细水雾施加后,二氧化碳浓度开始快速下降,并最终趋于平稳,这是由于细水雾抑制了燃烧反应过程,降低了二氧化碳的生成速率,同时部分二氧化碳直接溶解于细水雾中。利用FDS计算得到的二氧化碳浓度随时间变化趋势基本和实验测量值一致,较好的体现了上述变化规律。此外比较图7(a),图7(b)可以

实验空间的新鲜空气有助于燃烧和二氧化碳的产生,而计算曲线也体现了这一点。

图 8 给出了不同实验空间工况的一氧化碳浓度

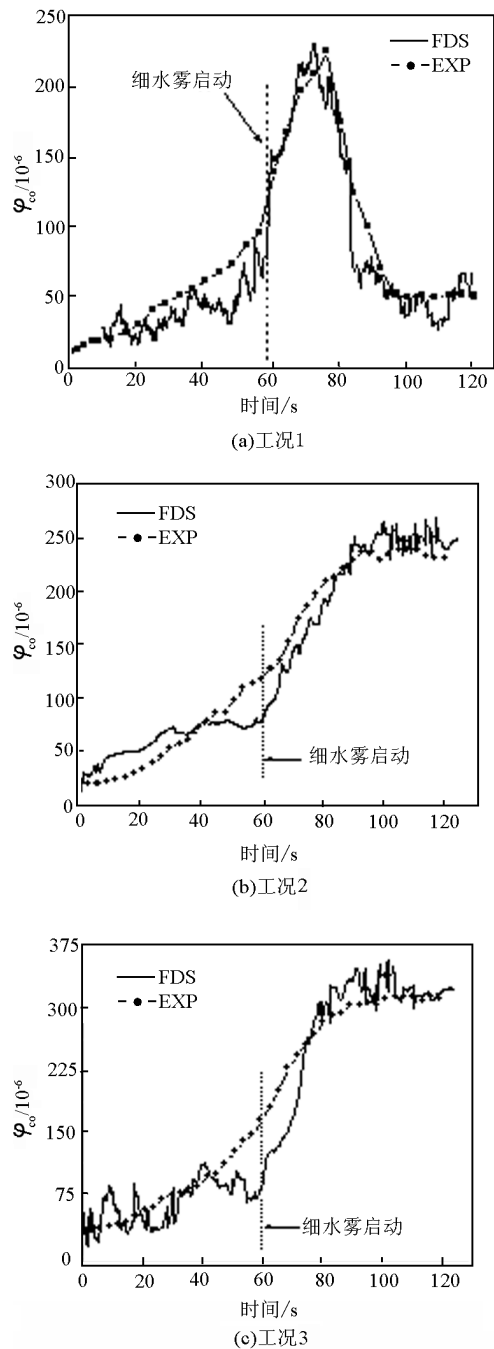


图 8 一氧化碳浓度曲线

Fig. 8 Variations of Carbon monoxide with time

计算曲线。可以看出,施加细水雾之后一氧化碳浓度上升速率加快,并最终趋于平稳。这是因为火焰区内细水雾受热气化之后体积迅速膨胀,占据了大量空间,降低了氧气的体积分数,从而使燃烧化学反应过程不充分,导致一氧化碳大量产生。利用 FDS

计算得到的一氧化碳浓度随时间变化趋势基本和实验测量值一致,较好的体现了上述变化规律。此外比较图 8(a),图 8(b)可看出细水雾启动之后工况 1 的一氧化碳上升速度明显比工况 2 快。这主要也是由于工况 1 水雾粒径(50 μm)远小于工况 2 中的水雾粒径(300 μm),小粒径的水雾能更有效地抑制燃烧,而燃烧不充分将导致一氧化碳量的增加,计算曲线准确的体现了这一趋势。比较图 8(a),图 8(c),可以发现在细水雾启动后一氧化碳在工况 1 比工况 3 的增长趋势迅速。这主要是由于工况 3 处于自然通风情况,进入实验空间的新鲜空气有助于使燃烧更充分,导致一氧化碳产生量相对于工况 1 的情况更少所造成。

5 结语

笔者通过数值模拟和实验研究得出如下结论:

1) 细水雾作用下,可以有效降低烟气温度,烟气温度存在一个快速下降阶段和缓慢下降阶段,喷头类型以及通风状况对快速下降阶段长短具有明显的影响。

2) 细水雾作用下烟气成分中氧气浓度不断回升,二氧化碳浓度快速下降,一氧化碳浓度则快速上升,喷头类型及通风状况对烟气成分浓度变化规律具有影响。

3) FDS 可以较为准确地预测细水雾作用下烟气温度场的变化规律,亦可预测细水雾作用下烟气组分浓度的变化趋势。只要计算网格匹配合理,计算曲线与实验测量结果吻合较好。在实际的细水雾灭火系统工程应用当中,可以利用 FDS 场模拟方法预测细水雾作用下火场烟气温度和烟气组分浓度等特性参数的变化规律,为细水雾灭火系统的性能化设计和优选提供必要的依据。

参考文献

- [1] Grant G, Brenton J, Drysdale D. Fire suppression by water sprays [A]. Progress in Energy and Combustion Science [C]. 2000, 26: 79 - 130
- [2] Jones A, Nolan P F. Discussion on the use of fine water sprays or mists for fire suppression [J]. J of Loss Prev Process Ind, 1995, 8 (1): 17 - 22
- [3] Mawhinney J R, Richardson J K. A state - of - the - art review of water mist fire suppression research and development [R]. 1996. Internal Report No 718
- [4] St - Georges M, Buchlin J M. Detailed single spray experimental measurements and one - dimensional modeling [J]. Int J Multi-

- phase Flow, 1994, 20(6): 979 – 992
- [5] Lentati A M, Chelliah H K. Dynamics of water droplets in a counterflow field and their effect on flame extinction[J]. *Combustion and Flame*, 1998, 115(1):158 – 179
- [6] Alpert R L. Incentive for use of misting sprays as a fire suppression flooding agent [A]. *Water Mist Fire Suppression Workshop Proceedings*[C]. Gaithersburgh: National Institute of Standards and Technology, 1993. 31 – 35
- [7] Mawhinney J R, Eng P. Engineering criteria for water mist fire suppression system [A]. *Water Mist Fire Suppression Workshop* [C], 1993.37 – 73
- [8] Chow W K, Cheung Y L. Simulation of sprinkler – hot layer interaction using a field model[J]. *Fire and Materials*, 1994, 18(6): 359 – 379
- [9] Kim M B, et al. Burning rate of a pool fire with downward – directed sprays[J]. *Fire safety Journal*, 1996,27(1): 37 – 48
- [10] 丛北华, 秦俊, 廖光焯, 等. 细水雾作用下固体 PMMA 燃烧特性的实验研究[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(10): 1244 – 1249
- [11] 周 华, 朱 畅, 范明豪, 等. 高压细水雾灭火系统的雾滴直径测量与灭火试验[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(8): 950 – 954
- [12] Chow W K, Yao B. Numerical modeling for interaction of a water spray with smoke layer[J]. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, 2001, 39(3): 267 – 283
- [13] Xiang X D, Colbeck I. Charged water drops and smoke dissipation[J]. *Fire Safety Journal*, 1997, 28(3): 227 – 232
- [14] Nyankina N, Novozhilov V. Prediction of fire environment under water mist suppression conditions by two – phase zone model[J]. *Journal of Applied Fire Science*, 2000—2001, 10(3): 193 – 214
- [15] Vaari J. A transient one – zone computer model for total flooding water mist fire suppression in ventilated enclosures [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, 37(2): 229 – 257

An experimental and numerical study on the interaction between water mist and smoke

Lin Lin, Fang Yudong, Weng Tao, Zhang Yongfeng, Liao Guangxuan

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

[**Abstract**] This paper investigated the interaction between water mist and smoke in experiments, revealing the variation trends of smoke temperature and species concentrations. Variation trends were also obtained under the same scenes by FDS (fire dynamic simulator) simulation. Experiment results were compared with simulation. The comparison comes out that with reasonable computation grid setting, FDS can predict the variation trends quite well. In practical water mist system design, FDS may be applied to predict the behavior of the designed system.

[**Key words**] fire smoke; water mist; FDS