

喷淋冷却与自然排烟耦合作用下 烟气沉降研究

李思成^{1,2}, 陈颖¹, 胡隆华², 霍然², 阳东²

(1. 中国人民武装警察部队学院, 河北廊坊 065000; 2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 通过理论分析,建立了喷淋冷却与自然排烟耦合作用下火灾烟气层沉降的理论预测模型,并开展了相应的实验,把实验结果作为输入参数代入模型,得到了不同实验条件下烟气层的沉降结果。结果表明,喷淋冷却与自然排烟耦合作用下,烟气沉降速度相差很小;喷淋作用后,烟气层最终沉降高度降低;随着压力的增大,烟气层最终沉降高度相差较小。

[关键词] 消防工程;水喷淋;喷淋冷却;自然排烟;烟气沉降

[中图分类号] TU998.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)09-0090-06

1 前言

建筑物发生火灾时,产生大量的烟气,国内外大量火灾实例统计数字表明,因火灾而伤亡的人群中,大多数是烟害所致。火灾中受烟害直接致死的约占1/3~2/3,因火烧死的约占1/3~1/2,而且火烧死中也是多数受烟毒晕倒而后烧死,这足以说明火灾产生的烟气危害是何等严重。在建筑防火设计中,防排烟工程的设计具有非常重要的意义^[1]。在工程设计中,为了安全可靠,设计人员大都选用机械排烟方式,但有时因受各种条件的限制,自然排烟也会成为唯一可选用的方式。在我国规范规定中^[2,3],自然排烟占有较大比重。自然排烟是利用火灾时产生的热烟气流的浮力和外部风力作用,通过建筑物的对外开口把烟气送至室外的排烟方式,这种排烟方式实质上是热烟气与室外冷空气的对流运动。

现在建筑中大都装设了喷淋系统,火灾发生后,喷淋启动,会压制火灾增长,减小火灾规模和烟气的产生,降低烟气温度和热烟气的浮力。Mawhinney^[4]曾就喷淋作用对烟气的特性影响进行过研究,分析

了不同的喷淋状况对火源热释放速率、辐射热流、烟气温度、氧浓度、二氧化碳、一氧化碳以及压力的影响,并就喷淋作用后对烟气的流动影响进行了分析。喷淋对烟气层冷却后,烟气温度降低,体积变小,自然填充速度变慢;但另一方面,应该注意到,烟气温度降低后,浮力减小,自然排烟量降低,会使烟气下降速度加快。目前,对于喷淋冷却与自然排烟耦合作用下烟气沉降特征,还有待进一步研究。

文章通过理论分析,建立了喷淋冷却与自然排烟耦合作用下烟气层高度的沉降模型,并结合相应实验,得到不同工况下烟气沉降高度,分析了喷淋压力对自然排烟效果的影响。

2 喷淋冷却与自然排烟耦合作用下烟气沉降理论分析

2.1 自然排烟量

图1为设有水平自然排烟口的建筑内气体流动状况。冷空气从房间底部开口流入室内,而热烟气通过房间屋顶的水平开口排出。在工业库房中,这样的排烟设计经常遇到,底部的门为补气口,自然排

[收稿日期] 2008-09-06

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(50536030)

[作者简介] 李思成(1977-),男,山东鄄城县人,中国人民武装警察部队学院讲师,主要从事建筑火灾预防与控制研究工作;

E-mail:lishich@mail.ustc.edu.cn

烟口水平安装在库房的屋顶。通过顶部自然排烟口排出的烟气体积为^[5]：

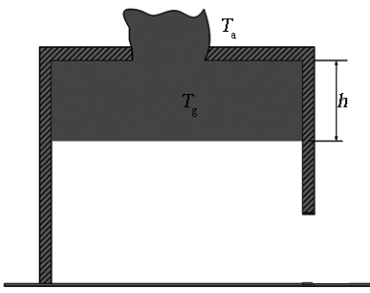


图1 顶部水平自然排烟示意图
Fig.1 Schematic diagram of ceiling smoke venting

$$V_v = C_d \sqrt{\frac{2h(T_g - T_a)g}{T_a}} = C_d \sqrt{\frac{2h\Delta T g}{T_a}} \quad (1)$$

式(1)中, T_g 为室内烟气层的平均绝对温度, K; T_a 为室外空气的绝对温度, K; h 为烟气层厚度, m; ΔT 为排烟口下方烟气层的平均温升, K; C_d 为水平开口流量系数, 取 0.7; g 为重力加速度。

从而可知排烟口的质量流量为：

$$m_v = C_d A_v \sqrt{\frac{2h(T_g - T_a)g}{T_a}} = C_d A_v \sqrt{\frac{2h\Delta T g}{T_a}} \quad (2)$$

式(2)中, A_v 为排烟口面积, m^2 。

2.2 喷淋冷却量

喷淋液滴与热烟气之间的总的对流传热量为^[6]：

$$Q_{\text{sprinkler}} = \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi \left(\frac{i}{2}\right)^3 \rho_w C_p (T_f - T_{w0}) n(i) \quad (3)$$

式(3)中, i 为喷淋液滴直径, μm ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; C_p 为水的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; N 表示喷淋液滴的最大粒径, μm ; $n(i)$ 为直径为 i 的液滴个数; T_f 为液滴到达烟气层底部时的温度, K; T_{w0} 为液滴的初始温度, K。

对于液滴到达烟气层底部时的温度 T_f , 可通过对单个液滴建立能量方程得到^[7]：

$$m(i)C_p \frac{dT(i)_w}{dt} = h(i)S(i)[T - T(i)_w] \quad (4)$$

式(4)中, $m(i)$ 为粒径为 i 的液滴的质量, kg; $T(i)_w$ 为粒径为 i 的液滴的初始温度; $S(i)$ 为粒径为 i 的液滴的表面积, m^2 ; T 为液滴的温度, K。

式(4)可改写为：

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{i}{2}\right)^3 \rho_w v C_p \frac{dT(i)_w}{dx} = \frac{kNu(i)}{i} \pi i^2 [T - T(i)_w] \quad (5)$$

($T(i)_w \leq 373 \text{ K}$)

式(5)中, x 方向为液滴竖直向下的方向。在求解上式时采用三阶 Runge - Kutta 进行数值积分, 可以算出喷淋液滴穿过烟气层时温度的变化过程。

2.3 烟气生成量

小室中烟气生成量用 Heskestad 模型^[8]计算：

$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{5/3} + 0.00192 \dot{Q}_c \quad (6)$$

($Z > Z_1$)

$$\dot{m}_p = 0.0056 \dot{Q}_c \frac{Z}{Z_1} \quad (7)$$

($Z < Z_1$)

式(6)中, \dot{m}_p 为烟气生成量, kg/s ; \dot{Q}_c 为火源的对流热释放速率, kW ; Z 为烟气层高度, m; Z_0 为火源的虚点源, m; Z_1 为平均火焰高度, m。

虚点源的公式为：

$$Z_0 = 0.083 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (8)$$

式(8)中, \dot{Q} 为热释放速率, kW ; D 为火源等效直径, m。

平均火焰高度公式为：

$$Z_1 = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (9)$$

2.4 耦合喷淋冷却与自然排烟的烟气沉降模型

把上部烟气层作为控制体, 根据能量守恒定律, 可以得到上部热烟气层的能量方程：

$$\frac{d[Z_u A \rho_u T_u C_{ps}]}{dt} = Q_c + \dot{m} C_{pa} T_0 - Q_{\text{sprinkler}} - m_v C_{ps} T_u \quad (10)$$

式(10)中, Z_u 为热烟气层的厚度, m; A 为烟气沉降的平面面积, m^2 ; ρ_u 为热烟气层的密度, kg/m^3 ; T_u 为热烟气层的温度, K; Q_c 为烟气羽流的对流换热率, kW ; C_{ps} 为热烟气的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C_{pa} 为环境空气的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; \dot{m} 是卷吸进入羽流的冷空气的质量流率, kg/s ; T_0 为环境空气的温度, K; m_v 为自然排烟量, kg/s ; $Q_{\text{sprinkler}}$ 为喷淋冷却量, kW 。

对式(10)进一步转化, 可得到：

$$-\frac{dZ}{dt} = \frac{Q_c - Q_{\text{sprinkler}}}{A \rho_0 T_0 C_{ps}} + \frac{\dot{m} C_{pa}}{A \rho_0 C_{ps}} - \frac{m_v T_u}{A \rho_0 T_0} \quad (11)$$

式(11)中, Z 为烟气层下表面距地面的高度, $Z = H - Z_u$, m; H 为建筑的高度, m。

把式(2)代入式(11), 可得到:

$$-\frac{dZ}{dt} = \frac{Q_c - Q_{\text{sprinkler}}}{A\rho_0 T_0 C_{ps}} + \frac{\dot{m}C_{pa}}{A\rho_0 C_{ps}} - \frac{C_d A_V \sqrt{\frac{2h \Delta T g}{T_a}} T_u}{A\rho_0 T_0} \quad (12)$$

对于烟气的温升, 可由式(13)得到:

$$Q_c - Q_{\text{sprinkler}} = \dot{m}C_{ps} \Delta T \quad (13)$$

把式(13)代入式(12), 可得到烟气层高度随时间的变化模型:

$$-\frac{dZ}{dt} = \frac{Q_c - Q_{\text{sprinkler}}}{A\rho_0 T_0 C_{ps}} + \frac{\dot{m}C_{pa}}{A\rho_0 C_{ps}} - \frac{C_d A_V \sqrt{2(H-Z) \frac{Q_c - Q_{\text{sprinkler}}}{\dot{m}C_{ps}} g}}{A\rho_0 T_0} \left(T_0 + \frac{Q_c - Q_{\text{sprinkler}}}{\dot{m}C_{ps}} \right) \quad (14)$$

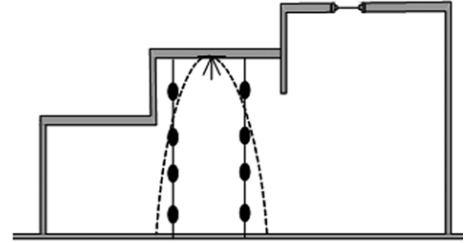
3 实验装置与实验安排

3.1 实验装置

利用中国科学技术大学 PolyU/USTC 大空间火灾实验厅内的烟气耦合实验台进行实验研究。图 2 为实验台实物图。实验台分成 3 个部分: 燃烧区、喷淋区和蓄烟区。其中燃烧区是一个 2.5 m(长) × 1.22 m(宽) × 2.2 m(高)的长方形小室, 为了保证燃烧的稳定和充分, 在燃烧小室三面的底部均留有 0.4 m 高的通风口。燃烧区小室与喷淋区相连部分敞开, 开口尺寸为 1.22 m(宽) × 1.8 m(高)。燃料产生的烟气首先在燃烧区小室内聚集, 然后通过开口进入到喷淋小室中。喷淋小室尺寸为 4 m(长) × 2 m(宽) × 2.6 m(高), 其通向蓄烟区的开口为 2 m(宽) × 2.2 m(高), 喷淋小室通向蓄烟区的一侧挡烟垂壁高度为 0.4 m, 使得实验时能在喷淋区形成厚度约为 1.0 m 的烟气层。蓄烟区尺寸为 4.2 m(长) × 4.2 m(宽) × 4.2 m(高), 蓄烟区三面的底部均留有 0.5 m 高的通风口, 自然排烟口位于蓄烟区的中央, 尺寸大小为 0.6 m × 0.6 m, 排烟口面积为地面面积的 2%, 符合规范规定^[2]。



(a)



(b)

图 2 烟水耦合实验台

Fig. 2 Experimental bench of smoke and sprinkler

实验使用 ZSTP-15 标准普通型洒水喷头, 喷头直径为 12.7 mm, 流量系数 $K = 80$, 安装于喷淋区域顶部中央位置。喷淋小室有两串 K 型热电偶, 每串热电偶沿喷淋小室中心点对称布置, 距端墙和侧墙的距离分别为 1.0 m。每串热电偶有 15 只, 热电偶之间的间距是 0.15 m, 最上端热电偶的高度为 2.6 m。为了测得准确的烟气层温度, 热电偶用倒“U”型的金属薄片保护。实验中用热线风速仪测量热烟气的速度。实验中使用可调式减压阀对喷头工作压力进行控制, 精度可达 0.002 MPa。

油盘热释放速率通过一个六支点压电式称重平台测量得到。实验中, 称重平台将感受到的压力变化传送到数据采集器中, 然后再输入到计算机, 经过转换后记录为燃料质量随时间的变化。燃烧过程中, 计算机每隔 1.5 s 采集一次数据, 这样整个实验过程中可以得到燃料的实时变化情况, 通过其变化曲线的瞬时斜率就可求出单个油盘的质量损失速率。

3.2 实验安排

在实验中, 选取了 4 种不同的油盘, 油盘尺寸分别为 0.25 m × 0.25 m, 0.3 m × 0.3 m, 0.5 m × 0.5 m, 0.6 m × 0.6 m。油盘的深度为 0.05 m, 实验所用的燃料为柴油, 每次实验用油大约 600 mL, 对于喷淋实验, 在点火时同时开启喷淋, 喷淋工作压力分别为 0.05, 0.075 MPa 和 0.1 MPa, 实验工况共 16 组, 每次实验持续时间约为 600 s, 具体实验工况

以及实验结果见表 1。

表 1 试验工况统计及结果

Table 1 Experimental results and test conditions

实验序号	环境温度 /K	油盘尺寸 /m ²	对流热 /kW	喷淋压力 /MPa	烟气温升 /K	烟气流量 模型值 / (kg·s ⁻¹)	喷淋冷却量 /kW	排烟口 尺寸 /m ²	蓄烟池 面积 /m ²	烟气层稳定高度 /m
1	301	0.25 × 0.25	36.8	-	19.4	0.347	-	0.36	17.64	3.823 7
2	301	0.25 × 0.25	36.8	0.05	4.5	0.347	7.12	0.36	17.64	3.733 4
3	301	0.25 × 0.25	36.8	0.075	3.5	0.347	7.72	0.36	17.64	3.723 8
4	301	0.25 × 0.25	36.8	0.1	2.9	0.347	8.48	0.36	17.64	3.711
5	301	0.3 × 0.3	50.4	-	33.5	0.398	-	0.36	17.64	3.785 4
6	301	0.3 × 0.3	50.4	0.05	9.4	0.398	14.36	0.36	17.64	3.620 2
7	301	0.3 × 0.3	50.4	0.075	6.1	0.398	15.48	0.36	17.64	3.601 6
8	301	0.3 × 0.3	50.4	0.1	4.9	0.398	16.96	0.36	17.64	3.575 1
9	301	0.5 × 0.5	101.5	-	60.5	0.56	-	0.36	17.64	3.626 5
10	301	0.5 × 0.5	101.5	0.05	29.7	0.56	24.68	0.36	17.64	3.442 1
11	301	0.5 × 0.5	101.5	0.075	24.0	0.56	26.56	0.36	17.64	3.412 4
12	301	0.5 × 0.5	101.5	0.1	20.1	0.56	29.12	0.36	17.64	3.395 8
13	301	0.6 × 0.6	159.6	-	107	0.734	-	0.36	17.64	3.378 8
14	301	0.6 × 0.6	159.6	0.05	35.2	0.734	54.88	0.36	17.64	2.948 6
15	301	0.6 × 0.6	159.6	0.075	28.1	0.734	59.04	0.36	17.64	2.896 6
16	301	0.6 × 0.6	159.6	0.1	21.8	0.734	64.64	0.36	17.64	2.819 7

4 结果与讨论

在实验当中,只有上部 8 支热电偶处在烟气之中,对两串热电偶 T_A 和 T_B 取水平位置平均,对处于烟气层中的 8 支热电偶取空间算术平均,得到不同

实验状况下烟气层平均温度随时间的变化如图 3 所示。从图 3 可以看到,在无喷淋情况下,烟气温度较高。喷淋作用后,烟气温度明显降低,但在不同压力下,温度差别不大。

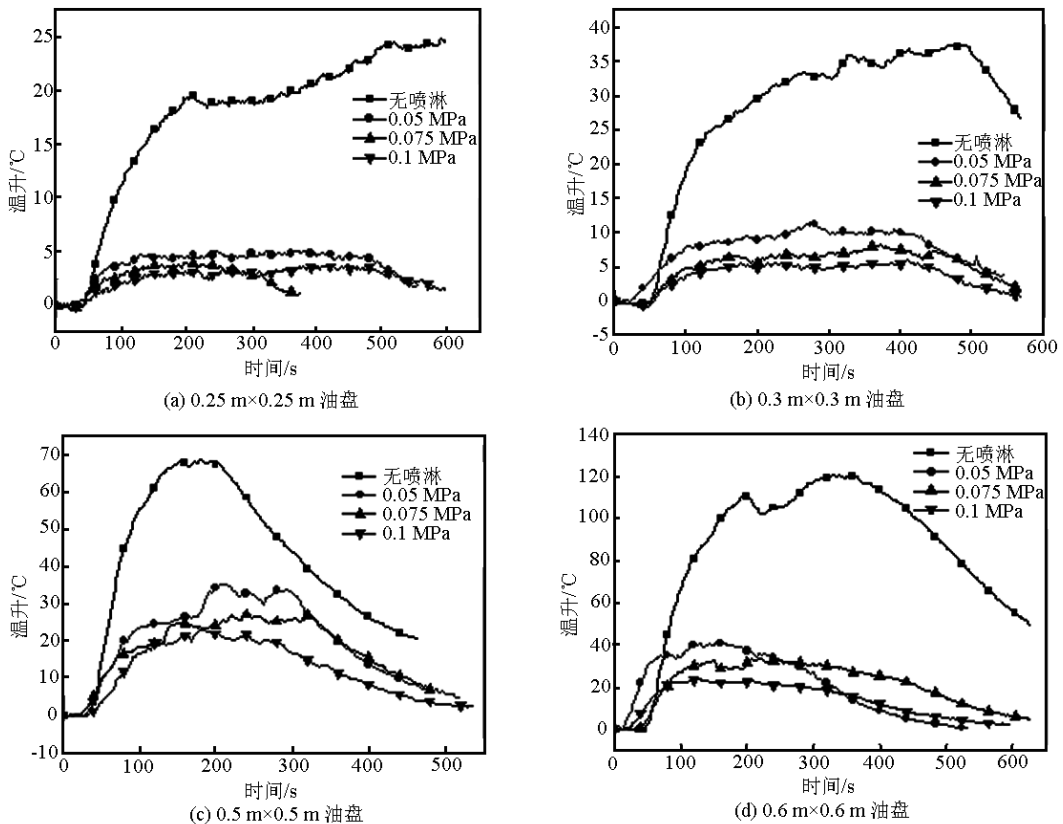


图 3 热电偶平均温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Change of mean temperature of thermocouple with time

对每次实验的平均值在平滑时间段内取平均,可以得到各次实验的烟气层的平均温度。烟气层的平均温度见表 1。

根据表 1 中的输入参数,对式(14)进行数值求

解,可得到自然排烟情况下烟气层高度随时间的变化情况,烟气层高度在不同火源和不同喷淋情况下随时间的变化情况见图 4。

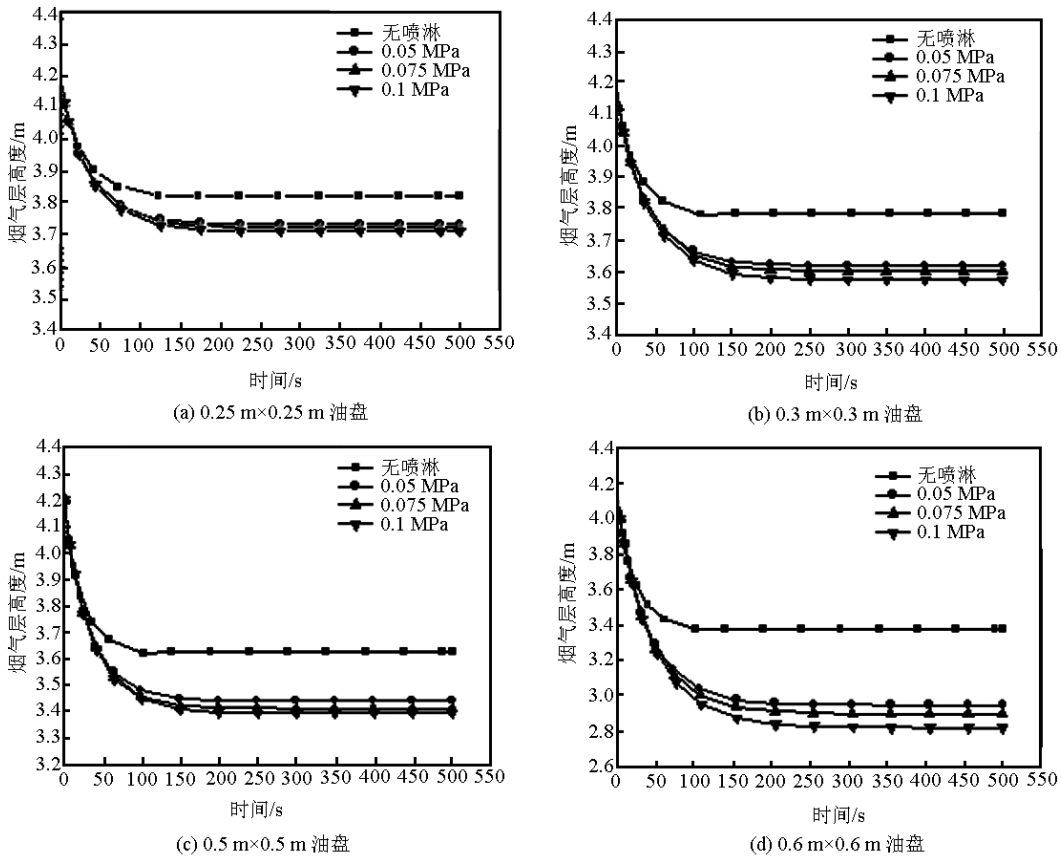


图 4 不同尺寸油盘不同喷淋压力下的烟气沉降

Fig. 4 Smoke filling of different fires under different sprinkler pressure

喷淋对烟气层冷却之后,在自然填充情况下,烟气层下降速率变慢。但是有自然排烟的情况下,喷淋作用后,烟气温度下降,浮力降低,自然排烟量减小,会造成烟气层下降速率同比无喷淋的情况下变大。喷淋冷却与自然排烟耦合作用下,同一火源的烟气沉降速度非常接近;自然排烟可以使烟气层稳定在一定高度,如:在无喷淋情况下,对于 0.5 m×0.5 m 油盘,烟气层高度可稳定在 3.626 5 m,对于 0.6 m×0.6 m 油盘,烟气层高度可稳定在 3.378 8 m;喷淋冷却烟气层之后,烟气层最终稳定高度降低,但在不同压力下差别较小,如对于 0.3 m×0.3 m 油盘,烟气层最终稳定高度为 3.785 4 m;当喷淋压力为 0.05 MPa 时,烟气层最终稳定高度为

3.620 2 m,降低 4.4%;当喷淋压力增大到 0.1 MPa 时,烟气层最终稳定高度为 3.575 1 m,降低 5.6%,两种压力下烟气层厚度的最终差别为 1.2%。

5 结语

文章在自然排烟与喷淋冷却理论分析的基础上,建立了喷淋冷却与自然排烟耦合作用下的烟气层沉降模型。开展了相应的实验作为模型输入参数,得到了不同实验条件下烟气层沉降结果。结果表明,喷淋冷却与自然排烟耦合作用下,烟气沉降速度相差很小。随着压力的增大,烟气层最终沉降高度相差较小,如对于 0.3 m×0.3 m 油盘,烟气层最终稳定高度为

3.785 4 m;当喷淋压力为 0.05 MPa 时,烟气层最终稳定高度为 3.620 2 m;当喷淋压力增大到 0.1 MPa 时,烟气层最终稳定高度为 3.575 1 m。

参考文献

- [1] 杜 红. 防排烟工程[M]. 北京:中国人民公安大学出版社, 2003
- [2] 建筑设计防火规范(GB50016-2006)[S].
- [3] 高层民用建筑设计防火规范(GB50045-95)(2005)[S].
- [4] Mawhinney J R, Tamura G T. Effect of automatic sprinkler protection on smoke control systems[A]. ASHRAE Transactions[C]. 1994,100(1)
- [5] Philip J D. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. 3rd Edition. Boston, MA, USA; Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, 2002
- [6] Howard P M. Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray 1 - A tentative theory[J]. Fire and Materials,1979,3(1):34-38
- [7] Chow W K, Anderson C T. Experimental studies on sprinkler water spray - smoke layer interaction[J]. Journal of Applied Fire Science,1994,4(3):171-184
- [8] Heskestad G. Fire Plumes, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995

Study on smoke filling combined with sprinkler cooling and natural smoke exhaust

Li Sicheng^{1,2}, Chen Ying¹, Hu Longhua², Huo Ran², Yang Dong²

(1. The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang, Hebei 065000, China;

2. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] A mathematical model was developed for predicting smoke filling combined with sprinkler cooling and natural smoke exhaust. Experiments were carried out to validate the model, with experimental results, smoke filling characteristics are obtained. Results showed that smoke filling velocity combined with sprinkler cooling and natural smoke exhaust has a very small difference; the final height of smoke reduces with sprinkler cooling; for the range of pressure studied in the present investigation, we found only a small effect of pressure on the final height of smoke.

[Key words] fire protection engineering; sprinkler spray; sprinkler cooling; natural smoke exhaust; smoke filling