

文章编号: 1000-4750(2009)11-0247-05

# 长通道内烟气一维水平蔓延阶段质量卷吸系数的实验研究

王浩波<sup>1</sup>, \*纪杰<sup>1</sup>, 钟委<sup>2</sup>, 霍然<sup>1</sup>, 张英<sup>1</sup>, 胡隆华<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽, 合肥 230026; 2. 郑州大学化工学院安全工程系, 河南, 郑州 450001)

**摘 要:** 长通道型结构内发生火灾时, 由于通道侧壁的限制, 烟气将很快运动至充分发展阶段, 表现为沿通道轴向的一维水平蔓延。该文分析了一维水平蔓延阶段中上部热烟气层和下部冷空气层在分界面处的水平相对剪切运动, 以及由此导致的烟气层质量流率的沿程增加。通过联立烟气作一维水平蔓延时的运动速度衰减规律, 推导出了长通道型结构内烟气一维水平蔓延过程中的质量卷吸系数关系式。在模拟尺寸长通道实验台中进行了一系列实验, 测得到了关系式中的未知参数, 包括环境空气温度、一维水平蔓延阶段中两参考截面处的烟气流速、温度和烟气层厚度等, 求出了一维水平卷吸系数。

**关键词:** 烟气; 长通道; 一维水平蔓延; 水平卷吸系数; 模拟尺寸实验

**中图分类号:** X928.7 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON AIR ENTRAINMENT COEFFICIENT DURING ONE-DIMENSIONAL HORIZONTAL MOVEMENT OF FIRE-INDUCED SMOKE IN LONG CHANNELS

WANG Hao-bo<sup>1</sup>, \*JI Jie<sup>1</sup>, ZHONG Wei<sup>2</sup>, HUO Ran<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, HU Long-hua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

2. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** During fires in long channels, due to the restriction of side walls, the fire-induced smoke will rapidly reach the fully developed phase, with the characteristic of an axial one-dimension horizontal movement. It is analyzed for both the relative shear movement at the interface between the upper hot smoke layer and lower cold air layer during the one-dimensional horizontal movement of smoke, and the resulting increase of mass flow rate of the smoke layer. With combining the variation law of smoke velocity, the expression of an air mass entrainment coefficient was established. A series of experiments were carried out in a bench-scale long channel, the parameters in the expression were measured, including the ambient air temperature, and the velocity, temperature and thickness of smoke layers at two reference positions. Based on these experimental results, the horizontal entrainment coefficient was obtained.

**Key words:** smoke; long channel; one-dimensional horizontal spread; horizontal entrainment coefficient; bench-scale experiment

收稿日期: 2008-06-20; 修改日期: 2009-03-12

基金项目: 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题项目(HZ2008-KF06)

作者简介: 王浩波(1977—), 男, 山西太原人, 助研, 博士生, 主要从事建筑防排烟优化设计研究(E-mail: wanghb@ustc.edu.cn);

\*纪杰(1979—), 男, 河南项城人, 博士后, 主要从事长通道、地铁火灾防治研究(E-mail: jijie232@ustc.edu.cn);

钟委(1978—), 男, 重庆江津人, 讲师, 博士, 主要从事隧道、地铁火灾防治研究(E-mail: zhongwei@zzu.edu.cn);

霍然(1945—), 男, 河北衡水人, 研究员, 学士, 博导, 从事建筑火灾防治研究(E-mail: hlh@ustc.edu.cn);

张英(1985—), 男, 湖北襄樊人, 博士生, 主要从事固定表面火蔓延特性研究(E-mail: ying@mail.ustc.edu.cn);

胡隆华(1979—), 男, 湖南衡阳人, 副研究员, 博士, 主要从事隧道、地铁火灾防治研究(E-mail: hlh@ustc.edu.cn).

长通道型建筑结构有多种表现形式,如隧道、地铁、地下通道、地下商业街等。在此类结构中,客流量一般比较大,一旦发生火灾经常是群死群伤的结果,因此研究烟气在长通道内的蔓延规律和沿程质量产生速率,可以用于指导长通道型结构内防排烟系统的设计,对长通道火灾的防治工作有重要意义。在工程预测中,一般通过估算烟气生成量来设计机械排烟系统的排烟量。在计算普通尺寸房间中火灾时的烟气层质量产生速率时,通常采用经典羽流模型<sup>[1-6]</sup>,仅考虑羽流卷吸导致的烟气层质量增加,忽略烟气层分界面处的卷吸对烟气层质量的贡献。由于普通房间的尺寸较小,烟气层分界面处的卷吸所导致的烟气层质量增加量所占比例较小,故可获得较理想的结果,基本可满足工程预测需要。长通道型建筑结构的长度尺度是普通尺寸房间的数十倍,结构差别较大,烟气蔓延过程也有较大差异,使用经典羽流模型计算长通道型建筑结构内火灾时的烟气产生量,将导致较大误差,有必要研究长通道型建筑结构内的烟气层质量产生规律。

通道内的烟气蔓延过程如图1所示,火灾产生的烟气经过上升羽流、径向蔓延和向一维水平蔓延过渡等3个阶段后,由于通道侧壁的限制,烟气流动将到达充分发展阶段,即一维水平蔓延阶段,表现为沿通道轴向的一维水平运动。在通道内,由于上部烟气层和下部空气层存在相互剪切作用,会将一部分空气卷吸到烟气层中。经过长距离的蔓延后,这种烟气层界面处的空气卷吸将对烟气层的质量流量造成重要影响。因此,定量研究烟气层界面处的卷吸作用,可弥补仅采用羽流模型计算烟气生成量方法的局限性。

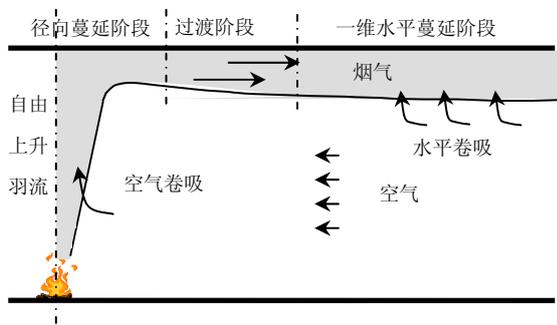


图1 长通道内的烟气蔓延过程

Fig.1 Smoke movement in a long channel

近年来,一些学者开始关注烟气水平蔓延中空气卷吸对烟气层质量产生速率的影响<sup>[7-10]</sup>,Kunsch

提出了通道内烟气轴向顶棚射流的水平卷吸系数的定义,并通过无量纲分析推导了一维水平卷吸系数<sup>[7-8]</sup>,但并未开展系统的实验研究,理论推导的系数的正确性需要实验的验证。王荣辉等<sup>[11]</sup>进行了一系列模拟回廊排烟的实验,研究了烟气沿水平方向蔓延时的质量增加。本文通过理论分析,建立了通道内烟气一维水平蔓延过程中的卷吸系数求解表达式,并在模拟尺寸长通道实验台中进行了一系列实验,根据实验测量的参数求出了一维水平卷吸系数。

## 1 一维水平卷吸系数的推导

随着烟气离火源距离的增加,烟气层将由径向蔓延逐渐过渡到一维水平蔓延,烟气层与长通道侧壁的碰撞作用大大减小,由反浮力壁面射流造成的空气卷吸量也大大降低,在长通道中间和靠近侧壁处的烟气温度将趋于一致,此时卷吸主要是由水平剪切力造成的。空气是典型的牛顿流体,烟气也可作为牛顿流体处理。牛顿粘性定律表明粘性切应力的大小由相邻两层流体之间垂直于流动方向的法向速度梯度所决定的,所以,烟气层分界面处的剪切力与上层热烟气和下层冷空气之间的相对速度成正比,烟气的质量卷吸速率也与上层热烟气和下层冷空气的相对速度成正比。

Kunsch 提出烟气在通道中作一维水平蔓延时,其中  $dx$  段内的烟气卷吸速率  $dm$  可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$dm = \beta \cdot \rho_a \cdot w \cdot \Delta u \cdot dx \quad (1)$$

其中:  $\rho_a$  是空气的密度;  $\Delta u$  是  $x$  处烟气层和空气层之间的相对速度;  $\beta$  是水平卷吸系数;  $w$  是长通道的宽度。

Hinkley<sup>[10]</sup>研究了烟气在通道内作水平一维运动时的衰减规律,给出如下关系式:

$$u_s = u_{s0} \cdot \exp[\alpha(x_0 - x)] \quad (2)$$

式中:  $u_{s0}$  为一维水平方向坐标  $x_0$  处的烟气运动速度;  $u_s$  为  $x$  处的烟气运动速度;  $\alpha$  为一个多参数组合变量。

但是,对于下层冷空气的速度分布,目前无关系式进行描述。对于整个狭长型的通道结构,当烟气流动状况达到稳定时,根据质量守恒,在任意横截面上,上层热烟气的质量流率应与下层冷空气的质量流率相等。烟气在一维水平蔓延阶段的绝对温度值与环境空气的绝对温度值相差不大,可假设二者密度相同,可得到热烟气层和冷空气层的体积流

率相等, 即:

$$u_a \cdot h_a = u_s \cdot h_s \quad (3)$$

其中:  $h_s$  是烟气层的厚度;  $h_a$  是下层空气的厚度, 通道高度为  $H$ , 则  $h_a = H - h_s$ , 可得:

$$u_a = \frac{h_s}{H - h_s} u_s \quad (4)$$

则烟气层和空气层之间的相对速度为:

$$u = u_s + u_a = \frac{H}{H - h_s} u_s \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)可得:

$$d\dot{m} = \beta \cdot \rho_a \cdot w \cdot \frac{H}{H - h_s} \cdot u_{s0} \cdot \exp[\alpha \cdot (x_0 - x)] \cdot dx \quad (6)$$

对式(6)积分, 即可得  $x_0$  到  $x$  之间的烟气质量卷吸速率, 但其中  $h_s$  是  $x$  的函数, 且没有简化的表达式, 故考虑将  $\beta \cdot \frac{H}{H - h_s}$  作为一个修正的卷吸系数  $\beta'$  来处理, 对式(6)积分结果:

$$\Delta \dot{m} = \beta' \cdot \rho_a \cdot w \cdot u_{s0} \cdot \int_{x_0}^x \exp[\alpha \cdot (x_0 - x)] dx = \beta' \cdot \rho_a \cdot w \cdot u_{s0} \cdot \frac{1 - \exp[\alpha \cdot (x_0 - x)]}{\alpha} \quad (7)$$

进行泰勒展开有:

$$\exp[\alpha \cdot (x_0 - x)] = 1 + \alpha \cdot (x_0 - x) + \frac{[\alpha \cdot (x_0 - x)]^2}{2!} + \dots \approx 1 + \alpha \cdot (x_0 - x) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 可得到烟气一维水平蔓延阶段质量卷吸速率:

$$\Delta \dot{m} = \beta' \cdot \rho_a \cdot w \cdot u_{s0} \cdot (x - x_0) \quad (9)$$

对于烟气一维水平蔓延阶段来说,  $x_0$  到  $x$  之间的烟气质量卷吸速率等于该距离内的烟气质量流率增量, 即:

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_s - \dot{m}_{s0} = \rho_s \cdot w \cdot h_s \cdot u_s - \rho_{s0} \cdot w \cdot h_{s0} \cdot u_{s0} = \rho_a \cdot w \cdot \left( \frac{T_a}{T_s} \cdot h_s \cdot u_s - \frac{T_a}{T_{s0}} \cdot h_{s0} \cdot u_{s0} \right) \quad (10)$$

其中, 将烟气视为理想气体, 利用理想气体状态方程, 有  $\rho_s = \rho_a \cdot T_a / T_s$ ,  $\rho_{s0} = \rho_a \cdot T_a / T_{s0}$ ,  $h_{s0}$ 、 $h_s$  和  $u_{s0}$ 、 $u_s$  分别为  $x_0$  和  $x$  处的烟气层厚度和速度。

将式(10)代入式(9), 得到卷吸系数  $\beta'$  的表达式:

$$\beta' = \frac{T_a \left( \frac{h_s}{T_s} \cdot \frac{u_s}{u_{s0}} - \frac{h_{s0}}{T_{s0}} \right)}{x - x_0} \quad (11)$$

可知该系数由环境空气温度、一维水平蔓延阶段上两截面处的烟气流速、温度和烟气层厚度决

定。因此, 在实验中测量一维水平蔓延阶段中两个典型截面上的烟气流速、温度和烟气层厚度, 代入式(11), 即可求得一维水平蔓延阶段的卷吸系数。

## 2 实验设计

实验台按照 1/8 的相似比例设计, 内部空间尺寸为 7.5m(长)×1.5m(宽)×0.6m(高), 两侧开口均完全打开。实验台顶部平行布置了 2 串水平热电偶  $D_1$  和  $D_2$ ,  $D_1$  串位于顶棚中心线,  $D_2$  串距侧壁 0.25m, 每串 15 个测点, 测点间隔 0.5m, 火源附近局部加密(测点间隔 0.25m), 另在距火源 2.5m 和 5.5m 设置 A、B 两个测量截面, 在该测量截面上设置两串从顶棚垂下的竖直热电偶串, 每串 14 个测点, 间距 2.5cm, 另设速度测点和厚度标尺, 如图 2、图 3 所示。实验采用矩形池火, 燃料为纯甲醇, 火源功率分别为 3.6kW、5.43kW、8.3kW、11.4kW。由于甲醇火无明显烟气, 故在火源上方放置烟饼以达到示踪效果。

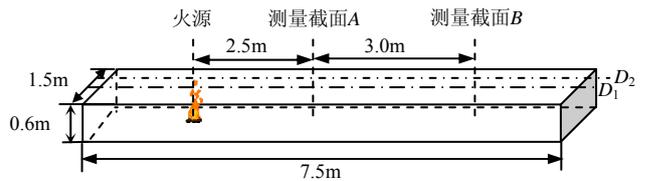


图 2 实验台示意图

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

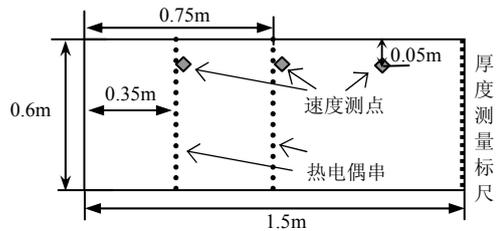


图 3 测量截面测点布置

Fig.3 Measurement setup in the cross-section

在长通道型结构中, 火灾烟气的蔓延阶段 1 是自由上升羽流阶段。阶段 2 是从阶段 1 的结束位置到以火源正上方顶棚为中心、半径为 0.75m(通道半宽)的圆周边界处。阶段 3 是向一维水平蔓延阶段的过渡, 在此阶段中烟气层对空气的卷吸主要有两种形式: 其一是烟气与长通道侧壁发生碰撞后形成壁面反浮力射流, 由于反浮力射流温度仍较高将再次进入烟气层, 因此在长通道侧边处形成一系列涡旋结构将大量空气卷吸进入烟气层, 从而导致靠近侧壁处烟气层温度明显比通道中央低; 其二是上部烟

气层和下部空气层之间的相对运动所产生的水平剪切所导致的卷吸, 由于其卷吸强度远小于反浮力壁面射流, 所以在过渡阶段大部分的空气卷吸是由反浮力壁面射流造成。阶段4为一维水平运动阶段, 一维的意义即是在理想状态下, 该阶段中任一横截面上通道两侧和中央烟气层温度和速度值相等。根据该分析, 实验分为两步进行, 第一步是根据顶部的水平热电偶串确定图1中所示的过渡阶段的终止位置, 即一维水平蔓延阶段的起始位置; 第二步是在一维水平蔓延阶段上取一个参考段, 测量起始截面与终止截面上的相关参数, 代入式(11)中求解。图4是实验过程中的典型现象。

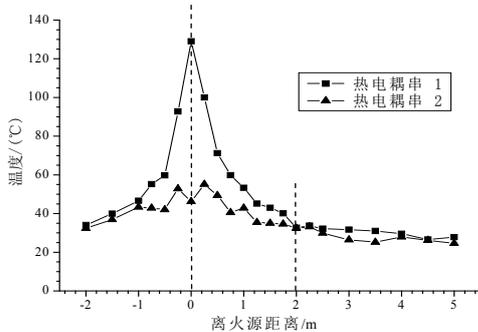


图4 烟气流动情况  
Fig.4 Smoke movement

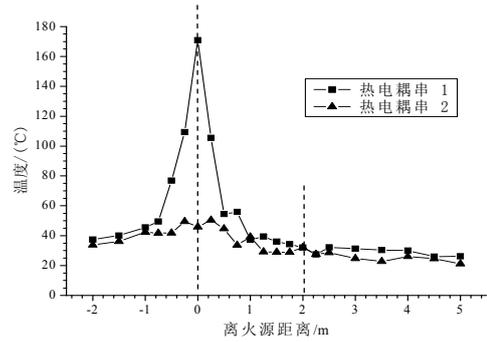
### 3 实验结果及分析

图5为4种火源功率下, 布置在模拟尺寸长通道实验台顶棚下方的水平热电偶串  $D_1$  和  $D_2$  测得的温度数据。理想状态下, 在一维水平蔓延阶段中, 通道两侧和中央烟气层温度和速度值相等, 但在实验条件下, 不可能达到完全相等, 而是略有差别。从图5中可以看出, 距火源距离越远, 同一截面上两测点温度之差越小, 最终差值落入一个区间内。根据图5, 可认为距离火源2m处, 烟气运动达到一维运动阶段。

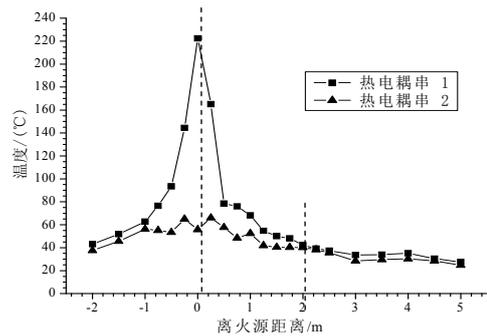
根据以上判定, 取距离火源2.5m处到5.5m处作为测量段, 即  $x=5.5, x_0=2.5$ 。在各工况下测得的原始数据如表1所示。已知  $x-x_0=3m$ , 将实验得到的结果利用式(11)即可求出水平卷吸系数, 结果见表2。



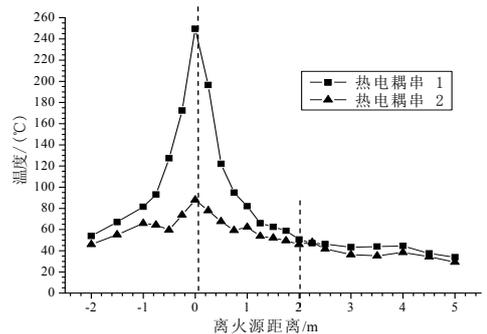
(a) 火源功率 3.57kW



(b) 火源功率 5.43kW



(c) 火源功率 8.33kW



(d) 火源功率 11.35kW

图5 顶棚下方烟气层温度

Fig.5 Smoke layer temperature under the ceiling

表1 实验结果列表

Table 1 List of experimental results

火源功率/kW	环境温度/K	烟气厚度/cm	烟气蔓延速度/(m/s)			烟气温度/K	
			左侧	中间	右侧	中间	两侧
距火源距离 $x$ 处							
3.57	295	9.5	0.23	0.25	0.24	294.2	292.2
5.43	296	10.5	0.32	0.34	0.32	330.5	314.7
8.33	290	11.5	0.37	0.39	0.38	325.7	315.7
11.35	290	12	0.42	0.44	0.42	300.5	297.8
距火源距离 $x_0$ 处							
3.57	295	9	0.24	0.3	0.25	306.3	305.4
5.43	290	10	0.34	0.39	0.35	299.2	294.2
8.33	289	11	0.4	0.45	0.39	306.8	306.0
11.35	291	11.5	0.44	0.51	0.45	315.8	312.4

表2 不同火源功率下的水平卷吸系数

Table 2 Horizontal entrainment coefficient for different tests

火源功率/kW	$\beta'$	$\beta$
3.57	0.000126	0.000107
5.43	0.000204	0.000169
8.33	0.000314	0.000255
11.35	0.000317	0.000255

从表2可以看出,通过实验结果计算得到的水平卷吸系数位于0.0001—0.0003之间,量级为 $10^{-4}$ ,与Kunsch<sup>[7]</sup>通过无量纲分析得到的水平空气卷吸系数约0.00015比较吻合,说明其模型是合理的。

## 4 结论

在长通道型建筑结构内,烟气流动充分发展后,表现为沿长通道轴向的一维水平运动。由于烟气层和空气层之间存在相对运动,一部分空气会被卷吸到烟气层中。本文通过分析建立了通道内烟气一维水平运动阶段的卷吸系数表达式,并通过实验求出了一维水平卷吸系数的值,验证了Kunsch的理论推导值是合理的,该结果可用于估算长通道型建筑结构内火灾烟气蔓延充分展开阶段的质量产生速率,为防排烟系统的设计提供数据支持。

### 参考文献:

[1] Zukoski E E, Kubota T, Cegeten B. Entrainment in fire

- plumes [J]. Fire Safety Journal, 1980, 3(1): 107—121.
- [2] Heskestad G. Engineering relations for fire plumes [J]. Fire Safety Journal, 1984, 7(1): 25—32.
- [3] Heskestad G. Virtual origins of fire plumes [J]. Fire Safety Journal, 1983, 5(2): 174—185.
- [4] NFPA, SFPE. SFPE handbook of fire protection engineering [M]. 3rd ed. Quincy, MA: NFPA, 2002.
- [5] McCaffrey B J. Momentum implications for buoyant diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 1983, 52(2): 149—167.
- [6] McCaffrey B J. Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results [R]. National Bureau of Standards, NBSIR 79-1910, Washington D C, 1979.
- [7] Kunsch J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(1): 13—24.
- [8] Kunsch J P. Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(1): 67—81.
- [9] He Yaping. Smoke temperature and velocity decays along corridors [J]. Fire Safety Journal, 1999, 33(1): 71—74.
- [10] Hinkley P L. The flow of hot gases along an enclosed shopping mall: A tentative theory [R]. Fire Research Note No. 807, Fire Research Station, 1970.
- [11] 王荣辉, 张村峰, 宾雄由, 王浩波, 钟伟, 霍然. 中庭建筑回廊排烟方法的模拟实验研究[J]. 火灾科学, 2006, 15(3): 178—183.
- Wang Ronghui, Zhang Cunfeng, Bin Xiongyou, Wang Haobo, Zhong Wei, Huo Ran. Experimental study on venting from the cloister of atrium [J]. Fire Safety Science, 2006, 15(3): 178—183. (in Chinese)

### 来函照登: 彭刚的致歉信

《工程力学》编辑部:

您好!

2007年9月我向贵刊投了一篇题为《钢纤维混凝土动态压缩性能及全曲线模型研究》的论文,同时,我向《振动工程学报》投了另一篇题为《钢纤维混凝土动力性能的常三轴试验研究》的论文,在往返过程中,由于本人工作不慎,误把投给贵刊的论文电子稿发给了《振动工程学报》。今年2月,贵刊与《振动工程学报》同时刊出了这篇题为《钢纤维混凝土动态压缩性能及全曲线模型研究》的论文。

十天前,我的学生在统计我的论文时发现了这个问题。一时间,我陷入了苦脑与懊悔之中。思前想后,我认为我必须面对错误、承担责任,向您及所有读者表示深深的歉意。我心情沉重的拨通了您的电话,同时,我还想以书面形式正式向您致歉。

我想说,这件事情的责任全部在我,由于自己工作的不慎,给两个刊物都造成了不良影响,我意愿承担全部责任,同意公开道歉。同时,我还应向本文的其他作者道歉。

最后,真诚地希望您能接受我发自内心的歉意!不胜感谢!

致

礼

作者: 彭刚  
2009年6月16日