

长通道内烟气层水平蔓延阶段的质量卷吸速率实验研究

纪杰¹, 霍然¹, 张英¹, 钟委², 胡隆华¹

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027; 2. 郑州大学化工学院安全工程系, 河南郑州 450002)

摘要: 根据卷吸机理不同, 可将通道内烟气蔓延过程分为四个不同阶段. 通过模拟尺寸实验, 测量了烟气层温度、厚度以及典型截面处的烟气流动速度, 确定了不同蔓延阶段的起止位置, 并重点计算了火羽流撞击顶棚后的径向蔓延阶段以及随后向一维水平蔓延的过渡阶段烟气层分界面处的质量卷吸速率. 通过对实验结果的分析, 给出了这两个阶段烟气层卷吸速率的经验关系式.

关键词: 长通道; 烟气; 模拟尺寸实验; 卷吸速率

中图分类号: X928.7 **文献标识码:** A

Experimental study on the entrainment mass flow rate across the smoke layer interface during horizontal spread in a long channel

JI Jie¹, HUO Ran¹, ZHANG Ying¹, ZHONG Wei², HU Long-hua¹

(1. State Key laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;

2. Department of Safety Engineering, Chemical Engineering Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the different entrainment mechanisms, the smoke movement in a long channel can be divided into four stages. Small scale experiments were carried out with temperature, thickness and velocity of the smoke layer measured. The transitional states of the four stages were analyzed and determined. The entrainment mass flow rate across the smoke layer interface in the stage of radial spread after impinging onto the ceiling and in the transitional stage it gradually assumes one-dimensional horizontal spread was deduced. Combining the experimental results and theoretical analysis, an empirical formula for predicting the entrainment rate across the smoke layer interface was deduced.

Key words: long channel; smoke layer; small-scale experiment; entrainment rate

0 引言

长通道结构有多种表现形式, 如隧道、地铁、地下通道、地下商业街等. 此类建筑内, 一般客流量大, 一旦发生火灾经常是群死群伤的结果. 研究烟气在长通道内的蔓延规律, 以及在烟气蔓延不同阶段中的烟气产生速率, 对长通道火灾的防治工作有重要

意义.

长通道内发生火灾时, 火灾烟气在热浮力的驱动下向上运动, 撞击顶棚并形成顶棚射流. 根据卷吸机理的不同, 将火源看作点源, 假定烟气羽流为轴对称, 可将烟气蔓延的过程分为四个阶段^[2~4], 如图1、图2所示.

阶段1是羽流上升阶段: 火源加热上方空气, 热

空气向上运动,周围冷空气不断被卷吸进入到热空气中,形成烟气羽流.阶段2是撞击顶棚并向四周蔓延;羽流上升后撞击顶棚(根据火源功率的大小以及顶棚的高度,分为烟气羽流撞击和火焰撞击两种情况),烟气羽流撞击顶棚后,将沿径向向四周自由蔓延,直至遇到两侧壁面阻挡.阶段3是由径向蔓延向轴向蔓延的过渡阶段;烟气在侧壁的作用下逐渐由二维的径向运动向一维的水平流动转变.阶段4是一维水平运动阶段:由于上部的热烟气和下部的冷空气之间的相对运动,烟气在水平运动的过程中会受到水平剪切力的作用,同时将一部分冷空气卷吸到烟气层中.

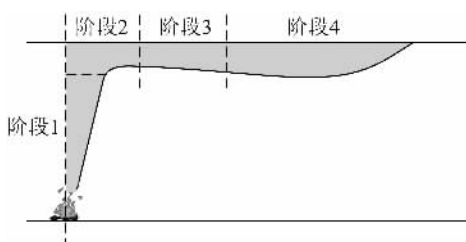


图1 长通道内烟气蔓延过程(侧视图)

Fig. 1 Smoke movement in a long channel (side view)

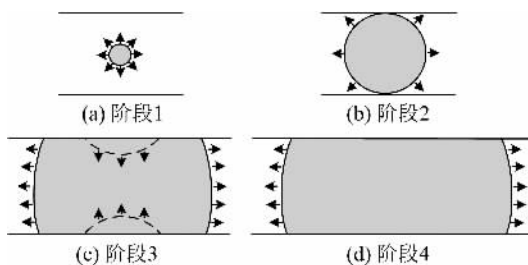


图2 长通道内烟气蔓延过程(俯视图)

Fig. 2 Smoke movement in a long channel (top view)

在传统的区域模拟思想中,将烟气层水平蔓延阶段(阶段2~4)质量流量的增量忽略,而只通过经典羽流模型考虑火羽流卷吸量对烟气层的贡献.近年来,一些学者开始注意到在长通道中,这种水平蔓延阶段的增量将对烟气层的流量产生显著贡献^[3~6]. J. P. Kunsch 研究了通风隧道内影响火灾烟气羽流在顶棚下运动范围的因素,通过实验和数值计算得到了轴向蔓延阶段(阶段4)的水平卷吸系数^[3,4].但目前对于阶段2和阶段3过程中烟气层的质量卷吸速率仍缺乏研究.而在这两个过程中^[1],会出现的一种特殊现象——水跃(internal jump),将导致烟流能量的突然损失,同时烟流将卷吸大量环境空气而导致质量流率的突然增大.因此研究烟气

层在长通道内蔓延第2,3阶段的质量卷吸特性是非常有必要的.

本文采用比例尺为1:8的模拟长通道实验台,对烟气层在长通道内水平蔓延阶段2和3的质量卷吸速率进行实验研究,并进一步通过理论分析,建立了烟气产生速率的无量纲关系式.

1 实验设计

实验台按照1:8的相似比例设计.主体尺寸为7.5 m(长)×1.5 m(宽)×0.6 m(高).实验台顶部布置2串热电偶,每串15个测点,测点间隔0.5 m,火源附近局部加密(测点间隔0.25 m).热电偶串1位于顶棚中心线,热电偶串2与1平行,相距0.5 m,如图3所示,测点位于顶棚下方6 mm.实验采用矩形池火,燃料为纯甲醇,火源功率分别为3.57, 5.43, 8.33, 11.35 kW.火源位于距实验台左侧端部2.5 m处的通道底部中心线上.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.速度测量采用6162智能型中温风速仪.

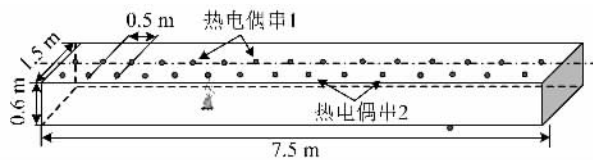


图3 实验台示意图

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

表1列出了实验工况,共8组实验:1~4组测量顶棚温度和烟气层厚度,用于确定不同阶段之间分界面的具体位置;5~8组测量温度、烟气层厚度和1~4组实验确定的阶段分界面处的烟气速度.图4和图5是实验过程中烟气在通道内的蔓延情况.

表1 实验工况列表

Tab. 1 Summary of tests

编号	火源功率/kW	火源位置(距通道左端)/m	测量参数
1	3.57	2.5	温度、烟气层厚度
2	5.43	2.5	温度、烟气层厚度
3	8.33	2.5	温度、烟气层厚度
4	11.35	2.5	温度、烟气层厚度
5	3.57	2.5	温度、速度、烟气层厚度
6	5.43	2.5	温度、速度、烟气层厚度
7	8.33	2.5	温度、速度、烟气层厚度
8	11.35	2.5	温度、速度、烟气层厚度



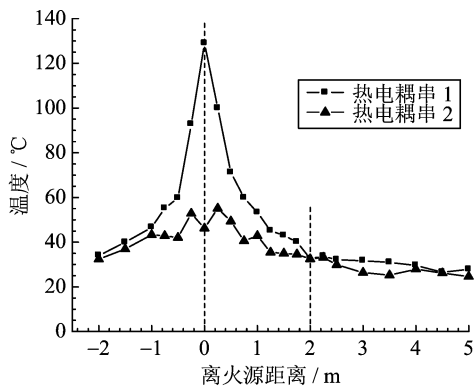
图 4 烟气流动情况(内视图)

Fig. 4 Smoke movement (inside view)

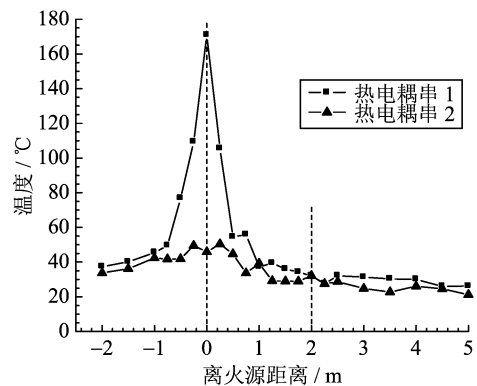


图 5 烟气流动情况(外视图)

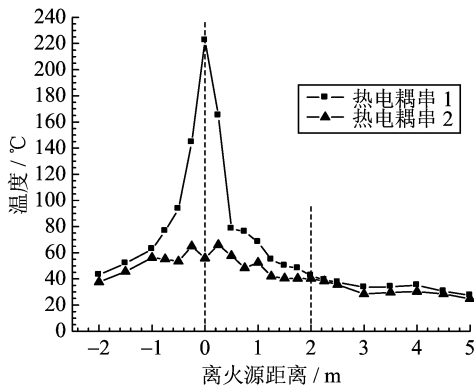
Fig. 5 Smoke movement (external view)



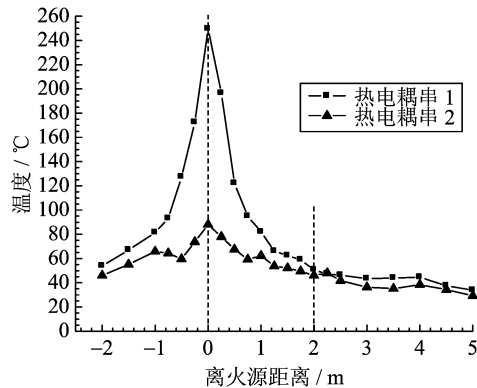
(a) 火源功率3.57 kW



(b) 火源功率5.43 kW



(c) 火源功率8.33 kW



(d) 火源功率11.35 kW

图 6 顶棚下方烟气层温度

Fig. 6 Smoke layer temperature under the ceiling

2 结果分析

2.1 各阶段的过渡位置

阶段 1 是火羽流卷吸阶段。阶段 2 为阶段 1 结束位置到以火源正上方顶棚为中心、半径为 0.75 m (通道半宽) 的圆周边界处。阶段 4 为一维水平运动阶段, 在理想状态下, 该阶段任一横截面上通道两侧

和中央烟气层温度和速度值相等, 在实验条件下, 则存在一定差异, 即同一横截面上两测点的温度值会有差异。图 6 为 4 种火源功率下, 热电偶串 1 和 2 测得的温度数据。可见, 距火源距离越远, 同一截面上两测点温度之差越小, 最终落入一个区间内。根据图中温度值, 可认为距离火源 2 m 处, 烟气运动达到一维运动阶段。因此, 本文认为阶段 3 和阶段 4 的分

界面位于距火源 2 m 处。

2.2 各阶段烟气层卷吸速率的计算

阶段 1 的质量卷吸速率采用常用的 Zukoski 模型:

$$\dot{m}_1 = 0.21 \left(\frac{\rho_0 g}{c_p T_0} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (1)$$

其中, T_0/K 为环境温度; $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$ 为空气密度; $c_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$ 为空气比定压热容; $g/(9.81 m \cdot s^{-2})$ 为重力加速度; $\dot{Q}/(kW)$ 为火源功率; z/m 为烟气羽流离地面的高度。

阶段 2, 3 和 4 的烟气层卷吸速率等于各阶段起止处的烟气层质量流率之差。烟气层质量流率计算公式如下:

$$\dot{m} = u \times d \times w \times \rho(T) \quad (2)$$

其中, $u/(m \cdot s^{-1})$ 为分界面处烟气蔓延速度; d/m 为分界面处烟气层厚度; w/m 为通道宽度。得到阶段 2, 3 和 4 的烟气产生速率计算公式:

$$\dot{m}_i = u_e \times d_e \times w \times \rho(T_e) - u_s \times d_s \times w \times \rho(T_s) \quad (3)$$

其中, 下标 i 代表各阶段 ($i=2, 3, 4$), e 和 s 分别代表各阶段终止界面和起始界面处的参数。考虑到烟气层速率在通道宽度方向上的分布, 将烟气层的质量流率按宽度方向上三个部分分别计算再求和, 则质量流率的计算公式变换为

$$\dot{m} = \frac{1}{3} \times w \times \sum_{j=1}^3 d_j \cdot \rho(T) \cdot u_j \quad (4)$$

其中, 下标 j 表示长通道的 3 个区间 ($j=1, 2, 3$)。则烟气产生速率为

$$\dot{m}_i = \frac{1}{3} \times w \times \left\{ \left[\sum_{j=1}^3 d_j \cdot \rho(T) \cdot u_j \right]_e - \left[\sum_{j=1}^3 d_j \cdot \rho(T) \cdot u_j \right]_s \right\} \quad (5)$$

将烟气视为理想气体, 利用理想气体状态方程, 有

$$\rho_s = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_s} \quad (6)$$

其中, T_s 为烟气温度, 由热电偶测得; ρ_0 和 T_0 为参考用的空气密度和温度。

图 7 和图 8 为计算得到的各阶段转折位置处烟气层的质量流率以及由此而得到的各阶段烟气层质量卷吸速率。如图 8 所示, 由于烟气蔓延各阶段的卷吸机理的差别, 导致卷吸速率有较大差别。在整个蔓延过程中, 烟气主要产生在阶段 1 和阶段 2。阶段 1 由于羽流作用卷吸空气较多, 导致产生速率最大。火

源功率越大, 阶段 2 的烟气卷吸速率越接近阶段 1, 该阶段主要是水跃现象卷吸大量空气。阶段 4 虽然距离较长, 但卷吸进来的空气很少, 故烟气层卷吸速率非常低。

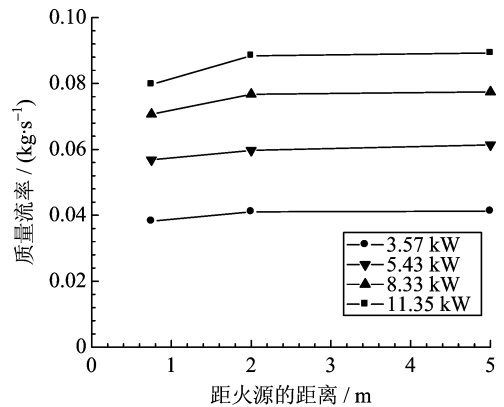


图 7 烟气层质量流率

Fig. 7 Mass flow rate of smoke layer

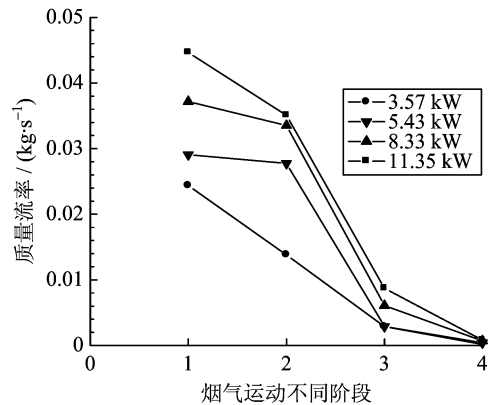


图 8 各阶段烟气层质量卷吸速率

Fig. 8 Mass entrainment rate of smoke layer in every stages

通过将烟气运动的控制方程无量纲化^[6], 取无量纲参数 π_6 , 可推导出质量流率的无量纲形式:

$$\dot{m}'_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_0 V L^2} = \frac{\dot{m}_i}{\rho_0 g^{1/2} L^{5/2}} \quad (7)$$

计算得到各工况下的无量纲烟气产生速率, 如图 9。

为建立阶段 2 和阶段 3 的无量纲质量产生速率关系式, 引入一个关联系数, 将无量纲烟气质量产生速率和羽流质量卷吸速率联系起来:

$$\dot{m}'_2 = C_2 \cdot \dot{m}'_1 \quad (8)$$

$$\dot{m}'_3 = C_3 \cdot \dot{m}'_1 \quad (9)$$

又

$$\dot{m}'_1 = 0.21 \cdot \dot{Q}'^{1/3} z'^{5/3} \quad (10)$$

其中, \dot{Q}' 和 z' 分别是无量纲火源功率和无量纲烟气

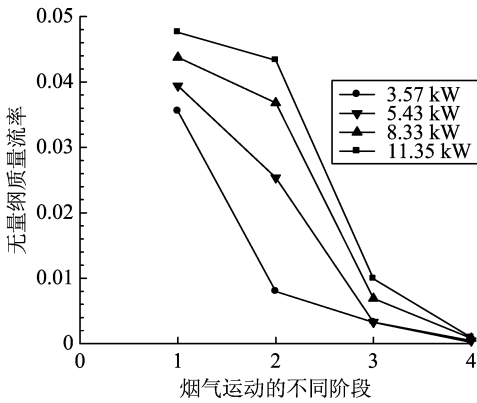


图 9 各工况各阶段的无量纲烟气生成速率
Fig. 9 Dimensionless smoke production rate of every stages in different tests

层高度,表达式如下:

$$\dot{Q}' = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}} \quad (11)$$

$$z' = \frac{z}{H} \quad (12)$$

将公式(11)和(12)代入到公式(10)中,即得到了阶段 2 和阶段 3 的无量纲质量产生速率关系式:

$$\dot{m}'_2 = C_2 \cdot \dot{Q}'^{1/3} \cdot z'^{1/3} \quad (13)$$

$$\dot{m}'_3 = C_3 \cdot \dot{Q}'^{1/3} \cdot z'^{1/3} \quad (14)$$

其中, C_2 和 C_3 可根据图 7 中的计算结果求出,分别为 0.138 和 0.028.

3 结论

通道内火灾产生的烟气在蔓延时,不同阶段的

卷吸机理有较大差异,因此研究此类问题时,应分阶段分析. 径向蔓延和向一维水平蔓延的过渡阶段对火灾烟气质量产生速率有较大影响,将这两个阶段的烟气层卷吸速率关系式相对于火羽流卷吸阶段进行无量纲化处理,通过实验验证,得到它们的关联系数 C_2 和 C_3 分别为 0.138 和 0.028. 本文的研究结果可用于估算长通道内火灾烟气蔓延不同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(References)

- [1] Chan W R, Zukoski E E, Kubota T. Experimental and Numerical Studies on Two Dimensional Gravity Currents in a Horizontal Channel: NIST-GCR-93-63 [R]. Pasadena: California Institute of Technology, 1992.
- [2] Delichatsios M A. The flow of fire gases under a beamed ceiling [J]. Combustion and Flame, 1981, 43: 1-10.
- [3] Kunsch J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel [J]. Atmospheric Environment, 1998, 33: 13-24.
- [4] Kunsch J P. Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37: 67-81.
- [5] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
- [6] 钟委. 地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.