

地下狭长封闭空间烟气填充模式 可视化实验研究*

中铁第一勘察设计院集团有限公司 李德辉* 邓保顺
西安建筑科技大学 马江燕 李安桂

摘要 实验研究结果表明:当模型的形状系数小于 2 时,烟气形成自上而下的填充方式,烟气界面和水平面平行;当形状系数大于等于 2 时,烟气形成狭长空间的填充方式,而且形状系数越大,该填充方式越明显。在两种烟气填充方式下,烟气浓度分布特点不同:形状系数小于 2 时,烟气浓度在同一个水平面内分布相对均匀;形状系数大于等于 2 时,烟气浓度在同一水平面内分布很不均匀,远离火源处的烟气浓度远高于火源附近区域的烟气浓度。地下狭长、封闭空间的烟气填充方式对人员逃生不利,在制定地下建筑防火排烟逃生预案时应予以充分考虑。

关键词 地下建筑 封闭空间 可视化 CO 浓度 模型实验

Visualizing experiment of smoke filling processes in underground long and narrow enclosed space

By Li Dehui*, Deng Baoshun, Ma Jiangyan and Li Angui

Abstract The experiment results show that smoke fills from top down to bottom when the model shape coefficient is less than 2 and the interface of smoke layer is horizontal, and that the long and narrow enclosed space smoke filling mode will be formed when the shape coefficient is equal or greater than 2, and it is more obvious with even larger shape coefficient. The distribution characteristics of smoke density in the two modes are different. When the shape coefficient is less than 2, the distribution of smoke density on the same horizontal plane is relatively uniform, while that is very non-uniform when the shape coefficient is equal or greater than 2, the smoke density far away from the fire source is far higher than that near the fire source. The smoke filling mode in a long and narrow enclosed space is unfavorable for human evacuation under fire, so it should be considered fully when the fire evacuation plan was drafted for underground spaces.

Keywords underground building, enclosed space, visualization, CO concentration, model experiment

① ★ China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an, China



李德辉

主要设计项目

- 上海地铁明珠二期临平路站
- 上海地铁锦江乐园站站房及物业开发综合楼
- 西安地铁一号线车站机电设备
- 西安地铁二号线车站机电设备

* 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项项目“西安地铁空间交错车站火灾排烟及其人员疏散预案编制的理论基础与工程示范”(编号:2009ZDKG—47)资助

0 引言

烟气中存在毒气是火灾发生时使人致死的主要原因。据统计,火灾中 85% 以上的死亡者的死亡原因是吸入了有毒烟气^[1]。地铁、隧道、地下商场通道等地下建筑空间狭长、密闭,发生火灾时,其烟气流动具有特殊性。烟气在长通道内的蔓延特

①☆ 李德辉,男,1968 年 12 月生,大学,高级工程师
710043 西安市西影路 2 号中铁第一勘察设计院地铁总体处
(029)82349080
E-mail:ldhxm@126.com
收稿日期:2010-05-21

性已被重视和研究^[2-4]。文献[3]对一个长 88 m 的通道进行了烟气扩散及 CO 分布研究,得到了 CO 随离火源的距离近似呈线性分布,且竖向随距离也近似呈线性分布的结论。文献[4]使用长 7.5 m 的模型对烟气流态及温度分布进行了研究。但文献[3-4]所使用的模型都只有一端开口,没有形成密闭空间。文献[5]把中庭截面积和高度的平方之比定义为形状系数,指出烟气流动和建筑的形状系数有关,但文中只对形状系数为 0.366 的中庭的烟气填充进行了详细的研究。Cui 等人利用数值模拟方法对 3 个不同体形的中庭进行了烟气填充研究,3 个建筑的形状系数分别为 1,2 和 0.25,相对较小^[6]。笔者研究了不同形状系数下烟气填充方式以及烟气浓度的变化规律,以期对狭长、密闭空间的烟气控制及制定地下建筑防火排烟逃生方案提供理论基础。

1 实验工况设置

本文所使用的模型为一个较小尺度的有机玻璃模型和一个较大尺度的其他模型。有机玻璃模型便于观察烟气流动,其尺寸为 2 000 mm×500 mm×480 mm,如图 1 所示。本文采用文献[5]的

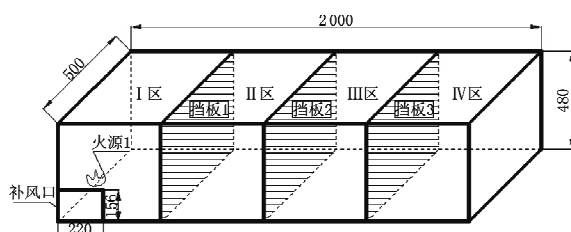


图 1 有机玻璃模型示意

方法对建筑形状系数进行定义,即形状系数 $\xi = \frac{A}{H^2}$,其中 A 为建筑物横截面积, m^2 ; H 为建筑物的高度, m 。为获知不同形状系数下烟气的填充方式,把模型分为 4 个区域,如图 1 所示,中间用活动挡板隔开,不允许烟气通过。本文把 I 区定义成 A 区,形状系数近似为 1.1; I+II 区定义为 B 区,形状系数近似为 2.2; I+II+III 区定义为 C 区,形状系数近似为 3.3; I+II+III+IV 区定义为 D 区,形状系数近似为 4.4。实验工况设置如表 1 所示。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

工况 1 和工况 2 的实验现象:火源点燃后,热烟气迅速撞击顶棚并向四周扩散,然后在模型的上

表 1 实验工况设置

工况	实验区域	形状系数	火源位置	备注
1	A	1.1	火源 1	见图 1
2	A	1.1	A 区域中心	
3	B	2.2	火源 1	见图 1
4	B	2.2	B 区域中心	
5	C	3.3	火源 1	见图 1
6	C	3.3	C 区域中心	
7	D	4.4	端墙	补风口的相对端
8	D	4.4	D 区域中心	

部空间逐渐积累,无论火源在侧墙处还是在模型中心,烟气的填充方式都是自上而下地填充整个空间。典型的填充图见图 2,从图中可以看出烟气层界面和水平面是平行的。

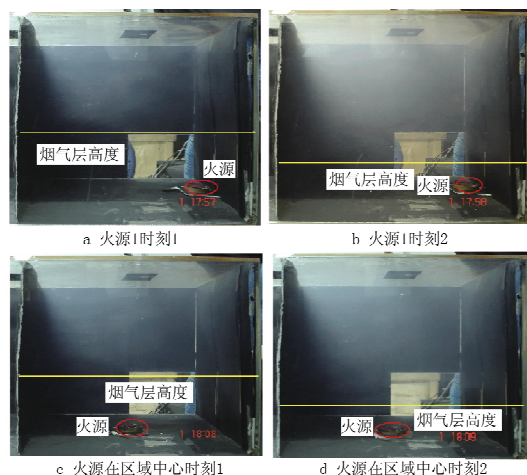


图 2 形状系数为 1.1 时的烟气填充示意

工况 3 的实验现象:当火源位于端墙处时,火源点燃后,烟气附着墙壁向上扩散,撞击顶棚后由于端墙的限制,烟气沿着顶棚向另一端扩散,当烟气碰撞另一端的端墙后,烟气向两个方向运动,一部分返回,一部分沿着端墙壁下降。随着燃烧的进行,烟气同时用两种方式填充模型:一是烟气在上部积累逐渐下降的自上而下的填充,一种是从远离火源端向火源端的水平填充。这时烟气层界面已不像工况 1 和工况 2 那样是水平的,而是和水平面有一定的夹角(见图 3a)。到了中后期,烟气会从模型的下部空间向火源方向运动(见图 3b),烟气存在于模型的上部和下部,中部空间形成一个大漩涡。从图中可以观察到在烟气填充时,下部远离火源的一端烟气浓度要远高于火源附近的烟气浓度。

工况 4 的实验现象:当火源位于区域中心时,烟气填充与工况 2 有相似之处,但有所区别,在火灾的初期,烟气层界面近似与水平面平行(见图

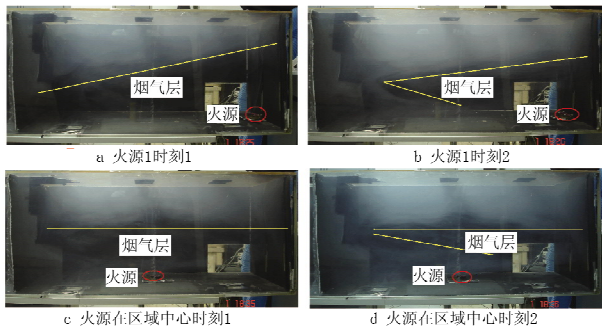


图 3 形状系数为 2.2 时的烟气填充示意

3c),但随着填充的进行,烟气在模型两端积累,由于火源的卷吸作用,烟气从模型下部向火源方向运动(见图 3d),这样,会以火源为中心形成较大的旋涡,旋涡内烟气浓度较小。由于模型的形状系数相对较小,此现象不是很明显。

工况 5 和工况 7 的实验现象和工况 3 相似(为研究补风口和火源的相对位置对烟气填充形态的影响,工况 7 火源位置设于补风口相对的端墙侧),见图 4a 和图 4b。从图 5 中可以看出,火源和补风口的相对位置不会改变烟气的填充形态。

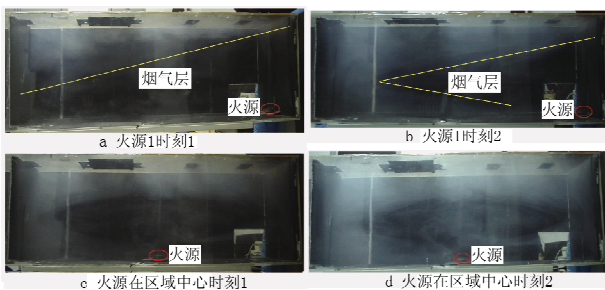


图 4 形状系数为 3.3 时的烟气填充示意

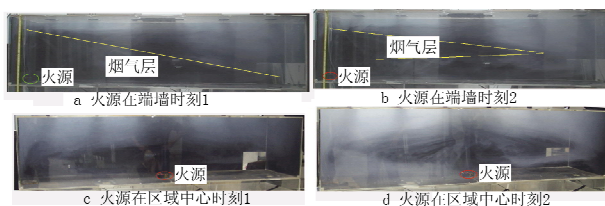


图 5 形状系数为 4.4 时的烟气填充示意

工况 6 和工况 8 的实验现象和工况 4 相似,从图 4c 和图 4d 可以看出,其中间旋涡更加明显。

2.2 实验结果分析

为什么会产生这样的两类填充方式呢?笔者认为和建筑的形状系数有关。当建筑的形状系数 $\xi=1.1$ 时,出现自上而下的填充方式。而当 $\xi \geq 2$ 时,会出现自上而下和从远离火源端向火源端水平填充的

方式,并且 ξ 越大,这种现象越明显。进一步分析可知,火灾发生时,烟气撞击顶棚后会向四周运动。

当 $\xi < 2$ (如 $\xi=1.1$) 时,建筑的长和宽相当,烟气在长和宽方向上所卷吸的空气量相当,随着燃烧的进行,烟气逐渐在模型上部空间积累后下沉,且在长度和宽度方向上的下沉速度相当,这样就会产生自上而下的填充方式。

当 $\xi \geq 2$ 时,模型的长度远大于宽度,形成狭长通道。烟气在狭长通道蔓延的过程分为 4 个阶段^[7-9],即如图 6 所示的前 4 个阶段。在一定条件下,通道越长,一维水平运动阶段越明显,在这个阶段烟气和周围的冷空气会发生热质交换,烟气的质量流量 m 随着距离火源长度 x 的增大而增大,文献^[10]给出了 m 的数学表达式。烟气的蔓延速度 v 和温度呈指数衰减^[10-11]。当烟气碰撞侧壁时,一部分烟气由于速度和温度降低而下沉,一部分则回流。通过可视化实验,笔者认为对于狭长、封闭的空间,在远离火源的端部存在如图 6 所示的碰壁回流阶段。由于这个阶段的存在,使远离火源端的烟气浓度远高于火源附近的烟气浓度(工况 3~8 都形成了这种现象),进而远离火源端的烟气毒气含量高于火源附近区域的烟气毒气含量,可见度远低于火源附近区域。火灾发生时,在密闭、狭长空间内,烟气这样的填充方式对人员的逃生很不利。

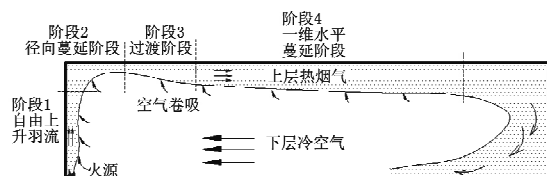


图 6 烟气在密闭狭长空间流动示意

由狭长空间的烟气填充方式的特殊性可以得出这样一个结论:对于相同的火源强度,当火源位于补风口相对的侧墙端时,补风口附近的烟气浓度要远高于火源位于区域中心时。为了进一步证实这个结论的正确性,也进一步证实狭长、密闭空间的烟气填充方式,笔者作了一组较大尺度的模型实验,实验在西安建筑科技大学空气调节研究所进行,实验模型的尺寸为 $8\,500\text{ mm} \times 2\,100\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$,如图 7 所示。火源有两种设置位置,分别为火源 A 和火源 B,火源的燃料为 0#柴油。CO 测点位置见图 7。在此模型中进行了 4 种工况(见表 2)的模型实验。实验结果见图 8。

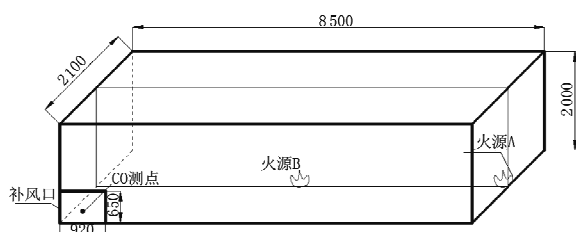


图 7 较大尺度模型示意

表 2 较大尺度模型工况设置

工况编号	火源位置	火源强度/kW	形状系数	环境温度/℃
A	火源 B	1	4.4	19.7
B	火源 B	3	4.4	19.3
C	火源 A	1	4.4	19.5
D	火源 A	3	4.4	18.3

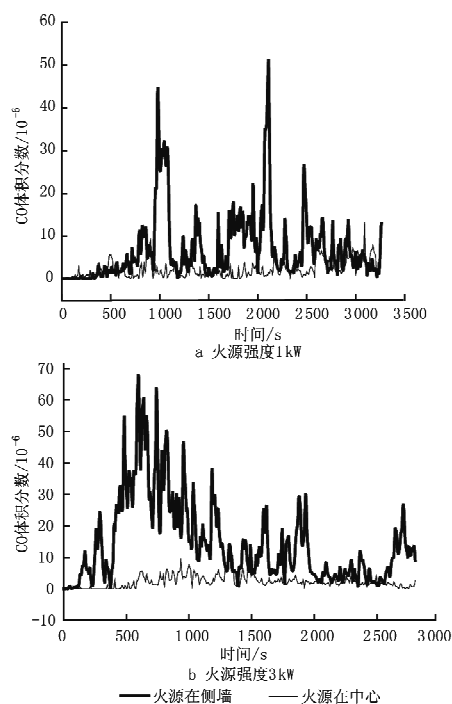


图 8 CO 浓度随时间变化

图 8 给出了不同火源位置和强度下 CO 浓度随时间的变化,从图中可以看出,火源 A 下的 CO 浓度远高于火源 B 下的 CO 浓度。火源强度为 1 kW,火源 A 位置时 CO 平均浓度是火源 B 位置时的 3.14 倍;火源强度为 3 kW,火源 A 位置时 CO 平均浓度是火源 B 位置时的 4.88 倍,这证实了本文提出的狭长空间内烟气流动方式的正确性。

3 结论

3.1 狭长、封闭空间的烟气填充方式和空间的形状系数有关,当 $\xi < 2$ 时,会形成自上而下的填充方式,在这种方式下,烟气的界面和水平面平行。当

$\xi \geq 2$ 时会形成狭长空间的填充方式,如图 6 所示,而且形状系数越大,此填充方式越明显。在这种填充方式下,烟气层界面和水平面成一定的夹角。

3.2 当 $\xi < 2$ 时,即在自上而下的填充方式下,烟气浓度在同一个水平面内分布相对均匀,而 $\xi \geq 2$ 时,即在狭长空间中,烟气浓度在同一水平面内分布很不均匀,远离火源处的烟气浓度远高于火源附近区域的烟气浓度。

3.3 通过较大尺寸的模型实验得知,在同一火源强度下,火源在端墙时补风口处 CO 浓度是火源在区域中心时的 3.14~4.88 倍。

3.4 研究表明,火灾发生时,狭长、封闭空间的烟气填充方式对人员的逃生很不利。对于狭长通道应该采取一些措施(在合适的位置增加挡烟板)来破坏烟气的这种流动方式,这对狭长、封闭空间的烟气控制及制定地下建筑防火排烟逃生方案有很大意义。

参考文献:

- [1] Jukka Hietaniemi, Rajia Kallonen, Esko Mikkola. Burning characteristics of selected substances; production of heat, smoke and chemical species [J]. Fire and Materials, 1999, 23(4): 171-185
- [2] 刘军军,兰彬,张文良,等. 地下商业街火灾烟气成分试验研究[J]. 消防科学与技术, 2001(1): 10-12
- [3] Hu L H, Fong N K, Yang L Z, et al. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel; fire dynamics simulator comparisons with measured data [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140: 293-298
- [4] Yang D, Hu L H, Huo R, et al. Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 30: 872-878
- [5] 刘方. 中庭火灾烟气流动与烟气控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002
- [6] Cui E, Chow W K. Simulation on indoor aerodynamics induced by an atrium fire [J]. Building and Environment, 2005, 40: 1194-1206
- [7] Delichatsios M A. The flow of fire gases under a beamed ceiling [J]. Combustion and Flame, 1981, 43: 1-10
- [8] Kunsch J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 13-24
- [9] Kunsch J P. Simple model for control of fire gases in a ventilation tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37: 67-81
- [10] 纪杰. 地铁站火灾烟气流动及通风控制模式研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008
- [11] 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