

高层建筑楼梯井不同开口方式下的烟气控制效果研究

许晓元, 李元洲, 许兆宇, 李 政

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:在1/3缩尺寸的高层建筑楼梯井实验台内开展了火灾烟气运动规律和控制实验,研究了中部楼层着火,烟气进入楼梯井的情况下,楼梯井不同开口方式对烟气控制效果的影响.测量了楼梯井内烟气的竖向温度分布、进出口风速以及烟气前锋上升时间.结果表明:各工况下,烟气到达一定高度后,烟气温度呈指数衰减;不同开口方式时,楼梯井内中性面位置不同,烟气蔓延速度不等;当着火层的邻近层开口时,烟气温度衰减快,烟气蔓延速度慢,控烟效果好.

关键词:楼梯井; 烟囱效应; 控烟效果; 竖向温度分布; 中性面

中图分类号: TU834.27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.10.008

Control effect of smoke in different opening situations in a high-building stairwell

XU Xiaoyuan, LI Yuanzhou, XU Zhaoyu, LI Zheng

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

Abstract: Experiments were carried out in a one-third scale model of a twelve-storey stairwell in order to investigate the control effect of smoke spreading in the stairwell under different opening conditions. The fire source was located on the 6th floor. The smoke temperature distribution along the stairwell, the inflow or outflow velocity at the openings and the rising-time of smoke front under different opening conditions were discussed. The results show that the smoke temperature takes on an exponential decay along the vertical direction when the smoke reaches a certain height, and that the neutral plane height varies under various opening conditions. In general, when vents are opened on floors near the fire, smoke temperature decreases faster, the smoke spreads more slowly, and the effect of smoke control is better.

Key words: stairwell; stack effect; smoke control effect; vertical temperature distribution; neutral plane

0 引言

高层建筑内大都设置有多个竖向通道,如楼梯井、电梯井、管道井、电缆井等,火灾情况下,一旦烟气进入这些通道,烟气便会在烟囱效应^[1-2]的作用下迅速向上蔓延.火灾中,有毒烟气的吸入是造成人员

伤亡的主要原因^[3].而火灾情况下楼梯井是人员最主要的疏散通道,一旦楼梯井进烟,不仅会造成烟气的快速蔓延,更重要的是对人员安全造成严重威胁.所以,深入开展火灾情况下高层建筑楼梯井内烟气的运动规律研究,对保护人员的安全及控制火灾的蔓延有着重要的意义.

前人针对竖向通道内火灾烟气流动开展了很多研究工作. Cooper^[4], Chow^[5], 张靖岩^[6-8] 等在前人研究的基础上, 深入系统地研究了竖井烟气运动模型, 对有烟囱效应存在的开放竖井内的中性面模型以及羽流前锋上升时间做了较系统的理论推导和实验验证. 但楼梯井内烟气的运动形式要比竖井内复杂得多, 由于踏步对烟气的阻挡作用, 使烟气以一种类似螺旋曲线的形式上升^[9]. Marshall^[10], Peppes^[11-12], Qin^[13] 等针对楼层较低的楼梯井, 开展了一些实验和数值模拟研究, 阐述了火源功率、楼梯井高度等因素对烟气在楼梯井中流动的影响, 研究了楼梯井内浮力驱动下的烟气流动特性及温度、压力等参数的分布规律.

但是, 对楼梯井自然排烟时, 不同开口方式对烟气的控制效果的研究却鲜有报道. 本文将在 1/3 缩尺寸的高层建筑楼梯井内开展火灾实验, 通过对楼梯井内烟气温度、开口处的进出风速度等参数的测量来研究不同开口方式下的烟囱效应、中性面位置, 及烟气前锋上升时间, 以探索楼梯井的最佳开口方式, 以便能更好地控制楼梯井内的烟气, 保护疏散人员的安全, 为工程实际提供参考.

1 实验设计及相似性分析

1.1 实验设计

实验在 1/3 缩尺寸的高层建筑楼梯井实验台内进行, 如图 1 所示. 实验台总高 12.2 m, 共 12 层, 第一层高 1.2 m, 其余 11 层均为 1 m. 图 2 为实验台平面结构图, 每层均由房间、前室和楼梯间三个部分构成, 其平面尺寸分别为 0.8 m×0.8 m, 0.8 m×0.8 m, 1.0 m×1.5 m, 各部分之间均有门相连, 所有门均可自由开启和关闭. 楼梯井左侧每层均设有一开口, 其尺寸为 0.3 m(宽)×0.2 m(高), 可单独启闭.

火源为松木木垛火, 木垛尺寸为 20 cm×20 cm×10 cm, 每层设置 10 个木棒, 木棒尺寸为 20 cm×1 cm×1 cm, 火源位于六层的房间内. 稳定火源功率



图 1 楼梯井实验台

Fig. 1 Photograph of experimental scale stairwell

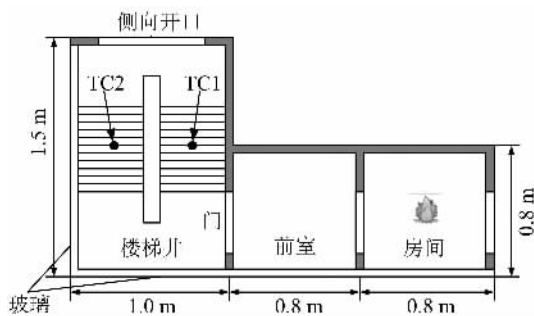


图 2 楼梯井平面结构示意图

Fig. 2 Planar layout of the scale model

为 6.3 kW. 一层楼梯间门作为疏散楼梯口, 在各个工况下均为开启状态. 楼梯井每奇数层开口中心处布置有测量气流速度的 KA12 型四通道风速仪, 测量精度可达到 0.01 m/s. 楼梯井内布置有两串热电偶(TC1, TC2), 分别位于两组楼梯踏步的竖直中心线上, 水平位置如图 2 中所示, 每串热电偶包含 24 个测点, 每段踏步上下均设有一根热电偶. 表 1 列出了本文的实验工况. 实验中为了方便, Test1, Test2

表 1 实验工况表

Tab. 1 List of experimental conditions

序号	火源位置	排烟口开启状态	风速测点
Test1	六层房间中心	均匀开口(1,3,5,7,9,11层开)	1,3,5,7,9,11层排烟口中心处
Test2	六层房间中心	着火层上部楼层开口(7,9,11层开)	1,7,9,11层开口中心处
Test3	六层房间中心	着火层上两层开口(7,8开)	1,7,8层开口中心处
Test4	六层房间中心	着火层上两层及下一层开口(7,8,5层开)	1,7,8,5层开口中心处
Test5	六层房间中心	顶层开口(12层开)	1,12层开口中心处

时每奇数层开口. 本次研究主要考虑烟气进入楼梯井后的基本蔓延运动规律, 没有考虑环境的影响, 因此实验没有考虑外界风的影响. 所以, 本文结论适合于建筑外界风很小的情况.

1.2 相似性分析

前人研究表明, 流体在模型中的流动过程与原型中的流动情况具有相似性, 必须要求两者的流体力学相似. 一般来说, 包括几何相似、运动相似、力相似和热相似, 并且要满足初始条件和边界条件的相同^[14].

用于火灾中的尺度模拟技术主要有三类: 弗诺德模型 (Froude modeling)、压力模型 (pressure modeling) 以及类比模型 (analogy modeling)^[15-16].

不同的研究目的采用的相似模型不同. 压力模型用于模拟可燃物的燃烧情景, 模型实验设计在加压容器中进行. 而弗诺德模型用于模拟火烟羽流的流动与传热问题, 模型实验在常压下进行. 类比模型中的盐水模拟实验技术是一项研究火灾烟气流动特性的新方法.

采用弗洛德模拟时, 不能同时保证模拟实验和现场实验中的雷诺数相等. 因此应当适当选择模型的尺寸以保证烟气流动达到充分发展状态以减小这种影响. 通常情况下, 我们主要关心模型实验中局部的烟气运动特征, 因此只需要保证这些局部区域中的流动达到充分发展. 研究表明, 小尺寸模型中各方向上的尺度不小于 0.3 m 即可保证流动达到充分发展的湍流流动. 这样在模拟烟气运动时, 只需要考虑弗洛德相似, 将弗洛德数作为设计模型实验时的相似判据.

弗洛德模拟中, 模拟实验与现场实验中相关参数之间具有如下关系 (M 是 model scale 的缩写, F 是 full scale 的缩写):

温度:

$$T_M = T_F \quad (1)$$

几何尺寸:

$$x_M = x_F \left(\frac{l_M}{l_F} \right) \quad (2)$$

压力:

$$\Delta P_M = \Delta P_F \left(\frac{l_M}{l_F} \right) \quad (3)$$

速度:

$$v_M = v_F \left(\frac{l_M}{l_F} \right)^{1/2} \quad (4)$$

体积流率:

$$V_{\text{fan},M} = V_{\text{fan},F} \left(\frac{l_M}{l_F} \right)^{5/2} \quad (5)$$

时间:

$$t_M = t_F \left(\frac{l_M}{l_F} \right)^{1/2} \quad (6)$$

对流传热:

$$Q_{c,M} = Q_{c,F} \left(\frac{l_M}{l_F} \right)^{5/2} \quad (7)$$

2 实验结果与讨论

2.1 不同开口方式对楼梯井内烟气流动的影响

各工况下楼梯井进出口处气流速度随时间的变化曲线见图 3. 分析曲线可知, Test1, Test2 和 Test5 时, 风速值变化较快, 上升迅速, 而另外两种工况时则要缓慢很多. 这是因为楼梯井在此三种开口形式下形成了烟囱效应, 导致气体流动加快. 楼梯井各楼层开口处在各工况下的气流方向及速度大小见表 2, 其中速度值为风速达到稳定阶段的平均值. 各工况下烟气和空气流动示意图见图 4.

分析表 2 中气流方向及图 4 可知, Test1 和 Test2 时楼梯井内的中性面位于七层与九层之间, 而 Test3 和 Test4 时, 楼梯井内的中性面位于五层与七层之间, Test5 时由于风速测点少暂无法确定中性面的位置. 由此可见, 不同开口方式可引起楼梯井内的中性面位置的变化, 当均匀开口和着火层上部楼层开口时中性面位置较高, 则烟气容易上升到高部楼层, 造成烟气的迅速蔓延. 由表 2 可知, 顶层开口时, 12 层开口处烟气流动速度最大, 说明此时形成了明显的烟囱效应. 综上所述, 当均匀开口、着火层上部楼层开口和顶层开口时烟囱效应强, 致使烟气蔓延至八层以上楼层, 而另外两种工况时大量烟气由七、八层开口排出, 极少烟气蔓延到八层以上楼层.

2.2 不同开口方式对楼梯井内烟气温度竖向分布的影响

将温度测点分成踏步上方和踏步下方两类来处理, 因此可将两串热电偶数据处理成四条温升一时间曲线. 取各温度测点的平稳段, 取平均值并求出温升值, 可得不同工况下楼梯井内烟气温度竖向分布, 如图 5. 分析图 5 可知, 各工况时着火层以下各测点的温度几乎没有变化, 说明烟气基本没有影响到着火层以下楼层. 各工况时七层测点温度最高, 八层及以上楼层温度成衰减趋势. 这是由于楼梯井内存在大量踏步, 踏步热传导带走一部分热量, 且烟气在楼

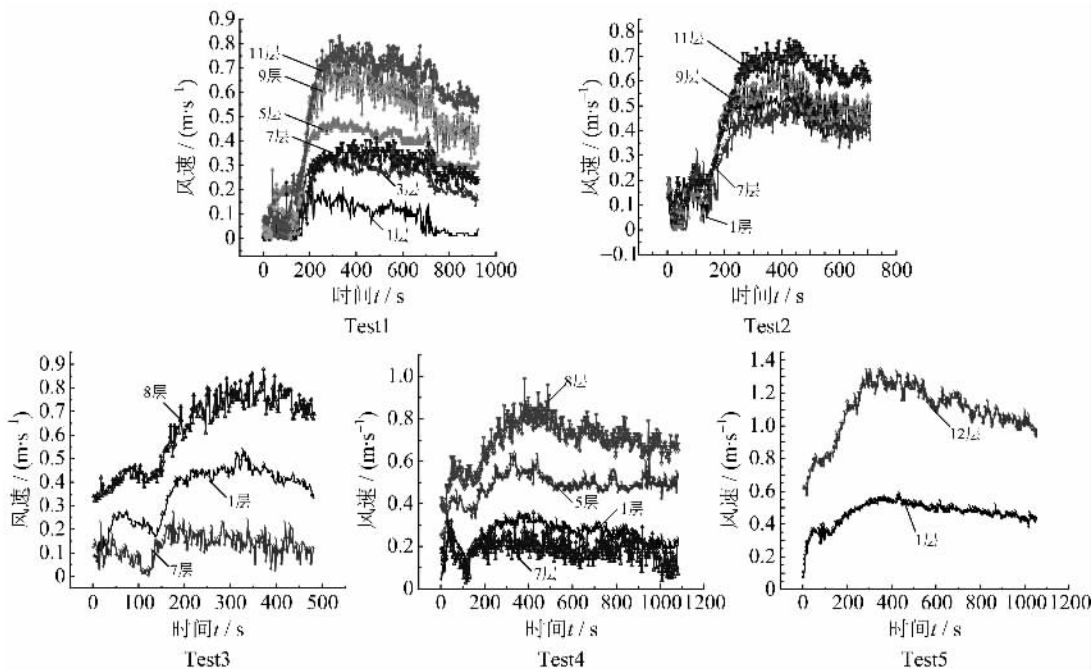


图 3 不同工况下楼梯井各开口中心处风速随时间变化曲线

Fig. 3 Velocity at the openings of the stairwell in different cases

表 2 不同工况下楼梯井各楼层排烟口中心处气流速度及方向

Tab. 2 Velocity and direction at the openings of the stairwell in different cases

工况	1层		3层		5层		7层		9层/8层		11层/12层	
	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向	气流速度 /(m·s ⁻¹)	方向
Test1	0.120 2	进	0.284 5	进	0.432 5	进	0.346 9	进	0.628 9	出	0.728 6	出
Test2	0.497 1	进					0.465 5	进	0.565 7	出	0.692 8	出
Test3	0.448 5	进					0.151 0	出	8层 0.740 3	出		
Test4	0.287 2	进			0.501 9	进	0.186 8	出	8层 0.758 3	出		
Test5	0.519 2	进									12层 1.223 9	出

梯井内的螺旋上升^[11,17]形式增强了烟气羽流对周围空气的卷吸,两者共同作用使楼梯井内温度随高度快速衰减.六层附近的 5.6 m,5.75 m,6.05 m 各测点有一定温升,但温升较小.这是因为,5.75 m,6.05 m 测点位于远离房间的踏步附近,而 5.6 m 测点虽然位于靠近着火房间的踏步下方,但其高度比着火房间的门口低,烟气进入楼梯井时,形成溢流,没有直接通过这些测点.导致这三个测点升温的原因是烟气遇到踏步后沉降接触到这些测点,所以六层各点的温度较低.

由图 5 可知,Test3 和 Test4 时,七、八层温度很高,但九层以上温度迅速衰减,十一、十二层测点

的温度几乎没有增长,接近常温.这是由于大量烟气通过七、八层开口流出,带走绝大部分热量. Test1, Test2 及 Test5 时,虽然七、八层温升较另外两种工况偏低,但九层以上楼层温升较大,甚至顶层温升都达到 5℃左右.这是因为 Test1, Test2, Test5 时造成了非常强的烟囱效应,使得整个楼梯井全部充满烟气.

将各测点温升与环境温度之比定义为无量纲温升,测点高度与楼梯井高度之比作为无量纲高度.图 6 为各工况下楼梯井内烟气无量纲温升的竖向分布规律.由图 6 可知,最高温升并不在离火源最近的测点,而是其上的测点,说明有空气从楼梯井下部流

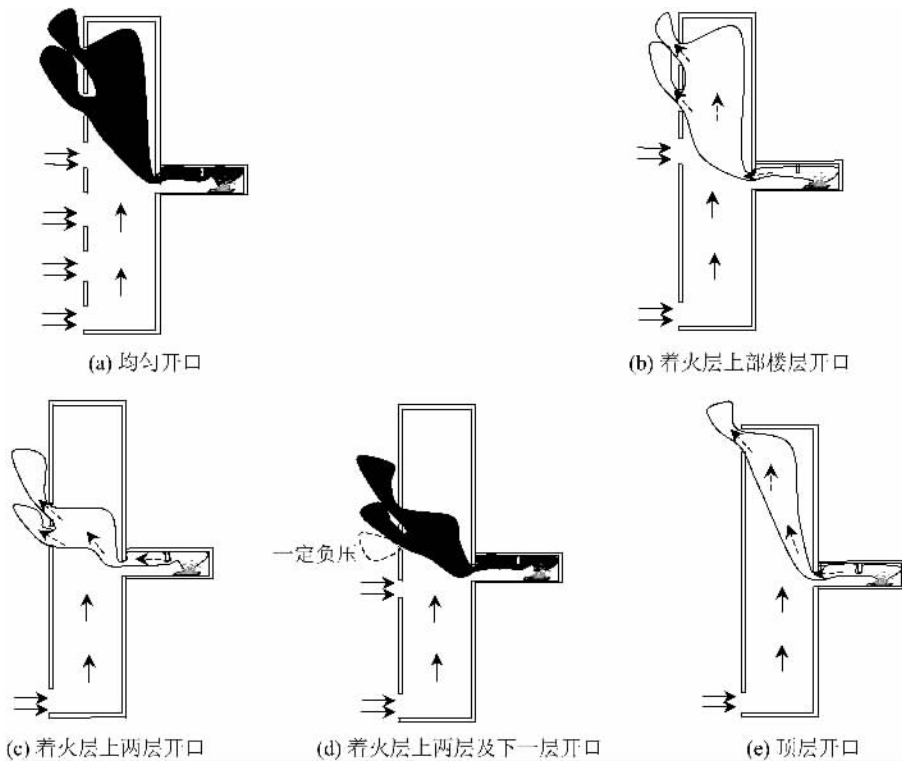


图 4 各工况下烟气和空气流动示意图

Fig. 4 smoke and air flow in the stairwell in different cases

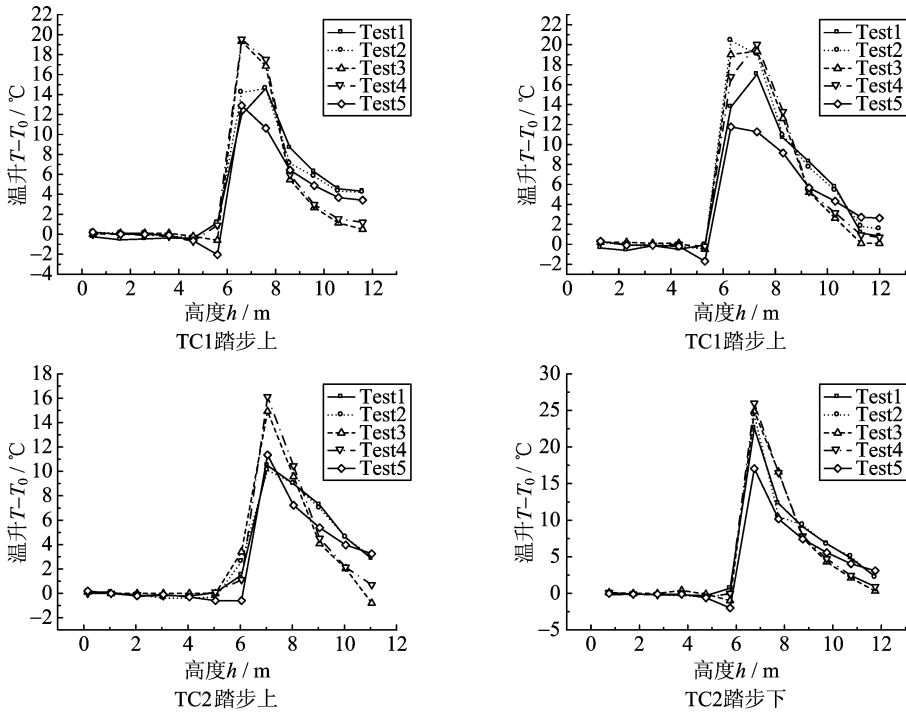


图 5 不同工况下楼梯井内烟气温度升竖向分布的对比

Fig. 5 Vertical temperature distribution in the stairwell in different cases

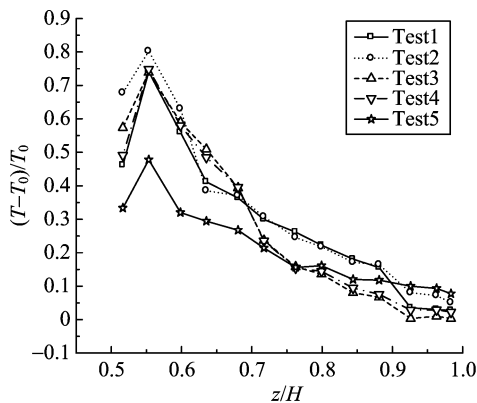


图 6 楼梯井内着火层以上无量纲温升竖向分布曲线
Fig. 6 Non-dimensional vertical temperature distribution in the stairwell in different cases

入,冷却了下部的烟气.根据烟气温度在竖井内的衰减规律^[11],将各工况下温升-高度曲线进行指数拟合,见图 7.因为当均匀开口、着火层上部楼层开口时,烟气在进入楼梯井后受开口影响均匀,而顶层开口时,烟气进入楼梯井蔓延至顶层过程中基本不受开口的影响;所以此三种工况自最高温对应的测点开始满足指数分布.另外两种工况时,烟气蔓延到七、八层时受开口影响极大,所以自八层开口以上第一个点开始呈指数衰减.分析各指数曲线可知,均匀开口、着火层上部楼层开口情况下无量纲温升随无量纲高度变化趋势接近,且衰减慢;当着火层邻近层开口时,曲线变化趋势接近且衰减很快;而顶层开口时,烟气温度衰减较慢.这说明着火层邻近层开口时,具有很好的控烟效果.

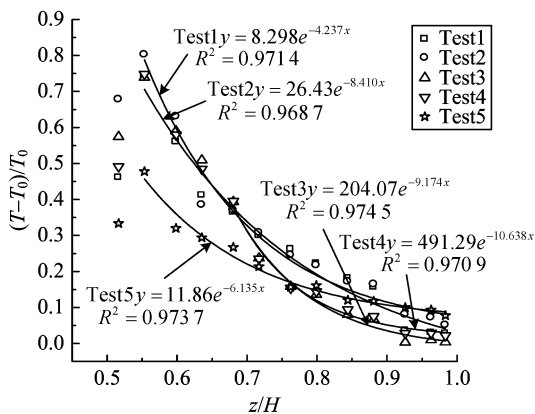


图 7 楼梯井内着火层以上无量纲温升
竖向分布指数拟合曲线

Fig. 7 Exponential fitting of the non-dimensional vertical temperature distribution in the stairwell in different cases

2.3 不同开口方式对烟气在楼梯井内蔓延速度的影响

本文采用烟气温度突变法^[17]来判断烟气前锋的运动位置.由于受火源、楼梯井结构和进风口的影响,离火源较近的热电偶测点气流环境复杂,所以分析烟气前锋位置时,不考虑 7.75 m 以下的热电偶.分析烟气前锋的上升时间时,高度为 6.3 m 的热电偶(TC1.12)反应最早,为了排除系统误差,将烟气到达该点的时间作为基准点来分析烟气前锋的上升时间.

图 8 为不同工况下烟气前锋位置与时间的曲线.从图中可看出,Test5 时,烟气上升最快,前锋位置-时间曲线近似为线性. Test1 和 Test2 时的前锋位置-时间曲线上升趋势相似,也近似为线性,但比顶层开口情况时上升速度慢.对于 Test3 和 Test4 两种工况曲线上升趋势类似,烟气在达到九层以后上升速度很慢,其中 Test4 烟气上升速度最慢.且此两种工况时,烟气未到达顶层,说明烟气蔓延范围较小.这是由于七、八层开口带走相当多的热量,使得烟气浮力变小,从而烟气上升的动力减小. Test4 比 Test3 控烟效果更好,这是因为,外部的空气由五层开口流入,烟气由七层开口流出,由于五层开口离七层开口较近,使得七层开口外部下方产生一定负压,所以加快了烟气的排出.烟气在此工况时的气流运动见示意图 4(d).

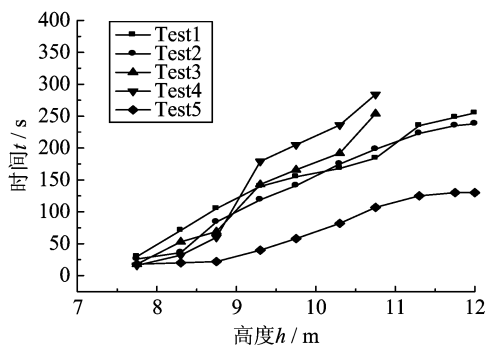


图 8 不同工况下烟气前锋位置与时间的关系
Fig. 8 Rising-time of smoke front in different cases

3 结论

通过在 1/3 缩尺寸楼梯井实验台内开展火灾实验,对楼梯井内烟气温度竖向分布、进风口速度以及烟气前锋上升时间进行了分析.结果表明:

(I) 当楼梯井均匀开口和着火层上部楼层开口时,中性面位置较高;当着火层邻近层开口时,中

性面位置较低;顶层开口时,形成了明显的烟囱效应. 总体而言,顶层开口时,烟气控制效果最差,着火层上下层均开口时,烟气控制效果最好.

(II) 各工况下,烟气到达一定高度后,烟气温度随高度呈指数衰减.

(III) 在实际火灾中,楼梯井自然排烟时,一旦烟气进入楼梯井,首先开启着火层的上两层及下层开口,可有效排出烟气,并防止烟气向上部蔓延.

参考文献(References)

- [1] 霍然,胡源,李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
- [2] Klote J H. A general routine of analysis of stack effect [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1991.
- [3] Hietaniemi J, Kallonen R, Mikkola E. Burning characteristics of selected substances: Production of heat, smoke and chemical species [J]. *Fire and Materials*, 1999, 23(4): 171-185.
- [4] Cooper L Y. Simulating smoke movement through long vertical shafts in zone-type compartment fire models [J]. *Fire Safety Journal*, 1998 31(2): 85-99.
- [5] Chow W K, Fong N K. The PolyU/USTC atrium: A full-scale burning facility for atrium fire studies[C]// Chow W K. Proceedings of the First International Symposium on Engineering Performance-Based Fire Codes. Hong Kong: The HongKong Polytechnic University, 1998.
- [6] Zhang J Y, Lu W Z, Huo R, et al. A new model for determining neutral-plane location in shaft space of a building under fire situation [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(6): 1 101-1 108.
- [7] Zhang Jingyan, Huo Ran, Wang Haobo, et al. Experimental study on the generation mechanism of stack effect[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(1): 73-76.
- 张靖岩,霍然,王浩波,等. 烟囱效应形成机理的实验[J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(1): 73-76.
- [8] Zhang Jingyan, Li Yuanzhou, Huo Ran, et al. Experimental study on the rising-time of fire plume fronts in the vertical shaft [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(2): 111-114.
- 张靖岩,李元洲,霍然,等. 竖井中羽流前锋上升时间的实验研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(2): 111-114.
- [9] Sun X Q, Hu L H, Li Y Z, et al. Studies on smoke movement in stairwell induced by an adjacent compartment fire[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(13): 2 757-2 765.
- [10] Marshall N R. The behavior of hot gases flowing within staircase[J]. *Fire Safety Journal*, 1985, 9(3): 245-255.
- [11] Peppes A A, Santamouris M, Asimakopoulos D N. Buoyancy-driven flow through a stairwell[J]. *Building and Environment*, 2001, 36(2): 167-180.
- [12] Peppes A A, Santamouris M, Asimakopoulos D N. Experimental and numerical study of buoyancy-driven stairwell flow in a three storey building[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(5): 497-506.
- [13] Qin T X, Guo Y C, Chan C K, et al. Numerical simulation of fire-induced flow through a stairwell[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(2): 183-194.
- [14] 庄礼贤,尹协远,马晖扬. 高等流体力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1997.
- [15] Quintiere J G. Scaling applications of fire research [J]. *Fire Safety Journal*, 1989, 15: 3-29.
- [16] Heskestad G. Physical modeling of fire[J]. *Journal of Fire and Flammability*, 1975, 6: 253-273.
- [17] 许兆宇,李元洲,孙晓乾,等. 开口位置对楼梯井内烟气运动影响的研究[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(2): 156-161.