

含吹拔空间的高层建筑火灾烟气流动数值模拟

朱国庆^{1,2}, 程远平^{1,2}, 顾正洪^{1,2}, 季经纬^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏徐州 221008)

摘要:研究设有吹拔空间的高层建筑烟气流动及火灾蔓延特征,分析其对防火分区和安全疏散的影响。采用性能化消防设计的方法对某设有74.65 m、55.95 m双吹拔空间的一类高层建筑建立火灾发展模型、设计火灾场景、用CFD火灾模拟软件进行数值模拟。结果表明该建筑利用吹拔空间自然排烟时各火灾场景均能满足各层人员疏散的性能指标,在吹拔空间四周环廊上设置挡烟垂壁影响烟气的顺畅排出,缩短了危险来临时间,增大了火灾的危害性。提出吹拔空间式建筑宜利用烟囱效应优先采用自然排烟方式,烟气控制宜疏堵结合,以疏导为主的设计理念。

关键词:吹拔空间;高层建筑;自然排烟;性能化防火设计;数值模拟

中图分类号:TU998.1;X932 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)01-0095-06

Numerical Simulation for Fire Smoke Flow in a High-rise Building with Patio Space

ZHU Guo-qing^{1,2}, CHENG Yuan-ping^{1,2}, GU Zheng-hong^{1,2}, JI Jing-wei^{1,2}

(School of Mining and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Characteristics of smoke flow and fire spread in a patio space of a high-rise building were studied to investigate their influences on fire compartment and safety evacuation. Fire development model was established and fire scenarios were designed to simulate fire and smoke spread by CFD software numerically based on concepts of fire performance-based design in a high-rise building with double patio space, whose height are 74.65 m and 55.95 m, respectively. Simulation results show that in all fire scenarios, performance targets for safety evacuation for people in each floor was satisfied, if smoke was extracted naturally using the patio space. Hang walls mounted in corridors around the patio space prevent smoke flowing out smoothly, shorten the coming of the risk time and increase fire danger. Using chimney effect, it is preferred to adopt natural smoke exhaust method in a high-rise building with patio space.

Keywords: patio space; high-rise building; natural smoke exhaust; performance-based fire safety design; numerical simulation

“以人为本,贴近自然”的设计理念使得内天井式建筑受到设计师和广大用户的喜爱,这种内天井又被建筑师美其名曰“吹拔空间”。贯通各层的吹拔空间改善了高层建筑内部的通风及采光条件,起到了环保、节能、愉悦身心、增进交流的作用,但给防火安全带来许多新的问题,成为建筑师取舍两难的心痛。按照现行防火规范各层应为单独防火分区,需要设置大量防火

卷帘^[1]。这不仅造价高昂,而且破坏了良好的创意和优美的效果;不设计防火卷帘又难以满足防火分区的有关要求,不能通过消防审核。

随着火灾科学和计算机硬件技术的飞速发展,用计算机模拟大空间建筑的火灾发展和烟气流动情况成为当前消防技术领域的前沿研究方向,性能化防火设计(performance-based fire safety design)就是基于火灾模拟而发展起来的一种不同于基于传统方式规范的防火

* 收稿日期:2007-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50406026)

作者简介:朱国庆(1968-),男,江苏徐州人,副教授、高级工程师,博士生,主要从事火灾科学和建筑性能化防火设计的研究,(E-mail)zqg119xz@126.com。

设计方法^[1]。它以火灾模拟结果和建筑物的实际性能需要为基础,更人性化、科学化地选取防火技术手段,使火灾安全目标、火灾损失目标与设计目标良好结合,实现火灾防治的科学性、有效性与经济性的统一^[3],以获得可以接受的、等效的消防安全水平。在建筑不能满足现有处方式防火规范、又要体现设计创意的情况下,性能化设计的方法提供了一个可选的良好解决问题途径。本文采用性能化防火分析的方法,对某时代广场(设有双吹拔空间的一类高层综合楼)建立火灾模型和性能评价标准,用FDS火灾模拟软件进行数值模拟,分析自然排烟状态下火灾烟气对防火分区和安全疏散的影响。

1 某时代广场基本情况及消防设计问题

某时代广场总建筑面积为70 372 m²,为钢筋混凝土框架剪力墙结构,地上19层,地下1层。地上1~4层为商业,5~19层为住宅(或公寓式办公,层高4.8 m)。在5~19层住宅部分中心沿南北方向并列布置2个高度分别为74.65 m、55.95 m的吹拔空间,自4层屋面分别通至19层和16层,吹拔空间无顶盖。围绕2个通天的吹拔空间,四周各层布置了12~38间不等的一室一厅一厨一卫的住宅,每户使用面积平均约40 m²。建筑高度98.83 m,为一类高层民用建筑,耐火等级为一级。5~12层平面和剖面如图1、图2所示。

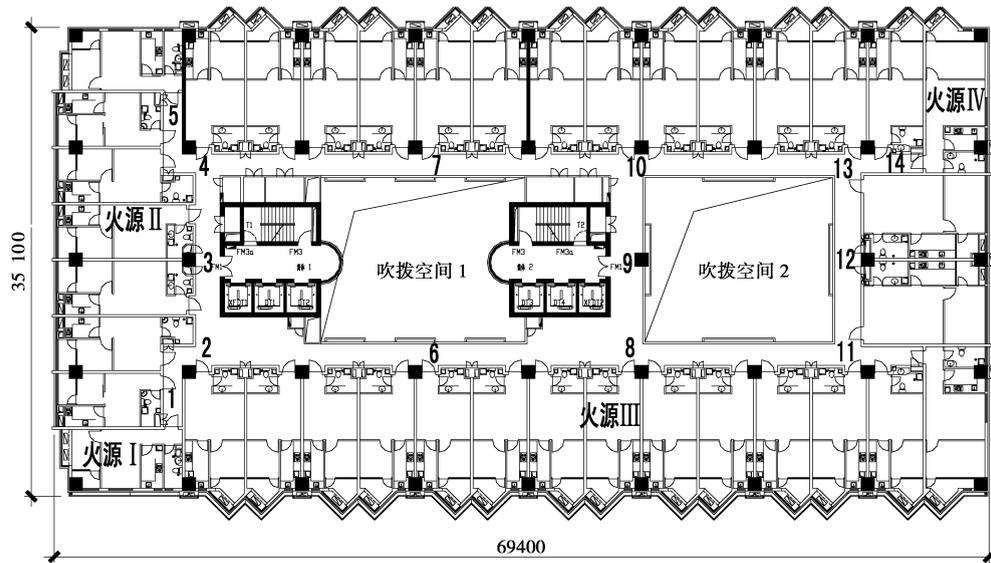


图1 5~12层平面图

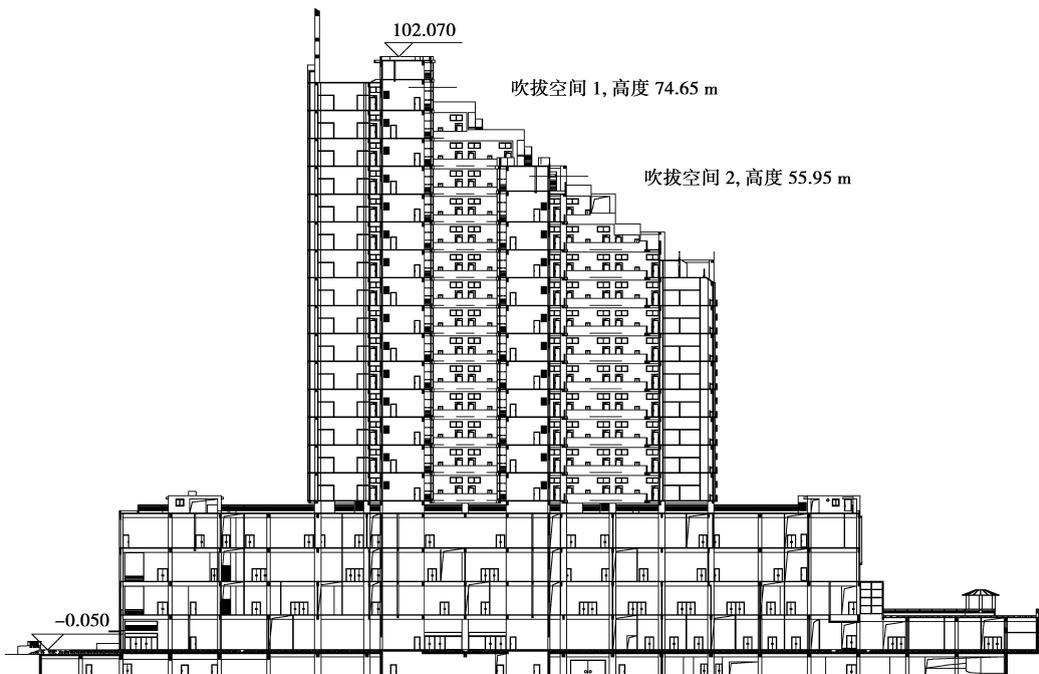


图2 剖面图

本工程 5~19 层设计方案新颖而富有创意,改变了传统综合楼的设计风格,给该楼带来了四射的活力和良好的室内环境。但贯通 5~19 层和 5~15 层的吹拔空间,同时也给消防设计带来严峻的挑战。

2 个通天的吹拔空间,将 5~19 层 24,205 m² 的住宅区域上下连通,形成 2 个竖向的整体空间,给火灾

时人员的安全疏散、烟气的蔓延流动、火灾的竖向发展等方面带来许多未知的因素。采用什么样的消防设计方案才能既能获得可接受的消防安全水平,又能节约投资和管理维护费用,成为需要认真探讨和研究的技术问题。5~19 层吹拔空间消防设计的问题经分析汇总于表 1。

表 1 5~19 层住宅部分吹拔空间消防设计问题分析

消防系统	设计状况	消防问题分析	消防规范要求
防火分区	2 个吹拔空间将 5~19 层住宅部分各层上下贯通	在吹拔空间开口部位无防止烟火在层间扩散的措施,上下各层建筑面积之和超过一个防火分区的最大允许建筑面积	《高规》 ^[1] 5.1.4:高层建筑内设有上下层相连通的开口部位时,应按上下连通层作为一个防火分区,其允许最大建筑面积之和不应超过 1 000 m ²
安全疏散	各层疏散走道与 5~19 层住宅部分吹拔空间处于同一个建筑空间	一旦某层发生火灾,各层疏散走道均受到烟火威胁,设计中走廊无机机械排烟设施	《高规》8.4.1:一类高层建筑中虽有直接自然通风,但长度超过 60 m 的内走道应设置机械排烟设施
自动喷水灭火设施	5~19 层公共部位及房间内无自动喷水灭火系统	初期火灾不能得到及时有效控制	《高规》7.6.2:一类高层建筑及其裙房,均应设自动喷水灭火系统。
防烟排烟	利用 2 个通天的吹拔空间自然排烟,走廊与吹拔空间之间无防烟分区	烟气在吹拔空间中上升时有烟囱效应和层化现象,自然排烟的效果不确定,设计无机机械排烟系统	《高规》8.4.1:一类高层建筑中净空高度超过 12 m 的中庭应设置机械排烟设施
火灾自动报警设施	吹拔空间周边各层走廊内设有烟感探测器、手动报警按钮和消防广播	各住宅户内无火灾探测器,不利于火灾的及早发现和通报火灾	《高规》9.4.2:除住宅、商住楼的住宅部分、游泳池、溜冰场外,一类高层建筑应设置火灾自动报警系统

针对上述问题,将采取性能化消防设计的方法模拟 5~19 层火灾发展蔓延和烟气流动情况,根据模拟结果的分析而确定相应的消防措施。

2 设计火灾和火灾场景

实验和研究发现,火灾的热释放速率是随时间而变化的^[4]。大量实验表明,许多物品从起火到旺盛阶段,热释放速率大体按时间的指数规律增长,逐渐发展成为全室性的较大规模的火灾,又称时间平方火^[5]。即:

$$\bar{Q} = \alpha t^2 \quad (1)$$

式中: \bar{Q} 为火源热释放速率,kW; α 为火灾增长指数,kW/s², $\alpha = \bar{Q}_0/t_0^2$,kW/s²;t 为火灾发展时间,s;t₀ 为火源热释放速率 $\bar{Q}_0 = 1\text{MW}$ 时所需要的时间,s。

不同的可燃物火灾增长指数不同,根据 α 的不同可将火灾发展分为:超快速增长、快速增长、中速增长和慢速增长四个类型^[6]。依照 NFPA92B《购物商场、大厅和较大区域烟气控制系统导则》,这四类火灾的增长指数分别为:0.187 6 kW/s²、0.046 9 kW/s²、0.011 7 kW/s² 和 0.002 9 kW/s²。

由于 5~19 层各房间的可燃物品种和数量大体一

致,典型可燃物质为住宅内的家具及装修材料(按照木材类和塑料类各 50%),参考文献^[6]将 5~19 层住宅部分的火灾初期的增长阶段定义为中速发展火,其火灾增长曲线的函数可表述为:

$$\bar{Q} = 0.011 7 t^2 \quad (2)$$

确定火灾受控时最大热释放速率应综合考虑建筑的消防设施水平、消防队控制火灾的能力、建筑内火灾荷载的布置及种类、建筑的空间大小以及比较成熟的统计资料、试验结果等。本建筑 5~19 层没有设计自动喷水灭火系统,火灾最大规模的确定主要考虑公安消防队的控火能力和有关火灾的统计资料。

2.1 受消防队控制的火灾规模

由于吹拔空间及其周边不设置自动喷水灭火系统,保守地认为火灾在初期没有得到有效控制,直至消防队接警后赶到才有效控制火灾的继续增长。最近的消防站与该工程相距不足 1.5 km,且道路宽阔平坦,消防车行驶速度按 30 km/h 计^[7],途中时间需 3 min。起火后 4 min 消防队接到报警,消防队接警后 1 min 出动^[8],到现场后 2 min 内展开灭火战斗行动,并控制火势继续发展。此时火灾有效燃烧时间为 10 min,火

灾规模增长到:

$$\begin{aligned}\bar{Q} &= 0.0117t^2 = 0.0117 \times (10 \times 60)^2 \\ &= 4\ 212\ \text{kW}\end{aligned}\quad (3)$$

2.2 根据统计资料确定火灾规模

文献[6]第 4.2 节“火灾模型的确定和排烟量”中给出了各类场所的火灾模型,其中无喷淋的中庭推荐值为 4 000 kW。

德国工业火灾防护标准 DIN18232 中有关火灾发展时间、发展快慢、火灾的组别分类、不同火灾组别对应的最大热释放速率,对应的由消防队控制的中速发展火最大热释放速率建议值为 6 000 kW。

综合考虑上述(1)、(2),将该吹拔空间的火灾设计为最大热释放速率为 6 000 kW 的中速发展火,并以此进行火灾模拟的计算。保守地认为,此时消防队仅仅控制住火灾不再增长但没有消灭它,火灾维持这时的规模直到模拟结束时为止。

火源位置设计基于最不利和代表性原则,选择了位于吹拔空间底部的 5 层和中部的 10 层的 I ~ IV 号位置,数据采集点设计在各个楼层环廊地面上方 2 m,并考虑了其代表性,具体位置如图 1 所示。

为了考察挡烟垂壁的作用,还设计了一个在各层环廊面向吹拔空间侧增加 0.7 m 高挡烟垂壁的场景。鉴于建筑南高北低的特殊剖面形式,火灾场景设计时考虑火灾时正好遇上 2.9 m/s 北风的情况。在本案例中共设计了 15 个火灾场景。

3 数值模拟和结果分析

FDS(Fire Dynamics Simulator)是由 NIST(National Institute of Standards and Technology,美国商务部标准和技术研究院)开发的计算机模拟软件。它是一种以火灾中流体运动为主要模拟对象的计算流体动力学(CFD)模型,适用于因火灾引起的烟雾和热传输规律的研究。FDS的基本原理是将模拟空间划分成许多微元控制体,以微元控制体为基本单位,假设每个微元控制体内各种物理量(温度、压力、速度、密度等)的值是同一的,它们只随时间而变化。模拟计算的精度主要与微元控制体的数量有关,而微元控制体的数量又主要受计算机能力的限制。与其他场模拟软件一样,FDS也是以 N-S 偏微分方程为基础进行数值求解,给出较详细的各种物理量(温度、压力、速度、密度、热释放速率、烟雾组分等)的分布。其控制方程为^[9]:

$$\text{质量守恒: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\text{组分守恒: } \frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho D \nabla$$

$$Y_i + \bar{m}_i^m \quad (5)$$

$$\begin{aligned}\text{动量守恒: } \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H &= \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \\ & \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij})\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\text{速度场方程: } \nabla \cdot \mathbf{u} &= \frac{\gamma - 1}{\gamma P_0} (\bar{q} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla K \nabla T + \\ & \nabla \cdot \sum_i c_{pi} T_i \rho D \nabla Y_i - \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dP_0}{dt})\end{aligned}\quad (7)$$

$$\text{状态方程: } P_0(t) = \rho TR \sum_i Y_i / M_i \quad (8)$$

式中各项含义参见文献[9]。

3.1 性能目标和性能指标

性能目标也就是防火保护的目。对于吹拔空间及其周边的各房间来说,其消防设计所要达到的目标应该是保护建筑内的使用人员及火灾期间进行灭火战斗的消防队员的生命安全。可以把这一目标量化为以下性能指标^[10-11]:

1) 距各层疏散走道地面高度 2 m 以下的烟气层(空气层)温度不应超过 60 °C;

2) 距各层疏散走道地面高度 2 m 以下的烟气层(空气层)能见度不小于 5.0 m;

3) 距各层疏散走道地面高度 2 m 以下的烟气层(空气层)中 CO 体积分数不大于 500 ppm;

4) 走廊上部热烟气层的最高温度不超过 180 °C。

以上技术指标是经大量实验验证的在一般情况下人能够较长时间正常活动的临界值。

3.2 疏散需要时间的计算

疏散计算方法主要有水力模型和人员行为模型两种方法。对于建筑结构简单、布局规则、疏散路径容易辨别、建筑功能较为单一且人员密度较大的场所,宜采用水力模型来进行人员疏散的计算。本文在疏散计算时采用水力模型方法,计算结果如表 2 所示。

表 2 疏散需要时间(RSET)

疏散过程分项	2 个出口有效时	
	着火层 1 个出口失效时需要的疏散时间(RSET ₁)/s	着火层及非着火层需要的疏散时间(RSET ₂)/s
探测报警	60	60
人员响应	120	120
最远工作点人员离开房间	13	13
距安全出口最近房间人员到达安全出口	17.4	17.4
楼层全部人员通过安全出口	104.3	52.2
疏散行动时间	134.7	69.6
合计	383	304

3.3 计算条件

模拟计算采用以下初始条件:

- 1)气象条件:室外夏季温度为 35 °C,冬季温度为 -5 °C,建筑室内温度设为 20 °C,空气流速为 0 m/s;
- 2)无外部风(增加北风火灾场景除外),通风气流与烟气均视为理想气体;
- 3)起火房间面向走廊的房门开启,洞口尺寸 1 m × 2 m,外窗关闭并在火灾温度达到 250 °C 时玻璃破碎打开,开口面积 12.25 m² (3.5 m × 3.5 m),其它各房间门、窗均保持关闭状态;
- 4)火灾初期发展规律用 t² 中速增长火表示,火灾在消防队到达并投入灭火战斗行动后,火源热释放速率便不再增长,但也不减弱熄灭,即最大热释放速率保持 6 MW;
- 5)燃烧物质为住宅建筑内典型材料的混合物,假定燃烧物质为 50% 的纤维材料(木材、纸张、棉织品等)和 50% 的合成材料(塑料、橡胶、聚氨酯泡沫等);
- 6)火灾模拟时间为 1 200 s;

3.4 模拟结果分析

1)图 3 为 5 层火源 I 场景下烟气在吹拔空间内蔓延情况。可以看出吹拔空间烟囱效应显著,烟气窜出起火房间后向最近的吹拔空间流动,流入吹拔空间的烟气向上迅速窜升的同时在水平方向填充吹拔空间周围各楼层环廊,但远离起火房间的吹拔空间几乎不受烟气影响。

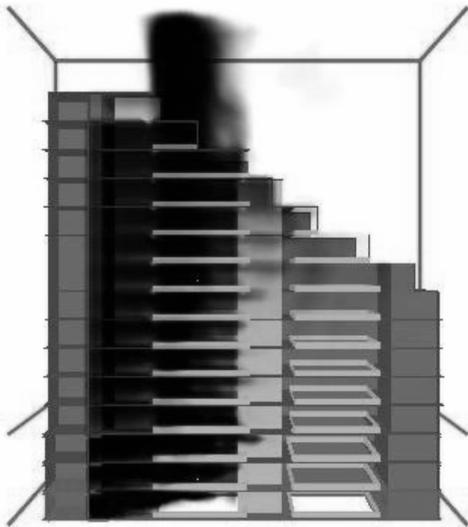


图 3 5 层火源 I 场景下烟气在吹拔空间内蔓延情况

2)图 4 为 5 层火源 I 场景下 384 s 时各楼层 CO 体积分数分析。由图可见,即使在一个出口失效的情况下,在人员疏散完毕时(384 s)各楼层环廊 2 m 高度的 CO 体积分数未达到临界值。温度、和能见度的情况与 CO 情况相似。

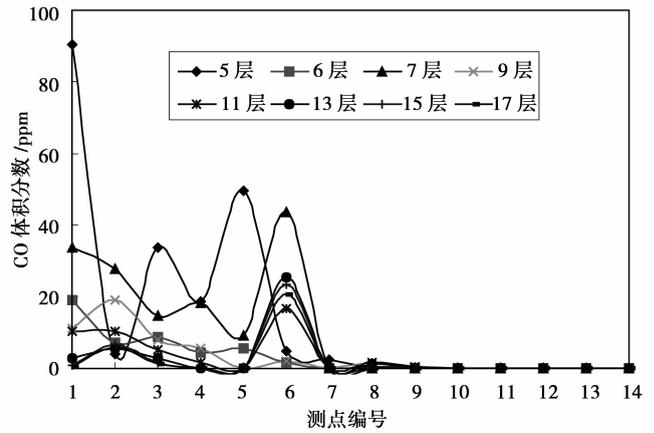


图 4 5 层火源 I 场景下 384 s 时 CO 体积分数分析

3)图 5 为 5 层 II 号火源场景时 6 层温度切片图。可以看出,在吹拔空间中向上流动的烟气温度较低,各火灾场景均不超过 60 °C。

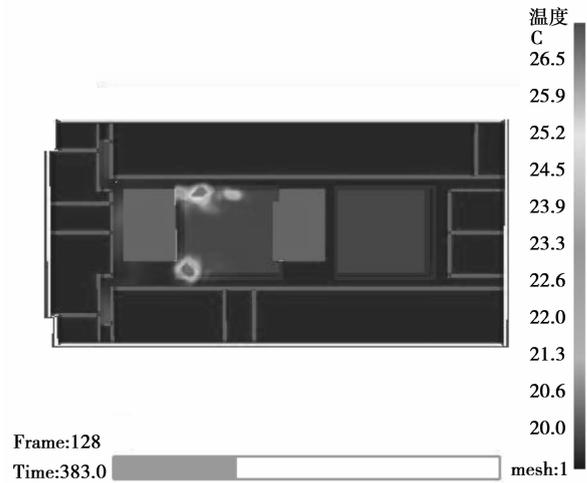


图 5 5 层 II 号火源场景 6 层温度切片图

4)图 6、图 7 分别为增加挡烟垂壁后 5 层 I 号火源烟气蔓延情况和 CO 体积分数的分布情况(384 s)。由图可见,各层环廊围绕吹拔空间增加 0.7 m 高挡烟



图 6 增加挡烟垂壁后 5 层 I 号火源烟气蔓延情况

垂壁后,烟气蔓延范围明显扩大,起火楼层环廊 CO 体积分数和能见度全面超过危险临界值。

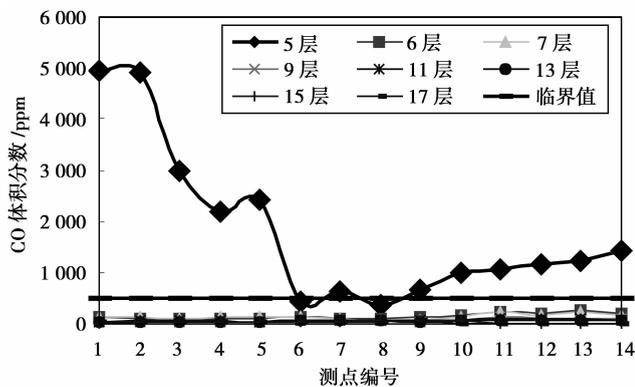


图7 增加挡烟垂壁后5层1号火源384 s时CO体积分数分析

5)图8所示为恰巧有2.9 m/s的北风作用时吹拔空间内烟气蔓延情况。可以看出,烟气的排出受到北风的影响,但没有出现烟气倒灌入吹拔空间的现象,只是增大了烟气的涉及范围。对数据文件分析显示,各层各项指标仍能满足安全疏散的要求。

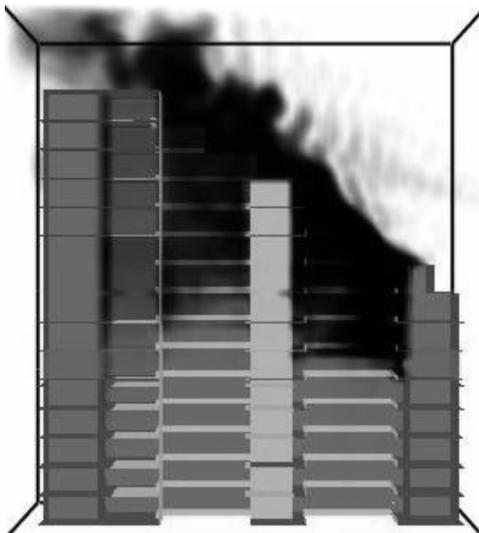


图8 增加北风时烟气蔓延情况

4 主要结论

1)通天的吹拔空间在火灾时烟囱效应显著,利用自然排烟方式可以排出大多数烟气,是可以优先考虑的排烟设计方案。

2)当吹拔空间周围是防火分隔较好独立房间时,经吹拔空间向上排出的烟气温度较低,不足以引燃上部楼层的普通可燃物,火灾一般会在垂直方向上蔓延,吹拔空间周围环廊上可以不设置防火卷帘。

3)在吹拔空间周围环廊上增加挡烟垂壁阻碍了烟气的快速、顺畅排出,造成起火楼层在短时间内即全面达到人员可以耐受临界指标,且扩大了烟气影响范围。

4)含吹拔空间的高层住宅(公寓)宜在各住宅分户内增设火灾探测器和自动喷水灭火设施,分户门设为甲级防火门(具有自动关闭功能),以缩短预报火灾时间、控制火灾规模,立足于火不出户。

5)含吹拔空间的高层建筑防排烟设计应疏、堵结合,以疏导烟气为主。这样既可以降低烟气中毒性物质的含量,有利于人员的疏散与扑救;又可以快速排出燃烧区的热量,降低烟气温度,有利于防止火灾的蔓延扩大。

参考文献:

- [1] GB 50045-95,高层民用建筑设计防火规范[S].
- [2] CUSTER R L P, MEACHAM B J. Introduction to performance-based fire safety[M]. Boston, MA, USA: Society of Fire Protection Engineers, 1997.
- [3] 王蔚,张和平,徐亮,等.大中庭建筑的性能化防火设计初探[J].建筑学报,2006,(7):48-49.
WANG Wei, ZHANG He-ping, XU Liang, et al. Initial exploration of the performance-based fire protection design for building with large atrium[J]. Architectural Journal, 2006,(7):48-49.
- [4] 范维澄,孙金华,陆守香.火灾风险评估方法学[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] BEYLER C L. Fire Dynamics[M].// DINENNO P J. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition. Quincy, MA, USA: The National Fire Protection Association, 2002:2-18~2-31.
- [6] DGJ08-88-2000,民用建筑防排烟技术规程[S].
- [7] 程远平,李增华.消防工程学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002.
- [8] 公安部.公安消防队执勤条令[S].1996.
- [9] MCGRATTAN K. Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide[M]. WASHINGTON, USA: U. S. Government Printing Office: 2004.
- [10] PURSER D A.. Toxicity assessment of combustion products[M].// DINENNO P J. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition. Quincy, MA, USA: The National Fire Protection Association, 2002: 2-83~2-171.
- [11] BS 7974: 2001, Application of fire safety engineering principles to the design of buildings-Code of practice[S]. London: British Standards Institution, 2001.

(编辑 陈蓉)