

高层建筑条形走廊自然排烟效果的数值模拟与评价

哈尔滨工业大学 大庆石油学院 施 微[☆]

哈尔滨工业大学 高甫生

摘要 采用场-区模型模拟火灾发生时高层建筑条形走廊内的自然排烟过程,考虑了室外风向、风速、起火房间位置、走廊宽度和外窗尺寸、季节以及内走廊长度等因素对自然排烟过程的影响,对模拟结果进行分析并得出相应结论,结果显示当内走廊长度超过 30 m 时,走廊内采用自然排烟不能保证人员的安全疏散。

关键词 火灾 自然排烟 条形走廊 风向 风速

Numerical simulation and evaluation of natural smoke exhaust for straight corridor in high-rise buildings

By Shi Wei[★] and Gao Fusheng

Abstract Simulate the process of natural smoke exhaust for straight corridor in high-rise buildings with a field-zone compound model. Considers various components that affect the natural exhaust such as wind direction, wind speed, position of fire room, width of corridor, dimensions of exterior windows, season and length of corridor, etc. Obtains some conclusions through an analysis of the simulating results. The result shows that natural smoke exhaust should be used effectively in the corridor, the length of which is within 30 meter, to ensure people evacuate safely in fire building.

Keywords fire, natural smoke exhaust, straight corridor, wind direction, wind speed

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

建筑物发生火灾后,烟气从起火房间向走廊及建筑物其他部位蔓延,走廊是建筑内人员向前室疏散的必经之路。走廊烟气能否及时向外排出很大程度决定着建筑内人员是否可以安全逃生。自然排烟方式以其结构简单、不需要附加能源和复杂的排烟设施的优点而被广泛应用。本文采用场模型 FDS(fire dynamic simulator)与区域模型 CFAST(consolidate fire and smoke transport)相结合的方式,模拟起火层内条形走廊采用自然排烟时火灾烟气的流动过程,并对走廊内自然排烟的效果进行分析与评价。

1 模拟对象

建筑模型(宾馆)标准层平面见图 1,条形走廊长 56 m,宽 1.8 m,室内净高 2.8 m,走廊内设有吊顶,净高 2.5 m,走廊两端外墙设有可开启自然排烟窗,尺寸为 1.5 m×1.2 m。客房房门尺寸为 0.8

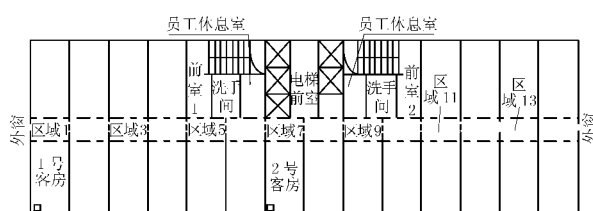


图 1 标准层平面示意图

m×2.1 m,前室房门尺寸为 1.2 m×2.1 m。该建筑位于北京市区(气象参数见表 1),共 30 层,层高 3 m,起火层为第 20 层。起火房间分别位于 1 号客房和 2 号客房(见图 1),火源处于墙角。本文首先模拟 1 号客房起火后的烟气蔓延过程,然后分析改

①☆ 施微,女,1982 年 3 月生,硕士研究生
163318 大庆石油学院土木建筑工程学院 133 信箱
(0459) 6504343
E-mail: melody.shiwei@gmail.com
收稿日期:2006-03-20

变起火房间位置对走廊烟气扩散的影响;同时,在研究了具有上述长度和宽度走廊的烟气运动特性后,分析了改变走廊宽度和长度对自然排烟的效果的影响。

表 1 北京市区夏、冬季室外计算气象参数

	大气压力/kPa	干球温度/℃	参照风速/(m/s)
夏季	99.86	30	1.9
冬季	102.04	-5	2.8

注:表中参照风速为空旷地带 10 m 高度处测量的当地风速,用于模拟时需作修正。模拟所采用的参照风速为市区 30 m 高度处的参照风速(见文献[1]),经修正参照风速为:夏季 1.5 m/s,冬季 2.2 m/s。

起火房间内的火灾过程采用场模型 FDS 模拟,其他房间利用区域模型 CFAST 模拟。模拟时间设定为 1 200 s。将条形走廊划分为 14 个串联的区域(见图 1),以便更加精确地对狭长走廊内烟气蔓延的区域进行模拟^[2],区域之间设置与走廊等宽等高的通风开口。由 FDS 向 CFAST 传递的数据包括:火灾功率、燃料的热解率、起火房间内 CO₂、CO 的质量分数等。火灾功率随时间的变化关系见图 2。将数据进行简要处理后直接导入

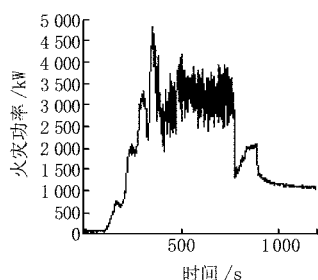


图 2 输入 CFAST 的火灾功率随时间的变化

CFAST,这些参数是:火灾功率,火源燃烧热,CO/CO₂(燃烧高温分解生成的 CO 与 CO₂ 的质量之比,kg/kg)。计算得火源燃烧热为 19 MJ/kg,CO/CO₂ 为 0.02。

2 模拟结果及分析

研究表明,随着起火房间房门开度的增加,室内火灾功率的峰值逐渐增大,相应走廊内的烟气运动速度、烟气的温度和浓度都要增加^[3]。本建筑模型客房位于条形走廊两侧。火灾发生后,如有非火灾房间门打开,房间会储存一定的烟气量,而且宾馆客房卫生间的排气窗孔会在热压的作用下向外排烟,使得走廊内烟气量有所减少。但是,宾馆房门开启具有很大的随机性,鉴于不可能对每种房门开启的情况进行模拟,本文仅模拟起火房间房门全开、非起火房间房门全关的最不利工况下,走廊内

采用外窗自然排烟时烟气的分布状况。模拟发现,开启外窗时,门缝渗透对排烟效果影响不大,因此在模拟自然排烟效果时忽略门缝渗透的影响。

模拟时,将走廊划分为 14 个区域,命名为区域 1,区域 2,⋯,区域 14。将这 14 个区域按疏散方向划分为 3 部分,区域 1~区域 5 通过前室 1 疏散,为疏散通道 1;区域 6~区域 9 位于两前室之间,人员依据习惯选择疏散方向,为疏散通道 2;区域 10~区域 14 通过前室 2 疏散,为疏散通道 3。针对不同通路模拟结果整理参数曲线进行分析。

走廊采用开启外窗进行自然排烟,定义外窗朝向与外界自然风向夹角为风力角 α (见图 3)。 α_1 , α_2 分别为左、右侧外窗风力角。由于室外风向的不确定性,分别模拟以下三种情况的自然排烟:1) $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 180^\circ$;2) $\alpha_1 = 180^\circ$, $\alpha_2 = 0^\circ$;3) $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$ 。设定起火 100 s 后走廊外窗开启。

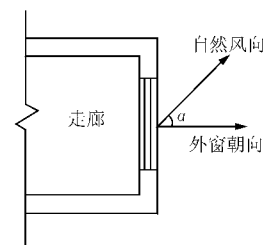


图 3 外窗风力角定义示意图

用于评价排烟效果的参数主要有:上(下)层烟气温度、上(下)层组分体积分数、烟层界面高度等参数。以情况 1 时通道 1 模拟数据为例分析上(下)层烟气温度(见图 4)。由曲线可见,走廊内上层温度 100~400 °C,人在该环境下难以忍受而导致受伤或失去疏散能力,下层温度除靠近起火房间的区域(区域 1、区域 2)外都低于 40 °C,对于人员疏散是安全的。

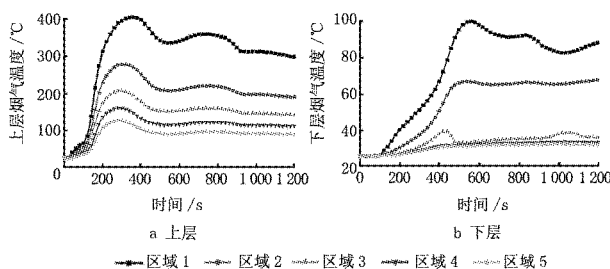


图 4 通道 1 各区域上、下层气体温度随时间的变化

以通道 1 为例分析该区域内上(下)层烟气组分体积分数(见图 5)。混合气体中,未耗尽的 O₂ 可提供人员呼吸,有利于疏散。CO₂ 与 CO 是两种主要的燃烧产物。CO₂ 的主要危害是使人缺氧窒息甚至死亡;CO 自身带有毒性,它的毒性反应与

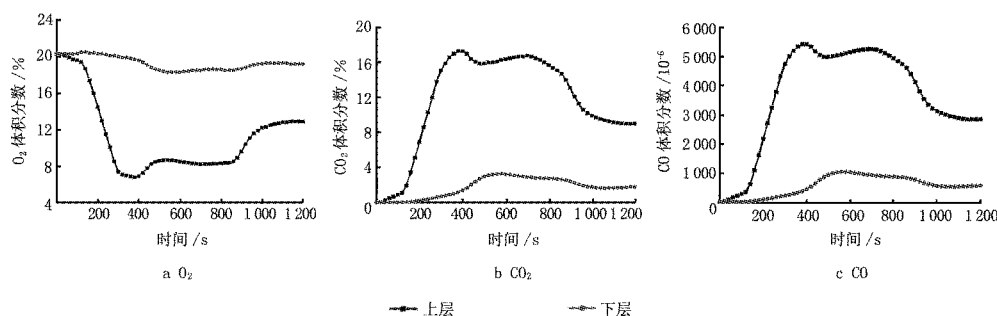


图5 烟气中典型气体组分体积分数随时间的变化

浓度和持续时间成正比。此处采用 O_2 、 CO_2 、 CO 作为典型气体进行组分分析。通常情况下规定的烟气组分中各种有毒气体的火灾疏散条件浓度^[4]见表 2。

表2 烟气中各组分的许可浓度(体积分数)

毒 性	气体名称	长期停留允许浓度	火灾疏散条件浓度
单纯窒息性	O_2		$<14\%$
	CO_2	$5\,000 \times 10^{-6}$	3%
化学窒息性	CO	50×10^{-6}	$2\,000 \times 10^{-6}$
	HCN	10×10^{-6}	200×10^{-6}
	H_2S	10×10^{-6}	$1\,000 \times 10^{-6}$
黏膜刺激性	HCl	5×10^{-6}	$3\,000 \times 10^{-6}$
	NH_3	50×10^{-6}	
	Cl_2	1×10^{-6}	
	$COCl_2$	0.1×10^{-6}	25×10^{-6}

从模拟结果可发现,上层烟气中三项参数浓度均超过疏散标准,威胁到人员的生命安全;而下层烟气可以保证人员的安全疏散。对走廊各区域混合气体组分数据分析发现,沿走廊长度方向的各区域内,烟气组分浓度在一定范围内变化,下层烟气的组分浓度各项参数均满足疏散条件。综合上述对烟气上(下)层温度及上(下)层组分浓度的分析可知,仅对火灾过程中走廊位置烟层界面高度的变化趋势进行讨论,即可全面评价烟气排出效果并以此评估建筑内人员向外疏散的安全程度,因此下面的分析仅围绕烟层界面高度展开。根据烟层界面高度评价自然通风对人员疏散的影响,通常安全疏散的烟层界面高度下限为 1.5 m。

2.1 室外风向与风速对排烟效果的影响

模拟发现,通道 2 各区域烟层高度随时间在一个极小的范围(区域 5 与区域 10 的表征曲线之间)内变化,曲线簇几近重合,因此下面分析烟层高度随时间变化时仅列出通道 1 和通道 3 各区域的该参数曲线。

无排烟情况时(见图 6),起火后 30~180 s,烟气在走廊内水平蔓延,同时不同区域(由远及近)的烟层高度相继依次迅速下降,300 s 左右燃烧进入

稳定发展阶段,各区域烟层界面相继达到最低点,降至地面。

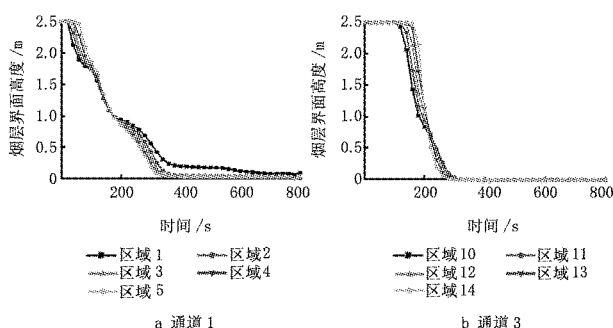


图6 无排烟情况下烟层界面高度随时间的变化

外窗开启进行自然排烟,不同风向下的模拟结果见图 7。外窗风力角 $a_1=0^\circ$, $a_2=180^\circ$ 条件下,火灾初期各区域烟层界面依次迅速下降,200 s 左右烟气水平蔓延至整个走廊。水平蔓延的同时,不同区域的烟层界面高度在短时间内陆续下降。外窗开启后,由于左侧外窗处于负压状态,使得烟层下降速率较为缓慢,在外窗开启时刻(100 s)前后可以明显看到各区域烟层界面下降速度的差异。随着火势发展,大量的高温烟气生成,聚集在走廊内。在 400 s 左右,各区域烟层界面先后降至最低点。其后火灾进入稳定阶段,烟层界面高度也逐步稳定,在不同区域稳定在不同的高度,存在少许扰动。

由于受外窗开启及起火房间的影响,走廊不同区域的烟层高度不同。右侧外窗处于迎风面,大量空气进入室内,通道 3 各区域烟气被大量室外空气冷却而沉降于地面。除起火房间正对的区域 1(烟层界面大约稳定在 1 m 左右)外,整个走廊烟层界面都在 0.5 m 以下,可见排烟效果十分不理想,不能保证安全疏散。

比较情况 2 与情况 1 发现,两种情况下通道 1 的曲线变化趋势与稳定后的界面高度基本一致。

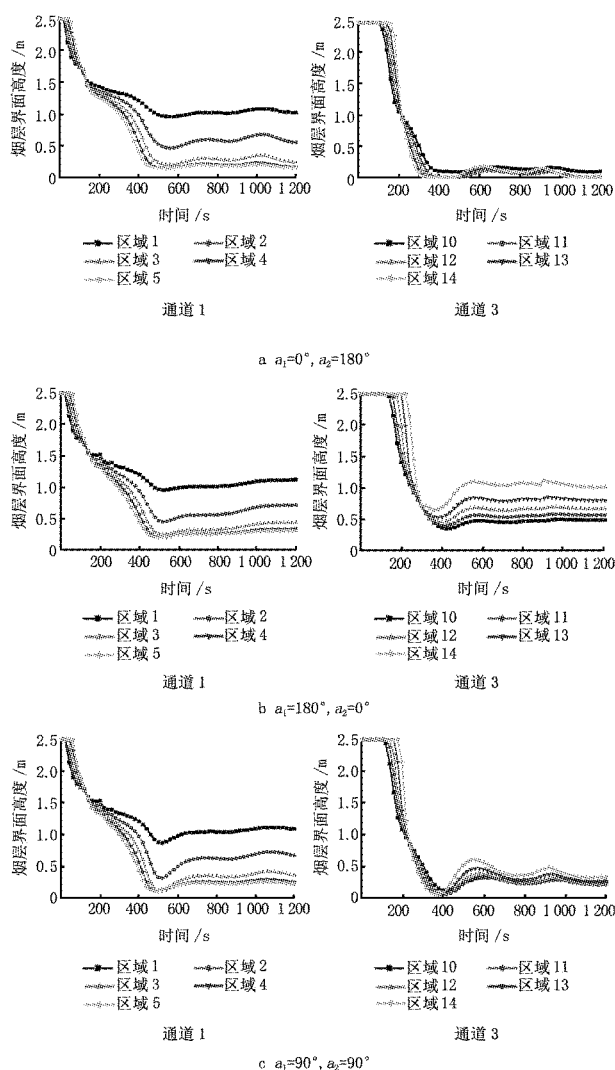


图 7 不同室外风向条件下烟层界面高度随时间的变化

主要是因为,左侧外窗相邻的区域 1 正对起火房间,使得该处烟气温度极高,产生相当大的热压。左侧外窗虽处于迎风侧,但风压作用小于热压,所以热压起主导作用,使得通道 1 各区域即使在风向相反的情形下,得到几乎同样的排烟效果。通道 1 各区域烟层界面高度随其相距起火房间由近及远逐渐降低,而通道 3 则相反,随其相距起火房间由近及远逐渐升高。主要是由于通道 3 远离起火房间且靠近外窗,在外窗作用下向外排烟,使得烟层界面有所升高。由于情况 2 右侧外窗处于负压,其排烟效果明显好于情况 1。但整体来讲排烟效果仍不理想,烟层界面高度在 1 m 以下,对疏散存在重大威胁。

在 $a_1=90^\circ, a_2=90^\circ$ 情况下模拟时,两侧外窗都是负压。排烟效果界于前两者之间,最明显表现

在通道 3 的各区域,情况 1 稳定在 0~0.3 m 之间,情况 2 稳定在 0.4~1.1 m 之间,而情况 3 大致稳定在 0.3~0.6 m 之间。

上述模拟结果是在北京市区夏季风速为 1.5 m/s 时得到的。实际上,室外风速具有常年变化的特性,甚至同时同地不同高度处的风速也有变化。以下参照风速设为 2.5 m/s,对情况 1,2 进行模拟,研究风速变化对排烟效果的影响。

比较图 8 发现,距起火房间较远的通道 3 各区域烟层稳定后(400 s 之后)排烟效果不好。这是因

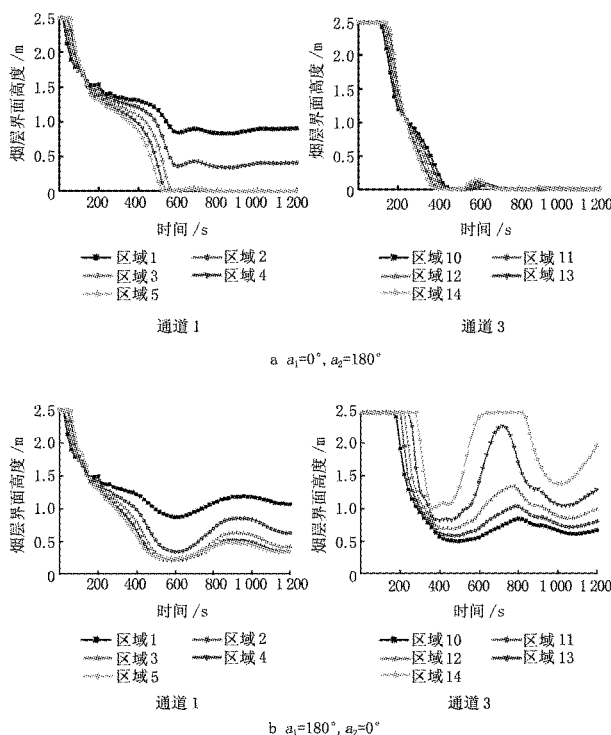


图 8 风速为 2.5m/s 时烟层界面高度随时间的变化

为情况 1 中右侧窗口处于迎风面,风速增大后会阻挡烟气的排出,因此风速越大排烟效果越差;且当室外风速增大到一定程度(超过临界风速)时,迎风面开口中和界高于开口上沿,此时外窗将失去向外排烟的作用。此类情况只会出现在非起火侧位于迎风面的时候,当起火侧位于迎风面时,燃烧产生的大量高温烟气使得该位置热压远大于风压而起主导作用。通过计算发现,该模拟条件下右侧外窗临界风速为 2.2 m/s,低于模拟风速 2.5 m/s,所以该处外窗自然排烟已失效。

虽然左侧外窗处于背风面,风速增大后有利于烟气的排出,但由于此模拟对象着火房间位于建筑左端,左侧外窗附近堆积大量浓度极高的高温烟

气,因此在增大风速时,左侧外窗排烟效果受风压影响并不明显。

$\alpha_1=180^\circ, \alpha_2=0^\circ$ 情况下同样也可得到上述结论。此情况下,左侧外窗处于迎风面,因此风速增大后阻碍烟气向外排出,左侧外窗附近(通道 1)各区域烟层界面高度(除区域 1)明显低于小风速下烟层界面高度。而右侧外窗附近(通道 3)各区域受负压影响,风速大时排烟效果优于风速小的情况。由此可见,室外风速越大,背风侧外窗排烟效果越好,但仍然不能保证火灾时人员的安全疏散。

2.2 起火房间位置对排烟效果的影响

改变起火房间位置进行模拟,令 2 号客房为起火房间。起火房间房门几乎位于走廊中央,由于建筑的对称性,只针对 $\alpha_1=0^\circ, \alpha_2=180^\circ$ 情况进行模拟,结果见图 9。由曲线可见,走廊长度方向各区

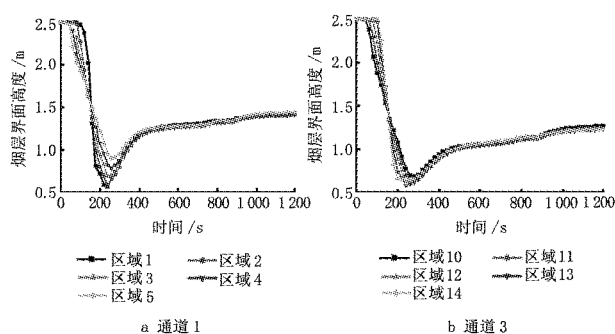


图 9 2 号客房起火, $\alpha_1=0^\circ, \alpha_2=180^\circ$ 时烟层界面高度随时间的变化

域烟层高度差别不大,300 s 后各区域烟层高度曲线几近重合。这是由于起火后,高温烟气同时向两侧迅速蔓延,不会产生单一区域内的聚积。水平方向的各相邻区域之间以及室内外之间迅速进行质量交换与能量交换,加速走廊内烟气的排出,使得各区域烟层界面高度几近相等,排烟效果相对稳定。火势稳定(400 s)后,烟层界面高度稳定在 1.2~1.4 m 之间。可见当起火房间位于走廊中间位置时,对整个走廊两侧房间内的人员疏散相对有利。

2.3 走廊宽度和外窗尺寸对排烟的影响

宾馆走廊宽度根据每层楼可容纳的人数设定,通常在 1.5~2.2 m 之间。现将走廊宽度按 2.1 m 考虑,同时改变窗口尺寸进行模拟。《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—95)(2001 年版)(以下简称《高规》)第 8.2.2.3 条明确规定,可开启外窗面积与走廊面积之比不小于 2%,本文模拟过程

中,外窗尺寸的设定都满足《高规》要求。室外风向为 $\alpha_1=180^\circ, \alpha_2=0^\circ$ 时,模拟结果见图 10。由曲线可见,仅改变走廊尺寸时,排烟效果不受影响;改变

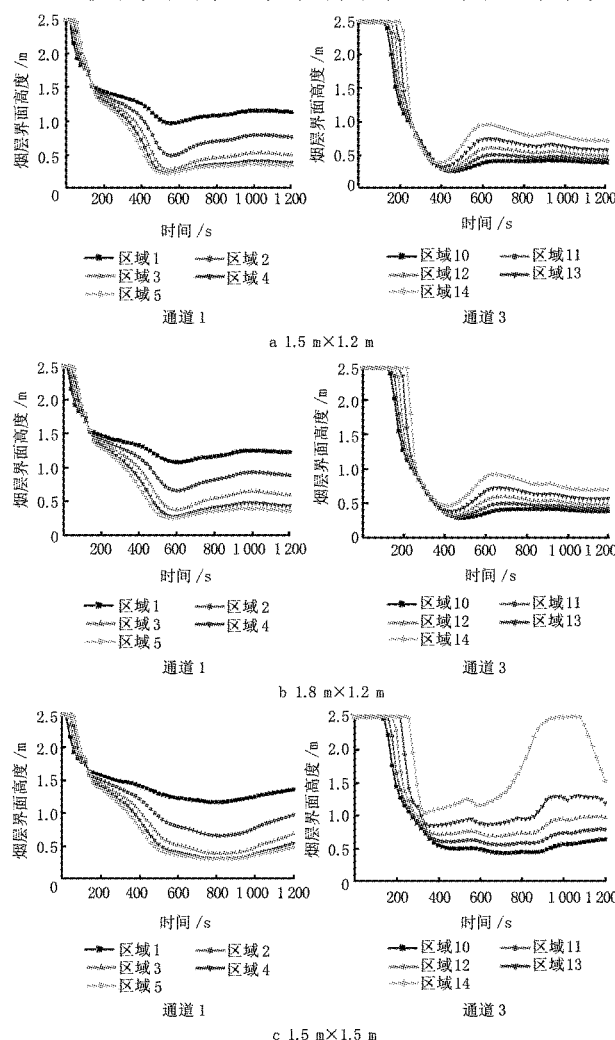


图 10 走廊宽 2.1 m, 可开启外窗尺寸 (宽×高) 不同时排烟效果对比

外窗尺寸时,外窗宽度变化对排烟效果影响不大,但当外窗高度(指窗户自身的竖向尺寸,下同)增大时,烟层界面高度有明显的提升。可见走廊外窗的高度对于自然排烟是敏感参数。即使外窗面积相等,外窗高度较大的建筑模型中,走廊自然排烟也有明显改善。因此在建筑本体设计时,可考虑增大走廊外窗高度,以提高走廊自然排烟效果。

2.4 冬夏季排烟效果的比较

与夏季相比,冬季室外风速较大,室外温度较低,起火时室内外温差大,因此风压、热压对排烟效果的影响要大于夏季该参数对自然排烟的影响。模拟结果发现,冬季自然排烟效果要明显优于夏

季。三种不同室外风向情况下,走廊烟层界面高度随时间的变化见图 11。冬季自然排烟效果虽然优于夏季,但在着火的整个过程中烟层界面高度维持

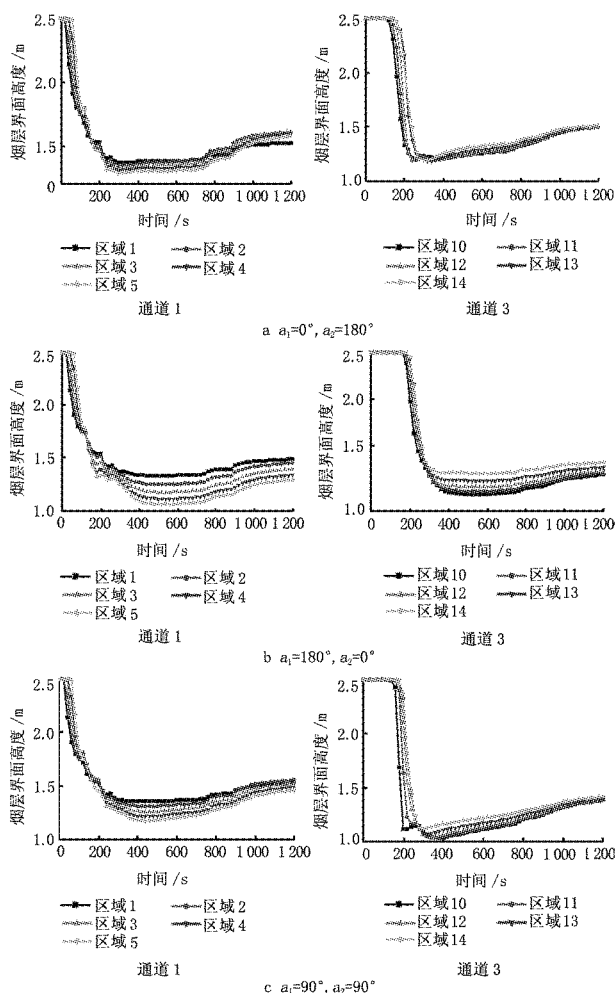


图 11 冬季不同室外风向条件下, 烟层界面高度随时间的变化

在 1.5 m 以下, 无法满足人员疏散的安全性要求。

2.5 内走廊长度对排烟效果的影响

模型中内走廊长度设为 56 m, 在此建筑格局及室外气象条件下的模拟结果表明, 通过外窗的自然排烟不能满足安全疏散的需要。现将走廊长度分别设为 32 m, 20 m, 模拟情况 1 下的自然排烟效果, 起火房间位于 1 号客房(见图 1)。走廊的区域划分仍按照长度方向 4 m 划分一个区域, 模拟结果见图 12。结果表明走廊长度减小后烟层界面明显升高。主要原因是, 条形走廊外窗设在走廊的两端, 长度减小之后, 两外窗对流作用以及冷热气体对流作用下, 使大量空气进入走廊, 走廊内热烟气和室外冷空气迅速进行质、能传递, 驱使烟气尽快

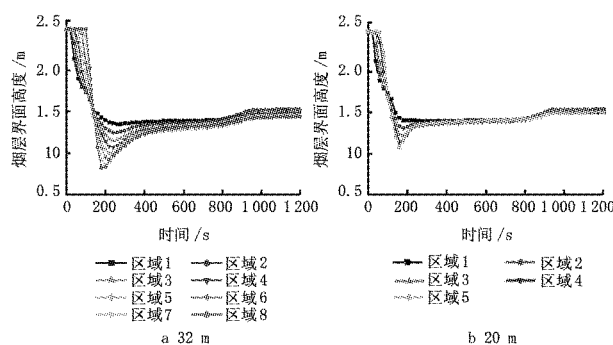


图 12 内走廊长度不同时自然排烟效果对比

排出。而且在条形走廊的中间不存在烟气滞留区域, 使得排烟效果整体提高。

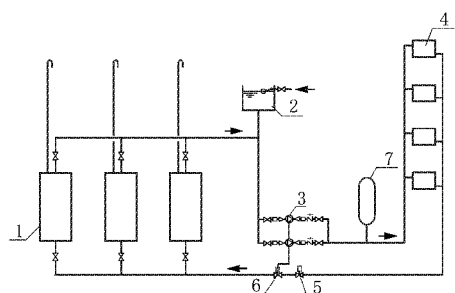
当走廊长度减小至 20 m 时, 各区域烟层界面几乎重合在 1.5 m 高度处, 走廊内各区域均可保证人员安全疏散。当走廊长度为 32 m 时, 沿走廊长度方向的不同区域, 烟层位置有少许差别, 烟层界面稳定在 1.2~1.5 m 之间。笔者同时对长度为 36 m 和 40 m 的条形走廊自然排烟效果也进行了模拟, 结果发现长度为 36 m 时烟层界面稳定于 1 m 之上; 但长度为 40 m 时, 部分区域烟层高度下降至 0.5~1 m 之间, 威胁到人员的疏散。由此可见, 当内走廊长度在 30 m 以内时, 通过开启外窗进行自然排烟可以满足人员安全疏散的要求; 当内走廊长度超过 30 m 时, 仅采用自然排烟不足以排出走廊内的烟气, 不能保证人员疏散的安全有效。

3 结论

自然排烟效果受室外风力条件、季节、起火房间位置、建筑平面格局、自然排烟外窗尺寸等因素的影响。模拟结果表明, 在模拟条件下, 条形内走廊长度为 56 m 时, 仅通过自然排烟不能保证起火层内人员整体的安全疏散, 这说明我国《高规》第 8.2.2.3 条对长度不超过 60 m 的内走廊可以采用自然排烟的规定尚有待进一步研究。

同时得出以下结论: 1) 室外风速增大时, 阻碍建筑迎风侧外窗的自然排烟, 但有利于背风侧外窗的排烟; 当外界风速超过该条件下的临界风速时, 迎风侧外窗将失去排烟作用; 2) 起火房间位于条形走廊中间时, 因火势可向两个方向同时蔓延, 加快烟气流动, 对人员疏散相对有利; 3) 增大外窗高度可明显改善走廊内自然排烟效果; 4) 以北京为代表的北方寒冷地区, 冬季自然排烟效果明显优于

(下转第 33 页)



1 常压热水锅炉 2 开式定压水箱 3 循环兼加压泵 4 供暖系统 5 减压装置 6 启闭阀（或电磁阀） 7 隔膜式气压罐

图4 常压锅炉与供暖系统直接连接方式3

采用常压热水锅炉都存在水输送能耗较高而不节能的缺陷,因此应该尽量避免采用。北京市建筑设计研究院编制的《建筑设备专业技术措施》^[5]第21.1.6条规定,“当热负荷较小的建筑采用常压热水锅炉供热时,应符合下列条件:1) 供热量不宜大于1.4 MW;2) 供水设计温度不应大于90℃;3) 宜采用带换热设备的二次间接供热机组或供热系统,不宜采用需设置水泵扬升供热的系统……”。

《全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力》^[6]第8.11.2~8.11.9条关于常压热水锅炉房设计特点的规定,也已经把问题阐述得比较清楚了。

3 关于常压热水锅炉及其系统配置的若干问题

在实际工程应用中常可以见到、以及笔者曾处理过的问题有:

1) 在民用建筑外独立建造锅炉房,且对承压锅炉没有严格限制的条件下,也采用常压热水锅炉。

2) 不论供暖系统形式如何,按照对供暖系统不甚了解的生产厂家提出的以常压热水锅炉为中心的系統形式,采用千篇一律的系统配置方式。

3) 由于开式定压水箱高度较低,循环泵吸入端的静压很小,在自锅炉出口至循环泵吸入口管段

(上接第49页)

夏季;5) 内走廊长度在不超过30 m的情况下,可通过开启外窗进行自然排烟保证人员安全疏散。当高层建筑具有长度较大的内走廊时,自然排烟不宜作为走廊排烟系统的主要手段使用,将其作为排烟系统的辅助设施将更为有效。

参考文献:

[1] 丁力行,鲁晓青,于宏. 地面粗糙度等级的修订对空气

上,如按常规配置阻力过大的管道过滤器等配件,会使循环泵吸入口形成负压,热水发生汽化,造成气蚀和水击。

4) 开式定压水箱与锅炉系统的连接管上配置止回阀,即不能使水箱吸收因加热而膨胀的系统循环水量,也是有关技术规定所禁止的。《全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力》^[6]第8.6.12条之4款就明确规定:高位膨胀水箱与热水系统的连接管上不应装设阀门。

5) 建筑物供暖系统高于开式定压水箱的系统中,若不设置减压阀或其他控制避免运行时发生系统倒空的有效设施,会使系统高点不能进行正常的水循环。

6) 建筑物供暖系统高于开式定压水箱的系统中,不设置与水泵联锁的启闭阀或其他控制停泵时发生系统倒空的有效设施,致使循环兼加压泵停止运行时,系统的循环水经由开式定压水箱溢流,重新启动时需要大量补水和排除空气。

参考文献:

- [1] 劳动部. 热水锅炉安全技术监察规程[R]. 劳锅局字[1991]8号和35号文件
- [2] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006
- [3] 北京市规划委员会. 关于禁止在多层和高层建筑物顶层和中间层安装锅炉的通知[R]. 市规发[2002]754号文件,2002
- [4] 国家质量技术监督局. 小型和常压热水锅炉安全监察规定[R]. 2000年6月15日第11号令,2000
- [5] 北京市建筑设计研究院. 建筑设备专业技术措施[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006
- [6] 建设部工程质量安全监督与行业发展司,中国建筑标准设计研究所. 全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003
- [7] 渗透理论风压的影响[J]. 暖通空调,2005,35(8):7-9
- [2] 胡隆华,霍然,姚斌,等. 超狭长两端封闭空间烟气运动工程分析方法的初步研究[J]. 火灾科学,2003,12(1):36-39
- [3] 邱旭东. 高层建筑火灾过程的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004
- [4] 赵国凌. 防排烟工程[M]. 天津:天津科技翻译出版公司,1991