

# 建筑物走廊机械排烟量 性能化研究<sup>\*</sup>

重庆大学 王厚华<sup>☆</sup> 韩武松

成都市城市燃气有限责任公司 何 晟

贵州省电力设计研究院 罗信明

**摘要** 采用网络模型软件模拟预测建筑火灾烟气流运动特性,以火灾建筑内的人员作为被保护对象,提出网络模型条件下火灾烟气危险状态判据,从而确定人员可用安全疏散时间 ASET。人员所需安全疏散时间 RSET 采用经验数据计算。比较 ASET 和 RSET,从而确定走廊排烟量。利用实例进行了验证,计算结果表明,其他条件相同时,不同火源条件下的排烟量是不同的,在火源强度较大( $250 \text{ kW/m}^2$ )时, $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的排烟量为该条件下的最佳排烟量。

**关键词** 机械排烟量 火灾 网络模型 性能化设计

## Performance research on mechanical exhaust smoke volume in building corridors

By Wang Houhua<sup>★</sup>, Han Wusong, He Sheng and Luo Xinming

**Abstract** Analyses the properties of fire smoke flow by network model software, with the staffs in fire building as the protected object, and gives three fire danger criterion standards under the network model condition, which can be used to determine the available safety egress time (ASET). The required safety egress time (RSET) can be counted by empirical data. Compares ASET and RSET to determine the corridor exhaust smoke volume. An example shows that exhaust smoke volume is different under different fire source conditions when other conditions are the same, and that the optimum exhaust smoke volume is  $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  under the condition of fire source with higher strength such as  $250 \text{ kW/m}^2$ .

**Keywords** mechanical exhaust smoke volume, fire, network model, performance-based design

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

### 0 引言

走廊是建筑物的重要组成部分,是火灾时人员逃生的必经之路。当发生火灾并形成轰燃时,着火室内的烟气经崩坏的门窗进入走廊,沿走廊向通道周围弥漫。因此,建筑物发生火灾时,走廊不仅扩大了火灾烟气弥漫的范围,而且严重妨碍人员疏散和消防救援工作。《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—95)(2001 年版)(以下简称《高规》)[1]

规定:一类高层建筑和建筑高度超过 32 m 的二类高层建筑,无直接自然通风且长度超过 20 m 的内走道或虽有直接自然通风但长度超过 60 m 的内走道均应设置机械排烟设施。《高规》第 8.4.2.1

①☆ 王厚华,男,1952 年 5 月生,硕士,副教授  
400045 重庆市沙坪坝重庆大学 B 区城市建设环境学院  
(023) 65121647  
E-mail:whhxinxiang@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-03-15

修回日期:2007-08-06

\* 重庆市重点攻关项目(编号:CSTC. 2006AB2004)

条和 8.4.2.2 条都对排烟量有规定,简单陈述为:担负一个防烟分区排烟时,排烟量应不小于  $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (单台风机最小风量不小于  $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ );担负两个或两个以上防烟分区排烟时,排烟量应按最大防烟分区面积计算,不小于  $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。工程实践中,设计人员往往不加思索地采用  $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  或  $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  设计机械排烟量。《高规》规定的排烟量采用了日本规范的数据,具有一定的合理性。但《高规》的不足之处也是显而易见的,它所规定的排烟量并没有考虑建筑物不同装修状况、不同形体、不同通风条件、不同燃烧阶段以及不同可燃物容量的建筑火灾产生的烟量不同的差异。按《高规》进行的这种“处方式”机械排烟量设计可能较大地偏离实际火灾情况,难以满足着火建筑内人员安全疏散的要求。

近年来,性能化设计的科学性与合理性正逐渐被建筑设计人员、消防科研人员和消防审审人员等所认识和接受,不少超规建筑采用了性能化的防火设计方法,取得了一定的成果,积累了一定的工程实践经验。应当指出的是,目前国内进行性能化设计的建筑多为大型商场、展览馆等大空间建筑及地下建筑,火灾烟流运动特性预测模拟计算软件基本上采用场模拟(CFD)软件或区域模型软件。对于高层建筑或多层多室建筑,由于受限空间很多,边界条件相当复杂,场模拟实际上没有工程应用价值;区域模型不适用于几何形状复杂、有强火源和强通风的建筑,不能正确预测排烟状况下的烟流运动特性。有关高层建筑和多层多室建筑走廊机械排烟量性能化设计研究的进展尚未见到文献报道。

本文采用网络模型软件模拟预测建筑火灾烟流运动特性,提出了网络模型条件下火灾烟气危险状态判据,从而确定人员可用安全疏散时间 ASET (available safety egress time)。人员所需安全疏散时间 RSET (required safety egress time) 采用经验数据计算。比较 ASET 和 RSET,从而确定走廊排烟量。有关网络模型的研究成果可参见文献[2-4],多层多室 RSET 的计算参见文献[5]。

## 1 火灾危险状态判据

保证建筑物内人员安全疏散的基本条件是:在一定时间内,在人员所在区域或疏散经过的通道中不会出现对人员生命构成危险的情况。在最不利的条件下,从建筑物着火至达到危险状况的时间间

隔即为 ASET。因此,给出网络模型条件下的火灾烟流危险状态判据是确定 ASET 的必要条件。

火灾烟气对人的直接危害主要体现在三个方面:高温、遮光性和毒性,本文分别对这三个方面的特征参数给出临界值。

### 1.1 临界温度 $t_c$

实验研究表明,当上部热烟气层温度高于  $180^\circ\text{C}$  时,将对人员造成严重灼伤<sup>[6]</sup>。而当热烟气层界面低于人眼特征高度时,对人的危害将是直接烧伤,此时的温度约为  $110\sim 120^\circ\text{C}$ 。区域模型把上层温度达到  $180^\circ\text{C}$  时的温度作为临界温度,而网络模型把建筑物的每一个受限空间视为一个节点(或称元体),假设每个节点瞬间的状态参数均匀,因此临界温度可由下式计算得到:

$$t_c = \frac{(h - h_b)\rho_h t_h + h_b \rho_a t_a}{(h - h_b)\rho_h + h_b \rho_a} \quad (1)$$

式中  $t_c, t_h, t_a$  分别为临界温度、上部热烟气层温度和下部冷空气温度;  $\rho_h, \rho_a$  分别为热烟气层密度和冷空气密度;  $h, h_b$  分别为房间高度和人眼特征高度。

取  $h=3 \text{ m}, h_b=1.6 \text{ m}, t_h=180^\circ\text{C}, \rho_h=0.779 \text{ kg/m}^3, t_a=21^\circ\text{C}$ <sup>[6]</sup>,  $\rho_a=1.2 \text{ kg/m}^3$ , 由式(1)求得临界温度  $t_c=78^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 临界烟气质量分数 $g_{sc}$

火灾烟气中往往含有大量的固体悬浮微粒,从而使烟气具有一定的遮光性,这将大大降低建筑物中的能见度,严重影响人员安全疏散。悬浮微粒的浓度与烟气的减光性有关,理论减光系数与烟粒子的质量浓度呈线性关系:

$$C_s = \frac{3}{2\rho d} \mu_s \quad (2)$$

式中  $C_s$  为理论减光系数,  $1/\text{m}$ ;  $\mu_s$  为烟粒子的质量浓度,  $\text{mg/m}^3$ ;  $\rho$  为烟粒子的平均密度,  $\text{mg/m}^3$ ;  $d$  为烟粒子的平均直径,  $\text{m}$ 。文献[7]给出了如表 1 中所示的保证安全疏散的极限减光系数值。

表 1 保证安全疏散的极限减光系数

光源标志形式	对建筑物熟悉者	对建筑物不熟悉者
发光型指示灯窗	1~2	0.17~0.33
反射型指示灯窗	0.4~0.8	0.07~0.13

火灾中烟粒子的直径约为  $0.1\sim 3 \mu\text{m}$ ,对于本文模拟的建筑物,取烟粒子直径为  $0.4 \mu\text{m}$ ,查表 1,取极限减光系数值为 0.2,计算出烟气悬浮微粒

质量分数危险临界值  $g_{sc}=0.053$ 。

### 1.3 临界 $CO_2$ 质量分数 $g_{sc}$

火灾烟气中不仅含有大量没有完全燃烧的组分,而且含有很多有毒、有害的组分,如  $CO$ 、 $SO_2$ 、 $CO_2$  等。资料表明,空气中  $CO$  的体积分数为  $1\,500 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$  时,人暴露其中就会头昏目眩; $SO_2$  体积分数为  $400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$  时,人暴露其中呼吸困难,迅速产生严重中毒; $CO_2$  体积分数为 10% 时,人暴露其中短时间内有生命危险。火灾时产生大量  $CO_2$ ,计算结果表明  $CO_2$  浓度通常 10 倍于  $CO$  和  $SO_2$ ,因此以  $CO_2$  作为火灾危险状态判据<sup>[6]</sup>。综合考虑,认为网络模型中火灾烟气  $CO_2$  体积分数为 3% 时达到危险状态,将其转化为质量分数,得出  $CO_2$  的临界质量分数  $g_{sc}=0.046$ 。

因此火灾危险状态判据为:临界温度  $78\,^{\circ}C$ ,临界烟气质量分数 0.053,临界  $CO_2$  质量分数 0.046。任一条件不满足,即认为处于不安全状态。

## 2 算例分析

算例为一旅馆建筑物的某层(如图 1 所示),共 10 个客房,各房间通过单开木制门与走廊连接,走廊无直接自然通风外窗,火灾时人员通过走廊右端的防火门进入楼梯间前室。运用图论原理,根据网络模型方法<sup>[4]</sup>,模拟建筑物抽象可得如图 2 所示的换气树。设模拟建筑 3 号房间着火(因 3 号房间最靠近出口,其着火为最不利条件),一般装修,火源热释放速率为  $125\,kW/m^2$ <sup>[7]</sup>,模拟假定火源为非稳态火源,热释放速率以  $t^2$  火灾形式增长,火焰蔓

延为中速火灾发展形式,火灾发展系数为  $0.011\,9\,kJ/s^3$ ,最大热释放速率为  $3\,100\,kW$ 。人员停留情况以及各计算用初始参数见文献[6],计算时间步长为  $5\,s$ ,计算步数为 360 步。

采用机械排烟。排烟面积按《高规》规定的内走道排烟面积计算,即走道的地面面积( $40.5\,m^2$ )与连通走道的设固定窗的 3 号房间的面积( $24.75\,m^2$ )之和,为  $65.25\,m^2$ ,机械排烟口设在走廊中部节点 2 处,以现行《高规》“负担一个防烟分区排烟时,应按每平方米面积不小于  $60\,m^3/h$  计算”<sup>[1]</sup>为基准,以  $6\,m^3/(m^2 \cdot h)$  为一个步长,分别计算 54, 60, 66, 72, 78  $m^3/(m^2 \cdot h)$  排烟量时建筑物火灾时的烟气流动性状。

在建筑物火灾时的最不利情况即在最靠近出口的 3 号房间着火的情况下,各房间人员要实现安全疏散,必须保证各房间人员所需安全疏散时间  $RSET$  小于其可用安全疏散时间  $ASET$ 。火灾发生后,房间内客人只能通过右边防火门进入楼梯间前室逃生。旅馆内装设感烟火灾报警装置,火灾发生后 60 s 报警;人员在房间内的行动速度为  $1.0\,m/s$ ,在走廊中疏散速度  $0.5\,m/s$ ;确认反应时间为  $120\,s$ <sup>[8]</sup>,计算得到该建筑最大所需安全疏散时间(离出口最远的 13 号房间所需安全疏散时间)  $REST=262\,s$ 。

自然排烟时走廊至楼梯间前室的防火门在前 60 s 内全开,60 s 以后右边防火门关闭;着火室的窗户在前 300 s 关闭,300 s 时崩裂;随机设定 10, 13, 8, 6 号房间窗开启,总开启面积为  $10.8\,m^2$ ,其余窗关闭。运用烟流预测软件分别对自然排烟和不同机械排烟量条件下的烟气流动特性进行模拟,为了节省篇幅,本文仅绘出 1 号节点的烟气性状比较,见图 3。其余节点比较图可参见文献[9]。

### 2.1 烟气温度、浓度分析

从图 3 中可以看出,自然排烟时,各节点温度、烟气浓度均呈不断上升的趋势;设置机械排烟时,各节点烟气浓度先呈较为快速的上升趋势,到达一定时间以后上升势头减缓,趋于稳定,各个节点的温度、烟气浓度均低于同时刻自然排烟的情况,且排烟量越大,下降越大。表明排烟系统的设置延缓了烟气温度、浓度的上升,对安全疏散逃生起到了重要作用。

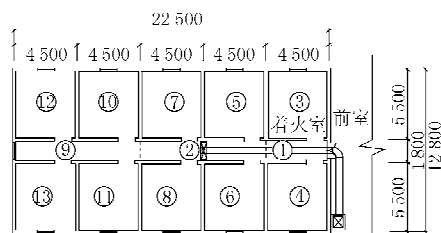


图 1 建筑物平面图

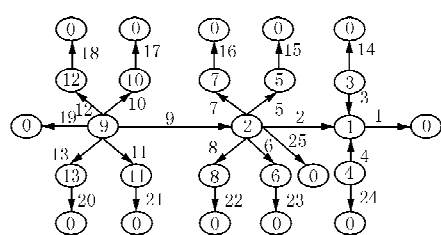


图 2 建筑物网络换气树

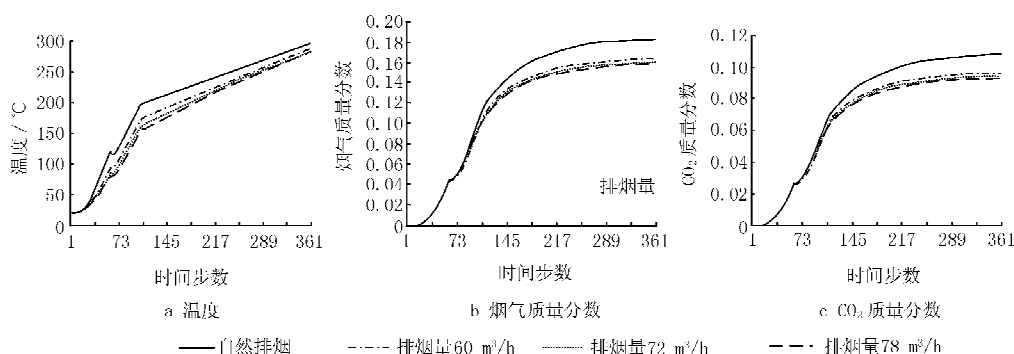


图3 普通装修、火源强度 125 kW/m² 时建筑物 1 号节点的烟气性状比较

比较火灾危险状态判据,对比曲线图,可以看出在自然排烟情况下,1号节点在52步即260 s时温度值为97.4℃,大大高于危险状态临界值,不能满足安全疏散要求。在排烟量为60 m³/(m²·h)时,走廊1号节点在52步即260 s时温度值为76.4℃,53步即265 s时温度值为78.3℃,由温度变化曲线知,262 s时温度值约为77.2℃,低于该建筑物在模拟条件下的温度临界值。此时烟气质量分数为0.042,CO₂质量分数为0.023,均低于火灾危险状态的临界值。即 $ASET > RSET$ ,可见在建筑普通装修、火源热释放速率为125 kW/m²条件下,机械排烟量按《高规》规定的最小排烟量设计是完全可行的。但总排烟量 $L = 65.25 \times 60 = 3915$  m³/h,小于《高规》规定的最小排烟量 $L_{min} = 7200$  m³/h。

随着排烟量增大到72 m³/(m²·h),排烟效果较60 m³/(m²·h)有明显提高,进一步增大排烟量至78 m³/(m²·h),无论是温度,还是烟浓度或CO₂浓度,都与72 m³/(m²·h)时非常接近,排烟效果已无明显提高,其原因是排烟量增大到一定程度,室内负压增大,排烟效率下降。因此过大地增加排烟量是无益的。

因着火室3号房间最靠近出口,是火灾时安全疏散最不利情况,所以不需再考虑着火室位于其他位置时的情况。

## 2.2 不同火源强度对最佳机械排烟量的影响

其他条件不变,改变火源强度,设上述建筑物为豪华装修,热释放速率为250 kW/m²<sup>[7]</sup>,即最大热释放速率值为6200 kW,比普通装修增大1倍。以排烟量为72 m³/(m²·h)进行计算,所得结果见图4。自然排烟时,走廊节点1在53步即265 s时温度值为115.7℃,不能满足安全疏散要求。60 m³/(m²·h)风量的机械排烟时,走廊节点1在53步即265 s时温度值为83.5℃,不能满足安全疏散要求;而72 m³/(m²·h)的机械排烟时,走廊节点1在53步即265 s时温度值为76.8℃,低于临界温度78℃;烟气质量分数为0.037,低于临界烟气质量分数0.053;CO₂质量分数为0.031,低于临界CO₂质量分数0.046,即有 $ASET > RSET$ 。

故该建筑物在模拟条件下的最佳机械排烟量为72 m³/(m²·h)。

## 3 结语

建筑防排烟系统设计是建筑设备工程师的基本任务之一。按照火灾的被保护对象、建筑内的火

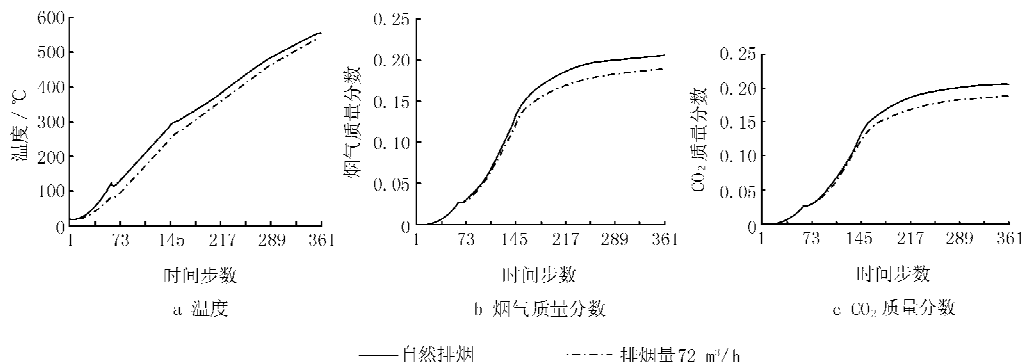


图4 豪华装修、火源强度 250 kW/m² 时建筑物 1 号节点的烟气性状比较

源情况及通风等情况进行性能化的排烟系统设计不仅能保证被保护对象的安全性,同时也可最大限度地节省排烟系统的初投资。与“处方式”设计相比较,性能化设计显然更具科学性和合理性。

本文通过对烟流性状及危害性分析,以火灾建筑内的人员作为被保护对象,合理提出了火灾烟气危险状态判据,为 ASET 的确定提供了必要条件。在此前提下,通过算例分析了机械排烟量,计算结果表明:当建筑物为一般装修,火源强度不太大( $125 \text{ kW/m}^2$ )时, $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的排烟量可满足火灾时安全疏散的临界要求;当建筑物为豪华装修,火源强度较大( $250 \text{ kW/m}^2$ )时, $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的排烟量已不能满足人员安全疏散要求, $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的排烟量能满足要求,但进一步增大排烟量实际效果并不显著。因此  $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的排烟量为此时的最佳机械排烟量。这一结果与四川消防科学研究所通过实体实验<sup>[10]</sup>所得出的结论相吻合。本研究得到的另一个重要结论是:总排烟量=单位面积排烟量 $\times$ 排烟面积,可不受《高规》规定的最小排烟量  $L_{\min}=7200 \text{ m}^3/\text{h}$  的限制。

本文研究成果对建筑物防排烟系统的性能化

(上接第 28 页)

6) 组合改造模式:以上几种模式的不同组合形式。例如,供热企业、能源服务公司和居民个人在政府协调下共同实施节能改造,供热企业负责一次管网的改造投资,节能服务公司负责既有居住建筑的供热计量、二次管网的改造投资,居民个人负责透明围护结构的改造投资;节能服务公司将改造后节省的供热费作为收益回报,供热企业同时还可以通过收取新增用户的入网费和供暖费实现投资回报,居民个人可获得一定额度的优惠热价或通过供热体制改革实现热费减少。

#### 4 结论

国内外既有居住建筑节能改造工程经验表明,目前节能改造技术已逐步趋于成熟,难点集中在确定科学合理的改造模式。既有居住建筑节能改造的公益性较强,可以将其归为半公益性商品,德国、波兰的经验证明,即使在市场化程度较高的发达国家,政府必须设立专项的节能改造资金推动既有居住建筑节能改造按照科学的模式开展,因此我国现阶段迫切需要政府制定经济激励政策来调动改造

设计具有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国公安部. GB 50045—95(2001 版) 高层民用建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2001
- [2] 王厚华,罗嘉陵,罗庆,等. 建筑物火灾烟气流动网络模型的线性化求解方法[J]. 暖通空调,2003,33(5)
- [3] 王厚华,汪鹏. 建筑物火灾性能化研究中的核心问题及其进展[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(3)
- [4] 谢元一,王厚华. 建筑物走廊型通道中火灾烟气流动特性的研究[J]. 中国安全科学学报,2006,16(1)
- [5] 王厚华,郭丹,郭勇. 建筑物人员疏散行动时间的预测研究[J]. 中国安全科学学报,2006,16(11)
- [6] 霍然,袁宏勇. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2003
- [7] Fang J B, Breese J N. Fire development in residential basement rooms[R]. NBSIR,2002
- [8] Shields T J, Boyce K E. A study of evacuation from large retail room[J]. Fire Safety Journal, 2000,35(25)
- [9] 何晟. 非稳态火源在火灾网络模型中的应用及其烟控系统性能化设计研究[D]. 重庆:重庆大学,2006
- [10] 公安部四川消防研究所. 地下商业街火灾烟气流动特性实验研究[R], 2002

各参与主体的积极性,鼓励有条件的地区采取灵活的模式来开展既有居住建筑节能改造,充分运用政府和市场两种手段,先使各参与主体获得部分实际的改造收益,从而提高对节能改造的认同度,进而采用市场化的手段来推进既有居住建筑节能改造。

#### 参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 26—95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996
- [2] 刘长滨. 建筑工程概论[M]. 北京:中国财政经济出版社,2001
- [3] Haykin S. 神经网络原理[M]. 叶世伟,史忠植,译. 北京:机械工业出版社,2004
- [4] 朱大奇,史慧. 人工神经网络原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2006
- [5] 林常青,吴萍. 德国既有住宅改造模式与经验[J]. 建设科技,2006(7):94—97
- [6] 涂逢祥,徐宗威,汪又兰,等. 波兰丹麦建筑供暖计量收费情况考察报告[J]. 暖通空调,2000,30(1):25—28