

建筑物火灾烟流特性预测系统的研究进展(下)*

重庆大学 王厚华[☆] 刘希臣 张 明

摘要 陈述了建筑物火灾烟流特性预测系统应用软件的开发、使用功能和具体实施方式。详细地介绍了日本同类软件的算例验证及其相关的实验研究,从而证实了本预测系统数学模型的正确性和预测计算结果的可靠性。从工程实例出发,说明了本预测系统在建筑消防性能化设计中的应用,指出了预测系统存在的不足及其需要进一步深入研究的内容。

关键词 火灾 网络模型 烟流特性 预测系统

Development in research of building fire smoke-flow property prediction systems (part II)

By Wang Houhua[★], Liu Xichen and Zhang Ming

Abstract Represents the development, function and concrete execution mode of the software. Based on the calculation of the example and relative experimental research, compares with the similar software in Japan and validates the correctness of this model and the reliability of the predictive calculation result. Start from an actual engineering example, explains the application of this system to the performance-based building fire safety design and points out some of its disadvantages and the farther research needed to be done.

Keywords fire, network model, smoke-flow property, prediction system

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

1 预测应用软件及其实施方式

针对现有技术中存在的问题,在文献[1-3]的基础上,本研究项目组建立了完整的建筑物火灾烟流特性理论模型,提出、改进和完成了理论计算方法,构成了完整的建筑物火灾烟流特性预测系统,并成功地利用 Matlab 语言开发出了应用软件。经实验验证,系统的预测计算结果与实验结果吻合得很好,完全符合建筑火灾时烟流、烟温、烟浓度、CO₂ 浓度、CO 浓度和壁温的发展变化规律,证明系统的数学模型可靠,软件的开发是成功的。经文献资料查新证实,目前国内尚无同类的建筑物火灾烟流特性预测系统。

预测应用软件具有如下功能:

1) 可以计算出火灾过程中,任意时刻各房间(节点)的温度、烟浓度、CO₂ 浓度、CO 浓度、空气密度、房间蓄热量、换气热损失、墙体吸热量、辐射

热损失、开口烟气质量流量、开口压差、墙体各节点任意时刻的温度。

2) 计算中可以方便地处理火灾过程中建筑物构造变化的各种情况。如随着人员疏散改变各门的开闭情况,开口的流量系数、壁面积、辐射透过系数的改变;门窗烧损改变开口的流量系数、壁面积、辐射透过系数等。

3) 可以方便地计算火灾过程中建筑物内各部位的加压送风方案及防排烟设计方案实施后的效果,提出修改意见,实现保证建筑物火灾安全状况下的性能化防排烟系统设计。

4) 软件对计算结果提供了丰富的查询功能和图表表达功能,壁体温度的输出结果可以三维显

①☆ 王厚华,男,1952 年 5 月生,硕士,副教授

400045 重庆大学城环学院

(023) 65121647

E-mail: whhxinxiang@yahoo.com.cn.

收稿日期:2007-12-05

* 重庆市重点攻关项目(编号:2006AB2004)

示。有利于用户更迅速、直观地根据计算结果分析火灾的规律和特点,随时查询各节点烟气特性参数。

5) 软件嵌入了半无限大物体传热计算模型和有限厚墙体传热计算模型,用户可根据建筑物可燃物容量判断火灾燃烧时间的长短,自由选择传热模型进行计算。前者计算速度更快,但计算精度不如后者。

6) 软件嵌入了国内外经实验整理出来的各种稳态火源与非稳态火源计算式^[4],方便了用户的使用。

软件的具体使用方式可由图 1 所示的程序框图来表示。系统预测计算的执行步骤如下:

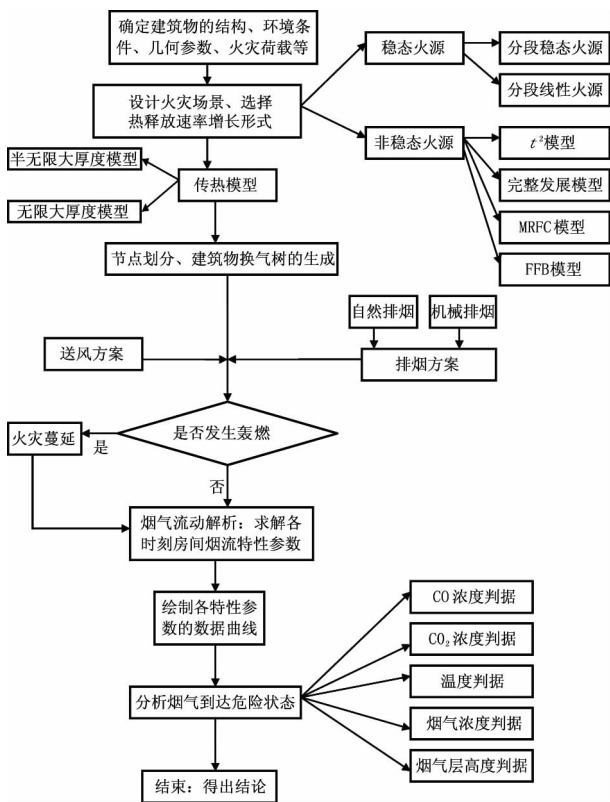


图 1 预测系统程序框图

1) 对于所分析的建筑物,输入环境气象条件,包括室外风速、风压、气温。根据建筑物的构造和火灾中构造的改变,查阅相关资料,输入开口的风压系数、流量系数、辐射透过系数以及建筑物构造的相关几何数据;输入墙体各材料的导热系数和比定容热容等物性参数。

2) 根据建筑物各室的使用功能,设计火灾场景,选择热释放速率增长形式,包括稳态火源和非

稳态火源。热释放速率可采用经验数据,也可由系统直接提供。系统提供的稳态火源包括分段稳态火源和分段线性火源;非稳态火源包括 t^2 火源、完整发展模型火源、MRFC 火源和 FFB 火源^[4]。

3) 选择墙体传热子模型。如燃烧时间较短,可选择半无限大厚度传热子模型;如燃烧时间较长,可选择有限厚度传热子模型。后者计算准确度更高,但收敛速度更慢。

4) 划分节点。将建筑物的各房间和各楼梯间作为节点,楼梯井用各层楼面分割成不同节点,走廊型通道按面积近似与房间相等划分成节点,根据图论原理将建筑物转化为节点和枝(开口)构成的建筑物换气树,形成换气回路接续矩阵 $[I]$ 和闭环矩阵 $[L]$ 。本系统中,建筑物换气树的生成是依靠电脑自动实现的,使用者仅需将建筑平面图输入电脑,即可由系统自动生成建筑物换气树,自动形成换气回路接续矩阵 $[I]$ 和闭环矩阵 $[L]$ 。关于建筑物换气树的自动生成,文献^[5]中已进行了报道。

5) 输入防排烟方案,如为自然排烟方式,即可进行下一步骤;如为机械防排烟,则需输入送风量与排烟量。

6) 判别是否发生轰燃^[5]。

7) 计算建筑物各开口烟气质量流量、压差、烟气浓度、 CO_2 浓度、 CO 浓度和壁温随时间的发展变化规律,系统自动生成各参数随时间的变化曲线。

8) 分析烟气到达危险状况的时间,系统自动提供 CO 浓度判据、 CO_2 浓度判据、温度判据、烟气浓度判据以及烟气层高度判据。

9) 结束,给出计算分析结论。

2 算例验证与实验研究

2.1 算例验证

算例验证的资料来源于文献^[6],建筑结构、开口的基本情况、火源条件、人员停留情况以及各计算用初始参数详见文献^[7]。为便于比较,在输入同一组初始数据后,将日本软件的计算结果(扫描得到)与本软件的计算结果描绘在图 2 上。计算过程中,取时间步长 $\Delta\tau=5\text{ s}$ 。为节省篇幅,本文仅绘出着火室的温度数据比较图。

从图 2 中可以看出,根据本预测系统开发出的计算软件与日本同类软件的计算结果非常接近,

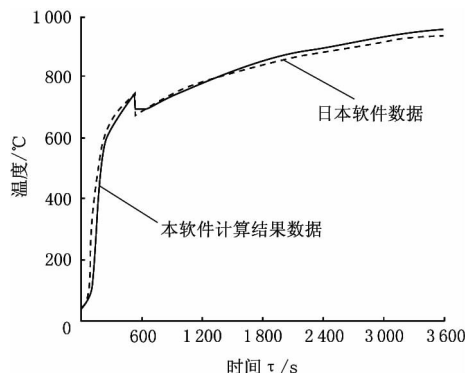


图2 着火室温度数据对比图

两者间的最大误差发生在 $\tau=3\ 600\text{ s}$ 的时刻,该时刻本软件的计算室温为 $968\text{ }^{\circ}\text{C}$,日本软件为 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$,绝对误差 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对误差小于 3% 。从而证实了本软件的计算结果与日本软件是一致的。由于日本软件的计算结果与其实验数据吻合得相当好^[6],因此可进一步证实本系统的数学模型可靠,算法正确,预测系统的开发是成功的。

2.2 实验研究 1

本实验模型为一真实的实体建筑,高 3 m ,其平面尺寸及测点的布置如图 3 所示。图 3 中,“○”表示热电偶测试柱,“△”表示烟气流速及烟浓度、 CO_2 浓度采集测试柱。输入各开口几何尺寸及结构材料、环境气象条件、墙体各材料的导热系数和比定容热容。火源采用含水率为 $8\%\sim 10\%$ 的长条形松木,质量分别为 10 kg , 50 kg , 100 kg ,构成了 3 种不同的火荷,其燃烧发热量采用失重测量法测定。

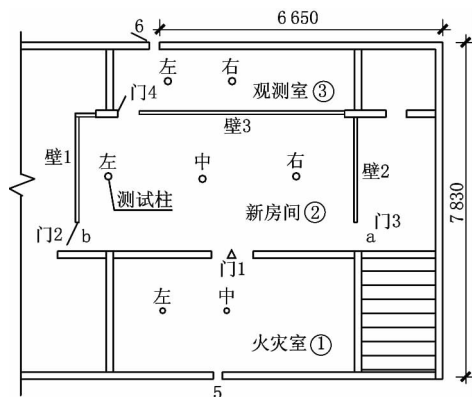


图3 实验研究 1 模型平面及测点布置图

未标注的壁面均为砖砌结构,两面抹灰。壁 3 为玻璃壁面,③室为观测室,室内设有探照灯及摄像系统,可观察到实验中的烟流运动情况。②室

中心有一排烟口,实验中当风机开启时可通过该排烟口将烟气排出。测温系统由竖向布置的 7 根测试柱组成,①室和②室的测试柱上各设置 9 个测温热电偶,位置最高的测点距离顶棚 0.1 m ,往下每两个测点间距为 0.2 m 。③室的两根测试柱上各设置了 4 个测温热电偶,其高度距顶棚分别为 $0.1, 0.3, 1.3, 2.55\text{ m}$ 。测试系统的布置充分考虑到对称性和代表性。测量数据由数据采集系统自动巡检采集,巡检周期为 5 s ,采集的数据输入计算机后,由打印机实时打印。所用测量装置均为先进的火灾实验专用装置,所有的热电偶均经过严格校验。

将实测的燃烧发热量、排烟量以及其他初始数据输入计算机,取时间步长为 5 s ,采用烟流特性预测系统进行计算。计算结果与实验结果描绘在同一坐标图上,由于篇幅限制,本实例中仅给出有代表性的两个不同方案下的温度数据比较图。更详细的资料可参阅相关文献^[8]。

从图 4,5 可以看出,火荷较小(燃烧质量分别为 50 kg 和 10 kg)的情况下,火灾初期,本系统应用软件的计算结果略高于实测结果。随着火灾过

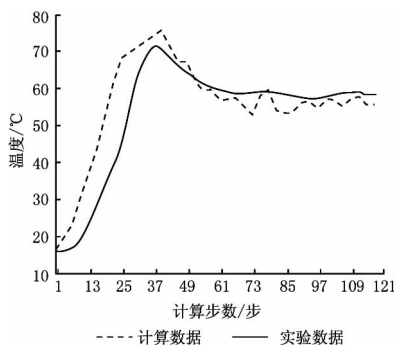


图4 50 kg、无排烟,②室温度数据比较图

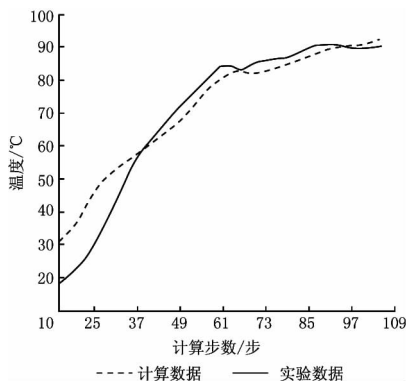


图5 10 kg、有排烟,①室温度数据比较图

程的进行,两者的误差减小。当火荷增加至 100 kg 的时候,计算结果与实验数据吻合得相当好,所有的比较结果都充分证实了这一点^[8]。从网络模型把每一个受限空间作为一个节点,假设任一时该节点具有均匀温度、密度等物性参数的特征来看,当室内可燃物容量较大时,采用网络模型开发出的预测软件具有足够的准确性。即使火荷仅为 10 kg,软件的计算结果也能够准确地描述建筑

物火灾的发展及变化趋势。

2.3 实验研究 2

模拟对象为四川消防科研所为进行“地下商业街火灾烟气流动特性实验研究”修建的实体建筑。该建筑按 1:1 的比例修建,建筑面积为 640 m²,净空高度为 3 m,通道长 67 m,宽 4 m。两端各设一个出入口,通道两侧为模拟铺面。平面图如图 6 所示。

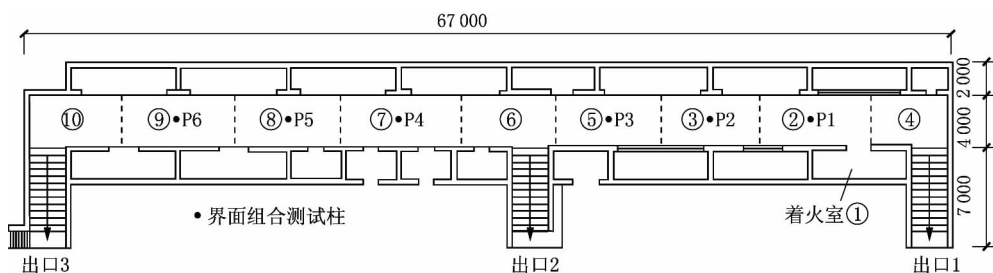


图 6 地下商业街建筑平面图

本模拟作了如下的假设:1) 着火室①门全开,所有铺面全关;2) 出口 2 关,出口 1,3 全开。图 7 为该建筑物的换气树。建筑物换气树以室外为基点 0,节点数 $m=10$,枝数 $n=12$,根据图论原理,可建立 $m \times n=10 \times 12$ 的换气回路接续矩阵, $(n-m) \times n=2 \times 12$ 的闭环矩阵,加上 n 个流量与压差关系式,线性无关方程组由 24 个线性无关方程式组成。

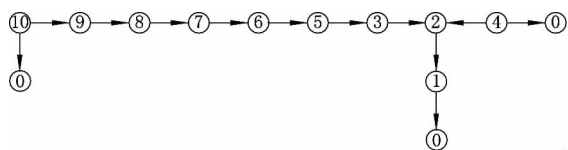


图 7 地下商业街网络换气树

实验火源为长条形木材,含水率 8%~10%,截面尺寸为 5 cm×5 cm,长 25 cm,质量 10 kg。燃烧时用失重法确定火源的热释放速率。开口条件:铺面全关,出口 2 关,出口 1,3 开。防排烟方式:自然补风、自然排烟。室外条件:无风,温度 20℃。

图 6 中“●”处布置 P1~P6 六个组合测试柱,每个测试柱上沿高度方向布置 9 个温度测点,其高度距吊顶分别为 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,1.1,1.3,1.5,2.55 m;3 个流速测点,其高度距吊顶分别为 0.5,1.0,1.5 m;6 个烟浓度测点,其高度距吊顶分别为 0.1,0.3,0.6,0.9,1.2,1.5 m;1 个化学成分

采气样点,其高度距吊顶 1.5 m。

模拟计算过程中,时间步长为 5 s,模拟时间为 1 800 s,共 360 步。对包括室外节点共 11 个节点的模拟耗时约 10 min。实验过程中,采用体积加权平均法求取节点温度平均值^[9]。

图 8 中实验温度曲线即为按此原则描绘出来的平均温度曲线,可以看出,软件计算结果与实验结果变化趋势是一致的。将 P1 测试柱实验数据与节点②的软件计算数据列入表 1,从表 1 可见,温度最大值相对误差不超过 14%,全时间范围内温度平均值相对误差不超过 3%,证明软件对走廊烟气温度模拟是成功的,模拟的结果是可靠的。其他节点处亦可得出相同的结论。由于计算热释放速率时采用的是失重法,将所有失去的质量均考虑转化为热量,而木材含 8%~10%的水分。燃

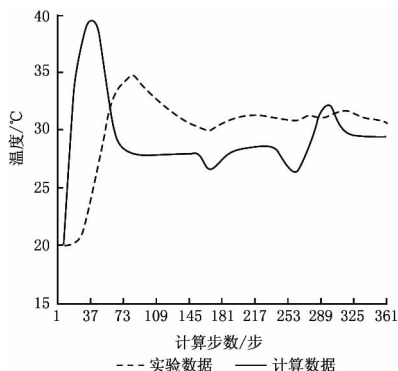


图 8 P1 处温度实验结果与计算结果对比

表 1 P1 温度实验数据与计算数据比较

实验数据		计算数据		相对误差/%	
最大温度 $t'_{\max}/^{\circ}\text{C}$	平均温度 $t'_{\text{mean}}/^{\circ}\text{C}$	最大温度 $t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	平均温度 $t_{\text{mean}}/^{\circ}\text{C}$	$\frac{t'_{\max}-t_{\max}}{t_{\max}}$	$\frac{t'_{\text{mean}}-t_{\text{mean}}}{t_{\text{mean}}}$
34.8	30	39.41	29.26	13.2	2.5

烧进入稳定阶段前,水分蒸发不仅不能放热,还要吸收汽化潜热,所以模拟计算的热释放速率偏高,温度最高值出现时间偏早。火灾进入稳定燃烧阶段后,两条曲线趋于一致。

图 9 为着火室 CO_2 质量分数计算数据与实验数据对比图,二者随时间的变化趋势非常相似,但计算值高于实验值,主要原因是:1) 单个测点并不能代表整个节点的平均值;2) 模型中 CO_2 质量分数与热释放速率相关,热释放速率越高, CO_2 质量分数越大。由前述可知,在燃烧初期模拟计算的热释放速率是偏高的。

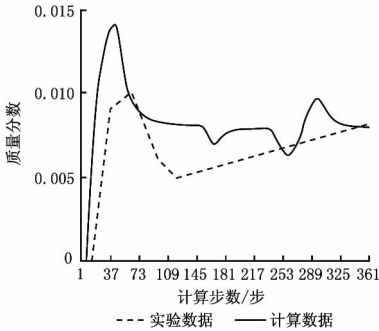


图 9 着火室 CO_2 质量分数计算数据与实验数据

烟气在水平方向上的蔓延速度及距离是防排烟系统设计和安全疏散设计的重要依据,是判别火灾初期人员能否安全疏散的重要指标。烟气浓度、 CO_2 质量分数以及温度变化均可反映烟气的蔓延情况,本模拟计算中,取 CO_2 质量分数的变化情况进行分析。通过某节点 CO_2 质量分数发生改变的时间来表示烟气侵入节点的时间,比较各个节点烟气浓度、侵入时间的早晚和节点间距离,可以得出烟气在走廊中的水平蔓延平均速度,从而为安全疏散设计提供依据。计算结果表明,烟气侵入节点②的时间为 40 s,侵入节点⑨的时间为 180 s^[10],节点②与节点⑨之间的距离为 45.8 m,烟气在走廊中的水平平均蔓延速度为 45.8 m/(180 s-40 s)=0.33 m/s。实验中 P1 处距吊顶 0.1 m 的烟感装置感受到烟气入侵时间为 75 s,P6 处距吊顶 0.1 m 的烟感装置感受到烟气入侵时间为 210 s^[11],水平平均蔓延速度为 45.8 m/

(210 s-75 s)=0.34 m/s,二者相对误差非常小(2.9%)。烟气侵入时间决定了某一时刻烟气污染的范围,计算结果比实验结果侵入时间要早,这是因为烟感装置本身对烟气的响应存在滞后,烟气到达烟感装置测点位置之后,经一定时间后烟感装置才能作出反应。对于安全疏散设计来说,这样所得的结果是偏安全的。

3 应用实例

应用实例引自文献[12]。旅馆建筑物的某层(如图 10 所示),共 10 个客房,各房间通过单

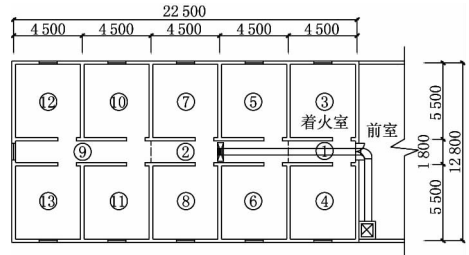


图 10 建筑物平面图

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,图 11 为模拟建筑物网络换气树。设模拟建筑房间③着火(因房间③最靠近出口,其着火为最不利条件),普通装修,火源热释放速率为 125 kW/m²,模拟中假定火源为非稳态火源,热释放速率以 t^2 形式增长,火焰蔓延为中速火发展形式,火灾发展系数值为 0.011 7 kJ/s³,最大热释放速率值为 3 100 kW。计算时间步长为 5 s,计算步数为 360 步。

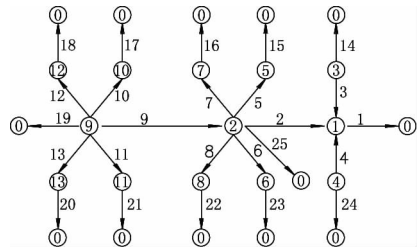


图 11 建筑物网络换气树

采用负压机械排烟,排烟面积按文献[13](以下简称《高规》)规定的内走道排烟面积计算,即走道的地面面积 40.5 m² 与连通走道的设固定窗的房间③的面积 24.75 m² 之和 65.25 m²,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”为基准,将排烟量向左右两边扩展,以 $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 为一个步长,分别计算排烟量为 54, 60, 66, 72, 78 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时建筑物火灾时的烟气流动特性。

在建筑物火灾时的最不利情况(最靠近出口的房间③着火)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,房间内人员只能通过右侧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 ,在走廊中疏散速度为 0.5 m/s ;确认反应时间为 90 s,计算得到该建筑最大所需安全疏散时间(离出口最远的房间③所需安全疏散时间) $RSET=262 \text{ s}$ 。

自然排烟时走廊至楼梯间前室的防火门在前

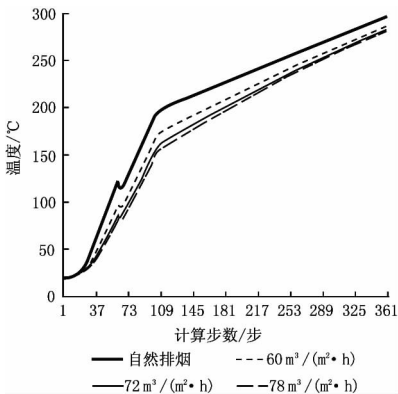


图 12 节点①温度曲线对比

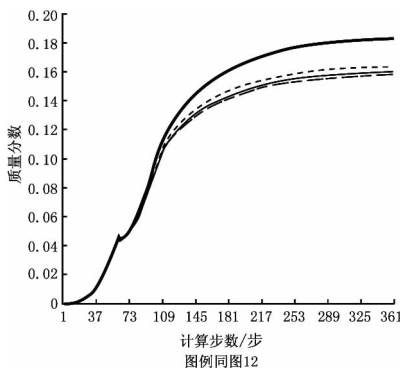


图 13 节点①烟气质量分数曲线对比

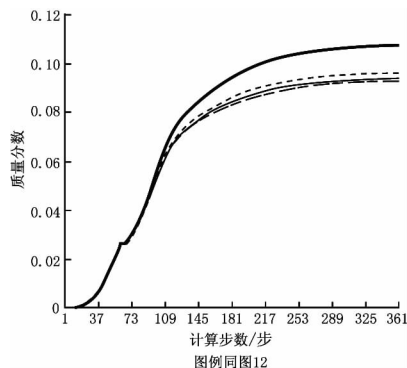


图 14 节点① CO_2 质量分数曲线对比

根据火灾危险状态判据^[12](临界温度为 78°C 、临界烟气质量分数为 0.053、临界 CO_2 质量分数为 0.046),对比图 12~14,可以看到自然排烟情况下,节点①在 52 步即 260 s 时温度值为 97.4°C ,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 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,节点①在 52 步即 260 s 时温度值为 76.4°C ,53 步即 265 s 时温度值为 78.3°C ,低于该建筑物在模拟条件下的温度临界值。此时烟气和 CO_2 的质量分数分别为 0.042, 0.023, 均低于火灾危险状态的临界值。即 $ASET > RSET$,可见在普通装修、火源热释放速率为 125 kW/m^2 的条件下,机械排烟量按 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 设计是完全可行的。但总排烟量 $L = 65.25 \text{ m}^2 \times 60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 3915 \text{ m}^3/\text{h}$,小于《高规》规定的最小排烟量 $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

随着排烟量增大到 $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,排烟效果

60 s 时全开,60 s 以后右侧防火门关闭;着火房间的窗户在前 300 s 关闭,300 s 时崩裂;随机设定房间⑩,⑬,⑧,⑥的窗开启,总开启面积为 10.8 m^2 ,其余窗关闭。运用烟流预测系统应用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,本实例中仅绘出节点①的烟气特性比较图。

从图 12~14 中可以看出,自然排烟时各节点温度、烟气质量分数均呈上升的趋势;设置机械排烟时,各节点烟气质量分数先呈较快速的上升趋势,到达一定时间以后趋势减缓,逐渐趋于稳定。各个节点的温度、烟气质量分数均低于同时刻自然排烟的情况,且排烟量越大,下降越大。排烟系统的设置延缓了烟气温度的上升,对安全疏散逃生起到了重要作用。

较 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 有明显改善,进一步增大排烟量至 $78 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,温度、烟气和 CO_2 质量分数都与 $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时非常接近,排烟效果已无明显改善,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,导致排烟效果无明显改善。因此过大地增加排烟量是无益的。

因房间③着火是火灾时安全疏散的最不利情况,所以不需再考虑着火房间位于其他位置时的情况。

其他条件不变,改变火源强度,设上述建筑物为精装修,热释放速率为 250 kW/m^2 ,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 $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 进行计算,节点①计算结果如图 15~17 所示。自然排烟时,节点①在 53 步即 265 s 时温度为 115.7°C ,不能满足安全疏散要求。 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的机械排烟量时,节点①在 53

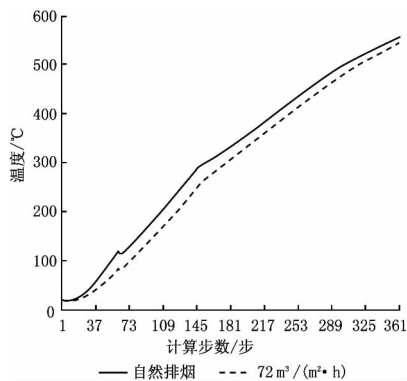


图 15 节点①温度曲线

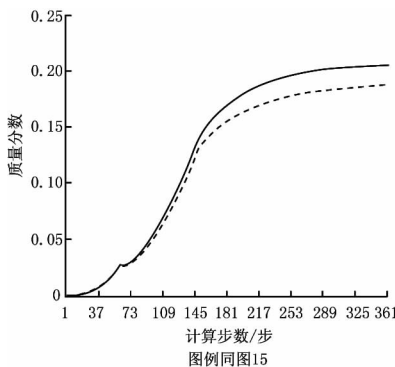


图 16 节点①烟气质量分数曲线

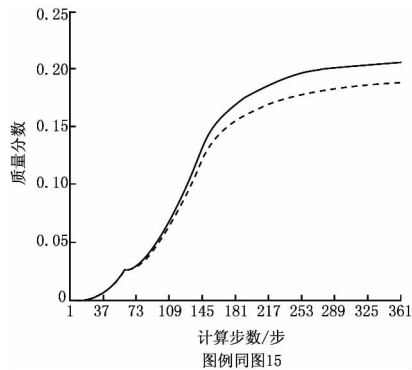


图 17 节点①CO₂ 质量分数曲线

步即 265 s 时温度为 83.5 °C, 不能满足安全疏散要求; 而 $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的机械排烟量时, 节点①在 53 步即 265 s 时温度为 76.8 °C, 低于临界温度 78 °C; 烟气的质量分数为 0.037, 低于临界烟气质量分数 0.053; CO_2 质量分数为 0.031, 低于临界 CO_2 质量分数 0.046, 即有 $\text{ASET} > \text{RSET}$ 。故该建筑物在模拟条件下的最佳机械排烟量为 $72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

本实例的计算结果与四川消防科学研究所通过实体实验所得出的结论相吻合。本文研究得到的另一个重要结论是: 总排烟量 = 单位面积排烟量 × 排烟面积, 可不受《高规》规定的最小排烟量 $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ 的限制。

4 结论与展望

经过 10 余年不懈的努力, 在大量理论研究和实验研究的基础上, 建筑物火灾烟流特性预测系统已基本成熟, 具备了进入市场的条件, 可以成为广大建筑设计师、设备工程师、消防建审人员和消防科研人员科学、合理、简单、快速使用的工具, 其研究成果已在相关职能部门试用并得到了充分的肯定。但系统的推广使用仍然存在不少的问题, 首先, 系统对使用者的专业知识要求比较高, 使用者必须对系统的数学模型有充分地了解, 能熟练地为建筑物划分节点, 为各壁体和开口编号; 其次, 系统需要输入的初始数据很多, 容易出错; 此外, 网络模型的计算精度比较粗糙, 不适用于需要精确计算的场合。因此, 场区网络模型的使用、大型数据库的建立、喷淋系统设置情况下的性能化分析计算等都是有待深入研究解决的问题。目前所有这些问题都在进一步的研究中, 相信不久的将来, 简单实用的建筑物火灾烟流特性预测

系统必将广泛地应用在我国建筑物防排烟系统的性能化设计中。

参考文献:

- [1] 严治军. 建筑物火灾烟气流动性状解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(2): 23-30
- [2] 严治军. 火灾建筑的室温预测法[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(3): 1-7
- [3] 严治军. 火灾建筑的热传导解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(5): 107-111
- [4] 何晟, 王厚华. 非稳态火源热释放速率在火灾网络模型中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(2): 73-76
- [5] 韩武松. 建筑物换气树生成技术研究及烟流预测软件的完善[D]. 重庆: 重庆大学, 2007
- [6] 日本建筑研究协会. 火灾时的烟流控制以及逃难方法研究报告书[R]. 日本建筑研究协会, 1993
- [7] 王厚华. 建筑物火灾室温预测网络模型的算例验证与实验[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(4): 77-82
- [8] 罗庆. 建筑物烟气流动性状实验研究及其预测软件的完善[D]. 重庆: 重庆大学, 2002
- [9] 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): 88-92
- [10] 谢元一. 建筑物走廊型通道中火灾烟气流动特性及其防排烟系统特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005
- [11] 张文良, 兰彬, 刘军军, 等. 地下商业街火灾烟气流动特性实验研究报告[R]. 成都: 公安部四川消防科学研究所, 2000
- [12] 王厚华, 韩武松, 何晟, 等. 建筑物走廊机械排烟量性能化研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(9): 65-69
- [13] 中华人民共和国公安部. GB 50045—95(2005 版) 高层民用建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005