

文章编号:1006-7329(2001)01-0036-06

建筑物火灾烟气流动性状预测

严治军, 刘方, 李楠

(重庆大学B区 城市建设学院, 重庆 400045)

摘要:述及国家自然科学基金资助项目《建筑物火灾烟气流动性状预测》的主要研究成果。介绍建筑物火灾烟流数学模型及其应用软件,并将数值模拟结果与实体火灾试验结果进行比较。

关键词:建筑火灾; 烟气流动; 数值模拟; 火灾试验

中图分类号:K121

文献标识码:A

80年代以来,国际上关于建筑防排烟理论,即火灾烟气流动与控制的研究主要采用两种方法:一是开展火灾烟流试验,特别是实体火灾烟流试验研究,通过试验来分析、认识、掌握火灾烟流规律及其控制原理;二是采用计算机模拟的研究方法。众所周知,不同的建筑形状与体量、不同的室内分隔与布局、不同的地理环境与气象状况都将影响建筑火灾烟气流动,试图针对所有不同的建筑、不同的火灾条件来开展火灾烟流试验,显然是不现实的。试验只能是针对典型的建筑、典型的条件进行,不可能包罗万象。因此,计算机模拟的研究方法便很有现实意义。该方法的前提是必须建立正确、可信的火灾烟流数学模型,开发火灾烟流性状预测软件,供建筑防火特别是防排烟研究设计者、建审工作者使用。为此我们承担了国家自然科学基金资助项目《建筑物火灾烟气流动性状预测》的研究,本文述及其主要研究成果。

1 火灾烟流数学模型

课题组在深入分析、研究国际有关火灾烟流研究成果的基础上,认真吸取国外研究的成功经验,并针对国外烟流模型存在的问题进行改进,从而建立建筑火灾烟流数学模型。该数学模型主要由室温解析、烟气流动解析以及围护结构传热解析三部分组成。

烟气流动解析的基础是建立房间的质量平衡式,即某室的质量发生速度等于通过该室各开口质量流量的代数和:

$$V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \sum (m_{ij} - m_{ji}) = M_i \quad (1)$$

式中: m_{ij} ——通过开口从*i*室流向*j*室的烟气流量,kg/s;

m_{ji} ——通过开口从*j*室流向*i*室的烟气流量,kg/s;

M_i ——*i*室的质量发生速度($M_i = M_{com,i} + M_{sup,i}$)

$M_{com,i}$ ——*i*室火灾时的燃烧速率,kg/s;

• 收稿日期:1999-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59578048)

作者简介:严治军(1944-1999),男,四川人,教授,博士生导师,主要从事空调、通风与防排烟研究。

$M_{sup,i}$ ——向 i 室的送风速率, kg/s;
 ρ_i —— i 室的烟气密度;
 V_i —— i 室的体积。

通过各开口的质量流量取决于各开口两侧房间温度差、压差以及中和面的位置。一般:

$$m_{ij} = f(p_{ij}, T_i, T_j, \mu)$$

$$m_{ji} = f(p_{ji}, T_i, T_j, \mu)$$

式中: μ ——开口流量系数;

B ——开口宽度, m;

p_{ij}, p_{ji} —— i 室与 j 室开口两侧的压差, Pa;

T_i, T_j —— i 室与 j 室温度, K。

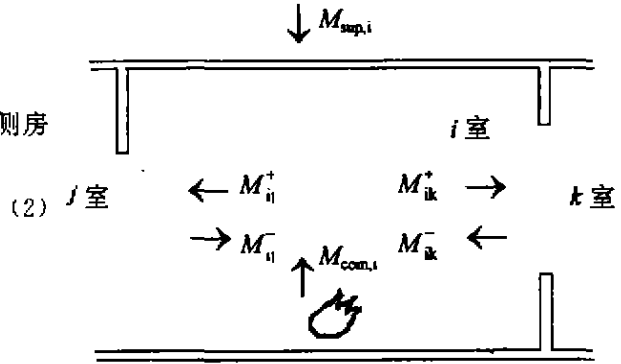


图 1 房间质量平衡图

因此,由方程(1)建立建筑物全部房间的联立方程式,同时求解质量流量与各开口处的压差,则能得到各开口的流量。在解法上运用图论基本原理构造建筑物换气“树”及换气回路接续矩阵。采用该方法可同时求出建筑物各房间、各通道不同时刻的压力、流量^[1]。

室温解析以热平衡原理为基础,根据各房间的产热量、传导热量建立热平衡方程,根据传热量与室温的关系,将热平衡式转化为各室温度为未知数的方程组进行联立求解。着火室 i 的热平衡式:

$$I_{Ci} = I_{Li} + I_{Ri} + I_{Wi} + I_{Ai} \quad (3)$$

式中: I_{Ci} ——单位时间着火室可燃物燃烧发热量, kW;

I_{Li} ——单位时间通过开口部喷出火烟流所带走的热量, kW;

I_{Ri} ——单位时间通过开口部的辐射热损失, kW;

I_{Wi} ——单位时间通过周边壁表面所吸收的热量, kW;

I_{Ai} ——单位时间室内气体的吸热量, kW。

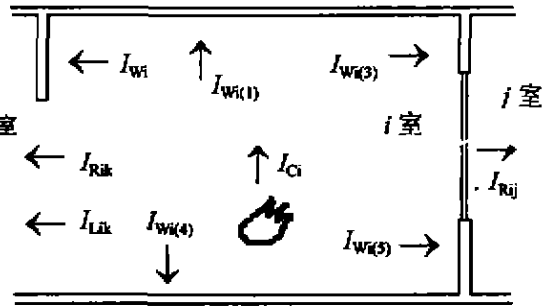


图 2 着火室热平衡图

其中:

$$I_{Ci} = KA \sqrt{H} q_{co} \quad (4)$$

式中: K ——比例系数;

A ——开口面积, m^2 ;

H ——开口平均高度, m;

q_{co} ——每 1 kg 可燃物的燃烧发热量, MJ/kg。

I_{Li}, I_{Ri} 是所有开口热损失之和,即:

$$I_{Li} = \sum_j I_{Lj} = \sum_j (C_{pi} m_{ij} T_i - C_{pj} m_{ji} T_j) \quad (5)$$

$$I_{Ri} = \sum_j I_{Rij} = \sum_j A_{Rij} \tau_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (6)$$

式中: C_p ——气流定压比热;

A_{Rij} ——开口面积, m^2 ;

τ_{ij} ——辐射透过率;

σ ——斯蒂芬波尔兹曼常数。

I_{Wi} 是所有壁面吸收热量之和:

$$I_{Wi} = \sum_k I_{Wi(k)} = \sum_k A_{Wi(k)} \alpha_{i(k)} (T_i - T_{Wi(k)}) \quad (7)$$

式中: $A_{Wi(k)}$ —— i 室第 k 个壁面的面积, m^2 ;

$\alpha_{i(k)}$ —— i 室第 k 个壁面的表面换热系数, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$;

$T_{w,i(k)}$ —— i 室第 k 个壁面的表面温度, K 。

室内气体吸热量

$$I_{iv} = \rho_i C_p V_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \quad (8)$$

式中: ρ_i 、 C_p 、 V_i 、 T_i —— i 室气体的密度、定压比热、体积、温度。

将以上各项热量表达式热平衡方程(3)便可得到以室温 T_i 为未知数的方程式, 采用同样方法可以建立建筑物其它房间的以室温为未知数的方程式, 这样就构成了求解建筑物各房间温度的联立方程组, 联立求解可求得各个时刻房间的温度^[2]。

围护结构的传热解析是建立房间热平衡的前提。理论上, 传热应是三维的, 但考虑到各壁面高、宽尺寸与壁厚相比均很大, 故按一维传热来处理, 其一维热传导方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9)$$

式中: T ——温度, K ;

τ ——时间, s ;

λ ——导热系数, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

c ——比热, J/kgK 。

采用有限差分法离散化方程, 从而进行求解^[3]。

2 计算程序的编制与主要功能

根据上述数学模型编制成大型通用计算程序。由主程序和 42 个子程序构成, 可归纳为室温计算、墙体传热计算、烟气流动计算。程序框图如图 3, 该程序主要功能有:

1) 可以计算出任意时刻建筑物各部位的温度、压力、烟气浓度以及各开口处的流量等。实现了对火灾烟流性状的动态模拟。据此, 可以了解火灾进程中疏散通道上的温度、烟气浓度等情况, 进而对安全疏散系统作出评价。

2) 在计算中可以方便地处理随火灾的发展进程所导致的建筑构造的变化。例如, 随着人员的疏散改变各门的开闭状况; 随着门、窗的烧损改变开口流量系数、墙体面积等。

3) 可以方便地处理火灾进程中建筑物内的适当部位进行加压送风或排烟, 进而可以对不同的排烟方案进行量化分析, 以实现防排烟系统设计的优化。

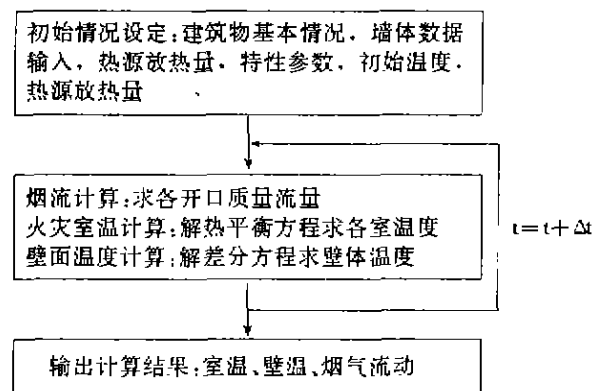


图3 计算程序流程图

3 实际火灾试验及试验与模拟计算结果的比较分析^[4]

3.1 火灾试验

为了对所建的数学模型进行检验, 课题组在公安部四川消防科研所高层火灾试验塔内开展了

实际火灾试验(图 4)。试验安排在二楼中部居室。我国现阶段居室木材的使用率低于日本、瑞典等国,据文献报道日本、瑞典居室火灾荷载为 10 kg/m^2 ,为此试验采用燃料为 125 kg 干木材(折合火灾荷载为 7 kg/m^2),木材呈井字型整齐堆放在电子称上。电子称用于记录火灾过程中燃烧的失重情况,以此计算可燃物燃烧发热量。火灾过程中,所有防排烟设施均关闭。

试验采用的主要仪器仪表列于表 1 中。

表 1 试验用仪器仪表

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	热点偶	镍铬-镍硅	20	量程 $0 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$
2	微压计	MP6 KAV(0.5 Pa)	2	量程 $0 \text{ Pa} \sim 6 \text{ }000 \text{ Pa}$
3	数字式微差压计	Setra264 型(0.05 Pa)	2	量程 $-50 \text{ Pa} \sim +50 \text{ Pa}$
4	霍尔变送器	YSH-1	11	量程 $-120 \text{ Pa} \sim +120 \text{ Pa}$
5	热球风速仪	QDF-2A(0.5 m/s)	2	量程 $0 \sim 10 \text{ m/s}$
6	电子称		1	

热点偶共二十支,着火室布置十支热点偶,如图 5,在平面上有 5 个测点,竖向方向又有两支热点偶,分别距地面和顶棚的距离为 1.2 m 、 0.4 m 。着火室相邻房间各一支、走廊三支,前室两支、十楼前室一支、楼梯间一支。

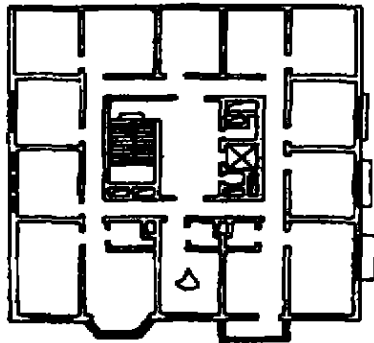


图 4 火灾试验平面图

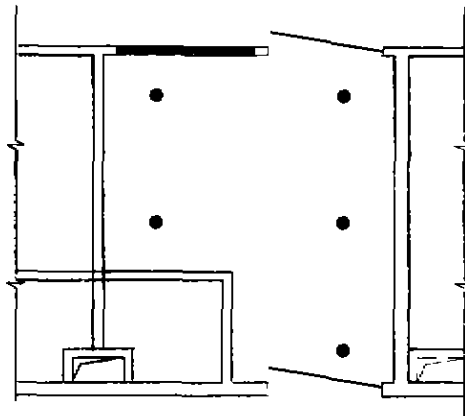


图 5 火灾室测点平面布置图

霍尔变送器的压力探头共有 11 个,其中,二楼楼梯间、前室、走廊、火灾室各一个,三楼楼梯间、前室、走廊各一个,九楼楼梯间、前室、走廊各一个,十楼楼梯间一个。

电子称位于火室中央,用于记录火灾过程中不断变化的燃烧物重量,以求得燃烧速度。试验塔底楼设有数据采集系统,测试的温度、压力等由该数据采集系统监控。

火灾试验步骤如下:

1)点火前将数据采集系统接通、开始运行直到各测点的初始值稳定,并记录各测点的温度与压力。

2)开始点火,数据采集系统每隔 30 s 记录一次数据。

3)模拟火灾时人员疏散情况,火灾开始后 30 s 打开火灾室的门,并保持开启;火灾开始后 40 s 打开前室门,三分钟关闭; 50 s 后打开楼梯间门,也在三分钟后关闭。火灾持续时间为 30 min 。

4) 30 min 后,消防人员进入现场,开始灭火工作。

燃烧发热速度(燃烧放热量)决定火灾的规模与进程,该放热量取决于燃烧速度 $I_c = 10 \text{ }638 W_{\text{mass}}$,其中燃烧速度 W_{mass} 为单位时间木材质量的减少。图 6 为火灾室放热量随时间的变化曲线。稳定燃烧阶段的平均放热量为

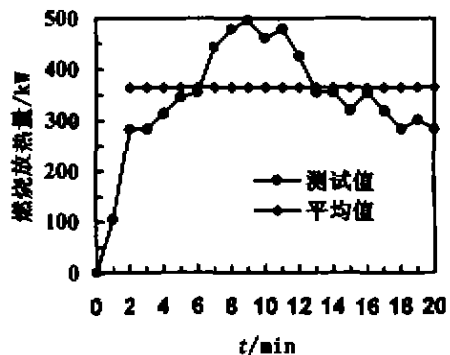


图 6 火灾室燃烧放热量随时间的变化

360 kW。

将火灾室内十根热点偶所得的温度值进行平均,将该平均值作为火灾室烟气温度,绘制出火灾过程室温变化图,见图6中的曲线。

通过开口的流量取决于两侧的压差,为此测定前室与楼梯间门洞压差值,进而求得通过该开口的流量,前室—楼梯间门的流量变化见图7中的曲线。

需要说明的是对于火灾试验的安排主要基于国外的火灾疏散试验以及疏散模型计算的结果。实际火灾发生时人员疏散情况非常复杂,与建筑布局情况、人员数目和年龄、起火位置、房间至疏散通道的开口情况等因素有关。而且实际火灾现场的防排烟设施可能有多种多样,考虑到火灾试验主要是验证烟流数学模型,为此火灾试验时防排烟设施均关闭。而且假定火灾开始发生后约30 s,人从睡梦中惊醒,迅速打开着火室门,开始逃生。经约5~10 s逃生者穿过走廊,打开走廊至前室的门进入前室,又经约5~10 s逃生者打开前室至楼梯间的门,从楼梯间疏散。

3.2 火灾室温度及前室至楼梯间的流量的比较分析

按照实际火灾条件与建筑数据,米用上述烟流计算程序进行预测计算。将实测数据与计算数据进行比较分析。火灾室温度的测量值曲线与计算值曲线的形状、走向一致,如图6。测量值与计算值均在8~9 min时达到最大,然后逐渐稳定,符合火灾发生规律。在开始阶段,由于火灾室内氧气较为充足,燃料充分燃烧,火灾室的温度明显上升;随着燃烧的继续,火灾室内氧气逐渐减少,火灾室的温度在相对稳定一段时间后开始逐渐下降,并有小幅波动。火灾可分为两个阶段,前一阶段火灾发展情况主要由燃料的情况支配,称为燃料支配型阶段;后一阶段火灾发展情况主要受室内含氧量支配,称为换气支配型阶段。8 min时计算值与实测值的绝对偏差为32.3℃,相对偏差19.3%;16 min时绝对偏差为34.1℃,相对偏差31.4%,计算值与实测值的平均相对偏差为15.4%。

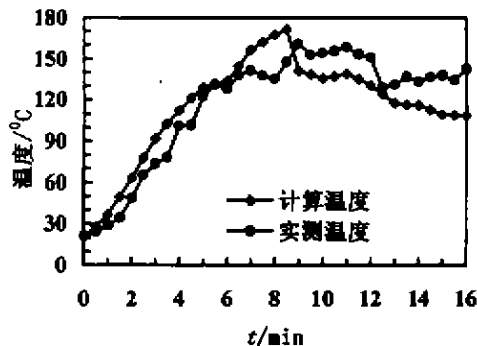


图7 实测温度与计算温度比较图

流量的测量值曲线与计算曲线的形状、走向一致,如图7。与温度曲线的变化类似,流量变化符合火灾发展规律。计算值与实测值的绝对偏差最大值在9 min,其值为0.015 kg/s,相对偏差平均为20.9%。

上述火灾室温度及开口流量的试验数据与运算数据分析表明,虽然测量值与计算值不一致,相对而言,计算曲线较为圆滑,这是由于理论计算,一些因素往往忽略或理想化,而实际火灾情况非常复杂,受很多偶然因素的影响,波动较大,且存在测量误差。但偏差值也不大,且符合火灾发展规律。为了进一步检验模型、算法及程序的可靠性,作者选用美国国家标准技术所的一组试验数据进行比较,如图9(火源位于着火房间中间,其燃烧放热量100 kW)^[5]。从图中可以看

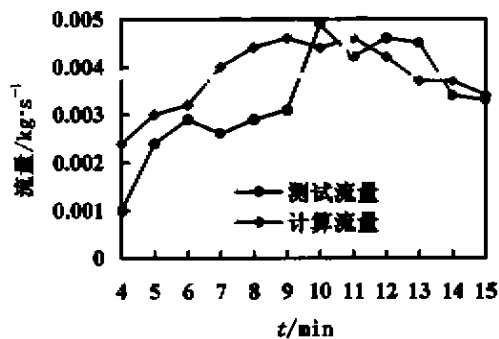


图8 实测流量与计算流量比较图

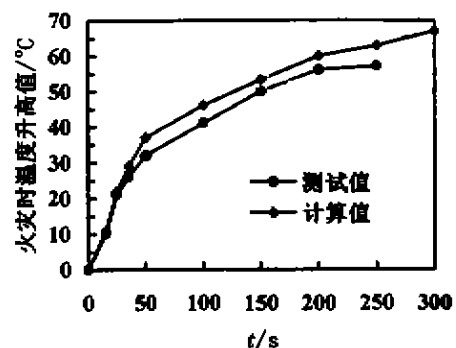


图9 火灾室平均温度随时间的变化

出计算值与试验值相符。

4 结束语

1) 概括了建筑物火灾烟流计算模型的基本原理和所开发的烟流预测软件,并用火灾试验进行了验证,表明所得的计算结果是合理的、可信的,这说明了本项目提出的烟流模型及其相应程序的正确性、可行性以及一定的实用性。建立的烟流预测软件,可作为建筑防排烟系统设计的评价工具。作为下一步的研究,一方面进一步改进、完善烟流数学模型及应用软件,另一方面开展建筑物疏散性状预测研究。

2) 目前火灾过程的计算机模拟的模型大体上分为场模型(Field Model)、区域模型(Zone Mode)、网络模型(Net Model)三种。国内外大多采用场模型和区域模型来研究火灾,本项目提出的建筑物火灾烟流数学模型则是一种网络模型。

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): 25-30
- [2] 严治军. 火灾建筑的室温预测法[J]. 重庆建筑大学学报, 1998, 18(3): 1-6
- [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] 严治军, 李楠, 刘方. 建筑物火灾烟气流动性状预测研究报告[R]. 重庆建筑大学, 1999
- [5] L. Y. Coppr, M. Harkleroad, J. G. Quintiere. An Experimental Study of Upper hot layer stratification in full scale multiroom fire scenarios[J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104: 741

A Study on Prediction of Fire Smoke Flow Properties in the Building

YAN Zhi-jun, LIU Fang, LI Nan

(Chongqing University B, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper presents results of a research project "The prediction of the Fire Smoke Flow Properties in the Building", supported by the National Natural Science Fund. The numerical model of fire smoke flow in the building and its applied computer software are outlined. The experimental results obtained from full-scale fire test are compared with the results of numerical prediction using computer software.

Keywords: building fire; smoke flow; fire test; numerical simulation