

建筑火灾烟气运动的数值模型综述

哈尔滨工业大学 施 微[☆] 高甫生

摘要 火灾烟气控制数值模拟以区域模型、场模型及网络模型为主,根据文献,对前两种模型归纳总结,并列表说明,其中包括 51 种区域模型和 18 种场模型。对区域模型、场模型及网络模型作了简要介绍和分析比较,并简述数值模拟计算过程中误差的产生及模型的验证。

关键词 建筑火灾 烟气控制 区域模型 场模型 网络模型 误差 验证

Overview of smoke control models in building fire

By Shi Wei[★] and Gao Fusheng

Abstract There are generally three major categories in smoke control models, which are zone model, field model and net model. Lists 51 zone models and 18 field models identified in the latest international survey in 2003. Briefly presents the three kinds of models and an analysis and comparison. Discusses the generation of errors and the validation of the numerical models.

Keywords building fire, smoke control, zone model, field model, net model, error, validation

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

1 研究的背景及意义

火灾的破坏性极大,它不仅造成巨大的社会财产损失,还严重地威胁着人的生命安全。国内外大量资料表明,火灾中导致人员死亡的主要原因是烟气。由于烟气的遮光性、毒性和高温的影响,不仅使建筑物内的能见度降低,延长了疏散时间,而且使人员在高温并含有多种有毒物质的燃烧产物的危险环境下停留较长时间。燃烧生成多种有害气体的同时造成缺氧,也会使人员窒息致死,或因窒息晕倒而被烧死。图 1 中列出了 1993—2003 年英国火灾的死亡人数与烟气导致死亡的人数对比^[1]。

利用数值模拟研究烟气运动规律,是随着计算机的出现并不断更新逐渐发展起来的,它越来越广泛地应用于火灾烟气研究的各个领域。数值模拟的方法使科研人员不必投入大量的人力物力财力去进行全尺寸火灾实验,只需掌握火灾相关参数并建立有效的火灾烟控模型即可进行模拟研究,是一种代价低、周期短且可多次复现的新型研究方法。

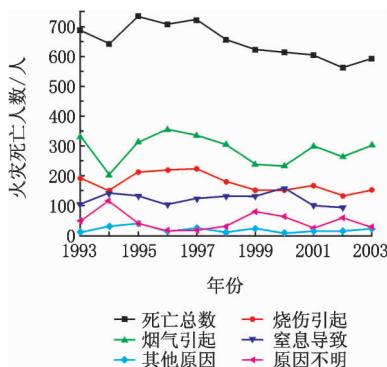


图 1 1993—2003 年英国火灾死亡人数

20 世纪 80 年代开始,尤其是 90 年代之后,计算机应用日益普及和飞速发展的计算机软硬件技术,为火灾烟气运动数值模拟提供了功能强大的研究工具。各种基于计算机使用的烟控模型的提出,

①☆ 施微,女,1982 年 3 月生,在读硕士研究生
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院 2644 信箱
(0451) 86282504
E-mail: melody_sw1982@gmail.com
收稿日期:2005-11-15

对于烟气运动的理论研究、防排烟系统设计方法及规范的制定与改进,有着重大意义。

2 火灾烟气数值模型发展现状

20 世纪 60 年代大量的建筑火灾事故表明,高层建筑的设计工作应当包括火灾烟气控制的相关内容,以确保防火安全。由此人们开始重视火灾烟气控制的研究,一些相关的烟气分析模型也相继出现。

美国、英国、加拿大、日本、荷兰等国家对火灾烟气模型的研究和开发起步较早,其中尤以美国标准技术局 NIST (National Institute of Standards and Technology) 为代表机构。早期开发的烟控模型中以网络模型为主^[2],如加拿大国家建筑研究院的 IRC 模型,NIST 建筑火灾研究实验室 BFRL (Building and Fire Researching Laboratory) 的 ASCOS 模型、CONTAM 模型及 SMACS 模型,美国 ASHRAE 的 SMOKESIM 模型,英国建筑研究部的 BRE 模型,英国 Oscar Faber & Partners 咨询工程公司的 Oscar Faber 模型,荷兰应用物理学院的 TNO 模型等。

1992 年 Friedman 曾对 62 种火灾与烟气运动的计算机模型进行分析^[3],依据研究区域中控制体的不同划分,大体上将这些模型分为场模型(field model)、区域模型(zone model)和网络模型(net model)。2003 年,美国的燃烧科学与工程 CSE (Combustion Science & Engineering) 机构的 Olenick 和 Carpenter 完成了对该工作的更新^[4],收集并分类整理的模型包括 69 种描述火灾烟气发展过程的模型(其中 51 种区域模型,18 种场模型),9 种探测器响应模型,24 种疏散模型,32 种火灾承受模型以及 32 种其他模型(因包括多类别属性在内,无法按个别属性分类,其中包括网络模型)。该机构同时在 Internet 上建立了公开的火灾烟气模型的资料库^[5],提供所收集到的各数值模型的简介。

建筑火灾烟气的数值模拟研究中使用最为广泛的是区域模型,其次为场模型、网络模型及场-区-网复合模型(FZN model)^[6],后者由中国科技大学火灾科学国家重点实验室的范维澄院士等人提出。

本文将结合文献中区域模型及场模型的最新收集成果,对两类模型进行总结并分类说明(见表

1,2),对区域模型、场模型及网络模型进行概括性介绍,并简述数值模拟计算过程中误差的产生及模型的验证。

表 1 区域模型

序号	模型名称	来源	编程语言	说明
1	ARGOS	丹麦		多室
2	ASET*	美国	FORTRAN	单室,无通风
3	ASET-B*	美国	BASIC	单室,无通风
4	BRANZFIRE*	新西兰	VB6.0	多室,多火源机械通风
5	BRI-2	日本		多楼层多室烟气运动
6!	CALTECH			轰燃之前火灾过程
7	CCFM. VENTS*	美国	FORTRAN77	多室含通风
8	CFAST*/FAST*	美国	FORTRAN/C	多室
9	CFIRE-X	德国	FORTRAN77	单室,液体碳氢池火
10	CFi ^{&}	法国	FORTRAN	多室,火灾危险性分析
11	COMPBRN-III*	美国	FORTRAN77	单室
12	COMPF2*	美国	FORTRAN66	轰燃后火灾过程
13	DACFIR-3* ^{&}	美国		飞机舱室
14	DSLAYV*	瑞典	PASCAL	单室
15	FASTLite*	美国	FORTRAN	多室
16!	FFM	美国		轰燃之前火灾过程
17!	FIGARO-II*	德国	FORTRAN	多室,火灾危险性计算
18	FIRAC ^{&}	美国		以 FIRIN 为核心,复杂通风系统
19!	FireMD	美国		单室
20	FIREWIND	澳大利亚	C	多室,含多个子模型
21	FIRIN ^{&}	美国		多室,复杂通风系统
22!	FIRM	美国	QBASIC/VB	单室
23	FIRST*	美国	FORTRAN77	单室单一区域,含通风
24#	FISBA ^{&}	法国		单室
25#	FPETOOL*	美国	FORTRAN	单室
26!	FMD	美国	FORTRAN	前室火灾
27	HarvardMarkVI*	美国	FORTRAN77	多室,FIRST 早期版本
28#	Hazard I*	美国	FORTRAN77	以 FAST 为核心
39!	HEMFAST	美国		室内家具火灾
30!	HYSLAV	瑞典		轰燃之前火灾过程
31	IMFE	波兰		单室,多风口
32	MAGIC ^{&}	法国	FORTRAN/C	多室,适用于核电站
33!	MRFC	德国	FORTRAN/C	多室,计算烟气运动及结构上的温度载荷
34!	NAT	法国	FORTRAN	单室,高温对结构的影响
35!	NBS	美国		轰燃之前火灾过程
36	NRCC1	加拿大	FORTRAN77	单室
37	NRCC2	加拿大	FORTRAN77	大型开放办公空间
38	OSU	美国		单室

续表

序号	模型名称	来源	编程语言	说明
39	Ozone*	比利时	FORTRAN/VB	单室单区域,评价建筑构件的耐火性
40!	POGAR	俄罗斯		单室
41!	RADISM	英国	BASIC	浮力流之中的顶棚射流、喷淋及通风的混合模型
42!	RFIRES	美国		轰燃之前火灾过程
43	R-VENT	挪威	PASCAL	单室,烟气通风
44	SFIRE-4*	瑞典	FORTRAN77	轰燃后火灾过程
45!	SICOM	法国	FORTRAN	单室
46!	SMKFLW	日本	FORTRAN77	单区域模型,模拟烟气运动
47!	SmokePro	澳大利亚	Delphi (PASCAL)	单室,计算烟层界面位置
48!	SP	英国		轰燃之前火灾过程
49!	WPI-2	美国		单室
50!	WPIFIRE	美国		多室
51!	ZMFE	波兰		单室

注:1) 模型名称右上角带有*标记的为免费发行,带有&标记的不能在PC机上运行;

2) 序号后带有!标记的为新增模型;

3) 序号后带有#标记的模型因重新分类而未出现在2003年该类模型列表中。

2.1 区域模型简介

区域模型是目前应用最为广泛的一类火灾烟气模型。早在20世纪70年代区域(zone)近似理论就用于模拟火焰及烟气层运动。区域模型通常是一维模型,把房间(受限空间)分为上部热烟气层与下部冷空气层两个控制体(见图2),用来计算室内火灾中的烟气流动、气体组分和温度。在火源所在房间,有时增加一些控制体来描述烟气羽流与顶棚射流。

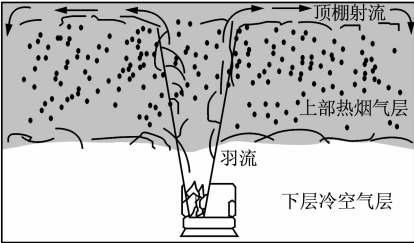


图2 区域模型图例

层内参数变化相对上下层之间的变化很小可忽略不计,即认为层内各物理量处处相等。因此在

表2 场模型

序号	软件名称及最新版本	来源及获取方式	编程语言	运行平台	简要说明
1!	ALOFT-FT V3.0	美国 NIST, 免费下载	FORTRAN77	PC 机	计算大型室外火灾烟气的生成过程,外界风速不为0
2	CFX-4 CFX-5	英国 AEA 公司, 商业购买	协议形式提供程序接口	PC 机 Unix 工作站	通用流体动力学软件,可模拟火焰蔓延、烟气运动过程,分析建筑构件耐火性能,评价消防系统
3	FDS V4	美国 NIST 下属 BFRl, 免费下载	FORTRAN	PC 机 Unix 工作站	低马赫数流体动力学模型,LES 及 DNS 求解,预测火灾过程,以及受通风、喷淋等影响下烟气的运动
4	FIRE V1.8	澳大利亚, 未发行	FORTRAN	PC 机	可预测固态及液态可燃物的燃烧率,模拟水雾喷射等现象
5	FLOW-3D	美国 FS, 商业购买	FORTRAN	PC 机	通用流体动力学代码
6!	FLUENT 6.2	美国,商业购买	C	PC 机 Unix	CFD 软件包,含多种离散格式及数值方法,能模拟流动、传热和化学反应等多种现象
7	JASMINE V3.1	英国,学术交流或商业购买	FORTRAN	PC 机 COMPAC 工作站	采用 PHOENICS 预测火灾过程,用于评价通风空调系统、喷淋系统及消防系统的性能
8	KAMELEON FireEx99	挪威,商业购买	FORTRAN77/C	Unix 工作站 PC-Linux 系统	求解受限/开放空间中温度场、浓度场及辐射场的分布,处理固体壁面的热力学响应,模拟喷淋对烟、火的抑制作用
9	KOBRA-3D WINKOBRA4.6	德国,商业购买	C++	PC 机	可模拟复杂几何空间中的烟气扩散及热量传递过程
10	MEFE V1.0	葡萄牙,未发行	FORTRAN77	PC 机	模拟单/双室内的火灾烟气运动。采用有浮力修正的 K-ε 湍流双方程模型,有限容积法(FVM)、交错网格求解技术
11	PHOENICS V3.4	英国,CHAM 公司,商业购买	FORTRAN/C++	PC 机 Unix 工作站	大型通用流体动力学软件,可求解流动、传质传热及燃烧问题,采用有限容积法,应用范围广
12	RMFIRE	加拿大,未发行	ANSI FORTRAN77	Silicon Graphics Personal IRIS	用于室内火灾烟气运动的瞬时计算

续表

序号	软件名称及最新版本	来源及获取方式	编程语言	运行平台	简要说明
13	SOFIE V3.0	澳大利亚, 商业购买	FORTRAN/C++	PC 机 Unix	可模拟受限空间中的火灾过程
14	SOLVENT V1.0	美国, 商业购买	FORTRAN/C++	PC 机	模拟管道中流体流动、换热及烟气扩散
15	SMARTFIRE V3.0	英国, 商业购买	C++	PC 机 Motif 工作站	基于 SIMPLE 算法的火焰数值模拟软件, $K-\epsilon$ 模型及六通量辐射模型, 可模拟多室火灾过程
16!	SPLASH	英国, 系统内使用	FORTRAN77	VAX	准场模型, 用于描述喷淋系统与火灾气体的相互作用
17	STAR-CD V3100A	英国, 商业购买	FORTRAN	PC 机 Unix 工作站	求解流动、传热、燃烧的大型通用软件, 对于复杂几何区域处理效果较好, 包含模拟工业厂房内火及烟气运动的标准模型
18!	UNDSAFE	美国/日本, 未发行	FORTRAN	大型机	预测围护结构内部开放空间火灾环境, 利用三维有限差分格式

区域模型中,物理量的变化是竖直方向的。这种分层假设是基于对真实火灾实验的观察,实验表明,在火灾发展及烟气蔓延的大部分时间内,室内烟气分层现象相当明显。因此普遍认为区域模拟给出的近似相当真实,是一种计算时间短、计算代价低又能保证足够精度的模拟方法^[7]。

区域模型通过求解一系列常微分方程(包括质量、能量守恒方程,理想气体方程以及对密度、内能的关联式)来预测上、下层温度,烟层界面高度,风口质量流量,热流量,壁面温度等参数随时间的变化。模型中火源的设置通常需要用户输入时间-释热率(heat release rate)曲线及材料的热物性等。壁面材料的热物性尽管随温度有所变化,但通常被视为常数。这种假设的根据在于,在所需的温度范围内,材料的热物性数据十分缺乏,而且对大多数材料来说,这些数据随温度的变化相对较小。

区域模型较场模型更适用于描述建筑结构之间的流体传输过程,如相邻房间烟气通过水平开口(如门、窗等)的传递。但对于几何形状复杂、有强火源或强通风的房间,其误差将会很大以至失去真实性,此类情况不宜使用区域模型。

表 1 列出 14 个国家的 51 种用于研究火灾烟气的区域模型。这些模型绝大多数采用两区域,仅 4 种模型是单一区域模型 (COMPf2, NRCC1, Ozone, SMKFLW)。有 20 种模型用于计算单室火灾,以 ASET, CFIRE-X, COMPBRN-III, FireMD, FIRM, FIRST, NAT, SmokePro 等为代表。14 种用于研究多室火灾烟气运动,以 BRANZFIRE, CCFM, VENTS, CFAST/FAST, HarvardMarkVI, MAGIC, MRFC 等为代表。另

外,不同的模型研究的火灾阶段也有差别,如 CALTECH, FFM, HYSLAV, NBS, RFIRES, SP 等 6 种模型用于轰燃前的火灾研究;COMPf2 与 SFIRE-4 两种模型着重处理轰燃后的火灾过程。19 种模型可计算自然通风/机械通风条件下的火灾烟气运动,除表中指明含通风系统外,还有 CFIRE-X, CiFi, DSLAYV, FIGARO-II, FMD, HarvardMarkVI, MAGIC, MRFC, NAT, SmokePro 等。一小部分区域模型用于研究特殊条件下的火灾烟气状况,如 CFIRE-X 用于研究液体碳氢池火,DACFIR-3 用于研究飞机舱室火灾,FMD 用于研究前室火灾,MAGIC 用于研究核电站火灾,NRCC2 用于研究大型开放式办公空间火灾发展过程。

2.2 场模型简介

场模型是建立在 CFD 数值模拟基础之上的一种模型,是二维或三维模型,其控制体(或称网格)数目可划分为几千到几百万不等,甚至更多。在每个控制体中要求解流量方程、热量方程和质量方程,包括浮力、热辐射和扰动等。场模型对计算机硬件设备要求较高,有些模型甚至要求使用大型机、Unix 工作站进行计算。场模拟通常要花费大量的计算时间,因此只有在需要了解某些参数的详细分布时才使用这种模型。

与区域模型相比,场模型应用于火灾烟气模拟研究的主要优势在于,由于场模拟划分的网格数目较大,对于火灾的发生发展、火场温度分布、烟气流动状况及其组分浓度等参数随时间的动态变化可给出相当细致的描述,便于使用者对火场及烟气流动的细节信息进行了解和掌握。

烟气运动场模拟研究是伴随着湍流理论研究的深入和计算机性能的提高而不断发展的^[8]。目前较成熟的湍流模拟方法可分为三类:直接模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和 Reynolds 时均方程模拟(RANS)方法。

DNS 是指使用同一尺寸网格直接对原始的 N-S(Navier-Stokes)方程求解,不使用模型假设。因此要求网格尺寸足够小,对计算机硬件要求非常高,无法用于工程计算。在 LES 中网格划分较细,大于网格尺寸的涡旋结构用非稳态的 N-S 方程直接求解,而小尺度的涡旋采用一种近似的模型。由于采用了这种近似,所以其精度低于 DNS,同时 LES 对计算机内存和速度要求远低于 DNS,因而近年来 LES 的研究与应用日趋广泛。

RANS 将非稳态 N-S 方程对时间作平均:把物理量 ϕ 分解为一个时间平均值 $\bar{\phi}$ 和一个脉动值 ϕ' ,即 $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ 。这样在所得出的关于时均物理量的控制方程中就包含了脉动量乘积的时均值等未知量,此时通用控制方程形式改为

$$\frac{\partial(\rho\bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\bar{\phi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} - \rho\bar{u}_j'\phi' \right) + S \quad (1)$$

由式(1)可知,一次项在时均前后的形式保持不变,而二次乘积项在时均化处理后产生了包含脉动值的附加项。其中当 $\bar{\phi}'$ 取 $\bar{u}_j'$ 时,式(1)就成为时均形式的 N-S 方程, $\rho\bar{u}_j'\phi'$ 称为 Reynolds 应力或湍流应力。

由于引入了脉动值的附加项,使得原先的方程组不封闭,需另补充确定这些附加项的关系式,但又不能引入新的未知量。这些把湍流的脉动值附加项与时均值联系起来的特定关系式就称为湍流模型。

表 2 列出 18 种可用于研究火灾烟气运动的场模型,大多数采用 Reynolds 时均方程模拟,ALOFT-FT 采用大涡模拟,FDS 中包含直接模拟和大涡模拟两种湍流模拟方法。不同的场模型采用的使方程封闭的湍流模型也不同,MEFE, SOFIE, SOLVENT 采用浮力修正的 $K-\epsilon$ 模型, JASMINE 采用高 Re 数的标准 $K-\epsilon$ 双方程模型,而 CFX, FLUENT, PHOENICS 及 STAR-CD 等大型 CFD 软件包含多种湍流模型,用于计算不同性质流体、不同条件下的流动。

处理压力速度耦合关系以 SIMPLE 系列算法为主,CFX 采用 SIMPLEC, JASMINE 及 PHOENICS 等采用 SIMPLEST 算法, KOBRA-3D 采用修改过的 SIMPLE 算法, SOLVENT 采用 SIMPLER 算法, STAR-CD 模型中可选用 SIMPLE, PISO 以及称为 SIMPISO 的算法(一种借用了 PISO 算法中处理非正交坐标系中压力梯度项处理方法的 SIMPLE 算法)。

在使用方面,大多软件都提供用户交互式操作的图形界面,一部分软件可嵌入 CAD 界面。在功能方面, SMARTFIRE, JASMINE 等可计算多室火灾; ALOFT-FT 用于计算大型室外火灾; FIRE 可用于模拟固态、液态、气态燃料的燃烧过程; KOBRA-3D, PHOENICS, RMFIRE 及 STAR-CD 等可处理几何空间复杂的火场模拟过程。

2.3 网络模型简介

网络烟控模型控制方程包括质量守恒方程和流量方程,有的还包括烟浓度和温度的其他方程。网络模型把整个建筑物作为一个系统,而其中的每个房间为一个控制体。假设每一个控制体内部的状态参数均匀,火灾过程的发展表现为构成建筑物的各单元体内部的状态参数(如温度、烟气生成量等)随时间的变化,由此可见,其计算结果相对粗糙。网络模型可以考虑多个楼层多个房间,能模拟距起火房间较远区域的烟气运动状况,如可以模拟火灾时起火层与其他楼层不同的加压情况,即夹层加压(pressure sandwich)。典型的网络模型输入数据是气象参数(室外空气温度、风速)、建筑特点(高度、渗透面积、开口条件)、送风量、火焰参数和室内空气温度。

20 世纪 80 年代至 90 年代初期, ASCOS 是世界上应用最广的网络模型,由 NIST 发布。软件采用 FORTRAN77 语言编写,用于分析由烟控系统引起的恒定空气流动。烟控系统运行时会引起建筑物内部各区域压力发生变化,可抑制烟气在起火建筑内扩散。ASCOS 能用来分析这一过程。

与 ASCOS 相比, CONTAM 是一种计算速度更快、结果更为可靠的网络模型,已逐步取代 ASCOS 而成为现今广泛应用的网络模型^[9]。CONTAM 同样由 NIST 发布,由 Walton 使用 C 语言编写并负责版本更新,用于多区域空气流动模拟研究。其雏形是 AIRNET(1989),随后进一步发展为

CONTAM94(1994), CONTAM96(1996), 直至最新的 CONTAMW2.0(2002)。CONTAMW 利用层、区域、空气流通过程等概念,按照不同的模拟目标将实际建筑简化为理想建筑模型,在此基础上进行模拟计算分析;该程序具有友好的图形用户界面、丰富的数据库、良好的数据分析绘图功能,能够处理大型复杂的网络模拟计算问题。CONTAM96 曾用于分析纽约世贸中心烟控系统的改造方案。

严治军教授自 1987 年开始着手探讨烟气流动的解析方法,比较系统深入地研究烟气流动理论,建立了烟气流动性状的预测方法,同时建立了比较完整的建筑火灾烟流网络模型^[10-12]。

3 误差的产生及模型的验证

所有的实验数据以及数值模拟计算都存在误差。误差包括随机误差和系统误差。随机误差通常被认为相对很小(1%~10%)^[13]。系统误差常出现于测量或计算机模拟过程(如计算机的舍入误差、截断误差等)中,且往往是可复现的。

使用数值模型模拟烟气运动时,研究人员务必清楚研究所针对的物理模型、基本概念、基本方程式、有关项的合理设定及相应表达,使模拟工作最大程度地接近火灾烟气发展的真实情况。另外,每种数值模型都有各自的使用范围,模型开发人员的工作通常仅限于在一定的范围内使模型的计算结果可靠,因此使用者需熟悉模型的假设及其局限性,在限定范围之外的模拟工作因其可行性未被验证而不宜被采用。

在正确使用数值模型的前提下,能使结果满足精度要求并包含必要的细节信息,数值模拟不失为优选的研究方法。然而,人们往往最为关心的问题不是获得更高的精度及追求更简便的算法,而是数值模型反映实际问题的有效性程度,即模型的验证。

模型的验证是发展数值模型的重要方面,通常的做法是把模型计算的结果与类似火场事件中得到的数据或测量结果进行比较。若无法与实验数据比较,可通过检查输入数据的敏感性,了解这些数据的估计误差对结论的影响。另外也可通过与其他数值模型或算法相比较的方法进行验证。

火灾实验通常采用专业的测量手段和精密的测量仪器。因此实验测得的数据通常近似认为是

真实情况,但需要注意的是,在一切实验中误差是客观存在且无法避免的。也就是说,如果计算结果与测量结果相差很大,那么两者都存在出错的可能。通常模型计算的结果与实际测量的结果的一致性在 10% 以内,不过有些情况如在起火房间内温度误差可达 20%,组分浓度的误差可高达一倍以上。实际上这种现象可能主要是测量的不确定性较大造成的^[14]。在高温环境下对各种气体复杂混合的状况进行测量,不但测量仪器、方法上会产生误差,而且火灾环境本身也缺乏重复再现性。因此利用实验数据验证数值模型时要考虑多方面因素,以便得出全面合理的结论。

美国 NIST 的建筑与火灾研究所曾对不同结构的建筑模型进行了一系列的全尺寸实验,以验证 CFAST 程序。结果表明,用该模型计算得出的建筑物内的火灾状况与实验结果较吻合,图 3 给出了不同模型中房间上层温度的曲线^[15]。由图可见,在此模拟结果与实验数据对比中,计算值与实验值的曲线变化趋势基本一致,大部分拟合极好,小部分数据偏差较大。

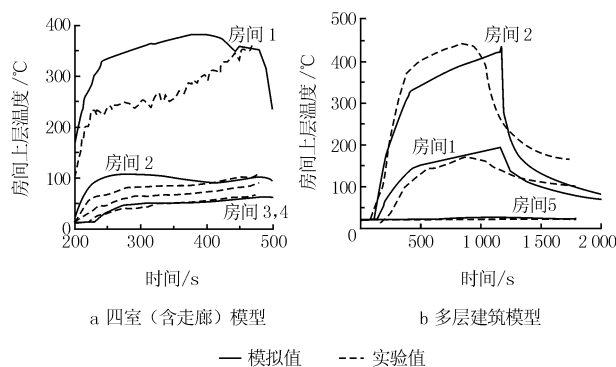


图 3 CFAST 的计算结果与实验数据的比较

4 结语

本文概述了近 10 年来火灾烟气数值模拟的主要成果,目的是使建筑防火科研人员、工程设计人员了解烟气控制相关的典型数值模型、最新的研究方向,以便于今后模拟工作的开展及新模型的开发。今后的烟气控制数值模拟研究可在借鉴国外先进的研究成果与方法的基础上进行。使用者要注意的是每种数值模型都有各自的特点与适用范围,使用时应先了解模型的假设及局限性,正确使用才能发挥模型的功效,满足科学研究与工程应用的需要。

参考文献

- [1] Fire Statistics, United Kingdom, 2003 [R]. London: Office of the Deputy Prime Minister, 2005
- [2] Nady M, Said A. A review of smoke control models [J]. ASHRAE J, 1988, 30 (4): 36-40
- [3] Friedman R. An international survey of computer models for fire and smoke [J]. J of Fire Prot Engr, 1992, 4 (3): 81-92
- [4] Olenick S M, Carpenter D J. An updated international survey of computer models for fire and smoke [J]. J of Fire Prot Engr, 2003, 13 (5): 87-110
- [5] <http://www.firemodelsurvey.com>
- [6] 姚建达, 范维澄, 佐藤晃由, 等. 建筑火灾中场区网数值模型的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27 (3): 304-308
- [7] Walton W D. Zone computer fire models for enclosures [M]//SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd ed. National Fire Protection Association, 1995: 148-151
- [8] 邱旭东, 高甫生, 王砚玲. 建筑火灾烟气运动数值模拟方法的回顾与评价[J]. 自然灾害学报, 2005, 14 (1): 132-138
- [9] Dols W S, Walton G N. CONTAMW 2.0 user manual-multizone airflow and contaminant transport analysis software [R]. NISTIR6921, 2002
- [10] 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
- [11] 严治军, 刘方, 李楠. 建筑物火灾烟气流动性状预测[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23 (1): 36-41
- [12] 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): 107-130
- [13] Klote J H. Review of CFD analysis of smoke management systems [G]//ASHRAE Trans, 2002, 108 (1): 687-698
- [14] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999
- [15] Jones W W, Forney G P, Peacock R D, et al. CFAST-consolidated model of fire growth and smoke transport (Version 5) technical reference guide [R]. NIST Special Publication 1030, 2004

• 广告 •

恒 润 机 械 仪 表 厂



ST 型蒸汽疏水阀

- 高效节能, 在背压下可很好工作
- 耐磨损、耐腐蚀、耐水击
- 自动排除污物及排放空气和 CO₂
- 工作压力: 1.6MPa
- 排量范围: 0~9m³/h
- 实用管径: DN15 ~ DN65



ZWT 系列自力式温度调节器

- 无需外加能源, 对蒸气、水、油、气体等温度进行自动调节和控制
- 公称压力: 1.6MPa
- 工作时间: >10⁵h
- 公称直径: DN15 ~ DN100
- 调节范围: 20 ~ 200℃
- 调节精度: ≤2℃



ZYT 系列自力式压力调节器

- 无需外加能源, 对介质压力实行全自动调节和控制
- 公称压力: 1.6MPa
- 工作时间: >10⁵h
- 公称直径: DN15 ~ DN100
- 调节范围: 20 ~ 1300kPa
- 调节精度: ≤10%



QRS 快速热水器

- 无温度失控和烫伤的危险
- 高效、节能, 无需专门维护人员
- 最大供热量: 30m³/h
- 供水温度范围 48 ~ 82℃, 全自动可调
- 水温控制精度: ±2℃

详细资料
欢迎垂询

地址: 江苏扬中市三沙路 126 号

电话: 0511-8322768

传真: 0511-8229608

邮编: 212200

手机: 0-13951278968

<http://www.yzmi.com.cn>

E-mail: yzmi@public.zj.js.cn

E-mail: sale@yzmi.com.cn (销售)