



建筑火灾烟气运动与控制研究方法 的回顾与评价

东北石油大学黑龙江省防灾减灾及防护工程重点实验室 施 微[☆]
哈尔滨工业大学 高甫生

摘要 介绍了建筑火灾烟气运动与控制的主要研究方法——实验方法、数值模拟方法、调查与实测方法的特点及应用情况,回顾了它们各自的发展历程,并列举了典型成果,同时指出了它们在使用过程中存在的问题与不足,旨在为初涉建筑火灾烟气运动的研究人员提供思路。

关键词 建筑火灾烟气 盐水模拟 数值模拟 调查 实测

Review and evaluation of building fire smoke movement and control researches

By Shi Wei[★] and Gao Fusheng

Abstract Presents the characteristic and application of main research methods of building fire smoke movement and control, including experimental method, numerical simulation method and investigation and test method. Reviews their development processes, gives some typical results and points out their existing problems and deficiencies in application, providing guidance to the new researchers in this field.

Keywords building fire smoke, saltwater simulation, numerical simulation, investigation, field test

★ Heilongjiang Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang Province, China

①

火灾的破坏性极大,不仅会造成巨大的社会财产损失,还严重地威胁着人的生命安全。大量数据表明,火灾过程中产生的大量高温有毒烟气是引起人员伤亡的直接原因。早在1939年美国就有了针对工业建筑火灾烟气运动的研究。20世纪60年代,一系列的高层建筑火灾事故的发生引起了人们对建筑火灾中烟气问题的关注。1973年ASHRAE设计手册(草案)首次列出了关于防火及烟气控制的章节,标志着对火灾烟气控制系统大规模深入研究的开始。

20世纪90年代之前,各国对于防排烟问题的研究着重于楼梯间、前室(合用前室)以及竖井的加压防烟问题,开展了一系列的全尺寸火灾实验。由于中庭式建筑在20世纪80年代被越来越多地采用,中庭及大空间建筑的防排烟问题成为90年代的研究重点。

烟气的研究方法主要有实验方法、数值模拟方法和针对已有建筑防排烟系统的调查与现场测定方法,相应的研究成果对烟气运动的理论研究、防

排烟系统设计及规范的制定与改进作出了巨大贡献。

1 实验方法

火灾烟气运动的实验研究主要有全尺寸火灾实验和小尺寸模拟实验。全尺寸火灾实验,即对实际建筑进行烟气运动实验。小尺寸模拟实验是指采用一定比例的模型建筑进行烟气运动实验或依据相似理论进行改变介质的模拟实验。

1.1 模型实验

早在1973年,美国亚特兰大城市建设部就进行了全尺寸火灾实验^[1]。实验对象是位于亚特兰大的14层Henry Grady宾馆,着重对其加压楼梯间与加压电梯井进行了实验研究。同年进行的火灾研究还有布鲁克林理工学院(Brooklyn

①☆ 施微,女,1982年3月生,硕士,讲师
163318 东北石油大学土木建筑工程学院
(0) 13614592690
E-mail:sw_dqpi@126.com
收稿日期:2011-05-11
修回日期:2011-07-06

Polytechnic Institute) 指导的对于纽约一幢 22 层办公楼的火灾实验。德国、加拿大、日本也先后开展了一系列的火灾实验。

中国科学技术大学于 1992 年建立了火灾科学国家重点实验室,包括大型的燃烧风洞、5 层模型楼、大空间火灾模型实验厅、3 MW 释热速率实验台、80 W 辐射引燃实验台、全尺寸典型客房火灾实验台等;实验设备包括三维激光粒子动态分析仪、锥形量热计、红外热像仪、热分析仪、热通量计、燃烧成分分析系统、超级小型机及计算机工作站等 15 套先进仪器设备。

实验研究需花费巨大的人力、物力、财力,烟气实验研究通常与火灾实验研究关联紧密,全尺寸与比例模型的烟气运动实验通常与火灾实验同时进行,即研究火灾发展规律的同时测量烟气运动的相关参数。除此之外,也有利用烟雾弹进行的对于防排烟系统的实验研究,但实验中发现烟雾弹释放出的化学烟气与火灾生成的热烟气有很大差别,不适用于火灾烟气控制的相关研究^[2]。现场观测的原始资料常常是研究人员的第一手资料,它在工程问题的决策中乃至对数值模型的有效性验证方面起到举足轻重的作用,但是实验工作耗资巨大,尤其是火灾的发生难以预料和不易实测,而实验室的工作条件优越,可以应用各种精密的测量仪器和先进的测量技术。因此,可在实验室进行的模拟实验得到了研究人员极大的重视,其中应用较为广泛的是烟气运动的盐水模拟实验。

1.2 盐水模拟实验

盐水模拟实验是一种真实直观、节省费用和环境清洁的受限空间火灾烟气运动研究方法,属于小尺寸模拟实验。基本思想是用盐水在清水中运动和扩散来模拟火灾烟气在空气中的蔓延和热量传递。

1963 年 Thomas 等人首次采用盐水模拟实验方法模拟设在顶棚和侧壁的排烟口向大房间内排烟的效果。1986 年,美国国家标准技术局(NIST, National Institute of Standards and Technology)火灾研究实验室(BFRL, Building and Fire Researching Laboratory)的 Steckler 等人用盐水模拟实验方法对密闭复合腔内火灾诱发的烟气流动进行了研究^[3]。

1992 年我国在中国科学技术大学建立了国内

唯一以火灾科学为主攻方向的火灾科学国家重点实验室。该重点实验室的张和平等人开展了受限空间火灾烟气运动盐水模拟实验方面的研究^[4],并于 1993 年设计建立了我国第一个盐水模拟实验台。自 1993 年至 1996 年底,运用该实验台完成了多项研究课题,研究范围涉及受限空间烟羽流准稳态结构和蔓延规律^[5],顶棚射流和顶棚下分层流的发生发展过程^[6],侧室-走廊烟气和卷吸空气的运动规律^[7-8];并首次将盐水模拟实验方法用于中庭类建筑物内的火灾烟气运动规律研究^[9-10],着重模拟了侧室火灾烟气经走廊流向天井及其在天井内的运动特性。

随着研究的深入,人们逐渐发现盐水模拟实验存在如下问题^[11]:

1) 两物理现象如何实现边界条件的相似。首先,在烟气层(或盐水流)内所作的忽略黏性和热传导效应的假设,不适用于靠近受限空间边界的区域。当盐水的雷诺数 Re 不能等同于烟气的 Re 时,难以实现对黏滞效应的精确模拟。其次,在烟气运动中,烟气与壁面会有热传导,而盐水模拟实验中盐分在壁面上不可渗透,使得该方法不能模拟冷壁面附近的反浮力流。可通过比较盐水模拟实验和实际火灾烟气运动的测量结果来得到表征两物理现象差距的经验关系式,通过修正系数来修正这种由边界条件差异所带来的问题。

2) 盐水流初始动量不为零导致的模拟误差。实际火灾烟羽流是由浮力驱动,故初始动量为零,而盐水注入有一定的初速度,初始动量不为零,盐水注入清水中后在重力和初始动量的共同作用下运动。

3) 盐水模拟实验目前还无法模拟火灾烟气层内的辐射换热和化学反应。

4) 盐水模拟实验的定量测量问题。目前的测量大都集中在速度场的测量,盐水浓度场的测量因难度大而尚缺乏成熟可靠的相关研究成果。速度的测量也还存在一些问题,火灾科学国家重点实验室的麻柏坤等人成功引入并发展了氢气泡和双染色测量技术^[12],对盐水层内三维测量作了一定的有益探索。

2 数值模拟方法

利用数值模拟研究烟气流动规律的研究方法随着计算机的出现及发展而逐渐发展起来,并且越

来越广泛地应用于研究的各个领域。20世纪80年代开始,尤其是90年代之后,计算机应用的日益普及和计算机硬件及软件技术的飞速发展,为火灾烟气运动的数值模拟提供了功能强大的研究工具。

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。早期开发的烟控模型以网络模型为主,如加拿大国家建筑研究院的IRC模型,NIST下属BFRL发布的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对62种火灾与烟气运动的计算机模型进行了分析^[13],依据研究区域中控制体的不同,这些模型大体上可以分为场模型(field model)、区域模型(zone model)和网络模型(net model)。2003年,美国燃烧科学与工程(CSE, Combustion Science & Engineering)机构的Olenick和Carpenter完成了对Friedman工作的更新^[14]。他们所收集并分类整理的模型包括65种描述火灾烟气发展过程的模型(其中包括48种区域模型,17种场模型),9种探测器响应模型,24种疏散模型,32种建筑承载火灾能力模型以及32种其他类别模型(其中包括网络模型)。美国燃烧科学与工程机构同时在Internet建立了公开的火灾烟气模型的资料库,提供所收集到的各数值模型的简要介绍。

在数值模型中,将质量、动量、能量等基本守恒定律结合温度、烟气的浓度以及人们所关心的其他参数进行了重新改写,从而得到一系列微分方程组。微分方程求解的基本步骤为:划分适当数量的控制体,确定合理的时间步长,选择合适的算法,迭代求解。其中的每一个环节都对模型的有效性及其可靠性有重要的影响,另外不同的模型所划分的控制体的数量也相差很大。

目前常用的烟控数值模型主要分为以下几类。

2.1 区域模型

区域模型是目前应用较为广泛的一种火灾烟气模型,早在20世纪60年代Thomas等人就将其应用于排烟通风系统的设计工作中。区域模型通常把房间分为上部热烟气层与下部冷空气层两个

控制体,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,可增加控制体来描述烟气羽流与顶棚射流。层内参数变化相对于上下层之间的参数变化很小,可忽略不计,即认为层内各物理量处处相等。因此在区域模型中,物理量是沿垂直方向变化的。这种分层假设是基于对真实火灾实验的观察作出的。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。因此人们普遍认为区域模拟得出的结果近似真实情况。区域模拟被认为是一种计算时间短、计算代价低、能保证足够精度的模拟方法^[15]。

区域模型通过对一系列方程进行求解,来预测温度、压力等状态变量随时间的变化。NIST发布的多室火灾模拟CFAST(consolidate fire and smoke transport)模型是目前最常用的火灾烟气区域模型。CFAST模型采用包含初始值问题的常微分方程,包括质量守恒、能量守恒(热力学第一定律)、理想气体定律及热力学能与密度的相关表达式等。假设在每一层内温度、烟气浓度等状态参数都是均匀的,通过求解每层的质量和能量守恒方程能够得出上述参数随时间的变化情况^[16]。大量的实验验证表明,其计算结果能够保证工程上的应用,不但能再现物理现象的发展过程,而且能节省大量的计算时间。

2.2 场模型

场模型是建立在CFD数值模拟基础之上的一种模型,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,考虑了浮力、热辐射和扰动等的影响。场模型对计算机硬件设备要求较高,通常要花费很长的计算时间,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。

典型的火灾场模型FDS(fire dynamics simulator)由NIST于1990年发布,用来预测火源、开口、通风系统等作用下火焰、烟气羽流性状,其中烟气运动场模拟的核心分别采用了直接模拟和大涡模拟的方法,使用者可以根据实际需要进行选择。同时还发布了Smokeview,它可以将FDS计算出的结果图形化显示出来,使结果直观地展现。

2.3 网络模型

网络模型把整个建筑物作为一个系统,而其中

的每个房间作为一个控制体,假设每个控制体内部的状态参数均匀。其计算结果与前两类模型相比相对粗糙。网络模型可以同时考虑多个楼层多个房间,能够计算离着火房间较远区域的烟气运动情况,例如可以模拟火灾时着火层排烟而其相邻楼层加压送风情况下的烟气运动状况。典型的网络模型输入数据是室外气象参数(空气温度、风速)、建筑尺寸参数(高度、渗透面积、开口条件)、加压送风参数、火焰参数和室内空气温度。最具代表性的网络模型是同样由 NIST 发布的 CONTAM 模型,这也是目前应用最广泛的网络模型。该模型利用层、区域、空气流通过路等概念,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;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。

2.4 复合模型

在建筑火灾烟气的计算机模拟中,以上三类模型各具特点。场模型可以给出火灾过程的细节,但计算机性能限制了其应用范围;区域模型在一定程度上兼顾了可靠性和经济性,但在某些情况下,例如在强通风、强火源或几何形状复杂的受限空间,火灾烟气分层现象不明显,区域模型就失去了成立的前提,必然带来相当大的误差;网络模型中每个房间参数视为均匀,适用于远离火源且各种混合已基本达到均匀的区域。若要研究整栋高层建筑火灾中的烟气运动,显然以上三种模型各有局限,如果可以将三种模型结合,充分发挥各自的优点,显然是更合适的研究方案,即建立场区网复合模型。复合模型的观点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首先提出^[17]。目前常用的复合模型有场区复合模型、场区网复合模型。

复合模型就目前来讲并未限制具体的模型种类以及复合方式,使用者可根据实际需要分别选择场、区、网模型,在合理依据下复合使用。目前,国内对于复合模型的联结方式,尚缺乏系统化、经验化、理论化的模式,有待今后相关工作的进一步完善。

近年来,哈尔滨工业大学课题组在建筑火灾烟气运动的数值模拟研究中做了大量工作,结合博士研究生和硕士研究生课题,完成了多项研究^[18-22]。研究内容包括:把高层建筑火灾过程的数值模拟研

究^[23-25]与烟气控制的数值模拟研究相结合,进行了高层建筑楼梯间前室烟气控制的数值模拟研究^[26],以及针对高层建筑走廊排烟方式的数值模拟研究^[27-28];首次应用场区网复合模型对高层建筑防排烟系统进行了烟气控制的数值模拟研究^[29];初步开发了高层建筑防排烟多媒体软件等相关工作。

3 针对已有建筑防排烟系统的调查实测

目前我国城市中高层建筑如雨后春笋般拔地而起,高层建筑已经成为大城市新建筑的主体,对这些建筑中防排烟系统的设计和运行状况进行调查、实测和评价成为烟气控制研究中的一种极其重要而行之有效的方法。通过该方法可以发现已有建筑的防排烟系统在设计、施工、运行管理以及消防产品的性能和质量等方面存在的问题,同时还可以发现消防管理部门在监督和验收中的不足,据此提出整改意见,并为防排烟规范的制定和修改提供依据。但是,由于调查和测试的工作量大,且需要消防部门和建筑使用单位的密切配合,实施起来难度较大,在国内外文献中还未见到这方面的报道。

哈尔滨工业大学高甫生等人从上世纪 90 年代初就着手对已有高层建筑防排烟系统进行调查分析^[30]。在当地消防管理人员的配合下,对哈尔滨市的二十多栋高层建筑作了调查,分析了建筑防排烟系统中存在的各种问题,为设计、管理和使用部门改进高层建筑防排烟系统提供了参考和借鉴。2002 年对哈尔滨市的一栋地面 32 层、地下 3 层的高层建筑进行了正压送风系统的现场测试和实验研究,针对不同实验工况,对楼梯间与前室、合用前室的正压值、门洞风速、加压送风量等进行了分析研究^[31-34],并对机械加压送风的若干问题进行了探讨;指出了目前国内在加压送风系统设计、验收、防排烟产品质量方面存在的一些问题,并针对《高层民用设计防火规范》中有关加压送风的某些条文提出修改完善的意见和建议。

值得一提的是,针对已有建筑防排烟系统的现场测试和实验研究,不仅可以了解该防排烟系统当前的运行状况和存在问题,而且通过实验研究和数据分析,还可以获得该系统运行的最佳工况,为系统的改进和今后的设计,以至防排烟规范的制定和修改提供依据。为此,在测试前应做好充分准备,制定试验方案和测试工况,安装必要的测试仪表;

还要在可能的情况下对原风管系统进行局部改造,以确保测试数据的准确性。例如,为了保证风量、风速可调与测试数据的准确可靠,应设置风量调节阀,且测点处的风管要有足够的直线长度等等。

应用调查、实测和评价的方法研究高层建筑烟气控制还处于初始阶段,我国城市中大量的高层建筑为这项研究提供了广阔的实验场所,其发展前景十分诱人。由于对正在使用的建筑进行火灾烟气工况测试比较困难,如能将现场实测与数值模拟相结合,效果必然更佳。

4 结语

实验方法与数值模拟方法是目前常用的火灾烟气研究方法,两者各有利弊,而在研究过程中两者又常常相互联系,互为补充。通过实验方法获得的不同材质物品燃烧释热率可以应用在数值模型的参数设定中,以这些火灾过程的基本参数为要素发展出室内火灾过程的科学理论(非经验理论),并以此建立更贴近实际的烟控数值模型,或对已有模型作进一步的完善和修正。同时实验方法也是对数值模拟方法能否反映实际情况的最有效的验证手段。调查与实测方法是针对已有建筑烟控系统的一种极其重要的研究方法,也是对上述两种方法的补充。逐步完善的数值烟控模型在理论研究和工程设计领域发挥着举足轻重的作用,不仅为人们了解建筑火灾发生、发展及烟气扩散过程提供了更为便利的方法和手段,同时也为建筑防火、防排烟设计和消防安全评估提供了新的科学工具,是消防安全工程学和性能化防火设计的重要基础。如何将上述研究方法完美结合,互相补足,扬长避短,用于火灾烟气理论研究及推广工程应用,将是火灾烟气运动研究的方向。

参考文献:

- [1] Klote J H. An overview of smoke control research [G]//ASHRAE Trans, 1995, 101 (1):979-990
- [2] Klote J H. Fire experiments of zoned smoke control at the Plaza Hotel in Washington, DC[R]. NISTIR 90-4253,1990:1-6
- [3] Steckler K D, Baum H R, Quinliere J G. Salt water modeling of fire induced flows in multicompartment enclosures [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1):143-149
- [4] 张和平, 范维澄, 霍然. 受限空间烟气运动的盐水模拟实验初探[J]. 火灾科学, 1994,3(2): 48-56
- [5] 麻柏坤, 张人杰, 张和平, 等. 烟气运动的盐水模拟实验[J]. 实验力学, 1994, 9(4): 317-322
- [6] 张和平, 张人杰, 麻柏坤, 等. 建筑物内火灾烟羽流和顶蓬射流诱发的空气运动盐水模拟实验研究[J]. 实验力学, 1997, 12 (1): 70-79
- [7] 张和平, 谢之康, 姜锡权, 等. 侧室一走廊烟气运动特性的盐水模型[J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29 (4): 664-670
- [8] 张人杰, 麻柏坤, 张和平, 等. 侧室一走廊初起火灾下烟气运动的模拟研究[J]. 火灾科学, 1995, 4 (2): 17-23
- [9] 张和平, 姜锡权, 谢之康, 等. 中庭建筑天井内火灾烟气运动特性的盐水实验模拟[J]. 实验力学, 1999, 14 (1): 69-79
- [10] 霍然, 董华, 范维澄. 大空间火灾烟气填充过程的数值模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29 (1): 38-42
- [11] 张和平, 周晓冬, 万玉田, 等. 受限空间烟气运动盐水模拟研究的现状和展望[J]. 中国安全科学学报, 1999,9(1): 30-34
- [12] 麻柏坤, 张人杰, 张和平. 氢气泡技术在烟气运动盐水模拟实验中的运用[J]. 火灾科学, 1995, 4 (3): 48-57
- [13] Friedman R. An international survey of computer models for fire and smoke[J]. J of Fire Prot Engr, 1992, 4 (3):81-92
- [14] 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
- [15] Walton W D. Zone computer fire models for enclosures[M]//NFPA. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Edition, 1995:148-151
- [16] Jones W W, Forney G P, Peacock R D, et al. CFAST: consolidated model of fire growth and smoke transport (version 6) [R]. NIST SP 1026, 2009: 13-17
- [17] 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
- [18] 王砚玲. 高层建筑火灾烟气控制的数值研究及软件开发[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008
- [19] 李东姝. 高层建筑楼梯间加压送风方式分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 1999
- [20] 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

(上接第9页)

- [21] 施微. 高层建筑走廊排烟方式的数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006
- [22] 陈军华. 高层建筑楼梯间前室烟气控制方式的数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006
- [23] 邱旭东, 高甫生, 王砚玲. 通风状况对室内火灾过程影响的数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 80-84
- [24] 王砚玲, 高甫生. 高层建筑火灾时同时开启门数量的确定[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 86-90
- [25] 邱旭东, 高甫生, 王砚玲. 高层建筑火灾时烟气危害性及危险度评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(3): 392-394, 409
- [26] 陈军华, 高甫生, 王砚玲, 等. 加压送风量与门两侧的压差值关系的网络模拟分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(8): 79-83, 110
- [27] 邱旭东, 高甫生, 王砚玲. 高层建筑走廊机械排烟的数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(6): 9-13
- [28] 施微, 高甫生. 高层建筑条形走廊自然排烟的数值模拟与评价[J]. 暖通空调, 2007, 37(7): 44-49, 33
- [29] 王砚玲, 高甫生, 邱旭东. 场区网模型及其在高层建筑防排烟分析中的应用[C]// 全国暖通空调制冷2004年学术文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2004
- [30] 高甫生, 王群. 哈尔滨市高层建筑防排烟系统存在问题分析[J]. 消防科技, 1994(2): 29-31
- [31] Wang Yanling, Gao Fusheng. Test of stairwell pressurization systems for smoke control in a high rise building[G]// ASHRAE Trans, 2004, 110(1): 185-193
- [32] 高甫生, 王砚玲, 邱旭东. 高层建筑加压送风系统试验研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(4): 31-35
- [33] 王砚玲, 高甫生, 邱旭东, 等. 高层建筑防烟楼梯间正压值与门洞风速试验分析[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(7): 16-20
- [34] Wang Yanling, Gao Fusheng. Pressurization analysis with CFD in escape routes of high-rise building[C]// The 4th International Symposium on HVAC. Beijing, China, 2003: 9-11