



# 高层建筑烟气扩散与控制 计算机模拟进展

南京工业大学 周 汝<sup>☆</sup> 何嘉鹏 蒋军成

**摘要** 描述了高层建筑火灾烟气的危害性,介绍了目前世界上高层建筑火灾烟气扩散和控制领域的计算机模拟研究方法和成就,分析了不同方法各自的不足,指出了改进方法。

**关键词** 高层建筑 火灾烟气 烟气扩散 计算机模拟

## Computer simulation development of smoke diffusing and control in fires of high-rise buildings

By Zhou Ru<sup>★</sup>, He Jiapeng and Jiang Juncheng

**Abstract** Describes the hazard of fire smoke in high-rise buildings, presents several methods and achievements of computer simulation of smoke diffusing and control in high-rise building fire in the world, and analyses the specific deficiencies of different methods, and points out some solutions for improvement.

**Keywords** high-rise building, fire smoke, smoke diffusing, computer simulation

★ Nanjing University of Technology, Nanjing, China

①

### 1 高层建筑火灾烟气的危害性

高层建筑中人员密度大、可燃物多、安全出口相对较少,火灾成为其最大的安全隐患。烟气中毒和窒息是高层建筑火灾造成人员伤亡的主要原因。烟的扩散速度极快,向上速度为 3~4 m/s,水平速度可达 0.5~0.8 m/s<sup>[1]</sup>。烟的主要危害有三个,一是强烈刺激人的眼睛,降低能见度,从而妨碍逃生和营救人员的动作;二是由于现代建筑大量使用各种高分子化学材料,这些材料燃烧产生的烟雾中含有大量的有毒有害气体,威胁人的生命;三是火灾使人产生恐慌心理,从而影响人员的逃生和疏散。

由文献<sup>[2]</sup>可知,建筑火灾一般占火灾总数的 60%左右,而高层建筑火灾在建筑火灾中又占很大比例,如美国纽约的 115 栋高层建筑在 3 年内竟发生火灾 41 起<sup>[2]</sup>。我国 2000—2003 年这 4 年内就发生高层建筑火灾约 64 242 起,伤亡人数约 6 302 人,直接经济损失高达约 101 603 万元,其中特大

火灾约 38 起,伤亡人数约 119 人,直接经济损失约 10 384.5 万元,重大火灾约 412 起,伤亡人数约 801 人,直接经济损失约 18 206.7 万元<sup>[3]</sup>。

因此研究火灾中烟气的产生、性质、运动和控制等对减少国家财产损失和保障人员安全具有重要的意义。

### 2 高层建筑火灾烟气流动的基本影响因素

建筑物内烟气流动是由空气、各种通风系统造成的压力差,以及温差造成的气体密度差导致的烟囱效应引起的,其中温差和温度变化是烟气流动最为重要的影响因素。

#### 2.1 烟囱效应

烟囱效应是由高层建筑内外空气的密度差造

①☆ 周汝,男,1981 年 5 月生,在读博士研究生  
210009 南京市中山北路 200 号南京工业大学 225 信箱  
(025) 83239964  
E-mail: maxmuse, zhou@163.com  
收稿日期:2006-10-26  
修回日期:2007-08-07

成的。高层建筑内外空气的温差导致的压力差将使空气在建筑中流动,这种现象称为热压作用。在低处外部压力大于内部压力,在高层则相反,在中间某一高度,内外压力相等,即存在一个中和界。烟囱效应随建筑物高度的增加而增强,火灾发生在较低层时,烟囱效应对竖井和较高层的烟气流动的影响尤为显著,此时烟从低层上升到高层的作用力更大。而烟囱效应造成的压力差和气流分布,以及中和界的位置,取决于建筑物大的分隔物的开口对气体流动的限制程度。

## 2.2 气体膨胀

高层建筑发生火灾时,温度升高引起的气体膨胀是影响烟气流动较为重要的因素。火灾时着火区域的温度可高达 800 °C,根据气体膨胀定律,可推算出着火区域内的气体体积将扩大到原来的 3 倍,其中 2/3 的气体将转移到建筑物的其他部分。由于膨胀过程发生相当迅速,并产生相当大的压力,迫使烟从着火层向上或向下往建筑物的其他部分流动。

## 2.3 通风、空调系统

如果通风、空调系统各处的送风量和排风量是相等的,那么建筑物内的压力不会受到影响,如果某部位的送风量超过排风量,那里的压力便会增加,空气就从那里流向其他部分。反之,在排风量超过送风量的部位,则出现相反的现象。因而建筑物内的通风、空调系统可以按照某种有益的方式设计,以控制建筑物内的烟气流动。

## 2.4 室外风力、风速的影响

风力作用使迎风面的墙壁经受向内的压力,而背风面和两侧的墙壁有朝外的压力,平顶层上有向上的压力,从而使空气从迎风面流入建筑物内,从背风面流出建筑物外,并对在顶层上开口的垂直通风管道产生吸力作用。正的水平风压力促使中和界上升,负的水平风压力促使中和界下降。

## 3 建筑火灾与烟气的数值模拟

火灾烟气流动研究主要有两种方法,一是火灾烟气流实体试验;二是采用计算机模拟。采用实体试验要求较高,条件较为复杂,相比而言,计算机模拟比火灾实体试验更具有经济效应和实用价值。在火灾烟气扩散模拟方面,一般都采用 CFD 技术进行数值模拟,分析烟气扩散时的速度、温度、浓度的动态分布。依据研究控制体的不同,高层建筑火

灾数值模拟可以划分为场模拟、区域模拟和网络模拟<sup>[4]</sup>。

### 3.1 场模拟

场模拟是在计算流体力学和计算燃烧学的基础上发展起来的,原则上可用来模拟各种火灾过程。由于场模拟需要将研究区域划分成许多微元控制体,建立的方程组也非常复杂,必须要用数值方法求解,因此该方法计算代价高,而且还存在气固相耦合、热辐射与固相热解的耦合等问题<sup>[5]</sup>。但由于场模拟可以精确地给出空间不同位置点的各物理量随时间的变化规律,随着大涡模拟技术和亚网格模拟技术的突破性发展,其在实际应用中有逐步取代区域模拟的势头。CFD 的通用软件有 FLUENT, STAR-CD 与 CFX 等,这些通用软件的数学模型的组成都是以 Navier-Stokes 方程组与各种湍流模型为主体,再加上多相流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等,大多数附加的模型是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式<sup>[6]</sup>。采用 CFD 技术得到的结果是与物理模型和数值分析两者都相关的结果,对一些迄今还无法用合适的数学模型进行描述的问题(如某些复杂的湍流流动等),CFD 计算结果的精度就会受到直接的影响。

高层建筑火灾烟气流场是时变的、有黏性的、可压缩湍流流场。而湍流流场模型通常包括代数模型、一方程模型、两方程模型、湍流应力模型等。现在广泛应用的是两方程  $K-\epsilon$  模型,并假设各向同性,即适合于较大雷诺数、低旋、弱浮力流动,对强对旋流、浮力流和近壁流等流动,模拟效果不是很理想。由于标准的  $K-\epsilon$  模型的耗散性过强,因此必须采用修正的  $K-\epsilon$  模型。另外由于  $K-\epsilon$  模型不适合近壁流动,因此在近壁处应该采用壁面函数来模拟近壁状态,如果还是用  $K-\epsilon$  模型可能会引起误差,而采用其他一些湍流模型如代数应力模型就能使模拟结果更接近实际了,但采用代数应力模型只能反映湍流的当地影响,不能反映对流与扩散效应。随着计算机的发展,大涡模拟逐渐被采用并将成为一种趋势。不同的情况下采用不同的模型,可以提高计算的精度和可靠性。

高层建筑火灾的烟气主要在着火区域、走廊和安全疏散楼梯之间蔓延,各个区域的流场情况是不一样的,因此在划分网格时采用多块网格技术,在

每个区域独立生成网格,同时保证各块网格在公共边界上重合。在求解过程中,每一区域向边界延伸两层虚拟的网格,这样就能保证网格边界的连续性,不同网格之间的信息可以通过虚拟网格来传递,在适时更新虚拟网格的信息后,每块网格都可以独立求解。而且在这些区域的连接处,边界条件的确定可以相对简单一些,但也更为重要。在采用该方法时要借助于初始网格数据,使用插值或迭代方法使网格按照边界的距离比例或按原来的稀疏比例重新分布,这样既能快速地生成网格,又保证了网格能及时反映烟气的变化。同时还可以在必要的地方进行网格加密,在加密时可以提供网格加密信息的背景网格为基础,通过定量判断来确定网格是否需要加密。对于近壁面的网格,应当避免在壁面法线方向的过分拉伸而超出壁面函数的有效范围,同时要确保在边界层内有一定量的网格。由于烟气在流动过程中会随建筑物空间的变化而改变形状,因此可以采用动网格技术,特别是在火灾房间发生爆轰导致窗户破裂以及着火层房间门窗、安全疏散楼梯间以及前室的门开合的时候,能使模拟情况尽可能符合火灾发生时的实际情况。

随着 CFD 技术的发展,它的可视化也显得越来越重要。可视化研究内容主要有几何体与网格的显示及评估、计算过程的显示与流体结构辨识、结果显示、分析和数据的比较这四个方面。根据研究内容的不同,CFD 可视化可分为三种处理类型:后处理、跟踪处理、驾驭处理<sup>[7]</sup>。后处理方式是现在集中研究的部分。在后处理显示的二维域上,两个变量的数据显示很容易,如在表示烟气扩散的温度场的二维图像上叠加等值线表示压力等,但如果同时要表示压力随时间的变化就不那么简单了。如果能开发出基于图符的表示方法来显示一个点上的多变量信息,如上面提到的各个关键的温度点用不同颜色的点或符号,或者再加上曲线深度或亮度的变化来表示。除了多变量数据的显示外,还要显示多变量之间的依赖关系,如在研究烟气扩散时一般都是仅仅设定初始入口压力、出口压力、无穷远边界压力和初始的密度、温度和速度,而对烟气扩散时压力的变化的表示就很复杂了。进行后处理不仅仅是为了说明模拟结果,还可以发现求解过程中可能出现的任何异常。例如,可以通过描绘 K 的等高线来检查是否存在某个区域的 K 错误地

偏大或偏小。可以列出湍流黏性比,看看湍流是否完全生效。能否很好地使输出端和图形处理软件方便地连接起来并加强对可视化的研究对进一步研究烟气扩散运动规律有着很大的帮助。

### 3.2 区域模拟

区域模拟思想是由哈佛大学的 Emmons 首先提出的,该方法一般将每个房间分为上下两个区域,并假定每个区域内的物理量参数均匀一致,然后由质量和能量守恒原理和理想气体定律导出一组常微分控制方程,而区域和区域及其边界和火源之间的质量、能量交换可通过模拟建筑火灾各分过程来得到。这些分过程是:燃烧,羽流,顶棚射流,壁面反浮力射流,孔道流动,对流换热、导热、辐射等各种传热过程。区域模拟所需的计算时间较短,并且在其假设成立的前提下能给出较合理的结果。但对于有复杂几何形状、有强火源或强通风的房间,其误差将很大,以致失去真实性<sup>[8]</sup>。

目前区域模拟大多采用 CFAST 程序,它采用设定火源,即将火源的热解速率或释热速率在不同时间的值预先设定,而没有将其与传热过程耦合起来,因此它是把在多个房间的多个火源全部作为分离的实体来处理,而不考虑羽流和与房间墙壁之间辐射换热作用的方式。CFAST 不使用点火源来近似羽流,而是用经验公式决定羽流引起的层间质量转移,这些经验可能会导致结果的不确定。在计算火区增大时也没有考虑燃料的热解模型,因此设定火源与真实火源的相似程度将决定计算结果的准确性。今后应该在羽流及其他火灾分过程的模化方面作进一步的突破。

### 3.3 网络模拟

网络模拟是将每一个房间用一个均匀参数来表示,并且假设同一个房间内的温度、烟气浓度和室内压力等物理量为均匀分布的方式。每个房间、楼梯间和通道等均具有一定的通风阻力,因此可以把这些连接处作为网络连接点,通过分支和节点连接成网络<sup>[9]</sup>。网络模拟忽略了烟流和空气的分层流动现象,计算时容易造成误差。

## 4 高层建筑火灾烟气扩散与控制的模拟现状

高层建筑火灾烟气控制方式一般有两种,一种为烟感探测系统和消防系统,另一种为利用建筑结构进行自然防排烟和机械防排烟。在消防系统不足以控制火灾时,就得依靠建筑结构进行自然防排

烟或者进行机械防排烟。自然防排烟包括设置挡烟垂壁和敞开阳台、楼梯间等等;机械防排烟一般都是在楼梯间进行加压送风,提高前室及其楼梯间的压力,在一定时间内防止烟气扩散到前室以及楼梯间,帮助人员逃生。多年实践证明这种防排烟方式是非常有效和可靠的,在实际设计中被广泛使用。

现代高层建筑根据使用性质可分为居住建筑和公共建筑,公共建筑中以带有中庭的商用建筑居多,由于其建筑结构将防火分区上下贯通,火灾对其的危害性增大,因此在火灾和烟气的控制研究中,商用建筑受到重视<sup>[10]</sup>。重庆大学、清华大学和中国科学技术大学等针对火灾数值模拟及其方法,中庭建筑的火灾实验、火灾模型、烟气流动、火源释热速率、防烟分区的划分、烟气控制性能化设计和安全疏散等各个方面进行了深入研究,得到了一系列结论<sup>[11-12]</sup>。采用各种模拟方法模拟了中庭建筑火灾过程中烟气的扩散过程,并比较了不同排烟方式(自然和机械排烟)的排烟效果。当中庭建筑发生火灾时,为了阻止烟气迅速向下沉降,最佳的排烟位置应该设计在顶棚处,其减缓烟气下沉的效果远远好于其他自然排烟和机械排烟方式,但是顶棚的机械排烟很难控制且受限于建筑的实际使用情况,中庭内发生火灾时功率大小并不一样,若采用顶棚机械排烟方式,只有当排烟速度大于自然排烟时烟气流出的平均速度时才会有效果。相对于无排烟情况,侧壁自然排烟和机械排烟虽然能够降低烟气的沉降速度,但效果并不显著。采用壁面机械排烟方式时,只有当烟气已经沉降到机械排烟口以下时,机械排烟才能有效减缓烟气沉降的速度。由于中庭建筑的特殊结构,还存在着门效应和烟气堵塞这两种不利于烟气控制的重要现象,因此研究者还对此效应产生的原因和作用机理进行了分析,并提出了参考性的通风设计方案。同时由实验和模拟可知,水喷淋系统对于火灾早期的控制起着重要作用,对烟气层的发展和烟气层温升影响较大,喷淋流量和喷射角度对烟气层的影响有待于进一步研究,这也是 ASHRAE 目前的重点研究项目之一。

南京工业大学的学者则针对没有中庭的一般高层民用住宅火灾发生的不同季节和不同的火灾烟气控制模式进行了深入的研究<sup>[13]</sup>。经过模拟得知,烟气扩散主要受烟囱效应和室外风力的影响,

烟气温度随着通道长度的增加而不断下降,当烟气到达通道出口时,其温度已接近火灾发生前的室温,故在火灾发生后的短时间内温度不是影响疏散的主要因素。烟气扩散速度随着通道长度的增加不断下降,当到达通道出口时,烟气速度基本与通道内空气速度一致,故在火灾发生后的短时间内高层建筑楼道内的空气流动速度是影响烟气扩散的重要因素。烟气温度、速度和浓度的变化速度与高层建筑发生火灾的楼层的位置有关系,发生火灾的楼层离中和界越远,热压越大,烟囱效应越明显,楼道内空气流量就越大,烟气的温度、速度和浓度的变化速度就越快,导致烟气扩散加剧,对疏散造成影响。在竖向,冬季火灾时的烟气扩散速度大于夏季火灾时的烟气扩散速度;冬季烟气扩散呈单一向上蔓延的趋势,而夏季烟气扩散则同时向上和向下扩散。同时还利用流线流量原理推导出了高层建筑的防烟空气幕性能参数的设计计算数学模型并应用到了模拟和实验中,并对不同的烟气控制模式如挡烟垂壁、挡烟垂壁+排烟、空气幕墙(设置在连接前室的通道上方)和空气幕墙+排烟等进行了模拟和实验,由模拟结果得知采用空气幕墙+排烟的控制模式可以为人员的逃生增加一倍多的时间,具有很好的防排烟效果,且需要的新风量相对于前室机械加压防烟方式大大减少,能防止火灾的进一步扩散,同时也解决了对前室加压造成的楼梯间和前室门口两侧压力差加大,增大开门阻力,不利于老人、儿童等弱势群体的疏散、容易造成伤亡的问题。实验则通过对空气幕的射流速度、喷射角和厚度的调整,确定了高层建筑防烟空气幕的设计方案,了解了高层建筑防排烟空气幕的流场特性,初步确定了合适的空气幕射流风量、速度、厚度、角度等,找到了合适的流量比关系,为防烟空气幕的结构设计提供了依据。从实验数据可知,采用空气幕防烟对于高层建筑火灾时的疏散是比较有利的,阻烟效果良好,从而可以得知纵向阻烟相对于横向阻烟更具有优越性,并且也可以应用在地铁站中<sup>[14]</sup>。

除了上述三种在高层建筑火灾烟气扩散与控制的模拟中被广泛采用的方法外,还发展了以这三种方法为基础的综合模拟方法。场模拟、区域模拟和网络模拟各有优点,但同时局限性也很强。因此中国科学技术大学的火灾科学重点实验室创造性地提出了一种体积守恒、修正压力的场区网模型,

对于一栋建筑,着火房间的烟气运动一般适用场模拟,附近的房间一般适用区域模拟,绝大部分远离着火房间的区域则适用网络模拟,对受限空间的爆轰过程进行模拟得到的结果较为理想,但仍然需要不断充实场区网模型,如火焰辐射模型等<sup>[15]</sup>。应用该方法的关键是处理好边界耦合问题以及三个模拟场之间边界初始值的获取。

近年来,大涡模拟技术在复杂湍流流体的模拟上取得了成功<sup>[16-17]</sup>。结合大涡模拟技术,采用体积守恒、压力修正的区域模型发展了一种新的火灾过程场区模拟程序。它采用小 Mach 数下的三维可压缩 Navier-Stokes 方程和有限差分法计算了滤波后的控制方程,结合 Smagorinsky 亚格子尺度模型对着火房间内的烟气运动过程进行了数值模拟,采用自编的场模型 FAC3 与区域模型连接,用假设上、下层各物理量的值相等的方法来实现网络模拟,对一栋 5 层建筑内的火灾烟气运动过程进行了模拟<sup>[18-19]</sup>。这种模拟思想充分利用了区域模拟和场模拟两种模拟方法的优点,有效地消除了区域模拟和场模拟各自的不足,受到了国际学术界的广泛重视,已被英国和日本等国相关研究机构采用<sup>[20]</sup>。中国科学技术大学的火灾实验室建立了基于大涡模拟的场-区复合模型程序 LFZ,用于对建筑火灾烟气进行模拟。哈尔滨工业大学课题组将场模型 FDS 与区域模型 CFAST 相连接,用场-区复合模型模拟高层建筑的火灾发展过程,日前该研究工作已取得一定成果<sup>[21]</sup>。该方法能高效准确地模拟烟气的运动过程,而且模拟结果对研究火灾烟气运动规律以及消防安全性能设计与评估具有重要的指导意义。随着计算机的发展,大涡模拟也将得到更为广泛的应用。

## 5 前景和展望

对于高层建筑火灾烟气的运动而言,其主要的影响因素为烟囱效应,中南大学和中国科学技术大学对其理论、产生以及作用机理都进行了详细的研究和分析<sup>[18,22-23]</sup>。在火灾时烟气绝大部分都是向上或向下流动,但在同一层扩散时,烟气就会通过走道从各个房间的空隙处渗透进去,而且烟气流动情况也随着火灾的变化而变化,因此在情况复杂的火灾区和烟气生成区采用场模拟,在附近的房间、走廊和通道采用区域模拟。设置防排烟装置的前室以及安全楼梯处的火灾烟气受烟囱效应影响,运

动更为复杂,影响人员的疏散,建议采用精确的场模拟。由于烟囱效应而扩散到其他相对较远楼层(同时也可以结合能见度标准来确定该区域)的烟气,分层明显,扩散也较为稳定,采用区域模拟。由于网络模拟自身缺点的存在,在火灾范围很大、燃烧所产生的高温膨胀对烟气流动产生重要影响而使其流动不随着气流流动时就不能采用了。

随着对火灾作用机理认识的不断深化,在模拟中发展了预混燃烧和非预混燃烧等各种燃烧子模型,同时由于这些模型的加入和不断完善,对于更加真实地反映火灾现场的各个流场和提高模拟结果的精确性起了至关重要的作用。随着消防观念的深入人心,现代高层建筑都带有自动水喷淋灭火等自救防护系统,在其作用下火灾烟气扩散时伴随着相变过程,这给模拟带来了新的问题。因此如何更加真实地反映在喷淋系统工作条件下火灾以及火灾烟气的产生与运动规律也是很重要的方面。

随着经济的发展,高层建筑越来越多,火灾的危险性也随之增大,造成的经济损失和人员伤亡也越来越严重。因此必须加强火灾的计算机数值模拟领域的探索和研究,将火灾过程的确定性与随机性模型相互融合,建立尽可能真实的建筑火灾模型,确定合理安全的疏散路线和疏散出口,正确设计排烟系统和排烟口位置,同时要促进火灾风险评估和火灾安全防护工作的开展,最大限度地减少经济损失和保证人员安全。

## 参考文献:

- [1] 徐志胜,常玉锋,白国强,等. 高层建筑火灾防排烟的研究[J]. 西部探矿工程,2003(12): 179-181
- [2] Chow W K. Comparison of the use of fire zone and field models for simulation atrium smoke-filling processes[J]. Fire Safety Journal,1995, 30(4): 337-353
- [3] 公安部消防局. 中国消防年鉴[M]. 西安:中国人事出版社,2001-2004
- [4] 姚建达,陆靖婷. 高层建筑火灾中烟气运动模拟的新方法[J]. 中国减灾,1997,7(4): 49-52
- [5] Cox G. Challenge of fire modeling[J]. Fire Safety Journal,1994, 29(2): 123-132
- [6] 姚征,陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报,2002,24(2): 137-144
- [7] 雷勇,魏涛,柳共青. CFD 可视化研究与进展[J]. 航

- 空计算技术,1999,29(1):6-9
- [8] 傅祝满,范维澄.建筑火灾区域模拟研究[J].自然科学进展,1997,7(3):345-349
- [9] 钟茂华,厉培德,卢兆明,等.多层多室建筑火灾烟气运动的网络模拟[J].火灾科学,2002,11(2):103-107
- [10] Rho J S, Ryou H S. A numerical study of atrium fires using deterministic models [J]. Fire Safety Journal, 1999,34(3):213-229
- [11] 王利珍,刘方,蒲清平.大空间建筑喷淋对烟气层的影响[J].消防科学与技术,2004,23(6):525-527
- [12] 陈建国,陈海昕,符松.体育场馆火灾烟气运动数值模拟中发现的 2 个典型现象[J].科学通报,2005,50(20):2305-2308
- [13] Zhou Ru, He Jiapeng, Xie Juan, et al. Three-dimensional field simulation on single space fire[C]// Process in Safety Science and Technology, 2005: 1427-1431
- [14] Zhou Ru, He Jiapeng, Jiang Juncheng. Analysis of smoke dynamic field in subway station fire [C] // Process in Safety Science and Technology, 2006: 1329-1333
- [15] Yao Jianda, Fan Weicheng, Kohyu Satoh, et al. Verification and application of field-zone-network model in building fire[J]. Fire Safety Journal, 1999, 34(1):35-44
- [16] Zhang Wei, Andrew H, Michael K. Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation[J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(1): 721-752
- [17] Gao P Z, Liu S L, Chow W K, et al. Large eddy simulation for studying tunnel smoke ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Techlogy, 2004, 19(6):577-586
- [18] 杨锐,蒋勇,纪杰,等.建筑火灾中基于大涡模拟的场区复合数值模型及其应用[J].自然科学进展,2003, 13(6):637-641
- [19] Chow W K, Yin R F. A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics [J]. Building and Environment, 2004,39(6):611-620
- [20] Hua Jinsong, Wang Jian, Kurichi K. Development of a hybrid field and zone model for fire smoke propagation simulation in buildings[J]. Fire Safety Journal,2005,40(2):99-119
- [21] 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,2004:32-47
- [22] 李耀庄,蒋春艳.不同开口状况下多层建筑火灾烟气运动的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2006,26(1):34-37
- [23] 霍然,胡源,李元洲.建筑火灾安全工程导论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999:85-98

(上接第 115 页)

水锅炉和对应水泵的运行;由于水的热容量大,一次水环路温度变化相对较缓慢,所以,利用一次水环路回水温度作控制边界条件,正是其作为自控信号的优势。

检测装设在二次水系统供水干管上的温度传感器测定的水温,当其降到 60℃以下时,及时指令开启一次水环路,增加 1 台热水锅炉和对应水泵运行。

## 6 结论

综上所述,二次泵变流量空调水系统的自动控制方案如下:依据装设在二次水环路供水干管上的温度传感器以及一次水环路回水总管上的温度传感器发出的信号,控制一次水环路设备的自动启停和热水锅炉的燃气供应量;依据末端逻辑设定的压差传感器信号,控制二次水环路水泵的运行频率和

启停。笔者认为这是一种简单而行之有效的方案,特此提出与读者共同探讨。

## 参考文献:

- [1] 柴慧娟.高层建筑空调设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1995
- [2] 蒋传遐.空调定水量系统改为变水量系统的可行性研究[D].长沙:湖南大学,2000
- [3] 陈在康,丁力行.空调过程设计与建筑节能[M].北京:中国电力出版社,2004
- [4] 张锡虎.连通器和混水器及其在二次水系统中的合理应用[J].暖通空调,2005,35(11):67-71
- [5] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2005