

文章编号:1674-2869(2017)04-0337-11

大空间建筑火灾烟气的蔓延及控制研究进展

王方舜

湖北省武汉市公安消防支队,湖北 武汉 430100

摘要:阐述了大空间建筑中火灾蔓延发展的特点和烟气蔓延的规律,分析了温度、湿度、热膨胀、风及室内消防设施等因素对大空间建筑火灾烟气的蔓延规律的影响.比较现有大空间建筑烟气控制方法,针对大空间建筑的特殊性和复杂性,提出在选择常规防排烟方法的同时,应着重利用自动消防设施合理地对烟气进行引导和分割,防止烟气的蔓延扩大;选择合适的火灾探测器,以便快速发现火灾烟气;合理设置补风系数,保证人员的有效疏散.

关键词:大空间建筑;火灾烟气;烟气控制;影响因素

中图分类号:TK121 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.04.006

Research Progress of Smoke Spread and Control in Large Space Building Fires

WANG Fangshun

Wuhan Municipal Fire Brigade of Hubei Fire Bureau, Wuhan 430100, China

Abstract: This article expounds the characteristics of fire development and the law of smoke spread in large space buildings, and analyzes the effects of temperature, humidity, thermal expansion, wind and indoor fire control facilities, etc on the spread law of fire smoke. To improve the flue gas control of large space buildings, we suggest by comparing with the smoke control methods that we should pay attention to using automatic fire fighting facilities to reasonably guide and split the flue gas to prevent the spread of flue gas expansion, select the appropriate fire detector to quickly find the fire smoke, and reasonably set the wind coefficient to ensure the effective evacuation of personnel, in addition to the use of the conventional smoke control methods.

Keywords: large space buildings; fire smoke; smoke control; influence factors

近年来,全国各地的大型或高层建筑层出不穷,其中往往包含某种形式的内部大空间.关于大空间建筑国内没有明确的定义,也有学者根据建筑的高度和体积大小来界定,然而在实际研究中并没有准确的区分.通常,我们把内部空间相当大,没有或者缺少实体分割所形成的建筑叫做大空间建筑,例如图书馆、博物馆、影剧院、礼堂、候车厅、大型仓库和车间、高层建筑的中庭等.大空

间建筑给人们提供了宽敞、舒适的室内环境,保证了很多室内活动少受或不受外界的影响,因而受到人们的普遍欢迎,已成为现代建筑的重要设计方向之一,正随着国民经济和城市化的发展而发展.火灾统计表明,我国发生的多起重特大火灾,多与大空间建筑物有关^[1],如2008年深圳龙岗舞王俱乐部火灾、2010年吉林市商业大厦火灾、2012年天津蓟县莱德商城火灾、2015年哈尔滨太古街

收稿日期:2016-12-07

作者简介:王方舜,硕士,工程师. E-mail: 487181110@qq.com

引文格式:王方舜. 大空间建筑火灾烟气的蔓延及控制研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(4): 337-347.

WANG F S. Research progress of smoke spread and control in large space building fires [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(4): 337-347.

日杂仓库火灾等. 与其它建筑火灾明显不同的是, 由于建筑物内部空间大、构造复杂、可燃物堆积多, 一旦发生火灾, 高温烟气容易集中, 导致人员疏散困难、灭火难度加大, 极易造成重大的人员伤亡和经济损失.

随着我国经济发展的迅速加快, 大空间建筑越来越普遍. 这类建筑不仅在高度和广度上有了很大的发展, 形式也趋于多样, 功能也更加复杂, 大空间建筑火灾已成为建筑火灾的一个难题. 大量的火灾事故统计表明, 烟气是阻碍人们逃生和消防员进行灭火行动、导致人员伤亡的主要原因之一. 据有关火灾资料统计, 烟气中含有二氧化碳、一氧化碳、氟化氢、氯化氢、氨、氰化氢、煤焦油粒子等有毒有害成分, 而高温烟气对大空间建筑内的被困人员而言, 危害作用更加严重. 这是因为在一个很大的空间内, 烟气不经任何阻挡, 很容易蔓延至整个空间; 如果烟气温度较高, 还有可能引燃其他的可燃物, 造成更大的危害. 因此, 认真研究大空间建筑火灾, 探索火灾烟气的蔓延规律, 寻求其烟气控制方法, 对于减少大空间建筑火灾中人员伤亡和财产损失具有十分重要的意义, 这也是我国防灾减灾的一个重要方面^[2].

20 世纪 50 年代, 英国最先开始了对大空间建筑烟气流动规律和控制技术的研究, 20 世纪 60 年代以后, 随着世界上高层建筑逐渐增多, 国际上掀起了对大空间建筑火灾烟气流动研究的热潮^[3-5]. 1964 年, 日本开始利用国内现有建筑开展实体火灾排烟实验, 2 年以后开始了烟气流动基础理论研究. 1976 年, 美国学者 H.P.Morgan 在一个 1/10 的小尺寸两层商场模型中, 进行了烟气释放速率、光学浓度及防火卷帘设置的研究, 由此提出了在多层购物商场中的烟气控制方法. 20 世纪 90 年代以后, 大空间建筑的火灾防治研究得到了长足的发展. 针对大空间建筑的特殊性和复杂性, 处方式防火设计已经不能满足其实际需要, 目前发达国家倾向于采用性能化设计规范代替处方式设计规范.

近些年我国对大空间建筑防排烟特点做了深入仔细研究, 该类研究为大空间建筑的安全设计和人员安全疏散提供了理论依据. 其中, 中国科学技术大学与香港理工大学关于大空间建筑火灾防治的研究在国内处于领先地位. 他们合作建设了一座大空间建筑火灾实验厅, 大厅的内部尺寸为长 22.4 m、宽 12.0 m、高 27.0 m, 屋顶设有 8 个 1.2 m×1.2 m 的正方形排烟口. 为更好地研究机械

排烟, 其中的 4 个排烟口被安装了 HTP-E-11 型大功率的高温排烟风机^[6], 如图 1 所示.

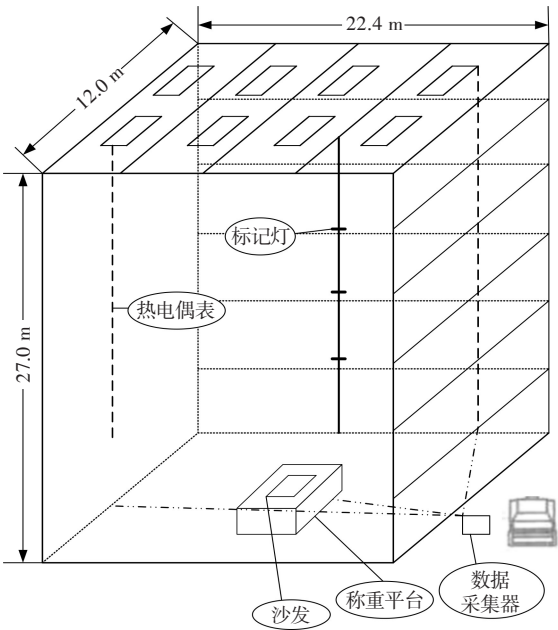


图 1 大空间实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large space experiment

该实验以油池火做为火源, 以沙发做为可燃物, 模拟大空间建筑火灾. 以油池火做为火源容易进行处理, 这种火源的初期增长阶段很短, 容易达到稳定燃烧, 可以视为在整个过程中热释放速率不变, 因此这种火源又被叫做定火源^[7]. 在该实验条件下, 通过分析对比实验结果与计算结果, 归纳了热释放速率与烟气运动参数之间的关系. 但是在实际大空间建筑火灾中, 绝大部分燃烧物质是固体可燃物, 其热释放速率和烟气生成速率比定火源要复杂得多, 与试验结果有一定偏差. 研究人员认为, 对于变火源燃烧的情况, 可以采用分段近似的方法来对烟气层的下降速率进行模拟. 因此, 该实验对实际情况仍具有十分重要的指导意义.

为研究大空间建筑火灾烟气蔓延规律, 寻求烟气控制方法, 就必须先弄清大空间建筑火灾蔓延发展的特点, 因为烟气是伴随火灾产生的, 火灾的特点决定了烟气的特点. 本文根据大空间建筑的烟气特性, 分析其烟气的蔓延规律, 指出了烟气对消防员扑救火灾和人员疏散造成的困难. 同时, 还分析了各种因素对大空间建筑火灾烟气的蔓延规律的影响, 这些影响因素包括温度、湿度、热膨胀、风及室内消防设施等. 在此基础上, 对比现有的大空间建筑烟气控制方法, 指出其适用范围和优缺点. 针对大空间建筑的特殊性和复杂性, 对烟气控制方法给出合理化的建议.

1 大空间建筑火灾蔓延发展的特点

1.1 大空间建筑的分类

根据其结构特点,大空间建筑大体可分为以下几种:

1)高度不是很高,但是平面面积很大的大面积型建筑,如生产车间、大型商场等.该类建筑的占地面积可达几千至几万平方米,建筑高度一般在6 m以下;

2)高度高且占地面积大,大空间四周没有楼层的单层建筑,如会堂、展览馆、剧院、体育馆、候车厅和大型仓库等.其占地面积通常有几百平方米至上千平方米,建筑高度为10 m~20 m;

3)共享中庭的高层建筑,该类建筑的大空间就是中庭,其占地面积只有几十平方米至上百平方米,高度达几十米以上.

表1给出了大空间建筑具体用途的分类.

表1 大空间建筑分类		
Tab. 1 Classification of large space buildings		
序号	类别	例子
No.	classification	example
1	体育建筑	体育馆、室内泳池、拱顶球场
2	会场	大礼堂、大会议厅、讲堂
3	观览场所	电影院、音乐厅、水族馆
4	展示场所	博物馆、博览会场、展览馆
5	宗教建筑	寺院、教堂
6	工业建筑	一般车间、大型仓库

1.2 大空间建筑的火灾特性

许多大空间建筑为了满足其需要,多采用钢骨架和钢筋混凝土做为主体支撑搭建,也有的仅以砖石构建,如教堂、寺庙等.因中间分割物较少甚至没有,这些装饰装修材料主要分布于屋顶和四周.在建筑中为了延长材料使用时间、美化建筑结构以及满足某些特殊要求,许多建筑内都采用了可燃或者易燃的装饰材料,这极大地增加了建筑的火灾危险性.根据大空间建筑的特点,大空间建筑的火灾特性归纳如下^[8-10].

1)火灾隐患多.该类建筑物中许多是多功能建筑物,有的内部还贮存了较多的可燃物,故火灾荷载较大.例如许多综合楼,既有大型商场又有存放服装、日用百货的周转库房,还有餐厅、游戏厅、歌舞厅、电影院等,一座大空间建筑可能有几十个单位,一家商场可能有近百个体摊贩等.由于该类建筑综合性较强,不便于统一管理,对消防安全的重视程度不一,潜在的火灾隐患多.

2)火势蔓延快.许多大空间建筑高度较高,尤其是高层建筑的中庭.如果某一楼层发生火灾,高温烟气就会随着各种垂直通道迅速向上蔓延.如建筑高度为100 m,烟气不到30 s就会扩散到顶层,向水平方向扩散,遇到存放的可燃物就会燃烧,引起新的着火点.特别是高层建筑的中庭,由于上下联通,很容易形成立体燃烧.另外,随着高度增加,水平风力会越大,助长火势蔓延.

3)扑救难度大.该类建筑内部空间大、氧气充足、火势发展快、热辐射强、烟雾浓,给消防人员开展灭火战斗造成了困难.另外,面对新型建筑,我们缺乏扑救大空间建筑物火灾的实践经验,指挥能力欠缺.且灭火面积较大、楼层较高时,会出现消防供水量不足、举高消防车难以达到高度等问题.

4)建筑消防设施难以启动.发生火灾时,烟气上升至顶棚,被感烟探测器或感温探测器探测,发出报警信号,启动室内消防设施扑灭初期火灾,这在普通建筑中是很容易实现的.但是在大空间建筑中,只有火势发展到一定阶段,烟气浓度和室内温度有显著上升时,火灾探测器才能开始工作.即使启动,火势也已到相当规模,延误了报警的最有利时机.同样,依靠温度上升而破裂的自动喷水灭火系统的喷头,由于短时间内温度达不到动作温度,难以启动灭火,而喷头喷出的水滴从几十米的高度落下来,不易到达燃烧物的表面,从而失去有效控火作用.

5)疏散困难.许多大空间建筑是人员密集场所,由于建筑空间过大,人们对建筑内部结构不了解,加之室外安全出口的距离远,疏散时间通常较长.另外,由于烟气很容易充满整个空间,影响了被困人员的视线,增大了人员疏散难度.

6)防烟分隔困难.在建筑内设置防烟分隔构件可以有效地阻止火灾烟气的蔓延,然而,像展览厅、候车室、剧院、高层建筑中庭很难或者无法设置防烟分隔构件.虽然人们可以利用防火卷帘、挡烟垂壁等防烟构件对烟气进行阻挡,但许多区域的防烟分区面积都超过了规范规定的标准.对大空间建筑合理划分防烟分区,设置有效的防烟分隔已成为一个研究的难题.

7)易发生坍塌的危险.大空间建筑内部分割物较少,支撑结构多采用钢结构或者钢筋混凝土结构,耐火等级偏低.钢材虽为不燃材料,但在高温下容易发生塑性变形,强度和刚度大大下降.普通低碳钢在350 ℃时,强度明显下降;温度为550 ℃时,强度约为常温的1/2;温度为600 ℃时,强

度约为常温的 1/3. 大空间建筑一旦发生火灾, 其内部温度远超 600 ℃, 普通钢材几乎完全丧失强度和刚度, 即使钢材表面有防火涂层, 在高温下仍然存在坍塌的危险.

2 大空间建筑火灾烟气的蔓延规律

火灾烟气的特性与其火灾烟气的蔓延有着紧密的关联, 研究大空间建筑火灾烟气的蔓延规律是研究烟气控制的前提.

2.1 火灾烟气的特性

材料燃烧过程中通常会释放出一定量的火灾烟气, 烟气的生成速度、浓度、成份等因素^[11], 决定了材料燃烧过程中的烟气特性. 为有效减少烟气的危害, 把握火灾烟气的特性是十分有必要的. 火灾烟气的特性主要包括以下 4 个方面.

2.1.1 烟气颗粒大小 材料在燃烧时通常会产生烟气, 特别是在阴燃时会产生大量的烟气. 烟是悬浮在空气中的气体、液体或固体小颗粒. 材料的性质对烟气颗粒大小有着重要的影响^[12]. 一般来说, 含碳量较少的物质, 如乙醇、丙酮等, 发烟量较少, 几乎不产烟; 而像石油、橡胶等含碳量较多的物质, 燃烧时发烟量很大, 肉眼就能看到碳黑颗粒. 描述烟颗粒尺寸分布的主要特征量是颗粒的平均直径 d_{gm} (μm) 和颗粒尺寸分布范围的宽度 d_{32} (μm).

2.1.2 烟气浓度 可见光在烟气中传播时, 由于烟粒子对光子的吸收和散射作用, 只有部分光线穿过, 火场能见度大大降低, 给人员逃生和疏散造成了很大的困难. 烟气的浓度通常有以下 3 种表示方法:

1) 质量浓度 μ_s ^[13]: 单位体积的烟气中烟粒子的质量, 即

$$\mu_s = m_s / V_y, \quad (1)$$

式(1)中: m_s 为烟粒子质量, g; V_y 为烟气体积, m³.

2) 颗粒浓度 n_s ^[13]: 1 m³ 的烟气中含有的烟粒子数目, 即

$$n_s = N_s / V_y, \quad (2)$$

式(2)中: N_s 为空间中的烟粒子总数; V_y 为烟气体积, m³.

3) 光学浓度: 用减光系数 C_s 来表示. 如果用 I_0 表示入射光强度 (C_d), 用 I 表示透射光强度 (C_d), l 代表烟气的长度, 根据比尔-朗伯定律求出减光系数 C_s ^[13]:

$$C_s = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (3)$$

2.1.3 能见度 能见度是在某一环境下人员能看到的最大距离, 火场中能见度对人员疏散至关重要. 研究表明, 能见度与烟气的减光系数成反比^[13], 即:

$$C_s \cdot D = K, \quad (4)$$

式(4)中: C_s 为减光系数, 1/m; D 为能见度, m; K 为系数.

这表明减光系数越大, 能见度越低. 为保证人员在疏散过程中能够看清疏散指示标志和安全出口, 规定在疏散过程中能见距离不得小于某一最小值, 这个最小值称为疏散极限视距, 用 D_{\min} 表示. 对于高层旅馆、百货大楼等建筑, 规定疏散极限视距不得低于 30 m; 对于人员密集的住宅、生产车间等, 疏散极限视距不得低于 5 m.

2.1.4 烟气温度 火灾烟气的温度与起火点的距离有关, 距离起火点越远, 烟气温度越低. 大空间建筑内部空间大, 如果堆放可燃物较多, 发生火灾后可燃物受热分解后导致烟气大量聚集, 当可燃气体浓度达到一定值时, 很容易引燃整个空间内的可燃物. 为简化计算, 通常用标准升温曲线来近似描述某时刻房间的平均温度^[13], 即:

$$t_{vr} = 345 \lg(8\tau + 1) + t_0, \quad (5)$$

式(5)中: t_{vr} 为着火房间 τ 时刻平均温度, ℃; τ 为从着火房间门窗玻璃破碎时起算的时间, s; t_0 为着火房间的初始温度, ℃.

高温烟气不仅会使人心跳加速, 产生幻觉, 还会对人的毛细血管和呼吸系统造成不可逆转的危害. 实际火灾统计表明, 因为高温烟气而致人死亡的数量, 超过了其他因素导致人死亡数量的总和.

2.2 大空间建筑火灾烟气的蔓延规律

大空间发生火灾时室内空间会产生大量的烟气, 对烟气迅速进行探测、报警和控制是保障消防人员扑灭火灾、疏散人员的先决条件. 掌握烟气的流动规律则是对烟气进行控制的前提. 大空间建筑由于内部空间大、构造复杂, 与普通建筑内烟气流动规律有所不同.

普通建筑发生火灾后, 由于可燃物的燃烧或热分解会产生大量的高温烟气, 烟气在浮力的作用下向上升腾. 一般的普通建筑层高有限, 烟气上升至顶棚处向四周水平扩散. 在顶棚及两侧墙壁的冷却作用下, 烟气温度逐渐下降, 两侧的烟气开始沿墙壁向下流动. 当烟层下降到门窗洞口处时, 将通过门窗洞口向室外或走道扩散. 由于烟气温

度较高,即便窗户关闭,窗上的玻璃也会因为高温而炸裂,烟气从破裂处逸出,如图2所示。

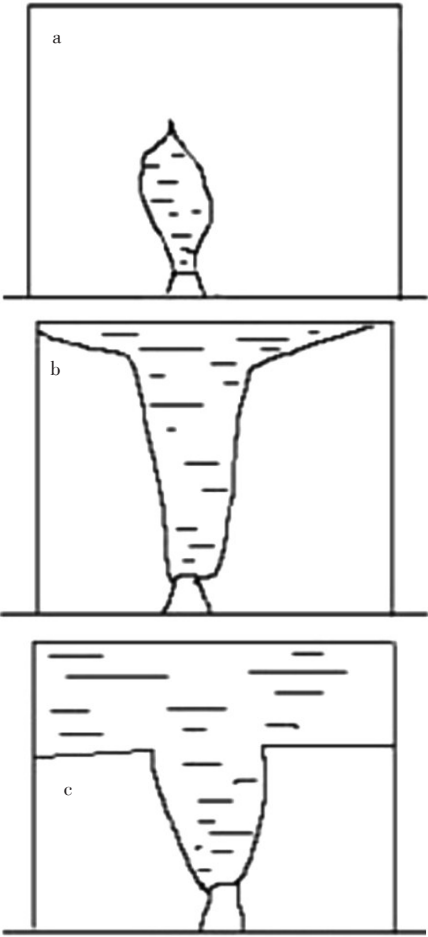


图2 普通建筑烟气蔓延规律
(a)烟羽流上升;(b)烟层形成;(c)烟层界面下降
Fig. 2 Fire smoke spread of common buildings
(a) Rise of plume ;(b) Formation of smoke boundary layer;
(c)Interface of smoke layer

与普通建筑不同,大空间建筑烟气蔓延规律具有其特殊性.常见的大空间建筑虽然有3类,但就其建筑特征来说,大空间建筑通常有很大的内部开敞空间,体积大、高度高是其不同于一般建筑的显著特征.另外,许多大空间建筑属于人员密集场所,具有功能复杂、空间分隔较少、可燃物多等特点.这类场所一旦发生火灾,其燃烧物有充足的氧气供应,火灾大小受燃料控制.据此,大空间建筑烟气蔓延规律有以下3种情况.

2.2.1 可燃物较少或火源较小 若可燃物较少,火源较小,则不会发生大的火灾.由于产生的烟气较少,烟气温度不是很高,在烟气上升的过程中,周围冷空气不断被卷入,使烟气的温度越来越低,最终接触不到顶棚,即不会像普通建筑火灾烟气那样形成顶棚射流.这种情况下烟气不仅不能从

建筑的高窗排出,反而会向下沉,在下部越集越厚,严重影响火场人员疏散,甚至可能导致人员死亡,如图3所示。

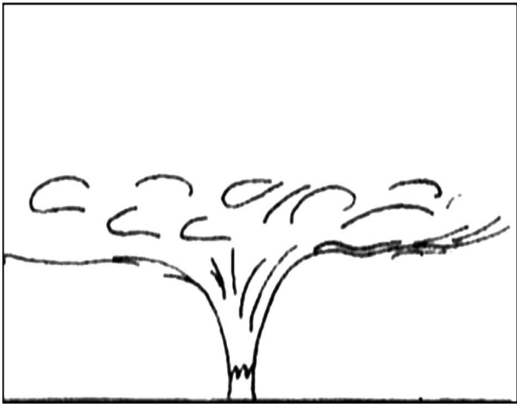


图3 较少可燃物情况
Fig. 3 Less combustible case

2.2.2 可燃物较多或火源较大 若可燃物较多,火源足够大,烟气能达到很高的温度,烟气受到的浮力较大,向上做加速运动;烟气在上升过程中会不断卷吸周围的空气,因此会出现不断扩张的现象,形成类似倒锥形的烟气流.热烟气与顶棚碰撞后向四周扩散,由于流体运动过程中的黏性作用,靠近顶棚的薄层烟气扩散速度较低;随着烟气向下移动,其速度会不断增加;但向下移动一段距离后,就会由于浮力的因素使速度趋于零,壁面周围的烟气开始远离壁面运动.此时,烟气的流动可以概括为浮力射流、顶棚射流和反浮力射流3个阶段,如图4所示。

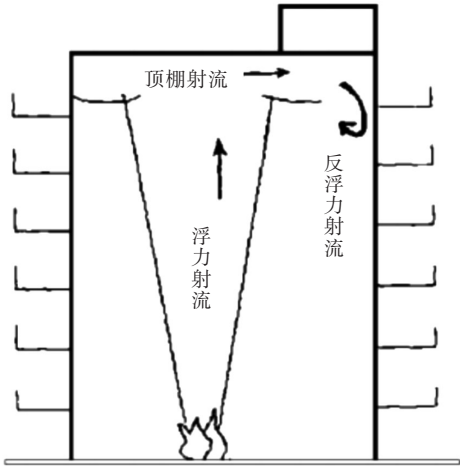


图4 顶棚射流的形成
Fig. 4 Formation of ceiling jet

2.2.3 热障现象 夏季,由于阳光直射,顶棚温度较高,顶棚下方会形成一定厚度的高温热气层,俗称“热障”.烟气在上升的过程中遇到上部的热气

层,所受的浮力由向上变为向下,运动状态也会由原来的加速状态变为减速状态,速度逐渐减小;由于烟气的卷吸作用,烟气会和上部的烟气层不断混合,直到两者温度相同,此时存在一个临界状态,即热气层的阻碍作用消失.当火势进一步扩大时,烟气温度又会不断升高.如图5所示.

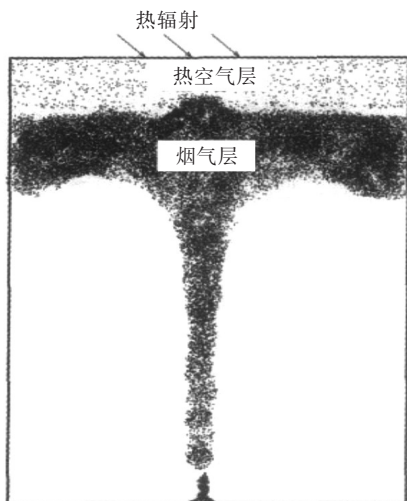


图5 热障现象

Fig. 5 Phenomenon of thermal barrier

2.3 火灾烟气蔓延规律的影响因素

火灾烟气的蔓延规律受多种因素的制约,概括起来有4种:温度、湿度、热膨胀和风.

2.3.1 温度对火灾蔓延规律的影响 大空间建筑内发生火灾时,由于建筑材料的燃烧会产生热烟气,热烟气的密度比室外空气小,因此会上浮,产生压力差.将室外空气的密度记为 ρ_w ,将室内烟气密度记为 ρ_n ,大空间建筑的高度记为 h ,那么称 $(\rho_w - \rho_n)gh$ 为热压或浮力.在理想情况下,热烟气位于房间上层,新鲜空气位于下层.在着火房间通常可以看到,新鲜空气从下部的开口流入,热烟气通过上部开口流出.因此,火场温度高低对火灾烟气蔓延有着至关重要的影响.如图2所示,设想有一大空间建筑发生火灾,火灾初期,室内温度不是很高,分子热运动较慢,烟气在水平方向和竖直方向扩散都较慢;火灾到猛烈燃烧阶段,室内温度可高达1 000℃以上,分子热运动剧烈,烟气在水平方向和竖直方向扩散都较快.在高度较高的大空间建筑中,这种现象更加明显.一个大空间建筑,发生火灾时,设建筑高度为 H ,内部烟气的温度为 T_1 、密度为 ρ_1 ,外部温度为 T_2 ,外部空气的密度为 ρ_2 ,建筑顶部的气压为 p ,底部的压力为 p_2 ,内部烟气的压力为 p_1 ,如图6所示.

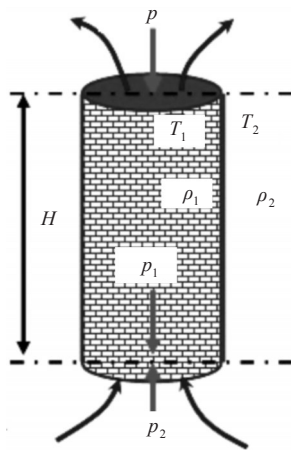


图6 烟囱效应示意图

Fig. 6 Schematic diagram of chimney effect

初始时: $T_1 = T_2$, $\rho_1 = \rho_2$,

$$p_1 = p + Hg\rho_1, p_2 = p + Hg\rho_2.$$

所以 $p_1 = p_2$

火灾情况下, $T_1 > T_2$, $\rho_1 < \rho_2$,

$$p_2 - p_1 = p + Hg\rho_2 - (p + Hg\rho_1) = Hg(\rho_2 - \rho_1).$$

(6)

于是冷空气从建筑下部进入,热烟气从建筑上部流出,这就是所谓的烟囱效应.从式(6)还可以看出,建筑内外温度差越大、建筑高度越高,烟囱效应越明显.大空间的高层建筑,特别是高层建筑的中庭,高度往往达到几十米甚至上百米,因为烟囱效应,烟气流动的特别快,可达2 m/s~4 m/s,几十层的大楼不到1 min就会充满热烟气^[14].

2.3.2 湿度对火灾蔓延规律的影响 湿度主要由天气情况、消防射水和自动喷水灭火系统的启动来控制.湿度不仅影响烟气的蔓延速度,使烟气难以迅速地排出去,而且还会影响可燃物的产烟速率、燃烧产物的性质及产烟量.湿度对烟气的蔓延速度影响较小,但对建筑材料的烟气特性影响显著.为此,作者进行了湿度对烟密度影响的实验.实验选取4种常见的装饰材料进行了烟密度实验.实验选取了尺寸为3 cm×3 cm密度板、实木板、三合板和刨花板各9块,分别在干燥状态、泡水2 min和泡水5 min后,在JCY-1型建材烟密度测试仪中进行试验,每种材料进行3次实验,取3次的平均值作为本实验的结果.实验结果表明,由于三合板和刨花板质地松软,吸水量较大,在前50 s内产烟速率很慢,较干燥状态比,总产烟量基本不变,但产烟量达到峰值的时间延迟了约150 s.密度板和实木板因为吸水性小,受湿度影响较小.因

此,湿度对烟气的产生速率有明显的延缓作用,这对火灾扑救和人员疏散是十分有利的^[15]。

2.3.3 热膨胀对火灾蔓延规律的影响 当一个完全封闭的房间发生火灾时,由于加热和空气膨胀,压力会不断升高,尤其是火灾发展很迅速时,压力差会产生实质性的影响。如果火灾大小保持不变,压力会呈线性增加,即压力会随着时间不断增加。通常大空间建筑都有一定的空气泄露,例如通过自然通风的形式或门窗漏风,原则上大空间建筑内的压力只会增加十到几十帕斯卡,而大空间建筑材料是能够承受这样的压力的。因此,热膨胀导致门窗开口破裂、烟气外泄的可能性很小,但热膨胀会在一定程度上加速烟气向四周扩散。

2.3.4 风对火灾蔓延规律的影响 风的基本参数是风速和风向。风由于气压差而流动,从而产生动压。所有建筑或多或少都会有一定的空气进入,由于大空间建筑内部通风条件较好,风对建筑内的火灾烟气的流动会产生很大的影响。风压与风速的平方成正比^[13],即:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2. \tag{7}$$

如果风速从 1 m/s 增加到 10 m/s,迎风面的风压将从 0.4 Pa 增加到 40 Pa。

大空间建筑屋顶表面通常是在迎风面产生正压,在背风面产生负压。平屋顶的整个表面都处在负压中。如果风向与屋脊平行,三角形屋顶的整个表面也可以都处于负压中。由于屋顶角度而产生的压力差在某些情况下可以改善火灾排烟的效果。如果门窗(垂直排风口)设置在背风面,而入口设置在迎风面,火灾烟气可以通过门窗或排烟口很好地排出。但是,由于风向是不确定的,开口位置一旦选定,就很难进行改变。因此,大空间建筑利用固定的门窗或排烟口进行自然排烟,通常难以达到理想的效果。

2.4 室内消防设施对火灾烟气蔓延的影响

2.4.1 防烟构件对火灾烟气蔓延的影响 为了控制建筑发生火灾后烟气的流动,将烟气控制在一定范围,方便排烟设施将烟气排出,通常用一些构件在建筑顶棚划分防烟分区,使用在大空间建筑内的防烟构件主要有挡烟垂壁、挡烟隔墙、防火卷帘等。

挡烟垂壁用不燃材料制作,其设置应当符合规范要求,保证其有效高度。大空间建筑,尤其是大型商场的顶棚、高层建筑的中庭,常常会设有挡烟垂壁。当室内发生火灾时,火灾烟气向上聚集,

挡烟垂壁能将其控制在一定高度而不向下蔓延。在火灾初期,挡烟垂壁对阻止烟气的蔓延是非常有效的。但随着火势的发展,烟气如果不能及时排除,烟气层的厚度超过挡烟垂壁的有效高度时,烟气将向四周蔓延;若烟气的流动速度过大,也会越过挡烟垂壁的下端向水平方向蔓延而失去挡烟效果。

挡烟隔墙是用不燃材料砌成,将建筑内部划分成若干个区间,将烟气控制在一定区域而不向周围扩散。挡烟隔墙在大型仓库中使用较多。需要注意的是,挡烟隔墙应上下贯通,对保护区实现完全隔离。装有吊顶的建筑,也要将隔墙砌至梁板底部。

防火卷帘平时卷放在门窗洞口上部,火灾发生时可以通过手动或自动控制将其放下展开。防火卷帘不仅可以阻挡火势蔓延,对烟气的扩散也有很好的阻挡作用。有时会在防火卷帘上安装防火冷却水幕,能起到降温 and 稀释烟气的作用。

以上 3 种常见的防烟构件对大空间建筑烟气的蔓延有很好的阻止作用,如果合理设置,可以为消防队员扑救火灾和火场人员疏散赢得宝贵的时间,但它们都是将烟气控制在一定范围,并不能将烟气排放出去。

2.4.2 建筑灭火设施对火灾烟气蔓延的影响 一般来说,大空间建筑内部常常根据需要设置不同的建筑灭火设施,主要有灭火器、室内消火栓给水系统、自动喷水灭火系统、泡沫灭火系统、气体灭火系统等^[16]。这些建筑灭火设施使火灾在初期就能够及时得以控制,也能很好地延缓火灾的发展蔓延。因此,安装建筑灭火设施的场所比没有安装的场所更安全,即火灾可控。火灾控制住了,火场中的烟气也会大大减少,烟气的温度也有明显的下降,这对于烟气的控制是很有利的。其中,自动喷水灭火系统主要用来灭火降温,对烟气稀释和阻挡起到一定的作用,对烟气的蔓延影响有限,下面重点讨论泡沫灭火系统和气体灭火系统。

高倍泡沫灭火系统在大空间建筑中广泛应用,如飞机库、地下车库、地下工程、矿井巷道等。用于大空间建筑中的泡沫灭火系统向火场喷射的是高倍泡沫,其原理是窒息灭火。发生火灾时,泡沫灭火系统的喷头动作,向着火部位喷射大量的高倍泡沫。随着时间的推移,着火物质和房间被泡沫覆盖或填充,火灾就会自动熄灭,烟气也被推赶出去。因此,泡沫灭火系统不仅能有效地灭火,对建筑内的烟气排出也很有利。由于泡沫灭火系统

的填充作用,大空间建筑内的烟气将由上方窗户或者排烟口排出。

气体灭火系统由某些惰性气体作为灭火介质,发生火灾时,气瓶阀打开,使气体充满整个或部分区域,达到窒息灭火的目的。气体灭火系统使用的气体有很多种,但它们的原理基本是一致的。当大空间建筑的某一部位发生火灾时,消防控制中心接到报警信号,通过联动装置打开气体灭火系统的喷头,喷出高压窒息性气体,将建筑内的空气和火灾烟气推赶出去。由于窒息性气体的压力比烟气的压力要大的多,烟气将向远离喷头附近的排烟口或窗户排出。需要指出的是,由于大空间建筑内部空间很大,而气体灭火系统的气瓶容积有限,对于某些内部空间超大的建筑,气体灭火系统只能在建筑局部起作用,远离系统的其他部位则向旁侧和上方流动,通过自然排烟或者机械排烟的方式排出。

3 大空间建筑烟气控制方法

烟气控制是指排烟和防烟2个方面。大空间建筑排烟方式有3大类,即固定排烟系统排烟、移动排烟设备排烟和破拆开口排烟;防烟方式主要有机械防烟和非燃化防烟。

3.1 固定排烟系统排烟

3.1.1 自然排烟 自然排烟是在热压和风压的作用下,通过建筑的门窗洞口将高温烟气排至室外的排烟方式。在某些很高的大空间建筑中,通常设置通风排烟竖井,发生火灾时,借助烟囱效应,为排烟提供动力,将高温烟气迅速排放出去。

自然排烟结构简单,投资较少,已在各类大空间建筑中广泛使用,如在建筑内设置门、窗户、通风管道、通风口等。建筑内的出口位置决定了烟气流动的方向,对烟气的流动具有引导作用。自然排烟的效果受热压和风压的影响。大空间建筑内的烟气在热压和风压的共同作用下,由建筑的门、窗、排烟管道、竖井、排烟口排出。

在大空间建筑中使用自然排烟,要考虑以下3个方面:

1)自然排烟对大建筑物的高度有一定的限制,尤其是高度很高的大空间建筑。一般地,高温烟气会由建筑较高的孔口排出。但是由于风压的作用,特别是在迎风面,可能导致建筑内的烟气无法排出。导致某一地区排烟失效的室外临界风速叫做极限风速,在此极限风速下采用自然排烟的建筑物的高度称为极限高度。极限风速^[13,17]和极限

高度^[13,17]由式(8)和式(9)确定:

$$W_{lj} = \sqrt{\frac{2gH_c(1 - T_w/T_n)}{k(1 + (T_w/T_n)^{1/3})}}, \quad (8)$$

$$H_{jh} = \left(\frac{W_{lj}}{\phi W_0} \right)^{1/n} \cdot H_0, \quad (9)$$

式中: W_{lj} 为排烟失效的室外临界风速, m/s; g 为重力加速度,取 9.8 m/s; H_c 为窗户高度, m; k 为风压系数; T_w 为室外温度, K; T_n 为室内温度, K; H_{jh} 为建筑物的极限高度, m; ϕ 为风速修正系数,一般取 1.0。

因此,只要测定了某一地区的风速、窗户高度、发生火灾时的温度以及室外温度,根据式(8)和式(9),就能够算出采用自然排烟的大空间建筑的极限高度,同时能判断某一大空间建筑能否采用自然排烟。

2)建筑物结构必须满足自然排烟的条件。因为烟气是经过排烟口或者外窗排至室外的,因此需要排烟的房间必须有一面墙壁靠室外,且排烟口至排烟区最远水平距离不能超过 30 m。

3)对建筑物外墙装修材料有特殊要求。由外窗或排烟口向室外排烟时,由于烟气温度很高,在浮力的作用下会向上运动,加之烟气射流的作用,烟气与墙面之间产生负压区,致使烟气流扑向墙壁形成贴壁现象。如果建筑外墙为可燃材料装修,很容易形成自上而下的大火;若高温烟气接触到上层窗户玻璃,玻璃很容易炸裂,不仅会对消防人员造成伤害,还有可能导致火灾向上层室内蔓延。因此,若某大空间建筑外墙采用玻璃或可燃材料装饰,不建议采用自然排烟。

3.1.2 机械排烟 机械排烟是通过风机实现的,它是利用排烟机提供动力,在排烟口形成负压,将烟气抽吸出去。采用机械排烟的大空间建筑,通常会在建筑内部设有排烟竖井,这是烟气排出的通道。启动机械排烟系统不需要消防人员进入火场内部,因此操作起来相对安全;同时,机械排烟几乎不受外界环境的影响,排烟效果比较稳定。但是,机械排烟对排烟机和管道的要求较高。在火势猛烈阶段,烟气大量产生,可能会超过排烟机的额定排烟量,同时设备要能耐受一定的温度。

3.2 移动排烟设备排烟

移动排烟设备广泛用于各类大空间建筑中,在实际工作中常与固定排烟设备相结合,特别是在通风不畅、火势较大、难以进行破拆排烟的大空间建筑中发挥着重要的作用,如地下车库等。常见

的移动排烟设备有电动排烟机、汽油机驱动排烟机、水力驱动排烟机和排烟消防车等^[18]。在使用移动排烟设备时应根据场地特点、烟气的性质和排烟量的大小进行合理的选择。

电动排烟机是通过电动机的转动,带动叶片旋转,产生负压,将火场烟气排放出去。使用时,应将排烟机置于上风方向,形成对流,以便有效地排出烟气。若在使用过程中现场风向变化,使排烟机位置变为下风方向时,应立即撤离现场,防止排烟机及操作人员受到高温烟气的伤害。电动排烟机的排烟量一般为10 000 m³/h~60 000 m³/h。

汽油机驱动排烟机通过汽油机的运作引导叶轮转动。其工作原理与电动排烟机相似,最大排烟量为50 000 m³/h。

水力驱动排烟机由压力水驱动,特别适合在易燃易爆场所使用,如停车库。该类排烟机有一个水带接口,当压力水高速进入时,冲击叶轮转动,喷雾水从前方排出。水力驱动排烟机不仅能够排烟,还能够起到降低火场温度、稀释降尘的作用。由于水压一般为0.25 MPa~1.8 MPa,所以排烟量不如电动排烟机和汽油机驱动排烟机,其排烟量一般为6 000 m³/h~25 000 m³/h。

排烟消防车具有正压送风和负压吸风的功能。正压送风时,可以输送新鲜空气,驱走烟雾;负压吸风时,可将有毒有害烟气定向排出。正压送风的送风量可达到800 000 m³/h以上,负压吸风的吸风量可以达到500 000 m³/h。若消防车离火场较远,宜采用正压送风的方式排烟;若消防车离火场距离较近,则宜采用负压吸风的方式将火灾烟气排出。排烟消防车的排烟量较普通排烟机大很多,因此很适合在大的火场和空间中使用。

3.3 破拆开口排烟

破拆开口排烟,是指在灭火救援行动中,对建筑进行破拆,人为创造排烟口,使火灾烟气排出的排烟方式。破拆排烟可分为水平破拆和垂直破拆两个方式。

3.3.1 水平破拆排烟 水平破拆主要是破拆大空间建筑的门、窗及外墙。像体育馆、游泳馆、候车厅等类型的大空间建筑,由于其门窗较多,破拆起来容易,因此宜选用水平破拆排烟。破拆门窗时,应尽量选择建筑迎风面最低处的门窗,同时打开建筑背风面最高处的窗户,保持烟气顺畅流动,以达到最佳效果。破拆外墙时,位置应尽量靠近顶棚,若建筑内装有挡烟垂壁,破拆位置不应低于挡烟垂壁的下端,防止排烟口失去最佳效果。在火场排

烟中,通常破拆多个开口,使烟气在短时间内能快速排出^[19]。

3.3.2 垂直破拆排烟 垂直破拆主要是破拆大空间建筑的顶棚或天窗。像大型仓库类型的大空间建筑,由于其门窗较少,高度不是很高,可选择垂直破拆排烟;像高层建筑中庭类型的大空间建筑,由于烟囱效应的影响,烟气向上蔓延较快,其中庭顶棚常用玻璃构件,破拆较易,因此也宜选用垂直破拆排烟。进行破拆时,应注意选择破拆的面积和位置。破拆面积应根据火灾大小决定,破拆面积过小,排烟速度慢,效果也不明显;破拆面积过大则加大了工作的难度。破拆位置最好选择在起火点的正上方,使燃烧范围集中,烟气集聚而易于排出。

由于大空间建筑内部空间很大,烟气聚集很多,若通过对外开口排烟,工作量较大;若破拆面积不够,就不能起到很好的排烟效果。

3.4 机械防烟

机械防烟,是在需要防烟的部位送入正压空气,从而使外界烟气无法进入。根据《建筑设计防火规范》和《人民防空工程设计防火规范》,人们常在防烟楼梯间和前室等部位设置机械防烟系统。装有机防烟系统的大空间建筑,由于防烟部位保持正压,外界烟气无法进入,将由起火房间经外窗或排烟口排出,保证了防烟楼梯间和前室的安全,为人员疏散和避难提供了有利条件。

机械防烟对烟气控制效率较高,与负压机械排烟不同的是,烟气不经过排烟管道,对设备几乎没有污染。机械防烟具有许多优点,例如:风道可以敷设在墙壁内,占用的空间较小,经济可靠;系统送入的新鲜空气温度较烟气低很多,对烟气起到了冷却运动,延缓了火灾的发展蔓延;烟气不通过送风机,对设备污染损耗小等。值得注意的是,若加压送风楼梯间的压力过高,会使楼梯间通向前室或走廊的门打不开,一般规定,防烟楼梯间的正压值为40 Pa~50 Pa,前室、合用前室、消防电梯前室、封闭避难层(间)为25 Pa~30 Pa。为了减小送风管道的局部阻力,机械加压送风的速度不应大于7 m/s。

3.5 非燃化防烟

非燃化防烟是指建筑材料及其内装修材料和储存物使用不燃或难燃材料,这样不易发生火灾,即使发生火灾,发烟量也很少。采用非燃化防烟对建筑的要求较高,不仅要考虑建筑材料和内装修材料的非燃化,还要考虑其内部储存物的非燃化。若建筑内部储存有易燃物质,应用不燃或难燃材

料密封起来.因此非燃化防烟常用在人员密集或存有贵重物资的大空间建筑,如候车厅、展览馆等.

4 结 语

大空间建筑已经成为未来建筑发展的一个趋势,我国在大空间建筑烟气流动规律和烟气控制方法上的研究起步较晚.

很多大空间建筑内部构造十分复杂,单一的烟气控制方法已经不能满足其实际需要,而通常是多种方法的有机结合.针对不同的大空间建筑,采用不同的烟气控制方法,不仅能提高效果,而且具有很大的经济意义.由于大空间建筑的独特性和复杂性,除了选择常规的防排烟方法外,在烟气控制上还应当着重注意以下3个方面.

1)对建筑进行有效分割.根据现行规范,大空间建筑排烟量由建筑的体积来衡量^[20],如:若体积小于17 000 m³,排烟量按建筑体积的6次/小时算;若体积大于17 000 m³,排烟量按该建筑体积的4次/小时算;最小排烟量不得低于102 000 m³/h.像候车厅、高层建筑的中庭,内部体积很多都超过了17 000 m³,若全部采用体积换算法,需要的排烟机数量很多,而且也不经济,与实际情况相差较大.为此,可以采用分割的方法,即在建筑内的房间和出入口安装机械加压送风系统,阻止火灾向人员集聚部位蔓延,可以为人员疏散赢得宝贵的时间.另外,对于高层建筑的中庭,还可以在中庭和楼层之间用防火卷帘分割,当感烟探测器探测到烟气时,防火卷帘落下,将中庭与房间隔离开,防止烟气进入.

2)选择合适的火灾探测器.感烟探测器和感温探测器是建筑中常用的火灾探测器,但是在夏季气温较高或是火灾初期,由于热气层的存在,烟气难以继续上升,不易被感烟探测器和感温探测器探测到.若把探测范围定的太低,容易造成误报;定的太高,则会延误最佳报警时机,甚至不报警.根据探测器的使用要求,大空间建筑特别是高度在20 m以上的建筑,建议使用新型的探测器,如图像式火灾探测器、红外光束感烟火灾探测器等非接触式的火灾探测器.

3)设置补风系统.大空间建筑内夹层房间一般没有窗户,具有很好的气密性.发生火灾后,机械排烟系统开始运作,外界空气不能及时进入这些房间,使内部气压下降而小于外界气压,房间内的被困人员很有可能无法开启安全门而造成疏散困难.因此,在大空间夹层房间等密闭区域内要设

置补风系统,以配合机械排烟系统使用.发生火灾后同时开启机械排烟系统和补风系统,在室内人员疏散完毕后,关闭补风系统而排烟系统继续运行.

参考文献:

- [1] 袁理明,范维澄.大空间建筑火灾中热烟气层发展规律的理论分析[J].自然灾害学报,1998,7(1):21-26.
YUAN L M, FAN W C. The oretical analysis of hot smoke layer development in large space building fires [J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(1): 21-26.
- [2] 杜红.防排烟工程[M].北京:中国人民公安大学出版社,2003.
- [3] National Fire Protection Association. Guide for smoke management systems in malls, atria and large areas: NFPA 92B [S]. Quincy, MA, USA: NFPA, 2000.
- [4] COOPER L Y, HARKLEROAD M, QUINTIERE J G, et al. An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multi-room fire scenarios [J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104(4): 741-749.
- [5] YUANA L M, COX G. An experimental study of some line fires [J]. Fire Safety Journal, 1996, 27(2): 123-139.
- [6] 霍然,李元洲,余明高,等.大空间建筑火灾机械排烟的初步研究[J].消防科学与技术,2001,20(4):3-5.
HUO R, LI Y Z, YU M G, et al. Preliminary study on the mechanical exhaust in the large space building [J]. Fire Science and Technology, 2001, 20(4): 3-5.
- [7] 张村峰,霍然,史聪灵,等.不同类型火源下烟气在大空间内的充填特性研究[J].消防科学与技术,2005,24(2):153-155.
ZHANG C F, HUO R, SHI C L, et al. Study on the smoke filling in large space atrium under different type of fire [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(2): 153-155.
- [8] 孙洋.大空间建筑防排烟系统的分析[J].沈阳大学学报,2006,18(4):45-47.
SUN Y. Analysis on smoke extraction system of construction with large space [J]. Journal of Shenyang University, 2006, 18(4): 45-47.
- [9] 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):525-526, 534.
- [10] 霍然,范维澄,袁理明,等.大空间火灾实验厅的建造与初步试验[J].火灾科学,1998,7(1):8-13.

[11] 蔡芸. 建筑防火[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2014:32.

[12] 张粉芹,赵志曼. 建筑装饰材料[M]. 重庆:重庆大学出版社,2007.

[13] 杜红. 防排烟工程[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2003.

[14] 杜文峰. 消防燃烧学[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2014:56.

[15] 陈伯辉. 典型内装修材料烟密度的实验研究[J]. 福建工程学院学报,2011,9(6):531-534.
CHEN B H. Experimental studies on smoke density of typical interior decoration materials [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2011, 9 (6) : 531-534.

[16] 张学魁,景绒. 建筑灭火设施[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2014:137-145.

[17] 赵国凌. 关于采用外窗自然排烟的高层建筑极限高度的探讨[J]. 消防科学与技术,1992(1):23-27.

[18] 李进兴. 消防技术装备[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2006:156-158.

[19] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范:GB 50016—2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2015.

[20] 陈颖. 大空间建筑烟气控制的数值模拟研究[J]. 武警学院学报,2007,23(2):74-78.
CHEN Y. Numerical simulation of smoke control in large space[J]. Journal of the Chinese People's Armed Police Force Academy,2007,23(2):74-78.

本文编辑:苗 变