

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.012

住宅建筑内火灾高温烟气流动数学模型

郭震,袁迎曙

(中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室;力学与建筑工程学院,江苏徐州 221116)

摘要:以住宅建筑火灾安全为研究背景,根据多室实体住宅建筑模型室内火灾升温及高温烟气流动影响的试验结果,重点讨论了起火房间尺寸、门洞尺寸及枢纽空间等3个主要空间构造因素对室内高温烟气流动影响。以质量守恒等相关热力学和流体力学基本概念建立了住宅空间单室尺寸与高温烟气分布的几何关系模型;利用动量守恒控制体法建立了开敞空间的开口尺寸与烟气扩散的关系模型。分析表明,住宅建筑火灾安全应充分考虑空间构造形式的影响;通过对烟气流动模式的独立房间尺寸设计和房间连通形式设计,可以有效地控制室内温度分布和烟气流动路径。

关键词:住宅建筑;建筑火灾;烟气流动;空间构造形式

中图分类号:TU318 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0073-06

Numerical Model of Hot-Smoke Flow in Residential Fire

Guo Zhen, Yuan Yingshu

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering,
School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, P. R. China)

Abstract:Based on the characteristics of spatial structure of residential units, the law of indoor hot smoke flow was investigated by experimental research on a platform model with multiple floors and rooms in a residential building. Three factors exerting influence on hot smoke flow in residential construction were mainly analyzed, including the relationship between the height of space and the area of single room, the size of doorway opening, and the hub space. Based on basic concepts of thermodynamics and fluid mechanics, the geometric relational model of the height of space and the area of single room impacted on filling speed of hot smoke in room was presented by conservation of mass. Moreover, under the influence of hot smoke flow, the formula of doorway opening size was developed by conservation of momentum. The results show that the fire safety of residential building should take full account of the impact of spatial structural. The indoor temperature distribution and hot smoke flow path will be controlled effectively by the design of single room size and room connectivity.

Key words:residential building; building fire; smoke flow; the form of space construction

住宅建筑火灾是社会比较关注的问题,它涉及到住户的人身、财产等切身利益。相对于高大空间的公共建筑,中国住宅建筑空间较小,且多采用易燃性的家具、装修材料和电器,导致室内火灾荷载密度

较高,火灾蔓延和烟气填充速度较快,火势不易控制;另外,燃烧产生的有毒气体随高温烟气迅速向室内扩散,使火灾中人员安全受到较大的威胁^[1]。统计显示^[2],火灾中85%以上的人员死亡直接因素是

收稿日期:2012-06-25

基金项目:国家自然科学基金(50878207);中国矿业大学“土木工程环境灾变与结构可靠性”江苏省重点实验室开放基金(JSKL2011YB08)

作者简介:郭震(1978-),男,副教授,博士,主要从事建筑防震减灾研究,(E-mail)guozhen@cumt.edu.cn。

吸入了烟尘或有毒气体而中毒窒息伤亡,高温烟气的流动又会造成火灾蔓延。从火灾后现场的调查发现,空间格局是导致火场扩大、烟气扩散的一个重要原因。因此,研究空间格局对室内火灾烟气流动的影响是一个重要课题。基于火灾安全观点的住宅空间设计,是目前降低住宅火灾损失的一个有效的技术手段。

基于火焰物理特性及空间边界特性,许多学者开展了相关的空间火灾发展、烟气蔓延及有毒气体扩散等研究^[3-4]。Brian 等^[5]利用试验方法验证了有毒气体随高温漂浮扩散过程,并提出空间形式是影响烟气流动的主要因素。Harrison^[6]在进行大空间中庭建筑火灾烟气流动研究中发现,走廊宽度和层净高将决定高温烟气向中庭扩散的时间。此外,Poreh 等^[7]研究发现挡烟垂壁对减缓烟气水平扩散具有较大的作用。火灾的发生具有随机性,但是火灾产生的高温烟气流动受到建筑空间形式的影响。当建筑形式确定后,烟气的流动模式具有确定性,或是说如果掌握高温烟气流动与建筑空间形式的关系,则可以通过有效的建筑空间设计控制烟气的流动。

本文在建筑住宅单元模型的室内火灾升温及高温烟气流动试验结果基础上,在建筑住宅单元空间构造形式对室内火灾高温烟气流动的影响规律方面进行深入讨论。空间构造形式包括:房间高度、门洞尺寸、房间面积及各房间连通形式等。基于物理学观点对影响规律进行机理分析,进而建立空间因素与室内烟气流动的关系模型,旨在为限制或减缓高温烟气扩散的消防设计和住宅建筑火灾安全评价提供一些新思路。

1 住宅建筑的空间设计与主要构造

作为民用住宅空间结构,具有较强的功能性,而房间的分割或者称为户型是实现住宅功能最直接的表现。随着住宅建筑产业的发展,越来越多的户型可供选择。虽然户型种类良多,但是仍然可总结出一些规律。

1.1 住宅空间高度与单室面积

单元式住宅每个房间的独立性较强,相互之间均通过转换空间(枢纽空间)联系。通常设计中,客厅及主卧室属于大房间;厨房、卫生间、书房或贮藏室为小房间。当室内层净高确定后,每个独立房间的空间容积是确定的。以封闭单室火灾的观点,高温烟气在不同起火房间内填充的时间不同,房间越大烟气填充时间越长。然而,室门的存在势必造成

高温烟气在完全填充房间前向外流动扩散。

1.2 门洞尺寸

门洞形式主要有 2 种,一种是有可开闭的室门,如卧室、厨房或书房;另一种是全开敞形式,如客厅、餐厅。前者门洞上方有一定高度的过墙,后者门洞高度基本等于室内净高。

高温烟气通过这 2 种门洞的形式是不同的。

1.3 枢纽联系空间构造

枢纽联系空间起到了连通独立房间的作用。通常单元型住宅建筑的枢纽空间面积相对较小,且密集的留设各独立房间的门洞开口。任何一个独立房间起火,高温烟气必然先流向枢纽联系空间,然后根据其他非起火房间与枢纽联系空间的连通方式向某个非起火房间流动。因此,可以认为枢纽联系空间的构造形式决定了高温烟气的流动趋势,具有分配高温烟气流动的特点,是影响高温烟气流动的主要空间因素。

2 住宅建筑火灾高温烟气流动试验结果分析

利用热电偶束量测了住宅建筑模型火灾过程的空间温度变化^[8],按照理想气体状态,燃烧释放的轻物质及加热的空气形成漂浮的烟气流。因此,从空间温度场的分布可以间接获得高温烟气流的路径、烟气进入各房间的顺序及烟气流的热量变化。

2.1 温度场分布特征

以 T1 试验为例,分别讨论玻璃破碎前一刻(模型为封闭系统,不考虑室外气流的影响)的空间平面温度和竖向温度分布。

1) 平面温度分布 由于热烟气受到浮力影响而漂浮在房间上部,因此将距天花板底 150 mm 处的测点位置温度绘于图 1。图中圆圈表示测点,圆圈内部数字表示测点编号。

从图 1 可以看出以下几点特征:

(1) 火源点附近具有全域最高温度,除了燃烧产生的热烟气外,还有较强的热辐射。

(2) 远离火源点时,空间温度值逐渐减小,说明烟气向远端运动过程中热量出现损失,热损失是由于高温烟气湍流运动卷吸冷空气和热对流造成的。

(3) 在相同水平位置,枢纽空间的温差并不大,而餐厅(6 号测点)、书房(9 号测点)两处误差达到 108℃;由于 3 和 5 两点位于起火房间与枢纽空间连通处,且为全敞式连通形式,高温烟气可以无障碍流动;而 9 号位于有可开闭室门的房间,虽然试验中室门上方过墙为 100 mm 高,但是流入室内的

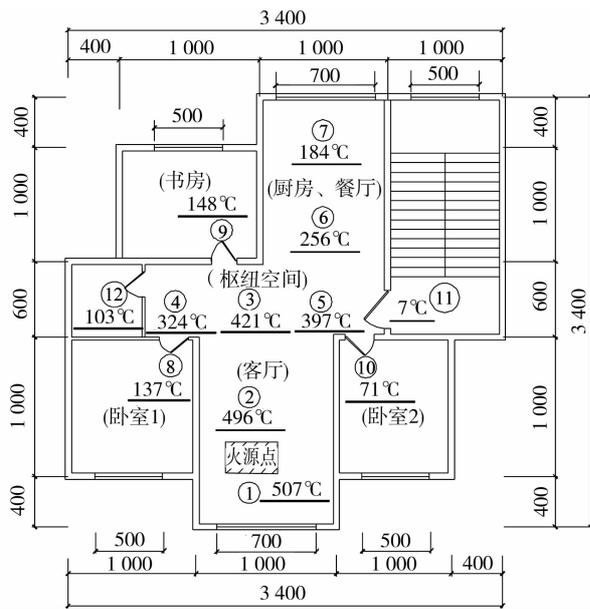


图1 距天花板底150 mm处测点温度(单位:mm)

烟气温度仍旧有较大的降低。

(4)在有室门的卧室1和卧室2房间中,虽然8和10号位置靠近起火房间,但温度远低于其他室内测点,说明高温烟气运动方向受到空间格局的影响。当流动方向上无障碍时,高温烟气对后方房间影响很小;当流动方向上有阻碍时,高温烟气回流造成对后方房间的填充,如,8号位置温度要高于10号位置。

2)竖向温度分布 空间竖向温度变化反应了烟气层的竖向分布。提取起火房间、枢纽空间及餐厅的竖向温度绘于图2。

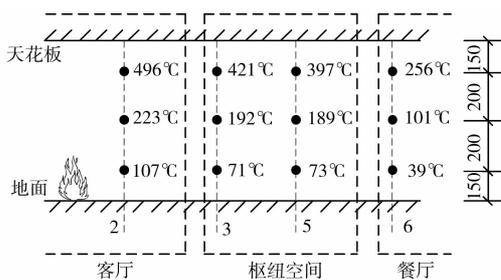


图2 空间竖向温度分布(单位:mm)

在靠近天花板底处的烟气层温度较高,在运动过程中卷吸冷空气,烟气层下降,温度降低。由于枢纽空间与起火房间的全开敞连通,该空间的竖向温度变化基本一致。从试验结果可以看出烟气层对空间竖向温度分布的2个特点:

(1)随着远离火源点,在烟气流动方向上,空间竖向温差也逐渐减小。

(2)在烟气流动方向的断面上,空间竖向温度变化基本一致。

2.2 起火位置与烟气流动关系

仍以T1试验为例,根据试验量测的温度值及烟气与温度的关系,将烟气流动路径及烟流量绘于图3。

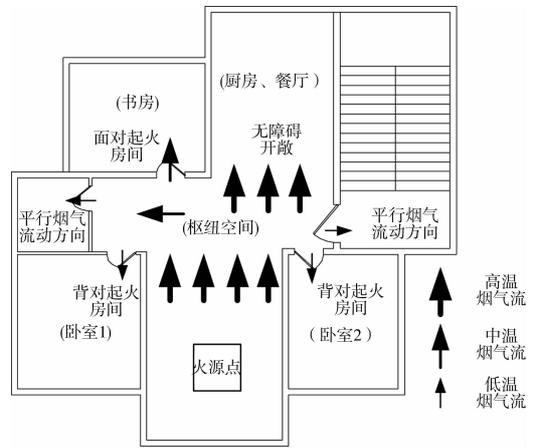


图3 烟气在室内的流动模式

由图3所示可知:

1)当非起火房间的门面对起火房间,该房间将进入较多的高温烟气,根据室内竖向温度变化的规律,可以认为该房间的升温是由于高温烟气层下沉到门上方过墙而溢入的。

2)当非起火房间的门背对起火房间,该房间进入的烟气量较少且温度较低,该房间的升温也是因高温烟气层下沉到门上方过墙而溢入的,下沉速度要小于1)的情况,这与烟气流动方向有关。

3)当非起火房间门与烟气流动方向平行时,起火房间位置对该房间温度几乎没有影响。

2.3 房间开口尺寸与烟气扩散关系

按照高温使燃烧产物漂浮而形成烟气层观点,结合前面的试验结果及图3所示,房间开口尺寸与烟气扩散具有如下关系:

1)全开敞形式,如,客厅、餐厅与枢纽空间的连通方式,高温烟气可以无障碍直接通过,烟层的热量损失主要是由于卷吸冷空气造成,若燃烧率稳定,烟气流出不变,则改变全开敞开口宽度不会造成房间顶部的温度变化,而会增加烟层厚度,造成温度竖向分布值增加。

2)有可开闭的室门,如卧室、书房,类似挡烟垂壁的室门上方过墙起到了阻碍烟气流动的作用,若烟气层厚度不变,当改变过墙高度,烟气向室内的扩散形式将发生变化。

根据以上试验现象,可以看出起火房间容积决定了高温烟气向外溢出时间和温度,枢纽空间的构造形式决定了高温烟气流动路径。因此利用相关热

力学和流体力学概念分别建立起火房间空间尺寸及枢纽空间构造形式 2 个主要因素与室内高温烟气流动的理论模型。

3 起火房间空间尺寸的影响

根据试验结果,在起火房间的火源点附近温度分布符合圆锥体模型。假定火源点在房间中部,浮力羽流不受墙壁的影响,而形成完整倒圆锥体^[3],在燃烧焰火下方可以等效一个虚热源点,即倒圆锥尖,见图 4 所示,图中 h_s 、 h_c 、 h_0 分别为虚火源点到天花板距离、室内层净高、燃烧物品高度; r_s 、 r_0 分别为烟气锥在天花板底的扩散半径、燃烧火焰范围的半径。

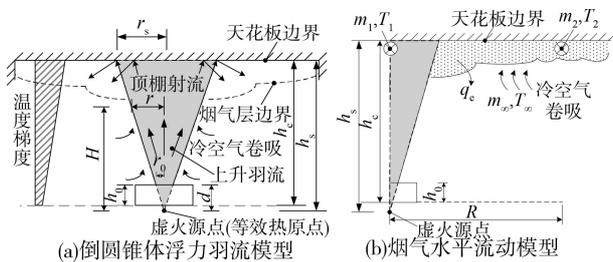


图 4 烟气羽流模型

根据质量守恒定律,图 4(b)可建立式(1)。

$$C_p m_1 T_1 + C_p m_\infty T_\infty - q_e = C_p m_2 T_2, \quad (1)$$

式中: T_∞ 、 T_1 及 T_2 分别为环境温度、火源点上方温度及室内距火源点距离 R 处的温度,K; m_∞ 、 m_1 及 m_2 分别为空气卷吸流量、火源点上方烟气流量及室内距火源点距离 R 处烟气流量,kg/s,其中, $m_2 = m_1 + m_\infty$; C_p 空气比热,1 kJ/(kg·K); q_e 热烟气层的散热量,包括对流散热量和辐射散热量,MJ/s。

令 $\Delta T_1 = T_1 - T_\infty$, $\Delta T_2 = T_2 - T_\infty$,则式(1)可以改写为:

$$\frac{m_1}{m_1 + m_\infty} - \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{q_e}{C_p(m_1 + m_\infty)\Delta T_1}, \quad (2)$$

其中 ΔT_1 为不受墙壁影响的烟气温度与高度关系模型^[8]:

$$\Delta T_1 = 9.1(F^{2/3} T_\infty / g) Q_c^{2/3} h_c^{-5/3} \quad (3)$$

式中: Q_c 为烟气热流量 MJ/s; $F = g/C_p T_\infty \rho_a$,其中 g 为重力加速度,0.98 m/s²; ρ_a 为 20℃时冷空气密度,1.22 kg/m³。

火源点上方烟气流量 m_1 可表示为:

$$m_1 = \rho_1 B h_{sc} v_1 \quad (4)$$

式中: ρ_1 为火源点上方烟气密度,kg/m³; B 为起火房间的开间,m; h_{sc} 为烟层厚度,m; v_1 为烟气与空气的相对流速,m/s。

空气卷吸流量 m_∞ 可表示为:

$$m_\infty = \rho_a B R v_\infty, \quad (5)$$

式中: R 为起火房间的进深方向长度,m;假定室内空气恒定,则 v_∞ 为空气与烟气的相对流速,m/s,此时 $v_1 = v_\infty$ 。

烟层界面与冷空气的热交换可以采用牛顿冷却公式:

$$q_e = h B R \Delta T_2, \quad (6)$$

式中: h 为复合换热表面(烟气层界面)传热系数,W/(m²·K); BR 表示烟气层水平流动过程中与空气的界面接触面积。

将式(5)和式(6)代入式(2),则

$$\frac{\rho_1 h_{sc}}{\rho_1 h_{sc} + \rho_a R} - \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{h R \Delta T_2}{C_p(\rho_1 h_{sc} + \rho_a R) v_1 \Delta T_1}. \quad (7)$$

整理后,可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} &= \frac{C_p \rho_1 h_{sc} v_1}{h R + C_p(\rho_1 h_{sc} + \rho_a R) v_1} \\ &= \frac{C_p \frac{m_1}{B R}}{h + C_p(\rho_1 \frac{h_{sc}}{R} + \rho_a) v_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

由于 h_{sc} 尺寸远小于 R ,同时高温烟气密度 ρ_1 也低于 ρ_a ,所以可以认为 $\rho_1 h_{sc}/R$ 对 ρ_a 的影响极小。另外火源点上方的烟气流量与火源点燃烧特性有关^[10-11], $m_1 = EQ^{1/3} B^{2/3} h_c$,其中 $E = \rho_1 [g/(\rho_a C_p T_\infty)]^{1/3}$; Q 为燃烧热流量,kW。所以式(8)可以进一步简化为:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{C_p E Q^{1/3}}{\lambda + \epsilon} \cdot \frac{h_c}{R}, \quad (9)$$

$$\text{或 } \frac{h_c}{R} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \left(\frac{h + \epsilon}{C_p E Q^{1/3}} \right). \quad (10)$$

式中: $Q' = Q/B$ 为单位宽度(开间)燃烧热流量,kW/m; $\epsilon = C_p \rho_a v_1$,表示为因烟气流动而产生的烟气层界面传热系数增量。式(9)、(10)均表达了起火房间水平面温度分布的空间尺寸效应。

当火源点物理特征已知,且起火房间尺寸确定后,可以利用式(3)和(9)得到距火源点 R 处的天花板底温度。或是当火源点物理特征已知,如需控制起火房间水平面温度分布可以利用式(10)确定最小空间尺寸。

4 枢纽空间构造形式的影响

虽然对于多室火灾烟气流动的研究已建立了场-区-网络的复合模型^[12],将每个独立的房间(起火房间用场模型,非起火房间用区域模型)作为网络上的节点,连接这些独立房间的空间(枢纽空间)作为网络的干线。然而,对于单元型住宅而言,枢纽空间

面积相对较小,又密集的留设各独立房间的门洞开口。另外,根据前文分析,空间因素又直接影响高温烟气的流动路径,所以对于单元型住宅建筑空间,枢纽空间的构成形式决定了高温烟气的流动路径和扩散方式,不能简单的将枢纽空间假定为网络干线。

关于枢纽空间可以总结为:1)门洞口上方垂壁可以有效的延缓高温烟气的进入,只有当烟气厚度达到垂壁高度后才开始向房间扩散。2)高温烟气进入枢纽空间后,平面任意方向速度可以认为相同。3)由于平面速度高于烟气下沉速度,高温烟气将先向无垂壁的开敞空间扩散,但是如果开敞空间与枢纽空间联通的开口面积较小时,枢纽空间的烟气排出量小于进入量,烟气层将下沉,达到垂壁高度后将向其他房间扩散。

因此,利用牛顿第二运动定律建立开敞空间最小开口宽度与枢纽空间的关系,以实现延缓高温烟气下沉,最大限度的控制烟气向所有房间扩散的时间。牛顿第二运动定律是分析流体流动的常用方法,也可以称为动量方程的控制体法,它的积分表达式为:

$$\iint_{c. si.} \vec{v}\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dA - \iint_{c. so.} \vec{v}\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dA = \iint_{c. s.} \vec{v}\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dA$$

将枢纽空间形式、烟气流入和流出绘于图5,其中枢纽空间为控制体(虚线内),烟气由某一起火房间流入,经由控制体向无垂壁空间流出(斜线区域),同时存在烟气下沉趋势。图中流入烟气生成率为 m_s , kg/s;烟气密度 ρ_s , kg/m³;流速 v_s , m/s;流出烟气流量为 m_o , kg/s;烟气密度 ρ_o , kg/m³;流速 v_o , m/s;下沉烟气流量为 m_z , kg/s;烟气密度 ρ_z , kg/m³;流速 v_z , m/s;层净高 h_c , m;垂壁高 h_{cb} , m;有垂壁房间门高 h_o , m;全开敞空间(无垂壁,如客厅)洞口宽度 b , m;枢纽空间地面面积 A_s , m²。

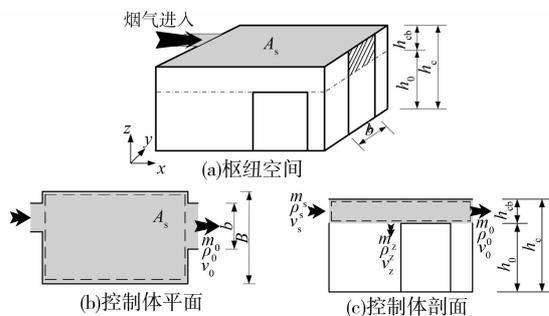


图5 枢纽空间控制体示意图

现假定:

1)火源点为稳定火源,即进入的烟气 m_s 、 ρ_s 、 v_s 为定值。

2)控制体内烟气密度相同,即 $\rho_z = \rho_o$ 。

3)烟气下沉速度 v_z 和流出速度 v_o 受到火源点热释放率的影响。

由此,为避免烟气下沉到垂壁高度,烟气层下沉通量应等于流出通量,所以利用动量方程的控制体法建立枢纽空间的动量守恒方程为:

$$v_z^2 \rho_z A_s = v_o^2 \rho_o b h_{cb} \quad (11)$$

高温烟气在天花板下方的运动平均速度^[13]:

$$v_o = 0.8 \left(\frac{g Q T_c}{C_p \rho_a T_a^2 B} \right)^{1/3} \quad (12)$$

式中: v_o 为高温烟气移动平均速度, m/s; Q 为总燃烧释放率, MJ/s。其中 $Q = m_s H_s$, m_s 为烟气生成率, kg/s; H_s 为燃烧材料的热释放率, MJ/kg; T_c 、 T_a 分别为高温烟气绝对温度、烟气层下方洁净区绝对温度, °C; B 为枢纽空间宽度, m。

高温烟气下沉平均速度可以由垂壁高度与烟气填充到垂壁高度 h_{cb} 时所用时间的比值求出,可以利用Hinkley^[12]单室烟气填充时间模型求出烟气填充到垂壁高度 h_{cb} 时所用时间 t ,则高温烟气下沉平均速度:

$$v_z = \frac{h_{cb}}{t} = \frac{S \sqrt{g}}{20 A_s} \frac{h_{cb}}{\sqrt{h_c} - \sqrt{h_o}} \quad (13)$$

式中火的边界周长 S 与烟气生成率 m_s 有如下关系:

$$m_s = 0.096 S \rho_a h_o^{3/2} \left(g \frac{T_a}{T_c} \right)^{1/2} \quad (14)$$

将式(12)、(13)、(14)用图5中参数表达,并代入式(11),可得:

$$\frac{m_s^2 g^{1/2}}{3.68 \rho_a^2 g^{1/2} (h_c - h_{cb})^{3/2} A_s^2} \left(\frac{h_{cb}}{\sqrt{h_c} - \sqrt{h_o}} \right)^2 \cdot A_s = 0.64 \times \left(\frac{g m_s T_c}{C_p \rho_a T_a^2} \right)^{2/3} \frac{1}{b^{2/3}} b h_{cb} \quad (15)$$

引入房间的开口垂壁因子 $k_h = \frac{h_c}{h_c - h_{cb}}$,式(15)整理可得开敞空间最小开口宽度与枢纽空间及火源的关系式:

$$b = \left(\frac{1}{2.35} \cdot \frac{m_s^{4/3}}{\rho_a^{4/3} g^{2/3}} \cdot \frac{1}{A_s} \cdot \frac{1}{h_c} \cdot \frac{k_h^2 (k_h - 1)}{(\sqrt{k_h} - 1)^2} \right)^3 \quad (16)$$

由于 k_h 为大于1, $k_h^2 (k_h - 1) (\sqrt{k_h} - 1)^{-2}$ 是一个单调递增函数,根据式(16)可以得到以下几点:

1)开敞空间开口宽度 b 与火源烟气生成率 m_s 成正比,在其他条件一定时,当火源功率较大时,开敞空间开口宽度应加宽,以减缓烟气向其他房间扩散。

2)开敞空间开口宽度 b 与枢纽空间面积 A_s 、净高度 h_c 成反比,当枢纽空间面积较大或净高度较大时,开口宽度可以相应小一些,因为较大的枢纽空间面积或高度可以储纳较多烟气,延缓了烟气层下降。

3)开敞空间开口宽度 b 与垂壁高度 h_{cb} 成反比,当垂壁高度较大时,开敞空间开口宽度可以小一些,较大的垂壁高度可以延缓烟气层的下沉,所以需要排出枢纽空间的烟气通量减小。

利用式(16)可以进行以下几点工作:

1)根据防火技术规范^[14]中火灾荷载密度的建议计算出火灾强度,然后利用该式设计枢纽空间与开敞空间之间联通的最小火灾安全宽度。

2)扩大开敞空间的开口宽度,使较多的烟气疏导到开敞空间,开敞空间按照火灾薄弱区进行加强设计,则可以提高住宅建筑的火灾安全系数,避免高温烟气延烧引起的结构连续性破坏。

3)对已建建筑可以利用该式评价其火灾安全等级。

5 结 论

以单元式住宅建筑为研究背景,利用室内火灾过程的高温烟气流动特性模型,对影响室内火灾高温烟气流动的空间构造形式进行了分析,分别建立了考虑起火房间尺寸、枢纽空间构造形式2个主要空间影响因素的烟气扩散计算模型。根据模型构成,在稳定火源情况下,得到以下几点结论:

1)起火房间的尺寸构成了高温烟气流体的边界条件,它将决定高温烟气填充和扩散的时间;利用式(9)或式(10)可以判断室内温度的分布或是进行空间尺寸设计以控制室内温度,对于式(9)或式(10)的验证工作将在后续研究中进行。

2)室门上方的过墙起到了阻碍烟气流动的作用,而全开敞空间将成为高温烟气无阻碍进入的空间,因此为减缓高温烟气全房间的扩散,应保证全开敞空间的开口尺寸满足式(16)要求。

3)枢纽空间是影响室内烟气流动路径的主要影响因素。基于烟气流动方式设计的枢纽间,可以有效控制烟气全房间扩散时间,或是将某一房间设计为存烟空间,再加强其耐火性能的设计以提高住宅建筑的火灾安全。

4)影响烟气流动方式变化的因素还有房间的相对位置,室门上方的过墙高度,这将在后续的研究中利用数值计算方法进行深入探讨。

参考文献:

[1] 李天,张猛,薛亚辉. 中原地区住宅卧室活动火灾荷载调查与统计分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 124-128.
Li T, Zhang M, Xue Y H. Survey and statistical research on live fire loads of residential bedrooms in Central Plains region [J]. Journal of Natural Disasters,

2010,19(4):124-128.

- [2] Hietaniemi J, Kallonen R, Mikkola E. Burning characteristics of selected substances production of heat, smoke and chemical species [J]. Fire And Materials, 1999, 23(4): 171-185.
- [3] 王厚华,李慧,熊杰. 多功能建筑火灾人员安全疏散模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(8): 1141-1145.
Wang H H, Li H, Xiong J. Simulation of safety evacuation in multi-building fire [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(8): 1141-1145.
- [4] Chen A P, Francis J, Dong X L, et al. An experimental study of the rate of gas temperature rise in enclosure fires [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(7): 397-405.
- [5] Lattimer B Y. The transport of high concentrations of carbon monoxide to locations remote from the burning compartment [M]. Nist, USA, 1997.
- [6] Harrison R. Smoke control in atrium buildings: A study of the thermal spill plume [R]. Christchurch, New Zealand: Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 2004.
- [7] Poreh M, Marshall N R, Regev A. Entrainment by adhered two-dimensional plumes [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(5): 344-350.
- [8] 郭震,袁迎曙. 住宅建筑内火灾高温烟气流动规律试验研究[J]. 土木工程与环境工程, 2012, 34(4): 149-156.
Guo Z, Yuan Y S. Experimental analysis of building space constructions on hot-smoke flow in residential fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 149-156.
- [9] Log T, Heskestad G. Temperatures of restricted turbulent fire plumes [J]. Fire Safety Journal, 1998, 31(2): 101-115.
- [10] Harrison R, Spearpoint M. The horizontal flow of gases below the spill edge of a balcony and an adhered thermal spill plume [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(25/26): 5792-5805.
- [11] Harrison R, Spearpoint M. Physical scale modelling of adhered spill plume entrainment [J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(3): 149-158.
- [12] Zhang G W, Zhu G Q, Wang X L, et al. The comparison of fire numerical simulations based on the large space factory fire experiment [J]. Procedia Engineering, 2011, 11: 649-657.
- [13] Hinkley P L. Some notes on the control of smoke in enclosed shopping centres [R]. Borehamwood, England, Fire Research Station, 1971.
- [14] 中国工程建设标准化协会标准. CECS 200:2006 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京:中国北京计划出版社, 2006.