

# 住宅建筑内火灾高温烟气流动规律试验研究

郭震<sup>a,b</sup>, 袁迎曙<sup>a,b</sup>

(中国矿业大学 a. 力学与建筑工程学院;

b. 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**以住宅建筑火灾安全为研究背景,利用多室多层住宅建筑缩比模型,进行了空间构造形式对室内火灾升温及高温烟气流动影响的试验研究。重点考察了不同火源点情况下,各房间内部的升温模式和温度分布,间接分析了高温烟气流动的规律。试验结果表明,住宅建筑的枢纽空间构造形式、房间门上方垂壁及各房间的相对位置对室内高温烟气的流动具有较大的影响。室门上方垂壁能够有效阻止高温烟气的扩散,室内外温差要高于无垂壁房间;非起火房间的室门开启方向与起火房间相对时,高温烟气的进入量要高于两者开口同向或平行情况。

**关键词:**住宅建筑;建筑火灾;火灾温度;烟气流动;空间构造形式

**中图分类号:**TU241.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)04-0149-08

## Experimental Analysis of Building Space Constructions on Hot-smoke Flow in Residential Fire

GUO Zhen<sup>a,b</sup>, YUAN Yingshu<sup>a,b</sup>

(a. School of Mechanics & Civil Engineering; b. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:**Based on the characteristics of spatial structure of residential units, the effect of building space construction on temperature raise and hot-smoke flow in residential fire was analyzed on building model with simulating multiple floors and rooms. The raise and distribution of temperature indoors were mainly tested under varied location of fire sources. And, the rule of smoke flow was discussed by using the law of temperature raise, indirectly. The results indicate that the mode of smoke flows is influenced by three spatial factors which include the form of junction terminal room construction; the height of down stand above the door and the relative locations of each room. The diffusion of hot smoke is prevented effectively by the down stand of the room; the temperature difference between indoor and outdoor should be higher than that of the room without down stand. When the open direction of door in non-fire room is opposite to that of the door in fire room, there is much more hot smoke.

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

建筑火灾安全是目前工程界较为关心的问题,也是社会的热点问题。目前,中国住宅火灾灾害程度呈加剧趋势,据统计<sup>[1]</sup>,2009年1月至8月中国城镇居民住宅共发生火灾35430起,直接财产损失17963.5万元。因此,系统地开展单元式住宅建筑

火灾安全研究迫在眉睫,研究成果能够为中国住宅建筑火灾安全设计提供理论依据,亦能够带动相关领域研究和产品研发的发展。

目前研究机构已建成多种类型的仿真建筑火灾实物试验模型,针对火灾发展的全过程,火焰物理特

收稿日期:2012-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878207)

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

性<sup>[2-3]</sup>,烟气扩散模型<sup>[4-5]</sup>,烟流性状<sup>[6]</sup>及烟气浓度分布<sup>[7-8]</sup>,结构构件耐火极限等进行了广泛的研究。如,中庭式大空间建筑火灾实验厅<sup>[9]</sup>;积木式多功能火蔓延特性实验台<sup>[10]</sup>;单室火灾试验平台<sup>[11]</sup>;多层多室实体建筑火灾实验平台<sup>[5]</sup>;构件耐火极限试验平台<sup>[12-13]</sup>等。上述现有的主要火灾试验平台,均以火灾特性、烟气流动性状,或构件高温承载能力为研究对象进行的物理性试验。然而上述的研究成果中均包含了一个空间构造形式的内在影响因素,但是这一因素还尚未作为建筑火灾安全设防的主要指标参数。如果将火灾和烟气的物理模型与空间构造形式相结合,将会极大的促进中国目前的住宅建筑火灾安全领域的发展,丰富火灾安全基础理论的研究内容。因此提出基于火灾安全的户型空间设计或家装改造建议,是目前降低住宅火灾损失的一个有效的技术手段。探索火灾中高温烟气的流动模式,是降低住宅火灾人员伤亡、财产损失等防范措施的理论基础性研究。笔者拟通过实体多层住宅建筑模型火灾试验研究,探寻住宅建筑内高温烟气的流动规律,总结试验数据和现象,揭示空间构造形式对火灾烟气流动的影响因素。火灾试验将在自制模块式多层住宅建筑模型上进行,该模型参照苏北某住宅小区的一单元两户住宅建筑建造,模块通过不同的组合方式可以模拟多室平面及竖向火灾,也可以进行不同户型和层数的火灾蔓延试验研究。

## 1 模块式多层住宅建筑火灾流动试验平台设计

### 1.1 住宅建筑模型组成及尺寸

考虑到不同户型对室内火灾烟气流动的影响,住宅建筑模型采用可按照不同户型灵活拼装的模块式设计,根据房间功能制作标准尺寸的空间模块,见图1,模型考虑了住宅建筑常规的功能要求,如客厅、厨房、卧室、书房、卫生间及楼梯间。按照1/4缩比尺寸制作,模型尺寸见图2和图3。

### 1.2 住宅建筑模型的构成试验平台构成

试验平台由标准化尺寸的独立房间构成,每层有8个独立房间拼接,各房间编号见图1(a)所示。其中①单元为所有房间之间的交通联系空间,其他房间通过各自门洞在①单元处汇集构成一个完整户型,这里将其称为枢纽空间;⑤单元为楼梯间;③和⑥单元为相同尺寸模型,分别模拟无房门和过梁的客厅和餐厅及厨房,定义其为大开敞空间;②、④、⑦3个单元尺寸相同,分别模拟有房门的卧室和书房,由于房门上方的过墙类似挡烟垂壁作用,故将这3

个空间定义为有垂壁空间;⑧单元为卫生间,也定义为有垂壁空间。

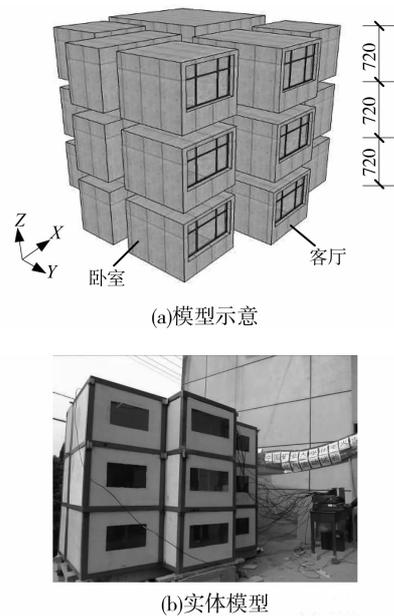


图1 模块化试验平台拼接示意

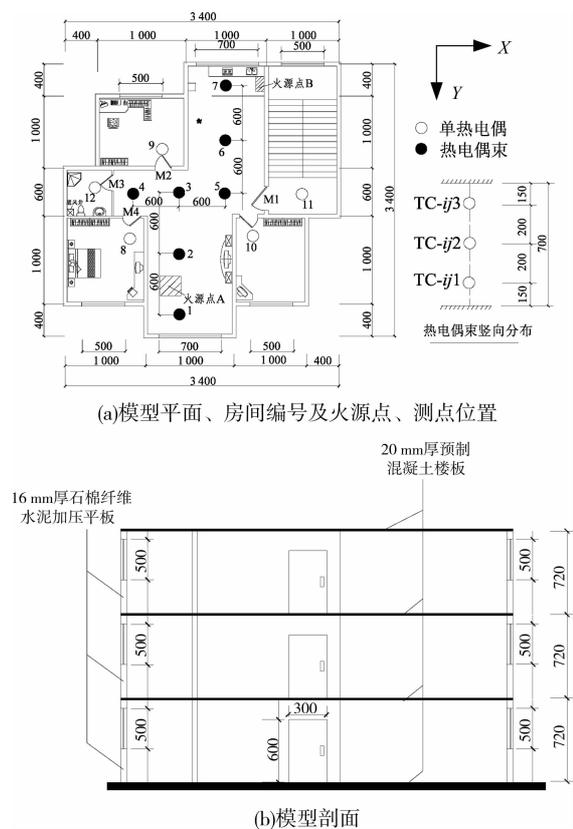


图2 住宅建筑模型尺寸

### 1.3 住宅建筑模型制作

#### 1) 骨架

每个独立模块由 L63×5 等边角钢焊接形成骨架。

## 2) 楼板及隔墙

根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2006) 5.1.1 条耐火等级为二级的民用建筑规定,不燃烧楼板及非承重墙体耐火极限为 60 min。因此,楼板采用 30 mm 厚预制混凝土板,内部配置钢筋筛网并且双向构造配筋,钢筋直径 8 mm。为降低自重,内嵌墙板采用导热系数为 1.43 W/(m·K) 的 16 mm 厚石棉纤维水泥加压平板,表观密度 1.95 g/cm<sup>3</sup>,其具有高强、轻质、防火、防水性能。经初步自然实火测试,在最高温度 500 °C 直接烘烤情况下,石棉纤维水泥加压平板 42 min 后开始发生挠曲变形,78 min 后粉化破坏。

## 3) 房门与窗户

试验平台窗户采用 5 mm 厚普通玻璃,铝合金包边固定于水泥压力板上。户门为 4 mm 厚钢板,室门为 8 mm 厚胶合板制成。

## 4) 室内家具及装修

根据每次试验的研究内容,布置室内家具和装修。试验平台实际安装后效果见图 1(b)。

### 1.4 试验平台的温度数据采集装置

试验的量测点位置见图 2(a),图中黑圆点表示三热偶束形测点,空圆圈表示置顶单热电偶测点。置顶单热电偶位于每个房间入口处且距天花板底 150 mm。所有热电偶采用直径 2 mm 的 NiCr-NiSi 热电偶。利用 TDS303 数据采集仪采集温度,获得空间温度分布。热电偶编号模式为 TC-*ijk*,其中 *i* 表示楼层号,*j* 表示平面位置编号,*k* (*k*=1、2、3) 表示热电偶束空间竖向布置的编号。

## 2 火灾试验方案设计

试验目的是空间构造形式(如房间相对位置),火源点位置变化,各房间连通形式等对室内火灾烟气流动的影响。利用热电偶量测空间温度分布,归纳烟气流动的规律。因此,室内家具不按照真实场景进行布置,仅以总燃烧热释放量相等原则换算成木材。另外,试验不以考察烟气填充时间为主要研究目的,故忽略火灾试验平台的尺寸效应的影响。

### 2.1 火灾场景设计

试验共设计 2 个火灾场景,分别为第 2 层的客厅火灾和厨房火灾,火源点平面位置见图 2(a)。

#### 1) 客厅火灾(T-1)—火源 A

客厅火灾以沙发被遗留烟头点燃作为起火原因。室内房间门均为开启状态;各室窗户均为关闭状态;通楼梯间户门关闭。

#### 2) 厨房火灾(T-2)—火源 B

厨房火灾主要原因假定为燃气炉火引燃橱柜,并假设燃气管道具有自动关闭功能,排除燃气泄漏引起的火势加剧和爆炸可能。此工况场景,室内房间门均为开启状态;各室窗户均为关闭状态;通楼梯间户门关闭。

### 2.2 试验分组

试验以考察空间构造形式对火灾蔓延和烟气流动影响为主要目的,试验仅考虑火源点位置的影响因素;火源点 A 和 B 位置如图 2(a)所示。房间门及窗户仅作为火灾场景条件,但试验中不排除通楼梯间户门或玻璃高温破坏造成的火灾蔓延和烟气流动的变化。试验分组情况见表 1。

表 1 试验分组

试验编号	火源点	窗户	室内门	户门	燃烧物	燃烧物质量/kg
T-1	A	闭	开	闭	水曲柳木	15
T-2	B	闭	开	闭	水曲柳木	13

### 2.3 试验点火装置及燃烧物质

点火材料为煤油,煤油碟上方由铁架支起杉木木料及布料作为起火装置,起火时间以木料和布料燃烧为起点,通过木料燃烧模拟室内家俱或电器起火。室内火灾荷载参照《建筑钢结构防火技术规范》<sup>[14]</sup>的 C.0.1 和 C.0.2 进行估算,根据总热释放量相等原则换算成水曲柳木质量后,客厅火灾用木料为 15 kg,厨房火灾用木料为 13 kg。试验目的为探索室内火灾的温度空间分布特征和烟气流动规律,所以不强调火灾试验过程的绝对温度。

### 2.4 试验场地及环境

试验模型安置在露天开阔场地进行,试验当天气候环境如下:

1) 试验 T-1 进行期间,户外实测温度 5.3 °C,风向东北,风速 3.6 m/s,气压 1 004.9 hPa,相对湿度 43%;

2) 试验 T-2 进行期间,户外实测温度 6.7 °C,风向东北,风速 2.1 m/s,气压 1 031.3 hPa,相对湿度 47%。

## 3 火灾试验过程

### 3.1 试验 T-1

试验 T-1 从点火到试验结束共进行了 58 min。试验过程见图 5。

1) 起火阶段,点燃火源点的煤油,木垛开始燃烧,火焰尺寸较小,发烟量不大。

2) 初燃阶段,6 min 后,木垛燃烧面积开始增大。由于模型房间密闭,火焰保持竖直。

随着燃烧的持续,火焰面积逐渐扩大,房间内的燃烧物相继起火,发烟量开始增加。在这一阶段中,起火房间的温度上升速度极快,而其他房间的温度变化幅度很小。

此阶段天花板上模拟吊顶的木条开始燃烧。同时玻璃温度较高。

3)全面燃烧,该阶段的起始标志是起火房间窗户玻璃的受热破碎。在点火后 13 min 左右,玻璃向内破碎脱落。由于新鲜空气的进入,火势突然增加,整个房间内的可燃物全部起火。此时,火焰开始向内蔓延,室内的烟气浓度较高,可见度极小,大量黑色烟气从窗口上缘向外溢出。

#### 4)降温阶段

随着可燃物燃尽,火焰逐渐减小,室内温度开始降低,降温速度略小于升温过程。整个试验历时 58 min,终止试验,此时室内平均温度降低至 63 °C。

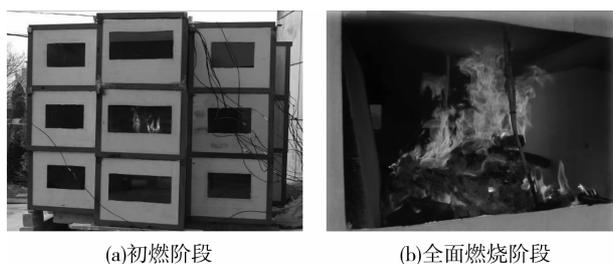


图 5 试验 T-1 火灾过程

### 3.2 试验 T-2

试验 T-2 的火源点位于厨房位置。试验历时 63 min。试验过程见图 6。



图 6 试验 T-2 火灾过程

1)起火阶段,由于天气干燥,点燃火源点的煤油后,木垛迅速开始燃烧。火焰范围不大,出烟量较少,透过玻璃可以观察到室内情况。

2)初燃阶段,木垛燃烧范围扩大,模拟吊顶也被引燃。室内已聚集大量黑烟,火势较为剧烈。

3)全面燃烧,厨房窗户玻璃在点火后 15 min 左右破碎,标志着进入全面燃烧阶段,室内木垛已全部燃烧。较新鲜冷空气作为助燃剂,加剧了所有可燃

物的燃烧速度。部分火苗从室内窜出窗户。

4)试验结束,随着室内可燃物全部燃尽,火势逐渐减小。在试验进行 63 min 后已无明火,试验结束。

## 4 火灾引起的住宅建筑模型内温度变化规律

通过火灾试验,得到了 2 种火灾工况下住宅单元平面及高度方向的温度分布情况。利用所测温度值与试验时间的关系,对试验数据进行处理,可以初步归纳室内升温规律。按照牛顿流体力学原理可知,冷空气的浮力作用使高温低密度的烟气流漂浮和运动,也就是说室内空间的温度场除了受到火源点热辐射升温外,高温烟气的流动也是室内温度升高的一个重要因素。因此,通过研究室内空间温度的变化可以间接获得高温烟气的流动规律。

### 4.1 起火时间与单元空间内部各监测点温度变化

根据试验 T-1 和 T-2 位于大开敞空间(客厅和厨房)的测点 1~7 的温度值与时间的关系绘于图 7(a)、(c),位于有房门空间(卧室、书房、卫生间)的测点 8~12 温度值与时间的关系绘于图 7(b)、(d)。图中温度曲线均为靠近天花板处的热电偶(TC-2j3)量测值变化。

图中反映了各测点温度随火源点的燃烧变化情况,由于缩比的试验平台存在空间尺寸效应,内部的氧气量偏少,造成试验过程中温度偏低实际火灾。依据测点温度变化的曲线,忽略玻璃破碎对温度曲线的影响,起火后室内平面温度动态变化具有以下几点特征:

#### 1)火源点位置的影响

模型 T-1 的测点温度以 1、2、3、5、4、6、7 顺序从高到低变化。模型 T-2 的起火点在厨房,所以该模型的测点 1~7 的温度变化与模型 T-1 完全不同。模型 T-2 的 8~12 测点温度变化现象与模型 T-1 基本一致,只是测点温度排列的顺序发生了变化,模型 T-1 的 9 号测点最高,而模型 T-2 的 10 号测点最高。

#### 2)有垂壁房间的温度升温特点

根据 T-1 和 T-2 的 8~12 测点温度可以发现,温度较高的房间均是门开洞方向面对起火房间,说明火源点位置变化引起各室温度变化的随机性,但是高温烟气流动方向和方式具有确定性。

#### 3)枢纽空间的平面温度分布特点

模型 T-1 测点 3、4、5 三点处在同一水平位置而且间距相同,但是测点 5 的温度要高于测点 4;模型 T-2 的火源点位置在厨房,但是枢纽空间的 4 号测

点温度仍旧低于同在枢纽空间的其他测点温度。这

反映了烟气流动方向的选择性。

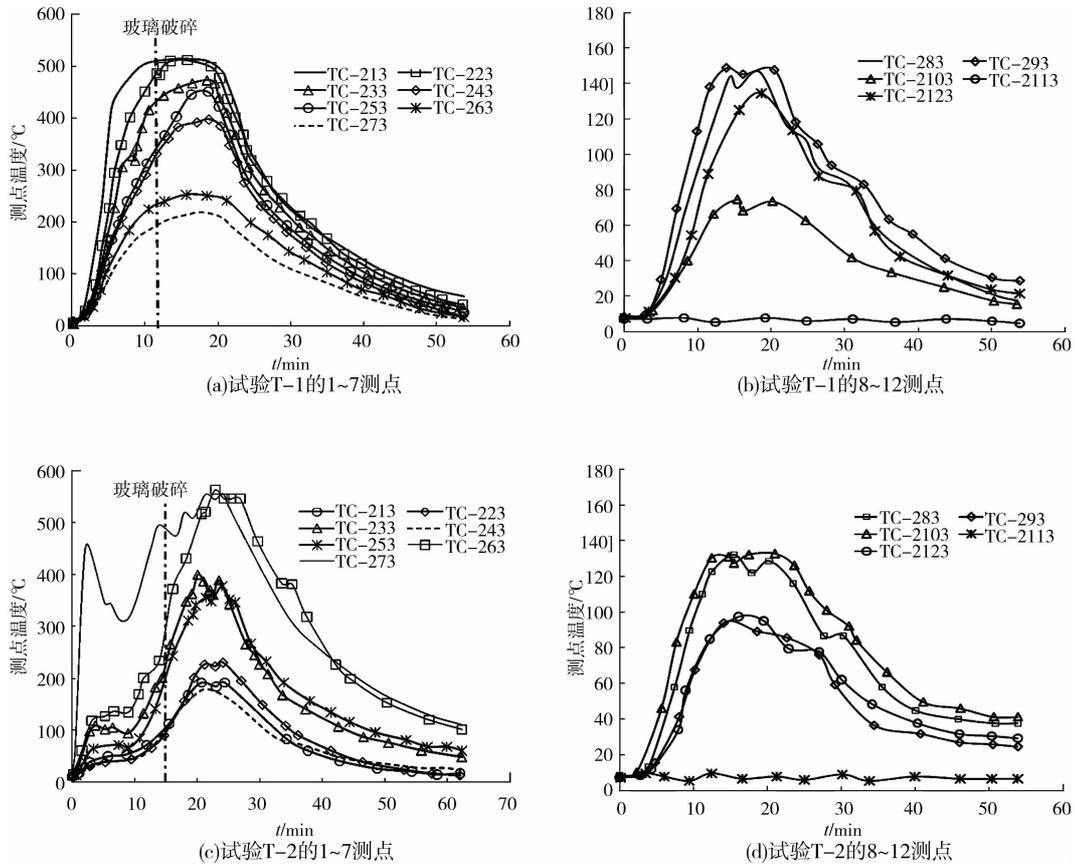


图7 火灾试验测点温度变化曲线

根据温度值的比较可以间接的判断高温烟气层进入不同空间区域的先后顺序:温度高的区域说明高温烟气层较易进入或是较早的进入;温度低的区域说明高温烟气层在进入的过程中存在热损失,可以认为是较晚进入或是不易进入。

高温烟气以湍流的形式向外扩散。在流动的过程中,因烟气层下缘卷吸冷空气发生热交换,造成烟气扩散距离越远,远端温度越低。空间构造形式决定了烟气流动的路径和距离,也就造成了室内空间温度分布的变异性;或是说非起火房间与起火房间的相对位置,决定了非起火房间升温速度和幅度,进一步说明烟气流动具有方向的选择性,空间布局是影响流动方向的关键因素。

#### 4.2 室内竖向温度变化

室内竖向温度变化在一定程度上反映了空间温度场的分布特征。2次试验中,火源点(T-1的测点1,T-2的测点7)受到火焰的直接热作用,温度值在竖向变化很小。所以选取试验T-1和T-2非火源点测点2、3、5、6的竖向温度变化进行分析。4个测点的竖向温度与时间变化曲线见图8所示。

从图8中可以看出:

1)相同高度的测点,靠近起火点的温度测量值均高于远离火源点的测点,这与4.1节中的分析结果一致。

2)选取某一火灾时刻,如T-1中 $t=15\text{ min}$ 时,可以发现测点TC-233温度要高于TC-222,说明相同时刻在起火房间附近空间内,远离火源点但靠近天花板的烟气层温度要高于接近火源点但靠近地板位置;同样,选取某一温度,如T-2中 $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测点TC-223要早于TC-232到达该温度,这表明高温烟气水平方向的流动速度要高于下沉速度。

根据上述对室内竖向温度变化的试验结果分析,可以进一步明确火灾中烟气流动的一般规律:

1)高温烟气在空间竖向存在梯度,高温气体因受到浮力作用而聚集在天花板下方,又因为烟气层下缘卷吸冷空气发生热交换降温,所以温度依次向下降低。

2)按照黏性流体力学观点,烟气层贴着天花板底以湍流形式前进,前端锋面速度受到火源点功率的直接影响,而烟气层下缘的湍流模式在卷吸冷空

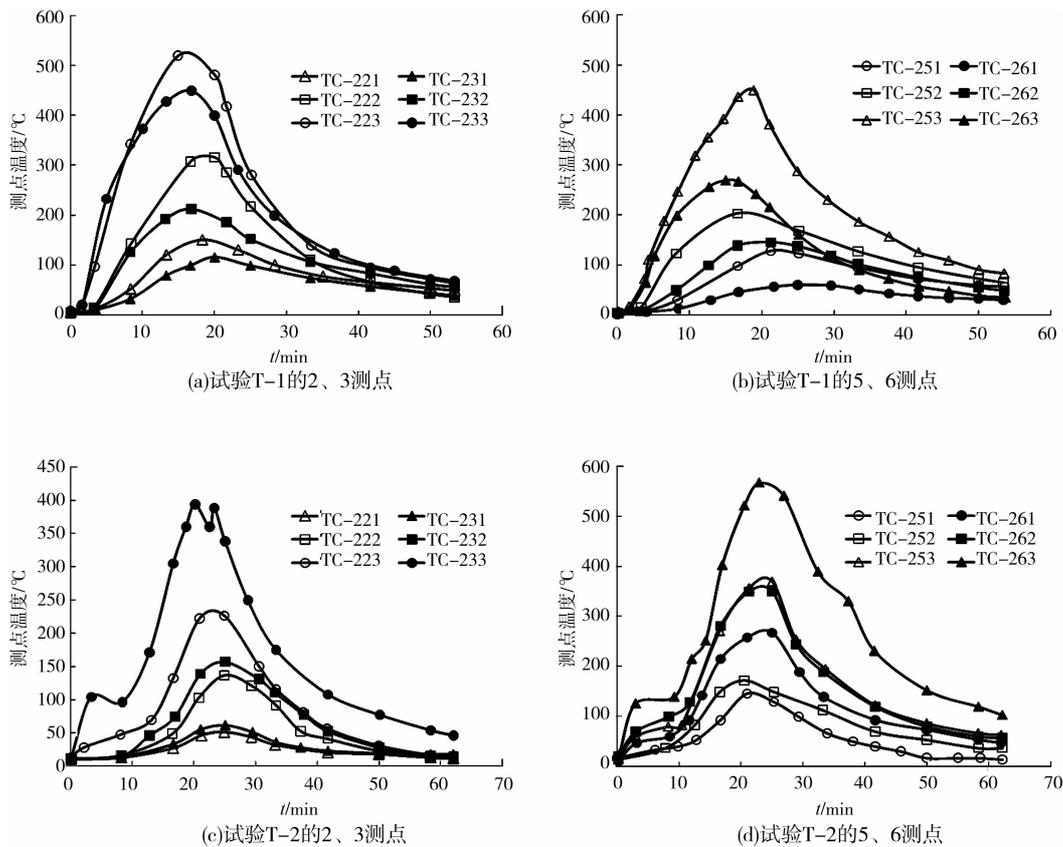


图 8 试验竖向温度变化曲线

气进行热交换的同时还受到冷空气层的浮力作用，下降速度低于前端锋面速度；另外，由于热交换，烟气层下缘温度要低于前端锋面温度；所以造成高温烟气水平方向的流动速度要高于下沉速度的现象。

3) 高温烟气趋于先充满整个空间的天花板，然后再向下扩散，因此挡烟垂壁(各房间门上方的过墙)可以阻碍烟气层的水平扩散，延长烟气扩散时间。

由于卷吸冷空气使烟气密度增大，导致烟气层下降(烟气层厚度增加)，表现为烟气填充空间现象。高温烟气层先到达的空间，烟气层厚度越大，在竖向空间上温度梯度小。

基于上述的讨论，如果忽略火源点的热辐射，空间内各点的温度均受到高温烟气层流动的影响。由于住宅单元特有的多室格局形式，如，门上方的过墙(类似挡烟垂壁)，也就势必会影响高温烟气的水平流动。

### 4.3 起火位置对单元空间内部各监测点温度变化的影响

火灾发生时，非起火房间的温度上升以高温烟气层流动和热交换为主的。从 500 s 到 1 000 s 以 100 s 为间隔，将 12 个平面测点位置的顶部热电偶量测温度值绘于图 9，图中横坐标对应为平面测点

编号，纵坐标为量测温度值。横向可以比较各测点间的温度差异，纵向反映了不同时刻同一测点位置的温度变化，温度值的疏密反映了温度变化的速率。

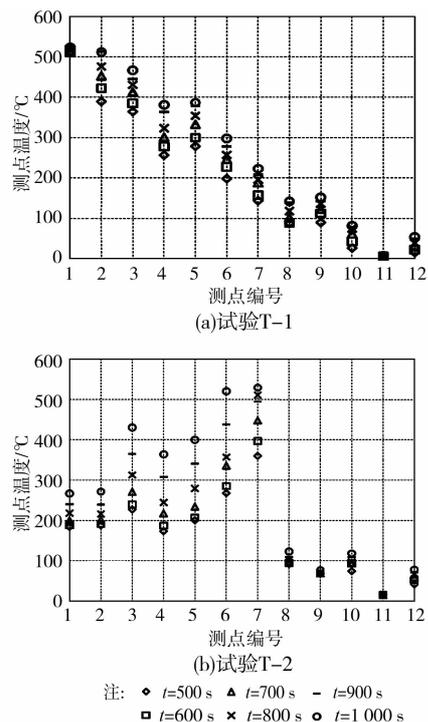


图 9 不同时刻顶部测点的温度变化

从图中可以看出:试验中,有垂壁空间(②、④、⑦)3个房间)测点8~10温度变化幅度很小,而且温度较低,说明热烟气进入这3个房间的烟气量少,或是烟气温度低;但是由于火源点位置不同,这3个房间的温度值和变化幅度不一样,试验T-1中10号测点的温度低于试验T-2,升温幅度却高于试验T-2;9号测点的温度差异更为明显,在试验T-2中最高温度仅为76.4℃,而在试验T-1中最高温度平均达到142℃。另外,在试验T-1和T-2中,卫生间温度(测点12)变化不大。

因此,火源点位置对空间各房间的温度影响较大,从空间布局构造方面得到起火位置与单元空间内部各监测点温度变化的规律:

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,但是有垂壁房间的温度低于相同水平位置的大开敞空间,说明有垂壁房间虽然面对起火房间,但是高温烟气层厚度必需达到房门上方垂壁高度后才能进入,这一过程增加了烟气层的热量损失。

2)当非起火房间的门位于起火房间烟气流出方向的后方,则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,不过下沉速度要小于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,该房间的升温原因与2)相同。

通过上述3个方面的讨论,可以得到结论:住宅单元火灾的具有随机性,但是火灾过程中高温烟气的流动符合一定规律性,不论火灾发生在哪个房间,高温烟气必将通过枢纽空间向其他房间扩散,那么枢纽空间的构造形式决定了高温烟气的流动规律。

## 5 影响火灾烟气流动的空间因素

根据上述对试验结果的现象的分析,可以初步得到影响住宅建筑火灾烟气流动的空间因素:枢纽空间构造形式,房门上方垂壁,各房间之间的相对位置。由于试验过程中,通往楼梯间的户门未被烧坏,因此在玻璃破碎前,模型基本处于完全封闭的多室联通模式。

### 5.1 枢纽空间对高温烟气扩散的影响

枢纽空间起到了各房间相互连通的作用。如果将各房间看作是网络上的节点,那么枢纽空间便是这个网络的干线。任一节点释放出的高温烟气必将通过网络干线向其他节点扩散。但是如前所述,并

不是所有节点升温速度和温度值是相同的,也就是说网络干线(枢纽空间)决定了其他节点获得高温烟气的分配原则,即枢纽空间的构造形式决定了高温烟气的流动规律。

从试验模型来看,枢纽空间与其他房间的连接形式主要有2种:

1)无垂壁(过墙)全敞连接,如客厅、厨房,高温烟气可以无障碍通过,2次试验中,无垂壁全敞空间升温速度和温度值都高于有垂壁房间。

2)有垂壁(过墙)连接,如卧室、书房、卫生间,高温烟气层必须集聚厚度达到门上过墙高度才能进入这些房间,烟气的集聚减缓了这些房间内部的温度上升速度,集聚过程中的热量散失也降低了进入这些房间的温度值。

### 5.2 垂壁对烟气流动的影响

按照黏性流体力学观点,烟气层的湍流式前进,会卷吸底部的冷空气进入,烟气层下缘部分的温度降低,烟尘颗粒开始下沉,造成烟层厚度增加。与卷吸的冷空气热对流,使分子运动速度减缓,烟层水平流速逐渐降为零,见图10所示。图中, $h_{yc}$ , $h_{cb}$ 分别表示烟气层厚度和垂壁高度; $v_{yc}(h)$ 为烟气层锋面水平速度,是烟层厚度的函数,它受到火源点功率的直接影响。当 $h_{yc} > h_{cb}$ 时,烟气层可以直接通过垂壁进入房间;当 $h_{yc} < h_{cb}$ 时,烟气层将先形成垂壁回流在向房间内扩散,但是扩散速度和温度将低于 $v_{yc}(h)_{max}$ 。

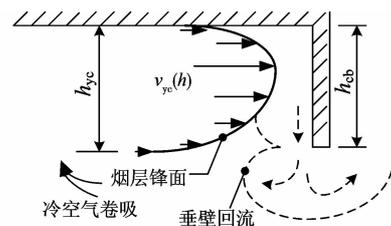


图10 烟气层与垂壁高度关系

当非起火有垂壁房间的门面对起火房间时,烟气前进方向受到门上方垂壁的阻碍,形成垂壁回流,温度和速度均比原烟气层锋面有一定降低,冷空气的浮力使垂壁回流进入非起火房间;但是垂壁回流速度仍受到火源点功率的影响,其仍旧高于烟气层下缘热交换冷却引起的烟层下沉速度。当非起火房间的门位于起火房间烟气流出方向的后方时,烟气是以热交换冷却的烟层下沉方式进入,所以升温时间滞后,且温度较低。

### 5.3 各房间之间的相对位置对烟气流动的影响

根据起火位置对单元空间内部各监测点温度变化的影响分析,烟气流动具有方向性。当烟气进入

枢纽空间后,各单元与枢纽空间的相对位置也影响各自空间的升温:

1)当单元开口面对高温烟气进入枢纽空间方向时:

①无垂壁(过墙)全敞连接时,高温烟气无障碍进入,升温速度快,温度值较高,该单元与起火单元之间形成主要高温高速烟气流通道,决定了全局火灾蔓延和烟气流动的发展和形式。

②有垂壁(过墙)连接时,高温烟气层厚度到达门上过墙高度后烟气进入,烟气温度和升温速度低于①情况,属于中温烟气流通道。

2)当单元开口(通常为有垂壁连接)背向或平行于高温烟气进入枢纽空间方向时,高温烟气进入主要是以烟气层湍流卷吸增厚超越垂壁高度的方式。这种进入形式的速度和烟气携热量要远小于1)的情况。

## 6 结论

利用模块式火灾试验平台,构建了缩比3层住宅单元模型,初步分析了住宅单元室内火灾发展的情况,进行了高温烟气流动和火灾蔓延的试验研究和分析。根据试验结果,可以发现室内火灾的以下几个显著特点和规律。

1)非燃烧房间与燃烧房间的连通形式是影响高温烟气流动的主要因素。当非燃烧房间与燃烧房间的连通形式较为直接时,高温烟气向非燃烧房间的流动和扩散也较为快,该房间的温度增加值也较高。

2)由于住宅建筑中各房间均通过枢纽空间联系,任一起火房间的高温烟气均将先进入枢纽空间,然后再向其他房间扩散,因此,枢纽空间的构造形式(如尺寸,各房间门的相对位置等)对室内高温烟气流动具有决定性。

3)房间室门上方的过墙(或称为垂壁)具有阻碍烟气流动的作用,由于烟气层贴天花板底水平运动,当室门上方垂壁高度大于烟气层厚度时,将有效减缓或改变烟气水平运动速度或方向;同理,高温烟气更易进入或流出大开敞空间(如客厅、厨房等),在面对起火房间相同位置情况下,高温烟气进入非起火房间速度和温度仅与室门上方垂壁高度有关。

4)当火源点确定后,烟气的运动模式是固定的,但是烟气运动所表现出的现象受到了空间形式的影响,也就是说空间形式对高温烟气的流动具有一定规律性影响。对于不同单元起火、枢纽空间构造、各单元开口程度及隔墙位置等影响因素的机理分析,将结合烟气运动规律进行进一步的探讨。

### 参考文献:

[1] 中国政府网. 公安部公布2009年1月至8月全国火灾情况统计[EB/OL]. [2009-09-11]. <http://news.sohu.com/20090911/n266665505.shtml>.

- [2] Black W Z. Smoke movement in elevator shafts during a high-rise structural fire [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(2): 168-182.
- [3] 霍然,李元洲,金旭辉,等. 大空间内火灾烟气充填研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2001, 7(3): 219-222.  
HUO Ran, LI Yuanzhou, JIN Xuhui, et al. Studies of smoke filling process in large spaces [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(3): 219-222.
- [4] Robbins A P, Wade C A. Test method for roof panels to be used for passive fire roof venting [J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(2): 142-148.
- [5] 罗庆. 建筑物烟气流动性状实验研究及其预测软件的完善[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [6] 钟茂华,厉培德,刘铁民,等. 多层多室建筑室内火灾烟气运动过程模拟实验研究[J]. *中国科学 E 辑*, 2005, 55(5): 490-502.  
Zhong Maohua, Li Peide, Liu Tiemin, et al. Simulation on multi-layer multi-room building fire smoke movement [J]. *Science in China Ser. E*, 2005, 55(5): 490-502.
- [7] 章涛林,方廷勇,卢平. 高层建筑火灾烟气迁移特性研究[J]. *安徽建筑工业学院学报:自然科学版*, 2008, 16(5): 58-64.  
ZHANG Taolin, FANG Tingyong, LU Ping. The research of smoke transfer characteristic in high-rise building fires [J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry*, 2008, 16(5): 58-64.
- [8] Lattimer B Y. The transport of high concentrations of carbon monoxide to locations remote from the burning compartment [C]//NIST GCR 97-713, 1997.
- [9] 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.  
HUO Ran, FAN Weicheng, YUAN Liming, et al. Construction and preliminary testing of large space fire test hall [J]. *Fire Science*, 1998, 7(1): 8-13.
- [10] 谢之康,张和平,程晓舫,等. 大空间公用建筑火灾积木式多功能火蔓延特性实验台的研制[J]. *火灾科学*, 1999, 8(1): 39-45.
- [11] Dembsey N A, Pagni P J, Williamson R B. Compartment fire experiments: comparison with models [J]. *Fire Safety*, 1995(25): 187-227.
- [12] Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(5): 1223-1235.
- [13] Stern G J, Rein G, Bisby L A, et al. Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires [J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(4): 249-261.
- [14] 中国工程建设标准化协会标准. 建筑钢结构防火技术规范(CECS 200:2006)[S]. 2006.