

多层多室建筑室内火灾烟气运动过程 模拟实验研究*

钟茂华 ** 厉培德 刘铁民 韦 星 廖光焯

(国家安全生产监督管理局安全科学技术研究中心, 北京 100029; 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

摘要 利用火灾科学国家重点实验室的模型实验楼, 对多层多室建筑室内火灾时, 烟气运动过程的规律进行研究, 实验过程主要对烟流成份、温度、气压差和烟流速度等进行测量与分析, 并基于国家标准“工作场所有害因素职业接触限值(GBZ2-2002)”对烟流成份对人的危害情况进行分析. 结果表明: 多层多室建筑火灾时, 着火源点垂直高度上温差最大, 随着烟流蔓延和扩散, 烟气层温度基本趋于一致. 对于木垛火灾和煤油火灾, 最先超过一般人的生理极限的主要成份是 SO_2 , CO 和 CO_2 , 其次是 NO 和 NO_2 . 多层建筑火灾过程中, 由于烟流的气压差波动幅度及频率较大, 容易导致烟流在流动过程中充分蔓延到所流经通道的每一个空间, 使人员避灾难度加大.

关键词 多层多室 火灾实验 烟气蔓延 烟气毒性

随着我国经济建设的发展, 高层建筑如雨后春笋般地涌现出来, 如何避免或减少高层建筑中的火灾的相关损失是消防部门、建筑设计和管理部门所面临的重大课题, 更是火灾科研工作者所面临的新的挑战^[1].

由于高层建筑火灾过程中的火风压产生^[2,3], 导致高温火灾烟流沿各种通道, 如走廊、楼梯间、电梯井、管道井、电缆井和垃圾井等通道, 自起火层向其上层或下层空间蔓延. 若初期灭火失败, 那么高层建筑犹如一座高大的竖向烟囱, 将很快形成一根冲天火柱, 危及楼内人员生命财产和安全.

对于多层多室建筑烟气运动规律的研究, 通常有两种研究方法: 模拟方法和

2004-04-10 收稿, 2005-02-25 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 50106017)、国家重点基础研究专项经费(批准号: 2001CB409600)和国家十五科技攻关项目(批准号: 2001BA803B01)资助

** E-mail: mhzhong@chinasafety.ac.cn

实验方法. 模拟方法主要有区域模拟、场模拟和网络模拟, 实验方法主要有小尺寸实验和全尺寸实验. Chow和Sato等人对中庭大空间烟气运动均进行了一些小尺寸和全尺寸的烟气研究^[4,5]. Luo等人以床垫为燃料, 在单层多室全尺寸实验室内进行火灾实验来研究建筑室内轰燃时烟气运动过程特点, 并与场模型和区域模型的数值计算结果进行比较^[6]. Peacock等人利用泛函分析方法对火灾过程中烟气运动特征如温度分布和烟气厚度等进行了分析, 并与实验结果进行对比研究^[7]. 姚建达等人利用场-区-网模型对建筑火灾中的烟气运动进行了数值模拟, 并与实验结果进行了比较研究^[8]. Zhong等人利用网络模拟技术对复杂网络火灾进行了数值模拟并提出了优化控制方案的选择方法^[9]. Liang等人利用非线性动力学方法来对建筑室内火灾轰燃时烟气运动过程进行了研究, 提出了室内发生轰燃的临界条件及其随相关参数变化而变化的情况^[10].

目前, 国内外进行的建筑室内火灾实验研究主要是以单层单室或多室的实验研究为主, 很少有进行多层多室的建筑火灾实验研究的报道^[11]. 这里, 我们利用中国科学技术大学火灾科学实验室典型 5 层模型楼开展实验研究, 研究多层多室建筑火灾时, 火灾过程的烟气运动、温度、压差及烟气成份等参数的变化过程.

1 实验装置

实验研究过程中主要的实验装置有 5 层模型实验楼、实验数据采集系统、图像采集系统、通风系统等, 主要装置分别介绍如下:

1.1 5 层模型实验楼

这一模型楼是一栋比例为 1:2、尺寸为 $7.5\text{ m} \times 6.0\text{ m} \times 7.5\text{ m}$ 的楼房. 楼内设有两个楼梯筒和一个多层共享空间. 1 和 2 楼结构类似, 3 和 4 层结构一致. 每个房间都有门和走廊相通, 每一走廊又有门和楼梯筒与共享空间相通. 各楼层的门及窗可按需要打开或关闭, 构成不同的通风通道. 实验模型楼如图 1 所示, 其主要尺寸如图 2 所示.



图 1 5 层模型楼

1.2 实验测试系统

1.2.1 温度的测量

温度的测量由 28 支直径为 2 mm 的 NiCr-NiSi 热电偶组成, 每 4 支热电偶组成一个热电偶树, 来测量建筑室内某点火灾时不同高度的温度分布. 每棵热电偶树均匀分布了 4 支, 每支

之间的间隔为 150 mm, 测量时最顶端的热电偶紧靠走廊顶. 在每一个热电偶树中, 离顶蓬越近的编号数字越小.

1.2.2 风流压差测量

实验过程中火灾产生的烟流压差由差压式传感器测量, 安装位置是 1 层走廊的火源点位置、1 层楼梯通道口及 4 层楼梯口. 同时在 4 层楼梯口还同时安装了电子压力传感器.

1.2.3 烟流成份测量

火灾过程中烟流成份由 M9000 燃烧分析器进行测量, 分析器的测量点位于 4 楼楼梯通道口. 测量的主要参数有氧气、二氧化碳、一氧化碳、一氧化氮、二氧化氮和二氧化硫等气体成份的浓度以及模型楼内的风流流速.

1.2.4 图像采集系统

实验过程中的烟气扩散和流动过程通过一个六通道图像采集系统完成, 该系统通过 CCD 摄像头、摄像机实时监视着火房、室内走廊、天井等的烟气运动过程.

实验过程中的采集系统为两台 PC 机, 一台用作采集温度、烟流成份及压力差等, 另一台用作图像采集. 火灾过程中图像采集系统、测温系统、数据传输及通风系统的布置如图 3 所示.

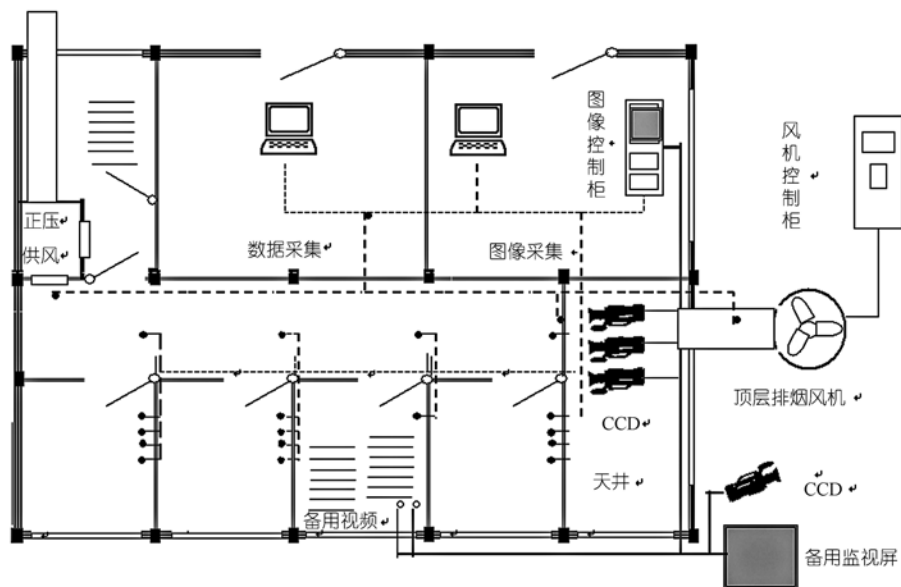


图 3 数据与图像采集系统、测温系统、数据传输及通风系统

1.3 实验燃料

实验的主要燃料是木材和煤油, 其中木材是以木垛的形式来进行实验的, 实

验过程中的木垛有 4 种类型, 如表 1 所示. 其中 I, II 和 III 类型的木垛的平面如图 4(a)所示, 每个木垛有 2 层, 木垛的每层有 4 根切面为正方形的木条组成; IV 号类型的木垛的平面如图 4(b)所示, 每个木垛有 2 层, 木垛的每层有 3 根切面为正方形的木条组成. 各类型木垛的尺寸见表 1.

表 1 实验过程中所用的木垛类型

类型编号	材料	每根木条尺寸/mm	每个木垛平面尺寸/mm	每个木垛重量/kg
I	松木	45×45×300	300×300	3.0
II	松木	30×30×300	300×300	0.95
III	松木	20×20×300	300×300	0.5
IV	松木	20×20×300	200×200	0.2

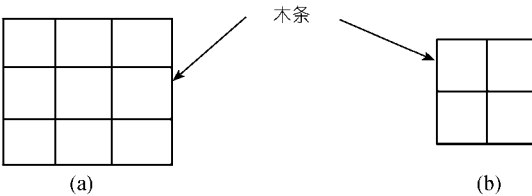


图 4 木垛的平面图

(a) I, II 和 III 类型木垛的平面; (b) IV 类型木垛的平面

实验过程中的另一燃料是煤油, 煤油主要是放在油盘中进行燃烧的, 实验时所用的油盘直径有两种, 引燃物是汽油, 实验分成 5 类进行, 如表 2 所示.

表 2 实验过程中所用的煤油进行火灾实验的不同类型

煤油实验类型	煤油体积/ml	引燃物	油盘直径/mm
1	400	汽油	165
2	500	汽油	165
3	750	汽油	165
4	1000	汽油	300
5	1250	汽油	300

2 分析方法

建筑火灾时人员伤亡大多是因为烟气中毒所致, 故这里基于 GBZ2-2002 对建筑物内火灾过程中的烟气成份进行分析, 计算火灾过程中, 烟气成份对人的安全的影响.

在这个标准中, 对烟气浓度共有 3 种计算方法, 分别为时间加权平均容许浓度(PC-TWA)、最高容许浓度(MAC)、短间接触容许浓度(PC-STEL). PC-TWA 是以时间为权数规定的 8 h 工作日的平均容许接触水平; MAC 是指工作地点、在一个工作日内, 任何时间均不应超过的有毒化学物质的浓度; PC-STEL 是指一个工作日内, 任何一次接触不得超过的 15 min 时间加权平均的容许接触水平. 考虑

到实验很难达到 8 h, 有时也难有 15 min, 故这里选用 MAC 的方法来进行分析, 计算火灾发生后, 烟气成份的浓度是否超过标准值. 标准规定: 工作场所中有毒物质的浓度必须控制在其最高容许浓度以下, 而不容许超过此限值. 显然超过这一规定, 将对人的生命安全构成重大危害.

3 实验结果及分析

3.1 实验过程

对多层多室建筑火灾的烟气蔓延的实验过程进行了多种组合, 主要是选择不同的着火房、不同的烟气通道、不同的可燃物以及风机门窗的开关等不同组合. 我们对木垛火灾实验和煤油火灾进行了多次实验研究. 这里选取典型的实验过程进行分析. 实验时, 可燃物(木垛和煤油)放在 1 层走廊里端, 实验全过程抽风机和压风机均处于关闭状态. 实验时, 主要对氧气、二氧化碳、一氧化碳、一氧化氮、二氧化氮及二氧化硫等气体成份的浓度以及模型楼内的风流流速、压差等参数进行测试. 温度、压差、烟流成份和气流速度的测点分布如图 5 所示. 下面选

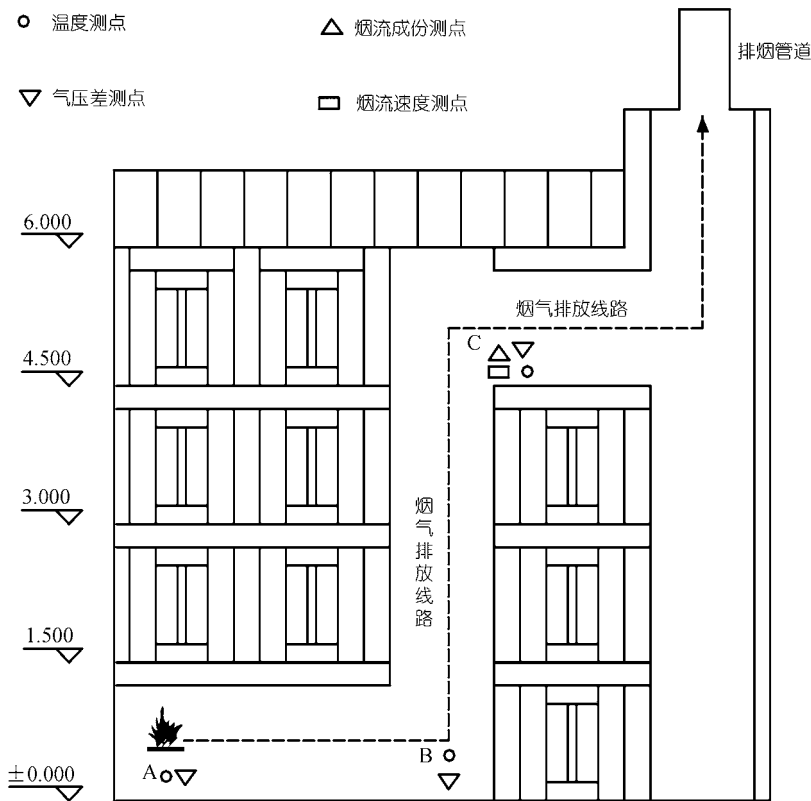


图 5 温度、压差、烟气成份和速度测量点分布

取其中的部分结果进行分析.

木垛火灾实验时中所用的材料类型为 I, 实验时火源点选为模型楼一楼通道内着火, 实验结果如图 6 和 7 所示.

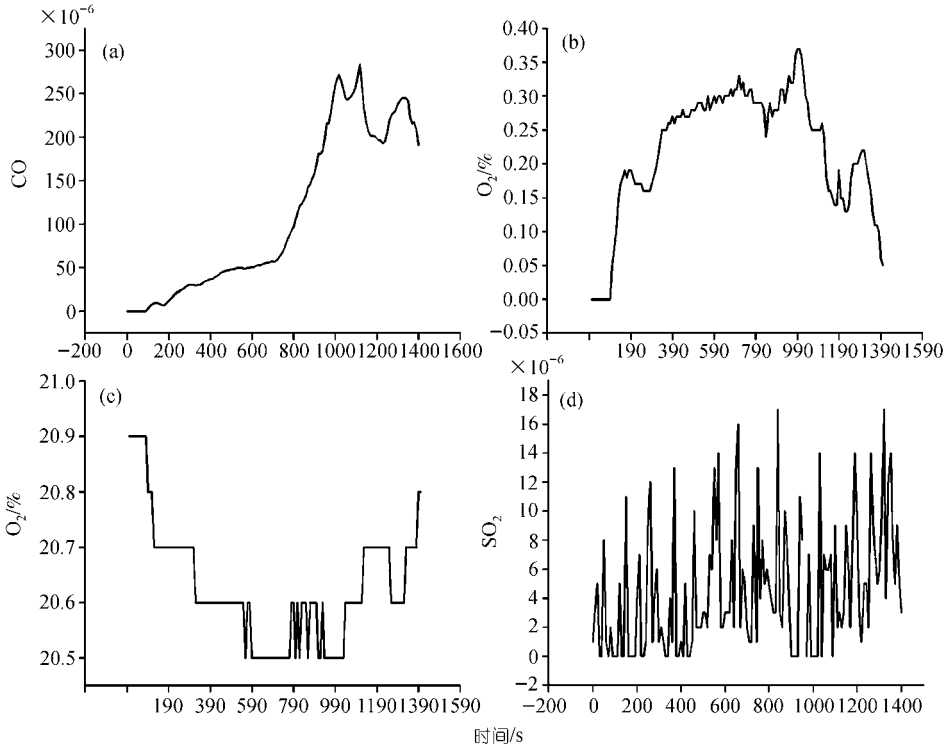


图 6 木垛火灾时 C 点烟流成份变化情况
(a) CO, (b) CO₂, (c) O₂, (d) SO₂

煤油火灾实验时火源点选为模型楼 1 楼通道内着火, 实验时所用的煤油为 400 ml, 用汽油来引燃煤油, 实验类型为 I, 实验结果如图 8 和 9 所示.

3.2 实验结果分析

图 7 和 9 表明, 在火源点 A 的温度明显高于 B 和 C 测点的温度. 对于木垛火灾, 最高温度位于距顶棚 150 mm 处, 而煤油火灾的最高温度位于距顶棚 300 mm 处. 火源点 A 的最高温度为 264 (木垛火灾)和 209 (煤油火灾). A 点垂直高度上温差大于其他测点垂直高度上的温差. 随着烟流向前流动, 烟流的温度降低, 在楼梯口 B 点烟气层的最高温度出现在离顶蓬 150 mm(木垛火灾)和 300 mm(煤油火灾)处, 温升值明显降低, 烟气层内部温度的变化趋于缓和, 烟气层下部温度高于上部温度并明显高于底部空气温度; 由于热交换作用, 烟气层将逐渐下沉; 在 C 断面上烟气层温度基本趋于一致, 在热风压的作用下, 烟流将流入天井.

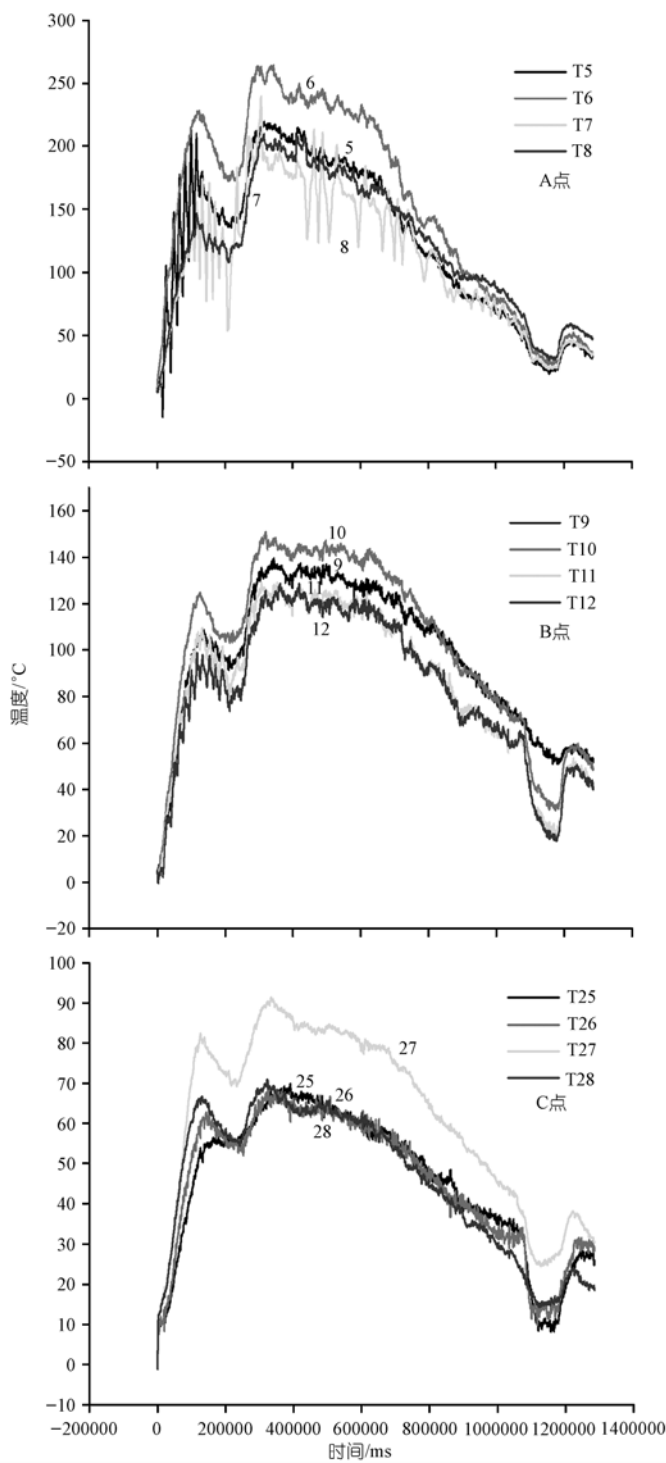


图 7 木垛火灾时不同测点所测烟流温度分布

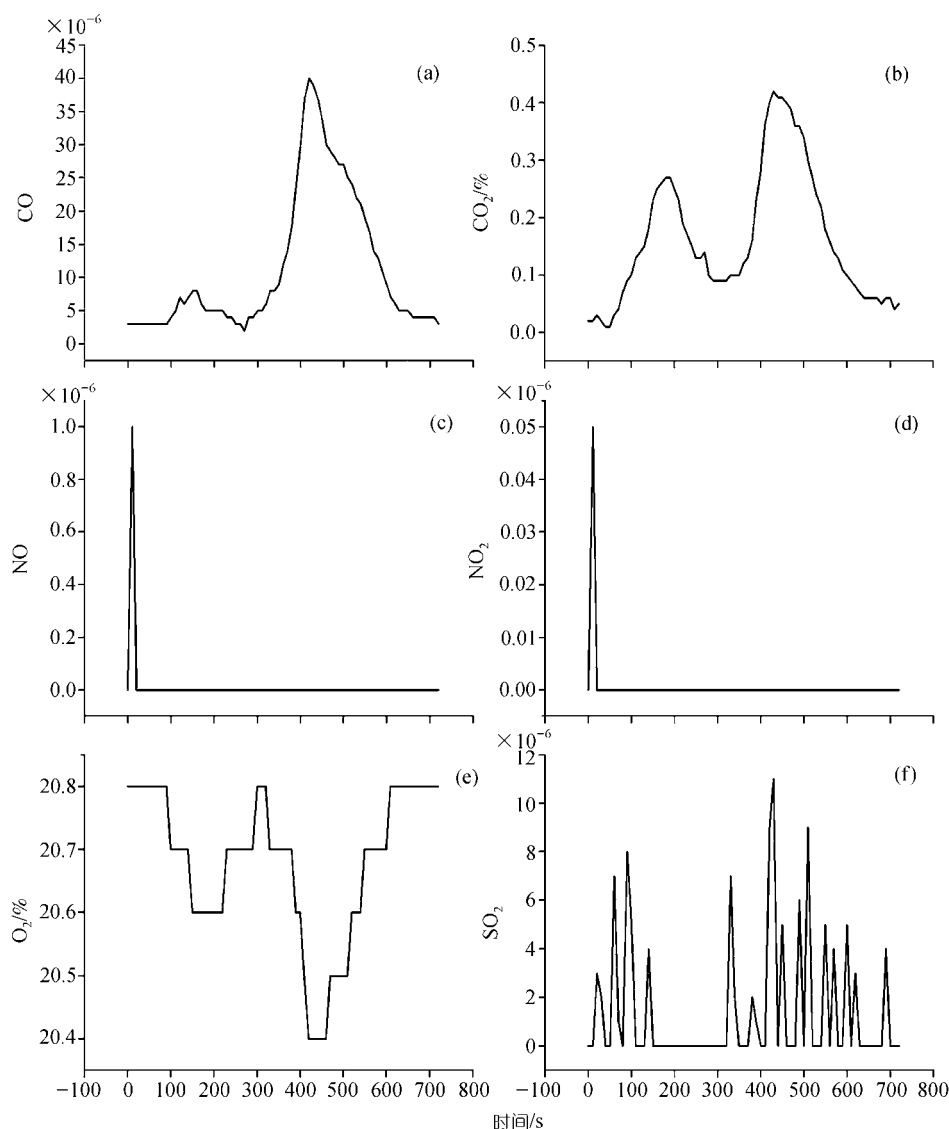


图 8 煤油火灾时 C 点烟流成份变化情况

(a) CO, (b) CO₂, (c) NO, (d) NO₂, (e) O₂, (f) SO₂

实验开始时, 各测点的空气压力与室外相同, 实验过程中发生了变化. 实验结果表明: 火灾发生前, A、B 和 C 三点的压力一致, 火灾初期, A 点压力增长稍高于 B 点, 烟气主要是靠热扩散进行, 随着火灾进入发展期, A 点压力要大于 B 点的压力, 使烟气向其他空间蔓延和扩散, 两者之间的压差逐渐减小. 由于高度差和温度差, C 点的压差在火灾过程中也发生了变化, 火灾初期的压差最大, 从而使烟流在火灾初期就迅速地由 1 楼通过楼梯流向 4 楼并最终流向天井, 火灾初期

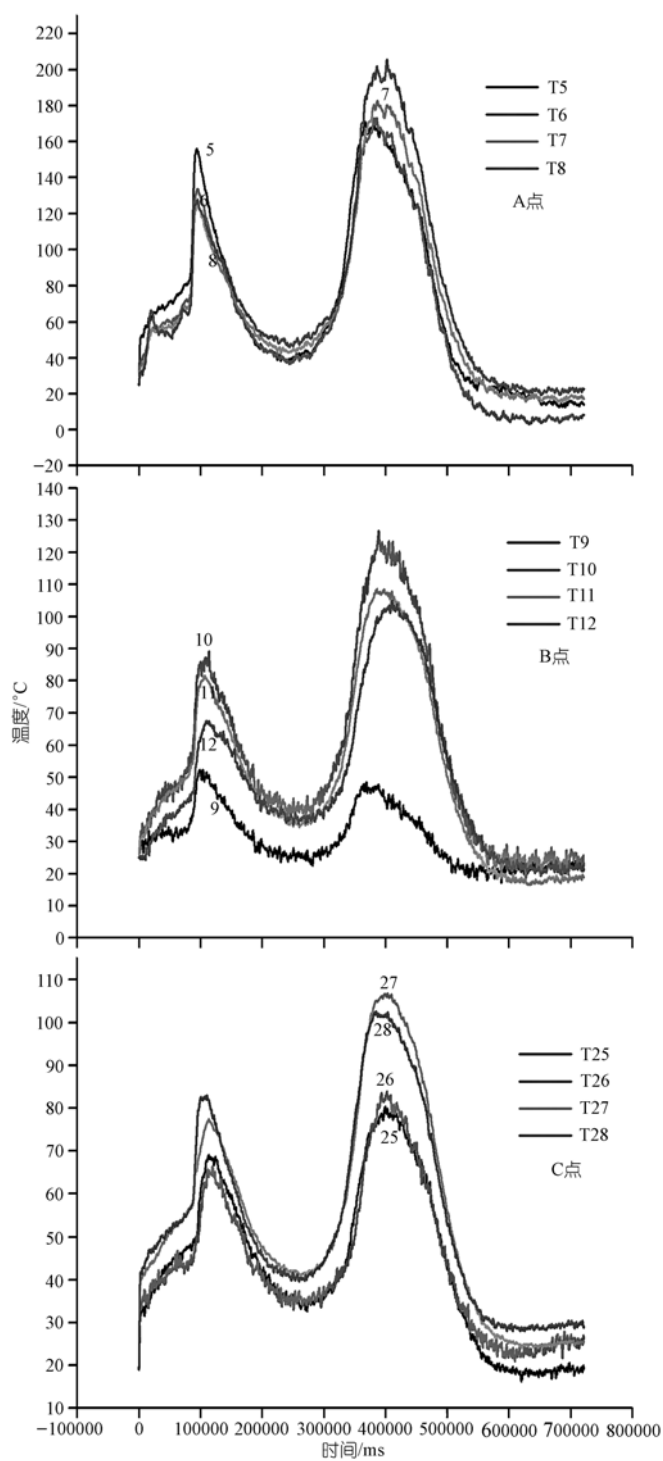


图 9 煤油火灾时不同测点所测烟流温度分布度变化情况

烟流速度变化较大, 随着火灾进行, 若风机及门窗开关状态没有改变, 则烟流速度比较平稳, 如图 10 所示. 图 11 为木垛火灾时, 不同测点处气压差的变化情况. 楼层越高, 对火灾过程的救灾过程带来的困难也越大. 多层建筑火灾过程中, 烟流的气压差波动幅度及频率较大, 容易导致烟流在流动过程中充分蔓延到所流经通道的每一个空间, 使人员避灾难度加大.

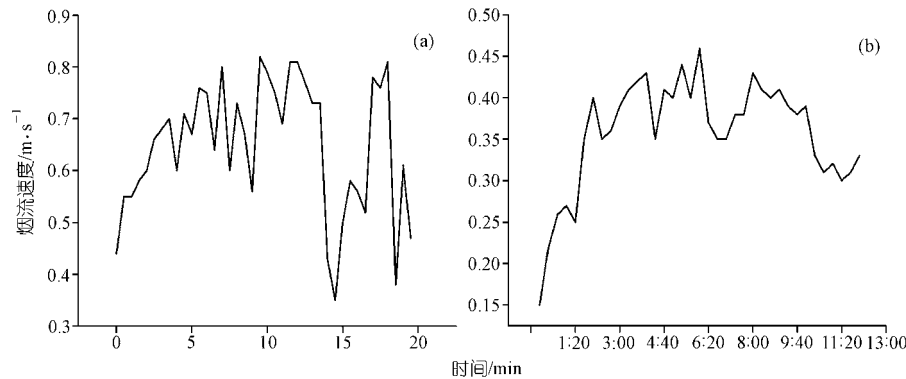


图 10 不同燃料时 C 点烟流速度
(a) 木垛火灾, (b) 煤油火灾

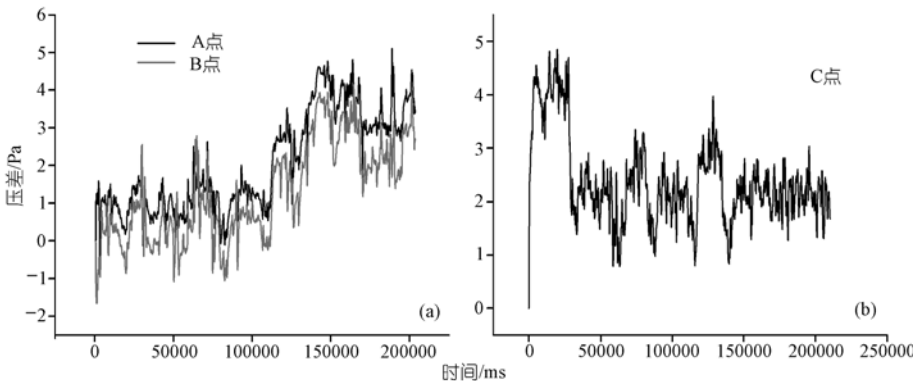


图 11 木垛火灾时不同测点所气压差变化情况

火灾初期, 在火源点烟流表现出明显的分区, 靠近顶蓬附近弥漫了烟流, 靠近地板处则没有明显的烟流. 随着烟流的前进和扩散, 到达 4 层时, 烟流的分布则比较均匀, 故实验过程中我们在 4 层的楼梯口对烟流的成份进行测量和分析. 各种成份的分布如图 6 和 8 所示, 根据 GBZ2-2002 的要求, 计算不同重量情况下烟流中各种成份的浓度达到其 MAC 时所需要的时间. 对于木垛火灾, SO_2 最容易达到其 MAC, 其次是 CO 和 CO_2 , 所测成份中最难达到的是 NO 和 NO_2 , 如图 12(a). 对于煤油火灾也有点类似, 如图 12(b) 所示, SO_2 最容易达到其 MAC, 其次

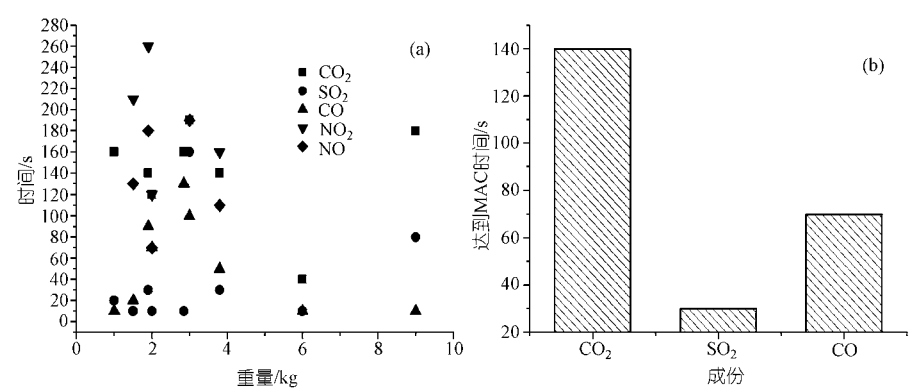


图 12 不同烟流成份达到 MAC 的时间
(a) 木垛火灾, (b) 煤油火灾

是CO和CO₂, 实验过程中NO和NO₂一直没有达到MAC. 可能与实验所用的煤油量有关系. 木垛火灾过程中的产烟量没有煤油的大, 木垛着火时室内的可见度要高于煤油发生火灾的室内可见度. 对于木垛火灾和煤油火灾, 最先超过一般人生理极限的主要是SO₂, CO和CO₂, 其次是NO和NO₂.

4 结论

本文在多层多室模型实验室内对木垛火灾和煤油火灾时烟流运动过程进行了研究, 得到如下结论:

- (i) 在着火源点垂直高度上的温度差明显高于其他测点的温差, 随着烟流蔓延和扩散, 烟气层温度基本趋于一致.
- (ii) 对于木垛火灾和煤油火灾, 最先超过一般人的生理极限的主要成份是SO₂, CO和CO₂, 其次是NO和NO₂.
- (iii) 多层建筑火灾过程中, 由于烟流的气压差波动幅度及频率较大, 容易导致烟流在流动过程中充分蔓延到所流经通道的每一个空间, 使人员避灾难度加大.

参 考 文 献

1 Zhong M H, Fan W C. China: some key technologies and the future developments of fire safety science. Safety Science, 2004, 42(7): 627~637[DOI]

2 Holborn P G, Nolan P F, Golt J, et al. Fires in workplace. Fire Safety Journal, 2002, 37(3): 303~327[DOI]

3 张树平. 建筑防火设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001

4 Chow W K. Some development and engineering aspect of smoke- extraction system for atria in Hong Kong. Fire and Materials, 1993, 17(1): 71~77

5 Satoh H, Sugawa O, Kurioka H, et al. Plume behavior in confined tall and narrow space- as ong of sub-model of plume for an atrium fire. Fire Safety Science, Proceedings of the Fourth International Symposium, Ottawa, Ontario, Canada, 1994. 551~562

- 6 Luo M C, He Y P, Beck V. Application of field model and two-zone model to flashover fires in a full-scale multi-room single level building. *Fire Safety Journal*, 1997, 29(1): 1~25[DOI]
- 7 Peacock R D, Reneke P A, Bukowski R W, et al. Defining flashover for fire hazard calculations. *Fire Safety Journal*, 1999, 32: 331~345[DOI]
- 8 Yao J D, Fan W C, Satoh K, et al. Verification and application of field-zone-network model in building fire. *Fire Safety Journal*, 1999, 33(1): 35~44[DOI]
- 9 Zhong M H, Wei X, Fan W C. Airflow optimizing control research based on genetic algorithm during mine fire period. *Journal of Fire Sciences*, 2003, 21(2): 131~153[DOI]
- 10 Liang F M, Chow W K, Liu S D. Preliminary studies on flashover mechanism in compartment fires. *Journal of Fire Sciences*, 2002, 20(1): 87~112[DOI]
- 11 Fu Z M, George Hadjisophocleous. A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings. *Fire Safety Journal*, 2000, 34(3): 257~285[DOI]