

# 建筑幕墙倾角构型对聚氨酯逆流火蔓延影响的实验探究

李旺<sup>1</sup>, 方廷勇<sup>1</sup>, 王经纬<sup>2</sup>, 万露露<sup>2</sup>, 李浩瀚<sup>1</sup>, 何灿<sup>1</sup>, 马鑫<sup>1</sup>

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 针对建筑幕墙倾角构型对于聚氨酯泡沫 (FPU) 逆流火蔓延行为进行实验研究, 探究受限空间约束条件变化对 FPU 板燃烧过程中火焰形态、高度和熔滴率等特征参数的影响。实验结果表明: 幕墙倾斜角度变化影响火焰周围的气流卷吸, 火焰高度峰值与幕墙倾斜角度呈负相关, 而熔滴率随着倾斜角度增加而增大, 且板材表面的侧边温度普遍大于中心区域温度。实验研究结论可为建筑幕墙设计和安装以及高层建筑外立面保温系统的防火设计提供理论指导。

**关键词:** 保温材料; 受限空间; 逆流火蔓延; 玻璃幕墙;

中图分类号: X932

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 01-044-06

## Experimental Study on the Influence of Building Curtain Wall Inclination Configuration on Polyurethane Countercurrent Fire Spread

LI Wang<sup>1</sup>, FANG Tingyong<sup>1</sup>, WANG Jingwei<sup>2</sup>, WAN Lulu<sup>2</sup>, LI Haohan<sup>1</sup>, HE Can<sup>1</sup>, MA Xin<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Anhui Hefei 230601, China;

2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Anhui Hefei 230601, China)

**Abstract:** The effect of the inclination configuration of the building curtain wall on the downwards fire spreading behavior of polyurethane foam (FPU) was studied to explore the influence of the confined space constraints on the flame shape, height and drop rate during the combustion of FPU panels. The experimental results show that the change of the inclination angle of the curtain wall affects the entrainment of the airflow around the flame. The peak flame height is negatively correlated with the inclination angle of the curtain wall, and the droplet rate increases with the increase of the inclination angle, and the side temperature of the sheet surface is generally greater than the center Regional temperature. The experimental research conclusions can provide theoretical guidance for the design and installation of building curtain walls and the fire protection design of high-rise building facade insulation systems.

**Key words:** thermal insulation material; Restricted space; Countercurrent fire spread; Glass curtain wall;

随着社会的快速发展,大众给予“建筑之美”高度重视,玻璃幕墙将建筑美学、建筑功能、建筑节能和建筑结构等因素有机地结合在一起。同时玻璃幕

墙与建筑外立面形成受限空间(夹层),在火灾发生时既给救援人员灭火行动带来困难,也增加火灾危险性。如 2011 年 2 月 3 日,沈阳第一高的五星酒

收稿日期: 2020-10-31

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0803300);安徽省高校协同项目(GTXXT-2019-027);安徽省自然科学基金项目(190085QE250);火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2019-KF13)。

作者简介: 李旺(1996-),男,硕士研究生,研究方向:火灾科学。

店皇朝万鑫酒店<sup>[1]</sup>发生严重火灾,起火原因是燃放烟花引燃了外墙表面的装饰材料,火势迅速蔓延扩大,致使建筑玻璃外窗、玻璃幕墙破碎,引燃室内可燃物,形成大面积立体燃烧,经济损失严重。

近年来,由于高层建筑保温材料燃烧引起的火灾频发,国内外学者对聚氨酯保温材料燃烧时的火蔓延行为进行了一系列研究实验<sup>[2-4]</sup>。由于玻璃幕墙在火灾下极易破裂和脱落<sup>[5]</sup>,脱落会形成新的通风口和火蔓延的通道,造成轰燃和回燃现象,形成建筑立体交互火蔓延。王经纬等人<sup>[6]</sup>模拟保温材料 FPU 在不同侧向环境风速下垂直逆流火蔓延行为,揭示了板材火蔓延前锋呈迎风侧和背风侧二段式分布,迎风侧的蔓延速度随着外部风速的增加而增加,火焰平均高度随着外界风速的增加会呈现先升后降再升的变化趋势。Ma 等人<sup>[7]</sup>研究建筑幕墙距外墙的距离对聚氨酯泡沫火蔓延过程的影响,揭示了幕墙在火蔓延过程中会加剧熔融液滴落现象,以及随幕墙间距增大火焰的平均高度先降低后增大。黄新杰等人<sup>[8]</sup>研究保温材料 EPS 在不同厚度以及不同压力和氧气浓度等条件下火蔓延特性规律。目前已有许多学者开展了不同试样在不同倾斜角度下的火蔓延实验研究<sup>[9]</sup>,忽略了幕墙倾斜角度对火蔓延的影响。在此笔者通过改变玻璃幕墙倾斜角度,聚氨酯泡沫竖直火蔓延时火焰前锋状态变化、火焰高度、火蔓延速率、熔融液滴落情况、温度场分布、辐射等特征参数的变化规律,研究分析幕墙角度对保温材料火蔓延的影响。

## 1 实验设计

所有实验都是在自主搭建的实验平台上进行的,如图 1 所示,实验平台主要由三个部分组成:(1)火蔓延系统;(2)幕墙系统;(3)测量系统。火蔓延实验装置主要由高精度电子天平(德国 Sartorius,0.01g)、石膏板、传感器和收集熔融液滴槽组成。电子天平通过数据采集模块与计算机连接,对火蔓延过程中 FPU 板质量变化进行实时记

录。实验过程中 FPU 板表面辐射通量通过两个水冷式辐射流量计(STT-25-50-R/WF, Tecfront Co., LTD.,精度为 0.01 KW/m<sup>2</sup>)来测量。辐射计的传感器放在 FPU 板表面,数据终端以 1 Hz 的频率记录燃烧过程中板材表面的辐射量。

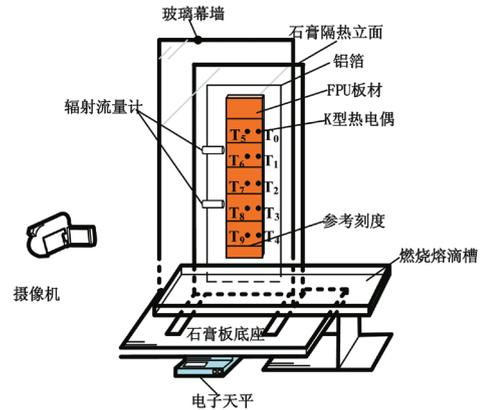


图 1 改变幕墙倾斜角度条件下保温材料火蔓延实验研究平台

FPU 保温板材的规格为长 80 cm、宽 20 cm、2 cm。为了保证实验数据的准确性,保温板材没有添加阻燃剂。实验前在保温板材以 10 cm 为间距绘制参考线,便于观察火焰前锋瞬时位置以及计算火蔓延速率。保温板材近域场温度通过布设 5 组共 10 个 K 型热电偶探头(编号 T0-T9),测量 FPU 表面中心线(T5-T9)和侧面(T0-T4)的温度,热电偶距试样表面 2 mm 以免影响质量测量。火焰形态变化、火蔓延速度和火焰高度等特征通过摄像机(SONY,FDR-AX100E)从正面对火蔓延过程进行摄像记录。实验的初始环境温度为恒定的空气温度和相对湿度(20±2℃、50±3%),消除环境对 FPU 板燃烧及火蔓延的影响,所有温度和质量等数据均以 1 Hz 的频率记录。每个实验工况至少进行 3 次实验,排除随机误差,保证实验数据的可重复性。为保证 FPU 板在水平方向同时点燃,采用丙烷点火器进行线性点燃。聚氨酯泡沫及玻璃幕墙各项物理参数见表 1、表 2。

表 1 实验选用的 FPU 板及玻璃幕墙各项物理参数

FPU 板材质: 软质聚氨酯泡沫板	平均分子结构	密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	比热 / (kJ/kg·K)	导热系数 / (W/m·K)	热解温度 / (K)	燃烧热 (MJ/kg)
	CH <sub>1.8</sub> O <sub>0.30</sub> N <sub>0.05</sub>	41.5	1.5	0.037	440	30

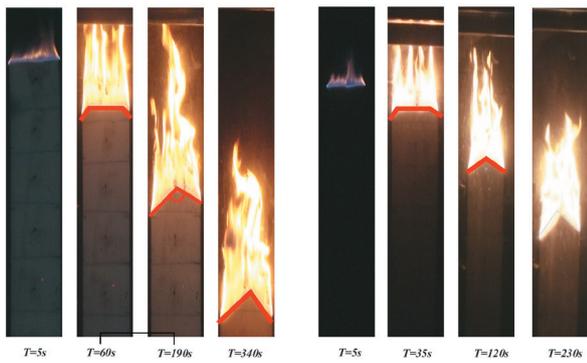
表 2 实验选用的玻璃幕墙各项物理参数

幕墙材质:	规格: 长 × 宽 × 高 / (cm)	密度 / (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	透射比 (%)
阻燃防爆 玻璃	100 × 40 × 0.3	2.7	87~91

## 2. 实验结果分析

### 2.1 火焰及火焰前锋形态变化

如图 2 所示为幕墙倾斜角度分别为 0° 与 30° 时火焰前锋形态,从图中可以看出,燃烧初期火焰前锋形态呈梯形,此时火焰面形状大致呈长方形;最终火蔓延得到的火焰前锋逐渐形成呈倒“V 型”,此时火焰面大致呈锥形,这主要是由于正面气流被玻璃幕墙阻挡,空气在受限空间两侧和底部卷吸,补



(a) A=0° (b) A=30°

图 2 在幕墙倾斜角度 A=0° 与 A=30° 工况下火焰变化对比

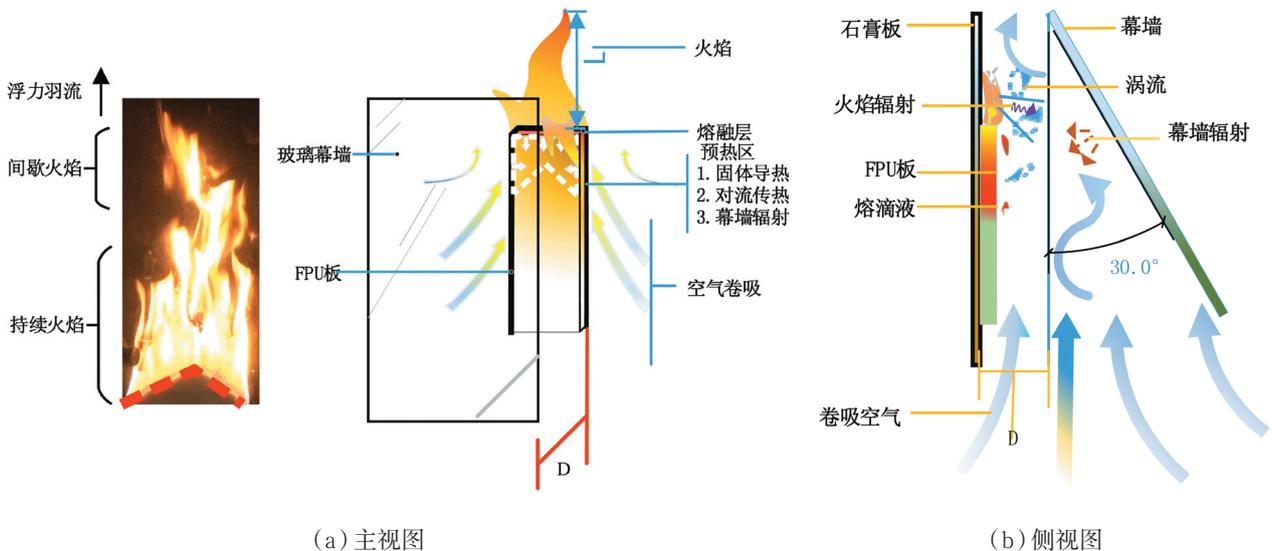
充新鲜空气,从而导致两侧燃烧速度比中间快,同时聚氨酯泡沫的燃烧特性是热解成可燃气体小分子后进行燃烧,与气相扩散燃烧相似,可燃气体燃烧是在与空气的界面发生的,两侧可燃气体先发生燃烧,而中部的可燃气体在浮力作用下运动一段距离才能与空气接触,因此火焰面大致呈锥形。

图 3 为 FPU 板逆流火蔓延过程中,玻璃幕墙在不同角度下火焰周围气流组织和火焰结构形状图,由火灾动力学理论实验研究可知,在不同受限条件下火蔓延的热反馈机理和空气流场卷吸效应发生显著变化,使得火蔓延特征参数十分复杂。

### 2.2 火焰高度

火焰高度是反映火蔓延情况的重要参数,火焰高度是采用 Zukoski<sup>[10]</sup> 的 0.5 火焰亮点概率得出。通过 Matlab 编制的程序对实验视频进行处理,从而获得玻璃幕墙不同角度下火焰高度如图 5 所示,反映了在燃烧过程中火焰高度与幕墙倾斜角度之间的关系。

从图 5 中可以看出火焰高度变化有四个阶段:第一阶段为起始阶段,板材刚开始燃烧,此时热解区域和热释放速率较小。第二阶段为缓慢增长阶段,此阶段熔融液开始随机滴落,将减慢火蔓延的速率和热解速率,火焰高度增长减慢甚至火焰高度出现降低。薛岩等<sup>[11]</sup> 研究发现,在低压下导线火蔓延熔融液滴落过程中,由于液滴滴落所产生的



(a) 主视图 (b) 侧视图

图 3 火焰周围气流组织和火焰形状结构示意图

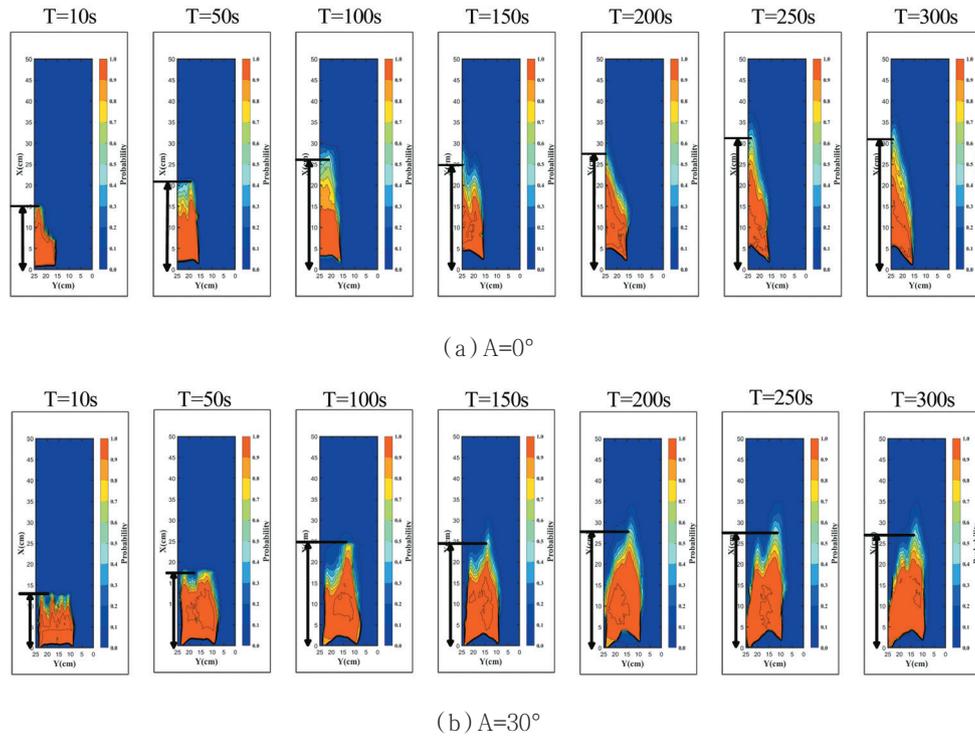


图 4 幕墙倾斜角度在  $A=0^\circ$ 、 $30^\circ$  工况下的火焰高度

向上的动量使火焰高度在滴落后发生突然的“跳动”现象。第三阶段为火焰高度迅速增加阶段,这是由于玻璃幕墙卷吸限制所导致,夹层内空气不足以支持充分燃烧,导致火焰拉伸以获得更多的空气完成燃烧。第四阶段是火焰高度降低,这主要是由于火蔓延后期燃料耗尽。从图中可以看出火焰高度随着角度的增加呈先增后减的趋势,且在角度  $A=5^\circ$  时达到界限值,这主要是由于当幕墙角度较小时,火焰持续向垂直方向贴壁延伸,幕墙对保温材料燃烧影响较小并不能限制火焰垂直方向的延伸。然

而当角度较大时,火焰高度降低,这主要有两方面原因导致,首先受限空间的体积随着角度的增大而增大,导致受限空间构型两侧和底部空气卷吸效应变小,从而使得火焰羽流与空气浮力共同作用拉伸效应减小,此外,由于幕墙与试样的距离变大,玻璃幕墙的热反射作用变小,因而使得火焰高度降低。

### 2.3 熔滴率

高分子材料 FPU 试样燃烧时会产生大量的烟气和有毒气体, FPU 板属于热塑性材料,在火蔓延过程中会出现熔融液随机滴落现象(如图 3),这是由于 FPU 板逆流火蔓延的实质是火焰前锋处窄条形油池火向下迁移的过程。不同幕墙角度下 FPU 板的熔滴率如图 6 所示,从图中可以看出随着幕墙角度的增大,熔融液滴落质量和熔融率逐渐增大,这主要是当幕墙角度越大时,与下方夹层空间相比,幕墙夹层上方空间减小,FPU 板材燃烧生成的烟气不易扩散出幕墙夹层空间,阻碍了新鲜空气的补给,同时燃烧产生的热量不易扩散,导致火焰前锋池火内的熔融燃料生成速率大于其燃烧消耗速率,因此随着火蔓延的进行熔融液体不断积累,当熔融液质量增长到大于其表面张力时,在重力作用下,熔融液由于受力不平衡就会滴落熔融滴落会引燃未燃区,产

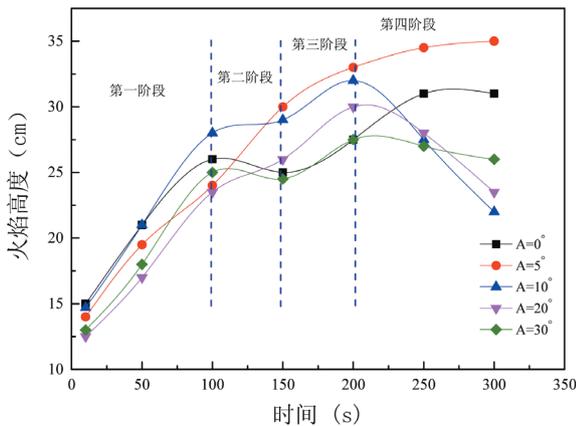


图 5 不同角度与火焰高度关系

生多点火源火蔓延,加大火灾危险性。

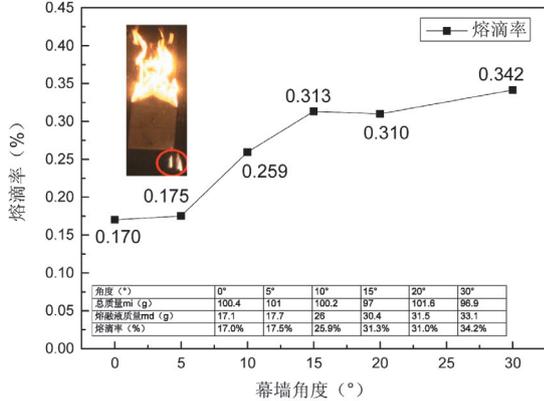


图 6 不同幕墙角度下 FPU 板的熔滴率

### 2.4 表面温度场和辐射热流变化

温度是衡量 FPU 板材燃烧特性和研究火蔓延的一个重要参数,火蔓延过程中 FPU 板材表面的温度场直接影响浮力羽流、质量损失速率、热解速率等,温度越高,对玻璃幕墙和建筑的结构破坏越大。图 7 所示为玻璃幕墙与立面角度为 A=30° 时 FPU 表面温度分布图,从图中可以看出侧边的热电偶先感应到温度,说明逆流火蔓延过程中侧边的燃烧速率比中间快,这一结论进一步阐明了火焰形态呈倒“V 型”蔓延。

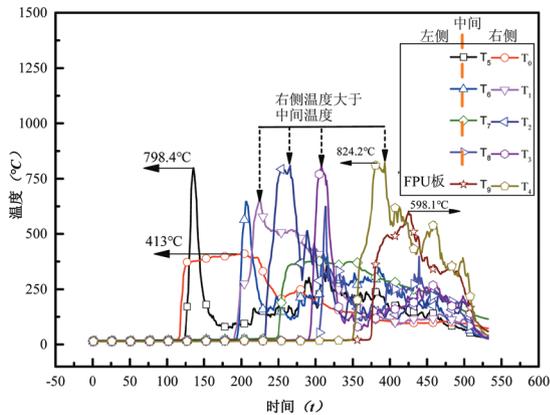


图 7 幕墙倾斜角度 A=30° 时 FPU 板表面温度场分布

当幕墙倾斜角度 A=30° 时,从图中可以看出当火蔓延达到第二组热电偶之后,边侧温度均大于中部温度,这是由于幕墙倾斜角度增大,卷吸作用减弱,侧边与外界接触更充分,燃烧更旺盛,因而侧边温度大于中间温度。在 An<sup>[12]</sup> 的研究当中,对这种现象给出了科学的解释,当幕墙间距较小时,由

于侧向空气卷吸作用,外部大型涡旋结构被拉伸或分裂,在中心线附近形成小型逆向涡旋,导致沿中心线的火焰温度降低,高温出现在两侧,这些也验证了我们的实验结果。

聚合物的分子结构中的含碳量通常很高,在燃烧过程中会产生大量的烟气,影响能见度的同时对火焰对外热辐射有很大的阻挡。如图 8 所示,当玻璃幕墙角度为 0°、15°、30° 是板材上部的热辐射强度都略大于下部,且辐射热通量峰值随玻璃幕墙角度的增大呈现减小趋势。这主要是于火蔓延过程中大量烟气聚集在上部空间,所以烟气对火焰辐射阻挡效果大于下部空间。并且随着幕墙角度增加,形成了一个类似顶棚射流的过程,阻止了羽流的流动,导致烟气大量聚集,对辐射的阻挡效果更加明显,因此峰值减小。

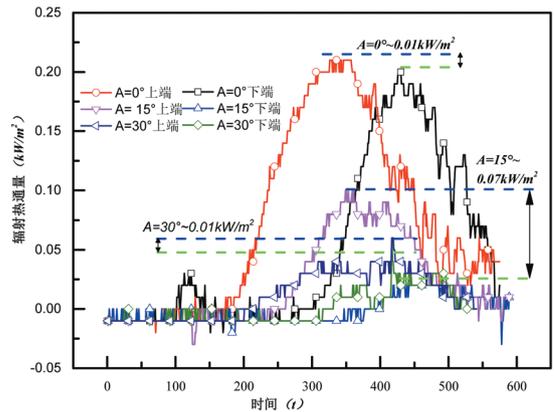


图 8 不同幕墙角度下 FPU 板材表面火焰辐射热通量变化

### 3 结论

近年来,外墙保温材料最大的“痛点”是保温却不阻燃,成为火灾发生最重要的因素,实验探究了受限空间约束条件变化对 FPU 板燃烧过程中火焰形态、高度、温度、熔滴率和辐射等特征参数的影响,为建筑防火设计提供主要理论依据,主要结论如下:

- (1) 受限空间条件下逆流火蔓延,由于空气卷吸效应影响,使火焰前锋呈倒“V 型”向下迁移。同时,在“V 型”火焰前锋和可燃气体浮力作用下,火焰面大致呈锥形。
- (2) 火蔓延过程中,由于卷吸效应的减弱,两侧

(下转第 55 页)

Applied Acoustics,2020,170:107510.

- [4] McCartney L,Lefsrud M G.Field trials of the natural ventilation augmented cooling (NVAC) greenhouse[J]. Biosystems Engineering,2018,174:159-172.
- [5] Gough H L,Barlow J F,Luo Z,et al.Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements:Impact of wind direction and turbulence[J]. Building and Environment,2020,170:106556.
- [6] 李立力,张亮亮,刘纲,等.某绿色建筑风环境数值模拟分析[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(S2):215-218.
- [7] 杨丽,Bing Wang.不同通风方式与室内空气环境质量的数值模拟分析[J]. 建筑科学,2014,30(4):78-83.
- [8] Benni S,Tassinari P,Bonora F,et al.Efficacy of greenhouse natural ventilation:Environmental monitoring and CFD simulations of a study case[J].Energy and Buildings,2016,125:276-286.
- [9] 疏志勇,吴志敏,魏燕丽,等.夏热冬冷地区被动式超

低能耗绿色建筑室内热湿环境营造及实测分析[J]. 新型建筑材料,2019,46(5):146-151.

- [10] 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.
- [11] 杨丽,钱锋,宋德萱.建筑室内空间环境舒适性的数值模拟研究[J]. 建筑科学,2017,33(8):129-134.
- [12] 韩彰.安徽省某住宅小区室内自然通风优化研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版),2019,19(6):26-30.
- [13] 黄昌辉.绿色和谐生态住宅室内环境设计研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2017.
- [14] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [15] 尹思艺.用 CFD 模拟分析优化室内通风效果[J]. 城市开发,2010(18):80-81.
- [16] 王亮,周彤云,刘东,等.室内自然通风环境热舒适性研究[J]. 热科学与技术,2018,17(5):425-429.

(上接第 48 页)

与空气充分接触而中间部位燃烧被限制,从而侧边温度普遍大于中心区域温度。

(3) 随着玻璃幕墙角度的增加,受限空间构型两侧和底部空气卷吸效应变弱以及玻璃热反射作用的减小,火焰在垂直方向的延伸高度逐渐降低。在建筑幕墙设计和安装时,考虑火焰对建筑钢架结构稳定性的影响,通过改变幕墙倾斜角度降低火焰高度,减少火焰对建筑的炙烤。

(4) 随着幕墙倾斜角度增大,夹层空间的热积累现象增强,熔融液滴落频率增加,易引燃未燃区域增加火灾危险性。大部分幕墙存在空腔结构,上下贯通的空腔会导致建筑整体着火,通过采取每层楼板、隔墙间填充防火封堵材料等分隔措施,有效避免熔融液滴落产生的危害。

#### 参考文献

- [1] 刘激扬,沈纹,倪照鹏,等.沈阳皇朝万鑫大厦火灾调查与启示[J]. 安全与环境工程,2013,20(6):156-159,163
- [2] 章涛林,周晓冬,雷杲,等.高层建筑典型外墙保温材料火蔓延特性数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(2):230-234.
- [3] 郭峰,朱国庆.EPS 外保温系统竖向火蔓延特性[J]. 消防科学与技术,2015,34(7):853-856.
- [4] 徐亮,伍卫军,丁严艳.典型热塑性聚合物热解行为研

究[J]. 火灾科学,2010,19(3):143-149.

- [5] 王禹.火灾下玻璃幕墙破裂行为的实验和数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [6] 王经纬,方廷勇,涂然,等.风速对聚氨酯泡沫垂直逆流火蔓延的影响[J]. 消防科学与技术,2019,38(8):1059-1061.
- [7] Ma X,Tu R,An WG,et al. Experimental study of interlayer effect induced by building facade curtain wall on downward flame spread behavior of polyurethane[J].Applied Thermal Engineering,2020,167:114694.
- [8] 黄新杰,纪杰,张英,等.拉萨和合肥环境下不同厚度保温材料 EPS 火蔓延特性研究[J]. 灾害学,2010,25(S1):136-139,153.
- [9] Ma X,Tu R,Ding C,et al. Experimental study on thermal safety analysis of flexible polyurethane at various facade inclined structures under low ambient pressure condition[J]. Engineering Structures,2018,176:11-19.
- [10] E.E. Zukoski,Properties of Fire Plumes,Combustion Fundamentals of Fire[M]. London:Academic Press,1995:101-219.
- [11] 薛岩,方俊,王静舞.低压下聚乙烯绝缘层导线火蔓延熔融滴落实验分析[J]. 火灾科学,2017,26(4):191-197.
- [12] AN W G,PAN R L,MENG Q X,et al. Experimental study on downward flame spread characteristics under the influence of parallel curtain wall[J]. Applied Thermal Engineering,2018,128:297-305.