

卷吸限制与火焰融合对 U 型外立面保温 材料火蔓延的影响

聂一凡, 张继薇, 赵 焱, 陈艳秋
(西南交通大学消防工程系, 成都 611756)

摘要: 本文从火蔓延速率、温度及热流 3 个方面, 研究了 U 型结构侧向和底部空气卷吸限制以及火焰相互作用对 U 型结构外立面保温材料顺流火蔓延行为特性的影响. 研究发现: 侧向空气卷吸限制增大了火蔓延速率、温升和热流; 底部空气卷吸限制整体上减小了火蔓延速率、增大了温升和热流; 背墙火焰与边墙火焰的相互作用增大了火蔓延速率、温升和热流.

关键词: 建筑外立面; 保温材料; 顺流火蔓延; U 型结构

中图分类号: TK11 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2024)05-0497-10

Effect of Air Entrainment Limitation and Flame Fusion on Fire Spread of U-Shaped Facade Insulation Materials

Nie Yifan, Zhang Jiwei, Zhao Yi, Chen Yanqiu
(Department of Fire Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In this paper, the effects of lateral and bottom air entrainment limitations and flame fusion on the behavioral characteristics of downstream fire spread of U-shaped structural facade insulation materials were investigated in terms of flame spread rate, temperature and heat flow. It is found that the lateral air entrainment restriction increases the flame spread rate, temperature rise and heat flow; the bottom air entrainment restriction reduces the flame spread rate, increases the temperature rise and heat flow in general; and the interaction between the back wall flame and the side wall flame increases the flame spread rate, temperature rise and heat flow.

Keywords: building facades; insulation; downstream fire spread; U-shaped structures

随着城市化进程的飞速发展, 为了追求建筑的采光以及外观美化等要求, U 型结构越来越多地被应用在建筑的外立面设计中. 同时, 为了满足建筑的节能需求, 建筑外保温领域也越来越广泛地使用有机保温材料. 然而, U 型外立面由于特殊的结构, 火灾中一旦保温层被引燃, 类烟窗效应将会使得火灾燃烧更加

剧烈, 加速火灾的蔓延, 给人员逃生和救援造成了极大的困难. 在实际火灾场景中, 顺流火蔓延由于火蔓延方向与浮力羽流上升方向相同, 火蔓延将会更快、更危险.

建筑材料火蔓延过程可以看成是一个持续性的点火过程. 可燃物在外界热量的作用下, 表面温度升

收稿日期: 2024-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308532); 四川省科技计划资助项目(2023YFS0405).

作者简介: 聂一凡(1998—), 女, 硕士, yifan.nie@my.swjtu.edu.cn.

通信作者: 陈艳秋, 女, 博士, 讲师, yanqiu.chen@swjtu.edu.cn.

高,火焰通过热传导、热对流和热辐射的方式将热量传递给未燃材料,使得火焰持续蔓延.在真实的火灾场景中,环境压力^[1-2]、环境风速^[3-4]、外加辐射强度^[5-6]、材料厚度^[7-8]和宽度^[9-10]、倾斜角度^[11-12]及外墙结构^[13-15]等因素将会对火蔓延过程产生非常重要的影响.

关于 U 型结构中的火蔓延行为特性的研究中, Yan 等^[16]通过 XPS 保温材料上火焰向上蔓延实验发现, U 型结构的几何设计将会增加建筑物的火灾危险性:火焰高度和火焰蔓延率随 U 型的几何因子的增大而增大. Yan 等^[17]还研究了 U 型外墙的不同几何形状对平原以及高原地区保温材料火焰顺流蔓延的影响,提出了类烟囱效应的假设.结果表明:U 型几何形状进深越大,质量损失速率和火焰蔓延速率也越大. Tsai^[18]改变 PMMA 试样的宽度(100 mm, 200 mm, 300 mm, 500 mm 和 700 mm),发现火蔓延速率都与材料宽度呈正相关. Shih^[19]在研究外墙结构对火蔓延的影响时,通过实验发现火焰传播速率最高的是□型结构,其次是 U 型结构、▨型结构、▧型结构、L 型结构和平面结构.李建涛等^[20]通过数值模拟研究发现,当 U 型结构的结构因子 α (侧墙宽度和背墙宽度的比值)在 0.4~1.6 时,顺流火蔓延速率与结构因子呈正相关.李建涛等^[21]还选用硬质聚氨酯泡沫进行实验发现,当 α 超过 1.2 时,火蔓延加速过程趋于稳定.闫维纲^[13]发现,火蔓延速率与 α 呈正相关,平原上的 U 型结构火蔓延速率远大于高原上的.殷向伟^[14]选用 PMMA 进行实验研究发现,当 α 小于 1 时,火蔓延速率与 α 呈正相关; α 大于 1 后,火蔓延速率趋于稳定.此外还发现,火焰高度和热解长度的关系: $x_f = 1.639 x_p$.安伟光^[22]研究发现,当凹型结构的结构因子增大,无量纲火蔓延速率(凹型结构存在和不存在时蔓延速率的比值)也将增大,但增加的加速度不断减小.

综上所述,在探究 U 型结构对火蔓延的影响时,前人的理论模型往往是基于平面结构增加不燃侧墙,考虑侧向空气卷吸限制的影响.然而, U 型外立面通常背墙侧墙均可燃,且大多底部直接与地面连接,相较于平面结构, U 型外立面火蔓延同时受到侧向空气

卷吸限制、底部空气卷吸限制、背墙火焰与侧墙火焰相互融合作用这 3 个因素的影响.基于此,本文根据一系列小尺寸实验通过对比分析研究了侧向空气卷吸限制、底部空气卷吸限制及火焰相互融合作用这 3 个因素对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流的影响.

1 实验方法

本文建立了一系列缩尺比为 1:20 的实验平台研究 U 型外立面保温层顺流火蔓延行为特性.为分别研究侧向空气卷吸限制、底部空气卷吸限制及火焰相互作用这 3 个因素对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流的影响,火灾场景设置如表 1 所示,所有实验台高 100 cm.实验中,不燃板材为 1 cm 厚的石膏板;可燃板材为在 1 cm 厚的石膏板内侧覆盖 2 cm 厚的聚氨酯保温板,聚氨酯芯材密度为 32 kg/m³,导热系数为 0.022 W/(m·K),聚氨酯保温板表面覆盖有砂浆,燃烧性能为 B1 级阻燃.实验中使用 3 mm 直径的 K 型铠装热电偶进行测温,探针耐温 1200 °C,探针长度 100 mm,引线长度为 3 m 长.铠装热电偶指的是在热电偶的测量点外包裹有金属装甲,并且使用绝缘材料来进行绝缘.热电偶沿背墙垂直中心线布置,沿距离 U 型结构下边 10 cm 处开始,每隔 10 cm 布置一个,直至 U 型结构顶部.热流计则布置在背墙中心处,本文实验中,选择型号为水冷 GD-B3 光体带法兰的热流计来进行热流的测量.灵敏度为 0.057 66 mV/(kW·m²),最大量程为 500 kW/m²,精度为 ±3%,实验测量使用时将产生一个与吸收的热流呈正比的输出.实验点火源为与背墙等宽的正庚烷小油池,长度和高度均为 1 cm.实验时在正面对燃烧过程进行录像,记录火蔓延全过程,同时采用米科 MIK-R6000 C 彩色无纸记录仪对温度和热流数据进行采集.通过软件处理火蔓延全过程的视频,得到火蔓延过程中不同时刻火焰前锋蔓延的距离,根据火焰前锋蔓延的最大距离及所用时间,得到不同工况的顺流火蔓延平均速率,并对温度和热流数据进行处理和分析,得到相关温度和热流规律,每个工况重复 3 次

表 1 火灾场景设置
Tab.1 Fire scenario setting

背墙 W/cm	侧墙 L/cm	侧墙	底部	因素分析		
4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	0	无	架空	侧墙卷吸限制	底部卷吸限制	火焰相互作用
4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	10	不燃	架空			
10	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	可燃	架空			
10	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	可燃	非架空			
10	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	不燃	非架空			

取平均值以确保结果的可重复性. 图 1 为非架空侧墙可燃 U 型结构的实验布置示意.

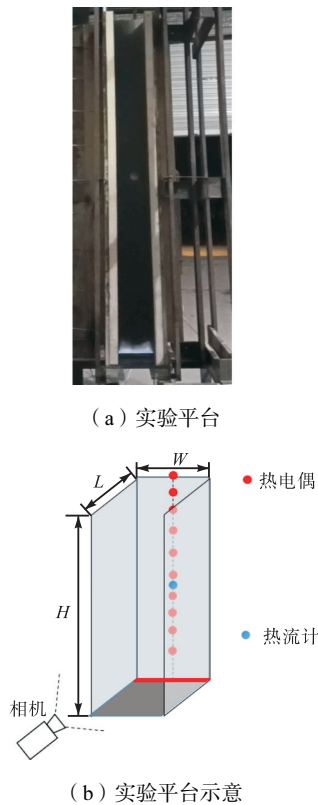


图 1 U 型结构实验平台及仪器

Fig.1 U-shaped structure experimental platform and apparatus

2 结果与讨论

2.1 侧向空气卷吸限制

本节中将平面结构和 U 型结构(侧墙为石膏板)在同一背墙长度下进行对比,如图 2 所示,U 型结构相对于平面而言,侧向空气卷吸受限制,平面结构则意味着侧向空气卷吸不受限制,以此研究侧向空气卷吸受限制与否对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流等影响.

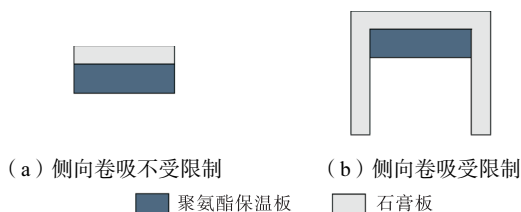


图 2 侧向空气卷吸限制实验结构示意

Fig.2 Schematic diagram of lateral air entrainment limitation experimental structure

图 3 显示了侧墙长度为 10 cm,背墙长度从 4 cm 增至 16 cm 过程中,同一背墙长度下侧向空气卷吸分

别有无受限制下同一时刻火蔓延图像(左侧为侧向卷吸受限制),选取时刻均为点火后 90 s.

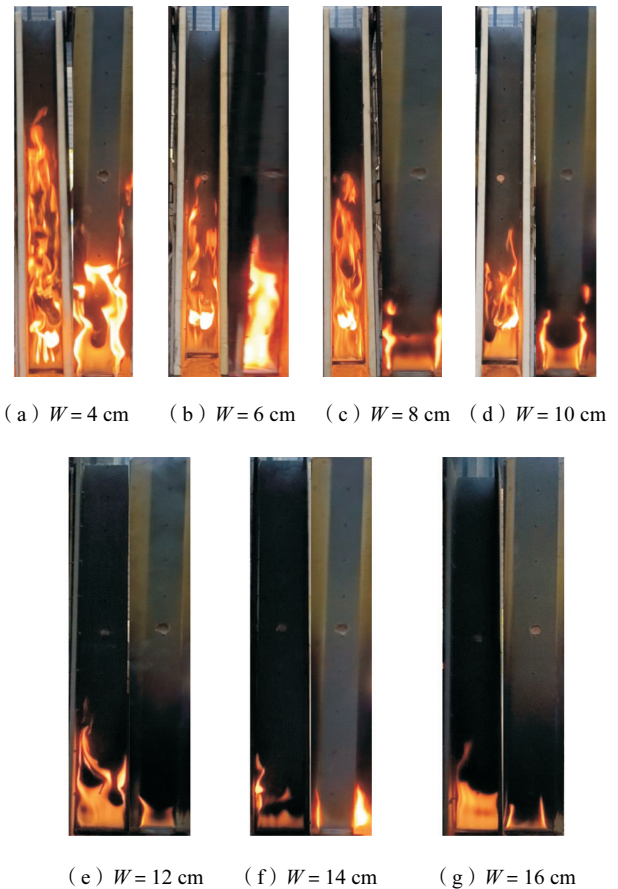


图 3 侧向空气卷吸分别有无受限制下同一时刻火蔓延图像

Fig.3 Images of fire spread at the same moment with and without restriction of lateral air entrainment

为了分析 U 型结构侧向空气卷吸受限制对顺流火蔓延过程的影响,图 4 显示了同一背墙长度下侧向空气卷吸分别有无受限制时火蔓延高度随时间的变化,将同一背墙长度下侧向空气卷吸分别有无受限制时火蔓延速率进行了对比.

由图 4 可以发现,侧向空气卷吸受限制时火焰前锋蔓延的最大高度都比侧向空气卷吸不受到限制时高.火蔓延速率增大范围在 0.05 cm/s 到 0.34 cm/s 之间,最大增大了 1.828 倍.同一背墙长度时,侧向空气卷吸受限制时火蔓延速率都比侧向空气卷吸不受限制时的大.这是因为侧向空气卷吸受限制时,为了满足燃烧的需要,从 U 型结构底部和正面卷吸的空气量增大,在 U 型结构内部形成向上的诱导气流,在一定程度上拉长火焰,并加快火焰对上部预热区的热反馈;另一方面,侧墙的存在不利于热量的损失,热反馈会有所增加,最终使预热区达到热解温度的时间缩短,使火焰蔓延的速率增大.

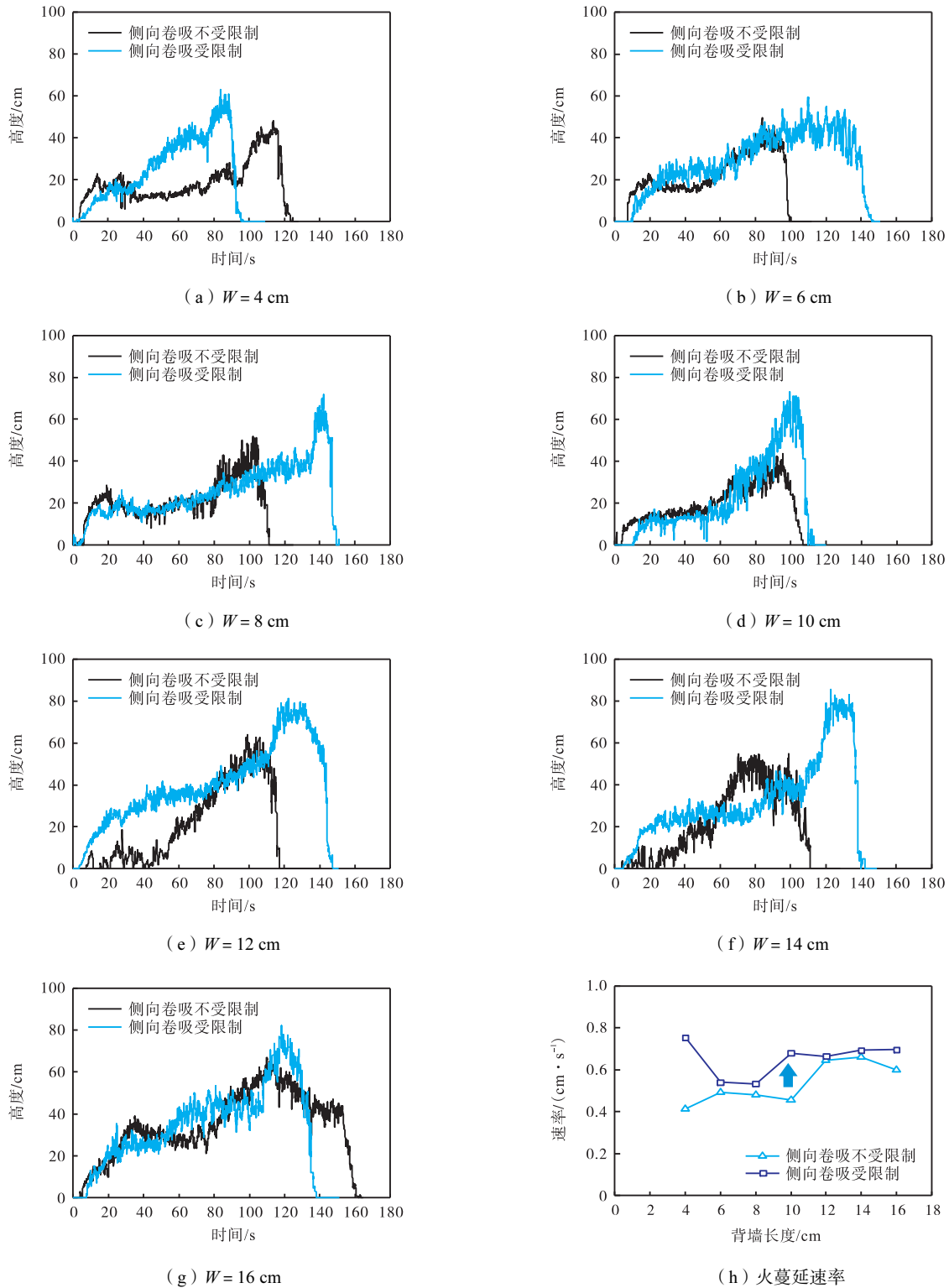


图4 侧向空气卷吸有无受限制时火蔓延高度随时间的变化及火蔓延速率

Fig.4 Variation of flame height with time and flame spread rate with and without restriction of lateral air entrainment

为分析 U 型结构侧向空气卷吸受限制与否对顺流火蔓延过程中同一位置处温度的影响,图 5 显示了同一背墙长度下侧向空气卷吸有无受限制时背墙 30 cm 高度处的温度随时间的变化及最大温升对比。

由图 5 可知,侧向空气卷吸受到限制使得背墙温度增大,温度增大的范围在 55℃到 192℃之间,最大

增大了 2.76 倍。这是因为侧向空气卷吸受限制时类烟囱效应较强,诱导气流对火蔓延的加速作用增强,火蔓延速率更快,燃烧过程更加剧烈,热反馈增强。另一方面,侧墙的存在使得热交换条件较差,U 型结构内部的热量不易散失。

为分析侧向空气卷吸受限制对顺流火蔓延过程

中热流的影响,图 6 显示了同一背墙长度下侧向空气卷吸有无受限制时背墙中心热流随时间的变化以及

背墙单位宽度最大热流(最大热流与背墙宽度之比, $q''_{max} = q''_{max} / W'$).

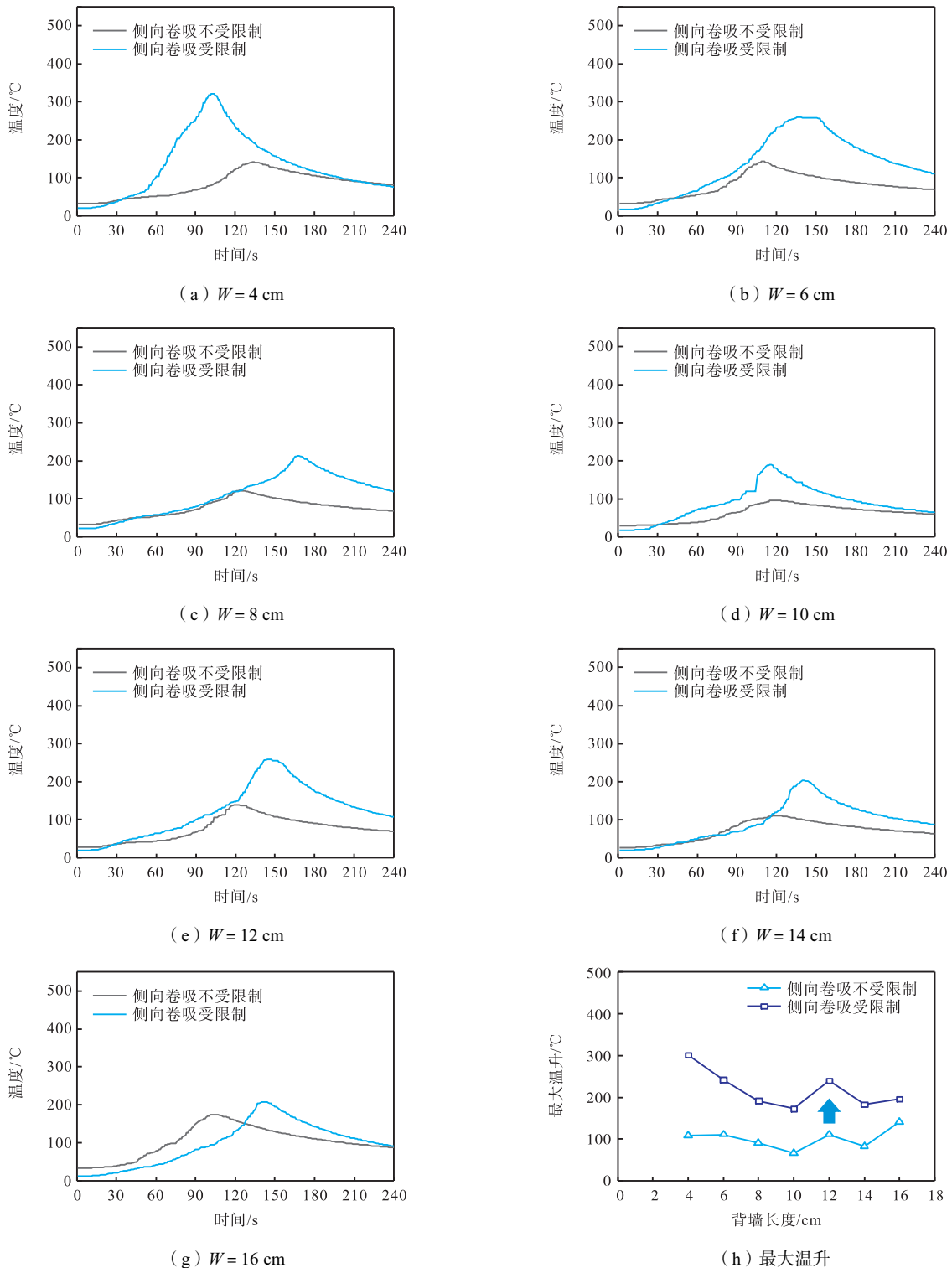


图 5 侧向空气卷吸有无受限制时背墙 30 cm 高处的温度随时间的变化及最大温升

Fig.5 Temperature change with time and maximum temperature rise at a height of 30 cm on the back wall with or without restriction of lateral air entrainment

由图 6 可知,侧向空气卷吸受限增大了背墙单位宽度最大热流,增大的范围在 28.90 kW/m^3 到 607.01 kW/m^3 之间,最大增大了 3.33 倍.这是因为侧向空气卷吸受限制时类烟囱效应较强,U 型结构内部

形成的诱导气流对火蔓延的加速作用增强,火蔓延速率更快,燃烧过程更加剧烈,热反馈增强.另一方面,侧墙的存在使得热交换条件较差,因此,侧向空气卷吸受限将会使得热流增大.

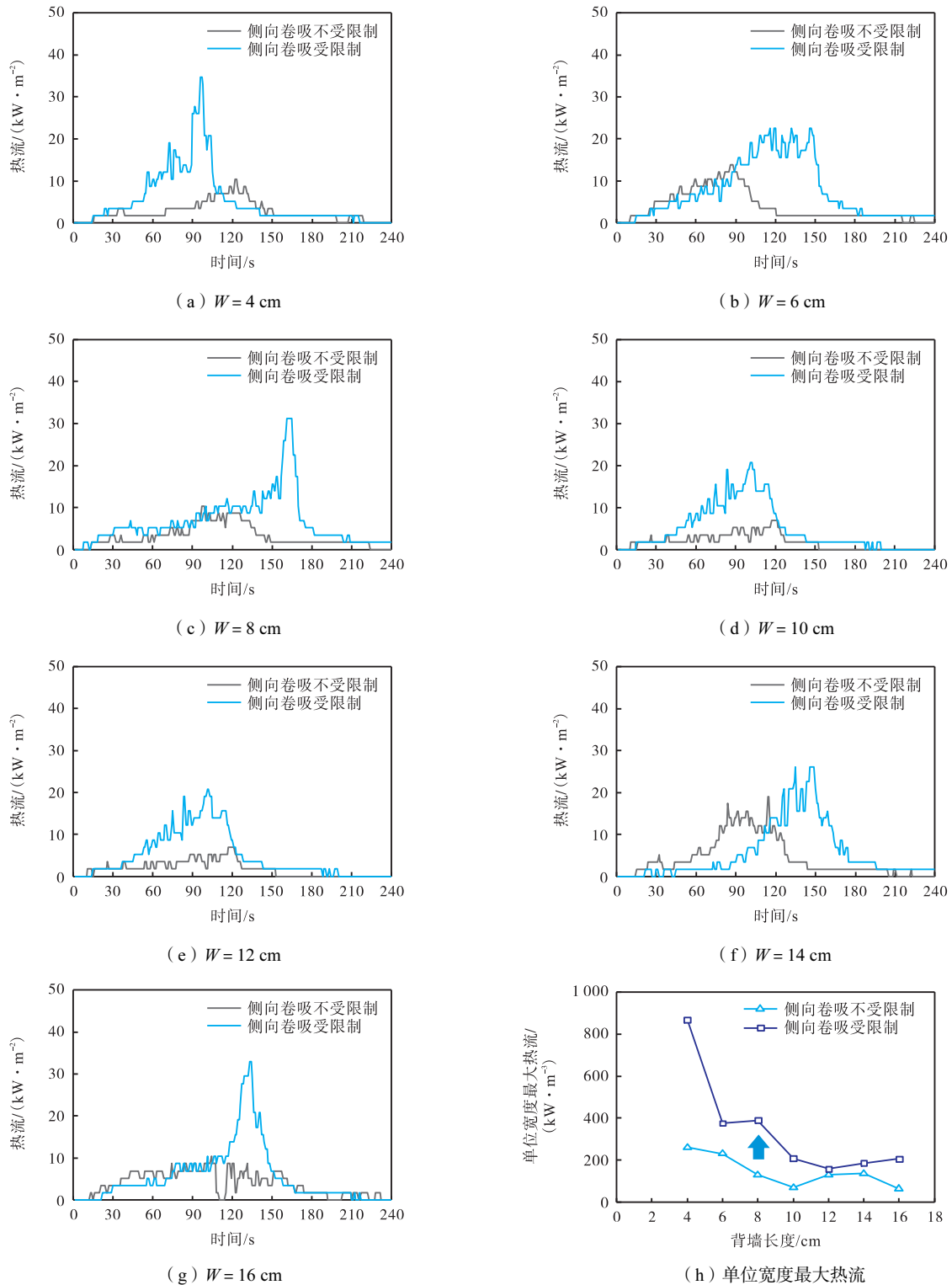


图6 侧向空气卷吸有无限制时背墙中心热流随时间的变化及单位宽度最大热流

Fig.6 Variation of heat flow in the center of the back wall with time and maximum heat flow per unit width with and without restriction of lateral air entrainment

2.2 底部空气卷吸限制

本节中在同一结构尺寸且 U 型结构三面都覆盖聚氨酯保温板时将 U 型结构底部非架空和架空的工况进行对比,以此研究底部空气卷吸受限制与否对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流等影响,如图 7

所示. U 型结构底部非架空代表了底部空气卷吸受限制,U 型结构底部架空则代表了底部空气卷吸不受限制. 本文根据火焰前锋所蔓延到的最大高度及所用时间得到火蔓延速率并进行对比.

为分析 U 型结构底部空气卷吸受限制对顺流火

蔓延过程的影响,本文分析了同一侧墙长度下 U 型结构底部空气卷吸分别有无受限制时火蔓延高度随时间的变化.此外,本文还将闫维纲^[13]的研究与本文实验中底部卷吸不受限制时的火蔓延速率进行了对比,其研究中给出了火焰前锋蔓延到 0.8 m 高处所用的时间,本文将其火蔓延的距离除以时间得到火蔓延速率.图 8 分别显示了底部空气卷吸分别有无受限制不同侧墙长度下的火蔓延速率、最大温升以及最大热流.

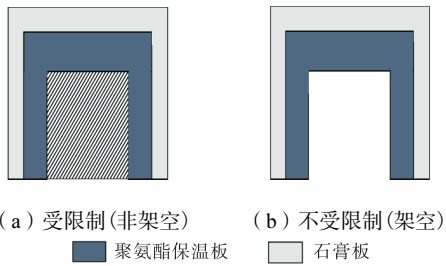


图 7 底部空气卷吸限制实验结构示意图

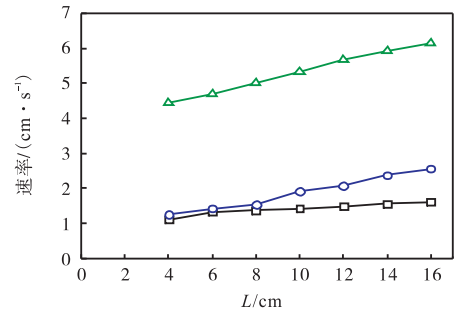
Fig.7 Schematic diagram of bottom air entrainment limitation experimental structure

由图 8(a)可知,随着侧墙长度的增加,底部空气卷吸限制减缓火蔓延速率的比例逐渐增加.这是因为底部卷吸受限时类烟囱效应会更小,由于不能从底部卷吸空气,从正面卷吸的气流进入 U 型结构内部后,气流速度会损失导致向上的流速减小,而诱导气流对火焰具有拉长作用,能增加预热区的长度并加强火焰对预热区的热反馈,诱导气流减弱导致对火蔓延的加速作用减小.火蔓延速率都随着侧墙长度的增加而增加.闫维纲^[13]的侧墙不可燃-底部架空实验中火蔓延速率比本文结果大,原因是:本实验所用聚氨酯保温板表面覆盖有砂浆,能一定程度上阻隔向保温板传递的热量.闫维纲所采用材料为纯聚氨酯,保温板表面未覆盖砂浆,保温板预热区可以接收到更多的热量,因此更快地进行热分解,这将使得燃烧过程加剧,最终使火焰蔓延加快.

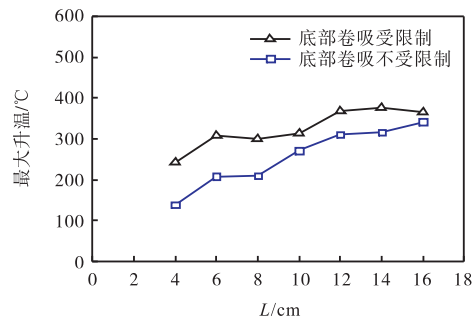
由图 8(b)可知,底部空气卷吸受限使得背墙温升增大.温升增大 23 ~ 104 °C,最大增幅为 1.75 倍.底部空气卷吸受限使得背墙温升增大,这是由于底部空气卷吸不受限制时,类烟囱效应更强,从底部卷吸的冷空气形成竖直向上的诱导气流更强,因此诱导气流的冷却作用将会更强.此外,底部卷吸受限制时还会限制热量向下方的散失.

由图 8(c)可知,在侧墙长度为 4 ~ 16 cm 时,底部空气卷吸受限整体上增大了背墙单位宽度最大热流,热流增大 173.43 kW/m³ 到 1 300.73 kW/m³,增大的比例在 7.4% ~ 46.0% 之间.整体而言,底部卷吸受

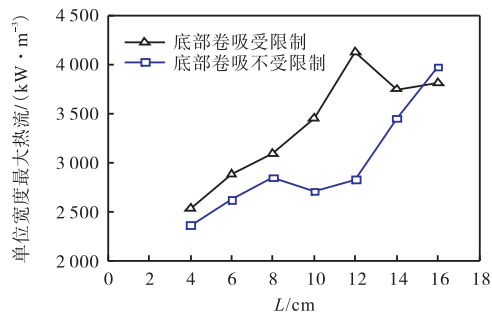
限制增大了热流,原因是:底部卷吸受限制时会限制热量向下方的散失,而底部空气卷吸不受限制时类烟囱效应更强,卷吸气流的强度更强,卷吸的冷空气的冷却作用更明显.在侧墙长度较大时,与诱导气流的冷却作用相比,其加剧燃烧的作用更明显,因此,在侧墙长度为 16 cm 时,底部空气卷吸不受限制增大了背墙单位宽度最大热流.



(a) 火蔓延速率



(b) 背墙 50 cm 高处最大温升



(c) 背墙单位宽度最大热流

图 8 底部空气卷吸有无限制时不同侧墙长度对火蔓延的影响

Fig.8 Effect of different sidewall lengths on fire spread with and without restrictions on bottom air entrainment

2.3 背墙火焰与边墙火焰相互作用

本节在同一结构尺寸下将侧墙分别有-无覆盖聚氨酯保温板的工况进行对比,以此研究背墙火焰与边墙火焰存在相互作用与否对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流等影响,如图 9 所示.侧墙覆盖聚氨

酯保温板代表背墙火焰与边墙火焰存在相互作用,侧墙未覆盖聚氨酯保温板则代表了背墙火焰与边墙火焰不存在相互作用。

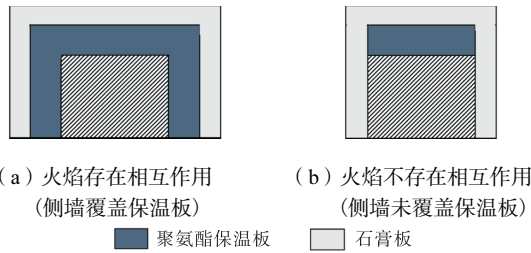


图 9 火焰相互作用实验结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of flame fusion experimental structure

图 10 显示了背墙长度为 10 cm,侧墙长度从 4 cm 增至 16 cm 过程中,同一侧墙长度下背墙火焰与边墙火焰分别有无相互作用下同一时刻火蔓延图像,所选时刻均为背墙火焰与边墙火焰存在相互作用时火蔓延到顶部的时刻(左图为火焰存在相互作用)。

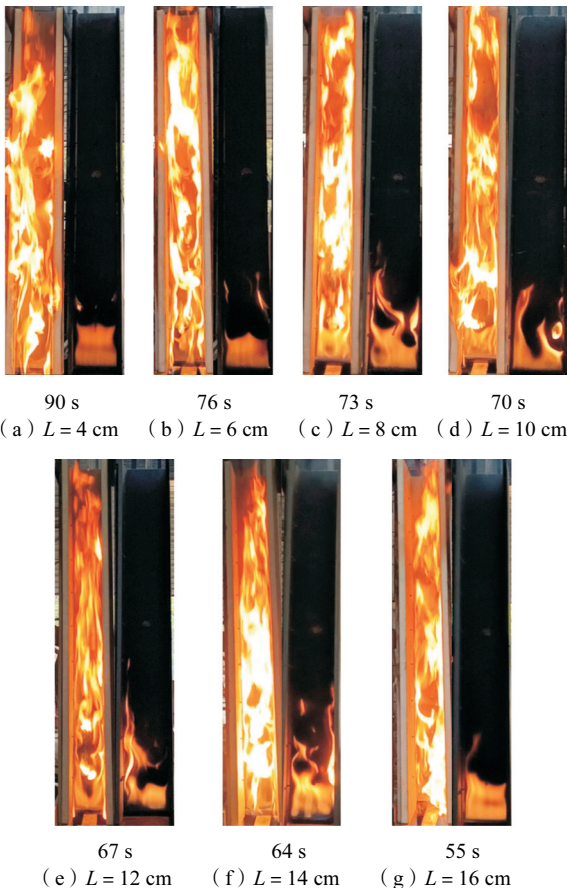
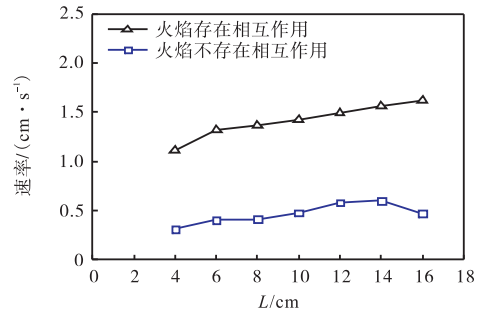


图 10 火焰有无相互作用下同一时刻火蔓延图像

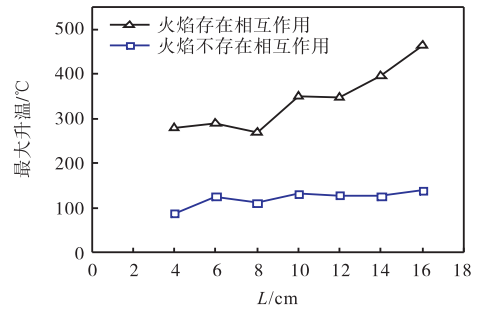
Fig.10 Image of fire spread at the same moment with and without flame fusion

由图 10 可发现,背墙火焰与边墙火焰存在相互作用时火焰将更快蔓延到 U 型结构顶部,火焰相互作用增大了火蔓延速率。

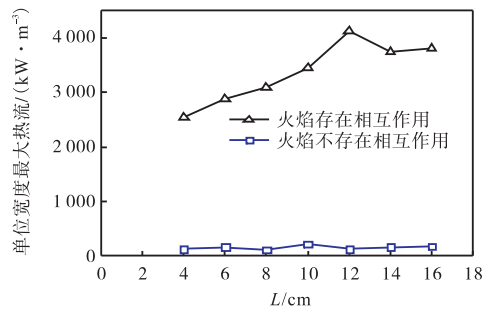
为分析背墙火焰与边墙火焰相互作用对火蔓延过程的影响,本文分析了同一侧墙长度下 U 型结构侧墙分别有无覆盖聚氨酯保温板时火蔓延高度随时间的变化和火蔓延速率.图 11 分别显示了背墙火焰与边墙火焰有无相互作用时不同侧墙长度下的火蔓延速率、最大温升以及最大热流。



(a) 火蔓延速率



(b) 背墙 50 cm 高处最大温升



(c) 背墙单位宽度最大热流

图 11 背墙火焰与边墙火焰有无相互作用时不同侧墙长度对火蔓延的影响

Fig.11 Effect of different sidewall lengths on fire spread with or without flame fusion between backwall flames and sidewall flames

由图 11(a)可知,火焰存在相互作用使得火蔓延速率增大,增大的范围在 0.80 cm/s 到 1.15 cm/s 之间,即最大增幅为 3.58 倍.原因是火焰相互作用使得预热区接收到的热反馈增大,预热区更快地变成热解区,燃烧过程更加剧烈,火蔓延速率因此增大。

由图 11(b)可以明显看到,同种结构尺寸下,背墙火焰与边墙火焰有相互作用时背墙最大温度比背墙火焰与边墙火焰无相互作用时高.火焰存在相互

作用使得最大温升增大 157 ~ 324 °C, 最大增长了 4.33 倍. 原因是火焰相互作用使得预热区接收到的热反馈增大, 预热区更快地变成热解区, 燃烧过程更加剧烈.

由图 11(c) 可知, 背墙火焰与边墙火焰无相互作用时, 背墙单位宽度最大热流在 104.06 kW/m³ 到 208.12 kW/m³ 之间. 在结构尺寸相同时, 背墙火焰与边墙火焰存在相互作用使得背墙单位宽度最大热流增大, 增大范围为 2 410.68 ~ 4 006.24 kW/m³, 最大增幅达到 34 倍, 可见除可燃物质增多的影响外, U 型结构引起的热损失减少、热反馈增强、燃烧促进等均有重要的影响. 火焰存在相互作用使得背墙单位宽度最大热流增大, 这是因为火焰相互作用使得预热区接收到的热反馈增大, 预热区更快地变成热解区, 燃烧过程更加剧烈. 而背墙火焰与边墙火焰无相互作用时, U 型结构预热区接收到的热反馈会减小, 并无法维持火焰在阻燃材料上向上蔓延.

3 结 论

本文根据一系列小尺寸实验, 通过对比分析研究了侧向空气卷吸限制、底部空气卷吸限制及火焰相互作用这 3 个因素对 U 型结构顺流火蔓延速率、温度及热流的影响. 研究发现: 侧向空气卷吸限制和火焰相互作用增强了 U 型结构内的诱导气流、减少了材料表面的热损失、增大了材料表面的热反馈, 对 U 型结构内顺流火蔓延的温度、热流、火蔓延速率分别促进了 2.76 倍、3.33 倍、1.828 倍和 4.33 倍、3.58 倍; 而底部空气卷吸限制由于减少了材料表面的热损失, 从而温度增大了 1.75 倍, 热流最大增大了 46%, 但其削弱了诱导气流, 从而减缓了火蔓延速率.

参考文献:

- [1] Zhang Y, Sun J H, Huang X J, et al. Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 61(1): 28-34.
- [2] Huang X J, Zhao J, Tang G, et al. Effects of altitude and inclination on the flame structure over the insulation material PS based on heat and mass transfer [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 90: 1046-1055.
- [3] Urban D L, Ferkul P, Olson S, et al. Flame spread: Effects of microgravity and scale[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 199(1): 168-182.
- [4] Ray S R, Fernandez-Pello A C, Glassman I. A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1980, 102(2): 156-169.
- [5] Kashiwagi T, Newman D L. Flame spread over an inclined thin fuel surface[J]. *Combustion and Flame*, 1976, 26(1): 163-177.
- [6] Ellen G Brehob, Anil K Kulkarni. Experimental measurements of upward flame spread on a vertical wall with external radiation[J]. *Fire Safety Journal*, 1998, 31(3): 181-200.
- [7] Huang X J, Wang Q S, Zhang Y, et al. Thickness effect on flame spread characteristics of expanded polystyrene in different environments[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2012, 25(4): 427-438.
- [8] Luo S F, Xie Q Y, Da L J, et al. Experimental study on thermal structure inside flame front with a melting layer for downward flame spread of XPS foam [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 329: 30-37.
- [9] Pizzo Y, Consalvi J L, Querre P, et al. Width effects on the early stage of upward flame spread over PMMA slabs: Experimental observations[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(3): 407-414.
- [10] Zhao K, Yang L Y, Tang W, et al. Effect of orientation on the burning and flame characteristics of PMMA slabs under different pressure environments [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 619-626.
- [11] Zhou Y, Gong J H, Jiang L, et al. Orientation effect on upward flame propagation over rigid polyurethane foam [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 132: 86-95.
- [12] 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.
- [13] 闫维纲. 耦合建筑外立面结构影响的 PU 保温材料火蔓延特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. Yan Weigang. Study on the Fire Spread Characteristics of PU Insulation Materials with the Influence of Coupled Building Facade Structure[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016(in Chinese).
- [14] 殷向伟. 外墙竖向通道结构对建筑外立面火蔓延的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. Yin Xiangwei. Influence of Facade Vertical Channel Structure on the Fire Spread of Building Facade[D].

- Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020 (in Chinese).
- [15] An Weiguang, Pan Rongliang, Meng Qingxuan, et al. Experimental study on downward flame spread characteristics under the influence of parallel curtain wall[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 297-305.
- [16] Yan Weigang, Li Jiantao, An Weiguang, et al. Large scale experimental study on the fire hazard of buildings' U-shape facade wall geometry[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 23(4): 455-463.
- [17] Yan Weigang, Shen Yang, An Weiguang, et al. Experimental study on fire risk of buildings' U-shaped exterior wall on flame propagation of insulation material on plain and plateau[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2015, 33(5): 358-373.
- [18] Tsai K C. Width effect on upward flame spread[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(7): 962-967.
- [19] Hsin-Yi Shih. An experimental study of upward flame spread and interactions over multiple solid fuels[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2008, 26(5): 435-453.
- [20] 李建涛, 闫维纲, 朱红亚, 等. 高层建筑外立面 U 型结构火蔓延特性数值模拟研究[J]. *火灾科学*, 2012, 21(4): 174-180.
- Li Jiantao, Yan Weizang, Zhu Hongya, et al. Numerical simulation study of fire spread characteristics of U-shaped structures on high-rise building facades[J]. *Fire Science*, 2012, 21(4): 174-180 (in Chinese).
- [21] 李建涛, 闫维纲, 朱红亚, 等. 高层建筑外立面 U 型结构火蔓延的实验研究[J]. *火灾科学*, 2012, 21(4): 167-173.
- Li Jiantao, Yan Weigang, Zhu Hongya, et al. Experimental study on the fire spread of U-shaped structure of high-rise building facade[J]. *Fire Science*, 2012, 21(4): 167-173 (in Chinese).
- [22] 安伟光. PS 建筑外墙保温材料燃烧及火蔓延行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- An Weiguang. Study on Combustion and Fire Propagation Behavior of PS Building Facade Insulation Materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 (in Chinese).