

装配式混凝土夹心保温外墙结构实体火灾试验研究

刘庆^{1,2,3}, 张唯^{2,3}, 高磊⁴, 南卫涵^{2,3}, 张屹东^{2,3}, 孟天畅^{2,3}, 苏晶晶^{2,3}

¹建筑安全与环境国家重点实验室, 北京

²中国建筑科学研究院建筑防火研究所, 北京

³建研防火科技有限公司, 北京

⁴南京消防器材股份有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2024年5月4日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

为验证装配式混凝土夹心保温外墙结构的防火性能, 本文对一种使用PE棒及装配式建筑MS密封胶进行接缝封堵并使用木砖窗口构造的装配式混凝土夹心保温外墙板结构进行了全尺寸实体火灾试验, 采集并对比分析了着火房间温度、着火房间外立面接缝处温度、着火房间窗框处温度等数据。结果表明, PE棒及装配式建筑MS密封胶接缝封堵能够起到良好的隔热作用, 阻止火焰在保温材料内部蔓延; 木砖窗口构造在火灾初期能够起到一定阻火隔热的保护作用, 但随着木砖炭化, 依然会造成火焰蔓延; 在保证施工工艺的条件下, 装配式夹心保温外墙板结构可以有效避免火灾通过外墙进行蔓延。

关键词

装配式建筑, 混凝土夹心保温, 全尺寸实体火灾试验, 火灾蔓延

Practical Fire Test Research on Prefabricated Concrete Sandwich Insulation External Wall Structure

Qing Liu^{1,2,3}, Wei Zhang^{2,3}, Lei Gao⁴, Weihan Nan^{2,3}, Yidong Zhang^{2,3}, Tianchang Meng^{2,3}, Jingjing Su^{2,3}

¹State Key Laboratory of Building Safety and Environment, Beijing

²Building Fire Research of China Academy of Building Research Institute, Beijing

³CABR Fire Technology Co., Ltd., Beijing

⁴Nanjing Fire Protection Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: May 4th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

文章引用: 刘庆, 张唯, 高磊, 南卫涵, 张屹东, 孟天畅, 苏晶晶. 装配式混凝土夹心保温外墙结构实体火灾试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 820-831. DOI: 10.12677/hjce.2024.135088

Abstract

In this paper, to verify the fire performance of prefabricated concrete sandwich insulation external wall structure, a full-scale practical fire test was conducted on a prefabricated concrete sandwich insulation external wall panel structure using PE rods and prefabricated building MS sealant for joint sealing, and wooden bricks for the window. Data such as the temperature of the fire room, the temperature of the external facade joint of the fire room, and the temperature of the window frame of the fire room were collected and compared. The results show that PE rods and prefabricated building MS sealant can play a good insulation role, preventing the fire spread inside the insulation material; the construction of wooden brick windows can play a role in preventing fire and insulating in the early stages of a fire, but as the wooden bricks carbonize, they still cause flame spread; under the guarantee of construction process conditions, the prefabricated sandwich insulation external wall panel structure can effectively prevent fire from spreading through the external wall.

Keywords

Prefabricated Building, Concrete Sandwich Insulation, Full-Scale Practical Fire Test, Fire Spread

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了提升建筑工程节能效益,我国积极推广应用装配式夹心保温外墙板结构体系,其具有良好的保温节能、防火性能,并且能够使建筑外观得到美化,局部浇筑混凝土并联合应用钢筋套筒进行连接,即可形成装配式建筑工程外墙体结构。由于装配式夹心保温外墙板结构体系的多种优良特性,近年来持续被人们所关注,对于该种结构体系的研究正在不断推进。

池启贵[1]对夹心保温外墙板技术以及相关施工工艺进行了解析,并以某住宅小区建筑为研究对象,深入探究了装配式混凝土夹心保温外墙板施工技术要点以及质量控制措施,为类似工程提供了参考依据。郑强[2]对装配式混凝土建筑深化设计的方法、主要问题以及解决方案进行了探索。结合工程实际,验证了深化设计方法的适用性,为装配式混凝土建筑的深化设计的指导性实施细则提供了参考。Kontoleon 等[3]通过建立数值模型和实验室标准试验验证相结合的方式探究了一种以 EPS 为保温材料的装配式混凝土夹心保温墙体系统的防火性能,并分析了不同位置和不同厚度的保温层对该系统防火性能的影响。

如上所述,相关学者已经对装配式夹心保温外墙板体系的施工技术、设计要点及防火性能进行了深入研究,但目前尚未对其进行过实体火灾实验研究,这可以了解其防火性能,有效验证火灾中该建筑结构的安全性,这对于装配式夹心保温外墙板体系的防火性能研究具有重大意义。因此,装配式混凝土夹心保温外墙结构实体火灾试验研究是十分有必要的。

2. 试验场景介绍

2.1. 试验对象

着火房间室内净尺寸为 4000 mm (长) × 3000 mm (宽) × 2800 mm (高)。由 600 mm × 240 mm × 200 mm

轻质砌块砖、防火板、型材及硅酸铝纤维棉组成，预留 800 mm 宽，2800 mm 高入口，外立面墙体由 1500 mm × 1800 mm 外窗及 200 mm 厚混凝土墙、90 mm 厚挤塑板保温材料、60 mm 厚仿石混凝土墙组成。着火房间以上二层外立面墙体由 200 mm 厚混凝土墙、90 mm 厚挤塑板保温材料、60 mm 厚带装饰面混凝土墙组成，拼缝胶宽度为 40 mm，厚度为 20 mm。试验区域内拼接缝为着火房间与相邻房间外墙交接处，拼缝使用 PE 棒及装配式建筑 MS 密封胶进行填充封堵。试验对象整体情况如图 1 所示。

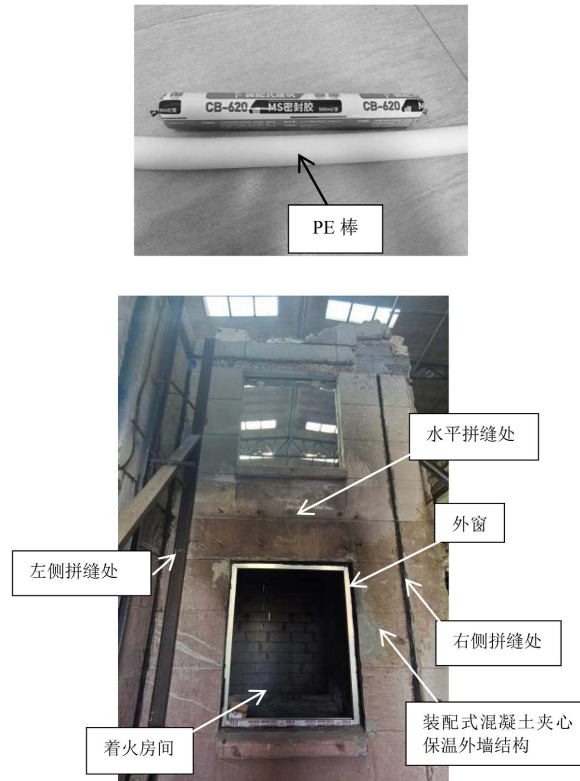


Figure 1. Overall situation of the test subjects
图 1. 试验对象整体情况

窗口四周由铝合金型材、密封胶、间距 450 mm 的木砖、保温材料、混凝土墙体等组成，窗口通过间距 450 mm 木砖与外墙夹心保温材料连接，构造示意如图 2 所示。

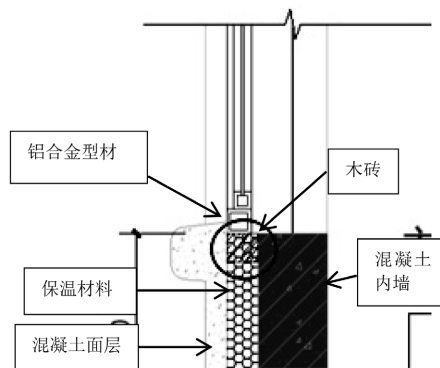


Figure 2. Schematic diagram of window structure
图 2. 窗口构造示意图

2.2. 火源规模

GB/T 9978.1-2008 [4]给出了纤维类火灾的标准温度 - 时间曲线($T = 345\lg(8t + 1) + 20$), 式中: T 为炉内的平均温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$); t 为时间, 单位为分钟(min), 为建筑构件的耐火性能试验规定了标准试验条件。在给定一个耐火试验条件时, 试验曲线应与真实火灾相关联, 如图 3 所示。

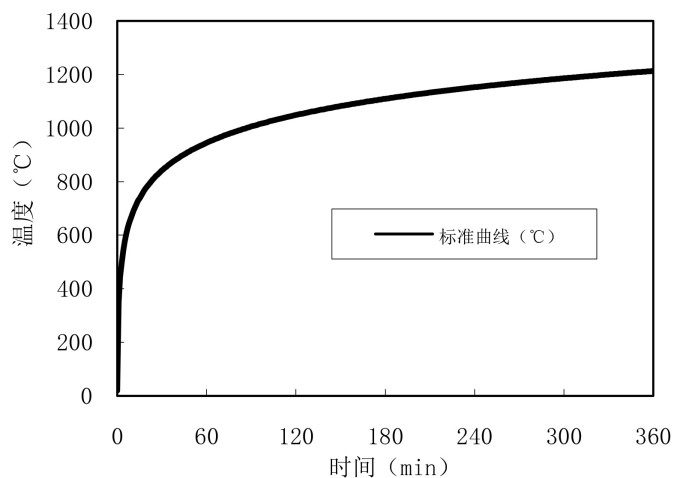


Figure 3. GB/T 9978.1-2008 standard temperature-time curve
图 3. GB/T 9978.1-2008 标准温度 - 时间曲线

此外, 上海市工程建设规范 DGJ 08-88-2006《建筑防排烟技术规程》[5]第 4.2 节“火灾模型的确定和排烟量”给出了各类场所的火灾模型, 详见表 1。

Table 1. Fire model heat release

表 1. 火灾模型热释放量

建筑类别	热释放量 Q (MW)
设有喷淋的商场	3.0
设有喷淋的办公室、客房	1.5
设有喷淋的公共场所	2.5
设有喷淋的汽车库	1.5
设有喷淋的超市、仓库	4.0
设有喷淋的中庭	1.0
无喷淋的办公室、客房	6.0
无喷淋的汽车库	3.0
无喷淋的中庭	4.0
无喷淋的公共场所	8.0
无喷淋的超市、仓库	20.0

同时, 参考标准 GB/T 29416-2012 [6]和 BS 8414-1:2015 [7]进行火源规模的设置, 选取本次试验研究着火源为标准木垛, 热释放速率峰值为 3 MW。

2.3. 试验可燃物设置

为便于试验研究,本次试验参考 GB/T 29416-2012 [6],选用标准木垛作为试验着火源,其中木条尺寸为 1000 mm × 50 mm × 50 mm,按照 GB/T 1931-2009 [8]选取密度为 457.90 kg/m³,含水率为 10.13%。为模拟一般住宅房间发生火灾时可能出现的火焰沿窗口蔓延的情况,在紧邻窗口位置按照 1500 mm 长木条和 1000 mm 短木条以层次交替的方式搭建木垛。木垛底面四个角部用红砖垫高,高出地面 400 mm,第一层由 10 根 1500 mm 长木条组成,第二层由 15 根 1000 mm 短木条组成,垂直搭在第一层木条上,形成 1500 mm × 1000 mm 的平面。依次类推直至形成 20 个木条层,搭建总尺寸为 1500 mm (长) × 1000 mm (宽) × 1000 mm (高)的木垛。

2.4. 试验测量系统

2.4.1. 温度测量

本次试验共布置 37 个温度测点,采集传输实时温度,每个测点对应唯一的温度数据。

1) 着火房间温度测点

着火房间火源处布置 3 个温度,位于火源正上方,竖向间距 500 mm。着火房间其它位置布置 4 个热电偶树,依次分布距离火源 500 mm、1000 mm、1500 mm 及 2000 mm 处,每个热电偶树布置 2 个温度测点,分别位于距火源上方垂直高度为 500 mm 和 1500 mm 处。着火房间共布置 11 个温度测点,用于采集房间温度场数据。

2) 着火房间外立面接缝处温度测点

着火房间与左侧外立面拼缝处,布置 2 支测温热电偶,着火房间与左侧外立面拼缝与内部保温材料连接处布置 2 支测温热电偶;着火房间与其上二层外立面交接缝隙处布置 3 支测温热电偶,着火房间与其上二层外立面交接缝隙与保温材料交接处布置 3 支测温热电偶。着火房间与右侧外立面拼缝处布置 1 支测温热电偶;着火房间与右侧外立面拼缝与保温材料连接处布置 1 支测温热电偶。

3) 着火房间二层外立面温度测点

在着火房间二层外立面下窗台及外饰面处分别布置 1 支测温热电偶。

4) 着火房间窗框处温度测点

为测量窗框及附近保温材料温度值,在窗框四周、窗框与保温材料连接处各布置 6 支测温热电偶,其中分别在上窗框均匀布置 3 个温度测点,其他窗框中间处各布置一个温度测点,每个温度测点分别在窗框四周、窗框与保温材料连接处各设置 1 支热电偶。

2.4.2. 热辐射测点

为测量着火房间对于相邻建筑物的热辐射影响,在距窗户中心 4000 mm 处布置一支热流计。

3. 试验结果与分析

3.1. 着火房间温度

将着火房间内布置的 24 个温度测点对应的房间温度场数据取平均值,可以得到一条着火房间内平均温度曲线,并与 GB/T 9978.1-2008 中给出的标准升温曲线进行对比,如图 4 所示。

由图 4 可知,试验开始后,房间内部平均温度急剧升高,随后升温速率逐渐减小,试验至 23 min 时,房间内部平均温度开始下降。另外,本次试验火灾情景下的温度场升温段发展趋势与标准升温曲线能够较好地拟合,这主要由于试验可燃物仅为标准木垛,并无其他类型可燃物,为试验结果分析的可靠性和可比性奠定了基础。

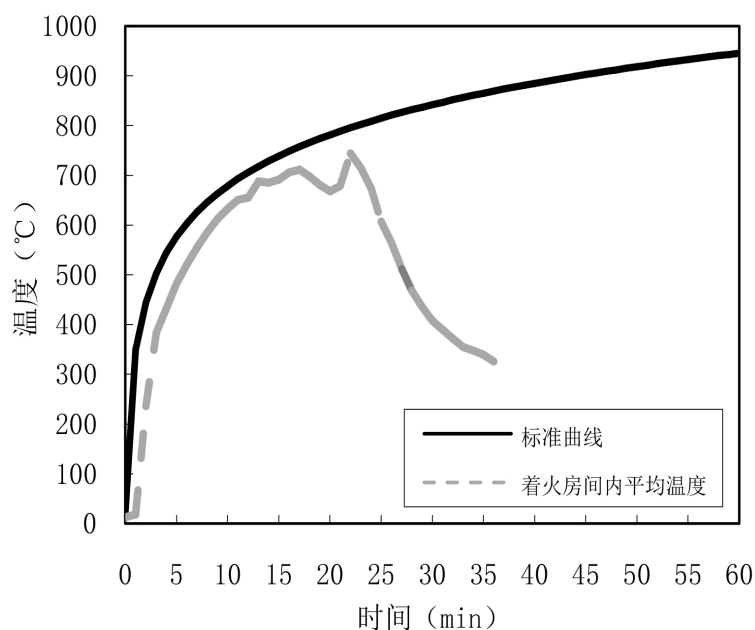


Figure 4. Average temperature curve inside the fire room and the ISO 834 standard temperature rise curve
图 4. 着火房间内部平均温度曲线及 ISO 834 标准升温曲线

3.2. 着火房间外立面接缝处温度

按照 2.4.1 中 2) 的方式进行着火房间外立面接缝处温度测点布置, 取同一拼缝同一面层的温度测点数据平均值, 分别得到不同拼缝处的密封胶表面平均温度及密封胶与保温材料连接处平均温度, 并将同一拼缝处的两组数据进行对比, 对比曲线如图 5~7 所示。

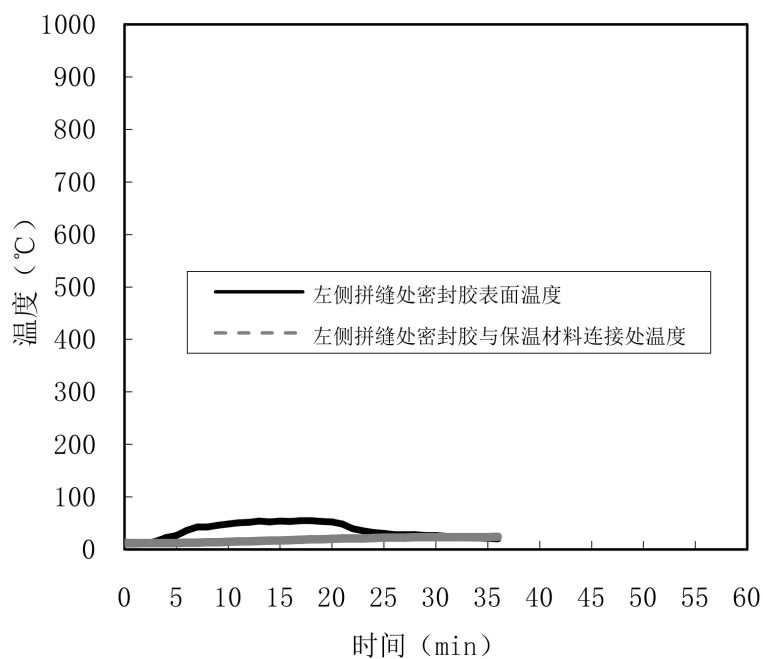


Figure 5. Temperature comparison curve at the left seam
图 5. 左侧拼缝处温度对比曲线

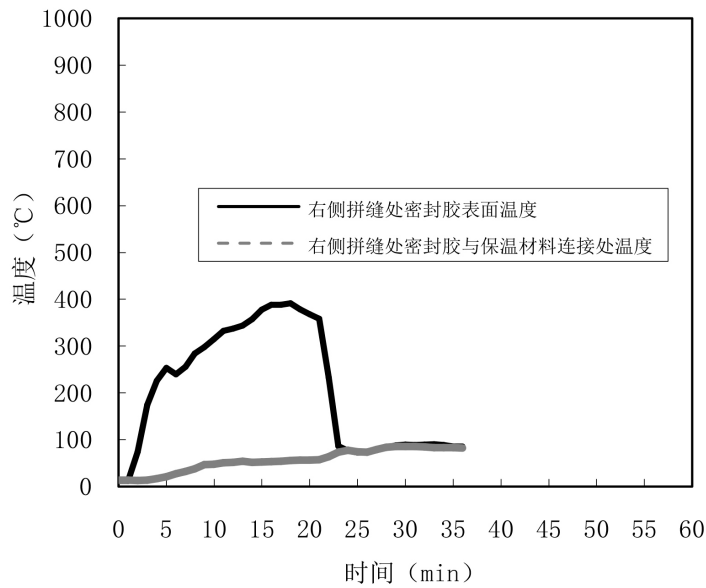


Figure 6. Temperature comparison curve at the right seam
图 6. 右侧拼缝处温度对比曲线

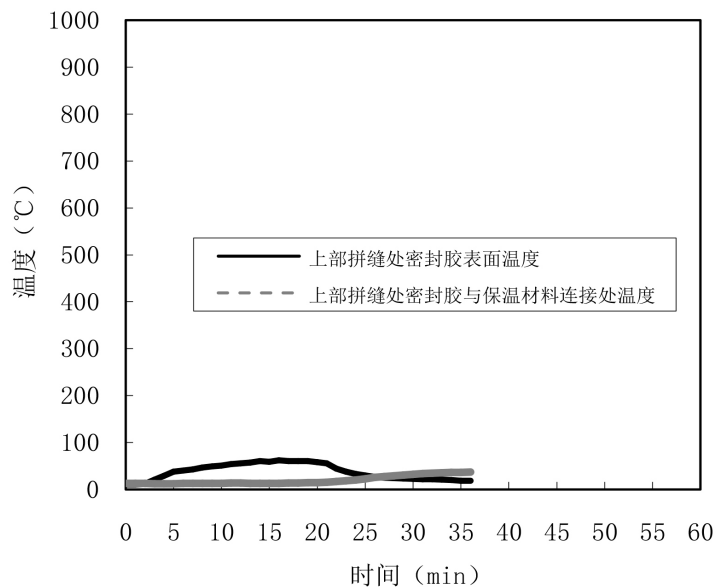


Figure 7. Temperature comparison curve at the upper seam
图 7. 上部拼缝处温度对比曲线

从图 5~7 的拼缝处温度对比曲线可知,密封胶与保温材料连接处温度(以下简称“连接处温度”)要低于密封胶表面温度(以下简称“表面温度”),其中左侧拼缝连接处温度最高仅为 23.5℃,而左侧拼缝表面温度最高达到 54.3℃;上部拼缝连接处温度最高仅为 36.7℃,而上部拼缝表面温度最高达到 61.4℃;相差最大的是右侧拼缝温度数据,表面温度最高已达到 390.7℃,但其连接处温度仅为 85.6℃,两处的最高温度比值超过 4:1。这些数据表明拼缝处的 MS 密封胶和 PE 棒起到了很好的隔热作用,有效保护了内保温系统,避免了火在内保温材料中进行蔓延,且右侧接缝处密封胶对于内部保温材料的保护作用尤为显著,有效地阻止了火焰在保温材料内部蔓延。

3.3. 着火房间窗框处温度

按照 2.4.1 中 4) 中的温度布点方式进行布点, 将上窗框表面处的 3 支热电偶测得的平均温度数据, 及上窗框与保温材料连接处的 3 支热电偶测得的平均温度数据分别绘制曲线并进行对比, 如图 8 所示。其他窗框表面及窗框与保温材料连接处的温度数据对比曲线如图 9~11 所示。

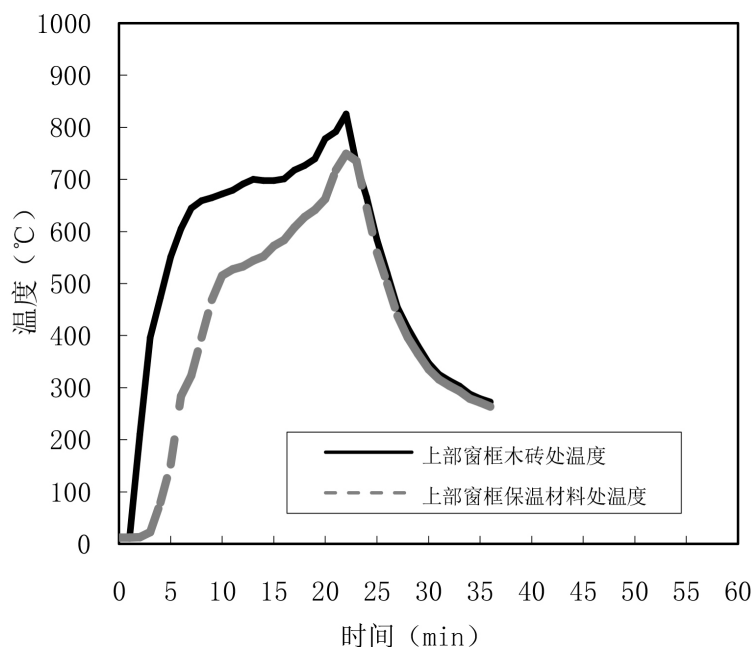


Figure 8. Temperature comparison curve at the upper window frame
图 8. 上部窗框处温度对比曲线

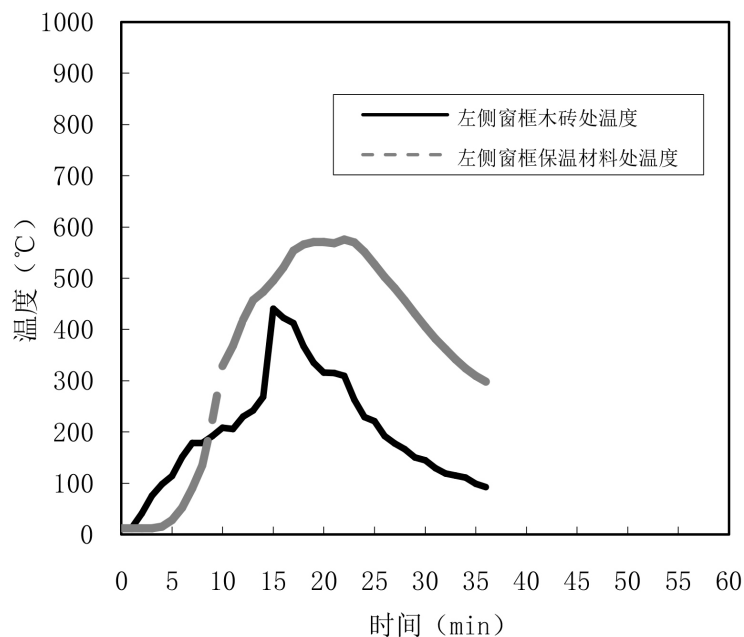


Figure 9. Temperature comparison curve at the left window frame
图 9. 左侧窗框处温度对比曲线

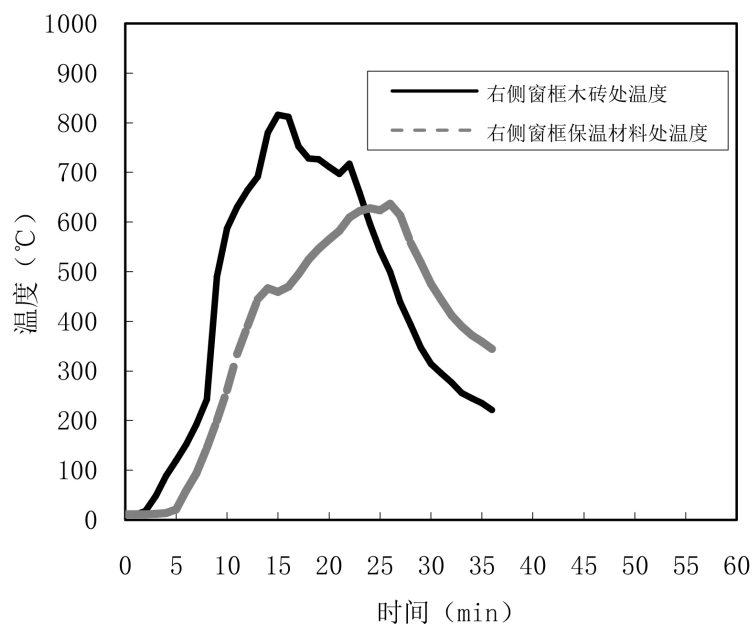


Figure 10. Temperature comparison curve at the right window frame
图 10. 右侧窗框处温度对比曲线

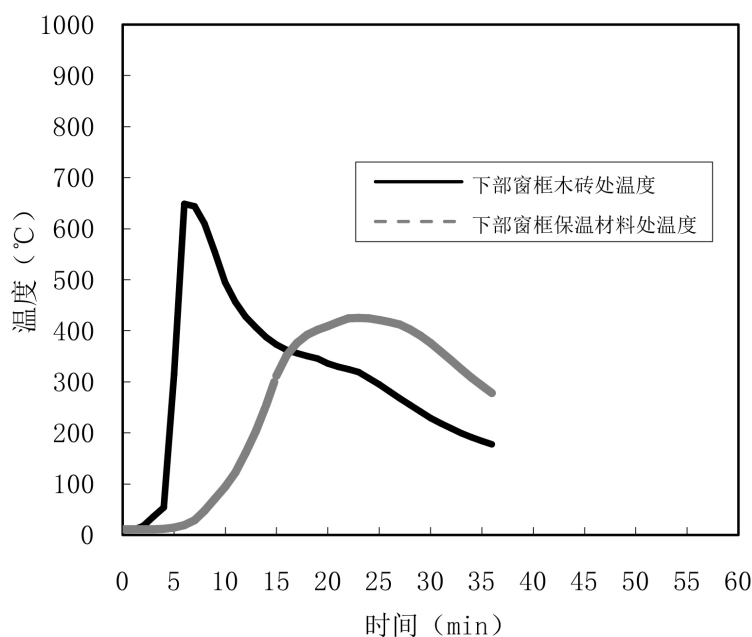


Figure 11. Temperature comparison curve at the lower window frame
图 11. 下部窗框处温度对比曲线

由图 8 可知, 上部窗口处, 木砖表面处温度值一直高于其与保温材料连接处温度值, 测点处温度值持续升高, 第 22 min 时, 上框温度达到最大为 825.8°C, 但上框保温材料处最高温度比上框木砖处最高温度低将近 80°C。另外, 试验过程中上部框起火燃烧并产生少量变形, 试验后观察发现木砖出现炭化现象, 木砖连接处保温材料仅出现少量收缩变形, 这说明木砖结构起到了一定阻燃隔热的作用。

由图 9 可知, 前 5 min, 左侧窗框保温材料处温度仅有缓慢升高的趋势。然而, 随后由于风向影响,

8 min 时, 左侧窗口处木砖表面处温度值超过其与保温材料连接处温度值, 温度逐渐传至保温材料处, 且木砖逐渐炭化。试验过程中, 保温材料处最高温度为 576.0℃, 木砖处最高温度为 440.2℃。试验后观察发现窗框燃烧变形, 且测量得出左侧窗框附近处保温材料平均炭化收缩量为 185 mm, 这表明随着火灾不断发展, 窗框及木砖结构并未有效保护附近内保温材料。

由图 10 可知, 前 5 min, 右侧窗框保温材料处温度几乎无变化。随后右侧窗口木砖表面处温度值高于其与保温材料连接处温度值, 木砖处的温度值在 15 min 后逐渐降低。试验过程中右侧窗框起火燃烧并发生较大变形, 附近保温材料也有烟气溢出, 试验至 23 min 时, 窗口火溢出减少, 但保温材料仍在燃烧, 右侧窗框木砖表面处温度值低于其与保温材料连接处温度, 试验后测量得出右侧窗框附近处保温材料平均炭化收缩量为 440 mm, 这表明随着火灾不断发展, 窗框及木砖结构并未有效保护附近内保温材料。

由图 11 可知, 下部窗框处, 前 6 min, 木砖表面处温度值急剧升高, 而保温材料处温度几乎无变化, 此时温度未传至保温材料处, 窗框及木砖结构极大地起到了阻火隔热的作用。然而, 随后木砖逐渐炭化, 温度通过窗框逐渐传递至保温材料处, 保温材料处温度不断升高; 17 min 后, 保温材料处温度值超过木砖处温度值。试验过程中, 木砖处最高温度达到 648.9℃, 而保温材料处最高温度为 425.0℃。这表明在火灾初期窗框及木砖结构对内保温材料起到了一定保护作用, 但后期其未能阻止火焰的不断蔓延。

总体来说, 窗口处窗框和木砖结构在破坏前可减缓温度向内传递。在火灾初期, 窗框及木砖结构能够对保温材料起到一定阻火隔热的保护作用, 但随着后期木砖炭化, 保温材料逐渐受到火焰作用, 从而使内保温材料炭化收缩, 造成火焰蔓延。

3.4. 距离窗口中心 4 m 处热辐射

试验前 16 min 热辐射值不断增加, 16 min 时热辐射达到最高值 5.59 Kw/m^2 , 16 min 后热辐射急剧降低直至试验停止, 如图 12 所示。

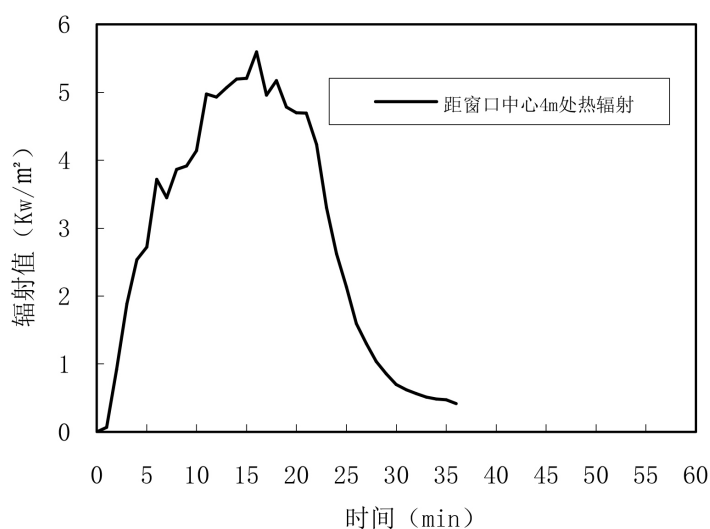


Figure 12. Thermal radiation curve at 4 m at the center of the window

图 12. 距离窗口中心 4 m 处热辐射曲线

3.5. 保温材料燃烧性能

取小样进行测试, 保温材料是密度为 $26 \text{ kg}/\text{m}^3$ 挤塑板, 氧指数为 24%。按照 GB/T 8626 中的规定, 点火时间 30 s、60 s 内焰尖高度 $F_s = 80 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm}$, 60 s 内有部分滴落物, 未引燃滤纸。

3.6. 挤塑板外墙外保温系统与挤塑板内保温系统

此前, 进行过挤塑板外墙外保温系统火灾模拟试验, 试验时墙体面层材料采用薄抹灰, 保温材料采用 B1 级挤塑板, 试验时长为 30 min。试验初期, 由于外层薄抹灰面层有着一定的阻火隔热作用, 外墙材料未出现明显的燃烧蔓延的趋势, 但随着火势发展, 薄抹灰逐渐脱落导致挤塑板直接受火开始燃烧, 随后火势逐渐加大, 火焰在外墙表面材料出现迅速的垂直蔓延趋势, 造成保温材料大面积炭化收缩发生破坏, 试验后的情况如图 13(左)所示。然而, 在本次试验中, 尽管墙体表面一层窗口上面出现过火后发黑的情况, 但试验过程中, 由于外墙混凝土结构的保护, 墙体表面并未出现大面积火焰垂直蔓延的现象, 火灾未对墙体结构产生较大影响, 本次试验后的情况如图 13(右)所示。由此可见, 与挤塑板外墙外保温系统相比, 挤塑板内保温系统具有更好的抗火性能, 极大地降低了保温系统发生火灾后的蔓延风险。

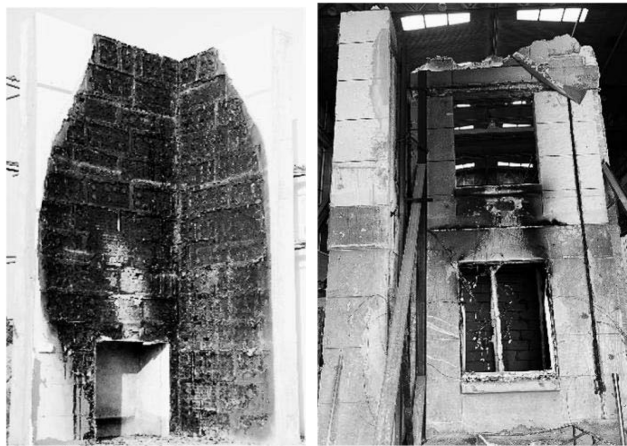


Figure 13. Condition of external wall of the external insulation system (left) and internal insulation system (right) of XPS after the test

图 13. 试验后挤塑板外墙外保温系统(左)与挤塑板内保温系统(右)情况

4. 结论与展望

4.1. 结论

- 1) 拼缝处的 MS 密封胶和 PE 棒能够起到良好的隔热作用, 阻止火焰在保温材料内部蔓延, 有效保护了内保温系统。
- 2) 在火灾初期, 窗框及木砖结构能够对内保温材料起到一定阻火隔热的保护作用, 但随着后期木砖炭化, 内保温材料逐渐受到火焰作用, 从而使内保温材料炭化收缩, 造成火焰蔓延。
- 3) 装配式夹心保温外墙板由于其结构独特性, 在保证施工工艺的条件下, 可以有效避免火灾通过外墙进行蔓延。
- 4) 与挤塑板外墙外保温系统相比, 挤塑板内保温系统具有更好的抗火性能, 极大地降低了保温系统发生火灾后的蔓延风险。

4.2. 展望

- 1) 应进一步对窗口构造进行优化, 可以采取在窗框与窗口之间设置不燃材料, 提高木砖耐火等级或使用其他替代材料等措施。
- 2) 除挤塑板外, 还可以对其他常用内保温材料, 如聚苯板、聚氨酯板、保温砂浆等进行实体火灾试

验, 这对其他材料在预制混凝土夹心保温外墙结构中的应用研究具有很大意义。

基金项目

中国建筑科学研究院有限公司建筑安全与环境国家重点实验室/国家建筑工程技术研究中心开放基金资助课题(BSBE2020-3)。

参考文献

- [1] 池启贵. 基于装配式混凝土夹心保温外墙板技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2022(10): 29-31.
- [2] 郑强. 装配式混凝土建筑深化设计及应用解析[J]. 建筑施工, 2020, 42(10): 1970-1973.
- [3] Kontoleon, K.J., Georgiadis-Filikas, K., Tsikaloudaki, K.G., *et al.* (2022) Vulnerability Assessment of an Innovative Precast Concrete Sandwich Panel Subjected to the ISO 834 Fire. *Building Engineering*, **52**, Article ID: 104479. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104479>
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9978.1-2008 建筑构件耐火试验方法 第1部分: 通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 上海市建设和交通委员会. DGJ 08-88-2006 建筑防排烟技术规程[S]. 上海: 公安部上海消防研究所, 2006.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 29416-2012 建筑外墙外保温系统的防火性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [7] 英国标准协会. BS 8414-1:2015 外包覆体系的抗火性能 第1部分: 砌体建筑外部的非承载包覆体系试验方法[S]. 伦敦: BSI 标准有限公司, 2015.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1931-2009 木材含水率测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.