

# 预制混凝土夹心保温外墙板窗口 及水平接缝防火性能实体试验研究

王聪颖<sup>1</sup>, 刘庆<sup>2</sup>, 张唯<sup>2</sup>, 周剑<sup>2</sup>, 田东<sup>3</sup>, 和静<sup>3</sup>, 任焯<sup>3</sup>, 张国来<sup>1</sup>, 卢晓岩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京城建房地产开发有限公司, 北京

<sup>2</sup>中国建筑科学研究院有限公司, 北京

<sup>3</sup>北京市建筑设计研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2023年11月18日; 录用日期: 2023年12月19日; 发布日期: 2023年12月26日

## 摘要

装配式剪力墙住宅建筑通常采用预制混凝土夹心保温外墙板, 其构造不同于传统的外保温外墙系统, 目前还缺乏针对这种夹心保温外墙板防火性能的实体试验研究。为检验夹心保温外墙板窗口防火构造做法以及墙板水平接缝的可靠性, 以某装配式建筑实验楼为对象, 开展了实体火灾试验, 结果表明预制混凝土夹心保温外墙板组成的装配式建筑外墙系统可有效避免火灾发生时, 火焰通过保温材料蔓延情况。研究结果可为装配式建筑夹心保温系统的防火能力评价及其防火构造优化提供依据。

## 关键词

预制, 外窗, 火蔓延, 防火构造, 夹心保温

# Experimental Study on the Fire Performance of Precast Concrete Sandwich Insulation External Wall Panel Windows and Horizontal Joints

Congying Wang<sup>1</sup>, Qing Liu<sup>2</sup>, Wei Zhang<sup>2</sup>, Jian Zhou<sup>2</sup>, Dong Tian<sup>3</sup>, Jing He<sup>3</sup>, Ye Ren<sup>3</sup>, Guolai Zhang<sup>1</sup>, Xiaoyan Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beijing Urban Construction Investment & Development Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing

<sup>3</sup>Beijing Institute of Architectural Design, Beijing

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 26<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 王聪颖, 刘庆, 张唯, 周剑, 田东, 和静, 任焯, 张国来, 卢晓岩. 预制混凝土夹心保温外墙板窗口及水平接缝防火性能实体试验研究[J]. 材料科学, 2023, 13(12): 1102-1113. DOI: 10.12677/ms.2023.1312123

## Abstract

Prefabricated shear wall residential buildings usually use prefabricated concrete sandwich insulation exterior wall panels, which have a different structure from traditional external insulation exterior wall systems. Currently, there is a lack of physical experimental research on the fire resistance performance of such sandwich insulation exterior wall panels. In order to test the reliability of the window fireproof structure of sandwich thermal insulation exterior wall panels and the horizontal joints of wallboards, a physical fire test was carried out on a prefabricated building. The results show that the exterior wall system of prefabricated building composed of prefabricated concrete sandwich thermal insulation exterior wall panels can effectively avoid the spread of heat insulation materials when a fire occurs. The research results can provide a basis for the evaluation of the fire prevention capability of sandwich insulation systems in prefabricated building and the optimization of their fire prevention structures.

## Keywords

Precast, External Windows, Fire Spreading, Fireproof Construction, Sandwich Insulation

Copyright © 2023 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. 前言

装配式剪力墙住宅建筑通常采用预制混凝土夹心保温外墙板,由混凝土内叶墙、保温板、混凝土外叶墙组成,即把保温板置于外墙的内、外侧墙片之间,通过专用拉结件把保温板与混凝土墙板进行连接,其中拉结件可以抵抗两片混凝土墙板之间的作用,并且可以有效避免冷热桥的发生[1]。

郑东华等[2]研究了预制混凝土夹心保温外墙板的制作工艺,从性能和造价两方面,对预制混凝土夹心保温外墙板与传统砌筑墙体进行了对比,从而体现出预制混凝土夹心保温外墙板具有良好的社会经济效益。蒋庆等[3]基于预制混凝土夹心保温外墙板的 ABAQUS 三维有限元模型,通过变参数分析方法,研究了玻璃纤维增强树脂拉结件的数量和外叶板的厚度对预制混凝土夹心保温外墙板组合性能的影响,研究成果为预制混凝土夹心保温外墙板的设计提供了一定参考。毛湘军[4]以长沙城际空间站项目为例,解析了夹心外墙板吊装施工的工艺流程,提出了相关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。

综上所述,相关学者已经对预制混凝土夹心保温外墙板的设计、制作工艺、施工技术进行了深入研究,但目前还缺乏针对预制混凝土夹心保温外墙板防火性能的实体试验研究。因此,本文以某装配式建筑实验楼为对象,开展了实体火灾试验。

装配式建筑实验楼(简称实验楼)的功能为装配式建筑结构、装修、施工技术展示。实验楼结构体系采用整体装配式混凝土剪力墙结构,其中剪力墙采用钢筋套筒灌浆连接的预制剪力墙,外墙采用夹心保温外墙板,楼板采用钢筋桁架混凝土叠合板。

选取一层南向无阳台的房间及上部二层外墙为试验对象,着火房间热释放速率峰值为 3 MW 的火源规模进行外墙窗口火试验[5] [6],模拟建筑物房间发生火灾时,可能出现的火焰沿窗口蔓延的情况。检验夹心保温外墙板窗口防火构造做法以及墙板水平接缝的可靠性,为夹心保温系统的防火能力评价及其防

火构造做法优化提供依据。

## 2. 试验对象

着火房间室内净尺寸为 4000 mm (长) × 3000 mm (宽) × 2800 mm (高)。由轻质砌块砖、防火板、型材及硅酸铝纤维棉组成,配有 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。窗台四周由铝合金型材、密封胶、木砖、保温材料、混凝土墙体等组成, 窗台通过木砖与外墙夹心保温材料连接。如图 1 所示。



Figure 1. Specimen condition before the test  
图 1. 试验前试件情况

## 3. 试验方案

### 1、温度测量

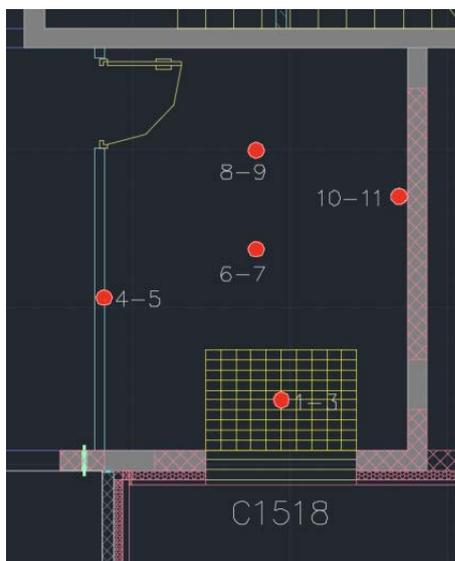
本次试验一共布置了 37 个温度测点, 采集传输实时温度, 每个测点对应唯一的温度数据。

#### 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 8 个温度测点, 依次分布距离火源 500 mm、1000 mm、1500 mm 及 2000 mm 处, 用于采集房间温度场数据。如图 2 所示。

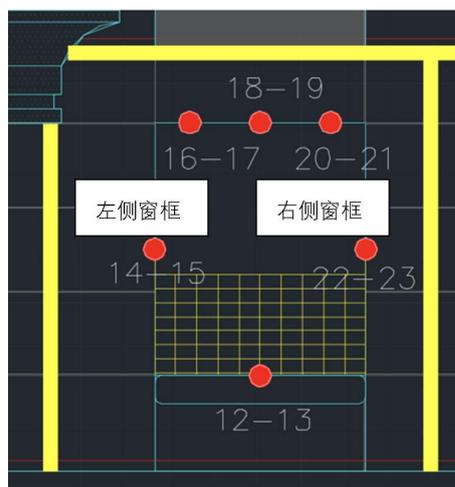
#### 2) 着火房间窗框处温度测点

为研究火灾情况下, 窗台构造做法对于四周保温材料的影响及更好的模拟室内火焰沿窗口向室外蔓延情况, 试验前, 着火房间窗户玻璃被拆除。为测量窗框及附近保温材料温度值, 在窗框四周布置 6 支测温热电偶, 在窗框与保温材料连接处布置 6 支测温热电偶。如图 3 所示。



**Figure 2.** Schematic diagram of temperature measurement points inside the fire room

**图 2.** 着火房间内部测温点示意图



**Figure 3.** Schematic diagram of temperature measurement points around the window frame

**图 3.** 窗框四周测温点示意图

### 3) 着火房间外立面接缝处温度测点

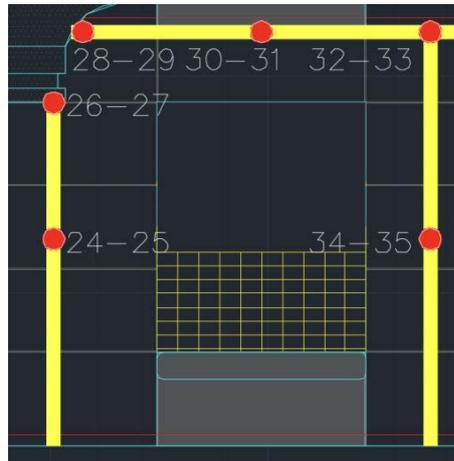
着火房间与左侧外立面拼缝处，布置 2 支测温热电偶，着火房间与左侧外立面拼缝与内部保温材料连接处布置 2 支测温热电偶；着火房间与其上二层外立面交接缝隙处布置 3 支测温热电偶，着火房间与其上二层外立面交接缝隙与保温材料交接处布置 3 支测温热电偶。着火房间与右侧外立面拼缝处布置 1 支测温热电偶；着火房间与右侧外立面拼缝与保温材料连接处布置 1 支测温热电偶。如图 4 所示。

### 4) 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。如图 5 所示。

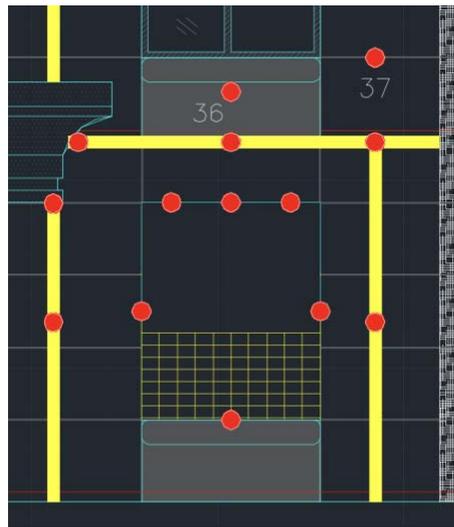
## 2、热辐射测点

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 处布置一支热流计测量辐射[7] [8]。



**Figure 4.** Schematic diagram of temperature measurement points for the joint of the first floor exterior facade

**图 4.** 一层外立面拼缝测温点示意图



**Figure 5.** Schematic diagram of temperature measurement points on the exterior facade of the second floor of the fire room

**图 5.** 着火房间二层外立面测温点示意图

### 3、试验燃烧物组成

本次试验采用木垛火作为火源，木垛尺寸为 1500 mm (长) × 1000 mm (宽) × 1000 mm (高)。燃烧物选用密度为 457.90 kg/m<sup>3</sup>，含水率为 10.13% 的木条，1000 mm (长) × 50 mm (宽) × 50 mm (厚) 短木条 150 根，1500 mm (长) × 50 mm (宽) × 50 mm (厚) 长木条 100 根，总计 250 根木条。

木条主要在窗口附近按照 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钢框架垫高，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，搭建平面尺寸为 1500 mm (长) × 1000 mm (宽) × 1000 mm (高) 的木垛。

GB/T 9978.1-2008《建筑构件耐火试验方法第 1 部分：通用要求》[9]中规定的炉温升温曲线为  $T = 345$

$\lg(8t + 1) + 20$  进行升温, 如图 6 所示。

式中: T——炉内的平均温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ ); t——时间, 单位为分钟(min)。

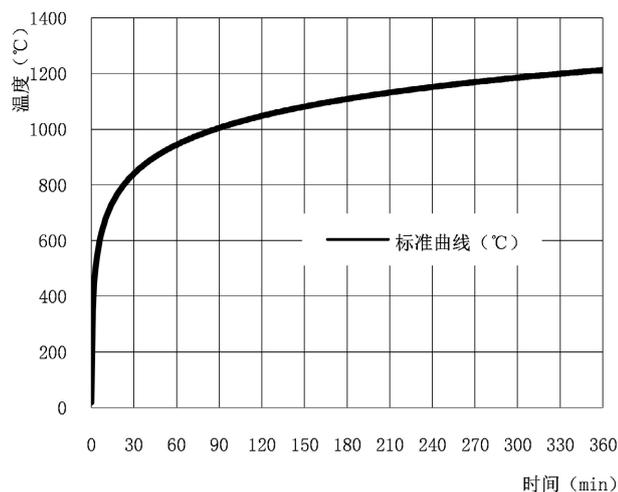


Figure 6. Standard time-temperature curve  
图 6. 标准时间 - 温度曲线

#### 4、保温材料燃烧性能

现场取少许保温材料(挤塑板)进行材料燃烧性能分析, 按照 GB/T2406.2-2009《塑料用氧指数法测定燃烧行为第 2 部分室温试验》[10]及 GB/T 8626-2007《建筑材料可燃性试验方法》[11]进行测试, 测试结果如下:

密度  $26 \text{ kg/m}^3$ , 氧指数 24%, 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。

#### 4. 试验结果及分析

本次试验测点数据如图 7~14 所示, 本试验典型照片如照片 1~7 所示。

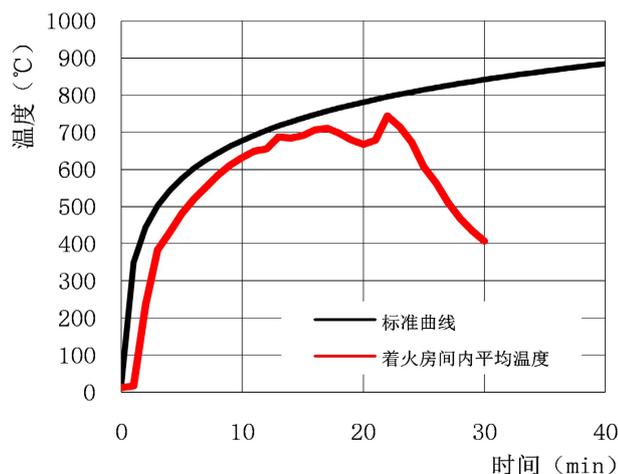
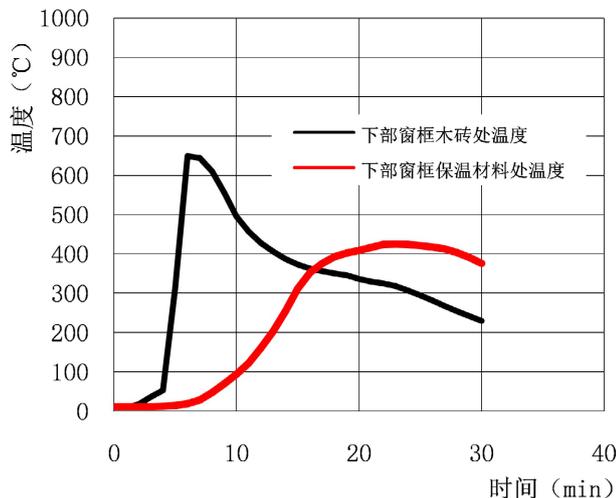


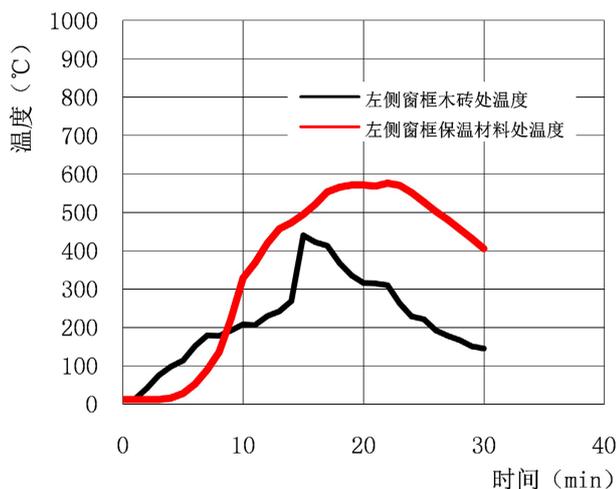
Figure 7. The average temperature inside the fire room (composed of the average temperature of 11 temperature measurement points from thermocouple 1 to thermocouple 11) curve and standard fire curve

图 7. 着火房间内部平均温度(由热电偶 1-热电偶 11, 11 个温度测点的平均温度组成)曲线及标准升温曲线



**Figure 8.** Temperature curve at the lower window frame  
**图 8.** 下部窗框处温度曲线

下部窗口处, 前 5 min, 木砖表面处温度值高于其与保温材料连接处温度值, 温度未蔓延至保温材料处; 10 min 后木砖逐渐炭化, 温度通过窗框逐渐传递至保温材料处, 保温材料处温度升高; 17 min 后, 保温材料处温度值大于木砖处温度值。下部窗框未出现破坏性损伤, 从而起到保护内部保温材料不受火焰直接作用。



**Figure 9.** Temperature curve at the left window frame  
**图 9.** 左侧窗框处温度曲线

左侧窗口处, 由于风向影响, 前 8 min, 木砖表面处温度值高于其与保温材料连接处温度值, 温度未蔓延至保温材料处, 8 min 后木砖逐渐炭化, 木砖与保温材料连接处温度升高并大于木砖表面处温度值, 窗框燃烧变形, 左侧窗框附近保温材料炭化收缩并燃烧, 火焰增大后窗框构造并未有效保护附近保温材料。试验后测量, 左侧下侧向里约 10 cm 范围内、上侧向里约 27 cm 范围夹心保温材料烧化。左侧窗口处 3 块木砖已炭化。

右侧窗口处, 由于风向影响, 木砖表面处温度值高于其与保温材料连接处温度值, 但是测点处的温度值在前 15 min 一直升高, 通过观察, 右侧框起火燃烧并发生变形, 附近保温材料也有烟气溢出, 试验至 23 min 时, 由于窗口火溢出减少, 保温材料持续燃烧, 木砖表面处温度值低于其与保温材料连接处温度值。试验后测量, 窗框右侧下侧向内约 140 mm 范围内、中上侧向内约 690 mm 范围内、上侧向内约 500 mm 范围内保温材料炭化收缩燃烧。右侧窗口处 3 块木砖已炭化。

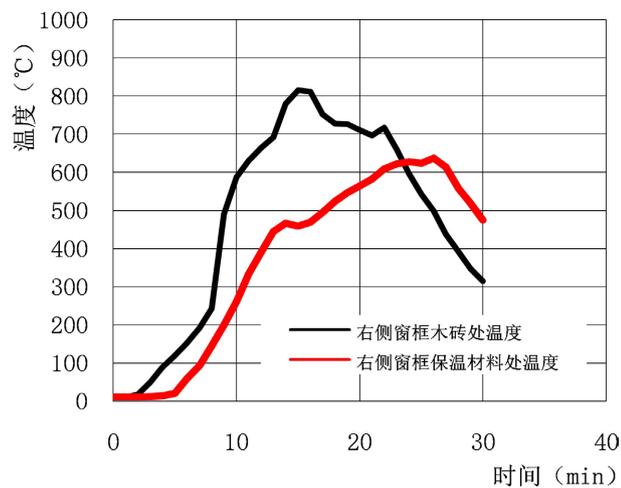


Figure 10. Temperature curve at the right window frame

图 10. 右侧窗框处温度曲线

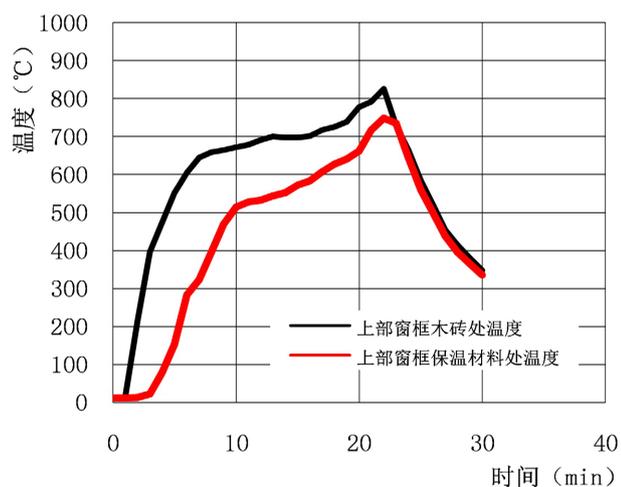


Figure 11. Temperature curve at the upper window frame

图 11. 上部窗框处温度曲线

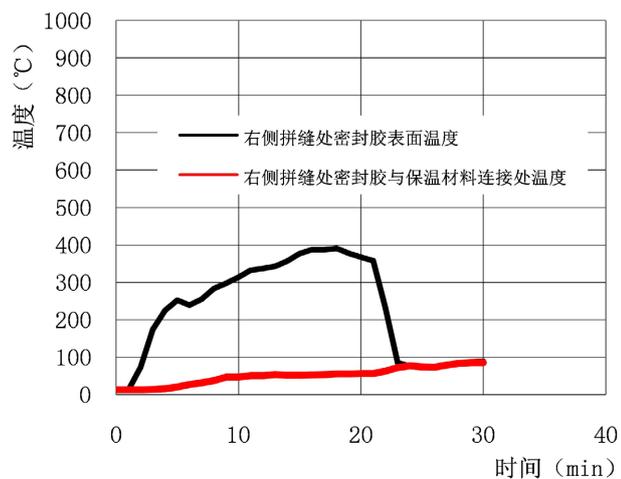


Figure 12. Temperature curve at the right joint

图 12. 右侧拼缝处温度曲线

上部窗口处，火焰一直溢出蔓延，木砖表面处温度值一直高于其与保温材料连接处温度值，但是测点处温度值一直升高，通过观察，右侧窗框起火燃烧并发生少许变形，其连接处保温材料收缩变形。

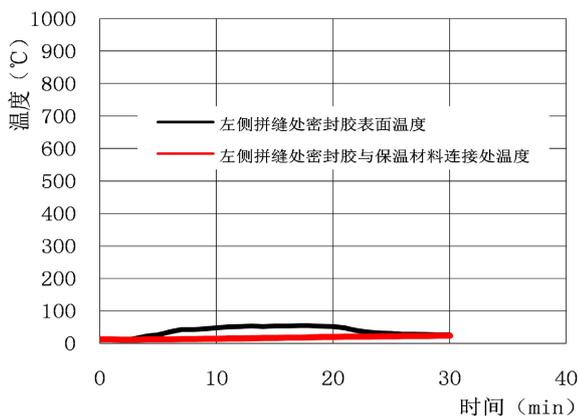


Figure 13. Temperature curve at the left joint

图 13. 左侧拼缝处温度曲线

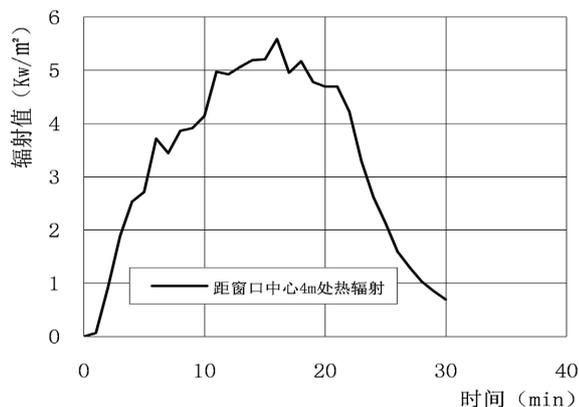


Figure 14. Radiation curve at a distance of 4 m from the center of the window

图 14. 距离窗口中心 4 m 处辐射曲线

距离窗洞口 4 m 处最大热辐射值为  $5.59 \text{ kW/m}^2$ 。



Photo 1. The placement of combustibles in the fire room before the test

照片 1. 试验前着火房间燃烧物放置情况



**Photo 2.** The wooden crib fire burned to the upper part of the first floor window (at the beginning of the test for 45 seconds)  
**照片 2.** 木垛火燃烧至一层窗口上部(试验开始 45 s 时)



**Photo 3.** The flame spread to the upper part of the second layer window (at the beginning of the test for 3 minutes)  
**照片 3.** 火焰蔓延至二层窗口上部(试验开始 3 min 时)



**Photo 4.** Flashover (at the beginning of the test for 8 minutes)  
**照片 4.** 试验轰燃情况(试验开始 8 min 时)



**Photo 5.** Condition of insulation material on the left side of the window after the test

**照片 5.** 试验后窗口左侧保温材料情况



**Photo 6.** Condition of the window wooden brick after the test

**照片 6.** 试验后窗口木砖情况



**Photo 7.** Condition of the horizontal sealant after the test

**照片 7.** 试验后水平密封胶处情况

## 5. 结论及建议

- 1) 本次试验选择 3 MW 火源功率着火房间内的平均温度场与 GB/T9978.1 标准升温曲线拟合度较高。
- 2) 窗口处构造在试验后期未能很好的起到保护保温材料的作用, 建议对窗口构造进行优化, 如在木砖表面涂刷防火涂料以提高其耐火性能, 或选择其他替代材料。

3) 各拼缝处密封胶表面起火燃烧, 但与 PE 棒连接处的保温材料基本未受到火焰影响, 拼缝处的 PE 棒和密封胶能够有效起到防止火灾蔓延的作用。

## 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] 王媛媛, 葛强, 孔令义, 等. 装配式夹心混凝土保温外墙板应用技术[J]. 住宅与房地产, 2021(14): 22-23.
- [2] 郑东华, Rk Pradhan. 预制混凝土夹心保温外墙板性价比分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(13): 199-200.
- [3] 蒋庆, 陈明, 种迅, 冯玉龙. GFRP 拉结件预制混凝土夹心保温外墙板的数值模拟和组合性能分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2021, 44(10): 1363-1369.
- [4] 毛湘军. 预制混凝土夹心保温外墙板施工项目应用研究[J]. 住宅产业, 2023(7): 83-86.
- [5] 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]. 秦皇岛: 中国标准出版社, 2012.
- [6] British Standards Institution, BS 8414-1:2015 (2015) Fire performance of external cladding systems—Part 1: Test Method for Non-Load Bearing External Cladding Systems Applied to the Masonry Face of a Building. BSI Standards Limited, London.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50016-2014 (2018 版). 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部、国家市场监督管理总局. GB 55037-2022. 建筑防火通用规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [9] 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]. 秦皇岛: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 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 2406.2-2009. 塑料用氧指数法测定燃烧行为 第 2 部分: 室温试验[S]. 秦皇岛: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 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 8626-2007. 建筑材料可燃性试验方法[S]. 秦皇岛: 中国标准出版社, 2007.