

高层幕墙防火性能优化与结构改造 协同设计研究

亓予坤¹, 赵博宇²

¹大连交通大学远交大交通学院, 辽宁 大连

²齐鲁工业大学能源与动力工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

随着城市化进程加速, 高层建筑幕墙因兼具功能性与美观性被广泛应用, 但其空腔结构易引起“烟囱效应”, 导致火灾快速蔓延, 其火灾安全隐患日益凸显。本文结合国内外规范差异, 通过材料性能与层间防火设计对比, 提出防火材料选型标准与分隔方式优化方案, 为高层幕墙安全设计与改造提供科学依据。

关键词

高层建筑幕墙, 防火性能优化, 结构改造, 层间防火分隔, 数值模拟

Research on Collaborative Design of Fire Performance Optimization and Structural Retrofit for High-Rise Building Curtain Walls

Yukun Qi¹, Boyu Zhao²

¹Far Eastern Jiaotong University School of Transportation, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

²School of Energy and Power Engineering, Qilu University of Technology, Jinan Shandong

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization, high-rise building curtain walls have been widely adopted for their functional and aesthetic advantages. However, their cavity structures are prone to the

“chimney effect”, leading to rapid fire spread and increasingly prominent fire safety risks. This study compares material performance and inter-floor fire compartmentation designs based on discrepancies between domestic and international codes. It proposes fire-resistant material selection criteria and optimization schemes for fire compartmentation methods, providing scientific guidance for the safety-oriented design and retrofitting of high-rise curtain walls.

Keywords

High-Rise Building Curtain Walls, Fire Performance Optimization, Structural Retrofit, Inter-Floor Fire Compartmentation, Numerical Simulation

Copyright © 2025 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

随着时代的发展和人们的需要,高层建筑幕墙应具有透光性、美观性、保暖等优势被广泛应用,超高层建筑的数量也不断增多,而火灾安全隐患日益凸显,据统计我国既有幕墙建筑中约 35% 存在火灾隐患。幕墙与实体外墙之间存在空腔,存在着空腔烟囱效应,尤其是超高层建筑,楼层越高,空腔效应越明显,火灾隐患更为严峻。但目前我国幕墙防火系统设计仍以被动性方法为主,研究时间较短,防火方法单一,存在较大改进空间。施工人员技术参差不齐、政策短缺等问题。因此本文通过软件模拟,测试高层幕墙选用材料和层间防火设计合理性,系统评估幕墙隔热材料与玻璃的防火性能,其次是优化层间防火分隔设计,填补国内研究空白。

2. 文献综述

目前我国现行规范对既有幕墙改造缺乏针对性条款,相较于国外规范,国内研究还有很多不足。尤其在材料协同应用与检测技术方面亟待完善,比如《既有建筑幕墙改造技术规范》(JGJ/T 397-2012) [1] 虽然专门针对既有幕墙改造,但内容较为笼统,缺乏具体操作细节,尤其是在材料选择结构评估和施工工艺方面,相较于国际标准还是有很大差距。如美国标准(ASTM E2431-12) [2] 有专门针对幕墙的评估设计和施工,如以 7.3.2 条为例,详细规定了既有幕墙改造的材料选择标准,特别对于节能材料的要求。对于欧洲标准(EN 13830:2015) [3] 第 6.3.2 条,规定了既有幕墙改造中的节能性能的提升要求,特别是对隔热材料和玻璃性能的具体指标,虽然近些年来。国内的规范有了很大改进。但是仍存在很多不足,对于幕墙材料的使用方面,《建筑幕墙工程技术规范》(JGJ 102-2016) [4] 材料更新要求中,第 5.3.2 条提出改造中采取符合现行标准的新材料,但对既有材料的与新材料的协同使用技术并未说明。对于检测报告方面的要求,《建筑幕墙工程检测技术标准》(JGJ/T 324-2021) [5] 第 5.2.3 条规定报告需包含改造建议但未明确与设计方案的衔接机制。规范存在不足,检测方法仍是以传统手段为主,如目击法,敲击法等。综上,国内规范存在三方面缺陷: 1) 材料标准模糊,未规定新旧材料协同使用技术; 2) 检测手段滞后,仍依赖目测敲击等传统方法; 3) 防火设计薄弱,缺乏层间防火系统性解决方案。基于上述问题,本文针对国内幕墙防火研究的不足,重点开展以下工作: 首先,对常见隔热材料和玻璃性能进行数据模拟研究,以弥补国内在幕墙材料性能研究方面的空白; 其次,对层间防火设计方法进行深入探讨,提出优化方案。通过本研究,旨在推动我国幕墙防火技术的进步,为高层建筑幕墙的安全设

计提供科学依据。

3. 研究方法

3.1. 防火材料选择

防火材料运用不当以及材料管理不到位, 是造成幕墙火灾不可控的原因之一。2017年6月14号位于英国伦敦西区高楼公寓楼格兰菲尔塔24层公寓大火发生火灾, 火灾造成79人死亡。经事故调查发现该起火建筑幕墙使用的是。经事故调查发现, 该起火建筑幕墙使用的是聚乙烯-铝塑复合板外墙贴面, 仅15 min, 火灾就从最初着火的2层烧到了24层材料选择方面该工程没有对各项防火材料的性能与应用原则进行充分利用使防火材料难以在火灾中发挥真实作用[6]。因此我们要充分了解幕墙防火材料的性质。才能在幕墙防火设计中充分利用防火材料的功能。在不同的环境中选择适合的防火材料。考虑材料的燃烧性能等级是一个很重要的衡量标准。根据GB 8226《建筑材料及制品燃烧性能分级》文件[7], 建筑材料及制品燃烧性能等级分成A级(不可燃材料)、B1级(难燃材料)、B2级(可燃材料)、B3级(易燃材料), 幕墙防火材料的选择必须严格符合技术规范和安全标准, 高层幕墙建筑必须选用A级或B1级。针对高层建筑的特点如火灾疏散难度大、高度大、风压的影响选择材料, 所以高层幕墙建筑阻燃材料应选用矿物质防火板, 这种材料阻燃等级为A1, 其阻燃性能能够确保火灾发生时能够有效阻止火势蔓延, 在1000℃高温下可以保持结构稳定超过两小时。玻璃幕墙是所有幕墙中应用最广泛的, 但并不是所有材质的玻璃都适合做玻璃幕墙。不同玻璃的防火性存在一定的差异。对于高层建筑幕墙防火玻璃应选择钢化防火玻璃, 这种玻璃在高达1000度的温度下能保持完整性达120分钟, 其热辐射系数不超过 $5.7 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$ 这样就可以极大地减少火灾蔓延的风险[8]。常用的高层幕墙防火材料还有岩棉, 根据GB/T 25975《建筑外墙外保温用岩棉制品》[9]岩棉条的导热系数(平均温度25°)应不大于 $0.046 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 应符合GB 8624-2012中5.1.1中A1级材料(不可燃材料)的要求, 成本适中, 防火性能优异, 目前做层间防火封堵和幕墙空腔填充最常见的材料之一。岩棉吸水性较强, 在长期使用过程中很容易发霉, 使防火效果大大减弱, 在使用过程中应该搭配防水措施。

3.2. 层间防火分隔方式对比

幕墙防火常见的方法为层间防堵, 其原理是防堵幕墙与建筑主体空腔, 空腔类似烟筒一样的垂直通道, 层间防堵烟可以抑制烟筒效应。防堵材料要设置不可燃材料的阻隔带进行层间防火。为了验证层间防火不同分隔方式的合理性, 本文采取了数据模拟的方法, 选用了三种不同的层间防火分隔方式。分隔方式一是, 在楼层从间隙上沿设置780 mm不可燃岩棉。分隔方式二是在楼层间隙中嵌入780 mm不可燃岩棉。分隔方式三是在楼层从间隙下沿设置780 mm不可燃岩棉层间塞。由于实际情况超高层建筑幕墙防火试验过于困难, 我们模拟高层建筑模型试验装置, 共设有6层, 高度为宽度为15米, 进深为8米。高度为20米, 墙板厚度为120毫米。模型背面设置为6 mm厚玻璃幕墙面, 正面未设置(如下表1~3所示)。

Table 1. Separation method

表 1. 分隔方式

分隔方式一	在楼层从间隙上沿设置780 mm不可燃岩棉
分隔方式二	在楼层间隙中嵌入780 mm不可燃岩棉
分隔方式三	在楼层从间隙下沿设置780 mm不可燃岩棉层间塞

Table 2. Model condition

表 2. 模型条件

模拟房间尺寸(宽 × 进深 × 高)	20 × 10 × 8
模拟房间面积	200 m ²
房间层数	6 层

Table 3. Reference for model flame design

表 3. 材料设置参数

材料类型。	密度	比热容	导电率	吸收系数	发射率
岩棉层间塞	100 kg/m ³	0.841 KJ/(kg·k)	0.04 W/(m·k)	100.01 1/m	0.9
钢化玻璃(幕墙)	2500 kg/m ³	0.84 KJ/(kg·k)	0.8 W/(m·k)	1.0E+5 1/m	0.85

模型火焰设计参考如下:

T2 火灾热释放速率应按下式计算:

$$Q = a \cdot t^2$$

式中: Q——热释放速率(kW)

t——火灾增长时间(s)

a——火灾增长系数(按表取值) (kW/s²)

火灾热释放速率 $q = Q/S$, S——火源面积

根据《建筑防烟排烟系统技术标准 GB 51251-2017》该幕墙建筑模拟应用场所为办公室, 因此按照如图, 该场所火灾达到稳态时的热释放速率为 $Q = 6.0\text{MW}$ 。火灾增长类型为快速火。火灾增长系数 $\alpha = 0.0469$ (KW/s²), 火源面积为 200 m²。根据理论公式可得 $q = 30 \text{ KW/m}^2$, $t = 357.67 \text{ s}$ 。

模拟实验原理及方法:

玻璃在火灾热载荷过程中, 玻璃导热性比较差, 高温热量无法快速从背面传被火面传导到受火面。使玻璃表面形成一定的温度差, 受热不均产生破裂和脱落等现象, 形成新的火焰蔓延通道, 在溢出火焰的高温加热下, 上层外窗也会发生破裂和脱落, 火焰进入 2 层引燃 2 层可燃物。如沙发窗帘等形成纵向火蔓延。在玻璃产生脱落的过程中, 会产生较大开口, 形成新的火蔓延通道。

工程常采用玻璃破裂时引火面的环境温度作为玻璃破裂的判定条件。根据应急管理部天津消防研究所对钢化玻璃在火灾中破碎的情况的试验研究成果, 6 毫米厚的双层中空钢化玻璃破裂脱落时的迎面火环境温度在 600℃ 以上。8 毫米厚的双层夹胶钢化玻璃破裂脱落时迎面火环境温度最低温度在 530℃ 以上 [10]模型设置了六所以判定幕墙层间防火的作用效果, 在模型玻璃幕墙迎面火面设置热电偶即探测点。我们在高层幕墙模型中设置了 14 个探点, 测试内容为所在点的温度(如下表 4 所示)。

Table 4. The specific location of the measurement point

表 4. 测点具体位置

	温度探测点(Devices)编号	温度探测点具体方位
一层	1	一层下部
	2	一层上部
二层(着火层)	5	二层下部
	6	二层上部

续表

三层	7	三层下部
	8	三层上部
四层	9	四层下部
	10	四层上铺
五层	11	五层下部
	12	五层上部
六层	13	六层下部
	14	六层上部
二层	3	一层玻璃幕墙内侧
	4	一层玻璃幕墙外侧

4. 结果与讨论

4.1. 层间防火分隔效果对比

根据不同分隔方式测点温度分布情况, 火灾模拟烟气蔓延程度, 玻璃幕墙迎火面和背火面温差来分析。

对于分隔方式一(在楼层从间隙上沿设置 780 mm 不可燃岩棉), 一层下部探点温度最高, 探点 2 最高温度在 510℃, 平均温度为 480℃。幕墙被火面测点平均温度为 100℃, 幕墙受火面测点平均温度为 250 摄氏度, 两者差值低于钢化玻璃受热破裂的最低温度。除此以外, 其他楼层温度变化不明显, 大致为常温 20℃。在模拟火灾动画中, 烟气蔓延不明显, 烟气主要集中于着火层, 上部下部无明显的烟气蔓延现象(如下图 1~4 所示)。

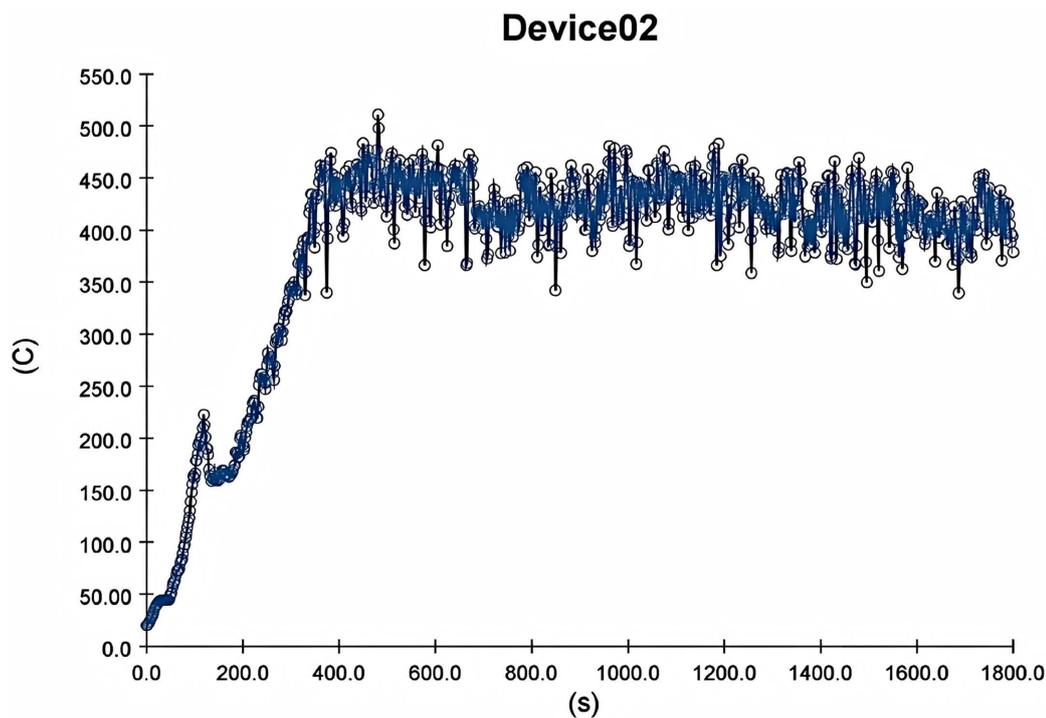


Figure 1. Device02 temperature map

图 1. 探测点 02 温度图

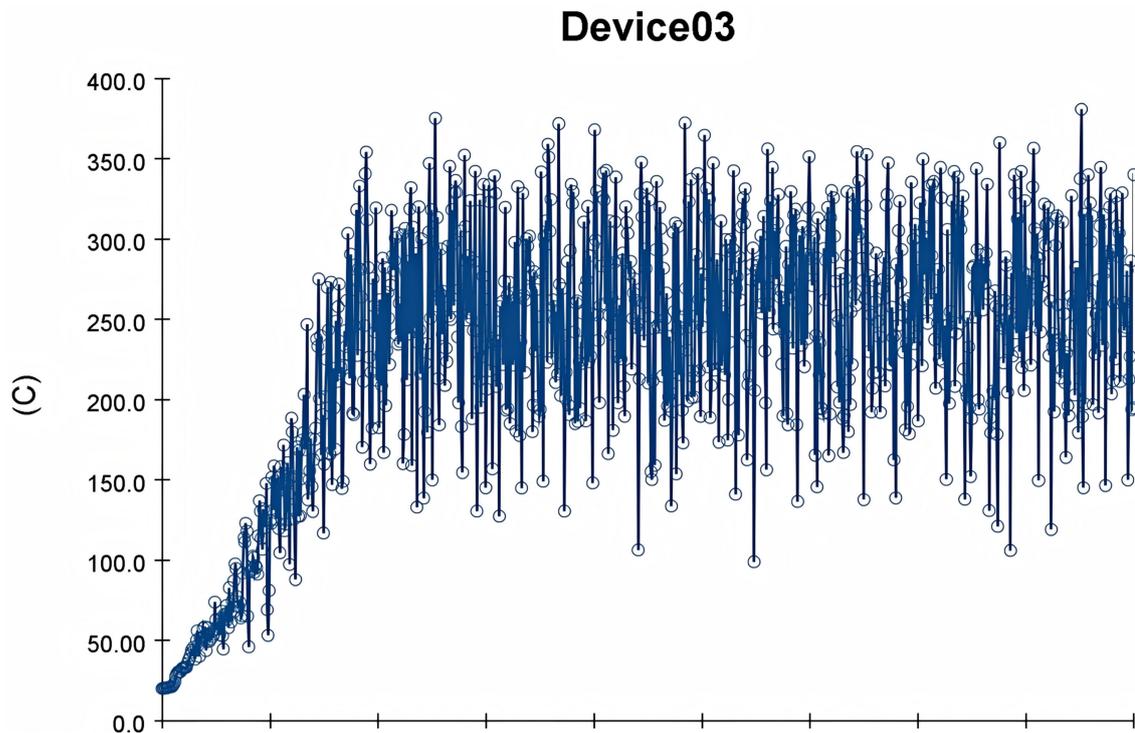


Figure 2. Device03 temperature map
图 2. 探测点 03 温度图

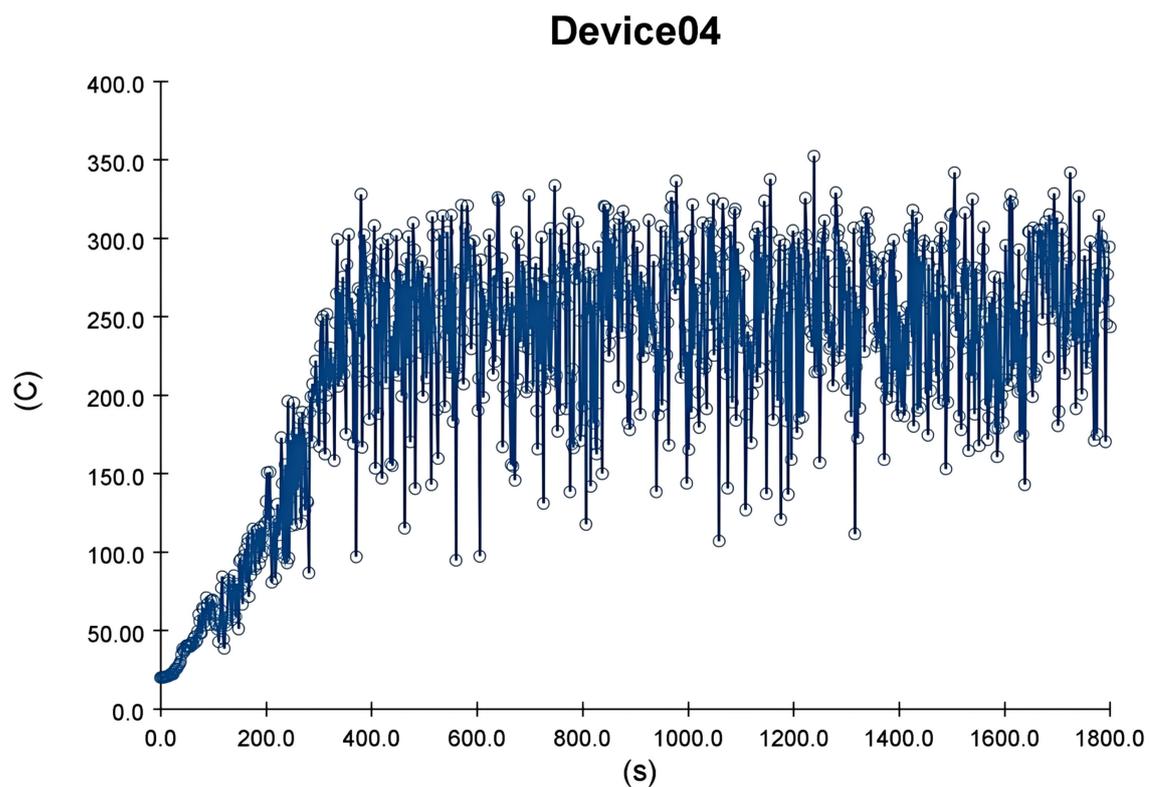


Figure 3. Device04 temperature map
图 3. 探测点 04 温度图

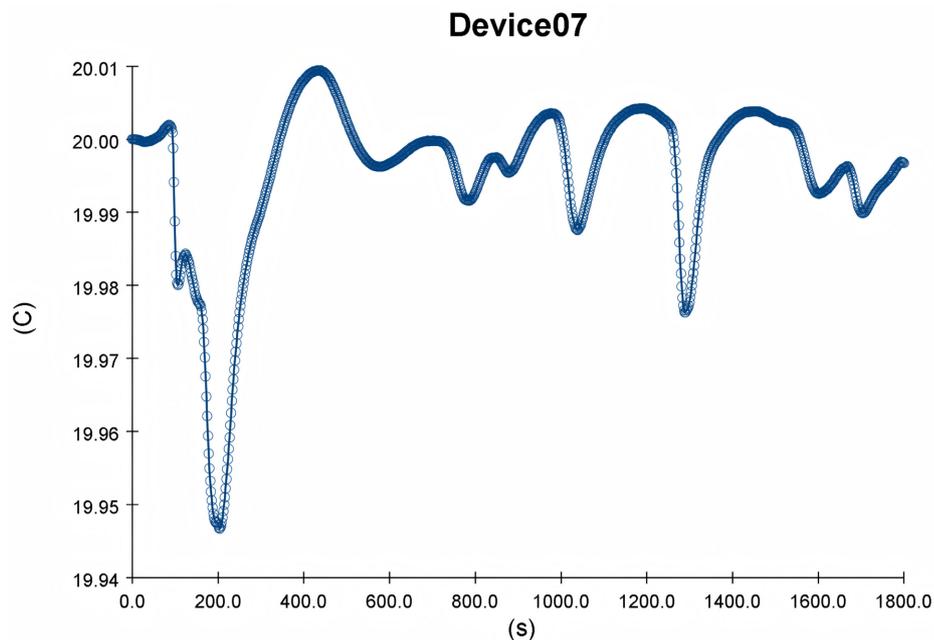


Figure 4. Device07 temperature map
图 4. 探测点 07 温度图

对于分隔方式二(在楼层间隙中嵌入 780 mm 不可燃岩棉), 着火层下部探点最高。探点 5 温度最高探点最高温度为 450℃, 平均温度为 300℃。幕墙被火面测点温度为常温, 测点 3 最高温度为 400℃, 两者差值低于钢化玻璃受热破裂的最低温度。三层玻璃幕墙下侧侧点最高温度达 65℃, 平均温度在 60℃, 4 层玻璃幕墙下侧测点平均温度在 60℃浮动, 5 层 6 层温度均在 40℃以上。在模拟火灾动画中, 烟气蔓延不明显, 烟气主要集中于上部即着火层以上部分, 下部蔓延不明显(如下图 5~7 所示)。

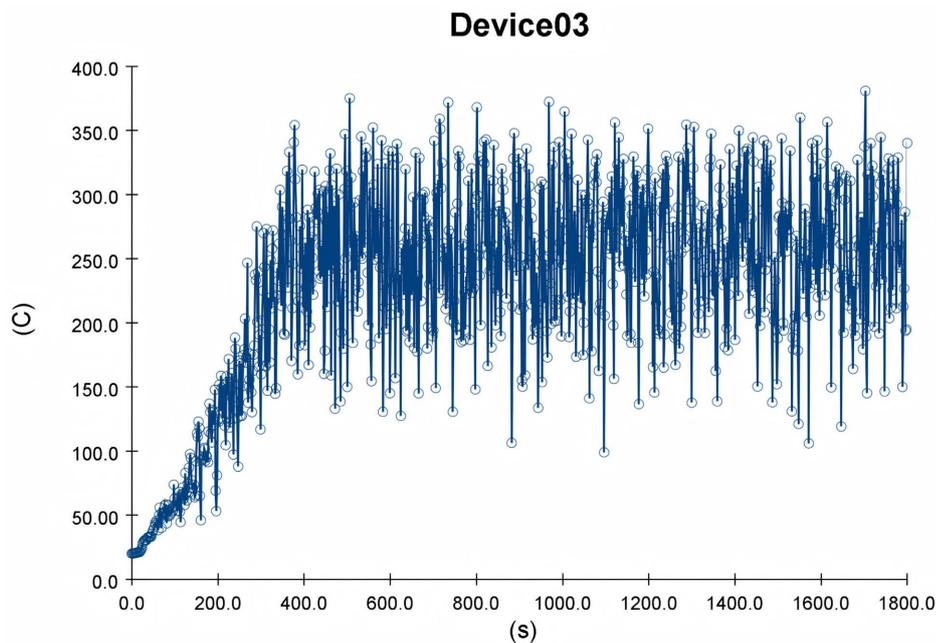


Figure 5. Device03 temperature map
图 5. 探测点 03 温度图

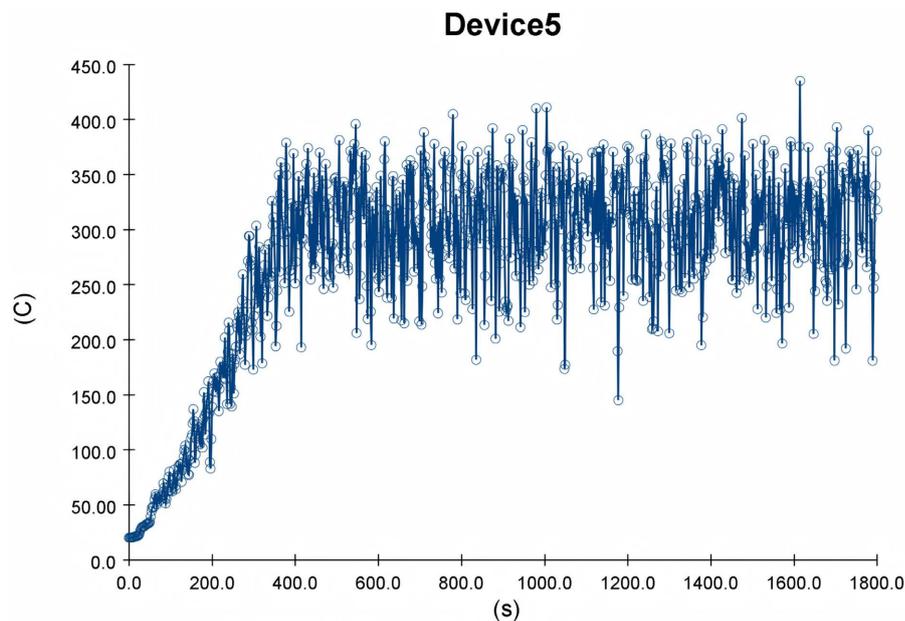


Figure 6. Device5 temperature map
图 6. 探测点 5 温度图

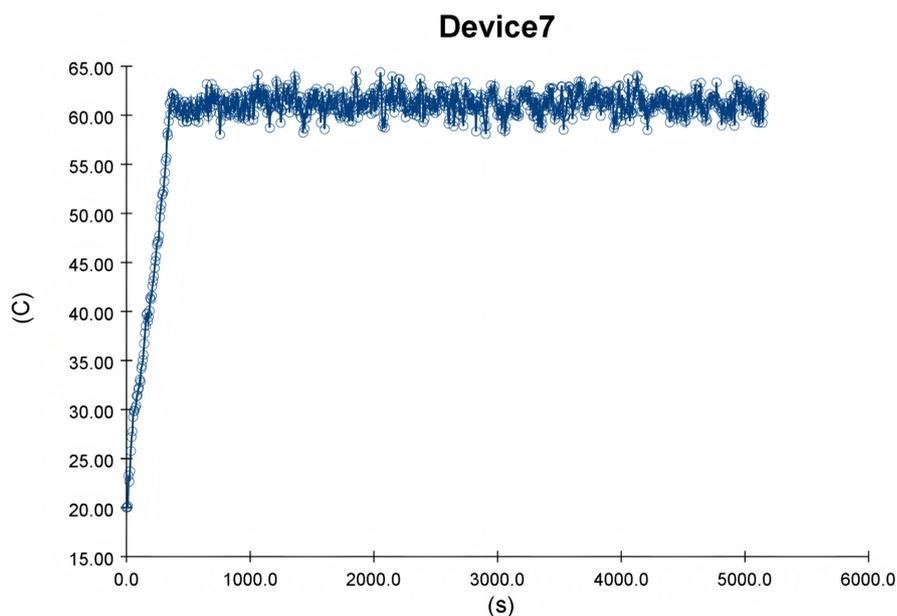


Figure 7. Device7 temperature map
图 7. 探测点 7 温度图

对于分隔方式三(在楼层从间隙上沿设置 780 mm 不可燃岩棉), 最高温度探测点 2 位于一层, 最高温度在 600°C, 在 510°C 浮动。玻璃幕墙受火面测点 3 最高温度为 500°C, 背面测点 4 最低温度为 40°C, 低于钢化温度受热破裂的最低温度, 存在破裂风险。着火层玻璃幕墙下部温度在 450°C 浮动, 最高温度为 550°C, 上部温度在 300°C 浮动, 最高温度为 400°C。三层幕墙下部平均温度为 20°C, 其他楼层平均温度在 20°C 左右, 为常温, 其他楼层温度变化不明显。在火灾模拟动画中。烟雾蔓延不明显, 着火层及着火层下层烟雾较为严重(如下图 8~14 所示)。

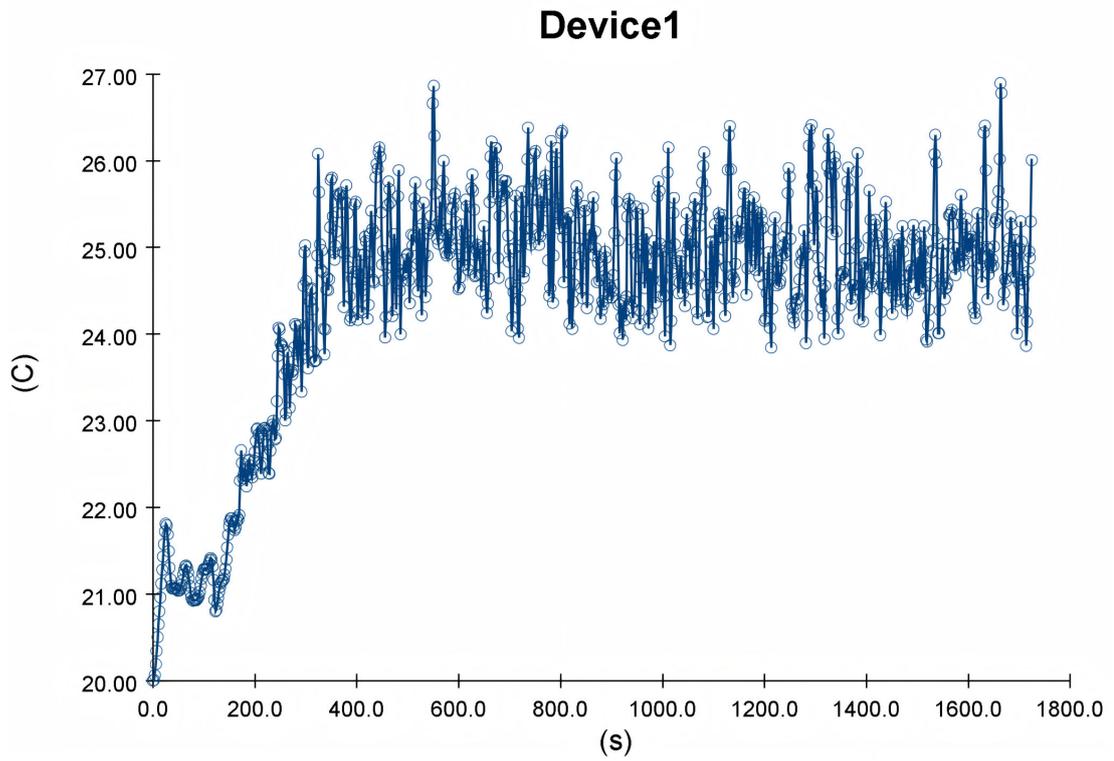


Figure 8. Device1 temperature map
图 8. 探测点 1 温度图

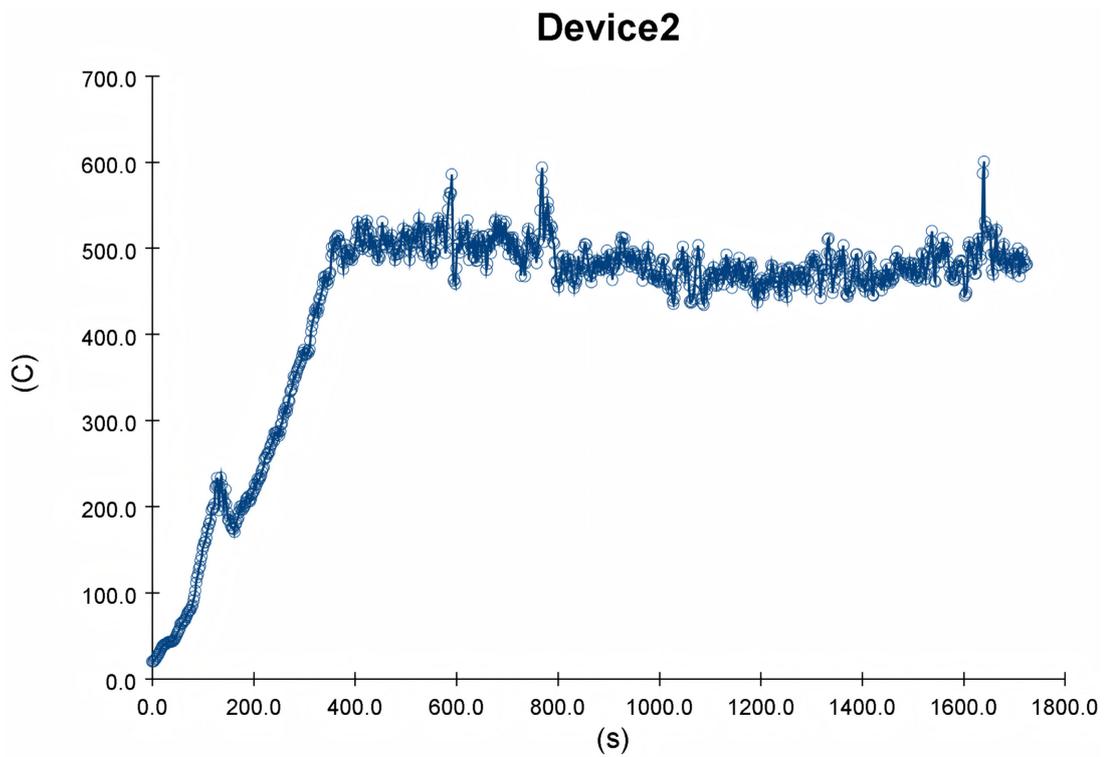


Figure 9. Device2 temperature map
图 9. 探测点 2 温度图

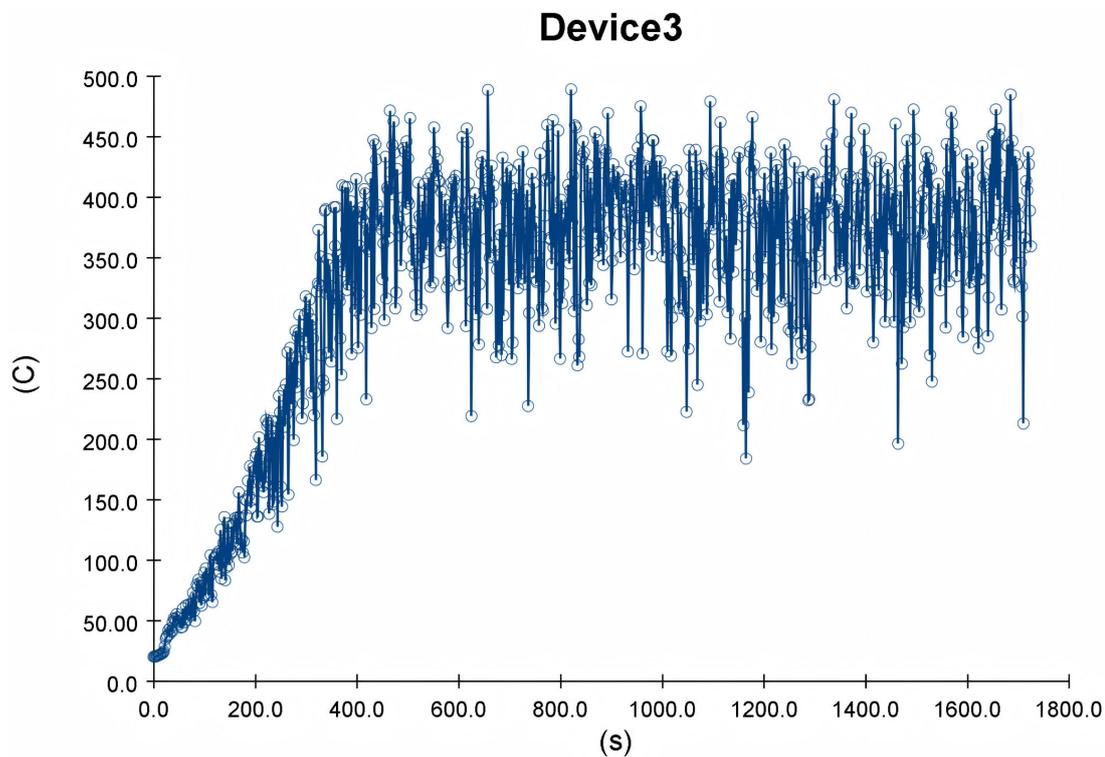


Figure 10. Device3 temperature map
图 10. 探测点 3 温度图

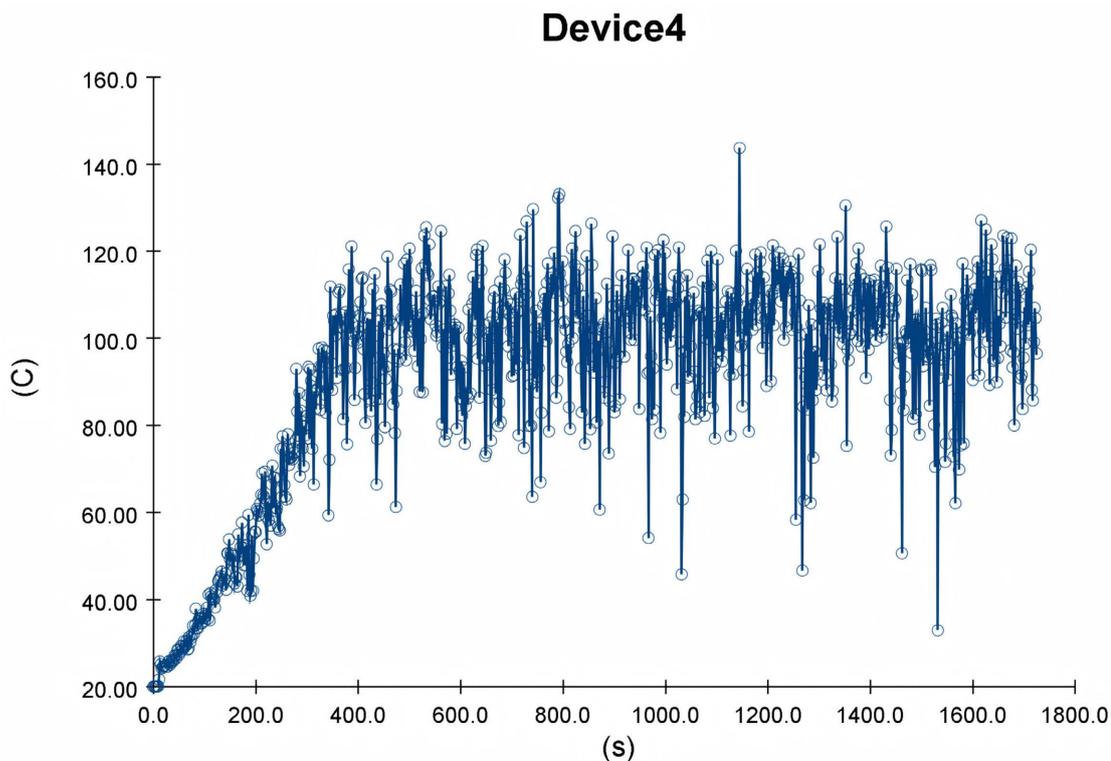


Figure 11. Device4 temperature map
图 11. 探测点 4 温度图

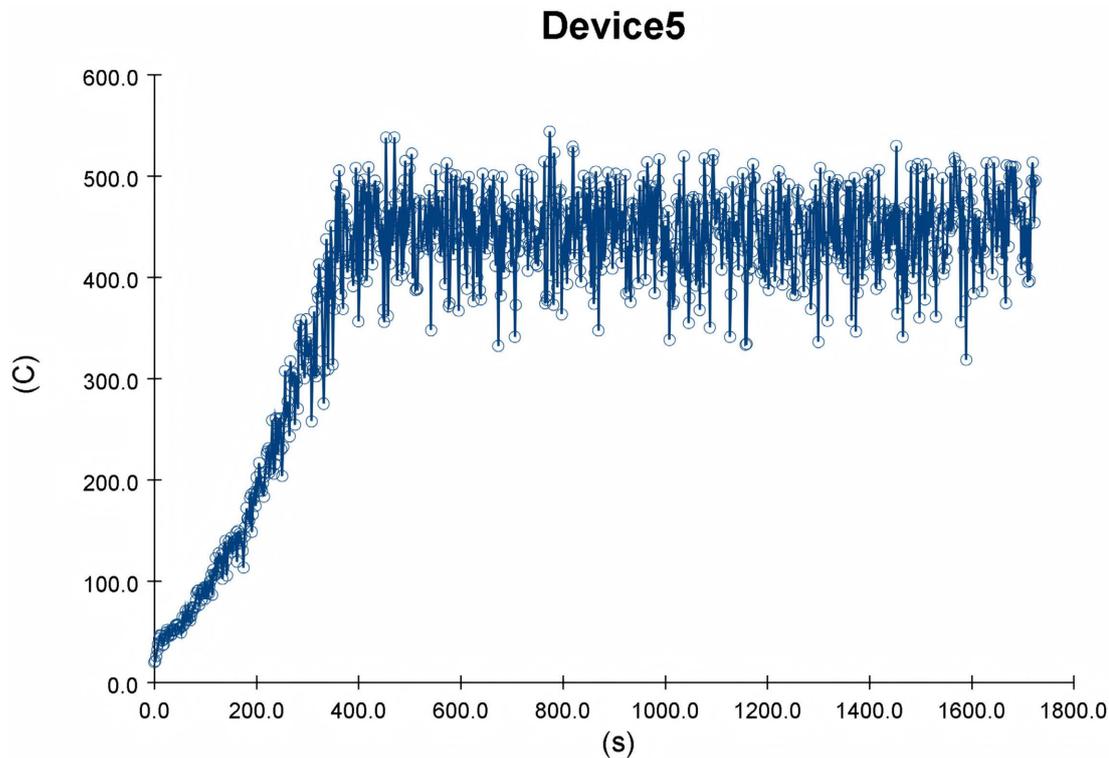


Figure 12. Device5 temperature map
图 12. 探测点 5 温度图

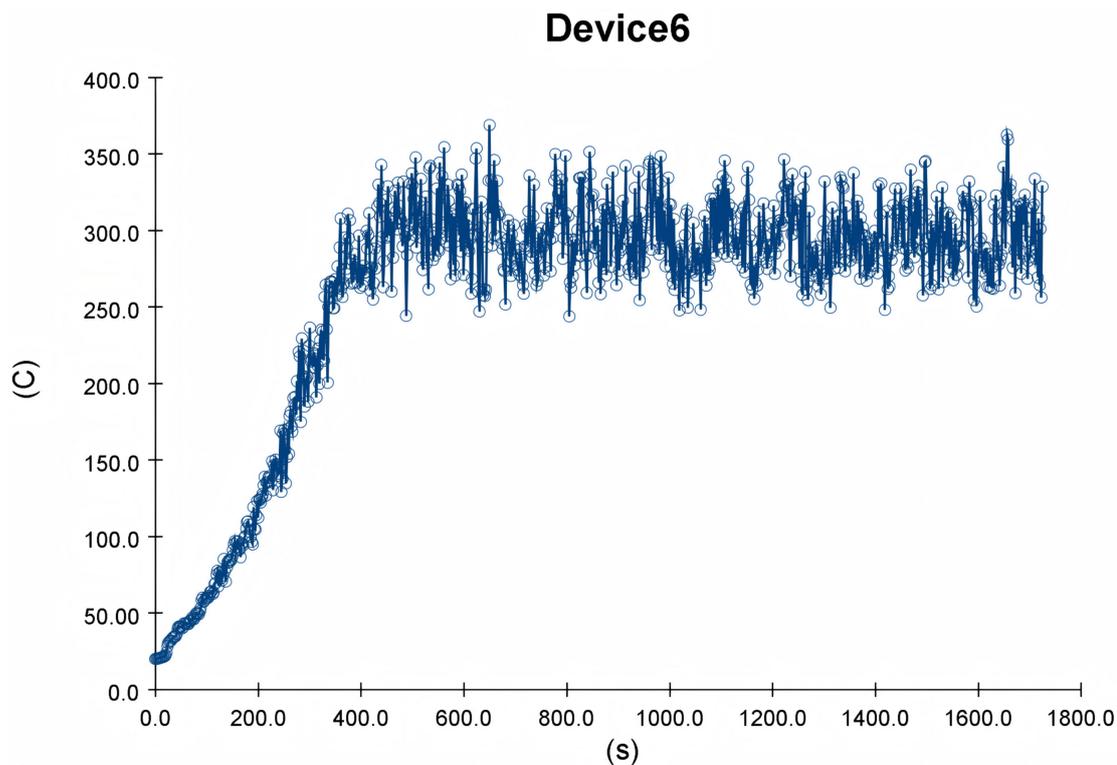


Figure 13. Device6 temperature map
图 13. 探测点 6 温度图

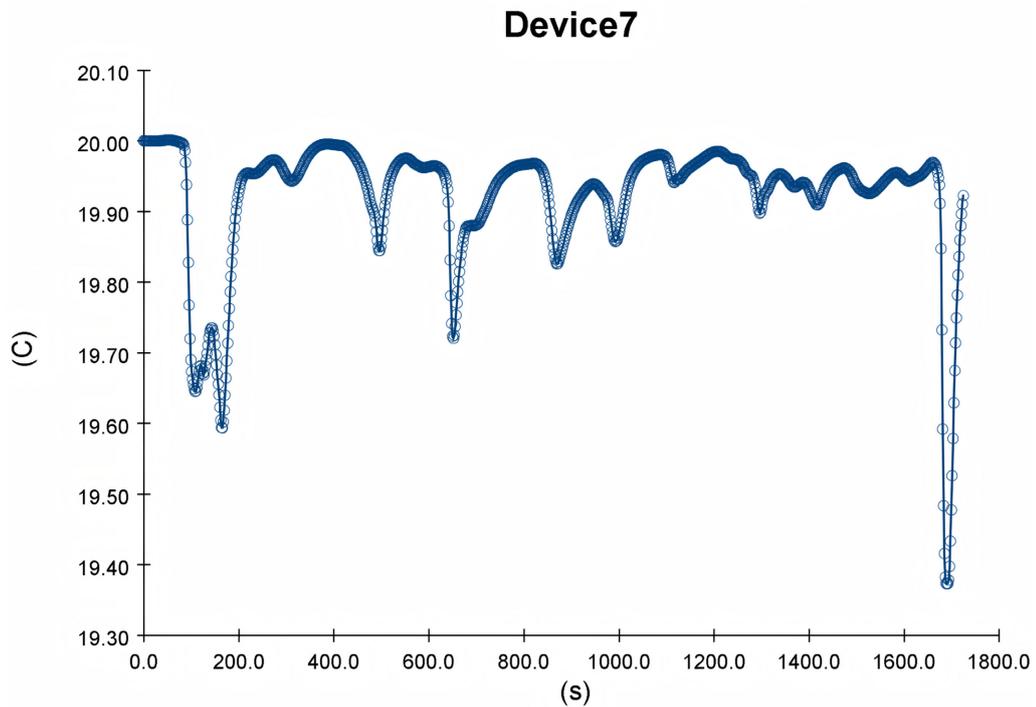


Figure 14. Device7 temperature map
图 14. 探测点 7 温度图

模拟总结:

分隔方式一: 上沿设置 780 mm 岩棉层间塞

结果: 烟气集中于上层, 结构稳定性高, 但向下阻隔效果弱

分隔方式二: 楼层间隙嵌入防火材料

结果: 着火层温度最高 510°C, 背火面温差 < 破裂阈值(530°C), 但下层玻璃易破裂

分隔方式三: 下沿设置 780 mm 岩棉层间塞

结果: 背火面温差达 460°C, 玻璃破裂风险显著增加(如下表 5 所示)

Table 5. Performance comparison of separation methods
表 5. 分隔方式性能对比

分隔方式	最高温度(°C)	烟气蔓延范围	结构稳定性
方式一	510	最小	高
方式二	450	局部	一般
方式三	600	中等	低

4.2. 防火材料性能分析

在火灾模拟动画中显示, 岩棉层间塞与钢化防火玻璃在高温下可保持结构稳定大于 1 小时, 显著降低火势蔓延风险。岩棉虽防火性能优异, 但需配合防水措施以避免吸湿失效。

5. 结论

- 1) 优先选用 A 级矿物质防火板与钢化防火玻璃, 严控材料燃烧性能;

2) 分割方式一(上沿岩棉塞)综合表现最优, 可有效抑制烟囱效应并维持结构稳定。方式一阻隔烟雾的性能较强, 烟雾蔓延范围小; 因受热膨胀影响小, 上沿岩棉层间塞的结构更稳定, 但是对于向下的温度阻隔效果差, 容易造成着火层下层玻璃幕墙破裂, 所以需优化向下热阻隔。

3) 对于新建建筑, 应尽量采用分隔方式一(上沿岩棉塞)并搭配竖向防火分区设计, 每层增设一道横向防火屏障。

对于既有建筑改造优先, 可以采用红外热成像技术或无人机检测技术测空腔密封性, 对失效岩棉进行原位更换, 并增补防火板覆盖层。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部建筑制品与构配件标准化技术委员会. JGJ/T 397-2012 既有建筑幕墙改造技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] ASTM International (2012) ASTM E2431-12-Standard Practice for Determining the Resistance of Single Glazed Annealed Architectural Flat Glass to Thermal Loads. ASTM International.
- [3] European Committee for Standardization (2015) EN 13830: 2015-Curtain Walling-Product Standard. CEN.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ 102-2016 建筑幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 324-2021 建筑幕墙工程检测技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [6] 尹传山, 李廷江. 建筑幕墙防火材料的选择及防火要点分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(10): 53-55.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 8226-2006 建筑材料及制品燃烧性能分级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [8] 裴耀宗. 建筑幕墙防火材料选择及研究要点[J]. 居舍, 2024(10): 45-47.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 25975-2010 建筑外墙外保温用岩棉制品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [10] 叶超, 路世昌, 黄益良. 超高层建筑玻璃幕墙层间防火数值模拟研究[C]//中国消防协会. 2023 中国消防协会科学技术年会论文集——二等奖. 2023: 5.