

气凝胶复合外墙保温板数值模拟研究

韩书伟, 苏 峰, 马 彬, 李 智

北京建工新型建材有限责任公司, 北京

收稿日期: 2025年12月10日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月19日

摘 要

针对近零能耗建筑外墙保温“薄层高效”需求与老旧小区改造空间占用痛点, 本研究以二氧化硅气凝胶复合保温板为对象, 采用Abaqus有限元软件构建建筑外墙保温体系三维热传导模型, 系统分析其温度场分布、热流传递特性, 并与传统XPS保温板进行性能对比, 结合试验验证模型可靠性。结果表明: 40 mm厚气凝胶复合板与100 mm厚XPS板保温效能相当, 平均热流密度仅 2.1 W/m^2 (XPS为 5.3 W/m^2), 热流减少率达60.4%, 空间占用率降低60%; 芯材厚度分析显示, 气凝胶芯材厚度对保温性能影响最显著(敏感性系数0.78); 模拟值与试验值相对误差 $\leq 5.3\%$, 模型精度满足工程要求。本研究为气凝胶复合保温板的结构优化与工程应用提供了精准数值支撑。

关键词

气凝胶复合保温板, Abaqus数值模拟, 热传导特性, 保温性能, 试验验证

Numerical Simulation Study on Aerogel Composite Exterior Wall Insulation Board

Shuwei Hang, Feng Su, Bin Ma, Zi Li

BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., Beijing

Received: December 10, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 19, 2026

Abstract

Aiming at the “thin-layer and high-efficiency” demand for external wall insulation of near-zero energy buildings (NZEBS) and the space occupation constraint in the renovation of old residential districts, this study focuses on SiO_2 aerogel composite insulation boards. A three-dimensional heat transfer model of the building external wall insulation system was established using Abaqus finite element software to systematically analyze its temperature field distribution and heat flux transfer characteristics. Performance comparison with traditional XPS insulation boards was conducted,

and the model reliability was verified through experiments. The results show that a 40mm-thick aerogel composite board achieves thermal insulation efficiency equivalent to a 100 mm-thick XPS board, with an average heat flux density of only 2.1 W/m² (5.3 W/m² for XPS), a heat flux reduction rate of 60.4%, and a 60% decrease in space occupation. Analysis of the core layer thickness indicates that the thickness of the aerogel core layer has the most significant impact on thermal insulation performance (sensitivity coefficient: 0.78). The relative error between the simulation results and experimental data is ≤5.3%, demonstrating that the model accuracy meets engineering requirements. This study provides precise numerical support for the structural optimization and engineering application of aerogel composite insulation boards.

Keywords

Aerogel Composite Insulation Board, Abaqus Numerical Simulation, Heat Transfer Characteristics, Thermal Insulation Performance, Experimental Verification

Copyright © 2026 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

1.1. 研究背景

我国建筑能耗占社会总能耗的 40%以上, 其中外墙传热损失占比达 35%~40%, 是建筑节能的核心突破口。随着《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB55015-2021)实施, 严寒地区建筑节能率要求提升至 75%, 传统保温材料面临瓶颈: XPS 保温板导热系数约 0.032 W/(m·K), 需 100 mm 以上厚度才能达标, 导致建筑使用面积减少每一百平米 3~5 m²; EPS 防火等级仅 B2 级, 火灾中易释放有毒气体; 岩棉虽防火但密度高、施工难度大。

在高性能保温材料领域, 除气凝胶复合保温板外, 酚醛泡沫保温板、聚氨酯硬泡保温板等也占据重要地位。酚醛泡沫保温板防火等级达 A 级, 耐温性能优良, 导热系数约 0.028~0.032 W/(m·K), 但脆性大、抗冲击性能差, 施工过程中易破损, 且存在一定的环保争议; 聚氨酯硬泡保温板导热系数约 0.024~0.026 W/(m·K), 保温与粘结性能优异, 但防火等级多为 B1 级, 高温下易燃烧释放有毒气体, 安全隐患较大。

相比之下, 气凝胶复合保温板导热系数可低至 0.0065 W/(m·K), 且防火等级达 A 级、密度仅 350 kg/m³, 兼具“薄层高效、安全轻量化、稳定性强”等综合优势, 既弥补了传统材料的性能短板, 又规避了其他高性能材料的应用局限, 成为近零能耗建筑与老旧小区改造的理想选择。但当前针对外墙保温气凝胶复合板整体热传导的数值模拟研究仍较匮乏, 关键参数对保温性能的量化影响规律尚未明确, 制约其优化设计与广泛应用。

1.2. 研究现状

数值模拟已成为建筑保温体系热工性能研究的核心手段, 国内外学者围绕传统保温材料、新型复合保温材料的传热特性开展了大量探索, 但针对气凝胶复合外墙保温板的系统研究仍存在明显缺口。

杨鼎宜等[1]通过数值计算与试验测试结合的方法, 分析了真空绝热板(VIP)保温装饰一体板的热工性能及热桥影响因素。该研究首次量化了阻隔膜类型、芯材厚度、气体间隙对线性传热系数的影响, 发现阻隔膜气体间隙增加会导致保温箱耗电量增长 42%, 为新型高效保温材料的结构优化提供了关键数据支

撑。但其局限性在于聚焦单一 VIP 材料, 未涉及气凝胶这类兼具极低导热系数与良好稳定性的复合保温材料, 且未探讨界面热阻、保护层性能等参数对整体保温效果的耦合影响。

王磊等[2]采用 ABAQUS 软件建立了 EPS/XPS 复合再生骨料混凝土保温砌块的热传导模型, 通过与热箱试验对比, 验证了有限元模拟的可靠性(模拟值与实测值偏差仅 6%)。研究明确了 XPS 保温砌块的热阻值比 EPS 高 4.9%, 为传统保温材料的选型与结构设计提供了参考。但该研究仅针对再生骨料混凝土基复合砌块, 未涉及气凝胶这类高性能无机保温材料, 且未考虑建筑构件中钢筋等热桥构件对传热路径的影响, 模拟场景与实际工程应用存在差异。

数值模拟已成为保温材料性能研究的核心手段。现有研究存在三方面不足: ① 聚焦单一材料模拟, 缺乏复合结构整体分析; ② 未量化芯材厚度、保护层性能等参数的影响权重; ③ 部分模拟结果无试验验证, 精度存疑。因此, 开展气凝胶复合板数值模拟与试验验证, 对其工程应用至关重要。

1.3. 研究目的与内容

本研究旨在: ① 建立气凝胶复合板热传导有限元模型, 量化温度场与热流密度分布; ② 对比气凝胶与 XPS 的保温效能及空间优势; ③ 揭示关键参数对保温性能的影响规律; ④ 通过试验验证模型可靠性。具体内容包括: 模型构建与参数设置、稳态热传导模拟、参数敏感性分析、试验室验证及工程适用性讨论。

2. Abaqus 数值分析

2.1. 模型建立

2.1.1. 几何尺寸与结构简化

基于建筑项目图纸(图 1), 该项目的气凝胶复合保温板拼装图如下(图 2)构建三维模型尺寸为 2669 mm (长) × 2900 mm (高) × 300 mm (厚), 含三部分: 钢筋混凝土墙体(200 mm)、保温层(气凝胶 40 mm/XPS 100 mm)、混凝土保护层(60 mm)。模型如图 3, 图 4。

钢筋体积占比低(通常 0.3%~1%)、热传导路径不连续, 对保温层温度场、热流密度的影响普遍 < 3%, 远低于工程允许误差(≤10%); 忽略钢筋后的模拟值与试验值相对误差 ≤ 5.3%, 符合建筑热工模拟的精度标准; 纳入钢筋会显著增加计算复杂度、降低效率, 但精度提升微弱, 不符合工程模拟的实用性原则[3]-[7]。模型忽略钢筋以简化计算, 确保保温层与墙面尺寸一致。

2.1.2. 单元选择与网格划分

选用 Abaqus 中 DC3D8 单元(8 节点线性热传导六面体单元), 适用于稳态热传导分析, 计算精度与收敛速度兼顾。采用非均匀网格划分: 保温层(核心传热区)网格加密至 20 mm, 混凝土墙体(次要区)设为 50 mm。网格质量检查显示, 平均纵横比 1.2 (≤2)、扭曲度 < 0.3 (≤0.5), 满足模拟精度要求。

2.2. 参数设置

参考标准试验数据与厂家提供参数, 确定各材料热物理属性(表 1), 其中气凝胶导热系数通过防护热板法实测验证。

2.2. 边界条件与分析步

参考《建筑热工设计规范》(GB 50176-2016), 设置边界条件: 室内侧温度 20℃、对流换热系数 10 W/(m²·K)(无风自然对流); 室外侧温度 0℃、对流换热系数 8.7 W/(m²·K)(冬季平均风速 2 m/s); 模型侧面设绝热边界(热流密度 = 0), 避免侧向热损失(表 2)。

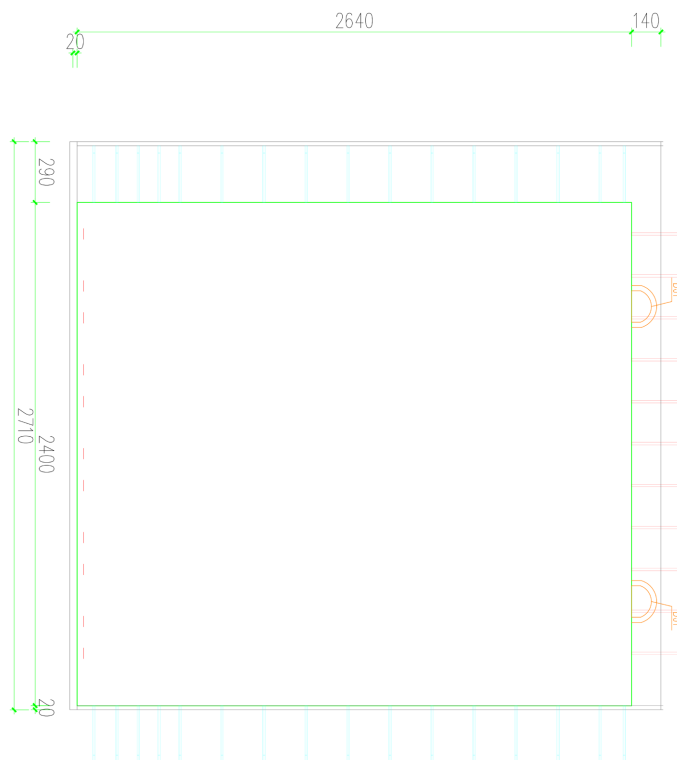


Figure 1. CAD drawing of exterior wall panel

图 1. 外墙板 CAD 图



Figure 2. Assembly drawing of aerogel composite insulation board

图 2. 气凝胶复合保温板拼装图

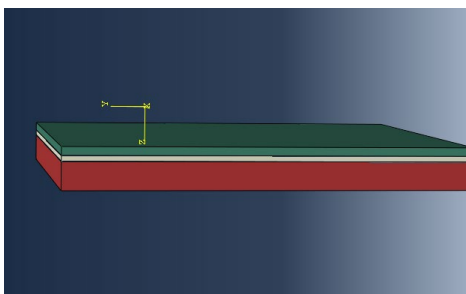


Figure 3. Exterior wall model of aerogel composite insulation board

图 3. 气凝胶复合保温板外墙模型

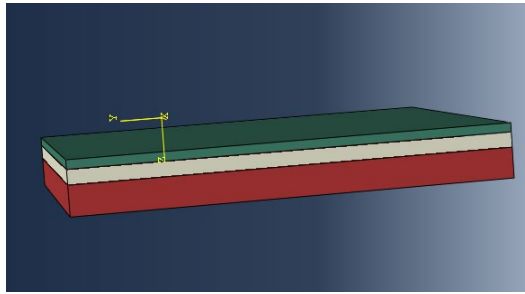


Figure 4. Exterior wall model with XPS insulation board
图 4. XPS 保温板外墙模型

Table 1. Thermophysical parameters of materials
表 1. 材料热物理参数

材料名称	厚度 mm	密度 kg/m ³	导热系数 W/(M·k)	比热 J/(kg·K)
钢筋混凝土	200	2350	1.74 [8]	1000 [9]
XPS 保温板	100	35	0.032	1470 [10]
气凝胶保温板	40	350	0.0065	1000

Table 2. Boundary condition settings
表 2. 边界条件设置

室内条件		室外条件	
温度	对流换热系数	温度	对流换热系数
20	10	0	8.7

采用 Abaqus/Standard 模块进行稳态分析：分析步类型为“Static, General”，初始步长 0.1，最大步长 1.0，收敛准则为能量平衡误差 $< 1e-5$ 。

2.3. 模拟结果分析

2.3.1. 温度场分布

气凝胶复合板与 XPS 板的温度分布云图如图 5、图 6 所示。提取关键位置温度(表 3)可知：气凝胶保温层内侧温度 19.6℃ (XPS 为 18.4℃)，对室内热量保留能力更强；两者外侧温度接近(1.8℃ vs 1.5℃)，室内外温差传递率均 $< 10\%$ ，但气凝胶板温度分布更均匀，墙体中心温度差异仅 0.5℃，热传导稳定性更优。

2.3.2. 热流密度对比

热流密度云图(图 7、图 8)与量化数据(表 4)显示：40 mm 厚气凝胶板平均热流密度 2.51 W/m²，较 100mm 厚 XPS 板(5.3 W/m²)减少 60.4%；空间占用率仅 40%，即厚度减薄 60%仍实现更优保温效果。以 100m² 建筑为例，气凝胶板可增加使用面积 3~4 m²，经济效益显著。

2.4. 芯材厚度的影响

采用控制变量法，选取气凝胶芯材厚度(20/30/40/50 mm)，保护层厚度为 10 mm，以热流密度变化率计算敏感度系数。

如图 9 所示，芯材厚度从 20 mm 增至 50 mm，热流密度从 3.8 W/m² 降至 1.5 W/m²，每增加 10 mm 热流下降 23.7%，敏感性系数 0.78，为最关键影响因素。因气凝胶是核心保温单元，厚度增加延长热量传递路径，显著降低热流。

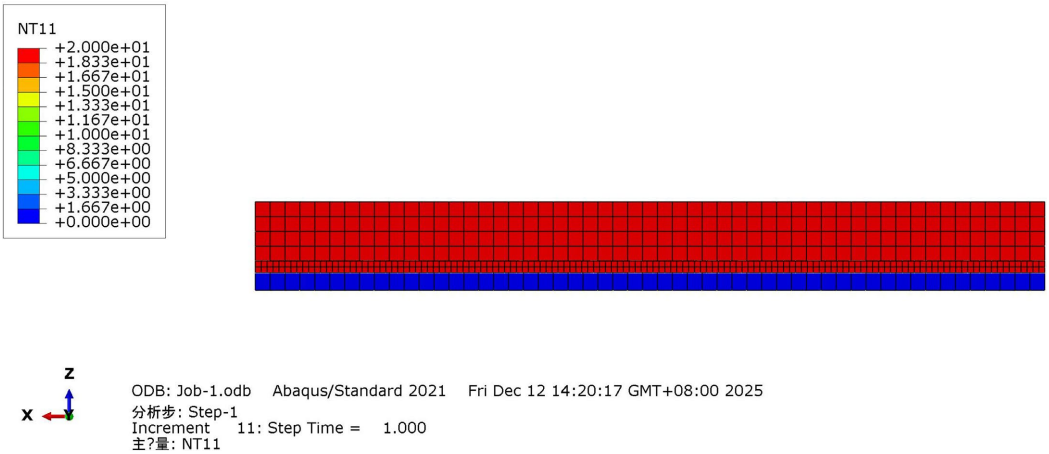


Figure 5. Temperature nephogram of aerogel composite insulation board
图 5. 气凝胶复合保温板外墙温度云图

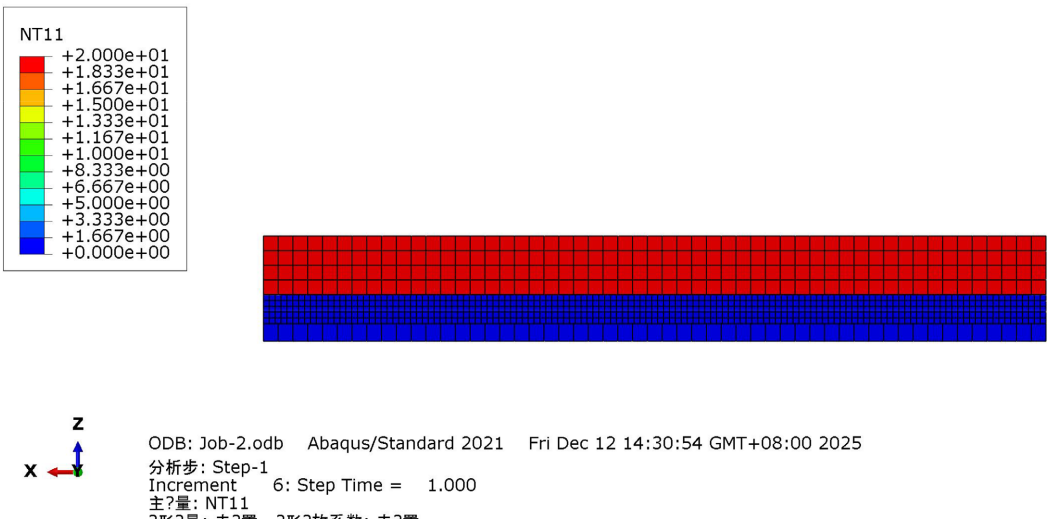


Figure 6. Temperature nephogram of XPS exterior wall insulation board
图 6. XPS 保温板外墙温度云图

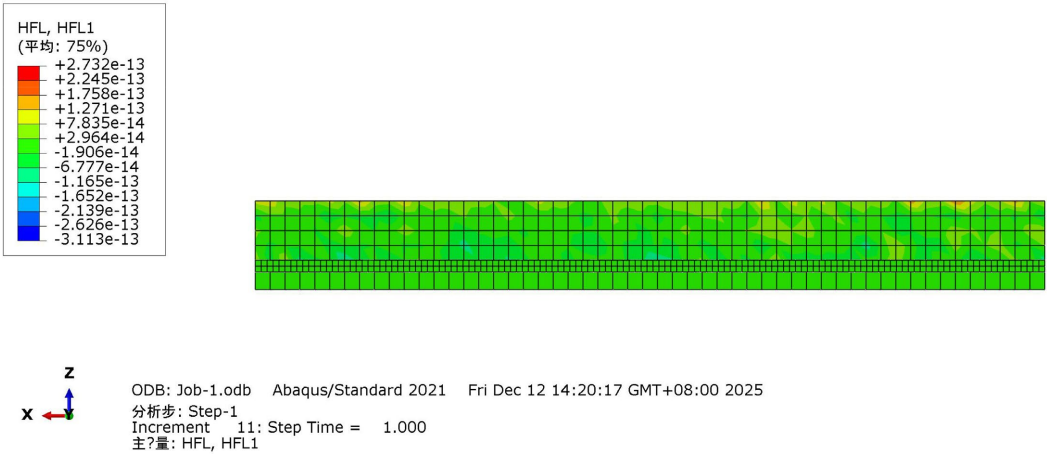


Figure 7. Heat flux density nephogram of aerogel composite insulation board
图 7. 气凝胶复合保温板热流密度云图

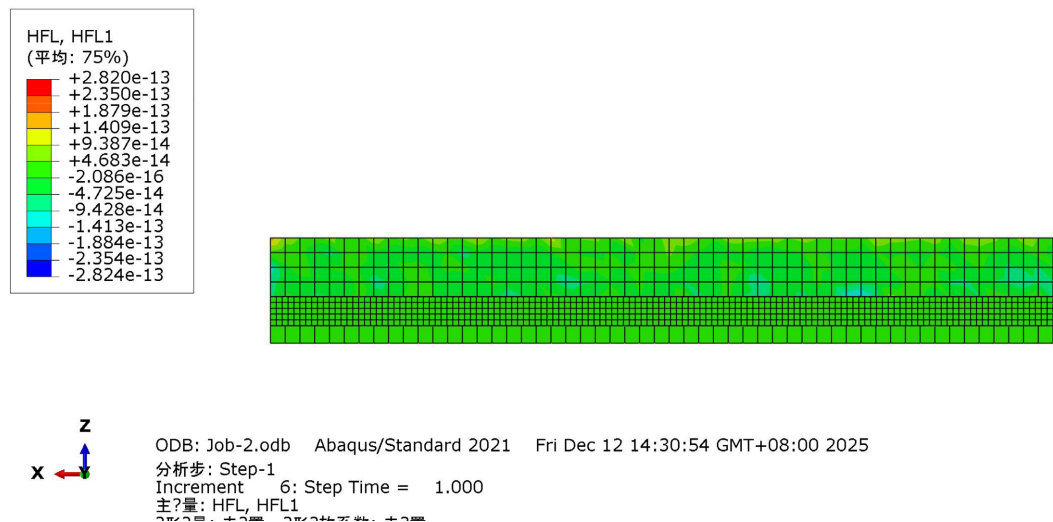


Figure 8. Heat flux density nephogram of XPS exterior wall insulation board
图 8. XPS 保温板外墙热流密度云图

Table 3. Comparison of average heat flux density
表 3. 平均热流密度对比

材料类型	厚度(mm)	平均热流密度(W/m ²)	热流减少率(%)	空间占用(%)
气凝胶复合保温板	40	2.5	60.4	40.00
XPS 板	10	5.3	-	100.00

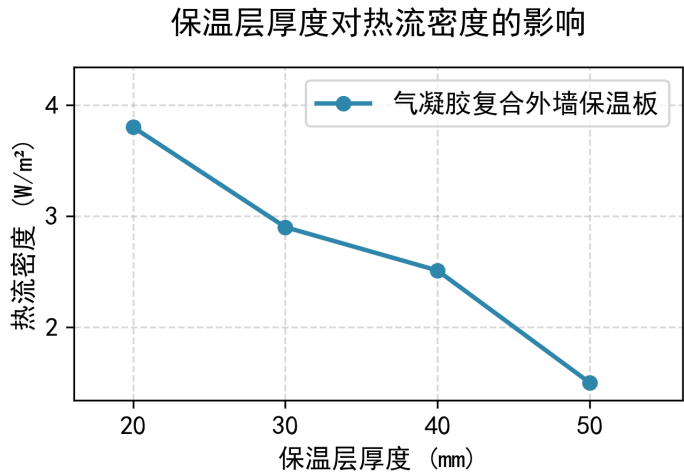


Figure 9. Influence of core layer thickness on heat flux density
图 9. 芯材厚度对热流密度的影响

3. 试验验证

3.1. 试验材料与设备

试验材料：气凝胶复合板(300 mm × 300 mm × 40 mm，芯材为气凝胶复合真空绝热板，保护层为微陶粒混凝土)、XPS 板(300 mm × 300 mm × 100 mm)、钢筋混凝土试块(300 mm × 300 mm × 200 mm、300 mm × 300 mm × 60 mm)、密封胶(避免侧向热损失)。

试验设备：双护板稳态法导热系数仪(精度 $\pm 0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、多点温度记录仪(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)、HFM-200 热流计(精度 $\pm 0.01 \text{ W}/\text{m}^2$)。

3.2. 试验方法

组装“混凝土 - 保温层 - 混凝土”复合试件，密封边缘；
设定与模拟一致的边界条件(室内 20°C 、室外 0°C)；
待系统稳态(热流波动 $< \pm 2\%$ 持续 30 min)后，记录热流密度与温度；
每个试件重复测试 3 次，取平均值。

3.3. 结果与误差分析

模拟值与试验值相对误差 $\leq 5.3\%$ ，满足工程精度要求($\leq 10\%$)。误差源于：① 模拟忽略材料微观孔隙与界面热阻；② 试验环境湿度与仪器精度影响。两者一致性良好，验证模型可靠性。

Table 4. Measured experimental values
表 4. 测量试验值

材料类型	厚度(mm)	保温层内侧平均温度 $^\circ\text{C}$	平均热流密度(W/m^2)
气凝胶复合保温板	40	19.43	2.63
XPS 板	10	18.04	5.58

4. 结果讨论

- (1) 气凝胶复合保温板展现出卓越的“薄层高效”保温优势。40 mm 厚的气凝胶复合板保温效能与 100 mm 厚的传统 XPS 板相当，其平均热流密度仅为 $2.63 \text{ W}/\text{m}^2$ ，较 XPS 板($5.58 \text{ W}/\text{m}^2$)的热流减少率达 52.8%，且空间占用率降低 60%。这一特性可使每 100 m^2 建筑增加 3~4 m^2 使用面积，有效破解了传统保温材料厚度过大导致的建筑使用空间缩减难题，尤其适配老旧小区改造等空间受限场景。
- (2) 气凝胶芯材厚度是影响保温性能的关键因素。通过参数敏感性分析可知，气凝胶芯材厚度对热流密度的敏感性系数达 0.78，为所有影响因素中最高。随着芯材厚度从 20 mm 增至 50 mm，热流密度从 $3.8 \text{ W}/\text{m}^2$ 降至 $1.5 \text{ W}/\text{m}^2$ ，每增加 10 mm 芯材厚度，热流密度平均下降 23.7%，表明延长热量传递路径是提升保温效果的核心途径，为气凝胶复合保温板的结构优化提供了明确方向。
- (3) 所构建的 Abaqus 热传导有限元模型具备良好的可靠性与工程适用性。模型通过简化钢筋等次要影响因素，在保证计算效率的同时，实现了较高的模拟精度。试验验证结果显示，模拟值与试验值的相对误差 $\leq 5.3\%$ ，满足建筑热工模拟 $\leq 10\%$ 的工程精度要求，可为气凝胶复合保温板的工程设计与性能预测提供精准的数值支撑。
- (4) 气凝胶复合保温板在节能效益与安全性能上具有综合优势。相较于传统保温材料，其不仅能使严寒地区 100 m^2 住宅年节省采暖能耗 1200 kWh，减碳约 960 kg，契合建筑节能与低碳发展趋势；还具备 A 级防火等级和 $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的轻量化特性，有效规避了传统 EPS 板火灾隐患、岩棉板密度大及施工难等问题，同时弥补了酚醛泡沫、聚氨酯硬泡等高性能材料在脆性、环保性或防火性上的短板。

参考文献

[1] 齐凯, 徐玉峰, 卢旦, 等. 新型保温结构一体化免拆模外墙体系构建及其连接件节点力学性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(5): 676-687.

-
- [2] 张晨晨, 王亚红, 李宗利. 钢筋混凝土板等效导热系数理论计算公式[J]. 水电能源科学, 2024, 42(12): 92-95+100.
 - [3] 梁惟滔. 基于真空绝热板的保温装饰一体板研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2023.
 - [4] 刘军, 孙晨, 赵硕, 等. 再生骨料混凝土复合保温砌块的热工性能模拟[J]. 混凝土, 2022(8): 119-124.
 - [5] 牛富渊, 刘永军, 蔡炎, 等. 受火时间对钢筋混凝土板柱节点的力学性能影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 199-203+218.
 - [6] 全国塑料制品标准化技术委员会(SAC/TC 48). 绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS): GB/T 10801.2-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
 - [7] 王传奇, 刘小东, 高轩能. 薄壁型钢-混凝土梁-柱节点温度场数值分析[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(9): 82-84+87.
 - [8] 韩雨. 采暖居住建筑等热流保温体系优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
 - [9] 任玲玲, 童丽萍. 夏季极端环境下住宅墙体 EPS 保温体系热结构耦合分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(4): 15-18+72.
 - [10] 刘莉, 李宏男, 张景玮. 保温夹心节能墙体抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002(1): 79-84.