

寒冷地区粉煤灰外墙保温试验研究

任 敏

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘 要: 为提升寒冷地区装配式建筑的节能效果, 以辽宁省某居民区工程为背景, 针对其外墙保温性能开展优化研究。通过对比粉煤灰保温板与未保温墙体的热工性能, 明确该材料在装配式混凝土结构中的保温效果与应用价值。试验选取密度 $\leq 300 \text{ kg/m}^3$ 、导热系数 $\leq 0.065 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的粉煤灰保温板, 在尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的试验墙体上布置测点, 采用三维温度检测与传热系数测试设备, 在室内 20°C 、室外 -5°C 的稳态温差条件下, 对墙体温度分布及传热特性进行实测分析。结果表明: 粉煤灰保温板实测密度为 $285.6 \pm 3.2 \text{ kg/m}^3$, 其内部梯度孔隙结构与微米级闭孔形成多重热阻; 粘贴保温板后, 外墙温度分布均匀, 最高可达 19.3°C , 传热系数均低于 $0.300 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 较未保温墙体显著降低。结论证明, 粉煤灰保温板兼具轻质与良好保温性能, 能有效减少热量损失, 适用于寒冷地区装配式建筑的外墙保温体系, 对提升建筑能效与室内热稳定性具有实用意义。

关键词: 寒冷地区; 预制结构; 装配式建筑; 工程施工; 粉煤灰; 外墙保温

中图分类号: TU761.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0120-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.018

Experimental Study on External Wall Insulation of Fly Ash in Cold Regions

REN Min

(Powerchina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to improve the energy-saving effect of prefabricated buildings in cold regions, this article takes a residential area project in Liaoning Province as the background and conducts optimization research on its external wall insulation performance. The research aims to compare the thermal performance of fly ash insulation board and uninsulated wall, and clarify the insulation effect and application value of this material in prefabricated concrete structures. The experiment selected fly ash insulation boards with a density of $\leq 300 \text{ kg/m}^3$ and a thermal conductivity of $\leq 0.065 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Measurement points were arranged on a test wall with a size of $3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$. Three dimensional temperature detection and heat transfer coefficient testing equipment were used to measure and analyze the temperature distribution and heat transfer characteristics of the wall under steady-state temperature difference conditions of 20°C indoors and -5°C outdoors. The results show that the measured density of fly ash insulation board is $285.6 \pm 3.2 \text{ kg/m}^3$, and its internal gradient pore structure forms multiple thermal resistances with micro scale closed pores; After pasting the insulation board, the temperature distribution on the exterior wall is uniform, with a maximum of 19.3°C , and the heat transfer coefficient is lower than $0.300 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, which is significantly lower than that of the uninsulated wall. The conclusion shows that fly ash insulation board has both lightweight and good insulation performance, which can effectively reduce heat loss and is suitable for the external wall insulation system of prefabricated

作者简介: 任 敏 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 建筑设计及其理论。

收稿日期: 2025-03-13

buildings in cold regions. It has practical significance for improving building energy efficiency and indoor thermal stability.

Key words: cold regions; prefabricated structure; prefabricated buildings; engineering construction; fly ash; external wall insulation

0 引言

外墙保温作为建筑节能体系中的关键一环，兼具环境与经济效益。从环境层面看，其有效降低了建筑物的能源消耗，减少了因供暖、制冷产生的温室气体排放，对缓解全球气候变暖具有积极意义；从经济角度而言，能大幅削减用户的能源开支，节省费用，尤其在寒冷地区，冬季漫长且气温极低，建筑物的热量散失问题突出^[1-2]。在此类地区推广高效外墙保温技术十分必要，它能够极大提升建筑的保温性能，保障室内温度舒适，是寒冷地区建筑节能降耗的有效手段。但是由于外部建筑环境限制，部分保温材料难以实现有效的传热性能，亟需进行调整和优化。

国内外研究人员进行了相关研究。陈玉霞等^[3]提出了混凝土夹心保温墙体保温层厚度优化方法，发现相同厚度下保温隔热性能依次是真空绝热板、聚氨酯、挤塑聚苯板、岩棉，对应最优厚度分别为20、50、75、90 mm；郑佳瑞等^[4]提出的超低能耗居住建筑预制混凝土夹心保温墙体桁架式连接件热桥方法，揭示了墙体热桥影响区域的一般规律，实现对局部传热表征体元的选取和分析；康熙等^[5]通过仿真模拟分析连接件、保温层厚度、地区气候差异等几种因素对墙体保温效果的影响程度，得出的修正系数分别在1.35~1.55、1.45~1.8、1.5~1.85范围内；彭罗文等^[6]提出的保温装饰一体化板外墙外保温系统抗风性能研究方法，结果表明陶瓷薄板保温装饰一体化板外保温系统与混凝土基层采用粘锚结合的方式连接时，具有足够的安全性；Pihelo等^[7]将粉煤灰与适量的水泥、外加剂等混合，制成保温砂浆，这种砂浆可以涂抹在建筑物的外墙表面，形成一层保温层，提高建筑物的保温性能；Ouyang等^[8]将处理后的粉煤灰与其他材料按一定比例混合，形成保温砂浆或保温板的生产原料；孟超^[9]研究了一种保温装饰一体板施工技术，结合具体的工程分析该技术的有效性；王澄瑜等^[10]将保温节能施

工技术应用在了土建建筑外墙施工，并分析其性能；杨斐^[11]分析了单面钢丝网架聚苯板技术在建筑外墙施工中的应用，并对施工结果进行了讨论；陈东鹏^[12]在绿色施工背景下，分析了不同材料对外墙保温效果，以期对未来施工工程提供参考；刘涛^[13]基于蒙特卡罗法，将固废聚氨酯发泡颗粒应用于建筑外墙中，并对该材料的保温性能进行了分析；赵全斌等^[14]分析加气混凝土复合保温外墙板中，各个连接节点的力学性能；高永健^[15]以高层建筑为研究目标，对该建筑的外墙保温效果进行研究；程虎兵^[16]对外墙保温、外墙装饰同时进行施工，在增加外墙美观性的同时保证外墙的保温效果；王珥玲^[17]进行了外墙保温施工，实现居民建筑冬暖夏凉。

在上述研究基础上，拟开展寒冷地区粉煤灰外墙保温试验研究。试验采用对比法，选取粉煤灰保温板（厚度为100 mm）与未保温墙体对比。划分试验墙体区域，采用三维温度检测设备测外墙温度分布，生成等温线图与云图。在相同环境（室内20℃、室外-5℃）下，用传热系数测试设备测两者传热系数，评估粉煤灰保温板性能。

1 工程概况

工程位于辽宁省某居民区，为装配式建筑，总面积为4 196 m²，体型系数为0.32，测试区域为第三层。混凝土框架结构，抗震设防烈度为7度，外保温与建筑同寿命。

结合寒冷地区保温要求，需要优化外墙保温环境，明确外墙保温墙体关联结构的围护热工参数，具体见表1。

表1 保温外墙围护结构传热系数
Table 1 Heat transfer coefficient of insulation exterior wall enclosure structure / [W/(m²·K)]

围护结构	外墙	楼地	隔墙	楼板	屋顶	外窗
建筑层1	0.26	0.08	0.37	0.16	1.5	2.8
建筑层2	0.32	0.04	0.47	0.23	1.8	2.7
建筑层3	0.27	0.06	0.28	0.12	1.4	3.1

结合表1采集的热工参数，窗旁粘贴热流计。具体如图1所示。

研究与应用

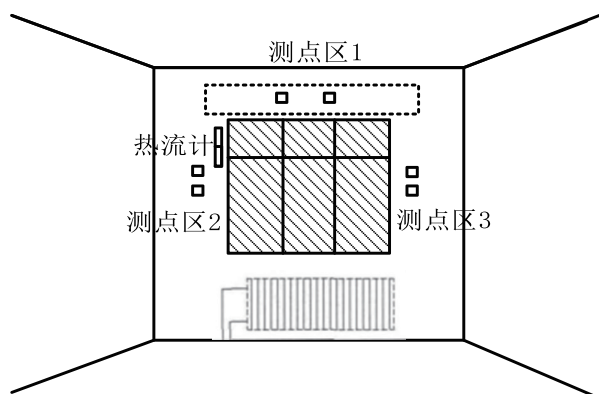


图1 建筑测点部署结构图

Fig. 1 Structural diagram of building survey points

2 粉煤灰外墙保温试验

2.1 主要材料及性能

保温板材料：粉煤灰保温板（密度 $\leq 300 \text{ kg/m}^3$ ，导热系数 $\leq 0.065 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ）与未进行保温的墙体进行对比试验；所有保温板厚度统一为 100 mm ；选用为黏结强度 $\geq 1.0 \text{ MPa}$ 的建筑黏结剂；选择耐温范围在 $-40 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间的隔离条，用于封堵墙体缝隙，减少温度流失，辅助提高保温效果；将温度砌块作为温度隔断，部署在墙体中心位置，辅助评估保温性能。

2.2 试验方法

在试验墙体（尺寸 $3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ）上划分左、中、右三个区域，每个区域安装两种不同材料的保温板，共 6 组试样。使用电子天平测量其质量，游标卡尺测量其尺寸，计算表观密度，并记录数据；

选择工程墙位置作为温度分布对比区域，使用三维温度检测设备获取温度等温线图。同时，在粉煤灰保温板上均匀部署测温点，通过热电偶和数据采集仪实时采集温度数据，生成温度云图，分析外墙温度分布情况

在相同环境条件下（室内 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、室外 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ）进行对比。使用传热系数测试设备分别测试粉煤灰保温板墙体和未保温墙体的传热系数，记录数据并分析。

2.3 试验步骤

将粉煤灰保温板切割为相同尺寸（ $1.0 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ），背面涂刷黏结剂后粘贴至试验墙体左侧和

中间区域，养护 7 d。自 8:00 至次日 8:00，记录昼夜温度变化，在稳态热环境下（室内外温差 $\geq 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ）进行测试，剔除异常值后，取各测点数据的算术平均值作为最终结果。

3 试验结果分析

3.1 保温板表观密度结果分析

选定围护结构中外墙的 6 个测点作为测试目标，以左侧、中间和右侧三个部分对比，结果见表 2。

粉煤灰保温板实测密度（ $285.6 \pm 3.2 \text{ kg/m}^3$ ），因其细集料填充作用形成密实结构，虽相对一些轻质材料密度稍高，但较传统保温砂浆显著降低，兼具轻质与保温特性。这表明粉煤灰保温板在保证一定强度的同时，能有效减少热量传递，为墙体提供良好的保温基础。而未保温墙体部分无保温材料，不存在此类表观密度与保温性能的关联特性。对于粉煤灰保温板，保温性能不仅与密度有一定关系，更受材料微观结构（如闭孔率、孔隙尺寸）的显著影响。

表2 保温材料表观密度测试结果

Table 2 Test results of apparent density of insulation materials

材料类型	理论密度/ (kg/m^3)	实测密度/ (kg/m^3)
粉煤灰保温板	≤ 300	285.6 ± 3.2
未保温墙体	180	182.4 ± 2.1

3.2 外墙保温温度分布结果分析

选择该工程夹心墙位置作为温度分布对比区域，验证粉煤灰保温板在典型墙体结构中的基础性能，集中呈现单一材料的测试数据，为后续与未保温墙体对比提供基准参考。使用三维技术，获取温度等温线图，如图 2 所示。粉煤灰保温板的粘贴，促使外墙的墙体温度能够达 $17.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上，且整体的温度分

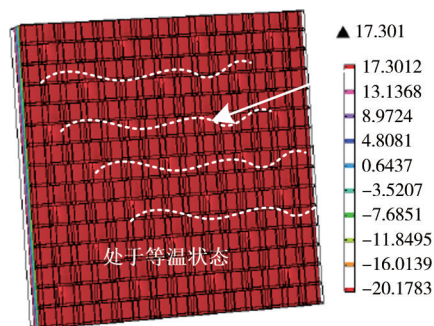


图2 墙体等温线图

Fig. 2 Wall isotherm diagram

研究与应用

布较为均匀,说明达到了一定的保温效果。依托于墙体等温线图反映的保温情况,映射外墙的保温状态。

在粉煤灰保温板上均匀部署测温点,生成温度云图,结果如图3所示。等温线表明外墙的温度情况较为良好。部署的测温点各个温孔温度达到 19.3°C 。

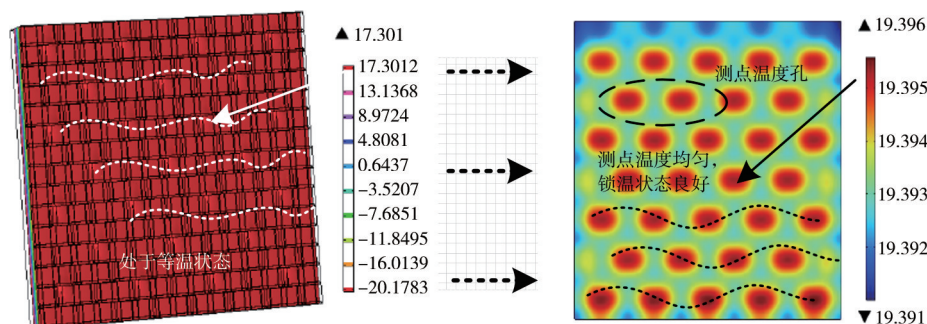


图3 外墙温度云图结果

Fig. 3 External wall temperature cloud map results

3.3 墙体保温传热结果分析

选定2个位置的测点分析,对比传热系数结果,如图4所示。所选择的2个测点得到的传热系数均保持在 $0.300\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 以下,相对较小。粉煤灰保温板通过特殊工艺形成梯度孔隙结构,其内部同时存在微米级闭孔,可实现三重热阻机制,有效阻碍热量传递,提高外墙的保温性能。而未保温墙体传热系数较高,热量容易通过墙体传导,导致室内热量散失较快,保温性能较差。在实际应用过程中,如果对建筑保温要求较高,粉煤灰保温板是更好的选择,能在降低能耗的同时,为室内提供更稳定的温度环境。

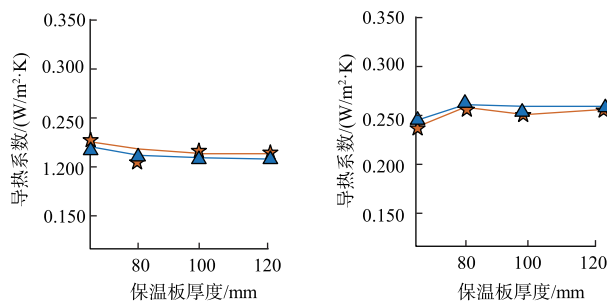


图4 外墙保温传热系数结果

Fig. 4 Results of heat transfer coefficient for external wall insulation

4 结论

围绕辽宁省某居民区装配式建筑的外墙保温优化展开,针对寒冷地区建筑特点,采用定位保温重

该结果表明,粉煤灰保温板以其特殊的结构,在温度向外扩散的过程中,先以墙体锁住部分温度,随后通过外墙的保温板进一步隔绝温度的扩散,更好地聚温,促使温度可以均匀分布在墙体之中,再加上隔离条的封堵,温度下降的速度也会大幅度降低,具有延长保温时间的作用。

建区域,结合热工参数分析,明确外墙保温优化方案,取得了以下主要成果:

(1) 粉煤灰保温板凭借细集料填充形成的密实结构,实测密度接近理论值,虽相对一些轻质材料密度稍高,但较传统保温砂浆显著降低,兼具轻质与保温特性,且保温性能受材料微观结构影响显著,其内部微米级闭孔能有效阻碍热量传递。

(2) 外墙保温温度分布测试表明,粉煤灰保温板粘贴后外墙墙体温度较高且分布均匀,通过墙体锁住部分温度,再经外墙保温板隔绝温度扩散,配合隔离条封堵,有效延长保温时间。

(3) 在传热系数测试中,粉煤灰保温板墙体传热系数较小,保温性能良好,能有效降低室内热量散失,满足寒冷地区建筑保温需求,为建筑外墙保温提供了新的优质选择。

参 考 文 献

- [1] 时元元,郝雨杭,付素娟,等.严寒寒冷地区装配式钢结构超低能耗建筑连接节点热桥分析[J].建筑节能(中英文),2023,51(11):46-51.
- [2] 郝雨杭,付素娟,王萌,等.寒冷地区装配式超低能耗建筑外墙板拼缝断热桥技术研究[J].新型建筑材料,2022,49(2):100-103.
- [3] 陈玉霞,闫林君.混凝土夹心保温墙体的保温层厚度优化[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(5):705-710.

研究与应用

- [4] 郑佳瑞, 杨丽平, 崔临风, 等. 超低能耗居住建筑预制混凝土夹心保温墙体桁架式连接件热桥效应研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (10): 20-29.
- [5] 康熙, 郭倩, 付士峰, 等. 超低能耗建筑现浇混凝土内置和钢丝网架复合板保温体系热工分析与测试研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (10): 30-39, 51.
- [6] 彭罗文, 陈威威, 石永, 等. 保温装饰一体化板外墙外保温系统抗风性能研究与探讨 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (9): 135-142.
- [7] Pihelo P, Kalamees T. Hygrothermal performance of AAC exterior wall after additional insulation with prefabricated elements in estonia [J]. AIP Conference Proceedings, 2023, 2918 (1): 1-9.
- [8] Ouyang Dihua, Yan Haoyu, Song Jiaying, et al. Combustion characteristics and fire hazard of polystyrene exterior wall thermal insulation materials [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140 (8): 53503.
- [9] 孟超. 保温装饰一体板施工技术在房屋建筑外墙施工中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025 (3): 175-177.
- [10] 王澄瑜, 谭渊文, 王华丽. 保温节能施工技术在土建建筑外墙施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024 (23): 260-262.
- [11] 杨斐. 建筑外墙保温节能技术在建筑施工中的有效应用 [J]. 四川建材, 2024, 50 (10): 39-40, 43.
- [12] 陈东鹏. 建筑外墙保温节能技术在建筑施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (19): 130-132.
- [13] 刘涛. 固废聚氨酯发泡颗粒复合外墙外保温系统性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [14] 赵全斌, 胡浩南, 张凌宇, 等. 加气混凝土复合保温外墙板连接节点试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (2): 87-91.
- [15] 高永健. 高层建筑工程项目中的外墙保温施工技术 [J]. 中国高新科技, 2022 (23): 149-150.
- [16] 程虎兵. 刍议房屋建筑工程外墙保温装饰工程施工技术 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11 (21): 140-142.
- [17] 王珥玲. 建筑工程施工中的外墙保温技术 [J]. 大众标准化, 2023 (1): 86-88.

(上接第 119 页)

- [8] 王保群, 辛公锋, 陶莉莉, 等. 公路混凝土梁板桥火灾损伤状况评定 [J]. 公路, 2020, 65 (4): 180-183.
- [9] 陈红奎, 冯志强. 火灾后预应力混凝土小箱梁桥承载能力评估 [J]. 河南科学, 2020, 38 (3): 464-469.
- [10] 田宇, 卢文良, 方继伟, 等. 某混凝土公路桥火灾后损伤评定 [J]. 中外公路, 2018, 38 (3): 119-124.
- [11] 戴传超. 不同保护层厚度下钢筋混凝土梁抗火性能数值模拟研究 [J]. 今日消防, 2026, 11 (3): 5-8, 20.
- [12] 郭亚文, 张雪松, 彭俊文, 等. 预应力混凝土 T 梁桥火灾后结构损伤评定与 HTRCS 快速加固技术研究 [J]. 四川水泥, 2025 (4): 203-205.
- [13] 王渭锋, 熊仁. 桥梁火灾后损伤检测评估研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (22): 138-140.
- [14] 郭靖, 钱若霖. 基于 AHP-TOPSIS 的桥梁火灾损伤评估与加固 [J]. 粘接, 2024, 51 (10): 169-172.
- [15] 李平. 桥梁火灾后的检测评估及加固处置分析 [J]. 江西建材, 2024 (6): 93-96.
- [16] 赵二朋. 火灾损伤后板桥数值分析及承载力评定 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [17] 路春森. 建筑结构耐火设计 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- [18] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 钱若霖, 苏佩. 基于裂缝参数的在役桥梁横向分布计算 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2022, 35 (2): 10-14.
- [20] 王渠, 刘俊杰, 吴庆雄, 等. 横梁非对称拼接的拼宽梁桥简化计算方法研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2026, 53 (5): 164-177.