

气凝胶复合外墙保温板制备及性能研究

苏 峰¹, 韩书伟¹, 马 彬¹, 李建平¹, 许 艳²

¹北京建工新型建材有限责任公司, 北京

²建邦新材料科技(河北)有限公司, 河北 保定

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

针对近零能耗建筑节能需求与老旧小区改造痛点, 本研究设计并制备了一种气凝胶复合三明治外墙保温板, 通过试验室研发检测的方法, 系统评估其保温性能及工程适用性。试验以SiO₂气凝胶为核心材料, 采用“面层-气凝胶芯层-面层”三明治结构, 通过对比传统保温材料(XPS)的热流密度与温度分布, 验证了气凝胶复合板在相同厚度下减少60%热流量的显著优势。研究表明, 该板材通过减薄60%保温层厚度(40 mm替代100 mm XPS), 可提升建筑使用面积3~4 m²/100m², 且适用于老旧小区外立面改造, 兼具轻量化(密度350 kg/m³)、防火(A级)及耐久性特点。本研究为建筑节能与绿色改造提供了理论依据与技术支持。

关键词

气凝胶, 三明治夹芯保温板, 建筑节能, 保温性能

Preparation and Performance Study of Aerogel Composite Insulation Exterior Wall Board

Feng Su¹, Shuwei Hang¹, Bin Ma¹, Jianping Li¹, Yan Xu²

¹BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., Beijing

²Jianbang New Materials Technology (Langfang) Co., Ltd., Baoding Hebei

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

Abstract

In response to the energy-saving demands of near-zero energy buildings and the pain points of old

residential area renovation, this study designed and prepared an aerogel composite sandwich exterior wall insulation board. Its thermal insulation performance and engineering applicability were systematically evaluated through laboratory research and development testing. The experiment takes SiO₂ aerogel as the core material and adopts a sandwich structure of “surface layer-aerogel core layer-surface layer”. By comparing with traditional insulation materials (XPS), it is verified that the aerogel composite board has a significant advantage in reducing heat flux by 60%. Research shows that by reducing the thickness of the insulation layer by 60% (40 mm instead of 100 mm XPS), this board can increase the usable area of buildings by 3 to 4 square meters per 100 square meters. It is also suitable for the renovation of the exterior facades of old residential areas, and features light weight (density 350 kg/m³), fire resistance (Class A) and durability. This research provides a theoretical basis and technical support for building energy conservation and green renovation.

Keywords

Aerogel, Sandwich Core Insulation Board, Building Energy Conservation, Thermal Insulation Performance

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

在全球能源危机愈演愈烈的当下，能源匮乏与环境问题已然成为制约社会可持续发展的核心难题。建筑领域作为能源消耗的重点领域，其节能改造刻不容缓。据相关统计，建筑能耗在全球社会总能耗中所占比例超过 40%，其中外墙传热损失占建筑总能耗的 30%~40%。因此，外墙保温技术成为建筑节能减排的关键切入点。

随着我国建筑节能标准的持续提升，《建筑节能与可再生能源利用通用规范》明确规定，严寒地区建筑需达到 75% 的节能率，这对保温材料的性能提出了更为严苛的要求。传统外墙保温材料，如挤塑聚苯板(XPS)、膨胀聚苯板(EPS)和岩棉等，在长期应用过程中逐渐暴露出诸多弊端。XPS 的导热系数为 0.03 W/(m·K)，EPS 为 0.04 W/(m·K)，岩棉为 0.045 W/(m·K)，相较于新型保温材料，其保温效能较为有限[1]-[3]。为满足节能要求，需增加保温层厚度，这不仅增加了建筑自重，还缩减了室内使用面积。同时，传统材料存在显著的安全隐患，EPS 防火等级仅为 B2 级，XPS 为 B1 级，在建筑火灾中极易燃烧并释放有毒气体，严重威胁人员生命安全。此外，传统保温材料施工工艺繁杂、工期较长，尤其在老旧小区改造中，厚重的保温层与建筑原有结构适配性欠佳，施工难度较大且易出现脱落现象，难以契合既有建筑绿色改造的实际需求。

气凝胶作为一种新型纳米多孔材料，凭借其独特的微观结构呈现出卓越的保温性能，其导热系数可低至 0.01~0.021 W/(m·K)，且具备 A 级防火特性，为解决传统保温材料的困境提供了创新思路。自 20 世纪 60 年代成功制备以来，气凝胶在航空航天、石油化工等高端领域已实现成熟应用。美国 NASA 将其应用于航天器隔热系统，有效保障了航天器在极端温度环境下的稳定运行。近年来，随着制备工艺的优化与成本的降低，气凝胶开始向建筑领域拓展，国内学者相继研发出气凝胶涂料、填充料等产品，推动了建筑保温材料的更新换代。

1.2. 研究现状

当前，气凝胶在建筑保温领域的研究已取得一定进展，学者们围绕气凝胶复合材料的制备与性能展开了诸多探索。在复合体系构建方面，研究人员通过将气凝胶与传统保温材料复合，旨在协同提升材料的保温性能与力学性能。例如，可发性聚苯乙烯/SiO₂ 气凝胶核壳颗粒的导热系数低至 0.028 W/(m·K)，气凝胶岩棉复合板的导热系数可达 0.0196 W/(m·K)，相较于单一传统材料，保温效能显著提升。在制备工艺方面，“溶胶-凝胶法”结合“CO₂ 超临界干燥工艺”成为 SiO₂ 气凝胶的主流制备方式，该工艺能够有效保留气凝胶的纳米多孔结构，避免干燥过程中孔隙塌陷，从而保证其优异的保温性能。

然而，现有研究仍存在诸多不足。首先，研究多聚焦于气凝胶单一材料的性能优化或简单复合，对复合结构的热工性能与工程适配性研究不够系统，尤其缺乏针对“面层-芯层-面层”三明治结构的深入分析，对不同面层材料与芯材的配伍性、界面结合机理研究不足。其次，气凝胶复合材料的长期服役性能研究欠缺，建筑外墙保温材料需承受温度变化、湿度波动、紫外线照射等复杂环境作用，现有研究多集中于短期实验室性能测试，对材料在实际使用过程中的热湿耦合性能、耐久性及老化规律验证不足。此外，在老旧小区改造场景中，轻量化、薄层化、易施工的需求尚未得到充分满足，现有气凝胶复合产品在结构设计、施工工艺与既有建筑结构的适配性方面仍需改进，且成本控制仍是制约其规模化应用的关键因素。

1.3. 研究目的与内容

本研究以“减薄厚度、提升效能、适配改造”为核心目标，针对近零能耗建筑节能需求与老旧小区改造痛点，设计并制备气凝胶复合三明治外墙保温板，系统开展材料性能与工程适用性研究，为建筑节能与绿色改造提供理论依据与技术支撑。具体研究内容如下：

(1) 材料体系设计与优化：构建“面层-气凝胶芯层-面层”三明治复合结构，筛选适配的芯材与保护层材料。芯材选取气凝胶毡真空绝热板、气凝胶复合芯材真空绝热板等，保护层材料选用纤维水泥板、发泡混凝土、微陶粒气凝胶混凝土等无机非金属材料，通过试验优化材料配伍方案。

(2) 制备工艺研究：优化气凝胶复合保温板的制备流程，重点解决芯材与面层的界面结合问题，采用物理连接等工艺确保复合板的结构完整性与稳定性。针对不同类型的芯材与保护层材料，调整制备参数，形成标准化的生产工艺。

(3) 性能测试与分析：对制备的气凝胶复合保温板进行全面的性能测试，包括导热系数、密度、抗压强度、防火性能、耐久性等关键指标。采用热流计法测定导热系数，对比传统保温材料(XPS)验证其保温优势。

(4) 工程适用性评估：结合老旧小区改造与近零能耗建筑的实际需求，分析气凝胶复合保温板的施工适配性、空间利用率提升效果及成本效益，为其工程应用提供技术参考。

2. 气凝胶保温材料特性与制备基础

2.1. 气凝胶的结构与性能优势

气凝胶作为一种由纳米级颗粒聚集而成的多孔材料，其内部孔隙率高达 80%~99.8%，平均孔径处于 5~20 nm 区间，这种独特的微观结构赋予其优异的物理性能。SiO₂ 气凝胶作为应用最为广泛的气凝胶类型，其孔隙结构能够有效抑制空气对流。纳米级的孔隙尺寸使得空气分子的平均自由程小于孔隙直径，显著降低了气体热传导；同时，气凝胶的空隙壁为纳米级薄膜，可减少固体热传导，并且对热辐射具有一定的阻隔效应。三者协同作用下，SiO₂ 气凝胶的导热系数可低至 0.02W/(m·K) 以下，成为目前已知导热系数最低的固体材料[4]。

除具有卓越的保温性能外，SiO₂ 气凝胶还具备多项适配建筑领域的关键特性。在防火性能方面，SiO₂

气凝胶主要成分为无机硅氧化物,不可燃且在高温条件下无有毒气体释放,防火等级可达 A 级,从根本上消除了传统有机保温材料的火灾隐患。在物理性能方面,气凝胶密度极低,通常介于 $100\sim 300\text{ kg/m}^3$ 之间,能够实现保温材料的轻量化,减轻建筑结构荷载。此外, SiO_2 气凝胶还具备低介电常数、低声阻抗、高比表面积以及良好的疏水性等特点,能够适应建筑外墙复杂的服役环境,避免因吸湿导致保温性能降低。

鉴于具备上述优异性能, SiO_2 气凝胶在多个领域呈现出广泛的应用前景。在航空航天领域,其可应用于航天器的隔热防护系统,以抵御极端温差;在集中供热供冷领域,可用于管道保温,减少热量损耗;在建筑领域,可作为保温板、涂料、填充料等,应用于新建建筑节能与既有建筑改造;在电子、交通、环保等领域,也发挥着重要作用。

2.2. SiO_2 气凝胶的制备工艺

SiO_2 气凝胶的制备过程主要包括溶胶制备、凝胶化、老化和干燥四个关键步骤,核心工艺为“溶胶-凝胶法”结合“ CO_2 超临界干燥工艺”,具体流程如图 1 所示[5]-[8]。

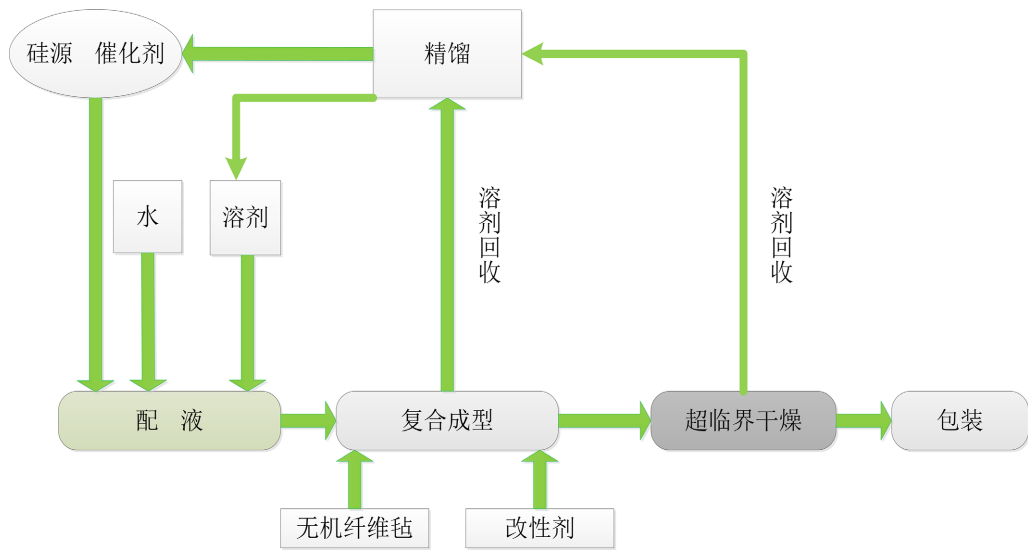


Figure 1. Aerogel production process
图 1. 气凝胶生产工艺

- (1) 溶胶制备: 以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源,乙醇为溶剂,在酸性或碱性催化剂作用下进行水解反应。将 TEOS、乙醇、去离子水按一定摩尔比混合,搅拌均匀后加入催化剂,控制反应温度在 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,反应时间 2~4 小时,形成均匀稳定的溶胶体系。水解反应的关键在于控制催化剂用量与反应温度,避免反应过快导致溶胶团聚。
- (2) 凝胶化: 将制备好的溶胶倒入模具中,在恒温恒湿环境下进行凝胶化反应。溶胶中的硅酸分子逐渐发生缩聚反应,形成三维网络结构,随着反应的进行,体系粘度不断增大,最终转变为凝胶。凝胶化时间受溶胶浓度、温度、湿度等因素影响,通常为 12~24 小时。凝胶化过程中需避免振动,防止凝胶结构受损。
- (3) 老化: 凝胶形成后,需进行老化处理以增强凝胶网络的强度。将凝胶置于乙醇溶液中,在 $40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 下老化 24~48 小时,通过溶剂交换去除凝胶内部的残留水分与未反应的反应物,同时促进凝胶网络的进一步缩聚,提高凝胶的机械强度与结构稳定性。
- (4) CO_2 超临界干燥: 这是制备气凝胶的关键步骤,目的是在去除凝胶内部溶剂的同时,保留其纳米多孔结构。将老化后的凝胶放入超临界干燥设备中,通入 CO_2 作为干燥介质,控制温度在 31.1°C 、压力

在 7.38 MPa 以上, 使 CO₂ 处于超临界状态。在超临界状态下, CO₂ 的气液界面消失, 表面张力为零, 能够在不破坏凝胶网络结构的前提下, 将内部溶剂缓慢抽出, 最终得到气凝胶产品。

需要注意的是, SiO₂ 气凝胶本身强度较低, 脆性较大, 无法单独作为外墙保温板使用, 必须与其他材料复合, 通过合理的结构设计 with 制备工艺, 弥补其力学性能的不足, 实现保温性能与使用性能的协同提升。

3. 气凝胶复合外墙保温板的制备

3.1. 原材料筛选与性能分析

根据某装配式项目的设计需求, 外墙保温板需达成容重不超过 400 kg/m³、传热系数不高于 0.020 W/(m·K)、防火等级为 A 级的技术指标。综合考量市场现有材料的性能与成本, 对芯材与保护层材料展开严格筛选。

3.1.1. 芯材筛选

满足传热系数 ≤ 0.020 W/(m·K) 要求的材料主要为气凝胶制品与真空绝热板。鉴于复合板的结构设计及工程适用性, 选取气凝胶毡真空绝热板、气凝胶复合芯材真空绝热板、气凝胶毡三种芯材开展试验, 其物理性能详见表 1。

Table 1. Physical properties of aerogel core materials

表 1. 气凝胶芯材物理性能

| 序号 | 芯材类型 | 厚度 | 密度(kg/m ³) | 25℃导热系数 W/(m·K) | 备注 |
|----|--------------|-------|------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | 气凝胶毡真空绝热板 | 10 mm | 220 | 0.010 | 气凝胶制品自研, 代抽真空。 |
| 2 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 10 mm | 250 | 0.0063 | 气凝胶制品合作研发, 代抽真空。 |
| 3 | 气凝胶毡 | 10 mm | 180 | 0.017 | 自研 |

从表 1 能够看出, 三种芯材均呈现出卓越的保温性能。其中, 气凝胶复合芯材真空绝热板的导热系数最低, 仅达 0.0063 W/(m·K), 保温效能最为优异; 气凝胶毡真空绝热板次之, 其导热系数为 0.010 W/(m·K); 气凝胶毡的导热系数相对偏高, 不过其密度最小, 在轻量化方面具有显著优势。就制备来源而言, 自研产品与合作研发产品均能够契合试验要求, 为后续复合板的制备提供了多元化的选择。

3.1.2. 保护层材料筛选

保护层材料应满足容重较小、防火等级达 A 级、导热系数较低、抗压强度较高且与混凝土结合性能良好的要求。基于此, 选用无机非金属材料中的水泥基材料, 具体涵盖纤维水泥板、发泡混凝土以及微陶粒气凝胶混凝土, 其物理性能详见表 2。

Table 2. Physical properties of protective layer materials

表 2. 保护层材料物理性能

| 保护层名称 | 规格型号 | 密度(kg/m ³) | 25℃导热系数 W/(m·K) |
|--------|-------|------------------------|-----------------|
| 纤维水泥板 | 10 mm | 592 | 0.030 |
| 发泡混凝土 | / | 300 | 0.06 |
| 微陶粒混凝土 | / | 600 | 0.2 |

纤维水泥板的密度为 592 kg/m³, 导热系数为 0.030 W/(m·K), 具有良好的抗压强度与防火性能, 且施工便利, 与芯材的兼容性良好; 发泡混凝土的密度仅为 300 kg/m³, 具备显著的轻量化优势, 但其导热系

数相对偏高；微陶粒混凝土的密度为 600 kg/m^3 ，导热系数为 $0.2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，但其力学性能表现优异，与芯材结合后能够提升复合板的整体结构稳定性。为进一步优化发泡混凝土的性能，在试验中还将气凝胶粉末添加至发泡混凝土中，制备气凝胶增强型发泡混凝土，并探究其对复合板性能的影响。

3.2. 复合板结构设计

综合芯材与保护层材料的性能特性，设计“面层 - 芯层 - 面层”三明治夹心结构。此结构可充分彰显芯材的保温优势以及面层的保护功效，达成“保温 + 防护”的双重功能。具体结构设计如下：

(1) 对称结构设计：采用对称的面层结构，规避复合板因两侧材料性能差异而引发的应力不均问题，降低变形与开裂的风险。例如， 5 mm 微陶粒混凝土 + 30 mm 气凝胶复合芯材真空绝热板 + 5 mm 微陶粒混凝土、 10 mm 纤维水泥板 + 10 mm 气凝胶复合芯材真空绝热板 + 10 mm 纤维水泥板等结构形式。

(2) 厚度匹配设计：依据芯材的保温效能以及保护层的防护需求，合理匹配各层厚度。芯材厚度区间为 $10\sim 30 \text{ mm}$ ，面层厚度为 $5\sim 10 \text{ mm}$ ，将复合板总厚度控制在 $30\sim 40 \text{ mm}$ 范围内，确保在满足保温性能的前提下，实现薄层化设计。

(3) 界面优化设计：为提升芯材与面层的结合强度，在制备进程中对芯材表面进行预处理，清除杂质并增大粗糙度，同时在面层材料中添加适量的粘结剂，改善界面结合状况，防止在使用过程中出现分层、脱落现象。

3.3. 制备工艺优化

气凝胶复合外墙保温板的制备工艺主要包括原材料预处理、配料混合、成型、养护四个关键步骤，具体流程如下：

(1) 原材料预处理：芯材裁剪为设计尺寸，去除表面浮尘与杂质，对于真空绝热板类芯材，检查密封性能，确保无漏气现象；保护层材料按配方比例准确称量，纤维水泥板进行切割加工，发泡混凝土与微陶粒混凝土提前搅拌均匀，控制含水率在合理范围。

(2) 配料混合：对于发泡混凝土与微陶粒混凝土面层材料，严格按照配合比加入水泥、骨料、外加剂及水，搅拌时间控制在 $3\sim 5$ 分钟，确保混合物均匀细腻。对于气凝胶增强型发泡混凝土，将气凝胶粉末按一定比例加入混合物中，延长搅拌时间 $1\sim 2$ 分钟，保证气凝胶粉末均匀分散。

(3) 成型工艺：采用模压成型工艺，将底层面层材料均匀铺设于模具底部，压实平整后放入芯材，调整芯材位置使其居中，然后铺设上层面层材料，再次压实，确保复合板厚度均匀、结构密实。成型过程中控制压力为 $0.5\sim 1.0 \text{ MPa}$ ，避免压力过大导致芯材结构破坏。

(4) 养护工艺：成型后的复合板放入标准养护室进行养护，养护温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 95\%$ ，养护时间不少于 28 天。养护过程中定期洒水，保持表面湿润，避免早期失水导致开裂，确保复合板的力学性能与耐久性。

通过上述工艺制备的气凝胶复合保温板，主要包括纤维水泥板复合板、微陶粒混凝土复合板、发泡混凝土复合板、气凝胶 + 发泡混凝土复合板、微陶粒混凝土蜂窝复合板等多种类型，其外观形态如图 2~7 所示。

4. 性能测试与结果分析

4.1. 测试方法

4.1.1. 导热系数测试

采用双护板稳态法导热系数仪(图 7)对复合板的导热系数进行测试，该方法符合《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》(GB/T 10294-2008)标准要求。测试环境温度为 25°C ，湿度为 $50\% \pm 5\%$ ，



Figure 2. Cement fiberboard composite aerogel board

图 2. 纤维水泥板复合板



Figure 3. Micro-ceramic particle concrete composite aerogel board

图 3. 微陶粒混凝土复合板

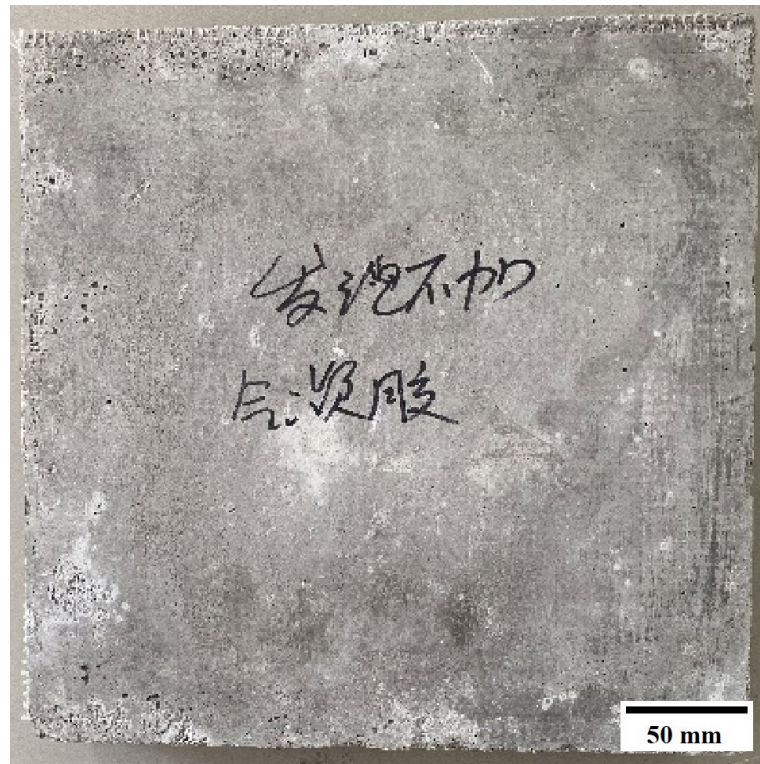


Figure 4. Foam concrete composite aerogel board
图 4. 发泡混凝土复合板

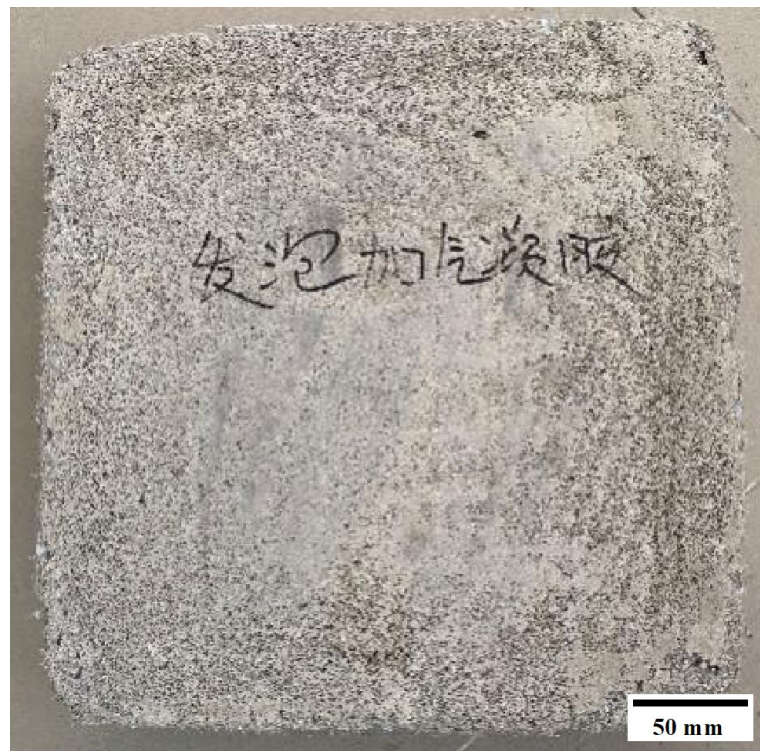


Figure 5. Aerogel-enhanced foam concrete board
图 5. 气凝胶 + 发泡混凝土复合板

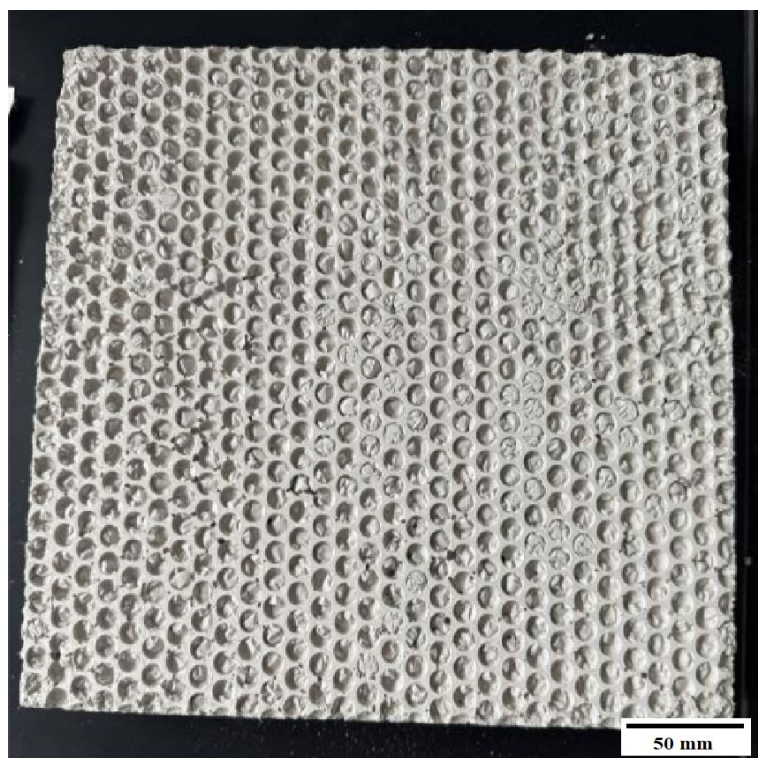


Figure 6. Aerogel composite honeycomb board
图 6. 微陶粒混凝土蜂窝复合板



Figure 7. Guarded hot plate apparatus
图 7. 导热系数测定仪

将样品切割为 300 mm × 300 mm 的标准试件，放入测试装置中，待系统达到热稳态后，记录热流密度与温度差值，计算得出导热系数[9]-[13]。

4.1.2. 密度测试

按照《建筑材料密度测试方法》(GB/T 50081-2019)，选取复合板上不同位置的 3 个试件，尺寸为 100 mm × 100 mm × 板厚，称量试件质量后，测量其体积，计算密度平均值。

4.1.3. 力学性能测试

采用万能材料试验机对复合板的抗压强度进行测试，试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 板厚，加载速率为 1 mm/min，记录试件破坏时的最大荷载，计算抗压强度[14]。

4.2. 测试结果与分析

4.2.1. 基本性能测试结果

不同芯材与保护层材料组合制备的气凝胶复合保温板，其关键性能测试结果如表 3 所示。

Table 3. Test indices for aerogel composite insulation panels
表 3. 气凝胶复合保温板关键参数检测

| 序号 | 芯材 | 芯材厚度 | 外壳 | 总厚度 | 容重 (kg/m ³) | 25℃传热系数 W/(m·K) | 抗压强度 Mpa |
|----|--------------|-------|------------------|-------|----------------------------|--------------------|-------------|
| 1 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 10 mm | 纤维水泥板 | 30 mm | 559 | 0.0261 | 3.324 |
| 2 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 10 mm | 微陶粒混凝土 | 30 mm | 333 | 0.0285 | 0.123 |
| 3 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 10 mm | 发泡混凝土 + 气凝胶颗粒 | 30 mm | 448 | 0.0895 | 0.841 |
| 4 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 10 mm | 发泡混凝土 | 30 mm | 518 | 0.1004 | 0.632 |
| 5 | 气凝胶毡 | 10 mm | 微陶粒混凝土 | 30 mm | 500 | 0.0467 | 0.124 |
| 6 | 气凝胶毡 | 20 mm | 微陶粒混凝土 | 30 mm | 439 | 0.0312 | 0.126 |
| 7 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 15 mm | 微陶粒混凝土 | 30 mm | 418 | 0.0115 | 0.135 |
| 8 | 气凝胶复合芯材真空绝热板 | 30 mm | 微陶粒混凝土 | 40 mm | 374 | 0.0065 | 0.137 |

对照样 100 mm 厚 XPS 保温板的测试结果为：密度 300 kg/m³，导热系数 0.03 W/(m·K)，抗压强度 0.25 MPa，防火等级 B1 级。

4.2.2. 容重分析

项目设计规定复合板容重需小于等于 400 kg/m³，从表 3 能够看出，序号 2 (333 kg/m³)、7 (418 kg/m³)、8 (374 kg/m³) 的容重符合要求，其中序号 2 的容重最小，在轻量化方面的优势最为突出。经分析其原因，当微陶粒混凝土作为保护层材料时，自身密度相对适中，并且与气凝胶复合芯材真空绝热板的适配性良好，能够在确保结构稳定性的同时，有效把控复合板的整体重量。在序号 8 中，芯材厚度增加至 30 mm，然而由于气凝胶芯材自身密度较小，复合板容重仍控制在 374 kg/m³，满足设计要求，这表明芯材厚度的增加对容重的影响较小，而保护层材料的密度是影响复合板容重的关键要素。

气凝胶复合保温板中满足容重要求的序号 2、8 产品，在轻量化方面具有显著的竞争优势，能够有效减轻建筑结构荷载。

4.2.3. 导热系数分析

设计要求传热系数不高于 0.020 W/(m·K)，结合表 3 数据，序号 4 (0.1004 W/(m·K))、7 (0.0115 W/(m·

K))、8 (0.0065 W/(m·K))满足该要求, 其中序号 8 的导热系数最低, 保温性能最为优异。通过对比分析, 可得出以下结论:

(1) 芯材厚度对导热系数具有显著影响。当保护层材料均为微陶粒混凝土时, 气凝胶复合芯材真空绝热板厚度由 10 mm 增至 15 mm (序号 2 与序号 7 对比), 导热系数从 0.0285 W/(m·K)降至 0.0115 W/(m·K); 厚度进一步增至 30 mm (序号 8), 导热系数降至 0.0065 W/(m·K)。这表明在保护层材料相同的情况下, 增加芯材厚度能够有效降低复合板的导热系数, 提升其保温性能。这是由于气凝胶芯材是复合板的主要保温单元, 增加芯材厚度可延长热量传递路径, 减少热流量。

(2) 保护层材料对导热系数具有重要影响。序号 3 与序号 4 对比, 在发泡混凝土中添加气凝胶粉末后, 复合板的导热系数从 0.1004 W/(m·K)降至 0.0895 W/(m·K), 这表明气凝胶粉末的添加能够改善保护层材料的保温性能, 进而降低复合板的整体导热系数。同时, 当纤维水泥板、微陶粒混凝土作为保护层时, 复合板的导热系数明显低于以发泡混凝土作为保护层的情况, 这与保护层材料本身的导热系数差异相符。因此, 选用低导热系数的保护层材料是提升复合板保温性能的重要途径。

(3) 芯材类型对导热系数起决定性作用。气凝胶复合芯材真空绝热板的保温效能优于气凝胶毡, 序号 2 (气凝胶复合芯材真空绝热板)的导热系数(0.0285 W/(m·K))远低于序号 5 (气凝胶毡)的导热系数(0.0467 W/(m·K)), 这说明芯材本身的性能是影响复合板保温效果的核心因素。

序号 2、5、6、7、8 的气凝胶复合保温板导热系数均低于 XPS, 其中序号 8 的导热系数仅为 XPS 的 1/4.6, 保温优势极为显著。在保温效能相同的情况下, 40 mm 厚的序号 8 复合板与 100 mm 厚的 XPS 保温板相当, 实现了保温层厚度减薄 60%的目标。

5. 经济性研究

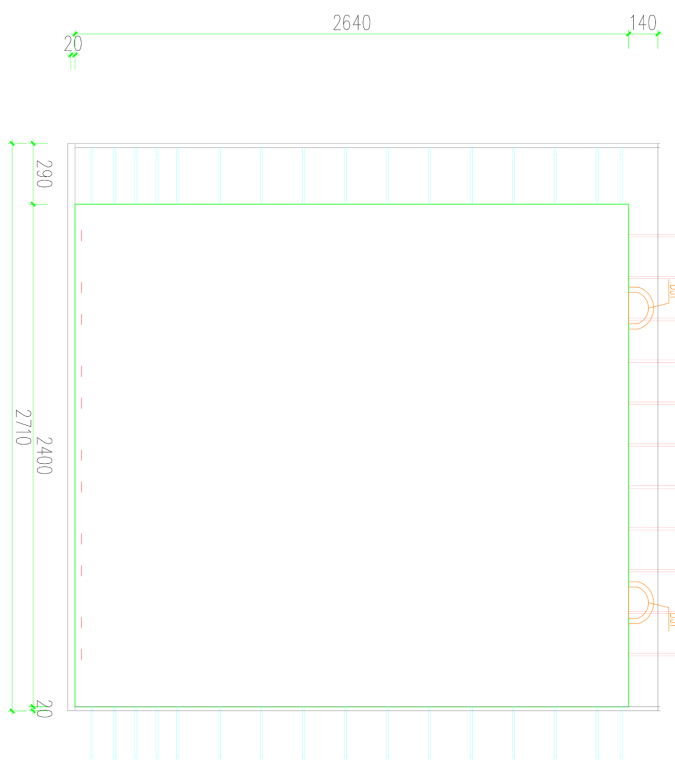


Figure 8. CAD drawing of exterior wall panel
图 8. 外墙板 CAD 图

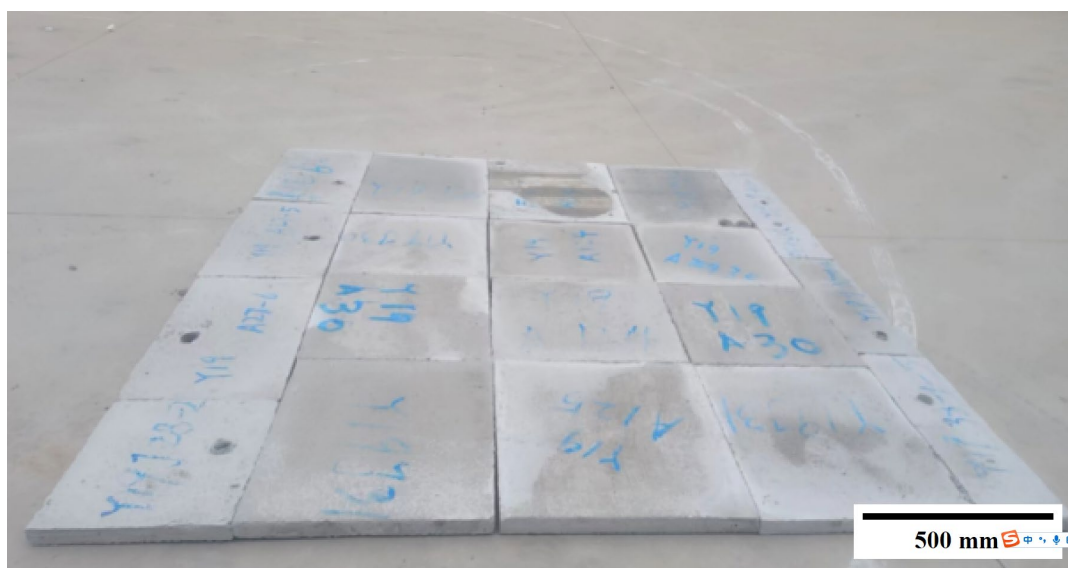


Figure 9. Assembly drawing of aerogel composite insulation board

图 9. 气凝胶复合保温板拼装图

图 8 为某型号外墙施工详图，单块墙板集成了施工外架预留孔、斜支撑固定孔、内外叶墙板保温连接件、排气预留孔及燃气管道预留孔等多种预埋件。传统保温板采用标准化尺寸设计，需施工人员结合现场预埋件位置进行二次裁切与开孔作业。受手工切割工艺精度限制，板材拼接缝及预留孔位边缘易出现间隙偏差，不仅破坏了保温系统的密闭性与结构完整性，更易形成热桥效应；同时，裁切产生的边角料无法二次利用，造成材料损耗率增加，间接提高了工程综合造价。

图 9 为气凝胶复合保温板的现场拼装效果。该类保温板在出厂前即依据项目深化图纸完成定制化加工，通过预设孔洞造型与精准尺寸控制，实现现场直接拼装作业。此工艺不仅大幅提升了板材拼接精度，有效规避了现场二次加工的弊端，还显著降低了人工成本与材料损耗，具备良好的技术经济性与工程应用价值[15]。

6. 结论

本研究通过材料筛选、结构设计、制备工艺优化及性能测试，成功制备出气凝胶复合三明治外墙保温板，主要研究结论如下：

(1) 确定了最优复合结构：微陶粒混凝土 5 mm + 气凝胶复合芯材真空绝热板 30 mm + 微陶粒混凝土 5 mm (序号 8) 的结构满足项目设计要求，其容重为 374 kg/m^3 ，导热系数低至 $0.0065 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，抗压强度 1.5 MPa，防火等级 A 级，兼具优异的保温性能、力学性能与安全性能。

(2) 明确了材料性能影响规律：在保护层材料与芯材材料一致时，增加芯材厚度能够有效降低复合板的导热系数，且对容重影响较小；在发泡混凝土中加入气凝胶粉末，可同时降低复合板的容重与导热系数，提升材料的综合性能；保护层材料的导热系数与密度是影响复合板整体性能的关键因素，低导热系数、低密度的保护层材料更有利于复合板性能优化。

(3) 传统标准化保温板需现场手工裁切开孔，受工艺精度制约，易出现拼接及孔位间隙偏差，破坏保温系统密闭性与完整性，且边角料损耗大，增加工程成本。基于项目图纸定制化生产的气凝胶复合保温板，出厂前预设孔洞、严控尺寸，可直接现场拼装，大幅提升装配精度，显著降低人工与材料成本，为装

配式建筑外墙保温工程提供高效低成本优化方案。

参考文献

- [1] 陈岩. 装配式建筑外墙保温一体化施工技术要点研究[J]. 砖瓦, 2025(12): 122-124.
- [2] 刘聪颖, 吴静, 申衡, 等. 新型建筑保温材料的研究进展与应用前景[J]. 居业, 2024(11): 211-213.
- [3] 苏峰, 李智, 周小芳, 等. 气凝胶复合保温材料在换热站中的应用[J]. 建筑技术, 2024, 55(7): 804-806.
- [4] 刘海. 装配式建筑外墙保温装饰一体板施工技术[J]. 工程机械与维修, 2024(2): 180-182.
- [5] 朱恺群. 城市更新中的绿色低碳策略研究[J]. 中国勘察设计, 2023(12): 53-55.
- [6] 周小芳, 李智. 硅溶胶制备 SiO_2 气凝胶复合绝热毡[J]. 建筑技术, 2022, 53(10): 1279-1281.
- [7] 周丽红. 装配式建筑用外墙保温材料[J]. 砖瓦, 2022(1): 57-58.
- [8] 李建平, 李智, 姚晓明, 等. 微波应用于 SiO_2 气凝胶的工艺研究[J]. 建筑技术, 2020, 51(12): 1463-1466.
- [9] 李建平, 孙艳荣, 李智, 等. CO_2 超临界干燥制备亲水 SiO_2 气凝胶的研究[J]. 建筑技术, 2020, 51(12): 1467-1471.
- [10] 孙永胜, 寄宝康. 浅析装配式建筑外墙保温材料的选择[J]. 河南建材, 2019(6): 102-104.
- [11] 梁立明. 珍珠岩/岩棉复合保温板的复合方式对性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [12] 徐志强. SiO_2 气凝胶的常压制备及在保温材料中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [13] 周华杰. 玻化微珠复合保温板的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [14] 武守相. 外挂保温复合板填充墙平面外受力性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [15] 孙大明, 景小峰, 刘轶晨. 低能耗高舒适住宅技术体系的研究[C]//中国城市科学研究会, 中国建筑节能协会, 中国城科会绿色建筑与节能专业委员会. 城市发展研究——第 7 届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 上海: 中国建筑科学研究院上海分院, 2011: 40-47.