

气凝胶在建筑保温节能中的应用与研究进展

张 军

无锡城市职业技术学院 建筑与环境工程学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年5月12日

摘 要

建筑保温对建筑节能减碳具有积极意义。为了深入了解气凝胶在建筑保温节能中的应用与研究进展, 梳理了气凝胶材料的主要分类与性能特点, 重点围绕气凝胶材料在围护结构、气凝胶玻璃、太阳能集热等方面的应用, 分析了其材料特性、导热系数、节能效果等, 并针对存在的力学性能差、耐久性不足、生产成本低、施工效率低等问题, 给出了最新研究进展, 以期为进一步推动气凝胶材料在建筑保温中的研究与应用提供参考。

关键词

气凝胶, 建筑, 保温节能, 研究进展

Application and Research Progress of Aerogel in Building Insulation and Energy Saving

Jun Zhang

School of Architecture and Environmental Engineering, Wuxi City Vocational and Technical College, Wuxi Jiangsu

Received: March 12, 2026; accepted: March 23, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

Building insulation plays a positive role in energy conservation and carbon reduction for buildings. To gain a deeper understanding of the application and research progress of aerogel in building insulation and energy conservation, this paper reviews the main classifications and performance characteristics of aerogel materials. It focuses on the applications of aerogel materials in building envelopes, aerogel glass, and solar energy collection, analyzing their material properties, thermal

conductivity, and energy-saving effects. Additionally, it addresses issues such as poor mechanical properties, insufficient durability, high production costs, and low construction efficiency, and provides the latest research progress, aiming to provide a reference for further promoting the research and application of aerogel materials in building insulation.

Keywords

Aerogel, Architecture, Thermal Insulation and Energy Saving, Research Progress

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

建筑行业是能源消耗的主要领域，对碳排放有着重要影响。建筑保温连接建筑室内外热环境，其性能对建筑内部工作负荷、能效利用有着显著影响。新型建筑保温材料的研发与应用势在必行。传统建筑保温材料主要分为有机和无机两类。有机材料如聚苯乙烯泡沫、挤塑聚苯板等，防火性能相对较低；无机材料如玻璃纤维、矿物棉等，阻燃性能虽有所提高，但防水与耐久性差、且自重与导热系数高[1]。气凝胶是以空气为填充介质的纳米多孔固体材料，其结构呈现纳米级三维网络，具备高孔隙率、低密度、低热导率、低介电常数等特性[2]，是一种新型建筑保温材料。本文从建筑用气凝胶主要种类与性能特点出发，系统综述近年来气凝胶在建筑保温材料中应用与最新进展，以为后期研究提供参考。

2. 气凝胶的常见种类与主要特点

2.1. SiO₂ 气凝胶

SiO₂ 气凝胶是目前建筑保温中应用最广泛的气凝胶类型，包括前驱体溶液制备、水解缩聚、溶剂交换、改性及干燥等制备过程。其隔热性能优异，热导率低，密度小、透光性好。以正硅酸四乙酯为前驱体，结合常压干燥法与疏水改性技术，制成热导率仅为 0.022 W/(m·K) 的高性能 SiO₂ 气凝胶[3]，简化了制备工艺并降低了成本。纯 SiO₂ 气凝胶脆性大、强度低，纤维复合、改性处理能增强其性能。以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源，掺入纤维增强玻璃纤维，导热系数 0.018 W/(m·K)，密度为 0.12 g/cm³，抗压强度提升至 2.5 MPa [4]。

2.2. 聚合物气凝胶

聚合物气凝胶以聚乙烯醇、聚酰亚胺、聚脲等聚合物为前驱体，比 SiO₂ 气凝胶柔韧性好、抗拉伸性能强。以聚酰胺酸为增强填充剂，加入芳纶纤维制备的复合气凝胶，导热系数 0.031 W/(m·K)，压缩强度为 798 kPa，燃烧炭化长度仅 1.5 cm，阻燃性优异[5]，以电纺聚酰亚胺(PI)纤维为支撑骨架，掺入聚硅氮烷复合改性，再经冷冻萃取与真空干燥制备的气凝胶，密度 39.1 mg/cm³，热导率 40.4 mW/(m·K)，孔隙率 >96%，耐疲劳性优异[6]。以聚脲(PU)为前驱体，添加硅烷偶联剂，制成的气凝胶密度 0.20 g/cm³，孔隙率 85%，热导率：0.030 W/(m·K)，接触角 152° (疏水性)，可用作外墙保温和防水[7]。

2.3. 生物质气凝胶

生物质气凝胶以纤维素、木质素、壳聚糖等为原料，可再生、可降解，用作建筑保温材料还具有一

定的生物“固碳”意义。韩申杰等[8]采用溶胶-凝胶法利用纤维素等制备的气凝胶,热导率 0.018~0.03 W/(m·K),抗压强度达 1.2 MPa,密度仅为 3.3 kg/m³,极限氧指数(LOI)从 18.5%提升至 57.4%。王立艳等[1]利用硅酸钠溶液与纤维素纤维并融合硅烷偶联剂,热导率 0.025 W/(m·K),在 80℃、85%湿度条件下老化 1000 小时,性能保持率超 90%,体现出一定的维持建筑外墙、屋顶保温的耐久性。

3. 气凝胶在建筑保温节能中的常见应用

3.1. 建筑围护结构

3.1.1. 气凝胶隔热涂料

气凝胶隔热涂料由气凝胶颗粒与成膜树脂、溶剂、改性剂等,通过分散、研磨等工艺制成,涂布于建筑墙面、屋顶等表面,通过抑制涂层内部物质热传导、对流与辐射交换,并阻隔外部热量传入及内部热量散失实现热阻。研究发现 SiO₂ 气凝胶微球能显著降低涂层的导热系数,当 SiO₂ 气凝胶微球质量分数为 4%时,涂层导热系数低至 0.0511 W/(m·K),且随着涂层厚度增加,导热系数降低,隔热效果提升[9]。以改性气凝胶为功能填料,辅以有机硅改性丙烯酸树脂、助剂等得到新型气凝胶复合保温隔热涂料,导热系数低至 0.038 W/(m·K),且耐水好、强度大、性价比高[10]。利用硅丙乳液与弹性苯丙乳液,二氧化硅气凝胶、膨胀珍珠岩等填料制备的阻隔-反射-辐射协同型涂料被证实更利于夏热冬冷时的建筑节能[11]。

3.1.2. 气凝胶毡

气凝胶毡主要以玻璃纤维或陶瓷纤维,通过溶胶-凝胶浸渍、干燥等工艺,将 SiO₂ 气凝胶负载于纤维毡中制备而成,其柔性较好,可裁剪、弯曲,适用于建筑管道、屋顶、外墙等复杂部位保温。在允许热损限度下,保温层厚度较传统玻璃纤维毡可减少 40%~54%,大大降低了建筑自重[1]。将二氧化硅气凝胶结合正硅酸乙酯,并加入玄武岩-玻璃纤维复合材料,在超临界干燥下制成,在常温下拉伸强度为 0.858 MPa,经 900℃热处理后样品抗压强度达到 0.431 MPa,一定程度上提高了气凝胶毡的受力性能[12]。在 SiO₂ 气凝胶毡改造的低温档案库房维护结构中,研究发现若维持档案室内温度 14℃,全年累计耗电量由 14064.6kWh 减少为 7740.1 kWh,节能效果显著[13]。

3.1.3. 气凝胶保温板材

气凝胶保温板材是将气凝胶颗粒与高分子聚合物、石膏、砂浆、纤维等基体材料混合,经搅拌、压制、高温固化制成,其形状规则、力学强度相对较高,可用作建筑外墙、屋顶、地面的保温构造。龙东风等利用聚乙烯醇分散制备 SiO₂ 气凝胶浆料,加入改性聚苯乙烯颗粒,结合无机胶凝材料热压成的新型保温板,导热系数可低至 0.029 W/(m·K),与改性前相比,新型保温板导热系数减小 23.7%,阻燃性能也可达到 A2 级[14]。利用 SiO₂ 气凝胶与聚苯乙烯颗粒悬浮合成的核壳结构可发性珠粒,制备的气凝胶/聚苯乙烯复合板材,在气凝胶添加量为 1.6%~2.0%时,复合板材的导热系数达到 0.0248 W/(m·K),且阻燃性能也有所提升[15]。

3.2. 气凝胶节能玻璃

传统的玻璃围护隔热性差,能量损失高。在双层玻璃之间填充气凝胶颗粒,或在玻璃表面涂覆气凝胶复合涂层制成的气凝胶节能玻璃,能有效提升玻璃的隔热性能。在玻璃中加入粒径为 3 mm~5 mm 的气凝胶,可减少 58%的热损失、降低 38%的可见光透过率,再加入小粒径气凝胶颗粒,热损减少值增加并保持较好的可见光透过率[16]。减小气凝胶颗粒尺寸可增强光散射效果,但过度填充会导致光线衰减加剧,需平衡好隔热性能与透光率损失。张焱等[17]发现采用气凝胶玻璃外围护结构的建筑能耗比木格构外围

护结构低 26.06%，节能效果显著，房间内的天然光照度大于 300 lx，也满足相关设计要求。

3.3. 太阳能集热

将气凝胶应用于太阳能集热板，可通过两种方式提升集热效率：一是优化集热源头，提高太阳能吸收率；二是强化隔热效果，抑制红外辐射热损，并对集热过程中的对外热损失进行重吸收。气凝胶的新型光伏系统结合相变材料，模拟发现系统整体热/电效率从 50.6%提高至 90.8%，同时实现了 104.1 kg/m²的 CO₂ 减排量[18]。采用二氧化硅气凝胶玻璃作覆盖层，可选择性吸收特定波段的太阳光，兼具高透光性，气凝胶的低导热率减少光伏电池的热损失，同时将未被吸收的光能转化为热能，系统的焓输出比传统系统提高了 13.3% [19]。引入透明气凝胶隔热层进行屏蔽板结构优化，当气凝胶层厚度为 5 mm 时，集热器在低温和中温范围内具有超高热效率，集热器的热效率为 60.47%提高了 20.68% [20]。

4. 气凝胶在建筑保温应用中的问题与最新进展

4.1. 性能优化

气凝胶的力学性能，尤其在动态载荷、高风压等复杂建筑环境中气凝胶易发生破裂或失效，保持长期稳定性及复合界面结合强度，解决其脆性、易老化、分散差等缺陷是性能优化关键。通过溶胶凝胶法结合冷冻干燥技术，制备壳聚糖二氧化硅复合气凝胶，其抗压强度提升约 40%，壳聚糖的柔性链段与二氧化硅网络形成互穿结构，有效抑制了裂纹扩展，断裂伸长率提高至 15%，较纯二氧化硅气凝胶(约 5%)韧性得到了显著改善，在模拟建筑墙体受力测试中，能量吸收效率提升 25%，且整体密度为 0.12 g/cm³，仍保持轻质特性[21]。通过正交热光固化的双向记忆气凝胶，内部介晶沿拉伸方向，形成有序微结构，抗压强度达到 1.8 MPa，较传统聚合物气凝胶提升 60%，逆变收缩率达 37%无疲劳损伤，抗撕裂性能显著优于传统气凝胶，在模拟建筑隔热层受力时，温度变化导致的应力变形也有所降低[22]。

4.2. 低碳生产

传统气凝胶多以正硅酸乙酯等有机硅源为原料，价格昂贵；部分工艺如超临界干燥生产能耗高整体成本高，需添加干燥剂降低干燥成本，或采用纤维板复合等形式减少用量来控制成本。而以废纸为原料，通过无溶剂定向冷冻制备气凝胶，无需“溶剂交换”与“疏水化处理”，免去了溶剂消耗和后处理，成本降低了近 2/3，墙体应用显示可使室内峰值温度降低 4.8℃，保热期延长 2.3 倍，节能效果显著[23]。回收废弃矿物棉，通过氢氧化钠溶解提取得到的硅溶胶原料，再利用常压干燥筒化工艺(50℃ → 200℃)代替超临界干燥，降低了能耗与调试维护费用，成本降低了 50%，其薄型化产品用于墙体保温时，厚度仅为传统保温材料厚度的 1/2~1/3，还可降低运输与施工成本[24]。

4.3. 施工改良

气凝胶材料自身光滑，施工时往往附着力不足，均匀性差，施工效率低。且施工时易摩擦产生气凝胶颗粒、纤维，危害施工人员健康甚至引发粉尘爆炸。因此在材料改良、工法优化、设备研发等方面仍待提升。采用耐高温有机硅树脂作为基体，可包裹气凝胶颗粒防止脱落，再添加纳米二氧化硅等提高硬度与耐磨性，减少颗粒或纤维的产生[25]。对于施工中的接缝处理，应开发专用拼接密封材料，减少拼接抑制热桥效应。材料整体附着力的提高，还可采用尼龙锚栓钻孔型锚固法，辅以梅花型塑料垫片 + 界面砂浆组合工艺，不仅可缓解气凝胶毡/板与找平层之间的应力集中，还可提升二者黏结强度，双层抗裂结构还可解决内墙保温的开裂问题，采用标准化锚固与界面处理工艺，保温施工效率可提高 25%，阴阳角、门窗洞口等节点处理时长缩短约 50% [26]。

5. 结论与展望

气凝胶作为一种新型轻质多孔材料, 凭借其低热导率、高阻燃性、轻质性等特点, 正成为建筑行业保温节能优选材料。三种常用材料以建筑围护结构保温(隔热涂料、气凝胶毡、保温板材)、节能玻璃、太阳能集热板等形式应用, 在建筑设计与既有建筑节能改造中均展现出良好的应用效果。而在力学性能、长期稳定性、低碳生产、施工效率等方面仍存在一定挑战。近年来, 利用纤维复合、纳米掺杂、常压干燥、生物质原料开发、工法改进等, 在性能优化、低成本制备、环保改性及施工改良等方面的均取得了较大进展, 为其规模化应用奠定了基础。

未来建议推动气凝胶与相变储能、智能温控功能的集成。气凝胶与相变材料(PCM)的微观复合是避免气凝胶功能单一, 实现建筑智能调温、推动建筑节能升级的关键路径, 其核心是依托气凝胶纳米多孔骨架的物理限域作用固定 PCM、抑制其熔融泄漏, 结合 PCM 固-液相变过程中的储放热特性, 实现建筑围护结构温度的动态调控。后期建议可精准解析气凝胶-PCM 界面作用机制, 探究纳米限域效应对相变材料相变行为的调控规律, 建立微观结构(孔径、孔隙率、界面结合能)与调温性能(储热密度、响应速度)的量化关联模型; 优化原位复合与双重封装工艺, 引入无机掺杂与增强相, 同步提升复合体系的长效稳定性、力学性能与调温耐久性; 并拓展光热-相变-隔热一体化功能, 适配外墙、屋面等不同建筑场景, 开展实测试验验证应用效果; 同时推进低成本规模化制备工艺研发, 构建复合材料性能评价标准, 结合全生命周期评价验证其低碳优势, 进一步推动在建筑节能领域的规模化应用。

参考文献

- [1] 王立艳, 盖广清. 硅基气凝胶保温隔热材料与建筑节能技术的融合分析[J]. 粘接, 2020, 44(11): 39-42.
- [2] 马浩然, 崔升, 宋梓豪. 气凝胶建筑保温节能材料的应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(9): 835-845.
- [3] 李月香, 马军霞, 王蒙. SiO₂ 高效节能气凝胶隔热材料的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(7): 7224-7230.
- [4] 张莉, 刘洁玲. 新型复合建筑材料 SiO₂ 气凝胶在土木工程应用探析[J]. 化学工程师, 2021, 35(6): 52-55.
- [5] 刘传志. 聚酰亚胺气凝胶-芳纶纤维复合材料的制备及性能研究[J]. 高分子通报, 2025, 38(5): 801-807.
- [6] Yao, K.Q., et al. (2023) Freezing-Extraction/Vacuum-Drying Method for Robust and Fatigue-Resistant Polyimide Fibrous Aerogels and Their Composites with Enhanced Fire Retardancy. *Engineering*, **21**, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.024>
- [7] Lou, F., Dong, S., Zhu, K., Chen, X. and Ma, Y. (2023) Thermal Insulation Performance of Aerogel Nano-Porous Materials: Characterization and Test Methods. *Gels*, **9**, 220. <https://doi.org/10.3390/gels9030220>
- [8] 韩申杰, 张恩浩, 卢芸. 建筑用生物质基纤维素保温气凝胶研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 108-120.
- [9] 王松涛. SiO₂ 气凝胶微球在水性隔热涂料中的多尺度热力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- [10] 吕文东, 栾焕光, 王滢, 等. 新型气凝胶复合保温隔热涂料的研制[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(2): 128-132.
- [11] 冀高平, 李忠, 李艳. 一种用于建筑外墙的复合型隔热保温涂料及制备方法[P]. 中国专利, CN110982360B. 2021-03-30.
- [12] 王亮, 辛怡, 曹永平, 等. 芳纶纤维毡增强二氧化硅气凝胶隔热材料的制备及其性能[J]. 西安工程大学学报, 2025, 39(1): 90-96.
- [13] 张建明. 纳米气凝胶作为档案库房墙体保温材料的实践研究[J]. 浙江档案, 2020(2): 20-23.
- [14] 龙东风, 张雪, 黄建, 等. SiO₂ 气凝胶复合改性 EPS 不燃保温板的制备和性能研究[J]. 新型建筑材料, 2026, 53(1): 82-86.
- [15] 赵建伟, 尚阳, 崔杰. 气凝胶应用于墙体保温材料的研究进展[J]. 新材料产业, 2021(2): 57-60.
- [16] 李昊琰, 吴会军, 张广鹏, 等. 氧化硅气凝胶在建筑中的节能减碳应用进展[J]. 建筑节能, 2025, 53(11): 57-64.
- [17] 张焱, 杨柳, 罗智星. 气凝胶玻璃住宅夏季室内光热环境研究与对策分析[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(9): 40-50.
- [18] Zheng, X. and Zhou, Y. (2023) A Three-Dimensional Unsteady Numerical Model on a Novel Aerogel-Based PV/T-PCM

- System with Dynamic Heat-Transfer Mechanism and Solar Energy Harvesting Analysis. *Applied Energy*, **338**, Article ID: 120899. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120899>
- [19] Du, M., Tang, G.H. and Wang, T.M. (2019) Exergy Analysis of a Hybrid PV/T System Based on Plasmonic Nanofluids and Silica Aerogel Glazing. *Solar Energy*, **183**, 501-511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.057>
- [20] Sales Silva, S.T., Barros, R.M., Silva dos Santos, I.F., Maria de Cassia Crispim, A., Tiago Filho, G.L. and Silva Lora, E.E. (2022) Technical and Economic Evaluation of Using Biomethane from Sanitary Landfills for Supplying Vehicles in the Southeastern Region of Brazil. *Renewable Energy*, **196**, 1142-1157. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.020>
- [21] Vareda, J.P., Matias, P.M.C., Paixão, J.A., Murtinho, D., Valente, A.J.M. and Durães, L. (2024) Chitosan-Silica Composite Aerogel for the Adsorption of Cupric Ions. *Gels*, **10**, Article 192. <https://doi.org/10.3390/gels10030192>
- [22] Wang, M., Song, Y., Bisoyi, H.K., Yang, J., Liu, L., Yang, H., *et al.* (2021) A Liquid Crystal Elastomer-Based Unprecedented Two-Way Shape-Memory Aerogel. *Advanced Science*, **8**, e2102674. <https://doi.org/10.1002/advs.202102674>
- [23] Li, J., Yuan, Y., Zeng, Y., Li, D., Yang, L., Wang, G., *et al.* (2025) High-Performance Thermal Storage Materials Using Wastepaper Aerogels for Green Building Applications. *Journal of Energy Storage*, **115**, Article ID: 115986. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115986>
- [24] Borzova, M., Gauvin, F. and Schollbach, K. (2025) Upcycling Waste Mineral Wool into Ambient Pressure-Dried Silica Aerogels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **13**, 2955-2965. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c09976>
- [25] 孙艳, 杨东凯, 董丹, 等. 气凝胶保温毡用环保型防尘胶的研制[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 535-537.
- [26] 一种气凝胶毡/板内墙保温施工工艺的制作方法[P]. 中国专利: 202510313424. 2025-05-13.