

引用格式: 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.

MA H R, CUI S, SONG Z H. Research Progress on the Application of Aerogel in Building Insulation and Energy-Saving Material[J]. Materials China, 2025, 44(9): 835-845.

气凝胶建筑保温节能材料的应用研究进展

马浩然^{1,2,3}, 崔升^{1,2,3}, 宋梓豪^{1,2,3}

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

(2. 南京工业大学 材料化学工程全国重点实验室, 江苏 南京 211816)

(3. 江苏先进无机功能复合材料协同创新中心, 江苏 南京 210009)

摘要: 保温隔热材料作为建筑节能的关键因素, 对减少建筑能耗和维持室内环境舒适至关重要。然而, 传统保温隔热材料在建筑领域的应用却存在材料密度大、使用厚重、制备原料有毒等不足, 且保温阻燃性能难以满足新一代绿色建筑的需求。作为一种新型轻质多孔材料, 气凝胶凭借其三维纳米多孔结构、高比表面积和孔隙率等特性, 展现出优异的隔热性能, 被视为理想的建筑保温隔热材料。在此基础上, 围绕近年来建筑用气凝胶的性能、种类及其在建筑保温领域中的应用研究进展, 探讨了气凝胶材料在建筑保温中实际应用及节能效果, 并分析了应用中面临的潜在问题, 提出了优化制备工艺、开发低成本原材料、加强资源化回收技术的研发等解决思路。以助力气凝胶材料在技术、经济与环境协同发展等方向上取得突破, 为绿色建筑与全球节能减排目标提供高效且创新的实现方案。

关键词: 绿色建筑; 气凝胶; 隔热性能; 保温材料; 节能应用

中图分类号: TB332; TU55⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)09-0835-11

Research Progress on the Application of Aerogel in Building Insulation and Energy-Saving Material

MA Haoran^{1,2,3}, CUI Sheng^{1,2,3}, SONG Zihao^{1,2,3}

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

(2. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

(3. Jiangsu Collaborative Innovation Centre for Advanced Inorganic Functional Composites, Nanjing 210009, China)

Abstract: Thermal insulation materials are crucial to building energy efficiency, playing a vital role in reducing energy consumption and maintaining indoor comfort. However, traditional insulation materials in the building industry have limitations, including high material density, heaviness, toxic raw materials and inadequate fire resistance, which fail to meet the requirements of next-generation green buildings. As a novel lightweight porous material, aerogel, with three-dimensional nanoporous structure, high specific surface area and porosity, exhibits outstanding thermal insulation properties, making it an ideal solution for building insulation. Based on recent advancements in the building insulation field, this paper reviews the performance, types and applications of aerogels in building insulation, discussing their practical applications and energy-saving effects in construction. It also analyzes the challenges faced in their application and proposes solutions, including optimizing preparation processes, developing low-cost raw materials and enhancing resource recycling technologies. These strategies aim to promote breakthroughs in the coordinated development of aerogels in terms of technology, economy and environment. The ultimate goal is to provide efficient and innovative approach for green buildings and contribute to global energy-saving and emission-reduction targets.

Key words: green building; aerogel; thermal insulation; thermal insulation materials; energy-saving application

收稿日期: 2024-09-05 修回日期: 2024-12-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3812300)

第一作者: 马浩然, 男, 2001年生, 硕士研究生

通讯作者: 崔升, 男, 1980年生, 教授, 博士生导师,

Email: scui@njtech.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202409008

1 前言

全球能源消耗的持续增长引发了诸多环境问题, 包括温室气体排放增加、气候变化加剧和资源枯竭。而建

筑行业是全球最大的能源消耗领域之一，约占全球总能源消耗量的 40% 以上，根据国际能源署统计，2017 ~ 2022 年仅建筑供暖能耗就占据世界一次能源供应总量的 15% ~ 20%^[1, 2]。随着全球气候变化和能源危机日益严峻，建筑行业高能耗和碳排放问题已经成为各国政府和科研机构关注的焦点。欧盟在《能源效率指令》中提出，到 2030 年至少实现 32.5% 的能源效率提升^[3]。美国则通过《能源政策法案》来鼓励建筑节能技术的应用和推广^[4]。中国在《绿色建筑行动方案》中明确要求新建建筑需达到节能标准，并推动既有建筑的节能改造^[5]。

为实现建筑节能，保温材料的选择至关重要。这类材料需满足一系列关键性能，包括低导热性($\leq 0.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、优异的防火性能、可靠的力学强度、良好的耐久性 & 抗湿能力，以应对复杂多变的服役条件^[6, 7]。然而，传统建筑保温材料，如岩棉、玻璃棉、聚氨酯泡沫板和挤塑聚苯乙烯板等，尽管具有一定的隔热、轻质性能及成本优势，但在长期使用过程中容易受到潮湿、紫外线、高温及化学侵蚀的影响，导致热工性能衰退和耐久性显著降低，难以满足现代建筑的长期节能需求^[8]。

气凝胶是一种新型轻质多孔材料，广泛应用于隔热、隔音、吸附、储能与转换和生物医学等领域^[9]。其结构特点如图 1 所示，由纳米级颗粒或聚合物分子链在三维空间内相互聚集而形成纳米多孔结构。这种独特的多孔结构使得气凝胶具有极高的比表面积($1000 \text{ m}^2/\text{g}$)和超过 90% 的孔隙率，成为当前最轻的固体材料之一^[10, 11]。同时纳米孔洞中的气态分散介质可有效阻止热量的传导，减少低温红外辐射，在常温下导热系数可低至 $0.013 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，展现出卓越的隔热性能^[12]。随着建筑行业对低碳环保要求的不断提高以及对气凝胶应用的研究深入，气凝胶已成为建筑节能领域的研究热点^[13]。近年来，围绕气凝胶在建筑中的应用，研究者们开发了多种新型气凝胶建筑材料，如气凝胶复合保温板、柔性气凝胶毡和透明气凝胶玻璃等。这些材料在隔热、隔音和

阻燃等方面展现出多重功能，满足高效节能、结构安全和舒适性提升等多方面需求^[14]。然而，将气凝胶广泛融入建筑行业并非没有挑战。由于气凝胶本身脆性较大，机械强度不足，因此难以单独承受复杂建筑环境中的机械载荷；同时，较高的吸湿性会导致它在潮湿环境中隔热性能逐渐退化。此外，高昂的生产成本和规模化生产的技术瓶颈限制了气凝胶在大规模建筑工程中的应用，其生产能耗高与废弃物处理不完善等全生命周期管理问题在可持续发展中同样面临挑战。这些问题构成了当前研究的重点方向，将为提高气凝胶性能、拓展气凝胶应用领域提供有力支撑。本文系统介绍了建筑用气凝胶材料的种类及其性能，综述了近年来气凝胶在建筑保温材料中的研究进展及节能应用，并探讨了气凝胶在建筑行业应用的潜在问题及未来发展方向，以期助力实现建筑节能减排目标，推动环境保护和可持续发展。

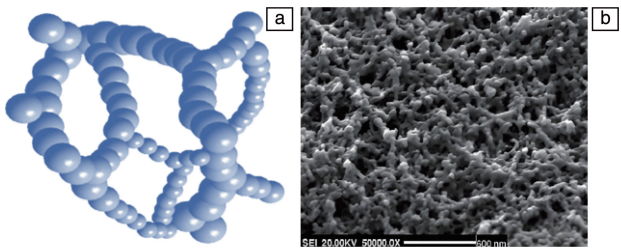


图 1 气凝胶的理想骨架结构(a)和微观形貌(b)

Fig. 1 Ideal structure(a) and microscopic morphology (b) of aerogel

2 建筑用气凝胶材料的种类和性能

现代绿色建筑对保温材料提出了更高要求，需兼顾隔热性、阻燃性、耐久性和环保性，以确保材料能够满足节能、安全和环保的多重要求^[15]。为全面分析气凝胶在绿色建筑中的应用潜力，表 1 对几种常见保温材料的性能进行了详细对比，并综合评价了各自的优缺点^[16-20]。

表 1 常见建筑保温材料与气凝胶的性能对比^[16-20]

Table 1 Comparison of the performance of common building insulation materials and aerogel^[16-20]

Types of insulation materials	Thermal conductivity/ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	Density/ (kg/m^3)	Combustion level	Weathering durability	Evaluation of strengths and weaknesses
Aerogel	0.013~0.021	3~150	A1	Excellent	Very low thermal conductivity and high cost
Foamed concrete	0.060~0.200	300~1200	A1	Excellent	Excellent fire resistance and self-weighting
Expanded perlite	0.045~0.070	40~150	A1	Good	Lightweight and low strength
Rock wool board	0.035~0.045	30~180	A1	Excellent	Thermal and acoustic insulation, high moisture absorption
Wood fibre board	0.040~0.060	150~250	B2	Average	Environmentally friendly and flammable
Expanded polystyrene	0.035~0.040	10~30	B2	Average	Lightweight, poor flame retardancy

续表					
Types of insulation materials	Thermal conductivity/ (W/(m·K))	Density/ (kg/m ³)	Combustion level	Weathering durability	Evaluation of strengths and weaknesses
Extruded polystyrene	0.029~0.035	25~45	B1	Good	Moisture and corrosion resistance, poor breathability
Polyurethane foam	0.022~0.035	30~60	B1	Good	Good insulation, more expensive
Phenolic foam	0.020~0.045	30~80	A2	Good	Better fire resistance, high brittleness
Polystyrene granule insulation mortar	0.045~0.070	200~400	B2	Good	Thermal insulation and waterproofing, high construction requirements

近年来，气凝胶材料凭借其独特的低密度、低热导率、高比表面积、出色的化学稳定性和阻燃性能，在建筑节能领域逐渐占据了重要地位。尤其是 SiO₂ 气凝胶及其复合材料，凭借卓越的隔热性能和耐久性，已成为建筑保温材料的主流选择。随着研究的不断深入，科研人员开发出了具有更高力学强度和柔韧性的聚合物气凝胶，以及具备可再生性和环保优势的生物质气凝胶。这些新

型气凝胶材料不仅在隔热性能上表现优异，还在能效提升、结构安全和可持续发展方面为建筑行业带来了更多可能性。表 2 总结了建筑用 SiO₂ 气凝胶、聚合物气凝胶和生物质气凝胶及其复合材料的主要性能、局限性和适用场景^[21-31]。在此基础上，本章节将进一步分析这 3 类气凝胶的研究进展和技术应用，为推动气凝胶在建筑节能领域的发展提供科学参考。

表 2 建筑用气凝胶及其复合材料的性能、局限性和适用场景

Table 2 The performance, limitations and applicable scenarios of aerogels and their composite materials in construction

Types of aerogels	Research on aerogel composites	Performances	Limitations	Applicable scenarios	Ref.
SiO ₂ aerogel	Silica fiber-based aerogels	Enhanced mechanical strength, excellent thermal insulation and tensile properties	High fiber content may reduce porosity, affecting insulation	Wall insulation, industrial pipe insulation	[21]
	Cement-based SiO ₂ aerogels	Lightweight, good thermal insulation, stable structural properties	Excessive aerogel may impair workability	Lightweight walls, building envelopes	[22]
	Gypsum-based SiO ₂ aerogels	Combines gypsum's moldability with aerogel's insulation	High moisture absorption, requires water-repellent additives	Interior wall insulation, decorative thermal panels	[23]
	Aerogel glass brick	Insulation, transparency and high compressive strength	Complex production, durability depends on sealing	Curtain walls, photovoltaic facades	[24]
	Aerogel-foam composites	Combines insulation with cushioning, lightweight and adaptive	Foam-aerogel bonding and durability require optimization	Roof insulation, waterproof layers	[25]
Polymer aerogel	Polyimide aerogel	Flexible, high-temperature resistant, stable under extreme conditions	High cost, complex fabrication	Flexible building parts, seismic insulation	[26]
	Polyvinyl alcohol aerogel	Water-resistant, strong mechanics, good environmental adaptability	Performance sensitive to humidity, weather resistance needs improvement	High-performance panels, eco-friendly coatings	[27]
	Cellulose-conducting polymer aerogels	Combines conductivity with insulation, multifunctional	Trade-offs between conductivity and stability, complex fabrication	Smart building insulation, sensor insulators	[28]
Biomass aerogel	Biomass cellulose aerogel	Renewable, eco-friendly, basic thermal insulation	Poor fire resistance, lower insulation compared to conventional aerogels	Rural green buildings, low-cost insulation	[29]
	Sodium alginate aerogels	Eco-friendly, biocompatible, moderate insulation	Weak mechanical properties, needs reinforcement	Degradable materials, lightweight thermal layers	[30]
	Chitosa aerogels	Antibacterial, good mechanics, lightweight	High moisture absorption, requires waterproofing	Green insulation boards, hygienic protective materials	[31]

2.1 SiO₂ 气凝胶

SiO₂ 气凝胶是最早面世并投入应用的气凝胶材料，其制备过程如图 2a 所示，包含前驱体溶液制备、水解、

缩聚、老化、溶剂交换、改性和干燥处理等步骤^[32]。凭借优异的隔热性能、高孔隙率和低密度等特点，SiO₂ 气凝胶被誉为“将改变世界的神奇材料”^[33]，在建筑节能领

域展现出巨大潜力。然而,制备成本高昂、热稳定性不足和力学性能较差等问题限制了其大规模推广。

为克服这些挑战,一方面,研究者通过改进溶胶-凝胶法和干燥技术,显著优化气凝胶的微观结构并降低生产成本。李月香等^[34]以正硅酸四乙酯为前驱体,结合常压干燥法和疏水改性技术,成功制备出了具备高结构有序度和优良热稳定性的 SiO_2 气凝胶材料,同时实现了制备工艺的简化和成本的降低,材料导热系数也仅有 $0.022 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。另一方面,纤维复合增强技术广泛应用于改善 SiO_2 气凝胶的力学性能和耐水性^[35]。Pedroso 等^[36]的研究表明,掺入纤维(芳纶、剑麻和生物质纤维)的气凝胶复合材料较纯 SiO_2 气凝胶力学性能提升 12% 以上,吸水率降低 50%,具有良好的力学强度和耐水性,同时还保持了低导热系数($<0.030 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),可满足建筑新建和改造对保温材料的高性能要求(图 2b)。

在建筑节能保温中, SiO_2 气凝胶的纳米多孔结构可显著降低建筑结构的热传导和对流,有效阻隔热辐射,提供出色的隔热保温性能,并大幅度降低建筑物的自

重^[37, 38]。Wu 等^[39]将超轻质 SiO_2 气凝胶(密度为 $75 \text{ kg}/\text{m}^3$)掺入发泡混凝土中,在相同发泡倍率下,超轻质气凝胶/发泡混凝土比传统发泡混凝土含有更小、更均匀的孔隙(图 2c)。当泡沫体积分数为 70%、气凝胶体积分数为 13% 时,发泡混凝土的密度和导热系数均降低约 10%,分别为 $185 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $0.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,并且力学性能优良,使用成本下降 49%,应用在建筑围护结构中可使建筑运行热量损失减少 9%。此外, SiO_2 气凝胶的光学性能也有独到之处。气凝胶多孔网络结构对透射光的散射和吸收极低,从而在可见光范围内呈透明。这一特性使它在透明保温墙体和光电建筑中表现出重要价值,可实现建筑节能和自然采光的双重目标。Ganobjak 等^[24]基于此开发并表征了一种 SiO_2 气凝胶新型模块化和半透明的气凝胶玻璃砖,其组成结构见图 2d。通过与其他文献报道或市面上常见的保温砖相比,这种气凝胶砖的导热系数仅为 $0.053 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,抗压强度接近 45 MPa,同时还为建筑增加了良好的透光优势。

如今, SiO_2 气凝胶已广泛应用于保温板材、毡材、

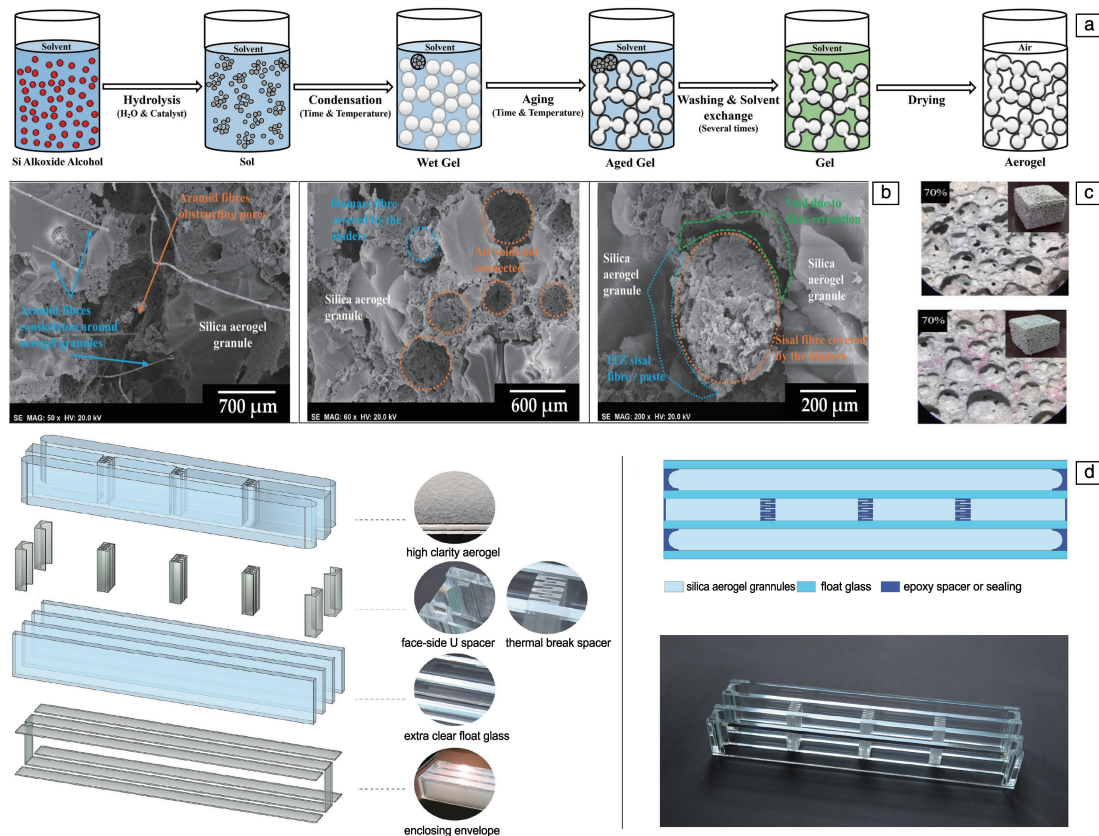


图 2 SiO_2 气凝胶的制备、改性及应用: (a) SiO_2 气凝胶合成工艺示意图^[32]; (b) 分别掺入芳纶、剑麻和生物质纤维的 SiO_2 气凝胶微观结构^[36]; (c) 70% 泡沫体积分数的超轻质气凝胶/泡沫混凝土光学照片^[39]; (d) 气凝胶玻璃砖的组成、结构及形状^[24]

Fig. 2 Preparation, modification and application of SiO_2 aerogels: (a) schematic diagram of SiO_2 aerogel synthesis process^[32]; (b) microstructure of SiO_2 aerogels doped with aramid, sisal and biomass fibres, respectively^[36]; (c) optical images of ultra-lightweight aerogel foamed concrete with a 70% foam volume fraction^[39]; (d) composition, structure and shape of an aerogel glass block^[24]

砂浆、玻璃、泡沫混凝土、隔热涂料和太阳能集热板等建筑节能材料中。然而，其进一步推广仍受制于生产工艺的复杂性和材料性能的局限性。因此，未来应着力开发更可持续的绿色化学合成方法，降低资源与能源消耗，并通过多功能复合材料设计提升材料力学性能、耐久性和隔热效果，以推动它在建筑领域的规模化应用。

2.2 聚合物气凝胶

聚合物气凝胶是由聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA)、聚酰亚胺、聚脲等聚合物为前驱体制备的新型气凝胶材料^[40-42]。与传统的 SiO_2 气凝胶相比，聚合物气凝胶在保持低密度和高孔隙率的同时，克服了 SiO_2 气凝胶的脆性和延展性不足等弊端，展现出更优异的柔韧性和抗拉伸性能。这些特点使它在外墙保温板、柔性保温材料以及绝缘线缆等建筑领域具备独特优势。

关于聚合物气凝胶节能应用及性能优化的研究近几年也越来越多。Yang 等^[43]利用 PVA 和氮化硼纳米片 (boron nitride nanosheets, BNNS) 制备了一种 BNNS/PVA 复合气凝胶。这种复合气凝胶能够承受超过其自身重量 1900 倍的压力，并拥有超低的热导率 ($0.023 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 和高达 93.8% 的太阳光反射率。与带有反射涂层的商业 EPS 泡沫相比，使用 BNNS/PVA 气凝胶保温隔热材料的建筑围护结构热量传递更少，室内外最大可相差 10°C ，同时还增强了建筑结构的稳定性和抗震能力。Abdolazizi 等^[44]针对聚合物气凝胶往往制备方法复杂、弹性模量较低的问题，通过冷冻干燥和掺入 2D 氧化石墨烯 (graphene oxide, GO) 纳米片的方法，成功地开发了轻质且坚固的 PVA-GO 纳米复合气凝胶。该气凝胶较传统聚合物气凝胶压缩模量增加了 9 倍，密度低至 $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，导热系数也仅为 $0.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，并表现出优异的耐水性和易清洁性，为建筑节能材料的多功能化开辟了新路径。

尽管在力学性能、柔韧性和环境适应性方面表现优异，但在与绿色建筑需求契合的可持续性和经济性方面，聚合物气凝胶的表现尚有改进空间。后续研究应聚焦于开发简化且低成本的制备技术，并引入智能功能材料以进一步提升其隔热、抗震和耐湿性能。同时，聚合物气凝胶可满足建筑物柔性部件需求，并在高性能绝热领域具有显著优势，为气凝胶材料的多样化应用提供更多可能。

2.3 生物质气凝胶

生物质气凝胶以纤维素、半纤维素、木质素和壳聚糖等可再生生物资源为原料，上述原料不仅来源广泛且成本较低，还具备良好的可再生性与一定的生物“固碳”潜力^[29]。这些特点使它在建筑节能材料领域与绿色环保需求高度契合，为可持续发展目标提供了重要支持^[45]。然而，相比 SiO_2 气凝胶和聚合物气凝胶，生物质气凝胶

的隔热和阻燃性能相对较弱，限制了它在构筑高性能保温材料体系中的应用。

近年来，研究人员通过复合改性技术显著提升生物质气凝胶的综合性能。Wang 等^[46]利用植酸交联果胶，结合冷冻干燥法制备了一种集环保、难燃、隔热与力学增强于一体的生物质复合气凝胶，该气凝胶的制备工艺高效且低能耗，植酸与果胶的交联作用可提升材料的防火性能 (极限氧指数: 45.1%，UL94 防火等级: V-0) 和隔热性能，使材料力学比模量亦大幅优于传统 SiO_2 气凝胶，展现出强劲的性能竞争力。Sun 等^[31]以壳聚糖 (Chitosan, CS) 为原料，通过添加蒙脱石和纤维素纳米纤维为增强填料，利用定向冷冻和化学气相沉积改性制备了多功能生物质复合气凝胶。该复合气凝胶轴向杨氏模量高至 630 kPa，径向导热系数低至 $0.031 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，极限氧指数为 43%，具有良好的力学、隔热及阻燃性能，在高层建筑的保温和阻燃领域展现出巨大的应用潜力。

未来生物质气凝胶可通过纳米复合技术实现多功能集成，如隔热、防火与降噪一体化，同时需加速规模化生产工艺的开发，助力绿色建筑材料的创新与应用。

3 气凝胶在建筑保温材料中的应用

气凝胶材料以其卓越的性能在建筑保温节能材料的开发应用方面展现出巨大前景。目前，利用气凝胶制备的建筑材料及设备主要包括隔热涂料、气凝胶毡、保温板材、节能玻璃、太阳能集热板等。

3.1 隔热涂料

气凝胶隔热涂料制备过程如图 3 所示^[47-49]。在气凝胶颗粒或微球制备的基础上将它与溶剂、改性剂、稳定剂等按照一定的配比进行混合，采用多种分散方法，使各组分充分均匀混合制备复合气凝胶浆料，之后再浆料与成膜树脂、助剂、溶剂及其它填料相混合，通过高速分散法制得气凝胶隔热涂料，最后用滚涂、喷涂、刷涂等涂覆工艺，将涂料均匀地涂布在屋顶、墙面等建筑

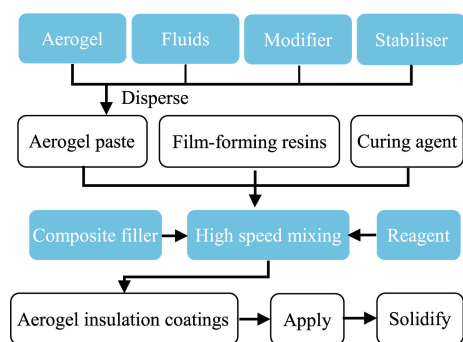


图3 气凝胶隔热涂料制备工艺^[47-49]

Fig. 3 Preparation process of aerogel thermal insulation coating^[47-49]

结构上,进行干燥固化处理,形成保温涂层,起到隔热保护的作用,可有效降低结构或设备表面温度,达到降低建筑能耗、节约能源的目的^[50]。

de Masi 等^[51]通过研究涂料在建筑被动辐射冷却中的热行为,比较了不同涂料在真实环境下的热性能。研究表明,气凝胶基涂料的隔热和太阳反射性能与市场上主流产品相当,甚至更佳。此外,经过一年时间的自然老化,涂覆气凝胶涂料的屋顶相比传统的冷屋顶太阳反射率提高了约 47%,在夏季降低表面温度、提高太阳辐射反射率以及长期性能方面更是优于传统涂料。

然而,作为一种纳米材料,气凝胶表面活性较强,表面原子在外部的范式力和内部的非对称价键力的共同作用下受力不均,气凝胶纳米颗粒容易发生团聚,在高温环境下,使得热量不会沿着界面热阻大的团聚气凝胶传递,而是通过热阻较低的聚合物基料传递,导致涂料热传导路径改变,降低了涂料的隔热性能。为此,Car-nicer 等^[52]和 Li 等^[53]通过添加表面活性剂对气凝胶纳米颗粒进行表面改性,基于表面活性剂上非极性亲油官能团吸附在纳米颗粒表面、而极性亲水官能团与水相容,促进了气凝胶颗粒在水中的润湿,使气凝胶颗粒可以更好地分散在悬浮液中,为解决气凝胶分散性差、容易团聚而导致涂层热导率高的难题提供了可行的研究路径。

3.2 气凝胶毡

气凝胶毡是以增强纤维毡为骨架,负载纳米 SiO_2 气凝胶而制成的柔性保温材料,具有极低的导热系数(最低可达 $0.0142 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、轻质(密度一般在 $60 \sim 100 \text{ kg}/\text{m}^3$)和卓越的疏水性(疏水率 $\geq 99\%$)^[54]。Guo 等^[55]通过将 SiO_2 气凝胶掺入玻璃纤维毡中,发现掺入气凝胶的毡材比表面积增大至 $200.4 \text{ m}^2/\text{g}$,抗压强度由 0.05 提高至 0.15 MPa ,在 200 与 600°C 下热导率分别减小至 0.006

和 $0.015 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。此外,毡材的传热背面温升曲线明显变缓,传热时间为 1800 s 时,背面温度比掺入气凝胶前降低了 51°C ,具有高效的隔热能力。气凝胶毡广泛应用于建筑领域的管道、外墙、屋顶等保温场景(图 4),显著提高了建筑结构及设备的保温效率和使用寿命,同时在满足最大允许热损失量的前提下,保温层厚度相比传统玻璃纤维毡减少了 $40\% \sim 54\%$,展现出强大的应用优势^[56]。

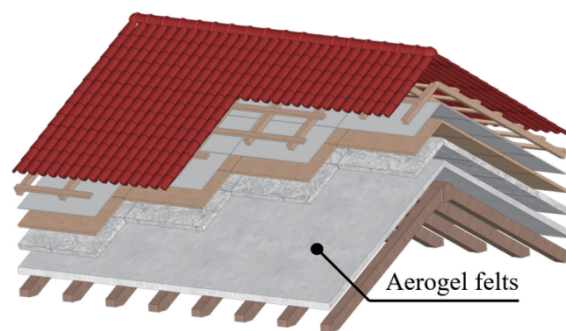


图 4 气凝胶毡在屋顶上的应用
Fig. 4 Application of aerogel felts on roofs

然而,高成本、易掉粉及耐高温性能有限的问题限制了气凝胶毡的进一步应用^[57]。Shi 等^[58]针对气凝胶毡材较为昂贵的问题,通过优化生产工艺(如常压干燥方法)和选择低成本的硅源来降低生产成本。首次采用原位溶胶-凝胶浸渍和燃烧干燥工艺成功制备了高性能玻璃纤维复合 SiO_2 气凝胶保温薄毡(GATF- SiO_2),制备过程如图 5 所示。与现有的干燥技术相比,该制备方法具有效率高、成本低的显著优势。与目前市售的无碱玻璃纤维毡相比,GATF- SiO_2 表现出质轻、疏水性强、力学性能好等特点。更重要的是,由于独特的复合结构,所制备的毛毡具有极低的导热系数($0.0158 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)和优异的热稳定性。

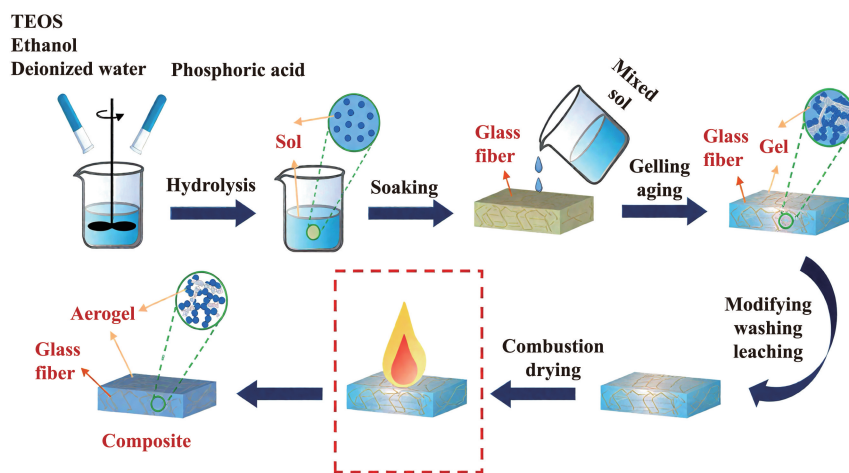


图 5 GATF- SiO_2 的制备过程^[58]

Fig. 5 Preparation process of the GATF- SiO_2 ^[58]

此外,采用化学接枝技术增强气凝胶颗粒与纤维间的结合力,或引入耐高温纤维增强体,如硅酸铝纤维和氧化铝纤维,或掺杂锆、铝等,可显著改善材料的施工性能和高温稳定性^[59]。未来,气凝胶毡将以轻质、薄层、高效的隔热特性,在建筑保温中占据更加重要的地位。

3.3 保温板材

气凝胶保温板材通常是将气凝胶颗粒与高分子聚合物、纤维、石膏或砂浆等混合,将混合物填充到模具中经高温处理、机械增强、压制成型为具有所需形状和尺寸的建筑板材^[60]。Verdolotti等^[61]研究发现,相较传统聚氨酯(polyurethane, PUR)泡沫保温板材,将SiO₂气凝胶掺入PUR中,可形成具有有机-无机杂化结构的复合气凝胶/PUR材料,赋予保温材料更好的阻燃性能、耐久性能和热绝缘效果,热导率较传统聚氨酯降低了30%。将该复合材料应用于建筑外墙、屋顶、地板等保温系统中,可为建筑提供更好的热效益,减少能源损耗。

目前,商用气凝胶保温板一般是将SiO₂气凝胶与无机纤维毡复合制得,保温板具有优异的防火、抗氧化等性能,但仍面临着制备成本较高的应用限制。Song等^[62]利用水玻璃/水体系制备的低成本SiO₂气凝胶(water-glass-based silica aerogel, WSA)对岩棉纤维毡(rock wool fiber felt, RWF)和超细玻璃纤维毡(ultrafine glass fiber wool felt, UGFW)进行了改性,最终得到2种新型气凝胶复合材料(WSA@RWF和WSA@UGFW)。研究发现,WSA表现出极低的密度(88.5 kg/m³)、导热系数(0.02114 W/(m·K))及高的疏水性(疏水接触角为150°),成本较商用气凝胶下降了21.5%。并且与传统RWF相比,WSA@RWF的热导率和体积吸水率分别降低了26.4%和91.4%。而WSA@UGFW的热导率为0.011 68 W/(m·K),密度低至45.7 kg/m³,疏水接触角亦可达到155.87°。由此制备的气凝胶复合材料为解决气凝胶保温板材应用中的高成本问题提供了思路,并因具有低密度、低热导率和高疏水性等优点,使它在作为防火建筑保温材料中具有很好的应用前景。

3.4 节能玻璃

与其他建筑围护结构(如墙壁或屋顶)相比,玻璃的隔热性能较差。通过玻璃等透明围护结构散失的热量占建筑围护结构总能量损失的45%^[63]。为实现建筑节能,许多研究人员利用表面涂覆工艺或在双层玻璃之间填充气凝胶颗粒制备气凝胶节能玻璃。

Zhang等^[64]通过添加不同含量的SiO₂气凝胶制备了复合保温玻璃涂层,并对其性能进行测试。当SiO₂气凝胶质量分数为15%时,复合涂层的导热系数仅为0.1288 W/(m·K)。Mu等^[65]将纳米晶钨青铜(CsxWO₃)和SiO₂气凝胶添加到聚乙烯醇缩丁醛(PVB)中,制备了PVB/CsxWO₃/SiO₂气凝胶复合材料,并将它用于制备夹

层玻璃。这种复合材料利用SiO₂气凝胶等纳米材料的近红外/紫外吸收或其它效应来减少热能、太阳能进入室内,可有效减少建筑物的能耗和热负荷,并保持清晰的能见度。经测试,含PVB/CsxWO₃/SiO₂气凝胶复合材料的节能玻璃具有高可见光透过率(75%)和近红外屏蔽率(77%),可使室内外温差达到6.9℃。

此外,气凝胶节能玻璃还可以作为一种有效的隔音材料应用于建筑玻璃结构上,提高人居环境的舒适性。Abazari等^[66]将利用超声波辐射法合成的气凝胶(SA-U)与聚酯树脂(PES)混合制备成复合材料并涂覆在玻璃上,并进行对比分析。结果表明,未经处理的普通商业玻璃声传输损失约为11.2 dB,而涂覆SA-U/PES复合材料的玻璃声传输损失可提高到27.3 dB。基于上述方法可得到一种隔热、隔音与调光功能一体化的节能玻璃,从而为建筑领域的节能降耗提供更加全面的解决方案。

3.5 太阳能集热板

太阳能是一种重要的可再生能源,具有使用地区范围广、清洁、无污染等优点,是实现节能减排目标的重要途径^[67]。而太阳能集热板则是实现建筑可再生能源利用的重要设备。通过太阳能集热器收集太阳能,并利用外部驱动力(如泵、风机等)做功来向建筑传递能量,提供生活热水和采暖,降低建筑能耗和CO₂的排放。将气凝胶作为太阳能集热板的组成部分,一方面可改进集热源头,提高太阳能的吸收率;另一方面可以通过实现更好的隔热效果来抑制红外辐射热损,或对集热过程中的对外热损失进行重吸收,提高集热效率。Gao等^[68]基于此设计了一种非聚光结构优化的真空气凝胶平板太阳能集热器(evacuated aerogel flat-plate solar collector, EAFC),如图6所示,主要由玻璃盖、透明气凝胶层、吸收板、吸收铜管、辐射屏蔽板和铝外壳组成。通过实验和数值模拟对EAFC的性能进行测试发现,当集热器入口温度为155℃时,热效率可达到60.47%。与传统的非聚光太阳能集热器相比,EAFC通过较薄的SiO₂气凝胶层有效阻止了辐射损失,在中低温范围内具有更高的热效率。

然而,太阳辐照存在间歇性和不稳定性,往往会严重限制太阳能的可持续和有效利用。Bai等^[69]结合气凝胶与相变储能技术,以CS气凝胶为载体,碳纤维粉末(carbon fiber powder, CFP)为导热填料,石蜡(paraffin, PA)为相变材料,通过真空浸渍法制备了一种新型复合相变材料PA/CS@CFP。经测试,复合相变材料PA/CS@CFP具有高于94%的负载率、良好的封装能力、211.9~257.5 J/g的高焓值、优良的热稳定性以及太阳热能转换和储存能力。将它应用于制造太阳能集热器时,可弥补因太阳能间歇性和不稳定性导致的利用率下降的缺陷,进一步提高太阳能集热效率并实现建筑能源的稳定供应。

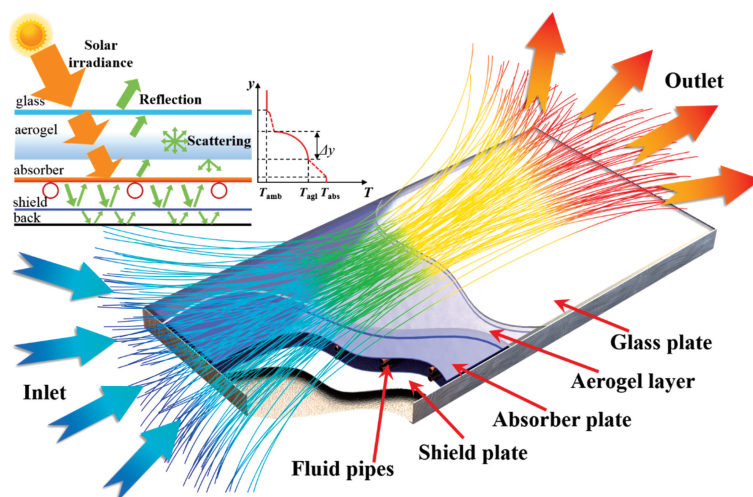


图 6 真空气凝胶平板太阳能集热器的原理图和截面图^[68]

Fig. 6 Principle diagram and cross-section view of the evacuated aerogel flat-plate solar collector^[68]

4 气凝胶建筑材料的实际应用及节能效果

气凝胶建筑保温节能材料为未来的绿色建筑发展提供了重要的技术支持。通过探讨气凝胶在建筑围护结构保温设计以及既有建筑节能改造中的实际应用及节能效果,可全面验证它在建筑节能领域的实际价值,同时分析技术局限与潜在问题,探索它在不同建筑环境中应用的潜力和未来发展方向。

4.1 建筑围护结构保温设计

建筑围护结构(包括墙体、屋顶、门窗等)是影响建筑热量传递和能耗的关键部分。研究表明,围护结构的能耗占建筑总能耗的 50% 以上,其中,墙体和屋顶的能耗约为 30%,占比最大,门窗的能耗则约占 20%^[70]。随着绿色建筑理念的推广,提高围护结构的保温性能已成为建筑节能设计的重点^[71]。

图 7 为气凝胶保温材料在墙体围护结构中的应用示意图。通过将气凝胶涂料、板材、毡材等应用于墙体、屋顶,可以依赖其极低的热导率和优异的隔热性能,显著提升建筑围护结构的保温效果,减少建筑的冬季热量损失和夏季热量传入,大幅降低采暖和空调能耗。Yang 等^[72]根据气凝胶在实际建筑工程中的应用,结合阻抗-电容网络及气凝胶的有效导热系数模型,预测了气凝胶绝热墙体的热绝缘性能。研究结果表明,相比传统墙体保温体系(面热阻为 $1.746 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$),使用厚度为 20 mm 的气凝胶纤维复合材料的外墙结构的热阻性能可提升 46.0%~53.5%,同时减少了约 50% 的节能成本,推动了建筑围护结构节能技术的普及。

此外,随着现代建筑对美学、自然采光和居住舒适度追求的提升,玻璃在建筑围护结构上的占比越来越大。然而,大面积玻璃结构容易导致热量的快速散失或过度

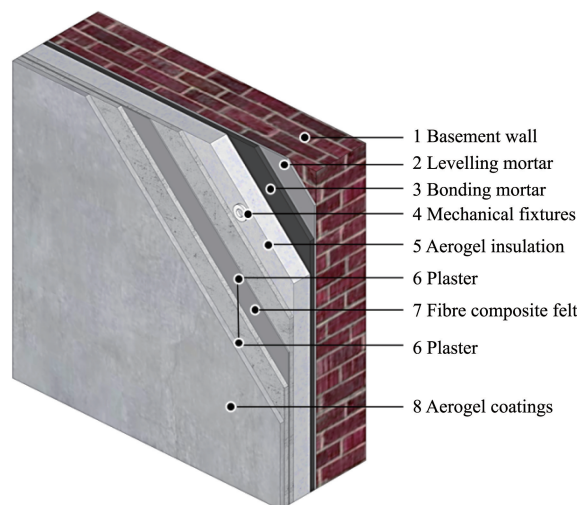


图 7 气凝胶保温节能材料在墙体围护结构中的应用示意图

Fig. 7 Schematic diagram of aerogel insulation integrated into the building envelope (wall section)

吸收,影响室内环境的稳定性。张焱等^[73]以中国北方光照充足地区某大学设计并建造的气凝胶住宅为研究对象,使用 DesignBuilder 软件对外围护结构分别采用气凝胶玻璃和木格窗的建筑进行了能耗、室内光热环境及热舒适性的对比模拟测试。分析得出,采用气凝胶玻璃外围护结构的室内天然光照度可大于 300 lx,室内光线柔和,完全能达到采光设计要求。采用气凝胶玻璃外围护结构建筑的全年空调能耗为 5061.987 kW·h,比采用木格窗外围护结构的全年空调能耗降低了 26.06%。该研究结果对气凝胶玻璃在节能的透明围护结构中的应用推广和发展具有重要意义。

4.2 既有建筑节能改造

当前,全球范围内大量既有建筑存在能耗高、热环

境差的问题,亟需节能改造。以中国为例,北方采暖地区的城镇既有住宅建筑约35亿平方米需要改造,这些建筑普遍存在能耗高、室内热环境差的问题。在冬季采暖和夏季制冷时能耗巨大,导致能源浪费和碳排放增加,无法满足当前的节能标准和环保要求^[54]。利用气凝胶保温材料对既有建筑进行节能改造,已被许多学者证明是减少空间能源消耗的可行选择^[74]。例如, Berardi^[75]选择位于多伦多的一座学校为研究对象,通过在不透明和透明围护结构中安装轻型气凝胶增强产品,如气凝胶保温毡、板材、玻璃等,为建筑赋予高热阻值,在不影响原有建筑物功能和内部使用空间的情况下,建筑物的整体能源节约可高达34%。Kumar等^[76]针对典型的澳大利亚单层房屋结构,从能源管理、CO₂排放和生命周期成本等方面对12种不同改造策略进行了数值评估。结果表明,将气凝胶保温材料运用于建筑外墙、天花板等结构改造中,建筑的能源消耗、峰值冷却需求、CO₂排放和运行能源成本分别可降低40%,65%,64%和35%。

2021年气凝胶建筑奖中就不乏建筑节能改造的案例。其中,位于德国魏玛市中心的包豪斯大学建筑材料科学研究所大楼曾被认为是社会现代主义建筑的杰出典范。这座建筑的外立面由木制、铝制窗户元素组成。由于建筑原始外部材料的隔热、保温等性能不佳, HASIT公司通过建筑热性能计算和模拟,以及评估气凝胶材料的效果,选择利用气凝胶涂料等保温材料对大楼外墙和屋顶进行大规模翻新,以减少建筑热量的传递和能源的消耗,改造效果如图8所示^[77]。改造后的研究所大楼建筑表面导热系数从1.36降至0.58 W/(m·K),显著降低了建筑物的能源消耗和运营成本。与此同时,建筑外立面结构还可以满足A1等级的防火要求,并为建筑提供更稳定的室内环境条件,如温度和湿度,符合历史古迹保护的要求。

4.3 气凝胶在建筑物中应用面临的挑战

尽管气凝胶材料凭借优异的隔热性能和轻质特性在建筑保温领域展现出广阔前景,但其应用仍面临以下几方面的挑战。

(1)在技术层面,气凝胶材料虽因其纳米多孔结构具备极低的导热性和优异的隔热性能,但也面临工程应用方面的难题。脆性问题限制了它在复杂建筑环境中的广泛应用。研究表明,纳米孔结构易引发应力集中,在动态载荷或高压条件下导致破裂或失效^[78]。此外,气凝胶材料在高湿、高温或强碱性环境中长期使用时表面化学稳定性较差,易发生孔径增大或结构塌陷,从而引起隔热性能的退化。而在气凝胶复合材料中,其界面结合强度与气凝胶颗粒分散均一性成为突出短板。气凝胶与基体材料的结合强度不足,热循环或机械载荷作用下易出现剥离或开裂;颗粒在基体中的分散性差则影响材

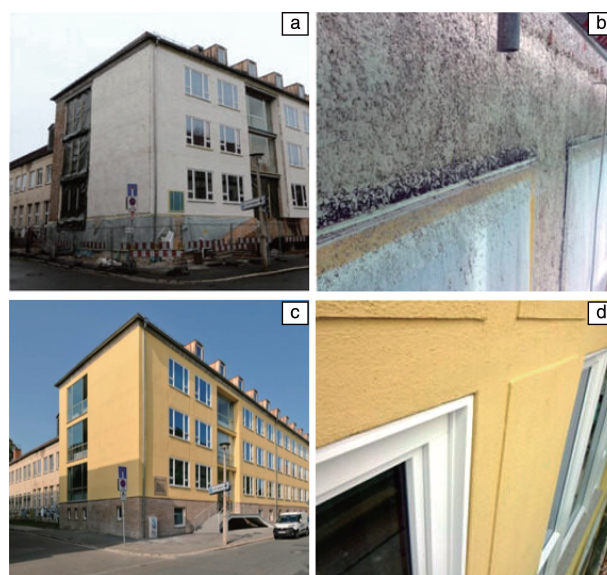


图8 利用气凝胶涂料改造前(a, b)和改造后(c, d)的包豪斯大学建筑材料科学研究所大楼照片^[77]

Fig. 8 Images of the institute of building materials science building at Bauhaus university weimar before (a, b) and after (c, d) utilization of aerogel coating^[77]

料隔热和力学性能。这些技术限制将会影响气凝胶在外墙、屋顶等暴露性建筑结构中的长期稳定性与适用性。

(2)在经济层面,气凝胶的制备成本较高,尤其是超临界干燥等工艺对设备和能耗要求较高,显著增加了材料的市场售价。与传统保温材料(如聚氨酯、岩棉)相比,气凝胶每平方米的成本高出10倍以上。但气凝胶在整个建筑生命周期系统基础上将会提供更具成本效益的性能,通过持续创新降低生产成本,将会成为有说服力的投资理由促进其广泛应用^[79]。

(3)在环境层面,气凝胶材料的生产在资源利用和环保性能优化方面仍有改进空间。现阶段的制备工艺中,有机溶剂和表面改性剂的使用可能对环境友好性构成一定挑战。此外,气凝胶的回收利用技术尚不成熟,大多数废弃气凝胶产品缺乏高效的资源再利用途径,可能增加废弃物处理的难度。因此,气凝胶在建筑中的应用需满足更高的环境友好性标准与回收利用要求。

综上所述,气凝胶在建筑中的应用虽具有显著的节能潜力,但在技术、经济和环境方面的不足仍需进一步克服。这些挑战为后续研究和技术开发提供了明确的方向,同时也凸显了加强政策支持和市场推动的重要性。

5 结 语

气凝胶作为一种新型轻质多孔材料,凭借其高比表面积、高孔隙率和优异的隔热性能,已成为建筑节能领域的重要研究对象。本文基于气凝胶材料的基本性质,综述了

近年来气凝胶保温节能材料的研究进展、应用形式和节能效果,并探讨了它在建筑行业的应用潜力及未来发展方向。

然而,气凝胶材料在建筑业的实际应用仍面临技术、经济和环境等方面的挑战。首先气凝胶材料的力学性能和长期稳定性需进一步提升。未来研究应专注于优化制备工艺与复合设计,通过多尺度结构调控增强气凝胶在复杂环境中的力学性能及热稳定性,确保它在建筑结构中的长期适用性。其次,高昂生产成本仍是限制气凝胶广泛应用的主要障碍。为此,应探索低成本原材料的开发与绿色制备工艺的引入,结合规模化生产技术实现气凝胶的经济性突破,提高其市场竞争力。最后,气凝胶的全生命周期管理需进一步完善。需加强回收利用技术的研究,实现废弃材料资源化处理,并继续开发基于可再生资源的气凝胶,提升其环境可持续性。随着技术进步和行业标准的完善,气凝胶在建筑节能领域的应用潜力将持续释放,通过技术、经济和环境方面协调发展,气凝胶材料有望为实现全球节能减排目标和绿色建筑发展提供更加全面的方案。

参考文献 References

- [1] LI Q, JU Z, WANG Z, *et al.* Energy and Buildings [J], 2022, 277: 112470.
- [2] BERGER M, WORLITSCHKE J. Energy [J], 2018, 159: 294–301.
- [3] ANON. Grdevinar [J], 2023, 75(3): 323.
- [4] SONG Y C. Modern Chemical Industry [J], 2006, 26(3): 63–66.
- [5] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于转发发展改革委住房城乡建设部绿色建筑行动方案的通知[EB/OL]. (2013-01-01)[2024-09-05]. https://www.gov.cn/zwqk/2013-01/06/content_2305793.htm.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Circular of the General Office of the State Council on Transmitting and Issuing the Action Plan for Green Buildings Formulated by the National Development and Reform Commission and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development[EB/OL]. (2013-01-01)[2024-09-05]. https://www.gov.cn/zwqk/2013-01/06/content_2305793.htm.
- [6] ALI A, ISSA A, ELSHAER A. Sustainability [J], 2024, 16(20): 8782.
- [7] 中华人民共和国建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189-2015 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2015.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Energy Efficiency Design Standard for Public Buildings: GB 50189-2015 [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2015.
- [8] HU P, HU X, LIU L, *et al.* Materials Science and Engineering: R: Reports [J], 2024: 161: 100842.
- [9] WANG H, HUANG Y, LIU S, *et al.* European Polymer Journal [J], 2024, 220: 113367.
- [10] 吴晓栋, 宋梓豪, 王伟, 等. 南京工业大学学报(自然科学版) [J], 2020, 42(4): 405–451.
- [11] XUE J, HAN R, LI Y, *et al.* Journal of Materials Science [J], 2023, 58(36): 14255–14283.
- [12] JIN R, ZHOU Z, LIU J, *et al.* Gels [J], 2023, 9(8): 606.
- [13] YU X, WU L, LI M. Buildings [J], 2023, 13(7): 1638.
- [14] PINTO I, SILVESTRE J D, de BRITO J, *et al.* Journal of Cleaner Production [J], 2020, 252: 119696.
- [15] FAROUK N, BABIKER S G. Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects [J], 2024, 46(1): 37–51.
- [16] METI P, WANG Q, MAHADIK D B, *et al.* Nanomaterials [J], 2023, 13(9): 1498.
- [17] YAP Z S, KHALID N H A, HARON Z, *et al.* Journal of Building Engineering [J], 2022, 59: 105128.
- [18] WANG Z, WANG C, GAO Y, *et al.* Polymers [J], 2023, 15(18): 3818.
- [19] JELLE B P. Energy and Buildings [J], 2011, 43(10): 2549–2563.
- [20] AJABLI H, ZOUBIR A, ELOTMANI R, *et al.* Renewable & Sustainable Energy Reviews [J], 2023, 185: 113609.
- [21] KANG D, JIA S, ZHAO C, *et al.* Ceramics International [J], 2024, 50(15): 26829–26838.
- [22] ŚLOSARCZYK A, VASHCHUK A, KLAPISZEWSKI Ł. Polymers [J], 2022, 14(7): 1456.
- [23] WAN Y, WANG J, LI Z. KSCE Journal of Civil Engineering [J], 2022, 26(8): 3216–3225.
- [24] GANOBJAK M, MALFAIT W J, JUST J, *et al.* Journal of Building Engineering [J], 2023, 64: 105600.
- [25] CHEN Y X, KLIMA K M, BROUWERS H J H, *et al.* Composites Part B: Engineering [J], 2022, 242: 110048.
- [26] LIU T, LIANG F, CHEN S, *et al.* Polymers for Advanced Technologies [J], 2023, 34(5): 1769–1776.
- [27] LV Q, YANG J, SUN X, *et al.* Polymer Composites [J], 2023, 44(3): 1648–1657.
- [28] HAN S, RUOKO T P, GLADISCH J, *et al.* Advanced Sustainable Systems [J], 2020, 4(7): 2000004.
- [29] SEN S, SINGH A, BERA C, *et al.* Cellulose [J], 2022, 29(9): 4805–4833.
- [30] ZHAN H, LIU J, WANG P, *et al.* International Journal of Biological Macromolecules [J], 2024, 273: 132643.
- [31] SUN Y, CHU Y, DENG C, *et al.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects [J], 2022, 651: 129663.
- [32] KARAMIKAMKAR S, NAGUIB H E, PARK C B. Advances in Colloid and Interface Science [J], 2020, 276: 102101.
- [33] KISTLER S S. Nature [J], 1931, 127(3211): 741.
- [34] 李月香, 马军霞, 王蒙. 功能材料 [J], 2024, 55(7): 7224–7230.
LI Y X, MA J X, WANG M. Functional Materials [J], 2024, 55(7): 7224–7230.
- [35] 李文彦, 宋梓豪, 崔升. 南京工业大学学报(自然科学版) [J], 2023, 45(2): 157–163.
LI W Y, SONG Z H, CUI S. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition) [J], 2023, 45(2): 157–163.

- [36] PEDROSO M, FLORES-COLEN I, SILVESTRE J D, *et al.* Cement & Concrete Composites[J], 2023, 139: 105045.
- [37] FU Z Y, CORKER J, PAPATHANASIOU T, *et al.* Journal of Building Engineering[J], 2022, 57: 104814.
- [38] 李文彦, 宋梓豪, 崔升. 南京工业大学学报(自然科学版)[J], 2022, 44(4): 387–394.
- LI W Y, SONG Z H, CUI S. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)[J], 2022, 44(4): 387–394.
- [39] WU H, ZHANG H, ZHANG G, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2023, 366: 130166.
- [40] SUN H, MU W, CUI X, *et al.* ACS Applied Polymer Materials[J], 2023, 5(1): 552–559.
- [41] LIU Y, WANG D, LI J. Frontiers in Materials [J], 2023, 10: 1224883.
- [42] LEVENTIS N, SOTIRIOU-LEVENTIS C, CHANDRASEKARAN N, *et al.* Chemistry of Materials[J], 2010, 22(24): 6692–6710.
- [43] YANG J, CHAN K Y, VENKATESAN H, *et al.* Nano-Micro Letters [J], 2022, 14(1): 54.
- [44] ABDOLAZIZI A, WIJESINGHE I, MARRIAM I, *et al.* Nanomaterials [J], 2024, 14(9): 745.
- [45] HAN S, ZHANG E, LU Y. Acta Materiae Compositae Sinica [J], 2024, 41(1): 108–120.
- [46] WANG H, LIU J, LI M, *et al.* Chemical Research and Application [J], 2019, 31(7): 1335–1341.
- [47] XIANG Y L, YAN M Y, LI L L, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2025, 472: 140878.
- [48] NAMAN K A, PÄR J, ANGELA S K. Construction and Building Materials[J], 2022, 314: 125602.
- [49] LI Z, CHEN Z K, DUAN Y M. Progress in Organic Coatings [J], 2025, 208: 109449.
- [50] DING Y, LIU Z, WANG F, *et al.* Surface Technology[J], 2017, 46(4): 197–204.
- [51] de MASI R F, FESTA V, RUGGIERO S, *et al.* Solar Energy [J], 2023, 259: 298–319.
- [52] CARNICER V, CANAS E, ORTS M J, *et al.* Ceramics International [J], 2021, 47(18): 26157–26167.
- [53] LI D, YANG T, SUN T, *et al.* Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection [J], 2024, 44(1): 167–174.
- [54] 张洁. 寒区住宅阳台 SiO₂ 气凝胶毡/PCM 综合节能改造及碳排放研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- ZHANG J. Integrated Energy Saving Retrofit of SiO₂ Aerogel Mat/PCM for Residential Balcony in Cold Area and Carbon Emission Study[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [55] GUO J, WANG D, SU L, *et al.* Inorganic Chemicals Industry [J], 2023, 55(11): 53–57.
- [56] 任富建. 区域供热[J], 2016(1): 62–64+76.
- REN F J. District Heating[J], 2016(1): 62–64+76.
- [57] 彭罗文, 艾明星, 柳培玉, 等. 建筑节能[J], 2018, 46(1): 71–77.
- PENG L W, AI M X, LIU P Y, *et al.* Building Energy Saving [J], 2018, 46(1): 71–77.
- [58] SHI J C, HU D M, JIA R P, *et al.* Ceramics International [J], 2024, 50(6): 9479–9488.
- [59] REN B, LIU J, RONG Y, *et al.* ACS Nano [J], 2019, 13(10): 11603–11612.
- [60] BOONRAWD C, YODYINGYONG S, BENYAHIA L, *et al.* Gels [J], 2022, 8(1): 7.
- [61] VERDOLOTTI L, OLIVIERO M, LAVORGNA M, *et al.* Composites Science and Technology [J], 2021, 213: 108917.
- [62] SONG Z, LEI Y, RAN W, *et al.* Journal of Building Engineering [J], 2024, 90: 109485.
- [63] GAO T, IHARA T, GRYNNING S, *et al.* Building and Environment [J], 2016, 95: 405–413.
- [64] ZHANG Z Y, HAN X F, JIA L, *et al.* Progress in Organic Coatings [J], 2024, 187: 108104.
- [65] MU Y Q, LIU Y P, YANG X H, *et al.* Journal of Materials Science [J], 2024, 59(15): 6322–6333.
- [66] ABAZARI M S, ENTEZARI M H. Journal of Building Engineering [J], 2024, 90: 109437.
- [67] 高大统. 新型非聚光式太阳能集热器件设计及系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- GAO D T. A Novel Non-Concentrating Solar Collector Design and System Research [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [68] GAO D, WU L, HAO Y, *et al.* Renewable Energy [J], 2022, 196: 1455–1468.
- [69] BAI Y, LIN F, LIU X, *et al.* Journal of Energy Storage [J], 2022, 56: 105980.
- [70] 李彬, 许晓坤, 李翔. 能源与节能[J], 2022(9): 53–55.
- LI B, XU X K, LI X. Energy and Energy Conservation [J], 2022(9): 53–55.
- [71] 余本东, 樊苗苗, 颜承初. 南京工业大学学报(自然科学版)[J], 2023, 45(5): 467–477.
- YU B D, FAN M M, YAN C C. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition) [J], 2023, 45(5): 467–477.
- [72] YANG J M, WU H J, LIANG Y Y, *et al.* Gels [J], 2023, 9(12): 943.
- [73] 张隼, 杨柳, 罗智星. 重庆大学学报[J], 2021, 44(9): 40–50.
- ZHANG Y, YANG L, LUO Z X. Journal of Chongqing University [J], 2021, 44(9): 40–50.
- [74] MOHAMMAD A K, GHOSH A. Solar Energy [J], 2023, 253: 389–400.
- [75] BERARDI U. Energy and Buildings [J], 2018, 159: 370–381.
- [76] KUMAR D, ALAM M, SANJAYAN J G. Sustainability [J], 2021, 13(19): 10716.
- [77] GANOBJAK M, BRUNNER S, HOFMANN J, *et al.* Gels [J], 2023, 9(10): 814.
- [78] JADHAV S, SARAWADE P. European Polymer Journal [J], 2024, 206(21): 112766.
- [79] GU X, LING Y. Alexandria Engineering Journal [J], 2024, 91: 620–631.