

二氧化硅气凝胶保温材料研究进展

程凯

江西服装学院, 江西 南昌 330200

DOI: 10.61369/SSSD.2025090005

摘 要 : 在全球能源危机与“双碳”目标推动下, 高效保温材料成为降低能源消耗、优化能源利用效率的关键支撑。二氧化硅气凝胶凭借纳米多孔结构带来的极低热导率, 被誉为“保温材料之王”, 自诞生以来便在建筑节能、航空航天、新能源等领域展现出不可替代的应用潜力。基于此, 本文结合现有研究成果, 对二氧化硅气凝胶保温材料展开研究, 探讨其未来发展路径, 旨在为相关研究与产业实践提供参考, 推动二氧化硅气凝胶保温材料突破产业化瓶颈、释放能源节约价值。

关 键 词 : 二氧化硅气凝胶; 保温材料; 研究进展

Research Progress of Silica Aerogel Insulation Materials

Cheng Kai

Jiangxi Institute of Fashion Technology, Nanchang, Jiangxi 330200

Abstract : Driven by the global energy crisis and the "dual carbon" goals, high-efficiency insulation materials have become a key support for reducing energy consumption and optimizing energy utilization efficiency. Silica aerogel, renowned as the "king of insulation materials" due to its extremely low thermal conductivity derived from its nanoporous structure, has demonstrated irreplaceable application potential in fields such as building energy efficiency, aerospace, and new energy since its inception. Based on existing research results, this paper conducts a study on silica aerogel insulation materials, explores their future development paths, aiming to provide references for related research and industrial practices, and promote silica aerogel insulation materials to break through industrialization bottlenecks and release energy-saving value.

Keywords : silica aerogel; insulation materials; research progress

引言

在能源危机与环保需求日益凸显的当下, 建筑、工业等领域对高效保温材料的需求愈发迫切。传统保温材料普遍存在热导率高、保温性能差、高温稳定性不足等问题, 难以满足当前对节能与安全的严苛要求, 研发新型高效保温材料成为关键课题。二氧化硅气凝胶作为一种新型纳米多孔材料, 凭借独特的微观结构, 展现出极低的导热率、高孔隙率、良好的耐高温性等优异特性, 在保温隔热领域具有巨大应用潜力。近年来, 众多学者围绕二氧化硅气凝胶保温材料展开深入研究, 在材料性质探索、制备方法优化、力学性能增强等方面取得了一系列成果。本文旨在整合现有研究进展, 系统分析二氧化硅气凝胶保温材料的性质、制备方法及力学增强策略, 为该材料的进一步研究与工业化应用提供参考。

一、二氧化硅气凝胶材料的性质及制备方法

(一) 二氧化硅气凝胶材料的性质

二氧化硅气凝胶作为一种新型纳米多孔材料, 凭借独特的微观结构展现出优异的综合性能, 在保温隔热、催化、环境治理等领域具有极高应用价值。从微观结构来看, 其由纳米级二氧化硅颗粒相互连接形成三维多孔网络, 孔隙率普遍高达80% ~ 99.8%, 且孔径多集中在2~50nm, 这种结构使得材料内部存在大量封闭空气。空气作为热的不良导体, 结合纳米孔隙对热传导的抑制作用, 让二氧化硅气凝胶拥有极低的热导率, 常温常

压下热导率通常低于 $0.02\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 远优于传统保温材料如岩棉、聚苯板等, 这也是其在保温隔热领域脱颖而出的核心优势。

同时, 二氧化硅气凝胶还具备良好的光学性能与化学稳定性。部分制备工艺下的产品光学透明性较高, 可用于光学器件涂层等场景; 其表面经改性处理后能具备疏水性, 接触角可达到 120° 以上, 有效避免水分吸附导致性能下降, 且在酸碱环境下(除强碱性溶液外)不易发生化学反应, 使用寿命长。此外, 材料密度极低, 通常在 $0.003 \sim 0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 之间, 属于轻质材料, 能减少应用场景中的结构负重, 这些性质共同奠定了其在多领域应用的基础。

（二）二氧化硅气凝胶材料的制备方法

二氧化硅气凝胶的制备主要围绕硅源选择、溶胶-凝胶反应、干燥工艺及表面改性等环节展开，不同研究者基于原料成本、性能需求等因素，开发出多种差异化制备方案。

在保温隔热性能优化导向的制备研究中，景泊桥、沈亚琴^[1]提出在生产方式改进后，在生产出的二氧化硅气凝胶材料中降低了二氧化硅气凝胶的热传导能力，并在将二氧化硅气凝胶用于建筑物防护实验中具有良好的保温性能，并增加了材料在高温条件下稳定的能力，为新型节能建筑材料提供了一种新的选择。杨海龙等^[2]以节约材料成本为出发点，以水玻璃（硅酸钠溶液）作为主要硅源制备 SiO₂ 气凝胶，并深入分析了 pH、反应温度、硅源浓度对气凝胶固化时间的影响，得到了最佳的生产参数。所制备的典型样品平均孔径尺寸为 6.3 nm，比表面积达 297.7 m²/g，孔隙结构均匀，在保证材料保温性能的同时，大幅降低了制备成本，为工业化量产提供了经济可行的思路。Yang 等^[3]在扩展原料的选择性上，通过以秸秆灰渣等农作物残余物为原料用溶胶-凝胶法结合真空冷冻干燥技术合成 SiO₂ 气凝胶的方法将废物再次利用，制备出的气凝胶产品孔隙率达到 90% 以上，并且具有比较良好的孔径大小、表面性质等，使得材料又回归环保，更兼具功能性。为提高物质的光热性能，Xia 等^[4]以正硅酸甲酯为硅源加入到甲醇-蒸馏水混合溶剂中，控制其水解速率和胶化过程，即可制备具有更好透光性能的 SiO₂ 气凝胶，同时其导热率也明显降低，使其满足既耐高温又透明的应用需求，例如夹层玻璃填充，以达到节能玻璃窗户的效应等。原位改性法是解决如何提高材料疏水性及力学性能的重要方法，即将硅源与含有疏水基团的硅烷偶联剂溶液混合，同时在溶胶-凝胶过程中完成表面改性，免去一些冗余的加工步骤。Yang 等^[5]以乙烯基三乙氧基硅烷（VTES）和甲基三甲氧基硅烷（MTMS）为复合前驱体，利用原位改性技术制备出高弹性疏水性 SiO₂ 气凝胶，材料接触角达 146°，疏水性能优异，且能承受 55% 的压缩应变，有效改善了传统气凝胶脆性大的缺陷。Li 等^[6]采用有机四乙氧基硅烷（TEOS）和无机碱性的水硅溶胶作为混合硅源，三甲基氯硅烷（TMCS）为表面改性剂，通过常压干燥法制备出具有疏水性 SiO₂ 气凝胶。该策略避免了高精密度真空冷冻干燥过程，同时降低了干燥过程费用，且所得产品具有稳定疏水性能，适于湿气环境应用。

二、二氧化硅气凝胶保温材料的力学增强

二氧化硅气凝胶保温材料导热率低至 0.018–0.025 W·m⁻¹·K⁻¹，是保温性能最优的固体材料之一，广泛应用于建筑、航空航天、工业领域。但因其三维网络由纳米 SiO₂ 颗粒松散连接构成，孔隙率高达 80% ~ 99.8%，导致脆性强、抗压强度低于 0.1 MPa、抗冲击性差，实际应用中易碎裂粉化，制约工业化推广。科研人员围绕“力学增强与保温性能协同保留”目标，开发出无机增强、聚合物增强、有机无机杂化增强三类技术路径。

（一）无机增强

无机增强以耐高温纤维、陶瓷颗粒等为增强相，将具有高耐

温性的无机化合物，如高温纤维、陶瓷颗粒等引入到 SiO₂ 气凝胶当中，即可满足其应用于极高温的条件，其优势是可以为气凝胶结构提供支撑，保证热力学性能良好，不会引起崩塌、裂解等问题。赵南等^[6]针对工业高温设备保温需求，用正硅酸乙酯（TEOS）为硅源，二甲基二乙氧基硅烷（DDS）为改性剂，莫来石纤维（Al₂O₃-SiO₂）为增强材料，采用“溶胶-凝胶法+超临界 CO₂ 干燥+1200℃ 高温烧裂解”的方式制备。莫来石纤维（长度 50–100 μm、直径约 5 μm）超声分散后与 SiO₂ 网络交织，形成互穿结构。性能测试显示，纤维表现体积密度 0.15 g/cm³ 时，常温抗压强度 0.32 MPa（较纯气凝胶提升 3 倍），800℃、1000℃ 热导率分别为 0.0319 W·m⁻¹·K⁻¹、0.043 W·m⁻¹·K⁻¹，远低于传统轻质莫来石砖，可用于工业高温管道保温，使用寿命延长 2–3 倍。张怡等^[7]聚焦建筑安全要求和强度要求，将硅酸铝纤维含有 Al₂O₃ 的质量分数达到 55% 的成分和约 6 ~ 10 μm 的直径的不锈钢纤维作为增强剂，在常压条件下干燥制备而成的复合气凝胶，考虑到凝胶收缩的问题，引入聚乙烯醇（PVA）辅助干燥剂，也改变干燥速率（50℃ 下干燥 12h 后 80℃ 下干燥 8h）。

（二）聚合物增强

聚合物增强引入柔性聚合物，利用其柔韧性与粘结性改善气凝胶脆性，抑制干燥收缩，适用于低温弯曲场景。关键是选择与气凝胶相容性好、热稳定性优的聚合物。Ulker 等^[8]针对纯气凝胶常压干燥坍塌问题，以海藻酸为增强剂。海藻酸羧基、羟基与 SiO₂ 硅羟基形成氢键，在颗粒表面形成柔性膜。添加 2% 海藻酸的复合气凝胶，体积收缩率从 45% 降至 18%，比表面积 650–700 m²/g、孔隙率 92%；弯曲应变从 1.2% 提升至 5.8%（可 180° 弯曲），常温导热系数 0.028 W·m⁻¹·K⁻¹，适用于市政供暖管道保温。Nazeran 等^[9]用甲烷二苯二异氰酸酯（MDI）与 SiO₂ 气凝胶化学接枝，MDI 异氰酸酯基团与硅羟基反应形成共价键，同时交联成三维网络。MDI 体积比 5% ~ 10% 时，复合材料抗压强度 0.28 MPa（提升 2.5 倍），250℃ 以下无质量损失，常温导热系数 0.026 W·m⁻¹·K⁻¹，可模压成保温块体，用于电子设备局部隔热。

（三）有机无机杂化增强

有机无机杂化增强融合无机高强度与聚合物柔韧性，构建“刚性支撑-柔性连接”网络，适用于高端场景。唐杰^[10]面向新能源汽车电池保温，以有机硅树脂、纳米 Al₂O₃（20–50 nm）、玻璃纤维短切毡（1–2 mm）为增强相，与柔性硅基气凝胶复合。优化配比（有机硅树脂 8%、纳米 Al₂O₃ 5%、玻璃纤维 10%）后，复合材料常温抗压强度 0.38 MPa、抗冲击强度 1.2 kJ/m²（分别提升 4 倍、6 倍），350℃ 以下稳定，-40℃ 热导率 0.025 W·m⁻¹·K⁻¹，阻燃达 UL94 V-0 级，试点应用使电池 -20℃ 续航提升 15% ~ 20%。

三、未来发展展望

在热学强化方面的研究，二氧化硅气凝胶隔热材料的力学增

强技术也已经取得了突破性进展,但仍需要通过不断在技术、成本和匹配性等三个方面的升级迭代,来实现从实验室到工业生产的过渡,后续可以从如下的三个方面着力:一是复杂性能协同优化将是主要的发展方向。如今多数增材工艺聚焦于单一性能提升,挑战在于解除“机械性能增加=绝缘性能折损”的限制,通过分子设计和复合系统管控达到“强韧-低传热-长耐久”的综合效果,如纳米增强纤维(碳纳米管、石墨烯)与有机高分子的复合并兼具基质增强和增强纳米材料导热作用减少热量传导。同时,针对恶劣服役环境(高湿性、强腐蚀)条件下,具备防水防老化的复合系统以拓展服役场景的领域。二是在更低制造成本方面,工艺实现产业化的技术突破很重要。现行的超临界干燥能耗高成本大,仍很难通过技术手段进一步降低,需要着重探索有效的零压干燥技术,辅以新技术(绿色环保溶剂、可降解高分子物)使烘干过程中的结构收缩降低至小幅度;同时,强化原材料的本地化和循环化利用也很重要,如扩大农作物废弃物的利用(秸秆灰、稻壳灰)替代传统的硅资源来源,结合不断生产型的流水线设计,使得材料价格处在建筑保温市场的接受范围(每平方米少于五十余元),则能促进广泛应用。三是场景式定制化会推动软件升级。为了适应不同行业的需要,应该研发和制造针对某个特定行业的产品:针对航空航天领域,要开发更轻且耐温能

力高的超薄气凝胶复合物(小于五毫米);针对新能源,要开发可弯曲成各种形状以配合非标电池盒的柔软式可折叠的电池包保护膜;针对建筑业,也要研发与现有建筑材料(如保温砂浆或夹心板)相结合的新一代的气凝胶复合部品,以便于建造环节的简化。当然,也可以跟智能化相结合,尝试将气凝胶结合温度感测器及火灾预警系统,打造出“保暖-传感-防火”一体功能的高值产品。

四、结语

综上所述,二氧化硅气凝胶保温材料凭借其卓越的保温性能,在解决传统保温材料缺陷方面成效显著,为保温隔热领域带来新突破。当前,二氧化硅气凝胶保温材料的研究已取得显著进展:制备工艺上,溶胶-凝胶法的优化、超临界干燥与常压干燥技术的改进,有效降低了生产成本并提升了材料制备效率;力学增强方面,多种增强策略的融合应用,使材料在保持优异保温性能的同时,力学强度与柔韧性得到大幅提升,为实际工程应用奠定了基础。展望未来,随着材料科学、制备技术与工程应用的深度融合,二氧化硅气凝胶保温材料的研究将朝着“高性能化、低成本化、功能复合化”方向持续迈进。

参考文献

[1] 简松海, 李尚辉. 二氧化硅气凝胶在建筑围护结构应用中隔热特性的研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(04): 97-101. DOI: 10.19406/j.cnki.cqkxyxbzkb.2023.04.012.

[2] 杨海龙, 孔祥明, 曹恩祥, 等. 聚合物改性 SiO₂ 气凝胶的常压干燥制备及表征[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2): 9. DOI: CNKI: 11-1801/TB.20111116.1044.015.

[3] Yang Z C, Yu H J, Li X L, et al. Hyperelastic and hydrophobic silica aerogels with enhanced compressive strength by using VTES/MTMS as precursors[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 525: 119677.

[4] Xia T, Yang H, Li J, et al. Synthesis and physicochemical characterization of silica aerogels by rapid seed growth method[J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7071-7076.

[5] Li M, Jiang H Y, Xu D, et al. Low density and hydrophobic silica aerogels dried under ambient pressure using a new co-precursor method[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 452: 187-193.

[6] 赵南, 冯坚, 姜勇刚, 等. 纤维增强 Si-C-O 气凝胶隔热复合材料的制备与表征[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(10): 1473-1477.

[7] 张怡, 葛欣国, 卢国建, 等. 硅酸铝纤维和玻璃纤维复合二氧化硅气凝胶材料的制备与性能[J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 68-71.

[8] Ulker Z, Erkey C. A novel hybrid material: an inorganic silica aerogel core encapsulated with a tunable organic alginate aerogel layer[J]. RSC Advances, 2014, 4(107): 62362-62366.

[9] Nazeran N, Moghaddas J, et al. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 461: 1-11.

[10] 唐杰. 有机硅源柔性硅基气凝胶力学及阻燃性能研究[D]. 西南大学, 2024. DOI: 10.27684/d.cnki.gxndx.2024.000741.