

二氧化硅气凝胶的制备及应用研究进展

王玉福, 李谨艺, 鲁建鹏, 魏 红

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月28日

摘 要

二氧化硅气凝胶是一种具有纳米多孔结构的新型轻质固体材料, 由于其独特的性质引起了人们极大的兴趣, 例如极低的密度、高比表面积、优异的隔热性能和光学透明性等。近年来, 随着材料科学和纳米技术的快速发展, 气凝胶在能源、环保、航空航天等领域的应用潜力逐渐显现。本文旨在综述二氧化硅气凝胶的最新研究进展, 涵盖其制备方法及应用前景。

关键词

二氧化硅气凝胶, 制备工艺, 应用

Progress in the Preparation and Application of Silicon Dioxide Aerogels

Yufu Wang, Jinyi Li, Jianpeng Lu, Hong Wei

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

Silicon dioxide aerogel is a new type of lightweight solid material with nanoporous structure, which has aroused great interest due to its unique properties, such as extremely low density, high specific surface area, excellent thermal insulation and optical transparency. In recent years, with the rapid development of materials science and nanotechnology, the potential of aerogels in energy, environmental protection, aerospace and other fields has gradually emerged. The aim of this paper is to review the latest research progress of silica aerogels, covering their preparation methods and application prospects.

文章引用: 王玉福, 李谨艺, 鲁建鹏, 魏红. 二氧化硅气凝胶的制备及应用研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(5): 1099-1106. DOI: 10.12677/ms.2025.155115

Keywords

Silicon Dioxide Aerogel, Preparation Process, Appliance

Copyright © 2025 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

气凝胶是一种以空气为分散介质,由相互连接的三维微纳米颗粒或聚合物分子构成的新型固体多孔材料。在所有固体材料中气凝胶密度最低($0.003\text{ g/cm}^3\sim 0.5\text{ g/cm}^3$),而且有非常高的比表面积($500.00\text{ m}^2/\text{g}$)、高孔隙率($80\%\sim 99.8\%$)、超低介电常数($k=1.0\sim 2.0$)、低折射率(1.05)和极低的热导率($0.005\sim 0.1\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$),所以被称为“21 世纪的奇迹材料” [1]-[5]。

1931 年, Kistler 教授以水玻璃(Na_2SiO_3)为硅源,使用超临界干燥法制备出了第一个二氧化硅气凝胶 [6],从此,气凝胶以一种新型多孔材料的角色走进了人们的视野,至今已有 90 多年的历史。二氧化硅气凝胶特殊的网络结构赋予其诸多优良的性能,被广泛应用于航空航天、环境保护、建筑材料、生物医学等领域 [7][8]。随着对二氧化硅气凝胶制备工艺的改善,目前已经由最初的二氧化硅气凝胶发展了许多类型的气凝胶材料,例如氧化物气凝胶、金属气凝胶、纤维素气凝胶以及和其他材料相结合的复合气凝胶材料 [9]。本文重点介绍了目前最流行的二氧化硅气凝胶的制备方法和不同的干燥技术;此外,还概述了气凝胶在建筑领域、生物医学领域、环境保护领域以及航空航天领域中的应用。

2. 二氧化硅气凝胶的制备

近年来,研究人员通过优化前驱体选择、催化剂种类和反应条件,进一步完善了制备工艺,制备得到了性能优良的二氧化硅气凝胶。二氧化硅气凝胶的制备过程主要包括湿凝胶的制备、老化以及干燥等步骤。常用的制备过程如图 1 所示:

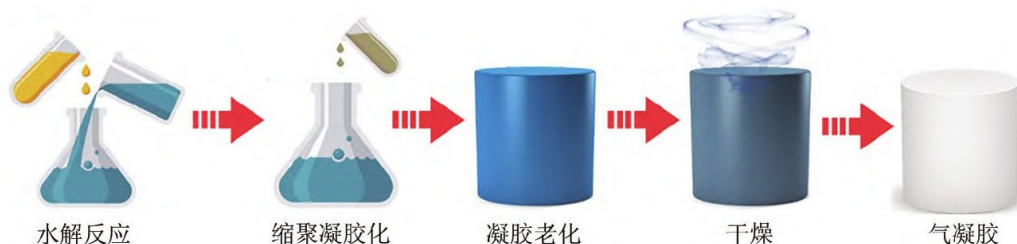


Figure 1. Flow chart of silicon dioxide aerogel preparation [10]

图 1. 二氧化硅气凝胶制备流程图 [10]

2.1. 湿凝胶的制备

溶胶-凝胶法是制备二氧化硅气凝胶最常用的方法,前驱体的种类在溶胶-凝胶过程中起着至关重要的作用,目前常用的前驱体有甲基三甲氧基硅烷(MTMS)、甲基三乙氧基硅烷(MTES)、四乙氧基硅烷 (TEOS)等。溶胶-凝胶法通过水解和缩合两步反应形成三维网络结构,虽然溶胶颗粒在前体溶液中可以自发的进行水解和缩聚反应,但是在不加入催化剂的情况下水解和缩聚反应的速率非常慢,会浪费大量

时间。研究人员通过在水解缩聚过程中加入催化剂调节反应体系的 pH, 来提高水解和缩聚反应的相对速率。通常会在水解反应阶段加入酸催化剂, 在缩聚反应阶段加入碱催化剂来加快反应速率, 常用酸的种类主要有盐酸、氢氟酸等, 碱的种类主要有氨水、氢氧化钠等[11]。在溶胶凝胶过程中, H^+ 离子浓度的增加导致了硅氧烷单体分子快速脱水形成硅醇, 使用浓度更高的碱催化剂可以缩短凝胶时间, 这是因为提供了更多的 OH^- 离子, 从而加快了缩合速率。

2.2. 老化

在湿凝胶形成初期, 凝胶网络骨架结构中仍含有大量的活性羟基, 骨架间的水解和缩合反应仍在继续, 如果直接进行干燥, 老化不良的样品在干燥过程中会出现不可逆体积收缩或孔隙塌陷, 另一方面, 凝胶骨架间存在较多表面张力较高的溶剂, 在干燥过程中会产生毛细管力, 导致得到的样品破裂。所以在制备气凝胶的过程中必须采用一定的老化手段才能保证在干燥过程中保持凝胶骨架结构的稳定性[12]。老化的主要目的就是使未反应完全的基团不断水解、缩聚, 并促进凝胶颗粒更紧密地聚集。湿凝胶老化过程中骨架强度的增强有利于减弱干燥过程中因去除孔隙间液体造成的骨架塌陷, 并且能提高干燥后气凝胶的机械性能。老化时间、温度、pH 等, 这些因素严重影响最终气凝胶的密度, 体积收缩率, 孔隙率和比表面积等性质[13]。

2.3. 干燥工艺

二氧化硅气凝胶制备过程中最重要的一步就是干燥步骤, 干燥过程中三维网络骨架结构不被破坏是保证气凝胶具有优异性能的重要前提。如果没有选择合适的干燥方式, 没有探索到合适的干燥条件, 最终结果可能是干燥不完全, 或者干燥导致内部孔隙塌陷, 得不到完整的样品。针对上述问题, 研究人员探索了许多种干燥方法, 目前常用的湿凝胶干燥方式包括超临界干燥法(SCLD)、冷冻干燥法和常压干燥法(APD) [14]-[16]。

2.3.1. 超临界干燥

超临界干燥法是最先制备气凝胶采用的工艺, 其核心原理是通过消除毛细管力实现凝胶网络骨架的完整保留。该方法操作流程包含以下步骤: 首先将湿凝胶置于高压釜并注入干燥介质, 随后通过精确调控温度与压力使孔隙内液体达到超临界状态, 经恒压处理一段时间后自然恢复至常压常温。在超临界状态下, 溶剂的液相与气相密度相同, 气液界面随之消失, 从而避免传统干燥过程中因毛细管力造成的凝胶网络结构坍塌问题[17]。在超临界干燥过程中, 选择合适的超临界条件以及合适的干燥介质是获得高性能气凝胶材料的关键, 目前超临界干燥常用的干燥介质有 CO_2 、 C_2H_5OH 、 CH_3OH 等。其中 C_2H_5OH 、 CH_3OH 易燃易爆, 有较大的危险性, 而二氧化碳超临界温度接近室温, 操作方便。所以成为目前使用频率最高的干燥介质。相较于其他干燥技术, 超临界干燥法制备得到的二氧化硅气凝胶结构完整、性能优异, 然而该工艺的产业化应用仍受多重因素制约, 干燥成本较为昂贵, 高温高压操作存在安全风险, 工艺复杂度高, 且完成干燥的周期较长, 限制了该技术的规模化推广[18][19]。面对复杂的制备技术和高昂的制备成本, Khudeev 等人[20]通过对超临界干燥过程进行建模和模拟; 开发计算二氧化硅气凝胶制造成本的方法; 创建计算二氧化硅气凝胶制造成本的软件模块, 借助开发的软件, 对二氧化硅气凝胶设备进行了技术经济优化。所开发的数学模型、优化方法以及对超临界干燥过程强化的研究, 使现有气凝胶生产的制造成本可降低了 26.4%。

2.3.2. 冷冻干燥

冷冻干燥(又称冻干法)作为另一种制备气凝胶的干燥工艺, 具有绿色环保、操作简便及成本较低的优

势。该技术通过低温低压环境使湿凝胶孔隙内的溶剂由液相变为固相,随后在真空条件下促使固态溶剂直接升华气化,实现气-液界面向气-固界面的转化,最终获得孔隙率高且收缩率低的气凝胶材料。冷冻速率和前驱体浓度对气凝胶材料的结构具有显著影响:当采用较快冷冻速率时,形成的微小冰晶在升华后能产生孔径细小且比表面积增大的多孔结构[21];而前驱体浓度过低时,冰晶生长引发的体积膨胀效应会导致气凝胶骨架结构被破坏,制备的二氧化硅气凝胶多为粉末[22]。目前制约冷冻干燥的因素主要是耗能较大,生产效率低,并且在冷冻过程中,因体积增大而破坏原有的孔隙结构等缺点。例如, Pan 等人[23]以硅酸钠为二氧化硅前驱体,使用叔丁醇水溶液作为冷冻干燥介质,得到了高孔隙率(97.74%)且具有介孔结构的二氧化硅气凝胶。叔丁醇和二氧化硅溶胶可以直接混合生成湿凝胶,避免了长时间且消耗材料的溶剂更换步骤,提高了制备的效率。另外,所提出的具有成本效益的制备策略有望可以提高二氧化硅气凝胶在建筑保温、工业催化和吸附等领域的大规模应用潜力。

2.3.3. 常压干燥

常压干燥法(APD)相比超临界干燥工艺和冷冻干燥工艺,因其操作简便、安全性高、成本低廉等优势,同时在提升产品性能与实现连续化生产方面具有显著潜力,已成为当前的主流工艺[24]。该技术的核心在于常压环境下通过梯度升温策略促使溶剂发生相变挥发,从而使凝胶骨架中的溶剂脱除。然而在此过程中,孔隙内溶剂挥发会产生毛细管力,导致凝胶发生不可逆收缩甚至三维网络结构坍塌[25]。为解决这一技术瓶颈,当前主要采取表面改性和溶剂置换策略:一方面通过表面功能化改性强化凝胶骨架,通过疏水改性可以让未反应完全的 Si-OH 基团被甲基硅烷烷基化,使得疏水基团修饰在湿凝胶骨架的表面。在干燥过程中,当疏水基团间距达到临界值时,其空间位阻效应可有效抵消毛细管作用力,从而显著抑制结构收缩与破坏;另一方面通过使用低表面张力溶剂替代原有高表面张力介质,从而降低在干燥过程中毛细管力带来的破坏[26]。例如, Li 等[27]以甲基三甲氧基硅烷为前驱体,向水和乙醇混合液中引入有机溶剂环己烷,通过酸碱两步法结合常压干燥工艺,得到了由 $1\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 空心微球构成的低密度块状二氧化硅气凝胶,该工艺避免了传统工艺中冗长的溶剂置换与表面改性过程,制备效率显著提升。

3. 二氧化硅气凝胶的应用

3.1. 保温隔热领域

与传统保温材料相比,二氧化硅气凝胶由于极低的热导率,能够有效减少热量损失,所以在保温隔热领域有着广阔的应用潜力。开发具有更好保温隔热性能的气凝胶,以扩大其在更多领域中的应用,仍然是一个巨大的挑战。为此, Maleki 等人[28]成功研制出一种新型的可压缩、轻质、分层组织的中大孔聚甲基倍半硅氧烷-丝素蛋白(PMSQ-SF IPN)混合气凝胶。该气凝胶具有优良的隔热性能($\lambda = 0.032\sim 0.044\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),以及出色的阻燃性和自熄性。气凝胶材料本身具有出色的防火性。但是,现有气凝胶材料生产方法成本较高,且没有在建筑领域推广应用的产品和方法,为此,王肇嘉等[29]开发了一种用于建筑保温的气凝胶复合保温材料,并研究了气凝胶含量对复合保温材料导热系数的影响,结果表明,气凝胶含量为 7%时,复合材料的导热系数最低($0.0202\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。气凝胶加入降低了复合保温材料的导热系数,大幅提高复合保温材料的保温性能。另外,隧道火灾通常会对衬砌结构造成巨大破坏。为避免在大规模隧道火灾情况下衬砌开裂和剥落, Liu 等人[30]提出了一种基于气凝胶材料的新型隧道防火方法。研究了衬砌内部温度分布,对比分析了模拟火灾下气凝胶涂层衬里与常规衬里的保温效果。模拟燃烧 1 h 后,常规衬砌表层 50 mm 厚的混凝土温度超过 600°C 。这个温度足以导致隧道衬砌严重开裂、剥落甚至爆裂。而对于气凝胶涂层衬里,衬里的内部温度保持在 200°C 以下,大部分区域甚至低于 100°C 。说明使用气凝胶涂层可以显著提高隧道衬砌的耐火性能。未来,它将在隧道防火领域具有非常大的应用潜力。

3.2. 吸附和环保领域

随着现代工业的快速发展,有机液体的排放和重金属污染造成的环境问题引起了广泛的关注。二氧化硅气凝胶结构中硅氧键形成的刚性骨架在维持网络结构的同时,赋予了材料高达 80%~99.8% 的孔隙率,这种多级孔道结构使其具备卓越的吸附性能。因此,可作为吸附剂应用于废水处理、重金属吸附和土壤废弃物吸附等环保领域。大多数复合材料比非复合材料拥有更高的染料去除率,但复合材料的结构复杂,制备成本更高,而天然吸附剂价格便宜,但吸附效果并不理想。为此,Štandeker 等人[31]以甲基三甲氧基硅烷(MTMS)为前驱体,采用超临界(CO_2)干燥法制备出了具有不同疏水性的二氧化硅单片气凝胶。通过吸附容量实验发现,这种改性疏水性二氧化硅气凝胶是吸附水中不同有毒有机化合物的极佳吸附剂。与粒状活性炭(GAC)相比,它们对所有测试化合物的吸附容量都高出 15~400 倍。即使经过 20 次吸附/解吸循环,疏水性二氧化硅气凝胶的吸附特性仍然保持稳定。此外,Wei 等人[32]通过溶胶-凝胶法获得了亲水性二氧化硅气凝胶(HSA),并研究了 HSA 对有机染料的吸附性能。结果显示 HSA 对阳离子染料(罗丹明 B (RhB)、亚甲基蓝(MB)和结晶紫(CV))的去除率高达 90%,最大吸附量为 RhB 191.21 mg/g、MB 51.16 mg/g 和 CV 24.86 mg/g。重金属是环境中常见的无机污染物,必须从废水和饮用水中去除,Vareda 等人[33]以正硅酸乙酯(TEOS)和甲基三乙氧基硅烷(MTES)为共前驱体制备二氧化硅气凝胶并使用含氮基团的改性剂对凝胶进行了改性。对制备的样品进行了初步吸附测试,研究表明,所制备的样品能很好地去除 Cu、Pb、Cd、Ni 等重金属元素。

3.3. 生物医学领域

气凝胶在生物医学应用中的潜力,特别是在药物递送方面,已经引起了越来越多研究者的关注。气凝胶的高表面积、高孔隙率、低密度、无生理毒性、生物相容性和热稳定性等优良特性对于药物递送具有许多益处。例如,Smirnova 等人[34]为了评估亲水性二氧化硅气凝胶作为药物载体的可行性,并研究气凝胶特性对水溶性较差药物释放速率的影响。通过超临界(CO_2)获得不同密度的亲水性二氧化硅气凝胶,并负载酮洛芬和黄霉素两种模型药物。结果表明,通过物理吸附,亲水性气凝胶上可沉积 30% 的酮洛芬和 5.4% 的黄霉素。另外研究了体外两种药物的释放动力学。酮洛芬从药物气凝胶制剂中的释放速度远远快于相应的晶体药物,酮洛芬的释放速度提高了 500%,黄霉素的释放速度提高了 450%。证明了吸附在高孔隙亲水性二氧化硅气凝胶上可显著提高水溶性差的药物的溶解速率。

由病原菌引起的医疗保健相关感染(HAIs)是一个世界性问题,有很高的发病率和死亡率。外源交叉感染是导致此类感染的主要机制之一。为了解决这个问题,Oh 等人[35]通过溶胶-凝胶法以正硅酸四乙酯为前驱体,并使用三甲基氯硅烷进行疏水处理。通过在阴性大肠杆菌 O157:H7 和阳性金黄色葡萄球菌悬浮液中浸渍接种。研究发现,大肠杆菌 O157:H7 和金黄色葡萄球菌在疏水性纳米多孔二氧化硅气凝胶(HNSA)上的附着力明显低于在亲水性和疏水性无孔二氧化硅材料上的附着力,与亲水性无孔二氧化硅相比,大肠杆菌 O157:H7 和金黄色葡萄球菌的降解率分别为 99.91% 和 99.93%;与疏水性无孔二氧化硅相比,大肠杆菌 O157:H7 和金黄色葡萄球菌的降解率分别为 82.95% 和 84.90%。这些结果表明,将 HNSA 用作医疗环境中与细菌病原体接触的表面可以改善细菌卫生,从而降低 HAIs 的发生率。

3.4. 航空航天领域

二氧化硅气凝胶凭借极低的密度、优异的热绝缘性能以及高度发达的多孔结构,在航空航天工业中有多种用途,包括隔热、高速粒子捕获、宇宙尘埃收集、低温流体遏制、阻燃、声学等[36]。然而,天然二氧化硅气凝胶在相对较低的应力下是脆弱的。通过选择硅烷前体和用聚合物增强,可以获得强度和刚度更高的耐用型气凝胶。例如,Hasan 等人[37]利用市售二氧化硅气凝胶基柔性复合材料作为被动热控元

件研究了在地外环境等应用中的可行性。结果表明,总质量损失等都在空间应用可接受范围内。ASTM 拉伸和撕裂测试证实了材料的机械完整性。在模拟空间环境测试(如相对湿度、热循环和热真空测试)中,热光学特性几乎没有改变,证实了气凝胶的太空应用价值。He 等[38]以莫来石纤维为基体, $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ 气凝胶为填料,通过真空浸渍法合成了新型气凝胶/纤维陶瓷复合材料。所制备的气凝胶/纤维陶瓷复合材料的抗压强度高达 1.05 MPa (为纯 SiO_2 气凝胶的 10 倍),与传统的纤维材料相比,气凝胶/纤维陶瓷复合材料的导热系数更低,室温下为 0.0524 W/(m·K), 500℃和 1200℃时分别为 0.082 和 0.182 W/(m·K),这表明它在很宽的温度范围内具有优异的隔热性能。因此,这种具有高强度的超低导热性气凝胶/纤维陶瓷复合材料是一种优异的隔热材料,可应用于航空航天领域。气凝胶还是火星探测任务中很有前途的隔热材料,Rocha 等人[39]为了评估疏水性二氧化硅气凝胶在火星环境中的特殊性,对样品进行模拟火星环境的实验室暴露、伽马辐射暴露和热循环测试,验证对其热、机械和化学特性的影响,结果表明气凝胶的特性只发生了微小变化,表明这些材料在热循环测试后仍能保持其隔热性能,而且在压缩模式下进行动态机械分析时的存储模量也有所提高。

3.5. 其它领域

二氧化硅气凝胶由于特殊的结构和独特的物理化学特性,在越来越多领域引起了广泛的关注。除了上面提到的应用之外,在其他领域也有广泛的应用,如气体过滤器、封装介质、吸收介质、能源存储、催化、传感器,太阳能电池模板和涂料砂浆等[40]。由于高透明度和隔热性,二氧化硅气凝胶已被用于太阳能相关领域,例如,Yu 等人[41]提出了一种掺杂有 ITO 纳米圆柱的混合等离子体气凝胶,用于改善高温聚光太阳能热发电(CST)工厂的光热转换,以实现更高的热力学效率。研究结果表明,二氧化硅气凝胶厚度为 5 mm、ITO 纳米圆柱浓度为 0.016%时,工作温度最大可提高 113.9℃。二氧化硅气凝胶是一种超级绝缘材料,可有效改善涂料砂浆的防火等性能。Chen 等人[42]用二氧化硅气凝胶替代传统骨料制备砂浆,研究了二氧化硅气凝胶的高温特性以及二氧化硅气凝胶砂浆的破坏演变模式,并以不同的火灾持续时间和火灾温度作为环境变量。结果表明,二氧化硅气凝胶颗粒从无定形结构转变为晶体结构的临界温度和临界时间分别约为 1100℃和 1.5 h。二氧化硅气凝胶砂浆的抗压强度为 3.5 MPa,粘结强度为 0.36 MPa,导热系数为 0.165 W/m·K。二氧化硅气凝胶砂浆的残余质量比和残余抗压强度在 1100℃, 2.5 h 后分别为 81%和 1.8 MPa。因此,二氧化硅气凝胶砂浆有可能用作防火涂料,并可应用于隧道中,以减少高温剥落,延长人员安全撤离时间。

4. 结论

二氧化硅气凝胶作为一种新兴多功能材料,具有高孔隙率、高比表面积、低密度、低导热率和低折射率等优良特性。这些特性使气凝胶在隔热、吸附分离、光电催化、能量储存与转换、吸声隔音等领域展现出巨大的应用潜力。但其大规模制备和成本控制仍是亟待解决的问题,此外,如何进一步提高其机械性能和环境稳定性也是未来研究的重点。随着新材料和新技术的不断涌现,通过不断优化制备方法和工艺,以及探索交叉学科应用,二氧化硅气凝胶有望在更多领域实现突破性应用。

参考文献

- [1] Zhang, S., Wang, L., Feng, J., Jiang, Y., Li, L., Hu, Y., *et al.* (2024) Fabrication of Flexible Silica Aerogel Composite Blankets from an Aqueous Fumed Silica-Based Slurry. *Science China Materials*, **67**, 1332-1339. <https://doi.org/10.1007/s40843-023-2787-5>
- [2] Kantor, Z., Wu, T., Zeng, Z., Gaan, S., Lehner, S., Jovic, M., *et al.* (2022) Heterogeneous Silica-Polyimide Aerogel-In-aerogel Nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, **443**, Article ID: 136401. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136401>

- [3] Mohammadi, A. and Moghaddas, J. (2015) Synthesis, Adsorption and Regeneration of Nanoporous Silica Aerogel and Silica Aerogel-Activated Carbon Composites. *Chemical Engineering Research and Design*, **94**, 475-484. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.09.003>
- [4] 张安杰, 刘东升, 李蕾蕾, 等. 环境友好型气凝胶材料研究进展[J]. 三峡生态环境监测, 2024, 9(1): 9-18.
- [5] Zheng, H., Shan, H., Bai, Y., Wang, X., Liu, L., Yu, J., *et al.* (2015) Assembly of Silica Aerogels within Silica Nanofibers: Towards a Super-Insulating Flexible Hybrid Aerogel Membrane. *RSC Advances*, **5**, 91813-91820. <https://doi.org/10.1039/c5ra18137b>
- [6] Kistler, S.S. (1931) Coherent Expanded Aerogels and Jellies. *Nature*, **127**, 741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- [7] Niculescu, A., Tudorache, D., Bocioagă, M., Mihaiescu, D.E., Hadibarata, T. and Grumezescu, A.M. (2024) An Updated Overview of Silica Aerogel-Based Nanomaterials. *Nanomaterials*, **14**, Article No. 469. <https://doi.org/10.3390/nano14050469>
- [8] 巩升鑫. 柔性二氧化硅气凝胶的制备及其孔结构与热导率关系研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- [9] 李承东, 陈照峰, 姚伯龙, 等. SiO₂ 气凝胶骨架增强改性研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(5): 1-5.
- [10] 潘月磊, 程旭东, 闫明远, 等. 二氧化硅气凝胶及其在保温隔热领域应用进展[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 297-309.
- [11] Temel, T.M., İközler, B.K., Terzioğlu, P., Yücel, S. and Elalmış, Y.B. (2017) The Effect of Process Variables on the Properties of Nanoporous Silica Aerogels: An Approach to Prepare Silica Aerogels from Biosilica. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **84**, 51-59. <https://doi.org/10.1007/s10971-017-4469-x>
- [12] Omranpour, H. and Motahari, S. (2013) Effects of Processing Conditions on Silica Aerogel during Aging: Role of Solvent, Time and Temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **379**, 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.025>
- [13] He, F., Zhao, H., Qu, X., Zhang, C. and Qiu, W. (2009) Modified Aging Process for Silica Aerogel. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 1621-1626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.009>
- [14] 吕璐涛, 杨宗霖, 刘伟, 等. 气凝胶材料的研究进展及其在航空航天领域的应用[J]. 高分子通报, 2022(4): 11-29.
- [15] 范良成, 黄玉叶, 黄骏. 二氧化硅气凝胶的制备技术介绍[J]. 陶瓷, 2019(8): 31-33.
- [16] Karamikamkar, S., Naguib, H.E. and Park, C.B. (2020) Advances in Precursor System for Silica-Based Aerogel Production toward Improved Mechanical Properties, Customized Morphology, and Multifunctionality: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **276**, Article ID: 102101. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102101>
- [17] Dowson, M., Grogan, M., Birks, T., Harrison, D. and Craig, S. (2012) Streamlined Life Cycle Assessment of Transparent Silica Aerogel Made by Supercritical Drying. *Applied Energy*, **97**, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.047>
- [18] 王宝和, 于才渊, 王喜忠. 纳米多孔材料的超临界干燥新技术[J]. 化学工程, 2005, 33(2): 13-17.
- [19] 陈龙武, 甘礼华, 岳天仪, 等. 超临界干燥法制备 SiO₂ 气凝胶的研究[J]. 高等学校化学学报, 1995(6): 840-843.
- [20] Khudeev, I.I., Lebedev, A.E., Mochalova, M.S. and Menshutina, N.V. (2024) Modeling and Techno-Economic Optimization of the Supercritical Drying of Silica Aerogels. *Drying Technology*, **42**, 812-835. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2318439>
- [21] Xiao, H., Lv, J., Tan, W., He, X., Chen, M., Zeng, K., *et al.* (2022) Ultrasound-Assisted Freeze-Drying Process for Polyimide Aerogels. *Chemical Engineering Journal*, **450**, Article ID: 138344. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138344>
- [22] 阿拉腾沙嘎, 郭凯月. 冷冻干燥法制备气凝胶材料研究进展[J]. 中国陶瓷, 2022, 58(6): 17-25.
- [23] Pan, Q., Liu, Q., Shi, Y., Yang, D., Lan, Y. and Wang, T. (2025) A Facile Strategy for Freeze-Drying Preparation of Silica Aerogel from Sodium Silicate. *Ceramics International*, **51**, 5342-5350. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.508>
- [24] Jung, I., Gurav, J.L., Ha, T., Choi, S.G., Baek, S. and Park, H. (2012) The Properties of Silica Aerogels Hybridized with SiO₂ Nanoparticles by Ambient Pressure Drying. *Ceramics International*, **38**, S105-S108. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.04.060>
- [25] 吴国友, 程璇, 余煜玺, 等. 常压干燥制备二氧化硅气凝胶[J]. 化学进展, 2010, 22(10): 1892-1900.
- [26] 王斌, 王丽娜, 魁尚文, 等. 常压干燥法制备气凝胶的研究进展[J]. 化学通报, 2022, 85(8): 927-936.
- [27] Li, B., Gao, X., Li, X., Liu, Z. and He, N. (2017) Monolithic Organosilica Aerogel Consisting of Hollow Microspheres by a Simple Ambient Pressure Drying Process. *Materials Letters*, **199**, 21-23. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.138>
- [28] Maleki, H., Whitmore, L. and Hüsing, N. (2018) Novel Multifunctional Polymethylsilsesquioxane-Silk Fibroin Aerogel

- Hybrids for Environmental and Thermal Insulation Applications. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 12598-12612. <https://doi.org/10.1039/c8ta02821d>
- [29] 王肇嘉, 路国忠, 何光明, 等. 气凝胶岩棉复合保温材料的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(1): 124-126+137.
- [30] Liu, S., Zhu, P. and Li, X. (2020) Design Approach for Improving Fire-Resistance Performance of Tunnel Lining Based on SiO₂ Aerogel Coating. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **34**, Article ID: 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001439](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001439)
- [31] Štandeker, S., Novak, Z. and Knez, Ž. (2007) Adsorption of Toxic Organic Compounds from Water with Hydrophobic Silica Aerogels. *Journal of Colloid and Interface Science*, **310**, 362-368. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.02.021>
- [32] Wei, W., Hu, H., Ji, X., Yan, Z., Sun, W. and Xie, J. (2018) Selective Adsorption of Organic Dyes by Porous Hydrophilic Silica Aerogels from Aqueous System. *Water Science and Technology*, **78**, 402-414. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.313>
- [33] Vareda, J.P., Valente, A.J.M. and Durães, L. (2020) Silica Aerogels/Xerogels Modified with Nitrogen-Containing Groups for Heavy Metal Adsorption. *Molecules*, **25**, Article No. 2788. <https://doi.org/10.3390/molecules25122788>
- [34] Smirnova, I., Suttiruwong, S., Seiler, M. and Arlt, W. (2004) Dissolution Rate Enhancement by Adsorption of Poorly Soluble Drugs on Hydrophilic Silica Aerogels. *Pharmaceutical Development and Technology*, **9**, 443-452. <https://doi.org/10.1081/pdt-200035804>
- [35] Oh, J.K., Kohli, N., Zhang, Y., Min, Y., Jayaraman, A., Cisneros-Zevallos, L., *et al.* (2016) Nanoporous Aerogel as a Bacteria Repelling Hygienic Material for Healthcare Environment. *Nanotechnology*, **27**, Article ID: 085705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/8/085705>
- [36] 穆锐, 刘元雪, 刘晓英, 等. SiO₂ 气凝胶复合材料及其在航空航天领域的研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3355-3371.
- [37] Hasan, M.A., Rashmi, S., Esther, A.C.M., Bhavanisankar, P.Y., Sherikar, B.N., Sridhara, N., *et al.* (2018) Evaluations of Silica Aerogel-Based Flexible Blanket as Passive Thermal Control Element for Spacecraft Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **27**, 1265-1273. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3232-y>
- [38] He, J., Li, X., Su, D., Ji, H. and Wang, X. (2016) Ultra-Low Thermal Conductivity and High Strength of Aerogels/Fibrous Ceramic Composites. *Journal of the European Ceramic Society*, **36**, 1487-1493. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.11.021>
- [39] Rocha, H., Lafont, U. and Semprinoschnig, C. (2019) Environmental Testing and Characterization of Fibre Reinforced Silica Aerogel Materials for Mars Exploration. *Acta Astronautica*, **165**, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.07.030>
- [40] Gurav, J.L., Jung, I., Park, H., Kang, E.S. and Nadargi, D.Y. (2010) Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *Journal of Nanomaterials*, **2010**, Article ID: 409310. <https://doi.org/10.1155/2010/409310>
- [41] Yu, X., Huang, M., Wang, X., Tang, G.H. and Du, M. (2023) Plasmon Silica Aerogel for Improving High-Temperature Solar Thermal Conversion. *Applied Thermal Engineering*, **219**, Article ID: 119419. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119419>
- [42] Chen, H., Zhu, P., Yan, X., Xu, X. and Wang, X. (2023) Exploring the Application Potential and Performance of SiO₂ Aerogel Mortar in Various Tunnel High-Temperature Environments. *Fire*, **6**, Article No. 407. <https://doi.org/10.3390/fire6100407>