

# 气凝胶材料的分类研究进展

李谨艺, 张菲菲, 白如玉, 鲁建鹏

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年4月26日; 发布日期: 2026年5月8日

## 摘要

气凝胶作为一种由纳米多孔网络构成的三维固体材料, 因其超低密度、高孔隙率、低导热系数等独特性能, 在隔热、吸附、催化、能源及生物医学等领域展现出广阔的应用前景。自20世纪30年代首次报道以来, 气凝胶家族已发展出丰富多样的材料体系。本文旨在从材料分类学的视角, 对气凝胶的研究进展进行系统综述。文章首先介绍气凝胶的通用制备原理, 随后按照材料来源和化学组成, 将气凝胶划分为无机气凝胶、有机聚合物气凝胶、碳气凝胶、生物基气凝胶以及多组分杂化气凝胶五大类别。文章详细阐述了各类气凝胶的典型代表、结构特征、核心性能优势及当前面临的主要挑战, 并通过各类别之间的对比分析, 揭示气凝胶材料从单一性能优化向多功能协同发展的演化规律, 为新型气凝胶材料的设计与应用开发提供参考。

## 关键词

气凝胶, 分类, 无机气凝胶, 有机气凝胶, 生物基气凝胶, 杂化气凝胶

# Research Progress on Classification of Aerogel Materials

Jinyi Li, Feifei Zhang, Ruyi Bai, Jianpeng Lu

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

Received: April 6, 2026; accepted: April 26, 2026; published: May 8, 2026

## Abstract

As a three-dimensional solid material composed of nanoporous networks, aerogels have shown broad application prospects in the fields of heat insulation, adsorption, catalysis, energy and biomedicine due to their unique properties such as ultra-low density, high porosity and low thermal conductivity. Since it was first reported in the 1930s, the aerogel family has developed a rich and diverse material system. This paper aims to systematically review the research progress of aerogels

from the perspective of material taxonomy. The article first introduces the general preparation principle of aerogels, and then divides aerogels into inorganic aerogels, organic polymer aerogels, carbon aerogels, bio-based aerogels, and multi-component hybrid aerogels according to material sources and chemical composition. In this paper, the typical representatives, structural characteristics, core performance advantages and current main challenges of various aerogels are described in detail. Through the comparative analysis between various categories, the evolution law of aerogel materials from single performance optimization to multi-functional collaborative development is revealed, which provides a reference for the design and application development of new aerogel materials.

## Keywords

Aerogel, Classification, Inorganic Aerogel, Organic Aerogel, Bio-Based Aerogels, Hybrid Aerogels

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

气凝胶材料的研究可以追溯到近 100 年前，Kistler 的工作最早发表于 20 世纪 30 年代初，他通过超临界干燥技术成功保持了湿凝胶的网络结构，制备出了世界上第一块二氧化硅气凝胶[1]。这类材料由纳米尺度的固体骨架和填充于其间的大量气体组成，具有连续的三维网络结构，因其极高的孔隙率和极低的密度，展现出超低导热系数、高比表面积和低声速等奇异特性，被誉为改变世界的十大神奇材料之一。

绝大多数气凝胶材料的制备遵循相似的路径：基于溶胶-凝胶化学，通过水解和缩聚反应将分子或离子前驱体转化为湿凝胶，随后采用超临界干燥、冷冻干燥或常压干燥等特殊干燥技术，去除孔隙内的液体而不破坏固体骨架，最终制得气凝胶[2]。经过近一个世纪的发展，气凝胶家族已从最初的无机二氧化硅体系，逐步扩展至有机聚合物体系、碳体系、生物质体系以及多组分杂化体系[3]。对这些庞大家族进行科学的分类与梳理，有助于深入理解不同气凝胶的结构-性能关系，指导面向特定应用的材料设计与选择。本文将按照材料来源和化学组成，对气凝胶的主要类别进行系统论述。

## 2. 无机气凝胶

无机气凝胶是研究最早、最深入的一类气凝胶，其骨架由无机化合物构成，主要包括氧化物体系和非氧化物体系两大类。

氧化物气凝胶是无机气凝胶中最重要的一类，以硅基气凝胶为代表。最常见的二氧化硅气凝胶的前体主要是通过四甲氧基硅烷和硅酸四乙酯等硅酸盐前驱体合成[4]。通过溶胶-凝胶过程，可以形成由三维互连的纳米孔骨架构成的独特结构。这种曲折的孔网络能够有效阻止固体热传导，而介孔尺寸则抑制了空气分子的对流碰撞，使得二氧化硅气凝胶的导热系数可低至 0.013 至 0.020 瓦每米每开，远低于空气的导热系数[5]。除二氧化硅外，氧化铝、氧化钛和氧化锆气凝胶也是重要的氧化物气凝胶。理论研究表明，氧化锆是理论上可实现最低固体电导率的无机材料之一，具有优异的高温稳定性和化学惰性，适用于高温催化载体和热障涂层等领域[6]。氧化钛气凝胶则因其光催化活性，在环境净化领域备受瞩目[7]。

非氧化物无机气凝胶主要包括一些碳化物、氮化物等，它们通常在极端条件下制备，具有更高的热稳定性和化学稳定性，但研究相对较少，制备难度也更大。

无机气凝胶的共同优势在于：极高的比表面积、超低的密度、优异的隔热性能和良好的阻燃性能。这些特性使其在航空航天、工业管道保温、建筑节能等领域成为不可替代的材料[8]。然而，传统无机气凝胶的骨架通常由刚性的化学键相互连接，形成类似珍珠项链的刚性网络，导致其机械性能较差，表现出高度的脆性和易碎性[9]。这种高脆性严重限制了其在需要承受力学载荷或柔性变形的场景中的应用，是无机气凝胶走向更广泛应用的核心瓶颈。

### 3. 有机聚合物气凝胶

为克服无机气凝胶的脆性难题，研究者们于 20 世纪 80 年代末开始探索有机聚合物基气凝胶。1989 年，Pekala 和 Kong 利用间苯二酚和甲醛的缩聚反应，首次制备出有机气凝胶，开创了气凝胶研究的新纪元[8]。

有机气凝胶的种类丰富多样，主要包括以下几类。间苯二酚 - 甲醛气凝胶作为最早开发的有机气凝胶，具有开孔的纳米结构形态和超低密度，是有机气凝胶研究的模型体系[8][9]。聚氨酯气凝胶结合了聚氨酯材料的良好力学性能和气凝胶的多孔结构，展现出优异的柔韧性和隔热性能。聚酰亚胺气凝胶因其分子链中含有耐热的酰亚胺环，具有优异的热稳定性和机械强度，可在高温环境下保持结构完整性，是航天领域柔性隔热材料的理想选择[10]。导电聚合物气凝胶如聚苯胺、聚吡咯等，在保留气凝胶多孔结构的同时引入导电性，拓展了气凝胶在超级电容器、传感器和电磁屏蔽等领域的应用[11]。

有机气凝胶结合了有机材料的特性和气凝胶的特殊结构。与其他宏观形貌的有机材料相比，有机气凝胶具有连续的纳米级骨架、高孔隙率和高比表面积。更重要的是，与无机气凝胶相比，有机气凝胶具有制备原料多样、分子结构可设计和力学性能优良等突出优点。得益于聚合物链段丰富的化学结构和可变的分子量，有机气凝胶能够被赋予机械柔韧性、导电性、刺激响应性、自修复性等多种功能，在吸声、储能、药物释放等领域展现出巨大潜力。

然而，有机气凝胶的多孔结构，如孔体积、比表面积和极限导热率等指标，往往难以达到无机气凝胶的高标准。其耐温性普遍低于无机氧化物气凝胶，且在高温下易发生分解或燃烧，这在一定程度上限制了其在高温场景下的应用。

### 4. 碳气凝胶

碳气凝胶可以视为有机气凝胶的衍生产物，通常是通过将有机气凝胶在惰性气氛中进行高温热解而制得[12]。热解过程将有机骨架转化为纳米结构的碳质材料，同时保留了气凝胶原有的三维多孔网络。

通过溶胶 - 凝胶技术聚合和缩聚制备有机前驱体，再经过干燥和高温热解，可得到具有良好导电性的纳米结构碳材料。碳气凝胶继承了有机前驱体的高比表面积和可控孔结构，同时赋予了碳材料优异的导电性和化学稳定性[13]。

由于其独特的结构组成，碳气凝胶具有广泛的应用前景。在电化学储能领域，它可用作超级电容器和电化学电容器的电极材料，其高比表面积和良好的导电性有利于电荷的快速储存和释放[14]。在环境领域，碳气凝胶可作为高效的吸附材料，用于去除水环境中的重金属离子和有机污染物[15]。此外，它在储氢材料、催化剂载体和光伏材料等领域的应用也受到广泛关注。

### 5. 生物基气凝胶

随着对材料可持续性、生物降解性和环境安全性的关注日益增加，研究者们积极寻找传统气凝胶的绿色替代品。近年来，生物基气凝胶因其独特的特性和环境友好性而迅速崛起。

生物基气凝胶是一类由天然生物聚合物构成的特殊多孔材料。其制备同样遵循溶胶 - 凝胶和干燥的

基本路径：首先形成均匀分散的生物聚合物前体溶液，通过物理或化学交联形成凝胶网络，然后采用冷冻干燥、超临界干燥或常压干燥技术获得最终产品。常见的生物聚合物来源包括纤维素、壳聚糖、海藻酸盐、蛋白质等[16]。

纤维素气凝胶是研究最广泛的生物基气凝胶之一，它继承了纤维素可再生、可降解、生物相容的优点，在包装、吸附和生物医学领域展现出广阔前景[17]。一个更为创新的案例是受松质骨启发而开发的基于羟基磷灰石纳米线的无机-生物基复合气凝胶。这种材料通过构建柔性的纳米线网络，实现了优异的弹性，同时保持了超轻、高孔隙率和良好的隔热性能。更重要的是，羟基磷灰石纳米线气凝胶展现出多功能性：可作为高效空气过滤器，对 PM2.5 具有高过滤效率；也可作为连续油水分离的智能开关材料，用于含油废水处理[18]。与传统的合成聚合物气凝胶相比，羟基磷灰石纳米线气凝胶具有生物相容性、环境友好性和低成本等优势。

生物基气凝胶是低成本、生物相容性和可生物降解的可持续材料，可用于改善食品添加剂的加工性能、实现生物活性物质的封装与控释、开发活性包装材料等。其在食品工业、生物医药和环境工程领域的应用潜力正在被不断挖掘。

## 6. 多组分杂化气凝胶

单一组分的气凝胶往往难以满足复杂应用场景的所有要求。将不同材料在纳米尺度上进行复合，制备多组分杂化气凝胶，可以实现性能的协同增强，是当前气凝胶研究的前沿方向。

由聚合物和无机组分组成的复合气凝胶，能够结合无机组分的高热稳定性、高比表面积和有机组分的柔韧性、可加工性。这种整合效应和协同效应，使得杂化气凝胶可以被赋予单一组分难以实现的功能组合，如同时具备良好的机械强度和优异的隔热性能，或兼具生物可降解性和功能性[19]。这类材料在生物医学和柔性电子等领域具有广阔的应用前景。

以氧化锆与二氧化硅杂化气凝胶为例，研究表明，通过精确控制溶胶-凝胶工艺参数，可以实现弱支化的氧化锆和二氧化硅团簇在纳米尺度上的自由缠绕和最大程度混合。当两组分达到最佳比例时，杂化气凝胶展现出比任一单一组分更高的热稳定性。这种高度混合的结构有效抑制了高温下的纳米孔坍塌和晶化行为，使得材料在 600 摄氏度、800 摄氏度和 1000 摄氏度下仍能保持优异的隔热性能[19]-[21]。这一混合策略为设计其他高温应用的多组分气凝胶提供了有效途径。

## 7. 总结与展望

经过近一个世纪的演化，气凝胶材料已从最初单一的二氧化硅体系，发展成为一个涵盖无机、有机聚合物、碳、生物基以及多组分杂化材料的庞大家族。各类气凝胶基于其独特的化学组成和微观结构，展现出差异化的性能特征和应用取向。

无机气凝胶，特别是硅基气凝胶，以其极限的隔热性能和最高的比表面积，在高温隔热和催化等领域占据不可替代的地位，但脆性问题始终是其应用拓展的主要障碍。有机聚合物气凝胶通过引入高分子链的柔韧性和可设计性，成功实现了力学性能的突破，并拓展了吸声、导电等功能应用，但其热稳定性和极限导热率仍有提升空间。碳气凝胶作为有机气凝胶的热解产物，继承了多孔结构并赋予了导电性，在电化学储能领域大放异彩。生物基气凝胶的兴起代表了材料科学向绿色、可持续方向发展的必然趋势，其在环境治理和生物医学领域的应用潜力正在被快速挖掘。而多组分杂化气凝胶则代表了材料设计的更高层次，通过纳米尺度的复合实现性能的协同增强，为满足复杂应用场景的多元化需求提供了可能。

展望未来，气凝胶材料的研究将继续沿着以下方向深入发展。可持续化与绿色化是重要趋势，开发生物基和可降解气凝胶，探索低能耗、环保的制备工艺。多功能一体化方向则面向能源、环境、健康等

领域的复杂应用, 开发集隔热、吸附、传感、生物活性等多功能于一体的先进气凝胶材料。结构精准调控将通过合成化学和组装技术的进步, 实现对气凝胶孔结构、骨架形貌和表面化学的原子与分子级精确调控。产业化与应用拓展方面, 在保持性能优势的同时降低制造成本, 推动气凝胶从高端航天应用走向建筑节能、环境治理、柔性电子等更广泛的民用领域。

综上所述, 基于分类视角的气凝胶研究, 不仅有助于厘清不同材料体系的本质特征与优势短板, 更为新型气凝胶的设计与开发提供了清晰的路线图。随着合成化学、材料科学与工程应用的不断交叉融合, 气凝胶这一神奇材料必将迎来更加璀璨的未来。

## 参考文献

- [1] Kistler, S.S. (2002) Coherent Expanded-Aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, **36**, 52-64. <https://doi.org/10.1021/j150331a003>
- [2] Almeida, C.M.R., Ghica, M.E. and Durães, L. (2020) An Overview on Alumina-Silica-Based Aerogels. *Advances in Colloid and Interface Science*, **282**, Article ID: 102189. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102189>
- [3] Maleki, H., Durães, L. and Portugal, A. (2014) An Overview on Silica Aerogels Synthesis and Different Mechanical Reinforcing Strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **385**, 55-74. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017>
- [4] Chen, M., Li, Z., Li, J., Li, J., Li, Q. and Zhang, L. (2017) The Extraction of Uranium Using Graphene Aerogel Loading Organic Solution. *Talanta*, **166**, 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.01.070>
- [5] Hrubesh, L.W. and Pekala, R.W. (1994) Thermal Properties of Organic and Inorganic Aerogels. *Journal of Materials Research*, **9**, 731-738. <https://doi.org/10.1557/jmr.1994.0731>
- [6] Zhang, Y.G., Zhu, Y.J., Xiong, Z.C., Wu, J. and Chen, F. (2018) Bioinspired Ultralight Inorganic Aerogel for Highly Efficient Air Filtration and Oil-Water Separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 13019-13027. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02081>
- [7] Abdullah, Zou, Y., Farooq, S., Walayat, N., Zhang, H., Faieta, M., et al. (2023) Bio-Aerogels: Fabrication, Properties and Food Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **63**, 6687-6709. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2037504>
- [8] Pekala, R.W. and Kong, F.M. (1989) A Synthetic Route to Organic Aerogels—Mechanism, Structure, and Properties. *Le Journal de Physique Colloques*, **24**, C4-33-C4-40. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1989406>
- [9] Veselá, P. and Slovák, V. (2012) Pyrolysis of N-Doped Organic Aerogels with Relation to Sorption Properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **108**, 475-480. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1949-z>
- [10] Hu, E., Zhu, Y., Cheng, X., Liu, Q. and Zhu, M. (2024) Recent Progress on Organic Aerogels for Sound Absorption. *Materials Today Communications*, **39**, Article ID: 109243. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109243>
- [11] Aney, S., Schettler, J., Schwan, M., Milow, B. and Rege, A. (2021) Insights into the Micromechanics of Organic Aerogels Based on Experimental and Modeling Results. *Advanced Engineering Materials*, **24**, Article ID: 2100095. <https://doi.org/10.1002/adem.202100095>
- [12] Wang, X., Zhao, K., Cao, W., Ji, D., Ye, Z., Su, Z., et al. (2024) Polyimide-Coating-on-Aramid Nanofiber Strategy toward Ultralight Organic Aerogels with Multifunctional Properties. *Chemical Engineering Journal*, **499**, Article ID: 155939. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155939>
- [13] Pantazidis, C., Wang, C. and Tomović, Ž. (2024) High-Performance Organic Aerogels Tailored for Versatile Recycling Approaches: Recycling-Reforming-Upeycling. *Small*, **20**, Article ID: 2403931. <https://doi.org/10.1002/sml.202403931>
- [14] Chen, Z., Fu, X., Liu, R., Song, Y. and Yin, X. (2023) Fabrication, Performance, and Potential Applications of Mxene Composite Aerogels. *Nanomaterials*, **13**, Article No. 2048. <https://doi.org/10.3390/nano13142048>
- [15] Parakkulam Ramaswamy, A. and Rigacci, A. (2021) Superinsulating Composite Aerogels from Polymethylsilsesquioxane and Kapok Fibers. *Materials Chemistry and Physics*, **261**, Article ID: 124252. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124252>
- [16] Liu, B., Gao, M., Liu, X., Zhao, X., Zhang, J. and Yi, X. (2019) Thermally Stable Nanoporous ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Hybrid Aerogels for Thermal Insulation. *ACS Applied Nano Materials*, **2**, 7299-7310. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01791>
- [17] Liu, Z., Ran, Y., Xi, J. and Wang, J. (2020) Polymeric Hybrid Aerogels and Their Biomedical Applications. *Soft Matter*, **16**, 9160-9175. <https://doi.org/10.1039/d0sm01261k>
- [18] Tan, M., Wang, J., Song, W., Fang, J. and Zhang, X. (2019) Self-Floating Hybrid Hydrogels Assembled with Conducting Polymer Hollow Spheres and Silica Aerogel Microparticles for Solar Steam Generation. *Journal of Materials Chemistry*

- 
- A*, **7**, 1244-1251. <https://doi.org/10.1039/c8ta10057h>
- [19] Li, T., Du, A., Zhang, T., Ding, W., Liu, M., Shen, J., *et al.* (2018) Efficient Preparation of Crack-Free, Low-Density and Transparent Polymethylsilsesquioxane Aerogels *via* Ambient Pressure Drying and Surface Modification. *RSC Advances*, **8**, 17967-17975. <https://doi.org/10.1039/c8ra03061h>
- [20] Chiappim, W., Awano, C.M., Donatti, D.A., de Vicente, F.S. and Vollet, D.R. (2014) Structure of Hydrophobic Ambient-Pressure-Dried Aerogels Prepared by Sonohydrolysis of Tetraethoxysilane with Additions of *n,n*-Dimethylformamide. *Langmuir*, **30**, 1151-1159. <https://doi.org/10.1021/la403798t>
- [21] Parale, V.G., Kim, T., Phadtare, V.D., Yadav, H.M. and Park, H. (2019) Enhanced Photocatalytic Activity of a Mesoporous TiO<sub>2</sub> Aerogel Decorated onto Three-Dimensional Carbon Foam. *Journal of Molecular Liquids*, **277**, 424-433. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.080>