

doi: 10.3969/j.issn.1004-275X.2020.06.001

气凝胶的研究进展

姜凯, 白臻祖, 黄珊, 郑惟嘉, 柳琰, 王晓燕
(国防科学技术大学 文理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 气凝胶是一种具有低密度、超高孔隙率、高比表面积等优异特性的纳米多孔材料, 由于具有这些独特的性质, 气凝胶材料在航空航天、隔热保温、生物医学、催化、吸附、隔音、电学等领域有着广泛的应用。目前气凝胶发展迅速, 概述了气凝胶的详细制备过程及其在不同领域内的应用。

关键词: 气凝胶; 纳米多孔材料; 制备过程; 应用

中图分类号: TQ427.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-275X(2020)06-001-05

Research Progress of Aerogel

Jiang Kai, Bai Zhenzu, Huang Shan, Zheng Weijia, Liu Long, Wang Xiaoyan

(College of Arts and Sciences, University of National Defense Science and Technology, Hunan Changsha 410073)

Abstract: Aerogel is a nanoporous material with excellent properties such as low density, ultra-high porosity and high specific surface area. Because of these unique properties, aerogel materials have a wide range of applications in aerospace, thermal insulation, biomedicine, catalysis, adsorption, sound insulation, electricity and other fields. At present, aerogel is developing rapidly. This article summarizes the detailed preparation process and its application in different fields of aerogel.

Key words: Aerogels; Nanoporous Materials; Preparation Process; Application.

气凝胶是一种有着极高孔隙率^[1](可达 99.8%)、极高比表面积^[2](可达 2000 m²/g)、丰富孔结构(孔径分布在 1~100 nm)和极低密度^[3](低至 3 mg/cm³)的新型纳米多孔材料。进入 21 世纪后, 气凝胶的发展迎来了井喷期。在这一时期, 许多具有特定功能的新型气凝胶相继涌现, 如过渡金属氧化物气凝胶、单质气凝胶、碳化物气凝胶、生物物质气凝胶等。此外, 对于气凝胶物理性能的改善——这一困扰气凝胶发展和应用的瓶颈问题, 更多有效的方法被提出, 气凝胶的工业化生产机制也日益成熟^[4]。

本文主要介绍气凝胶的制备过程, 并较为系统的综述了气凝胶的应用。

1 气凝胶的制备

气凝胶的制备过程总体上可以分为两步: 第一步是通过溶胶凝胶过程制备凝胶; 第二步是利用一定的干燥方法将凝胶内的液态物质替换为气态, 从而制得气凝胶。

1.1 溶胶-凝胶过程

溶胶-凝胶过程是制备气凝胶最核心的过程, 它直接决定气凝胶的各种微观结构与性质, 溶胶凝胶过程通常是指: 在催化剂的催化作用下, 前驱体发生水解、缩聚反应后形成溶胶, 然后经老化形成凝胶的过程, 如图 1 所示。

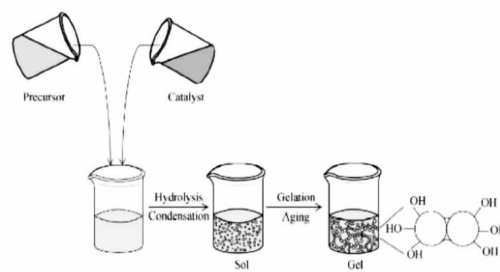


图 1 溶胶-凝胶过程示意图

Fig 1: Schematic diagram of the sol-gel process

溶胶-凝胶过程概括来说包括水解和缩聚两个步骤。

Step 1: 水解, 如图 2 所示。

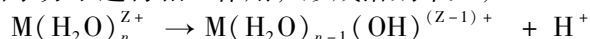


图 2 水解过程示意图

Fig 2 Schematic diagram of the hydrolysis process

前驱体一般为无机盐或金属醇盐, 当其溶于溶剂(一般为水)形成均匀的溶液时, 溶质与溶剂就会相互作用, 发生水解反应。

当前驱体是能电离的金属盐阳离子时, 其能够吸引水分子进行相互作用, 形成溶剂单元,



而对于非电离式分子前驱物, 如金属醇盐, 其水解反应原理与电离前驱物相同, 都是加—OH 基团、去—H 过程,

$M(OR)_n + xH_2O \rightarrow M(OH)_x(OR)_{n-x} + xROH$
反应延续进行, 直至生成 $M(OH)_n$ 。

Step 2: 缩聚, 如图 3 所示。

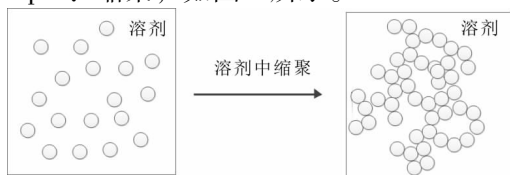
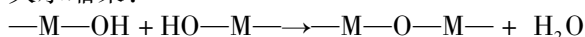


图 3 缩聚过程示意图

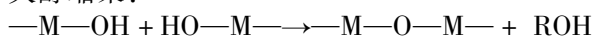
Fig 3 Schematic diagram of polycondensation process

缩聚反应包括以下两种:

失水缩聚:



失醇缩聚:



通过改变催化剂的种类与浓度、前驱体的种类与比例、溶胶凝胶体系的温度等反应参数^[5,6,7], 可达到对凝胶骨架微观结构进行调控的目的, 从而得到所需要的气凝胶结构。材料的物理结构决定材料的性能, 因而可以按照意愿调节溶胶凝胶参数, 制备出具有我们需要的特定功能的气凝胶。气凝胶也因此被认为是一种结构可调控的材料^[8]。

1.2 干燥过程

在凝胶干燥的过程中, 关键是尽量保持凝胶结构的完整性, 避免凝胶的网络结构被气液表面产生的毛细管张力破坏。干燥过程中, 在凝胶内部产生的毛细管张力如图 4 所示。此时的毛细管张力(P)用以下公式进行计算:

$$P = \frac{2\gamma_L \cos\theta}{r} \quad (1)$$

其中, r 为气液之间的界面能, θ 为接触角, γ 为孔洞的半径。

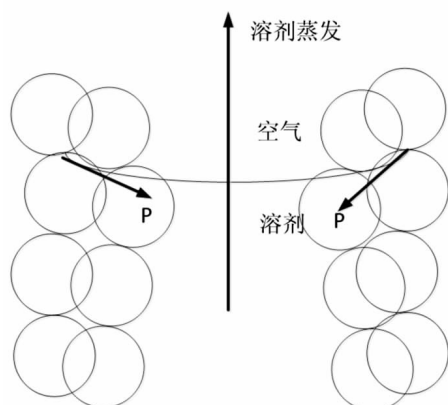


图 4 干燥过程中气液表面张力对凝胶骨架造成的变形

Fig 4: The deformation of the gel skeleton caused by the surface tension of gas and liquid during the drying process

通常制备气凝胶的干燥方法主要分为三类: 超临界干燥、冷冻干燥和常压干燥。

1.2.1 超临界干燥

超临界干燥法最早由 Kistler 提出。它指的是改变温度和压强, 使这两个参数均提升至干燥溶剂的超临界点以上, 以此消除凝胶孔洞内的气液界面,

从而避免干燥过程中凝胶孔洞内气液表面产生的张力对凝胶骨架造成破坏^[9]。在干燥过程中, 改变超临界干燥温度^[10]、选用不同的超临界干燥剂^[11]以及改变超临界流体所维持的时间^[12]等, 调控这些实验参数均会显著影响最终样品的形态和性能。

通常用作超临界干燥的试剂有两种, 一种是以乙醇为代表的有机溶剂, 另一种是液态二氧化碳。在进行有机溶剂选择时, 应该遵循与制备凝胶时所使用的溶剂一致的原则, 这样可以缩短后期的溶剂替换时间^[13]。但使用有机溶剂存在一些无法回避的问题, 如超临界温度及压力较高带来的设备高要求与能源浪费的问题, 以及有机溶剂本身具有可燃性带来的安全隐患问题, 这都严重阻碍了超临界干燥技术的推广与应用。而液态二氧化碳带来了曙光。从表 1 可知, 与有机溶剂相比, 液态二氧化碳作为干燥介质具有更低的超临界温度及压力, 所以使用起来更加安全, 也会使凝胶表面的化学基团相对稳定存在^[14], 同时凝胶骨架在干燥过程中也基本保持不变^[15]。使用一段时间后, 二氧化碳作为干燥介质的弊端逐渐暴露, 二氧化碳超临界干燥存在漫长且较为繁琐的溶剂替换过程, 时间成本较高, 同时还要求被替换的溶剂能够与液态二氧化碳互溶。

表 1 常用溶剂的临界温度和压力

Tab. 1 Critical temperature and pressure of some volents

溶剂	临界温度/℃	临界压力/MPa
甲醇	240	7.9
乙醇	243	6.3
丙酮	235	4.7
2-丙醇	235	4.7
水	374	22.1
二氧化碳	31	7.3

1.2.2 冷冻干燥

冷冻干燥是另一种不存在气液界面的干燥方法, 此方法毛细管压力不起作用^[16]。冷冻干燥中最好使用真空冷冻干燥^[17], 它将冷冻技术和真空技术进行结合, 采用体积膨胀率低其升华压强高的物质作溶剂, 再将温度降到湿凝胶中溶剂的固化温度, 把溶剂固化成固态, 然后采用负压的方法将溶剂升华, 以此达到排除分散介质作用的一种干燥脱水技术。

这种干燥技术虽然避免了来自溶剂的毛细管张力, 但因为固体升华较慢, 同时需要真空较为苛刻的条件, 因此产品尺寸和生产效率也存在较大的局限性。值得一提的是, 真空冷冻干燥解决了粒子团聚的问题。

1.2.3 常压干燥

如图 5 所示, 和超临界干燥相比, 常压干燥首先需要面对的问题就是如何克服毛细管压力作用导致的凝胶骨架坍塌, 通常在常压干燥之前先进行溶

剂替换的预操作, 即将凝胶内的溶剂替换为表面张力较小的试剂, 同时对凝胶表面进行疏水修饰处理^[18], 把活性基团转变为惰性基团, 以减小产生的毛细管张力。经过预操作后进行干燥。对比三种干燥方法, 常压干燥是其中操作最简单、使用最经济的方法。

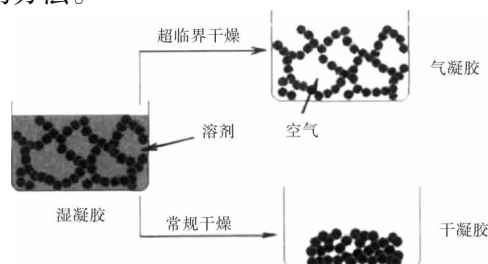


图 5 超临界干燥与常规干燥

Fig 5: Supercritical drying and conventional drying

现阶段, 干燥效果最好的是超临界干燥, 此方法制备的气凝胶网络结构最好, 体积收缩也最小。但超临界干燥的设备十分昂贵, 操作复杂且危险性大, 所以现在的学者将注意力转移到常温干燥和冷冻干燥上。

2 气凝胶的应用

气凝胶是一种纳米微孔级材料, 其密度非常低, 孔隙率非常高, 这种特殊的微观结构决定了其特殊的理化性能, 如具有低折射率、低热导率、低声阻抗等, 这是一般固态材料所不具备的。这些特性使其在隔热保温、生物医学、催化领域、吸附领域等(见图 6)有巨大的应用前景。

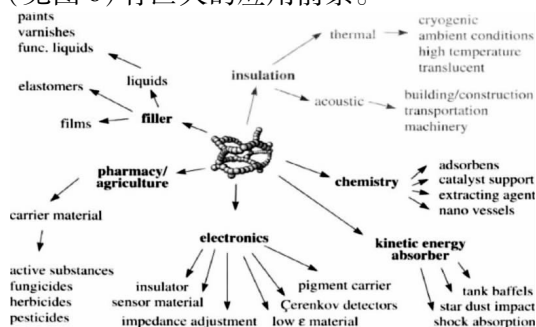


图 6 气凝胶的应用

Fig 3 Application of aerogels

2.1 气凝胶在隔热保温领域的应用

气凝胶产品从导热、对流、辐射三个方面对热量传递进行有效阻拦, 这导致了气凝胶材料导热系数非常低, 是目前已知的隔热、保温能力最优秀的材料^[19]。表 2 中的数据和信息也印证了这个结论, 所以气凝胶在保温领域应用广泛。

随着人类探索区域的逐渐扩大, 许多环境恶劣的区域, 如外太空、两极、高峰、深海、火灾现场等, 其温度远远超出人类所能承受的极限温度范围。如何保温隔热以保证人身安全, 那就不得不提到气凝胶了。

表 2 气凝胶与常见几种保温材料性能对比

Tab. 2 Performance comparison of aerogel and several common insulation materials

保温材料	导热系数 /[W/(m·K)]	温度范围/℃	燃烧等级
气凝胶	0.0136 ~ 0.038	-200 ~ 1400	A
聚异氰酸酯	0.019 ~ 0.022	-185 ~ 140	B1
硬质酚醛	0.019 ~ 0.024	10 ~ 120	B1
聚氨酯	0.020 ~ 0.030	0 ~ 100	B2
发泡聚苯乙烯	0.026 ~ 0.033	室温 ~ 90	B2
岩棉	0.040	0 ~ 600	A

为了寻找制作宇航服的合适材料, NASA 对多孔材料、泡沫材料、相变材料等多种类型进行综合对比。对比项目包括隔热效果、质量、材料柔性、力学强度、厚度等各个方面, 最终发现气凝胶具有很好的综合性能的同时, 兼具更为优异的保温隔热性能^[20]。

此外, 气凝胶在日常生活中(如节能窗、屋面太阳能集热器、保温涂料)^[21]、军事领域中(如飞机上的黑匣子、美洲豹战斗机的机舱隔热层)^[20]等也有广泛的应用。

2.2 气凝胶在吸附领域的应用

气凝胶能对有机物进行有效的吸附^[22]。Srasri 等^[23]以废报纸中提取的纤维素为原料, 在其表面负载四氧化三铁颗粒, 制备了纤维素/四氧化三铁复合气凝胶, 其对刚果红染料吸附效果十分显著。Zhou 等^[24]发现, 疏水二氧化硅气凝胶对水体中 TNT 的吸附率高达 96.5%, 在吸附量上也优于活性炭。

气凝胶还可以用来除去金属离子。现有的去除金属离子的手段有反向渗透、离子交换、蒸发等技术, 与它们相比, 用碳气凝胶进行电吸附除去溶液中的金属离子具有许多无法比拟的优势, 如减少二次污染、可再生、节能等。并且, 随着溶液浓度、电压以及比表面积的增加, 碳气凝胶的吸附容量也会随之增加^[25]。Goel 等^[26]使用碳气凝胶对水溶液中的 Hg^{2+} 进行吸附, 结果发现其吸附率十分接近 100%。同时, 这种气凝胶也能吸附 Cd、Pd、Cu、Ni、Mn、Zn、Cr 等重金属离子。

此外, 氨基改性后的气凝胶可以实现对二氧化碳的选择性化学吸附。Linneen 等^[27,28]通过浸渍法制备了氨基功能化二氧化硅气凝胶, 将四乙烯五胺负载在二氧化硅气凝胶中, 干燥 10% 的二氧化碳, 吸附量高达 3.5mmol/g。

2.3 气凝胶在生物医学领域的应用

气凝胶具有很高孔隙率, 同时选用合适的材料可以让气凝胶具备生物相容性、合适的机械性能、生物可降解性等特性^[29], 这些特性正是气凝胶在体内使用所必须具备的性质。目前气凝胶已应用于可植入医疗器件、非侵入成像、骨接枝和生物传感

等领域^[37]。

Toledo - Fernandez^[30] 的小组将钙硅气凝胶置于模拟体液中，以探究其生物活性。发现其在模拟体液中力学性质与骨骼相匹配，在模拟体液中培养 25 天后，在气凝胶的表面形成了一层均匀的磷灰石层。从而气凝胶在骨组织工程支架方向展现了优异的应用潜力。但也有实验表明^[38]，纳米孔隙为主的气凝胶缺乏大孔，而这恰好是骨生长和血管生长所必需的。同时，作为骨支架材料，其力学强度较弱。以上这两点是气凝胶应用于骨组织工程领域需要重点解决的问题。

Yin 等^[31]发现，大孔二氧化硅气凝胶和血小板具有很好的相容性，不会触发血小板的活化，也没有增强或降低血小板的凝血过程。气凝胶作为一种外来材料，实验中并未见诱发炎症。从而为气凝胶用作血管支架、心脏瓣膜等提供了试验基础。

此外，值得强调的是将气凝胶制备成微球^[36]用于药物缓释^[32-35]，以达到向靶细胞靶向控制释放药物的功能，这具有重要潜在应用价值。

2.4 隔音领域

气凝胶主要通过两个方面对声音起衰减作用。第一是其极大的内表面积，声波一旦传入，就会在气凝胶内表面上进行多次反射，从而消耗一定的能量。第二是其纳米级孔道，它的存在使得空气粘性流动的速度与空气分子的 Knudsen 扩散速度相接近，因而耗掉一部分通过空气传播的声能。另外，对气凝胶的制备材料进行恰当的选择，使用适当的具有频率依赖性的材料，可以达到良好的隔音效果^[39]。综上所述可以看出，气凝胶是十分理想的轻质隔音材料。

2.5 电学领域

碳气凝胶拥有碳材料本身的导电特性，同时还结合了气凝胶材料多孔的结构特性，是目前在电学领域中研究最为广泛的气凝胶材料。

碳气凝胶通常被用于超级电容器^[40]及锂离子电池^[41]电极材料的研究。当碳气凝胶被用于电极材料时，通常需要进行一些活化处理，如二氧化碳活化、氢氧化钾活化等。二氧化碳活化处理可进一步提高碳气凝胶的比表面积^[42]，从而显著提升其作为电极材料的电学及电化学性能^[43]。与二氧化碳活化工艺相比，氢氧化钾活化处理同样可使碳气凝胶的比表面积得到提升，但该过程主要是通过氢氧化钾腐蚀碳气凝胶颗粒表面，从而进一步增加碳气凝胶内的微孔及小介孔数量来实现的^[44]。

在电学领域内，十分值得一提的是电容去离子技术^[45]，这是碳气凝胶的另一个重要应用。如图 7 所示，电容去离子技术应用于海水淡化，可以除去海水中的杂质离子，从而实现海水的淡化。另外，在海水淡化后期，将外接电源正负极对调还可使吸附在碳气凝胶上的阴阳离子脱附，从而实现碳气凝胶的循环利用。

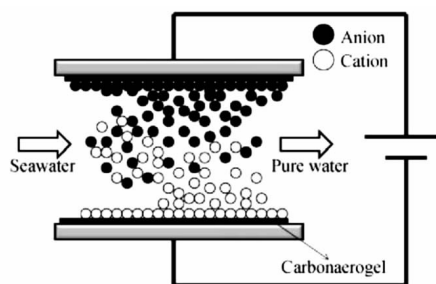


图 7 外接电源的碳气凝胶进行海水淡化

Fig 7 Carbon aerogel with external power supply for seawater desalination

气凝胶拥有极高的孔隙率，这样的物理结构决定其具有超低的介电常数、超高的介电强度、在微波频域内具有很低的介电损耗等优异的介电特性，这些独特的介电特性使气凝胶材料在微电子领域内具有巨大的应用潜能。

随着集成电路工艺逐渐向微型化的方向发展，电路器件的特征尺寸被要求不断减小，这就导致电路内部出现互联延迟、串扰等现象，从而使电路性能降低。使用具有低介电常数的介质材料可以有效解决上述问题。二氧化硅气凝胶就是众多材料中最佳的备选材料^[46]。

独特的介电特性使气凝胶还可以用于微波介质材料。Anna 等利用介电常数低至 1.16 的聚酰亚胺气凝胶作为微带天线的基质材料，对微带天线的性能进行测试。结果表明，与以传统的微波介质材料作为基质的微带天线相比，该微带天线具有更宽的宽带和更高的天线增益^[47]。

3 总结与展望

该文就气凝胶的制备过程及在不同领域的应用进行了较为系统的阐述，让读者对气凝胶有较为全面的把握。近年来，气凝胶凭借其独特的微观结构和以此带来的独特理化性质，应用的形式变得多样化，有纤维、微球气凝胶等，新的应用方向逐渐被探索出来，如轨道交通等，应用的领域也变得多元化，其中应用最好的是保温领域，其他领域现在也在迅猛发展，气凝胶具有十分光明的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang X, Liu L, Wang X, et al. Preparation and performances of carbon aerogel microspheres for the application of supercapacitor[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2011, 15(4): 643 - 648.
- [2] Hrubesh L W, Coronado P R, Satcher J H. Solvent removal from water with hydrophobic aerogels. J Non - Cryst Solids 285(1 - 3): 328 - 332[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2001, 285(1 - 3): 328 - 332.
- [3] Nicola Hüsing, Schubert U. Aerogels - Airy Materials; Chemistry, Structure, and Properties[J]. 1998, 37(1 - 2): 22 - 45.
- [4] 张泽, 王晓栋, 吴宇, 等. 气凝胶材料及其应用[J]. 硅酸盐学报, 2018(10).
- [5] Bedilo A F, Klabunde K J. Synthesis of high surface area zirconia aerogels using high temperature supercritical drying[J]. Nanostructured Materials, 1997, 8(2): 0 - 135.
- [6] Mrowiec Białoń, J, Pajak, L. Preparation effects on zirconia aerogel

- morphology[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 1998, 225(1): 115–119.
- [7] St Kker C, Baiker A. Zirconia aerogels; effect of acid-to-alkoxide ratio, alcoholic solvent and supercritical drying method on structural properties[J]. 1998, 223(3): 0–178.
- [8] 沈军, 王珏, 吴翔. 气凝胶——一种结构可控的新型功能材料[J]. 材料科学与工程, 1994(3): 1–5.
- [9] Kistler S S. Coherent Expanded-Aerogels[J]. Journal of Physical Chemistry, 1931, 36(1): 52–64.
- [10] Tajiri K, Igarashi K, Nishio T. Effects of supercritical drying media on structure and properties of silica aerogel[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 1995, 186(none): 0–87.
- [11] Brodsky C J, Ko E I. Effect of supercritical drying temperature on the properties of zirconia, niobia and titania-silica aerogels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 186(none): 0–95.
- [12] Mizushima Y, Hori M. Preparation of heat-resistant alumina aerogels[J]. Journal of Materials Research, 1993, 8(11): 2993–2999.
- [13] Liang C, Sha G, Guo S. Resorcinol-Formaldehyde Aerogels Prepared by Supercritical Acetone Drying[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2000, 271(1–2): 167–170.
- [14] Nicola Hüsing, Schwertfeger F, Tappert W, et al. Influence of supercritical drying fluid on structure and properties of organically modified silica aerogels[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 1995, 186(none): 0–43.
- [15] None. High-temperature and low-temperature supercritical drying of aerogels-structural investigations with SAXS[J]. Journal of Applied Crystallography, 1991, 24(5).
- [16] Versatile Aerogel Fabrication by Freezing and Subsequent Freeze-Drying of Colloidal Nanoparticle Solutions[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(3): 1200–1203.
- [17] Wang B, Li Q. Drying technology of gas gel preparation[J]. Drying Technonly&Equipment. 2013, 11(4): 18–26.
- [18] Xiao qing W, Xingyuan N, Guoqing Z, et al. Effect of Surface Modification Agents on Hydrophobic, Elastic and Thermal Property of Silica Aerogels Derived from Ambient Condition[J]. rare metal materials and engineering, 2012.
- [19] 王振宇, 王世伟, 郑权, 等. 气凝胶应用领域研究进展[C]//全国绝热节能材料行业创新与发展论坛.
- [20] 赵敏. 气凝胶在保暖服装上应用及进展研究[J]. 现代商贸工业, 2019, 040(018): 191–193.
- [21] 矫昕潼. 土木工程新型保温隔热材料的应用——以纳米气凝胶保温隔热材料为例[J]. 科技风, 2019.
- [22] 沈晓冬, 吴晓栋, 孔勇, 等. 气凝胶纳米材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(09): 31–40+52.
- [23] Srasri K, Thongroj M, Chaijiraaree P, et al. Recovery potential of cellulose fiber from newspaper waste: An approach on magnetic cellulose aerogel for dye adsorption material[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018; S0141813018318518–.
- [24] Zhou S, Cui J, Ye F, et al. New smoothing SVM algorithm with tight error bound and efficient reduced techniques[J]. Computational Optimization & Applications, 2013, 56(3): 599–617.
- [25] Ying T Y, Yang K L, Yiaccoumi S, et al. Electrosorption of Ions from Aqueous Solutions by Nanostructured Carbon Aerogel[J]. j colloid interface sci, 2002, 250(1): 18–27.
- [26] Goel J, Kadirvelu K, Rajagopal C, et al. Removal of mercury (II) from aqueous solution by adsorption on carbon aerogel: Response surface methodological approach[J]. carbon, 2005, 43(1): 197–200.
- [27] Linneen N, Pfeffer R, Lin Y S. CO₂ capture using particulate silica aerogel immobilized with tetraethylenepentamine[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2013, 176(Complete): 123–131.
- [28] Linneen N N, Pfeffer R, Lin Y S. Amine Distribution and Carbon Dioxide Sorption Performance of Amine Coated Silica Aerogel Sorbents; Effect of Synthesis Methods. [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(41): 14671–14679.
- [29] 乐弦, 章婷, 贾欢欢, 等. 气凝胶材料的发展趋势与应用前景[J]. 工程研究, 2017, 009(006): 558–567.
- [30] Jose Antonio Toledo-Fernández, Mendoza-Serna R, Morales V, et al. Bioactivity of wollastonite/aerogels composites obtained from a TEOS-MTES matrix[J]. journal of materials science materials in medicine, 2008, 19(5): 2207–2213.
- [31] Wei, Yin, Subramaniam, 等. Biocompatibility of surfactant-templated polyurea-nanoencapsulated macroporous silica aerogels with plasma platelets and endothelial cells[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2010.
- [32] Hentzschel C M, Alnaief M, Smirnova I, et al. Enhancement of griseofulvin release from liquisolid compacts[J]. european journal of pharmaceutics & biopharmaceutics, 2012, 80(1): 0–135.
- [33] Mesochanneled Hierarchically Porous Aluminosiloxane Aerogel Microspheres as a Stable Support for pH-Responsive Controlled Drug Release[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(17).
- [34] García-González, C. A, Jin M, Gerth J, et al. Polysaccharide-based aerogel microspheres for oral drug delivery[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 797–806.
- [35] Kumar Rajanna S, Vinjamur M, Mukhopadhyay M. Mechanism for formation of Hollow and Granular Silica Aerogel Microspheres from rice husk ash for drug delivery[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2015, 429: 226–231.
- [36] Granular Silica Aerogel Microspheres from rice husk ash for drug delivery[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2015, 429: 226–231.
- [37] 黎白钰, 李响. 气凝胶的制备与应用[J]. 广东化工, 2018, 045(007): 135–138.
- [38] Hajar, Maleki, Luisa, 等. Synthesis and biomedical applications of aerogels: Possibilities and challenges[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2016.
- [39] Malakooti S, Churu H G, Lee A, et al. Sound insulation properties in low-density, mechanically strong and ductile nanoporous polyurea aerogels[J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2017, 476.
- [40] 李亚捷, 倪星元, 沈军, 等. 聚吡咯/硝酸活化碳气凝胶纳米复合材料的制备表征及其在超级电容器中的应用[J]. 物理化学学报, 2016(2期): 493–502.
- [41] Liu N, Shen J, Liu D. A Fe₂O₃ nanoparticle/carbon aerogel composite for use as an anode material for lithium ion batteries[J]. Electrochimica Acta, 2013, 97(5): 271–277.
- [42] HOU Jinqiang, SHEN Jun, XUE Hui, 等. Preparation of High Specific Surface Area Carbon Aerogels via CO₂ Activation 二氧化碳活化法制备高比表面积碳气凝胶[J]. 过程工程学报, 2005, 5(6): 651–653.
- [43] Liu N, Shen J, Liu D. Activated high specific surface area carbon aerogels for EDLCs[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2013, 167: 176–181.
- [44] 刘冬, 沈军, 李亚捷, 等. 碳气凝胶的孔结构及其对电化学超级电容器性能的影响[J]. 物理化学学报, 2012, 28(4): 843–849.
- [45] 秦仁喜, 沈军, 薛辉, 等. 碳气凝胶电极用于NaCl溶液电容性除盐的研究[J]. 水处理技术, 2005, 31(4): 53–55.
- [46] Hrubesh L W. Silica Aerogel: An Intrinsically Low Dielectric Constant Material[J]. Mrs Online Proceeding Library Archive, 1995, 381.
- [47] Meador M A B, Wright S, Sandberg A, et al. Low Dielectric Polyimide Aerogels As Substrates for Lightweight Patch Antennas[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(11): 6346–6353.

收稿日期: 2020-05-16

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ3598)

作者简介: 姜凯(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事成骨支架材料方面的研究。