

二氧化硅气凝胶的制备工艺与应用

陈宇卓, 欧忠文, 刘朝辉, 郭瞳, 邓伟, 向玩凤

(后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

摘 要: 三维纳米孔隙结构的二氧化硅气凝胶具有孔隙率高、密度低、比表面积大等基本特征, 这些优异的特性使二氧化硅气凝胶在许多领域得到广泛研究和应用。二氧化硅气凝胶一般通过溶胶-凝胶过程、老化、干燥处理得到。主要总结了二氧化硅气凝胶的制备过程及机理, 介绍二氧化硅气凝胶的相关领域的应用, 并对二氧化硅气凝胶材料的发展前景进行了展望。

关 键 词: 二氧化硅气凝胶; 溶胶-凝胶; 干燥; 应用

中图分类号: TQ 127.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-0460 (2017) 10-2009-05

Preparation and Application of Silica Aerogels

CHEN Yu-zhuo, OU Zhong-wen, LIU Zhao-hui, GUO Tong, DENG Wei, XIANG Wan-feng

(Department of Chemistry & Material Engineering, Logistics Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: Silica aerogels with three-dimensional nano-porous structure have the characteristics of high porosity, low density and large specific surface area. Due to these exceptional properties, silica aerogels have been deeply studied and applied in diverse fields. Silica aerogels are obtained through sol-gel, aging and drying process. In this paper, the preparation process and mechanism of silica aerogels were mainly summarized, and application of silica aerogels was introduced. In addition, the development prospect of silica aerogels was discussed.

Key words: Silica aerogels; Sol-gel; Drying; Application

二氧化硅气凝胶是一种轻质多孔的无机非金属材料, 是二氧化硅粒子构建而成, 具有三维纳米网络结构, 孔隙率在 80%~99.8%, 孔隙尺寸在 10~100 nm, 属于介孔结构, 制备得到的气凝胶密度最低为 0.003 g/cm³[1,2]。二氧化硅气凝胶主要是通过溶胶-凝胶法制备, 制备工艺技术较为成熟。随着对二氧化硅气凝胶的进一步研究和功能化探索, 二氧化硅气凝胶独有的优异特性使其在保温隔热、催化载体、吸附清洁、生物医学等领域具有广阔的应用前景。

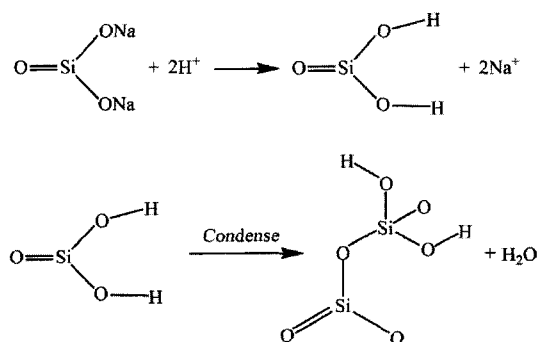
1 二氧化硅气凝胶的制备

1.1 溶胶-凝胶法

1.1.1 水玻璃为前驱体

1931 年, 美国斯坦福大学的 Kister 首次用无机硅原料——水玻璃, 制备得到二氧化硅气凝胶。目前, 利用无机硅化合物制备二氧化硅气凝胶, 一般选用工业上廉价的水玻璃作为前驱体, 经过一步溶胶-凝胶法制备得到凝胶: 向水玻璃中加酸溶液使其直接凝胶化, 或是将水玻璃经过阳离子交换树脂后制得硅酸溶胶。这个过程中主要是在酸性条件下

生成硅酸, 再经过调节 pH 使硅酸通过硅羟基间的缩聚, 生成由硅氧键 (Si-O-Si) 构建的初级颗粒, 然后经过初级粒子之间硅氧键聚合为次级粒子, 最终以珍珠链的形态链接在一起, 相互交联构成了二氧化硅气凝胶的纳米孔隙结构[3,4]。



利用水玻璃为前驱体制备二氧化硅气凝胶成本低, 原材料来源广泛, 可选用粘土、高岭土等土矿材料, 也可用工业副产品、废料作为硅源, 例如稻壳灰、工业硅粉、高炉粉煤灰、废炉渣等, 适合工业化大规模生产。刘光武^[4]直接以水玻璃为硅源, 通过盐酸和六甲基二硅醚混合溶液进行表面改性处

基金项目: 全军后勤科研计划项目 (BY115C007)。

收稿日期: 2017-03-05

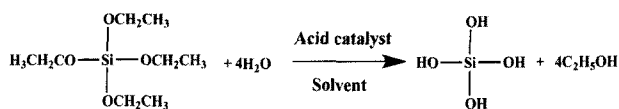
作者简介: 陈宇卓 (1992-), 男, 吉林省吉林市人, 硕士。E-mail: ChenYZL@foxmail.com。

理,制备出疏水的二氧化硅气凝胶,热导率仅为 $0.026 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。王蕾^[5]利用高铝粉煤灰制备了二氧化硅气凝胶,在高活性粉煤灰制备水玻璃过程中,通过调节 pH 对粉煤灰中 Al、Fe 等元素进行除杂,将 Al 元素以沉淀方式分离,最终获得隔热性能优良的气凝胶材料。

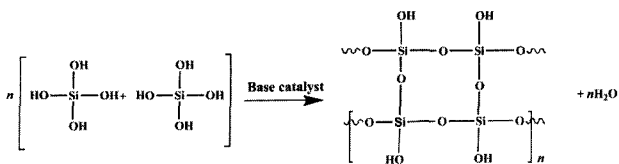
1.1.2 硅醇盐为前驱体

近年来,关于二氧化硅气凝胶的制备研究大多选用硅醇盐作为前驱体,如正硅酸甲酯(TMOS, $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$)、正硅酸乙酯(TEOS, $\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4$)等,化学结构式可表示为 $\text{Si}(\text{OR})_4$ 。此外,还有一些带有有机官能团的硅醇盐,化学结构式可表示成 $\text{R}_x\text{Si}(\text{OR})_{4-x}$ ($1 \leq x \leq 3$),用该类硅醇盐作为前驱体可制备出柔性二氧化硅气凝胶,具有更好的力学性能和疏水性能^[6]。利用硅醇盐制备二氧化硅气凝胶可以避免无机盐的生成,制得的材料性能较好。

选用易水解的硅醇盐作为前驱体时,需在适当的溶剂中均匀混合,前驱体的水解和缩合反应同时进行,调节溶液中 pH 值可使前驱体水解和聚合的平衡发生移动。在酸性条件下($\text{pH}=2\sim 5$),水解反应速率增大,前驱体向水解反应进行生成硅酸^[7]:



之后,生成的 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 单体在碱性条件下发生缩聚反应:



最终生成由硅氧键($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$)构建而成纳米网络结构的二氧化硅气凝胶。二氧化硅气凝胶网络孔隙结构取决于前驱体的水解和缩聚反应程度。Rao^[8]研究了溶胶-凝胶法酸碱两步法中的前驱体和催化剂配比,酸碱催化剂分别为 0.001 mol/L 的草酸溶液, 1 mol/L 的氨水溶液。结果表明当 $\text{TEOS} : \text{EtOH} : \text{H}_2\text{O}$ (草酸) : H_2O (氨水) 比例为: $1 : 6.9 : 3.5 : 2.2$, 时,制备的二氧化硅气凝胶密度降低到 0.11 g/cm^3 ; Z.T Mazraeh-shahi 等^[9]研究了二氧化硅气凝胶制备工艺对其孔隙结构的影响,发现温度是影响孔隙尺寸大小、尺寸分布的最大因素。

在较高温度条件下会加快硅醇盐水解和缩聚反应,生成较多的介孔结构,降低毛细管力,获得更高的孔隙率。

1.2 凝胶的老化

凝胶老化是不均匀凝胶粒子的溶解和再次缩聚的过程。在二氧化硅气凝胶溶胶-凝胶过程中,二氧化硅次级粒子间链接键较少,只有少数硅氧键将次级粒子连接在一起。经过凝胶颗粒的溶解和再次缩聚,可以增加次级粒子间的链接,同时获得更大的团聚粒子,达到增强气凝胶骨架的效果。

凝胶老化一般是将凝胶浸泡在原始溶胶的醇/水混合物中。研究证明,延长老化时间、提升过程温度,可使凝胶老化更完全,凝胶骨架强度增强^[10]。选择合适的老化介质,也会使气凝胶孔隙分布更均匀,改善孔隙结构^[11];适当增加老化介质的碱性会使孔隙变大,使二氧化硅气凝胶收缩率降到最低^[12]。

1.3 干燥处理技术

二氧化硅气凝胶的制备过程中,干燥处理十分重要。这个过程要将二氧化硅气凝胶孔隙中的溶剂除掉,同时要保证孔隙结构不受毛细管力破坏,保持结构孔隙结构的完整性。

1.3.1 超临界干燥

超临界干燥法的原理是:当液体温度和所受压力超过其当前物理的超临界值时,在二氧化硅气凝胶孔洞中的溶剂液体可直接转化为无气液相区的液体,无需经过气液相转化的物理过程,使产生表面张力降低。当超临界状态的溶剂从凝胶骨架中排出时,无毛细管力产生^[13,14]。超临界干燥过程如图 1 所示。首先通过加温加压将溶剂转变为超临界状态(T_c, P_c)以上,然后在大于临界温度的情况下减压、降温使其从超临界流体状态转变为气相。

表面张力降低。当超临界状态的溶剂从凝胶骨架中排出时,无毛细管力产生^[13,14]。超临界干燥过程如图 1 所示。首先通过加温加压将溶剂转变为超临界状态(T_c, P_c)以上,然后在大于临界温度的情况下减压、降温使其从超临界流体状态转变为气相。

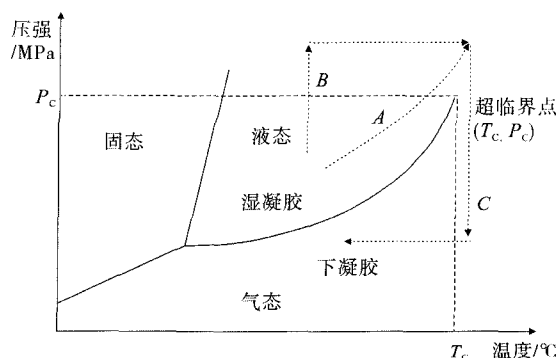


图 1 超临界干燥原理

Fig.1 The principle of supercritical drying

常用的超临界干燥介质如表 1 所示^[15]。超临界

干燥法一般包括超临界有机溶剂干燥、低温超临界 CO_2 干燥、低温超临界 CO_2 萃取干燥、高温快速超临界干燥^[16]。超临界干燥法制备出的气凝胶性能优良,相比其他干燥方法制备的气凝胶具有更大的表面活化能,热稳定性更好^[17]。但由于超临界干燥加压升温条件要求高,设备成本昂贵,干燥工艺条件控制要求复杂苛刻,无法工业化应用。

表1 超临界干燥介质超临界参数

Table 1 Drying medium parameters in supercritical state

干燥介质	沸点/℃	T_c /℃	P_c /MPa	$\rho_c/(g \cdot cm^{-3})$
甲醇	64.6	240	7.9	0.272
乙醇	78.3	243	6.3	0.276
丙酮	56.5	235	4.7	0.273
异丙醇	82.2	235.1	4.76	0.273
水	100.0	374	22.1	0.322
二氧化碳	-78.5	31	7.3	0.468
氮气	-195.8	37	7.3	0.236

1.3.2 常压干燥

相比于超临界干燥技术,常压干燥方法工艺简单、设备成本低,在生产气凝胶方面具有更广阔的前景。常压干燥法是选用一种低表面张力的溶剂浸润二氧化硅气凝胶,并通过表面改性使气凝胶表面呈现疏水性,在干燥过程中溶剂挥发时产生较低的毛细管力,不破坏气凝胶的网络孔隙,对其收缩影响降到最低,最终达到干燥的效果^[18]。

常压干燥过程中溶剂蒸发会产生毛细管力,若直接对湿凝胶进行干燥,会造成骨架坍塌,减小孔隙尺寸,增大气凝胶的密度,影响隔热性能^[19-20]。这是因为在二氧化硅湿凝胶骨架表面分布大量羟基($-\text{OH}$),毛细管力会使气凝胶表面相邻的羟基发生键和,羟基与硅氧基($\text{Si}-\text{O}$)之间也会发生缩聚^[21,22]。由于气凝胶中存在不同尺寸的孔隙,在干燥过程也会出现 100~200 MPa 的毛细管力差^[1],造成二氧化硅气凝胶骨架应力破坏。

减小毛细管压力产生的影响,一是降低毛细管力。在溶胶-凝胶法制备过程中,常用表面张力较低的溶剂替换出凝胶孔隙中的水溶剂,可以减小干燥过程中产生的毛细压力。常压干燥介质已在表2列出。也可添加过程控制化学添加剂,如甲酰胺、乙酰胺、二甲基甲酰胺、甘油等,调节水解和聚合反应速率,缩短胶凝时间,改善孔隙分布的均匀性^[23,24]。;二是增强二氧化硅气凝胶网络的骨架强度,来抵抗毛细管压力作用。对二氧化硅气凝胶进行力学性能增强改性也成为目前研究的热点;三是对凝胶表面进行疏水改性,减少表面羟基数量。在常压干燥制备二氧化硅气凝胶时,常用三甲基氯硅烷

(TMCS)/正己烷溶液作为表面改性剂,改性原理如图2所示。经适量配比的表面改性剂改性后,二氧化硅气凝胶表面可呈现超疏水性,孔隙结构保持完整。

表2 常用溶剂表面张力

Table 2 Surface tension of several solvents (20 °C)

溶剂	己烷	异丙酮	丙酮	乙醇	水
表面张力 $\gamma/(10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	18.4	21.7	23.7	22.3	72.8

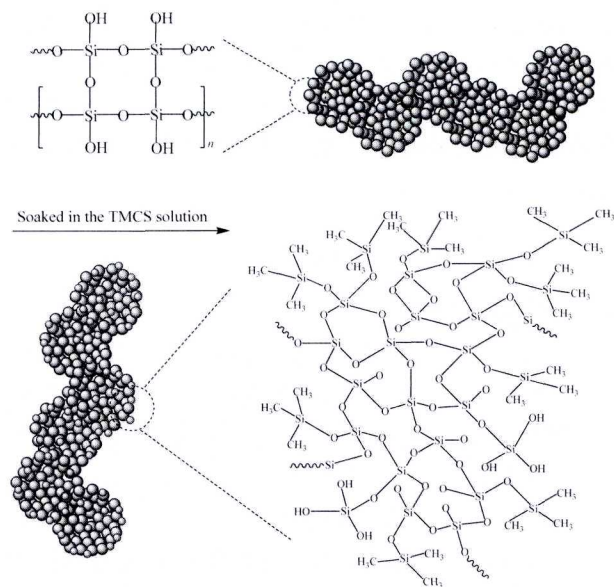


图2 三甲基氯硅烷 (TMCS)

对二氧化硅气凝胶表面疏水改性原理

Fig.2 Hydrophobic modification of silica aerogels by trimethylchlorosilane (TMCS)

在常压干燥时,溶剂交换过程以及在常温下干燥时间过长,有学者研究通过调节干燥温度或煅烧的方式来缩短制备时间。Jin Wang等^[25]通过提高常压干燥时温度将气凝胶制备过程缩短为2 h,他们将硅溶胶进行正常缩聚、改性处理和老化后,先在 180 °C 下干燥 30 min,然后在 350 °C 进行煅烧,最终得到的二氧化硅气凝胶疏水性、隔热性能优异。研究发现,提高常压干燥时的温度可增大气凝胶的孔隙数目,改善孔隙尺寸分布,对提高气凝胶热学性能有重要作用。一般的常压干燥加热方法是采用表面加热的方式,热量传递与溶剂扩散的方向相反,干燥速度缓慢,会使造成二氧化硅气凝胶网络粒子发生团聚。通过微波加热对传统加热方式进行改良,使传热过程更均匀,速度更快。高桂梅等^[26]用微波加热方式对水玻璃制成的二氧化硅气凝胶进行干燥,快速制备了性能较好的二氧化硅气凝胶,减少了二氧化硅颗粒之间的团聚。对比烘箱干燥和热风干燥,微波加热干燥的二氧化硅气凝胶性能更佳,

疏水性更好。

1.3.3 真空冷冻干燥

真空冷冻干燥技术是将湿物料置于低温条件下 ($-10\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), 先将溶剂冻结, 然后在真空条件下 ($1.3\sim13\text{ Pa}$) 逐渐升温使溶剂升华, 最终使物料脱水。真空冷冻干燥技术将溶剂直接从固态转化为气态, 避免了生成液相过程产生的毛细管力作用。在冷冻过程中, 溶剂在二氧化硅气凝胶孔隙内会凝结成晶体, 并发生晶体膨胀, 导致凝胶骨架材料破碎, 破坏了二氧化硅气凝胶纳米孔隙结构^[27], 因此利用真空冷冻干燥方法对二氧化硅气凝胶的骨架强度有很高的要求。在选取溶剂时, 应选用低体积膨胀系数的溶液来改善, 也可以利用液氮进行快速降温减少晶体体积膨胀。

2 二氧化硅气凝胶的应用

2.1 保温隔热材料

二氧化硅气凝胶导热系数极低, 仅在 $0.02\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 左右, 被认为是一种超级绝热材料。目前所有的纳米孔绝热材料都选用二氧化硅气凝胶作为纳米孔的载体^[28]。二氧化硅气凝胶现已广泛应用在航空航天、工业保温、建筑材料、食品包装等领域。1997年, 美国宇航局首次将气凝胶作为隔热材料应用在火星探测器中^[29]。随后, 美国宇航局开发了柔性纤维加固二氧化硅气凝胶合成织物作为航天服^[30]。在建筑材料领域, 采用二氧化硅气凝胶设计的透明玻璃墙体可以有效积累太阳能并且有保温的功效^[31], 掺入二氧化硅气凝胶颗粒的砂浆也具有良好的隔热效果^[32]。

二氧化硅气凝胶优异的隔热特性主要取决于其介孔结构, 孔隙尺寸小于或相当于空气自由分子的自由程 (69 nm)。其独特的三维孔隙结构也增加了固相传导路径的复杂性^[33,34]。在高温阶段, 二氧化硅气凝胶的辐射传热能力决定了它的导热性能。但二氧化硅气凝胶在高温下对波长在 $3\sim8\text{ }\mu\text{m}$ 的近红外辐射近乎透明, 导致热导率在高温时升高。所以在制备高隔热性能的二氧化硅气凝胶时, 可加入遮光剂, 如 SiC 、 ZrO_2 等和炭黑等, 能有效提高材料的消光系数, 优化气凝胶的光学特性, 保证其保温隔热性能^[35,36]。

2.2 载体材料

二氧化硅气凝胶孔隙率高、比表面积大, 生物相容性良好, 是一种新型的催化剂、吸附剂、药物载体材料。功能性复合二氧化硅气凝胶一般通过浸泡法、原位合成法、气相沉积法制备得到。A.V Rao

等^[37]利用甲基三甲氧基硅烷 (MTMS) 制备出的弹性二氧化硅气凝胶, 可以对废水中的烷烃、芳香化合物有效的吸附, 其吸附的功能性要好于活性炭、人工合成材料。将药物附着在二氧化硅气凝胶的纳米孔道上可以进行长效地释放, 实现药物的缓释、速释及靶向传递^[38]。曾森等^[39]将二氧化硅气凝胶浸渍在硫酸庆大霉素溶液中, 利用紫光-可见分光光度计测试得到了药物释放浓度与吸光度的线性关系, 证实了常压干燥制备出二氧化硅气凝胶作为载体的可行性。

2.3 光学材料

二氧化硅气凝胶具有极高的孔隙率, 这使它经过适当改性后可制备成高透性的薄膜或分散体。并且经过表面改性的二氧化硅气凝胶具有超疏水特性, 可应用在自清洁表面。利用二氧化硅气凝胶制成的玻璃耐热阻燃、防辐射, 吸音效果好^[31], 具有广阔的应用前景。

2.4 生物材料

二氧化硅气凝胶在生物医学材料领域也成为研究热点。二氧化硅气凝胶良好的生物相容性使其在人体组织工程材料、生物医用植入材料、生物医学成像技术和生物传感器等方面广泛研究和应用^[40]。经强度改性、孔隙改良后的二氧化硅气凝胶被应用于骨组织修复支架材料, 对于人体骨组织修复、血管生长有良好的促进作用。利用二氧化硅气凝胶三维多孔结构可以模拟人体器官结构, 评估某些生物医学成像技术^[41]。此外, 二氧化硅气凝胶制成的固定载体生物传感器, 具有高吸附性、强采集效率, 可实现不同生物组织的固定^[42]。关于二氧化硅气凝胶在生物材料方面的应用, 国内报告较少, 具有很广的研究开发空间, 需要对其孔隙结构、表面活性等物理化学性能进行更多的研究, 设计制造出更多有使用价值的生物材料。

3 总结与展望

近年来关于二氧化硅气凝胶材料的研究已取得较大的进展。目前关于二氧化硅气凝胶的制备研究主要偏重于以硅醇盐为前驱体, 通过溶胶-凝胶法制备, 原材料成本高, 制备过程还有待进一步优化, 需要对凝胶的胶凝和老化过程进行更多的过程控制因素研究。以矿物质或水玻璃为原料制备二氧化硅可降低生产成本, 但制备得到的气凝胶材料性能较差, 还需更多的深入研究。二氧化硅气凝胶凭借着其独特的性质, 正逐渐向人们的生活和生产当中。对于二氧化硅气凝胶功能性材料的开发, 仍需要更

多针对性的改性设计,更加契合人类需求,使二氧化硅气凝胶真正地得到普及应用。

参考文献:

- [1] Maleki H, Durães L, Portugal A. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2014, 385(2): 55-74.
- [2] 封金鹏,冯霞,黄强. 纳米孔超绝热材料研究现状及进展[J]. *宇宙航空材料*, 2014, 44(1): 24-36.
- [3] Maleki H, Durães L, García-González C A, et al. Synthesis and biomedical applications of aerogels: Possibilities and challenges[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2016, 236:1-27.
- [4] 刘光武,周斌,倪星元,等. 水玻璃为源的超疏水型 SiO_2 气凝胶块体制备与表征[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(1): 160-165.
- [5] 王蕾. 利用高铝粉煤灰制备氧化硅气凝胶的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [6] 杨凯,庞佳伟,吴伯荣,等. 二氧化硅气凝胶改性方法及研究进展[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(9): 833-836.
- [7] 张志华,王文琴,祖国庆,等. SiO_2 气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(1): 87-96.
- [8] A. Venkateswara Rao, Sharad D. Bhagat. Synthesis and physical properties of TEOS-based silica aerogels prepared by two step (acid-base) sol-gel process[J]. *Solid State Sciences*, 2006, 6: 945-952.
- [9] Zahra Talebi Mazraeh-shahi, Ahmad Mousavi Shoushtari, Majid Abdouss, et al. Relationship analysis of processing parameters with micro and macro structure of silica aerogel dried at ambient pressure[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 376 (2013): 30-37.
- [10] Hosseinali Omranpour, Siamak Motahari. Effects of processing conditions on silica aerogel during aging: Role of solvent, time and temperature [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 379 (2013): 7-11.
- [11] 卢斌,孙俊艳,宋森,等. 老化介质对常压干燥制备 TiO_2 气凝胶性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31(5): 1106-1111.
- [12] Juncal Estella, Jesús C. Echeverría, Mariano Laguna, et al. Effects of aging and drying conditions on the structural and textural properties of silica gels[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2007, 102 (2007): 274-282.
- [13] 胡惠康,甘礼华,李光明,等. 超临界干燥技术[J]. *实验室研究与探索*, 2000, 2: 33-35.
- [14] 王宝和,于才渊,王喜忠. 纳米多孔材料的超临界干燥技术[J]. *化学工程*, 2005, 33(2): 13-18.
- [15] 陈一民. 金属/二氧化硅复合气凝胶和低成本疏水二氧化硅气凝胶的研究[D]. 长沙: 国防技术大学, 2005.
- [16] Juncal Estella, Jesús C. Echeverría, Mariano Laguna, et al. Effects of aging and drying conditions on the structural and textural properties of silica gels[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2007, 102 (2007): 274-282.
- [17] Zhi Li, Xudong Cheng, Long Shi, et al. Flammability and oxidation kinetics of hydrophobic silica aerogels[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 320 (2016): 350-358.
- [18] 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.
- [19] 史非. 常压干燥制备 SiO_2 气凝胶及其结构、性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [20] Cai L, Shan G R. Elastic silica aerogel using methyltrimethoxysilane precursor via ambient pressure drying [J]. *Journal of Porous Material*, 2015, 22 (6): 1455-1463.
- [21] 祖国庆,沈军,邹丽萍,等. 弹性气凝胶的制备及其力学、热学性能研究[J]. *无机材料学报*, 2014, 29(4): 417-422.
- [22] A. Soleimani Dorcheh, M.H. Abbasi. Silica aerogel: synthesis, properties and characterization[J]. *Journal of material process Technology*. 2008, 199 (2008): 10-26.
- [23] 徐莉. 用溶胶-凝胶法制备大片干燥过程中干燥控制化学添加剂的作用[J]. *大连轻工业学院学报*, 1992, 11(3): 192-199.
- [24] 林高用,张栋,卢斌. 非超临界干燥法制备块状 SiO_2 气凝胶[J]. *中南大学学报*, 2006, 7(6): 1117-1121.
- [25] Jin Wang, Yulu Zhang, Yong Wei, et al. Fast and one-pot synthesis of silica aerogels via a quasi-solvent-exchange-free ambient pressure drying process[J]. *Journal of cent*, 2015, 218: 192-198.
- [26] 高桂梅. 油页岩灰渣制备纳米 SiO_2 和气凝胶的方法研究[D]. 吉林大学, 2010.
- [27] Y.D. Tretyakov, O.A. Shlyakhtin. Recent progress in cryochemical synthesis of oxide materials[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 1999, 9 (9): 19-24.
- [28] 倪文,刘凤梅. 纳米孔超绝热材料的原理及制备[J]. *保温材料与建筑节能*, 2015, 35(1): 87-96.
- [29] Wei T Y, Lu S Y, Chang Y C. A New Class of Opacified Monolithic Aerogels of Ultralow High-Temperature Thermal Conductivities [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(17): 7424-7428.
- [30] 杨冬晖,李猛,尚坤,等. 航天服隔热材料技术研究进展[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(2): 87-96.
- [31] K.I.Jensen, J.M.Schultz, F.H.Kristiansen, et al. Development of windows based on highly insulating aerogel glazings[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, 350 (2004): 351-357.
- [32] Liu Z H, Ding Y D, Wang F, et al. Thermal insulation material based on SiO_2 aerogel[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 122: 548-555.
- [33] 何雅玲,谢涛. 气凝胶纳米多孔材料传热计算模型研究进展[J]. *科学通报*, 2015, 60(2): 137-163.
- [34] 郭雨含,刘向东,王燕,等. SiO_2 气凝胶导热机理的分子动力学模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(1): 107-110.
- [35] 李俊宁,胡子君,李增耀,等. 纳米超绝热材料的设计与制备[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(2): 26-30.
- [36] 封金鹏,陈德平,杨淑勤,等. SiC 作为纳米 SiO_2 多孔绝热材料红外遮光剂的试验研究[J]. *宇航材料工艺*, 2009, 1: 38-48.
- [37] Venkateswara R A, Hegde N D, Hirashima H. Absorption and desorption of organic liquids in elastic superhydrophobic silica aerogels[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2007, 305 (1):124-132.
- [38] 胡延臣,王彦竹,王思玲. 纳米多孔二氧化硅作为药物载体的研究进展[J]. *沈阳药科大学学报*, 2010, 27(12):961-967.
- [39] 曾森,刘敬肖,史非. 二氧化硅气凝胶对硫酸庆大霉素的吸附和释放[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(8):1081-1085.
- [40] Maleki H, Durães L, García-González C A, et al. Synthesis and biomedical applications of aerogels: Possibilities and challenges[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2016, 236:1-27.
- [41] In E, Naguib H. Fabrication and characterization of silica aerogel as synthetic tissues for medical imaging phantoms[C]. *AIP Conference Proceedings* 1664,130002,2015.
- [42] 刘朝辉,苏勋家,侯根良,等. SiO_2 气凝胶在生物传感器上的应用[C]. 全国功能材料学术年会, 2006.