

# 纤维素气凝胶材料研究进展

高鹤, 梁大鑫, 李坚

东北林业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040

**摘要** 气凝胶是一种具有纳米孔洞结构的新型固体材料, 具有低热导率、低折射指数和低电阻率等特点, 在隔热保温、吸附催化和高性能电容器等方面具有广阔的应用前景。本文综述气凝胶发展的历史及气凝胶的制备方法和应用, 探讨了纤维素气凝胶研发中存在的问题, 展望了纤维素气凝胶的未来发展。

**关键词** 气凝胶; 纤维素气凝胶; 制备方法

气凝胶是一种由胶体粒子和高聚物分子相互聚结构成的具有纳米孔洞结构的新型材料, 是一种固体物质形态。其表观密度  $0.003\sim 0.35\text{ mg/cm}^3$ , 平均孔径  $20\text{ nm}$ , 孔隙率  $95\%\sim 98.7\%$ , 折射率  $1.0\sim 1.08$ , 介电常数  $1.1^{[1]}$ 。气凝胶密度极低, 是世界上最轻的固体材料, 又被称为“固体烟雾”。纳米孔洞结构使气凝胶具有低热导率、低折射指数和低电阻率的特点, 也使气凝胶在隔热保温、吸附催化和高性能电容器等方面具有了广阔的应用前景。

## 1 气凝胶

### 1.1 气凝胶的发展历史

1931年, 斯坦福大学的 Kistler<sup>[2]</sup>采用硅酸钠水溶液进行酸性浓缩, 再利用超临界干燥方法首次解决了常规干燥湿气凝胶结构坍塌的问题, 从而制备出二氧化硅气凝胶并为其命名。此后几年内, Kistler 又采用同样的方法成功制备出了氧化铝、氧化钨、三氧化二铁、氧化锡、纤维素、硝酸纤维素、白明胶、琼脂、蛋白、橡胶等各类气凝胶, 但由于这种方法的制备工艺复杂和产品工艺纯化困难, 并未得到普遍的关注。1966年, Peri<sup>[3]</sup>找到了一种新的合成方法, 即将溶胶-凝胶化学方法用于二氧化硅气凝胶的制备中。该法用正硅酸四甲酯取代了硅酸钠水溶液作为硅源, 将正硅酸四甲酯在甲醇溶液中水解-缩聚后直接得到二氧化硅甲醇凝胶, 避免了由水到乙醇替换时间太长及凝胶中无机盐类杂质的问题, 缩短了干燥时间, 简化了实验过程, 从而推动了气凝胶科学的发展。进入20世纪80年代后, 随着溶胶-凝胶法研究的深入和超临

界干燥的日臻完善, 气凝胶材料的制备、特性及应用研究得到了长足的发展。

20世纪80年代初, 气凝胶科学迅速发展。1974年, 粒子物理学家 Cantin 等<sup>[4]</sup>认识到二氧化硅气凝胶是制造 Cherenkov 探测器的理想材料, 并首次报道了将二氧化硅气凝胶应用于 Cherenkov 探测器。1983年, 伯克利实验室微结构材料组发现正硅酸乙酯可以代替毒性很大的正硅酸四甲酯, 并且其产品质量不会降低。此后微结构材料研究组也发现, 在超临界干燥之前, 用液态二氧化碳代替凝胶中的乙醇不会影响气凝胶的性质, 同时在安全方面又是一大进步。1985年, Tewari 等<sup>[5]</sup>使用二氧化碳为介质进行超临界干燥, 成功制备气凝胶, 并将干燥温度降至室温, 大大提高了设备的安全性, 同时也推动了气凝胶的商业化进程。制备技术的进步也引起了一大批科学家的兴趣并投身到气凝胶的研制中。

进入20世纪90年代, 对气凝胶的研究更加深入。据不完全统计, 近年各类杂志上有关气凝胶的文章已达3000多篇。《Science》将气凝胶列为十大热门科学之一。1989年 Gessar 等<sup>[6]</sup>对气凝胶制备机制、结构及合成方法等方面进行了全面综述。Pekala 等<sup>[7]</sup>以间苯二酚和甲醛为原料, 首次制备有机气凝胶, 并将其在惰性氛围下炭化制成了炭气凝胶, 解决了气凝胶热稳定性不好的问题, 在惰性和真空环境下耐温性高达  $2000^\circ\text{C}$ , 石墨化后耐温性达  $3000^\circ\text{C}$ , 但其在有氧条件下耐温性急剧下降需在表面覆盖耐高温抗氧化涂层。1990年, Larry 等<sup>[8]</sup>发表论文表明, 老化对最终气凝胶的性能影响很大, 而这在之前是不被重视的。

收稿日期: 2015-12-12; 修回日期: 2015-12-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2572014EB02-03); 黑龙江省自然科学基金项目(LC201406); 黑龙江省博士后资助经费项目(LBH-Z13001); 中国博士后科学基金项目(2014M561311); 无机合成与制备化学国家重点实验室(吉林大学)开放课题(2016-24); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12543016)

作者简介: 高鹤, 硕士研究生, 研究方向为木材功能性改良及生物质基复合材料, 电子信箱: 784124957@qq.com; 梁大鑫(通信作者), 讲师, 研究方向为木材功能性改良及生物质基复合材料, 电子信箱: 397972731@qq.com

引用格式: 高鹤, 梁大鑫, 李坚. 纤维素气凝胶材料研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(19): 138-142; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.19.024

目前,气凝胶的研制主要集中在德国BASF公司、DESY公司,法国的蒙彼利埃材料研究中心,美国的劳伦兹利物莫尔国家实验室、桑迪亚国家实验室,瑞典的LUND公司及美、德、日的一些高校。国内气凝胶的研究比较晚,1995年,同济大学波尔物理实验所才开始气凝胶的研究。之后国内其他大学、研究所也发表过关于气凝胶的论文,但均在起步阶段,未见关于开发新材料的应用型研究。

### 1.2 气凝胶的制备

气凝胶现阶段的制备方法主要分为2步:第1步常用的有溶胶-凝胶法制备出含水或醇的凝胶,此方法聚合所需时间较长,所以也可以采用紫外光引发法<sup>[9]</sup>;第2步为凝胶干燥成气凝胶,凝胶干燥的方法主要有常压干燥法<sup>[10]</sup>、超临界干燥法<sup>[11]</sup>、冷冻干燥法<sup>[12]</sup>和蒸发干燥法。

1) 超临界干燥。由于凝胶骨架里的溶剂存在表面张力,而普通的干燥会由于表面张力造成凝胶的骨架坍塌。超临界干燥就是通过控制温度和压力,在干燥过程中使溶剂达到临界点。从而使其在干燥过程中无明显的表面张力,其骨架结构不坍塌的前提下完成凝胶向气凝胶转变的过程。超临界干燥的介质主要有醇和二氧化碳液体,首先用醇或二氧化碳液体置换凝胶中的水然后采用临界干燥,但醇的临界温度在200℃以上,这也导致了采用醇作为干燥介质存在危险性,也难以大规模生产。而二氧化碳液体的临界温度仅仅只有31.1℃,仅比室温高出一度,安全性大大增强。

2) 常压干燥。由于超临界干燥的设备昂贵,操作复杂且危险性大,所以很多学者致力于常温常压条件下干燥方法的研究。凝胶干燥过程中其网络结构坍塌的主要原因就是毛细管压力和溶剂的表面张力。通常经过水解和缩聚后形成凝胶,其网络结构中的溶剂主要是水和醇。而水和醇的表面张力比较大,凝胶在干燥时由于水的表面张力很大导致凝胶的网络结构的孔隙毛细管压力也很大。而凝胶的网络结构比较脆弱,这就是导致了凝胶结构的坍塌的主要原因。

而常压常温干燥的原理就是用表面张力小的溶剂将水和醇替换。这些表面张力小的溶剂蒸发干燥时,毛细管的压力大大减小,这对采用非临界干燥的方法制备气凝胶十分有利。一般常温常压干燥方法是用表面张力低的溶剂浸泡替换凝胶中的水或醇,或在溶剂中加入一些油性表面活性剂来降低表面张力。从而减少凝胶中的毛细管压力,可以在常温常压下进行干燥。此外,网络增强及表面改性方法可以减小或消除气凝胶的碎裂程度,得到的气凝胶性能与超临界干燥工艺得到的基本一致<sup>[13]</sup>。

3) 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。真空冷冻干燥<sup>[14]</sup>就是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的溶剂的固化温度,将溶剂固化成固态。然后,采用负压的方法将溶剂升华,达到排除分散介质的作用。这是一种将真空技术与冷冻技术相结合的干燥脱水技术。冷冻干燥也解决了粒子团聚的问题。

现阶段干燥效果最好的是超临界干燥,此方法干燥的气凝胶网络结构最好,体积收缩也最少。但超临界干燥的设备十分昂贵,操作复杂且危险性大,所以现在的学者也将注意力转移到常温干燥和冷冻干燥。而蒸发干燥法仅用于干气凝胶的制备。

### 1.3 气凝胶的应用

气凝胶独特的结构也决定了他的优异特性,气凝胶有高孔隙率、低密度、低导热性的特点,所以人们将气凝胶应用到膜的研究上<sup>[15]</sup>。现在气凝胶膜的应用也十分广泛,可用于制造染料敏化太阳能电池<sup>[16]</sup>,其性能也得到增强。除此之外,气凝胶膜也可用作超大规模集成电路器件的金属线间和层间介质,因其介电常数很低,所以用气凝胶替代传统SiO<sub>2</sub>介质,减少互联延迟、串扰和能耗,提高电路性能<sup>[17]</sup>。气凝胶是传统SiO<sub>2</sub>介质膜的理想替代物。

气凝胶能有效抑制固体传热和气体传热,是世界上导热率最低的固态材料,可用于制作保温绝热材料,特别是在航天隔热材料的应用<sup>[18]</sup>。而且气凝胶在环境保护中也有应用。由于气凝胶的高比表面积和孔隙率的特点,且其孔结构具备开孔性和相互连通性等特点。使气凝胶可有效的吸附水中废物,且可以净化废气<sup>[19]</sup>。同时,气凝胶因其良好的生物相容性在医学领域也有着广泛的应用。

## 2 纤维素气凝胶

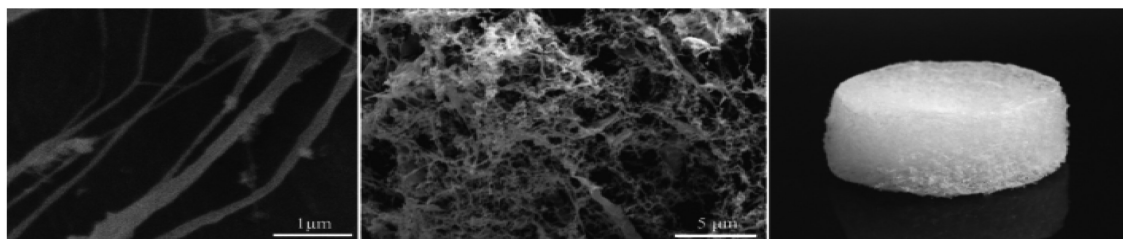
### 2.1 纤维素气凝胶简介

气凝胶主要分为无机气凝胶、合成聚合物气凝胶、气凝胶3类。气溶胶就是目前研究热度正在不断升温的纤维素气凝胶。无机气凝胶,有机气凝胶和无机-有机复合气凝胶一直受到关注,其制备方法不断更新,使用原料也不断优化,得到了广泛的应用。而纤维素气凝胶在近几年刚起步,也受到了持续关注。纤维素是世界上储备量最大、无毒且可再生可降解的一种天然高分子。纤维素分布十分广泛,棉花中纤维素含量十分丰富,其纤维素含量接近100%,麻类为80%~90%,木材、竹类含量为40%~50%。此外,秸秆、甘蔗渣等都是纤维素的来源<sup>[20]</sup>。纤维素气凝胶既有纤维素的再生的优点,又有气凝胶的多孔结构且易加工韧性好的优点,所以纤维素气凝胶的发展前景要比传统气凝胶更好一些。纤维素气凝胶可以分为天然纤维素气凝胶,再生纤维素气凝胶和纤维素衍生物气凝胶<sup>[21]</sup>3类。

2001年,Fung等以纤维素衍生物为原料成功制备了纤维素基气凝胶。纤维素基气凝胶既是高孔隙率多孔材料再生的材料,而且易于加工、韧性好,因此成为无机气凝胶、复合气凝胶后的新一代气凝胶。2006年以来学者对纤维素气凝胶研究日渐活跃。Surapolchai等<sup>[22]</sup>以微晶纤维素(MCC)和羧甲基纤维素(CMC)为原材料制备得到再生纤维素气凝胶。因为天然纤维素气凝胶在水中不稳定易发生溶胀破碎,Jin等<sup>[23]</sup>制备了超疏水、憎油的氟化钠纤维素气凝胶。它可在水面或油面上承载超过本身质量3倍的物质,而不会破碎。

2014年,赵卫等<sup>[24]</sup>采用绿藻为原料制备纤维素气凝胶(图1<sup>[24]</sup>),不仅为气凝胶的制备提供了新的原料,同时也解决了绿潮问题变废为宝。刘志明等<sup>[25]</sup>以毛竹为原料,采用落球法制

备出纳米纤维素球形气凝胶(图2<sup>[25]</sup>)。卢芸等<sup>[26]</sup>以木粉为原料,采用冻融法制备成功木质纤维素气凝胶(图3<sup>[26]</sup>)。



(a) 化学纯化后经胶磨 30 min 后得到的浒苔 NFC(纳米纤丝化纤维素) (b) 经叔丁醇冷冻干燥后得到的海藻 NFC 气凝胶截面的 SEM 图 (c) 海藻 NFC 气凝胶的宏观照片

图1 浒苔 NFC 及所组装的气凝胶

Fig. 1 Prepared NFC of *Ulva prolifera* and the assembled aerogel

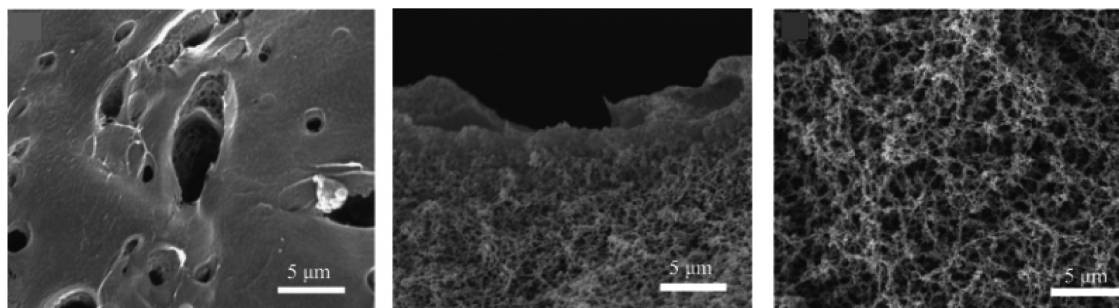
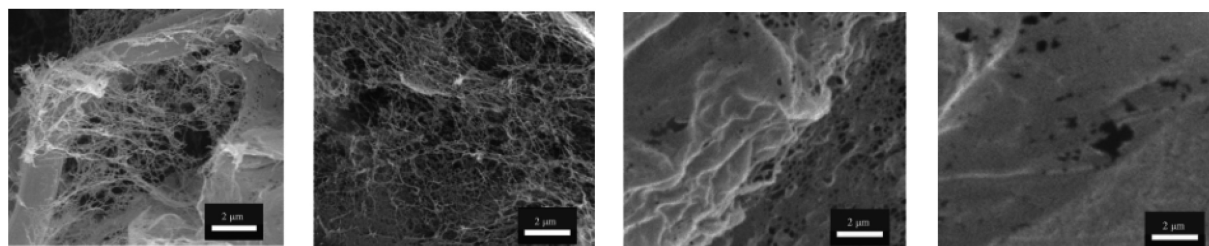


图2 球形纤维素气凝胶的表面形貌、边缘形貌和断面形貌

Fig. 2 Surface morphology, edge morphology and cross-section morphology of spherical cellulose aerogel



(a) 1次 (a) 4次 (a) 7次 (a) 10次

图3 不同循环冻融下木质纤维素气凝胶的扫描电镜图

Fig. 3 SEM images of the obtained lignocellulose aerogels with different FT times

## 2.2 纤维素气凝胶的制备

近几年来,对制备纤维素气凝胶原料研究已经取得了许多进展,其原料几乎涵盖所有的生物质材料,其中以木质材料最为普遍,也有大量研究以竹子、香蕉皮、亚麻和小麦秸秆、仙人掌、马铃薯块茎等生物质材料为原料成功制备出纤维素气凝胶。除了植物生物质材料外,也有人以细菌、海鞘等非生物质资源为原料制备纤维素气凝胶。

现在常用的纤维素气凝胶制备方法主要分4步。第1步

为纤维素的制备,即从木材、棉花、麻类中将纤维素分解出来,生产出纤维素纳米晶须(图4<sup>[27]</sup>),通常采用的方法有强酸水解法、机械分离法、化学预处理结合机械分离法和酶处理结合机械分离法等<sup>[27]</sup>。其中强酸水解法制备的纤维素纳米晶须有较高的比表面积,但对反应设备要求高,回收残留物较难;机械分离法可以批量生产但是纳米纤维素尺寸不均匀;化学预处理结合机械分离法和酶处理结合机械分离法可制备长径比更大的纳米纤维素晶须。第2步为水凝胶的制备,

即将制备出的纤维素纳米晶须制成水凝胶。通常采用的方法为超声波降解法,即将纤维素纳米晶须稀水溶液在超声波细胞破碎机中破碎成湿凝胶。第3步为凝胶中溶剂的置换,即用其他表面张力小溶液将水从凝胶中置换出来。防止由于溶剂的表面张力大,而使凝胶在干燥中结构破坏。第4步为湿凝胶干燥成气凝胶,即将湿凝胶中的溶剂蒸发出来,将液体用气体替换掉。通常采用的方法有超临界干燥、冷冻干燥、常压干燥和蒸发干燥4种。其中以CO<sub>2</sub>为介质的超临界干燥比较常用,这种方法可以避免液固界面的表面张力,从而消除毛细管作用力,避免了气凝胶固态结构被破坏,但过程复杂,成本也较高<sup>[28]</sup>。

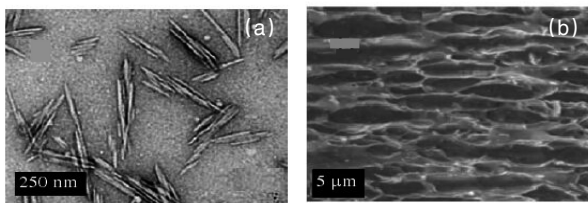


图4 纤维素纳米晶须透射电镜图(a)和含纤维素纳米晶须的气凝胶扫描电镜图(b)

Fig. 4 Transmission electron microscopic photographs of cellulose nano whiskers and scanning electron microscope photo of aerogel with cellulose nano whiskers

### 2.3 纤维素气凝胶的应用

纤维素气凝胶由于其独有的优异的性能,使纤维素气凝胶的应用范围大于无机气凝胶和聚合气凝胶。如纤维素气凝胶的生物相容性及其可降解的特点,使得纤维素气凝胶在制药业和化妆品行业也有很大应用<sup>[29]</sup>。木酸杆菌可以合成细菌纤维素,常用于生物医学材料等领域<sup>[30,31]</sup>。将气凝胶侵入聚苯胺溶液后洗涤干燥,可得到导电性气凝胶,其导电率高达 $1 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ <sup>[32]</sup>,使得纤维素气凝胶可用作超级电容器电极材料的纳米阻隔材料、纳米电解质储存场所,纳米层次结构的制备者及导电高分子模板材料,也使其在超级电容器领域得到了广泛的应用。将细菌纤维素气凝胶在高温和氩气的保护下热解,可以制备出质量小、柔韧且耐火的碳纳米纤维气凝胶,所得的气凝胶具有超强的有机溶剂吸附能力和较高的导电率,对压缩应变敏感,有望应用于压力传感器材料<sup>[33]</sup>。纤维素气凝胶现在也研究将其用到吸附剂中<sup>[34]</sup>。纤维素气凝胶在吸附、催化、分离、储存、电池、包装、食品、建筑隔音、药物传输、组织工程等行业领域都具有潜在的开发价值。

## 3 结论

气凝胶从问世起就受到广泛关注,而溶胶-凝胶法研究的深入和超临界干燥的日臻完善,以及液态二氧化碳在气凝胶制备中的应用,使气凝胶的研究得到了飞速发展,并成为了20世纪90年代十大热门材料之一。纤维素气凝胶由于来源丰富、可再生可降解和生物相容性的优点,自从出现以来,

就得到了巨大的关注,并已经被应用在了制药、化妆品、生物医学材料等方面。与此同时,纤维素气凝胶存在着重复性较差、技术复杂等问题,限制了规模化生产,使其目前主要应用在高端领域,在包装、食品、建筑隔音等民用领域方面的使用还很欠缺。

因此,随着气凝胶制备方法的不断简化,纤维素气凝胶的研究应该会成为未来的研究方向之一,充分利用纤维素气凝胶材料的性能优势,弥补其力学性能上的不足,从而使纤维素气凝胶材料更加广泛地应用到更多领域中,创造出更多的社会价值和经济价值。

### 参考文献(References)

- [1] 张伟娜. 疏水性二氧化碳气凝胶的常压制备及其性能表征[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.  
Zhang Weina. Preparation and characterization of hydrophobic silica gel by atmospheric pressure[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2006.
- [2] Kistler S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. *Nature*, 1931, 127: 741.
- [3] Peri J B. Infrared study of OH and NH<sub>2</sub> groups on the surface of a dry silica aerogel[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 70(9): 2937.
- [4] Cantin M, Casse M, Koch L. Silica aerogels used as Cherenkov radiators[J]. *Nuclear Instruments Methods*, 1974, 118: 177.
- [5] Tewari P H, Hunt A J, Lofftus K D. Ambient-temperature supercritical drying of transparent silica aerogels[J]. *Materials Letters*, 1985, 3(9-10): 363.
- [6] Gesser H D, Goswami P C. Aerogels and related porous materials[J]. *Chemical Review*, 1989, 89: 765.
- [7] Pekala R W. Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde[J]. *Journal of Materials Science*, 1989, 24(9): 3221
- [8] Larry L H, Jon K W. The sol-gel process[J]. *Chemical Review*. 1990, 90: 30.
- [9] 雷雷, 付志兵, 易勇, 等. 紫外光引发法制备RF气凝胶研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(4): 50-66.  
Lei Lei, Fu Zhibing, Yi Yong, et al. Research progress of RF aerogel prepared by UV[J]. *Materials Review*, 2014, 28(4): 50-66.
- [10] Rao A P, Rao A V, Bangi U H. Low thermalconductive, transparent and hydrophobic ambient pressure dried silica aerogel with various preparation conditions using sodium silicate solutions[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2008, 47(1): 85-94.
- [11] 冷英丽, 沈晓东, 崔升, 等. SiO<sub>2</sub>气凝胶超临界干燥工艺参数的优化[J]. *精细化工*, 2008(3): 209-211.  
Leng Yingli, Shen Xiaodong, Cui Sheng, et al. Optimization of supercritical drying process parameters of SiO<sub>2</sub> gas gel[J]. *Fine Chemicals*, 2008(3): 209-211.
- [12] 王立久, 徐海珣. 冷冻干燥法制备纳米TiO<sub>2</sub>多孔材料的研究[J]. *新型建筑材料*, 2010(6): 5-7.  
Wang Juli, Xu Haixun. Study on Preparation of nano TiO<sub>2</sub> porous materials by freeze drying method[J]. *New Building Materials*. 2010 (6): 5-7.
- [13] 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(10): 1892-1900.  
Wu Guoyou, Cheng Xuan, Yu Yuxi, et al. Preparation of silica gel by atmospheric pressure drying[J]. *Progress in Chemistry*, 2010(10):

- 1892-1900.
- [14] Wang B, Li Q. Drying technology of gas gel preparation [J]. *Drying Technology & Equipment*. 2013, 11(4): 18-26.
- [15] 赵嫦. 二氧化硅气凝胶膜及复合节能镀膜玻璃的制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
Zhao E. Study on Preparation and properties of silica gel film and composite energy saving coating glass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [16] Gu Z Y, Gao X D, Li X M, et al. Nanoporous TiO<sub>2</sub> aerogel blocking layer with enhanced efficiency for dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 590: 33-40.
- [17] Hyun S H, Kim J J, Park H H. Synthesis and characterization of low-dielectric silica aerogel films[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 83(3): 533-540.
- [18] 杜姗. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>气凝胶充填非石墨化泡沫碳的干燥工艺及抗氧化涂层研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
Du Shan. Drying process and anti oxidation coating of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gas gel filled non graphite foam carbon[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] 魏巍. 新型无机气凝胶的制备及其吸附/光催化性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.  
Wei Wei. Study on the preparation and adsorption / photo catalytic properties of new inorganic gas gels[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [20] Kentaro A, Hiroyuki Y. Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber[J]. *Cellulose*, 2009, 16: 1017-1023.
- [21] 陶丹丹, 白绘宇, 刘石林, 等. 纤维素气凝胶材料的研究进展[J]. *纤维素科学与技术*, 2011, 19(2): 64-75.  
Tao Dandan, Bai Huiyu, Liu Shilin, et al. Research progress of cellulose gas gel materials [J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 2011, 19(2): 64-75.
- [22] Surapolchai W, Schiraldi D. The effects of physical and chemical interactions in the formation of cellulose aerogels[J]. *Polymer Bulletin*, 2010, 65(9): 951-960.
- [23] Jin H, Kettunen M, Ras R A, et al. Superhydrophobic and superoleophobic nanocellulose aerogel membranes as bioinspired cargo carriers on water and oil[J]. *Langmuir*, 2011, 27(5): 1930-1934.
- [24] 赵卫, 卢芸, 欧阳欢, 等. 绿藻纤维素气凝胶: 从绿潮到新材料[J]. *科技导报*, 2014, 32(4-5): 35-39.  
Zhao Wei, Lu Yun, Ouyang Huan, et al. Green algae cellulose aerogel: From green to new material[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(4-5): 35-39.
- [25] 刘志明, 杨少丽, 吴鹏, 等. 再生竹纤维球形介孔气凝胶的表征[J]. *科技导报*, 2014, 32(4-5): 69-73.  
Liu Zhiming, Yang Shaoli, Wu Peng, et al. Characterization of spherical mesoporous silica gel for regenerated bamboo fibers[J]. *Science and Technology Review*. 2014, 32(4-5): 69-73.
- [26] 卢芸, 邱坚, 孙庆丰. 木质纤维素气凝胶在离子液体中的制备及表征[J]. *科技导报*. 2014, 32(4-5): 30-33.  
Lu Yun, Qun Jian, Sun Qingfeng. Preparation and characterization of wood cellulose gas gel in ionic liquids[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(4-5): 30-33.
- [27] 陈文帅. 生物质纳米纤维素及其自聚集气凝胶的制备与结构性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.  
Chen Wenshuai. Fabrication, structures and properties of nanocellulose and nanocellulose aerogels [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [28] Heath L, Thielemans W. Cellulose nanowhisker aerogels[J]. *Green Chem*, 2010, 12: 1448-1453.
- [29] Gavillon R, Budtova T. Aerocellulose: New highly porous cellulose prepared from cellulose-NaOH aqueous solutions[J]. *Biomacromolecules*. 2008, 9: 269-277.
- [30] 刘志明. 纳米纤维素功能材料研究进展[J]. *功能材料信息*, 2013, 10(5-6): 35-42.  
Liu Zhiming. Research progress of nano cellulose functional materials [J]. *Functional Materials Information*, 2013, 10(5-6): 35-42.
- [31] Liebner F, Maimer E, Wendland M. Aerogels from unaltered bacterial cellulose: Application of scCO<sub>2</sub> drying for the preparation of shaped, ultra-lightweight cellulosic aerogels[J]. *Macromolecular Bioscience*, 2010, 10(4): 349-352.
- [32] 张金明, 张军. 基于纤维素的先进功能材料[J]. *高分子学报*, 2010(12): 1377-1398.  
Zhang Jinming, Zhangju. Advanced functional materials based on cellulose[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010(12): 1377-1398.
- [33] Liang H W, Guan Q F, Zhu Z, et al. Highly conductive and stretchable conductors fabricated from bacterial cellulose[J]. *NPG Asia Materials*, 2012, 4(6): e19.
- [34] 关倩. 木材纤维素气凝胶的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.  
Guan Qian. Study on the preparation and properties of wood cellulose gel[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.

## Recent progress in studies of cellulose aerogel

GAO He, LIANG Daxin, LI Jian

College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract** Aerogel is a new kind of porous nanostructured solid materials, with a wide application prospect in the heat insulation and preservation, the adsorption catalysis and the high performance capacitor because of its low thermal conductivity, low refractive index and low resistivity. In this paper, its development, the synthetic methods and the application of the aerogel are reviewed, focusing on the development, the synthetic methods and the applications of the cellulose aerogel. Moreover, the existing problems in the development of the cellulose aerogel are discussed, and its future development is commented.

**Keywords** aerogel; cellulose aerogel; synthetic methods

(责任编辑 刘志远)