



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20250024

网络首发日期: 2025-10-28; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.n.20251027.1505.011>

超疏水、保温隔热、阻燃的生物质复合介孔气凝胶的 制备与表征

李皓宇, 张 潇, 姜俊娟, 侯庆喜, 刘 苇

(天津科技大学轻工科学与工程学院, 生物基纤维材料全国重点实验室, 天津市制浆造纸重点实验室,
纺织行业高性能纤维湿法非织造材料重点实验室, 天津 300457)

摘要: 气凝胶作为一种新兴材料已经成为一种替代传统保温隔热材料的理想产品, 受到了广泛的关注。二氧化硅气凝胶具有高比表面积、低密度、低导热率等优点, 拥有众多应用领域, 但其存在强度较低的缺点。本研究以正硅酸乙酯为硅源, 纤维素纳米纤丝作为增强材料, 经过老化、改性、超临界干燥等处理制备了一种生物质复合气凝胶, 并进行分析和表征。结果表明, 生物质复合气凝胶具有密度低、比表面积和孔隙率高、含介孔结构等特点, 显示出低导热系数、超疏水性、高热稳定性等优势, 并且具有防火性能, 有望在航空航天、环保、能源、化工、建筑、服装等领域展现出很好的应用前景。

关键词: 气凝胶; 生物质复合气凝胶; 介孔; 保温隔热; 超疏水性

中图分类号: TQ427.2⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)04-0049-06

Preparation and Characterization of Superhydrophobic, Thermally Insulating, Flame-Retardant, Mesoporous Bio-Composite Aerogel

LI Haoyu, ZHANG Xiao, JIANG Junjuan, HOU Qingxi, LIU Wei

(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, National Key Laboratory of bio-based fiber materials, Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper Industry, Textile industry key Laboratory of High Performance Fiber Wet Nonwovens, Tianjin 300457, China)

Abstract: Aerogels have emerged as ideal alternatives to traditional thermal insulation materials and have received extensive attention. Silica aerogels have the advantages of high specific surface area, low density and low thermal conductivity, making them suitable for a wide range of applications. However, they have the disadvantage of low mechanical strength. In this study, ethyl silicate was used as the silicon source and cellulose nanofibrils as the reinforcing material to prepare a bio-mass composite aerogel through aging, modification and supercritical drying processes, and the resulting material was analyzed and characterized. The results show that the biomass composite aerogel exhibits low density, high specific surface area and porosity, and a mesoporous structure, and also demonstrates advantageous properties including low thermal conductivity, superhydrophobicity, good thermal stability, and flame retardancy. These features position the material as a promising candidate for applications in aerospace, environmental protection, energy, chemical engineering, construction, textiles and related fields.

Key words: aerogel; bio-composite aerogel; mesoporous; thermal insulation; superhydrophobicity

收稿日期: 2025-02-18; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071715)

作者简介: 李皓宇(2000—), 男, 山东人, 硕士研究生; 通信作者: 刘 苇, 教授, weiliu@tust.edu.cn

引文格式:

李皓宇,张潇,姜俊娟,等.超疏水、保温隔热、阻燃的生物质复合介孔气凝胶的制备与表征[J].天津科技大学学报,2026,41(4):49-54.

Li Haoyu, Zhang Xiao, Jiang Junjuan, et al. Preparation and characterization of superhydrophobic, thermally insulating, flame-retardant, mesoporous bio-composite aerogel[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2026, 41(4): 49-54.

随着科技的快速发展以及人民生活水平的不断提升,保温隔热材料在能源、化工、建筑、交通等领域发挥着日益重要的作用。传统保温隔热材料可分为有机保温材料(如聚苯乙烯、聚氨酯)和无机保温材料(如岩棉、玻璃棉)。传统保温隔热材料存在耐高温性差、易吸水、燃烧产生有毒气体以及使用年限短等问题^[1-2]。因此,迫切需要开发新型保温隔热材料以减少热损失、提升能源效率,从而实现绿色经济的健康、可持续发展。

气凝胶是通过溶胶-凝胶法,经过一定的干燥方式使气体取代凝胶中的液相而形成的一种纳米级多孔固态材料^[3]。气凝胶具有比表面积高、密度低、导热率低等优良特性,在航空航天、环境保护、能源、化工、建筑、服装等领域展示了广阔的应用前景^[4-7]。二氧化硅气凝胶是一种典型的无机气凝胶,具有独特的三维分层纳米多孔结构,在保温隔热方面具有突出的优势,是一种极具应用潜力的新材料^[8-9]。但是,二氧化硅气凝胶内颗粒之间连接强度较低,导致气凝胶整体强度较低,严重限制了其大规模应用^[10]。为解决这一问题,研究者们尝试通过引入增强材料制备复合气凝胶。目前常见的增强材料有碳纳米管^[11]、石墨烯^[12]等,这些增强材料普遍存在成本高、环境负荷大或者与二氧化硅界面兼容性差的问题。

生物质材料在自然界中广泛存在,无毒无害,废弃后很容易被土壤中的微生物降解,是典型的环境友好型材料^[13]。纤维素纳米纤丝(cellulose nanofibril, CNF)是由植物纤维经过化学或物理方法处理得到的纳米级纤维材料,直径通常在几纳米到几百纳米^[14],具有强度高(拉伸强度可达 1.5 GPa)、长径比大(100~500)、生物相容性好以及可再生、可生物降解等优势,常被用于增强各类材料的力学性能,在医疗卫生、食品包装和环境保护等领域具有良好的应用前景^[15-18]。相关研究表明,CNF可用于增强二氧化硅气凝胶,但是现有研究对两者的协同增强机制/介孔结构调控规律以及高温稳定性等关键机制缺乏系统性研究^[19]。同时,生物质复合气凝胶的疏水性和阻燃性尚未得到充分优化,限制了其在户外和高温场景的

应用。

本文以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源^[20-22]、CNF作为增强材料,利用溶胶-凝胶法,经过老化、改性、超临界干燥等处理过程制备了生物质复合气凝胶,对生物质复合气凝胶的导热性能、力学性能、疏水性能等进行表征和分析。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

CNF(固含量 4.0%),济南圣泉集团股份有限公司;盐酸(质量分数 36%),天津市化学试剂供销公司;正硅酸乙酯(分析纯)、无水乙醇(体积分数 $\geq 99.7\%$)、氨水(质量分数 25%),天津市津东天正精细化学试剂厂;三甲基氯硅烷(TMCS,质量分数 99.0%),山东科源生化有限公司。实验用水均为去离子水,实验室自制。

ZNCL-DLS240 $\times$ 150型加热搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;NBW-2620型微电脑控制智能加热台,东莞市鑫耀五金工具有限公司;TC 3000E型导热系数仪,西安夏溪电子科技有限公司;FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪,天津港东科技股份有限公司;Autosorb-iQ型表面和孔径分析仪,美国康塔仪器公司;Theta Flex型接触角测量仪,大昌洋行(上海)有限公司;TG209 F3 Tarsus型热重分析仪,耐驰(上海)机械仪器有限公司;LD23.104型万能拉力机,力试(上海)科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

生物质复合气凝胶制备工艺示意图如图1所示。将正硅酸乙酯、无水乙醇、水和盐酸以一定的比例进行充分混合;向混合溶液中加入CNF,置于50℃的加热搅拌器中处理5h;将混合溶液冷却至室温,加入氨水调节混合溶液pH至7~8,进行缩聚反应;将混合溶液倒入模具进行固化得到水凝胶,12h后进行脱模。将脱模后的水凝胶浸于无水乙醇中,50℃条件下处理12h后更换无水乙醇,继续加热12h。将水凝胶浸于无水乙醇/三甲基氯硅烷的混合

改性溶液内^[23], 室温下进行改性, 12 h 后更换改性溶液, 再处理 12 h 后进行超临界干燥(干燥持续时间为 9 h, 干燥温度为 38 °C, 压力为 9 MPa)。分别制备二氧化硅气凝胶(silica aerogel, SA)和生物质复合气凝胶(silica composite aerogel, SC_xA), 其中 x 代表 CNF 与正硅酸乙酯的质量比, 质量比分别设置为 0.5、1.0 和 1.5, 所制备的生物质复合气凝胶相应地命名为 SC_{0.5}A、SC_{1.0}A、SC_{1.5}A。

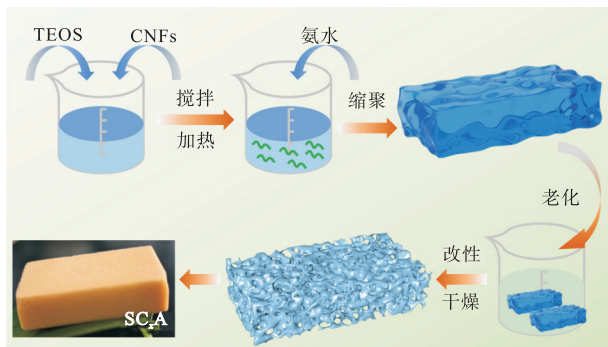


图 1 生物质复合气凝胶制备工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of bio-composite aerogel

2 结果与讨论

2.1 化学结构分析

采用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析气凝胶材料的化学结构, 结果如图 2 所示。

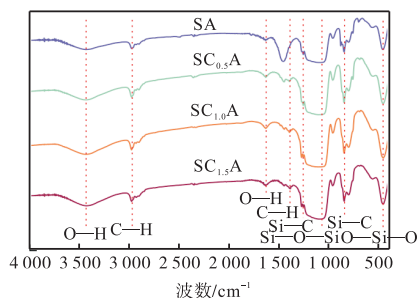


图 2 气凝胶的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of aerogels

由图 2 可知: 在 460 cm^{-1} 和 1087 cm^{-1} 附近分别出现吸收峰, 对应 Si—O—Si 键的弯曲振动和不对称伸缩振动, 表明这些气凝胶材料中含有大量的 Si—O—Si 骨架结构, 这是气凝胶的主要组成框架, 并且加入 CNF 后, 气凝胶的骨架结构没有改变; 1446 cm^{-1} 和 2964 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应 C—H 弯曲振动和不对称伸缩振动, 这表明 CNF 被成功引入二氧化硅气凝胶; 3450 cm^{-1} 附近为 O—H 键的反对称伸缩振

动吸收峰; 848 cm^{-1} 和 1260 cm^{-1} 附近观察到的吸收峰归因于 Si—CH₃ 基团的对称伸缩振动和反对称伸缩振动, 说明气凝胶材料中含有三甲基氯硅烷的特征结构, 这表明三甲基氯硅烷成功负载至气凝胶上, 使气凝胶呈现疏水性能。

2.2 孔径和比表面积分析

不同气凝胶的 N₂ 吸附-脱附等温线如图 3 所示。由图 3 可知: 所有气凝胶样品的吸附曲线均属于典型的第 IV 类型, 这表明样品均为介孔结构, 具有明显的滞后环。IV 型吸附曲线在相对压力较低时, 气体在吸附剂上先形成单分子层吸附, 随着相对压力的增大, 单分子层吸附饱和后发生多分子层吸附^[24]。当相对压力达到某一特定值时, 会发生毛细孔凝聚现象, 相对压力的变化会导致吸附量和脱附量不同, 形成不重合的环, 即滞后环^[23]。介孔材料通常是指孔径介于 2~50 nm 的新型纳米多孔材料, 具有比表面积高、孔道结构规则、孔径分布窄以及孔径可调等特点, 在催化、储能、生物医药、吸附等领域具有重要的应用潜力。

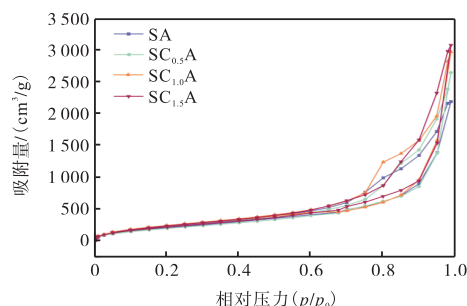


图 3 不同气凝胶的 N₂ 吸附-脱附等温线

Fig. 3 N₂ adsorption-desorption isotherms of different aerogels

不同气凝胶的密度、比表面积和孔隙率见表 1。由表 1 可知: 所制备的气凝胶样品均具有密度低、比表面积高、孔隙率高的特点。其中, SA 的密度为 0.1455 g/cm^3 , SC_{1.5}A 的密度增大至 0.1662 g/cm^3 。SA 的孔隙率为 93.4%, SC_{1.5}A 的孔隙率降低至 92.4%。SA 的比表面积为 455.46 m^2/g , SC_{1.5}A 的比表面积较 SA 有所降低, 为 373.75 m^2/g , 这是由于 SCA 样品的平均孔径大于 SA 的平均孔径, 比表面积呈现下降的趋势。产生这一现象的原因主要是随着 CNF 的加入, CNF 会填充至二氧化硅骨架的孔隙中, 导致比表面积和孔隙率的降低以及密度的增大, 并且加入量越多, 这一趋势越明显。

不同气凝胶的孔径分布曲线如图 4 所示。由图 4

可知:所制备气凝胶样品的孔径主要分布在 2.5 ~ 30 nm;其中,SA 的孔径主要分布在 5 ~ 10 nm;加入 CNF 后,气凝胶中 5 ~ <10 nm 孔径的占比减小,10 ~ 25 nm 孔径的占比增加。这表明加入 CNF 后,气凝胶的孔径会稍有增加。综合表 1 和图 4 可知,所制备气凝胶样品的比表面积较高,且孔径均介于 2 ~ 50 nm 之间,符合典型的介孔气凝胶特性。

表 1 不同气凝胶的密度、比表面积和孔隙率

Tab. 1 Density, specific surface area and porosity of different aerogels

样品	密度/(g/cm ³)	比表面积/(m ² /g)	孔隙率/%
SA	0.145 5	455.46	93.4
SC _{0.5} A	0.162 8	451.94	92.6
SC _{1.0} A	0.164 3	398.89	92.5
SC _{1.5} A	0.166 2	373.75	92.4

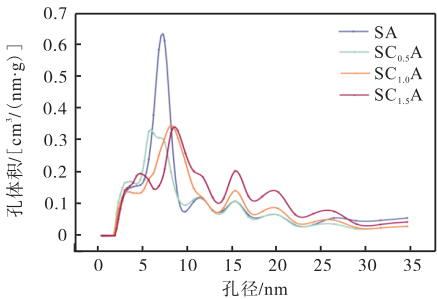


图 4 不同气凝胶的孔径分布曲线

Fig. 4 Pore size distribution curves of different aerogels

2.3 力学性能分析

不同气凝胶的应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知:在 50% 压缩变形条件下,SA、SC_{0.5}A、SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A 的压缩应力分别为 70.47、71.21、90.78、131.78 kPa。与 SA 相比,SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A 的压缩应力分别增加了 29% 和 87%。由此可见,在二氧化硅中引入 CNF 能显著改善气凝胶的抗压缩性能,并且随着 CNF 添加量的增加,抗压缩能力逐渐增强。这是因为 CNF 有效地嵌入了气凝胶的骨架结构中,增强了其强度性能,弥补了 SA 强度较低、易碎的不足。

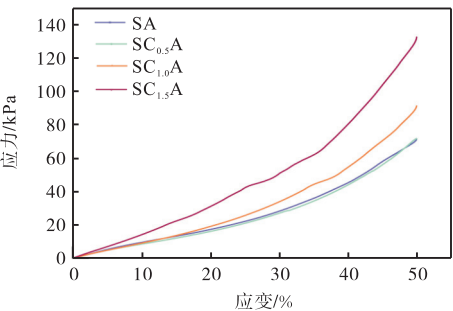


图 5 不同气凝胶的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of different aerogels

2.4 热稳定性分析

不同气凝胶的热重曲线如图 6 所示。由图 6 可知,气凝胶的质量损失主要集中在 3 个阶段:第一阶段(250 ~ 370 °C),质量损失主要源自生物质复合气凝胶中水分的蒸发以及 CNF 的炭化反应;第二阶段(>370 ~ 520 °C),质量损失主要源自气凝胶表面甲基的部分氧化、分解,此时疏水性能开始消失;第三阶段(>520 ~ 600 °C),这一阶段存在质量损失是因为气凝胶中羟基和甲基发生了氧化脱除,导致气凝胶部分骨架结构的破坏,引起整体质量的下降^[25]。经 800 °C 加热后,二氧化硅气凝胶的质量保留率约为 85%,而生物质复合气凝胶的质量保留率有所降低,SC_{0.5}A、SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A 的质量保留率分别为 82%、80% 和 79%。纯二氧化硅气凝胶在高温条件下能够保持其结构的稳定性,与之相比,生物质复合气凝胶在高温条件下的稳定性有一定降低。这主要是由于 CNF 的添加可能会削弱气凝胶的整体热稳定性,CNF 作为天然有机物在高温下容易发生热分解和氧化^[26]。随着 CNF 含量的增加,高温处理后的质量损失逐渐增大。 $T_{\max}$ 指的是样品在热重曲线上质量损失速率达到最大值时的温度。经计算,4 种气凝胶的 $T_{\max}$ 均在 550 °C 左右。

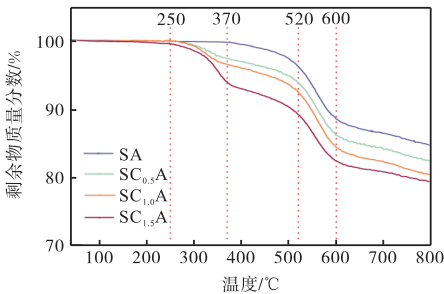


图 6 不同气凝胶的热重曲线

Fig. 6 Thermogravimetric curves of different aerogels

尽管引入适量的 CNF 可以有效提升气凝胶在室温下的力学性能,但过量添加会影响材料的热稳定性。因此,在制备高温耐用型复合气凝胶时,需要合理控制 CNF 的添加量,以实现热稳定性和力学性能之间的平衡。

2.5 亲疏水性分析

不同气凝胶的水接触角测试图如图 7 所示。SA、SC_{0.5}A、SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A 的初始水接触角分别为 133.31°、151.62°、155.38°和 164.97°,均表现出优异的疏水性能。其中,生物质复合气凝胶样品(SC_{0.5}A、SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A)表现出更强的疏水效果,初始接触

角最高可达 164.97° , 均超过超疏水材料的标准(接触角 $>150^\circ$); 而且, 随着 CNF 含量的增加, 气凝胶的疏水性能进一步增强。从机理上看, 生物质复合气凝胶样品表面疏水性的增强主要源于以下两个方面: 一方面, 二氧化硅骨架在三甲基氯硅烷改性过程中形成了大量的疏水硅烷基团; 另一方面, CNF 的引入使其表面羟基参与了改性反应, 进一步增加了疏水基团的数量^[27]。这两方面共同作用, 使生物质复合气凝胶呈现更加优异的疏水特性, 并且, 随 CNF 含量的增加, 疏水性进一步增强。

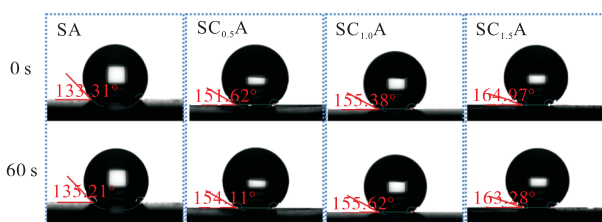


图 7 不同气凝胶的水接触角测试图

Fig. 7 Water contact angles of different aerogels

随着时间的延长, 气凝胶样品的水接触角基本没有变化。这表明经过三甲基氯硅烷改性处理后, 生物质复合气凝胶表面形成的疏水层具有突出的稳定性和持久性, 具有很好的实际应用价值。

2.6 导热性能分析

不同气凝胶在常温下的导热系数如图 8 所示。

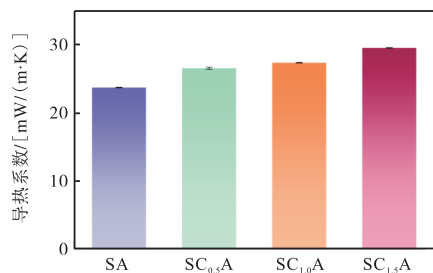


图 8 不同气凝胶在常温下的导热系数

Fig. 8 Thermal conductivity of different aerogels at room temperature

由图 8 可知, SA、SC_{0.5}A、SC_{1.0}A、SC_{1.5}A 的导热系数分别为 23.7、26.54、27.34、29.5 mW/(m·K)。常见的玻璃棉、硅酸钙隔热材料、珍珠岩保温材料的导热系数分别为 37~39、50、47~54 mW/(m·K)^[28], 与之对比可知, 所制备的生物质复合气凝胶的导热系数均低于常见保温材料的导热系数, 呈现出优异的保温能力。另外, 随着 CNF 含量的增加, 尽管生物质复合气凝胶的导热系数稍有升高, 但所有样品的导热系数均远低于国家一级保温材料的标准〔导热系数 $\leq$

65 mW/(m·K)〕^[29]。这表明所制备的生物质复合气凝胶均具有优异的保温性能。

2.7 保温隔热性能分析

将厚度为 1 cm 的气凝胶样品置于 400 °C 的加热台上, 利用红外热成像仪监测其上表面温度变化, 结果如图 9 所示。在 150 min 时, SA 的上表面温度为 72.4 °C, 而 SC_{0.5}A、SC_{1.0}A 和 SC_{1.5}A 的上表面温度分别为 73.8、76.5、79.4 °C, 稍高于 SA。经过 150 min 加热, 气凝胶样品均实现了 300 °C 以上的温降, 表现出优异的隔热性能。同时, SCA 比 SA 上表面温度稍高, 说明 CNF 的引入在一定程度上影响了气凝胶的隔热性能。这主要有两个原因: 其一, CNF 的隔热能力弱于二氧化硅^[30-31], 尤其在 CNF 含量高时, 纤维间接触概率增加, 加剧了热传导效应; 其二, CNF 的加入导致复合气凝胶孔隙率和比表面积的降低, 孔隙率的降低会导致固体热传导路径缩短, 导热能力提升; 比表面积的降低会降低声子散射, 亦可提高导热能力。

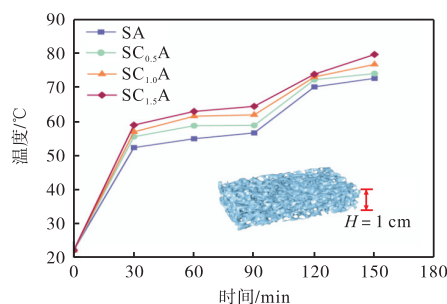


图 9 不同气凝胶上表面温度随时间变化曲线

Fig. 9 Surface temperature curves of different aerogels over time

2.8 燃烧性能分析

将生物质复合气凝胶置于酒精灯的外焰处(温度在 500~700 °C)进行燃烧测试, 评价其是否具有防火性能, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 经过酒精灯外焰加热 5 min, SA 外观形貌基本未发生变化, SC_{0.5}A 表面出现较小程度的变黑, SC_{1.0}A 表面出现中等程度变黑, 而 SC_{1.5}A 表面出现较大程度的变黑。这一结果表明, SA 经受火焰长时间的燃烧, 依旧保持其形貌, 具有优异的防火性能。SCA 由于 CNF 这一易燃有机物的加入, 在酒精灯的燃烧下, 表面的 CNF 部分发生了轻度的阴燃, 但是无火焰产生, 并且保留了完整的外观形貌。所有样品撤离火焰后未燃烧、无燃烧滴落物, 以 UL94 等级标准^[32]作为评判依据, 可以认为生物质复合气凝胶具有很好的防火

性能。

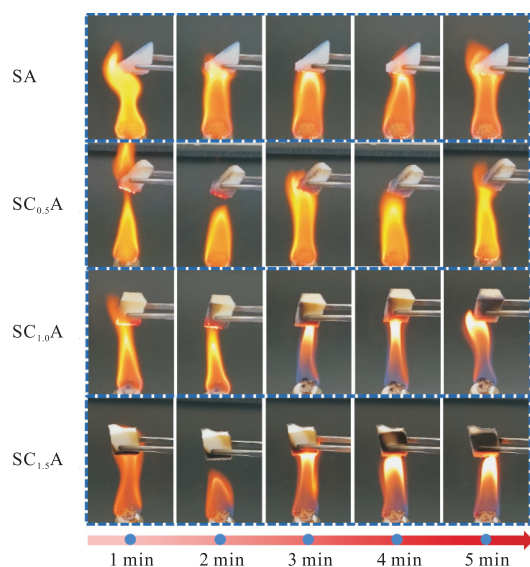


图 10 不同气凝胶的燃烧测试

Fig. 10 Combustion test of different aerogels

3 结 语

以正硅酸乙酯为硅源、CNF 为增强材料,经过超临界干燥制备了生物质复合气凝胶。结果表明,所制备的生物质气凝胶具有典型的低密度、高比表面积的特点,并具有介孔结构。CNF 的引入有效弥补了二氧化硅气凝胶强度较低、易碎的不足,提高了强度(50%应变时,SCA 的压缩应力较 SA 最高提升 87%),拓宽了二氧化硅气凝胶的应用领域。经三甲基氯硅烷疏水改性后,生物质复合气凝胶具有稳定的超疏水性,水接触角最大为 164.97° ,较纯二氧化硅气凝胶最高提升 31.66° 。此外,加入 CNF 这一易燃有机物后,生物质复合气凝胶依然具有优异的防火性能。然而,CNF 含量的增加会对高温热稳定性产生不利影响,在实际应用时需考虑 CNF 的添加量,以满足不同应用场景的需求。未来的研究将进一步优化生物质复合气凝胶的制备工艺,并挖掘其在新能源、新材料等领域中的应用潜力。

参考文献:

[1] Pan Bichen, Ren Penghe, Zhou Tejun, et al. Microstructure and property of thermal insulation coating on the carbon fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Journal of Inorganic Materials, 2020, 35 (8): 947-952.

[2] Wu Yiwei, Zhang Wenchao, Yang Rongjie. Ultralight and

low thermal conductivity polyimide-polyhedral oligomeric silsesquioxanes aerogels [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303 (2): 1700403.

- [3] 胡益婧,胡晶晶,张宏宇,等. 二氧化硅气凝胶的制备及性质研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53 (6): 891-894.
- [4] Ahmad S, Ahmad S, Sheikh J N. Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications: a review [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2023, 611: 122322.
- [5] Choi H, Han H H, Parale V G, et al. Rigid amine-incorporated silica aerogel for highly efficient CO₂ capture and heavy metal removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 483: 149357.
- [6] Karamikamkar S, Yalcintas E P, Haghniaz R, et al. Aerogel-based biomaterials for biomedical applications: from fabrication methods to disease-targeting applications [J]. Advanced Science, 2023, 10 (23): 2204681.
- [7] Mazrouei-Sebdani Z, Begum H, Schoenwald S, et al. A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2021, 562: 120770.
- [8] 宫学斌,刘元军,赵晓明. 热防护用气凝胶材料的研究进展 [J]. 纺织学报, 2022, 43 (6): 187-196.
- [9] 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.
- [10] Zhao Shanyu, Siqueira G, Drdova S, et al. Additive manufacturing of silica aerogels [J]. Nature, 2020, 584 (7821): 387-392.
- [11] 冯扬. 赤藓糖醇/碳纳米管/SiO₂ 气凝胶定形相变材料的制备与性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022: 1-32.
- [12] 谢擎宇,刘文龙,王思哲,等. 氧化石墨烯掺杂二氧化硅气凝胶的特性研究 [J]. 电子元件与材料, 2024, 43 (2): 162-168.
- [13] 翟俊俊,赵思,肖秦箭,等. 生物质气凝胶的疏水改性及应用研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (23): 174-188.
- [14] Song Limeng, Zhang Fan, Chen Yongqiang, et al. Multifunctional SiC@SiO₂ nanofiber aerogel with ultrabroadband electromagnetic wave absorption [J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14 (1): 152.
- [15] Bethke K, Palantöken S, Andrei V, et al. Functionalized

(下转第 62 页)

- voltage elimination strategy for reduced-voltage-sensor-based MMC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 132: 107181.
- [8] Khan M N H, Barzegarkhoo R, Siwakoti Y P, et al. A new switched-capacitor multilevel inverter with soft start and quasi resonant charging capabilities[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107412.
- [9] 姜晓杰. 基于 60°坐标系下三电平 NPC 逆变器控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020: 1-30.
- [10] 朱敏龙, 宋慧庆, 李宇航, 等. NPC 型三电平逆变器可视化三矢量无模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 110-122.
- [11] 苏畅, 许立斌, 于新红, 等. 裂相 T 型三电平逆变器连续集并行预测控制策略[J]. 电力电子技术, 2025, 59(9): 32-38.
- [12] 朱虹, 张兴, 李明, 等. T 型三电平逆变器模型预测多目标优化控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 90-96.
- [13] Chitra K, Kamatchikannan V, Viji K, et al. Simple boost PWM controlled cascaded quasi Z-source inverter[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 3161-3169.
- [14] Robles E, Fernandez M, Andreu J, et al. Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage elimination in electric motor drive systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 140: 110746.
- [15] Guo Xifeng, Sun Shaobin, Liang Xue, et al. Model predictive current control for two-phase switches clamping of three-phase inverter[J]. Energy Reports, 2020, 6: 164-172.
- [16] Li Po, Li Ruiyu, He Ying, et al. Adaptive finite control set model predictive control for three-phase inverters connected to distorted grid with fewer voltage sensors[J]. Control Engineering Practice, 2021, 116: 104936.
- 责任编辑: 周建军
-
- (上接第 54 页)
- cellulose for water purification, antimicrobial applications, and sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(23): 1800409.
- [16] Gorgieva S, Trček J. Bacterial cellulose: production, modification and perspectives in biomedical applications[J]. Nanomaterials, 2019, 9(10): 1352.
- [17] Nadeem H, Athar M, Dehghani M, et al. Recent advancements, trends, fundamental challenges and opportunities in spray deposited cellulose nanofibril films for packaging applications[J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: 155654.
- [18] 张潇, 胡豪, 侯庆喜, 等. 纤维素基气凝胶在保温隔热领域中的研究进展[J]. 中国造纸, 2023, 42(2): 86-93.
- [19] 赵佳音. 疏水性二氧化硅气凝胶的制备及其性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023: 1-28.
- [20] Estok S K, Hughes T A, Carroll M K, et al. Fabrication and characterization of TEOS-based silica aerogels prepared using rapid supercritical extraction[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2014, 70: 371-377.
- [21] Tamon H, Kitamura T, Okazaki M. Preparation of silica aerogel from TEOS[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 197(2): 353-359.
- [22] 丁婉怡, 张宏宇, 胡晶晶, 等. 正硅酸四乙酯制备二氧化硅气凝胶及其性质研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53(6): 895-898.
- [23] 赵佳音, 刘再满, 黎白钰. 疏水性二氧化硅气凝胶的制备及其性能研究[J]. 生物化工, 2023, 9(4): 102-105.
- [24] 李绍秀, 崔逸阳, 潘郑宇, 等. 钙锰修饰磁性碳纳米管的制备与表征[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3360-3366.
- [25] 王美月. 二氧化硅气凝胶及其复合材料的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 1-30.
- [26] Peng Fei, Jiang Yonggang, Feng Jian, et al. Thermally insulating, fiber-reinforced alumina-silica aerogel composites with ultra-low shrinkage up to 1 500 °C[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 411: 128402.
- [27] 何辉, 姜勇刚, 张忠明, 等. 二氧化硅气凝胶隔热复合材料的高温疏水改性及失效机制[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1813-1820.
- [28] 王小路, 黄晋, 张友寿, 等. 耐火保温材料现状及发展[J]. 耐火材料, 2016, 50(1): 75-80.
- [29] 柳敦雷, 陆佳颖, 薛甜甜, 等. 超疏水隔热聚酯纳米纤维/二氧化硅气凝胶复合膜的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2023, 44(7): 18-25.
- [30] 顾依怡, 王子扬, 孙绍刚, 等. 冰模板法制备纳米纤维素气凝胶及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 226-230.
- [31] 时吉磊, 唐春霞, 付少海, 等. 柔韧隔热纤维素基气凝胶制备与性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(4): 8-14.
- [32] 陆慰萱. UL—94 标准阻燃性能的测定方法[J]. 塑料通讯, 1995(1): 40-42.
- 责任编辑: 周建军