

以乙醇/水为溶剂体系制备硅气凝胶及其复合材料的研究进展

赵洪凯 刘 明 刘一甫

(吉林建筑大学材料科学与工程学院, 长春 130118)

摘 要 以乙醇/水为溶剂体系在常压条件下制备硅气凝胶及其复合材料, 取代了传统制备过程中复杂的溶剂替换和表面修饰过程, 缩短了制备周期, 降低了生产成本。从制备硅气凝胶的硅源出发, 综述了在常压条件下以正硅酸乙酯、硅溶胶、水玻璃、甲基三甲/乙氧基硅烷等为单一硅源和复合硅源, 以乙醇/水为溶剂制备硅气凝胶及其复合材料的研究进展。以此工艺制备的硅气凝胶及其复合材料具有较低的密度和导热系数, 较高的比表面积, 力学性能优良。

关键词 硅气凝胶, 乙醇/水体系, 常压, 制备方法

中图分类号 TQ427.6

文献标识码 A

文章编号: 1006-3536(2021)01-0218-05

DOI: 10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.01.048

Research progress on preparation of silica aerogel and its composite using ethanol/water as solvent system

Zhao Hongkai Liu Ming Liu Yifu

(School of Materials Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118)

Abstract Ethanol/water is a solvent system for preparing silica aerogel and its composite materials under normal pressure, which replaces the complicated solvent replacement and surface modification processes in the traditional preparation process, shortening the preparation cycle and reducing production costs. Starting from the silica source for the aerogel preparation, under normal pressure conditions, TEOS, silica sol, water glass, MTMS/MTES, etc. Research progress on the preparation of the silica aerogel and its composite materials with single silica source and composite silica source using ethanol/water as solvent. The silica aerogel and its composite materials prepared by this process have lower density and thermal conductivity, higher specific surface area, and excellent mechanical properties.

Key words silica aerogel, ethanol/water system, normal pressure, preparation

硅气凝胶是一种由 90% 以上的纳米多孔基质和 10% 以下的非晶 SiO_2 颗粒相互聚集组成的一种具有三维骨架结构的新型多孔功能材料^[1], 具有密度小、导热系数低、比表面积高、孔隙体积大等特点^[2]。自 1931 年 Kistler 以水玻璃为源首次制备出硅气凝胶以来, 关于硅气凝胶的研究取得了迅猛发展^[3]。由于以乙醇/水为溶剂体系制备硅气凝胶及其复合材料在保证样品性能的同时, 取代了传统制备过程中复杂的溶剂替换和表面修饰过程, 降低了干燥过程中制品发生开裂的概率, 简化了制备工艺, 缩短了制备周期, 降低了制备成本, 扩大了应用领

域, 得到了许多研究人员的关注。笔者从制备硅气凝胶的硅源出发, 介绍了单一硅源和单一硅源复合后, 在常压条件以乙醇/水为溶剂制备硅气凝胶及其复合材料的研究进展。

1 单一硅源制备硅气凝胶及其复合材料

1.1 以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源制备

Liu 等^[4] 将埃洛石纳米管(HNTs)分散在 10 mL 二甲基甲酰胺(DMF)中, 加入 6 mL TEOS、10 mL 乙醇(EtOH)和 4 mL 水(H_2O), 搅拌 30 min 后超声处理 60 min, 加入 0.07 mL 35% 氨水($\text{NH}_3 \cdot$

收稿日期: 2020-05-28; 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 吉林省发展和改革委员会产业技术与开发项目(2020C027-4); 吉林省大学生创新创业训练计划项目(8570036506)

作者简介: 赵洪凯(1974-), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事复合材料研究, E-mail: hkzhao003@126.com。

H₂O)搅拌后超声处理 20~30min,在 40℃下干燥 4d 制备出 HNTs/SiO₂ 复合气凝胶。该气凝胶的导热系数为 0.025~0.038W/(m·K),抗压强度为 400kPa~1.45MPa,可作为建筑保温材料。Liu 等^[6]将摩尔比为 1:7:4 的 TEOS、EtOH 和 H₂O 在 60℃下混合搅拌 30min,添加自制的泡沫碳和 HCl 在 50℃搅拌 1h 后,滴加 NH₃·H₂O 至 pH 为 7,50℃搅拌 10min 后在室温下老化,最后常压干燥制备泡沫碳/硅气凝胶复合材料。该制品的导热系数为 0.169W/(m·K),抗压强度为 10.17MPa,可作为隔热材料使用。Gao 等^[6]将 22.3mL TEOS、47.1mL EtOH、5.7mL DMF 在 500℃下混合加热 2h,加入 0.01g HCl 和 10.8mL H₂O 搅拌 30min,冷却后加入 36.78mL 1,2-环氧丙烷静置 25min 后在 EtOH 中老化 24h,最后使用有机溶剂升华干燥法制备硅气凝胶。该制备方法可根据实际需要控制硅气凝胶的比表面积、孔径和孔容,有利于硅气凝胶的实际应用。Li 等^[7]将 210mL NH₃·H₂O 与 270mL H₂O 混合加热,加入 0.855g 十二烷基硫酸钠(SDS)搅拌后加入 1.145g 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB),反应 30min 后滴入 10mL TEOS,2h 后用 EtOH 洗涤,在 50℃下干燥,然后在 550℃干燥 5.5h 制备硅气凝胶。该气凝胶的表观密度为 0.047g/cm³,比表面积为 856m²/g,孔隙率为 97.9%。

1.2 以硅溶胶为硅源制备

王少伟等^[8]用 1mol/L HCl 调节硅溶胶的 pH,加入 EtOH 在 60℃水浴中得到湿凝胶,在 50℃EtOH 中浸泡 3 次(24h/次)后用 TEOS/EtOH 混合液浸泡 24h,继续在 EtOH 中浸泡 3 次(24h/次),最后在 60℃干燥 48h 制备硅气凝胶。加入到含有 KH550 的 50℃水浴中,溶解后加入醋酸乙烯-乙烯共聚乳液后浸入玻璃纤维超声处理 20min,最后在 60℃干燥 12h 制备出 SiO₂ 气凝胶/玻纤棉复合材料。该材料的导热系数为 0.013W/(m·K),可满足隔热需求。He 等^[9]将摩尔比为 1:4:4 的 TEOS、EtOH 和 H₂O 在 40℃混合 10min 制备硅溶胶,加入 0.2mol HCl 搅拌 1h 后加入尿素搅拌 15min 后浸入到氧化铝模板中,在 90℃下干燥 3h 制备铝-硅复合气凝胶。该气凝胶的孔隙体积为 1.399cm³/g,孔隙率为 82.84%,比表面积为 0.374m²/g。赵晶晶等^[10]将 0.2g CTAB 溶于 H₂O 中,加入 10mL 硅溶胶搅拌 15min 后加入 HF,继续搅拌 20min 后在 50℃下静置凝胶,最后在 70℃下干燥制备硅气凝

胶。该气凝胶的密度为 0.158g/cm³,热导率为 0.048W/(m·K),比表面积为 119.5m²/g。Chen 等^[11]将 10mL SiO₂ 水溶胶与 30mL H₂O 混合搅拌 5min,加入表面活性剂和 HCl 使 pH 为 2—5,搅拌 15min 后加入 NH₃·H₂O 至 pH 为 8—9,搅拌 15min 后在 50℃下老化 4h,先在 60℃下干燥 2d,然后在 75℃干燥 1d 制备硅气凝胶。研究了不同表面活性剂对硅气凝胶性能的影响,结果表明,使用两性表面活性剂(RALUFON414)制备的硅气凝胶具有更高的比表面积,更低的热导率,而用阳离子表面活性剂(CTAB)和阴离子表面活性剂(SDS)制备的硅气凝胶具有更好的热稳定性。Sanosh 等^[12]分别以 TEOS 和 H₂O 为前驱体和溶剂制备了 pH 为 7 的硅溶胶,将玻璃纤维浸渍到硅溶胶中在铝模板上凝胶和老化,在真空干燥机中 16℃干燥,最后在 500℃下热处理 30min 制备 SiO₂ 低温凝胶-玻璃纤维复合材料,该复合材料的密度为 0.13~0.24g/cm³,导热系数为 0.02~0.035W/(m·K),在绝热材料和催化剂载体等领域具有广阔的应用前景。

1.3 以水玻璃为硅源制备

张小婷等^[13]将水玻璃溶液总质量 4%的 EtOH 和 3%的 H₂O 搅拌 1min 后加入硅酸铝纤维,将其加入到水玻璃溶液($V_{\text{水玻璃}}:V_{\text{水}}=1:8$)中搅拌 10min 后加入 HCl 调节 pH 为 2—3,搅拌 30min 后加入 NH₃·H₂O 调节 pH 至 6—7,凝胶后在空气中老化 48h,最后在 60℃下常压干燥得到硅气凝胶复合材料。该材料的导热系数为 0.021W/(m·K),抗压强度为 6.11MPa,具有优异的柔韧性。Yang 等^[14]将 5g H₂O 和 0.5g 聚苯乙烯在 35mL H₂O 中超声分散 10min,加入 0.1~0.2g CTAB 搅拌 30min 后滴加 0.1mol/L 硅酸钠溶液,加入 HCl 调节 pH,80℃搅拌 2h 后以 12000r/min 的转速离心后在 80℃下干燥,最后在 600℃煅烧 5h 制备出硅气凝胶纳米球。该材料的平均直径为 250nm,壳层平均厚度 12~18nm,可应用于建筑保温领域。Huang 等^[15]用 H₂O 稀释水玻璃后使用离子交换树脂去除 Na⁺,加入 EtOH 搅拌均匀后加入 2mol/L NH₃·H₂O 至 pH 为 6,倒入到玻璃纤维模具中静置凝胶后在 45℃EtOH 中老化 4h,用羟甲基糠醛和浓盐酸在 45℃浸泡 12h,最后常压干燥制备硅气凝胶毡。该材料的导热系数可低至 0.026W/(m·K),且具有优异的抗弯性能。

1.4 以三甲氧基硅烷(MTMS)为硅源制备

Luo 等^[16]以体积比为 1:5 的 EtOH/H₂O 混合

5mL MTMS 和 0.1g CTAB, 加入 1mL 0.1mol/L HCl 后在 45℃ 水浴中水解 30min, 加入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (1mol/L , $V_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}} : V_{\text{MTMS}} = 0.2$), 在 45℃ 水浴中凝胶后在 60℃ 水浴中老化 4h, 最后常压干燥合成硅气凝胶。该气凝胶密度为 0.0968g/cm^3 , 导热系数为 $0.037\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 热稳定性最高可达 528.1°C 。Zhang 等^[17] 将 14.2mL MTMS、42.3mL EtOH、14.4mL H_2O 和 5mL 0.1mol/L 水醋酸混合, 在 35℃ 下搅拌 30min, 加入用 42.3mL EtOH 稀释的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 搅拌 10min 后, 在 25℃ 密封凝胶, 用 42.3mL EtOH 浸泡 6h, 最后在 40℃ 干燥合成硅气凝胶。该气凝胶密度为 0.088g/cm^3 , 比表面积为 $502\text{m}^2/\text{g}$, 导热系数为 $0.018\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。Du 等^[18] 将摩尔比为 $1:7.9 \times 10^{-3}:7.63:15.93$ 的 MTMS、EtOH、CTAB、 H_2O 混合, 加入 0.1mol/L HNO_3 搅拌 10min, 密封静置 1h 后加入 0.1mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 搅拌 10min 后浸渍莫来石纤维, 在 45℃ 下凝胶后在 60℃ 下老化 24h, 最后常压干燥合成莫来石纤维复合气凝胶。当纤维含量为 5.7% 时, 该材料的导热系数为 $0.0403\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 最低密度为 0.249g/cm^3 , 抗压强度为 0.1082MPa , 是一种经济有效的保温材料。Cheng 等^[19] 将 0.5mL HCl、0.02g CTAB、25mL H_2O 、5mL MTMS 混合搅拌 30min, 加入 0.5mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 催化凝胶, 室温老化 1h 后常压干燥制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 0.079g/cm^3 , 孔隙率为 96.1%, 热稳定性达到 490°C 。Yun 等^[20] 将 MTMS 溶解在质量分数为 0.25% 的 CTAB 溶液中, 搅拌 30min 后滴加 14mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 至 pH 为 10, 静置 3h 后在 60℃ H_2O 中浸泡 12h, 先在 80℃ 下干燥 24h, 最后在 120℃ 干燥 12h 制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 75kg/m^3 , 导热系数为 $0.036\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 可应用于保温节能领域。

1.5 以甲基三乙氧基硅烷(MTES)为硅源制备

Shao 等^[21] 将摩尔比为 $1:8:16$ 的 MTES、EtOH、 H_2O 混合, 200r/min 搅拌 12h 后添加氨催化剂凝胶, 浸入 55℃ EtOH 中 24h, 最后在 480℃ 干燥制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 0.10g/cm^3 , 孔隙率为 99.5%, 导热系数为 $0.038\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。Zhu 等^[22] 将摩尔比为 $1:4:10:0.8$ 的 MTES、 H_2O 、EtOH 和乙酸混合, 加入 10mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 至 pH 为 8, 浸入魔芋葡甘聚糖气凝胶 0.5h, 在 50℃ EtOH 中陈化 24h, 最后冷冻干燥制备复合气凝胶。该气凝胶的比表面积为 $416.1\text{m}^2/\text{g}$, 导热系数为

$0.032 \sim 0.029\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 疏水角为 146° , 可应用于隔热领域。He 等^[23] 将摩尔比为 $1:4:6:0.8$ 的 MTES、EtOH、 H_2O 和醋酸混合水解 24h, 加入 10mol/L $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 浸渍细菌纤维素 30min 后在 EtOH 中老化 24h, 最后冷冻干燥制备细菌纤维素复合硅气凝胶。该气凝胶具有超疏水性(接触角 152°), 超亲油性(其质量的 10 倍), 油水混合物吸收快等特点。He 等^[24] 将 5.5mL MTES 和 10mL EtOH 与 $0.7 \sim 1.5\text{mL}$ H_2O 混合搅拌 16h, 加入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 调节 pH, 搅拌 5min 后在模具中凝胶, 在 55℃ 静置 48h 后在 80℃ 干燥制备硅气凝胶。该气凝胶的接触角为 140° , 导热系数为 $0.038\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。Chen 等^[25] 将 2mL MTES 和 22.4mL H_2O 混合, 加入 0.2mL HCl 搅拌 0.5h, 加入 NaOH 调节 pH 为 10, 浸入羟乙基纤维素(HEC)活化聚氨酯(PU)复合材料在 50℃ 老化 3h, 用 H_2O 清洗后冷冻干燥制备出 PU/HEC/ SiO_2 复合材料。该制品吸油量为自身质量的 36—75 倍, 在油水分离领域具有广阔的应用潜力。

2 复合硅源制备硅气凝胶及其复合材料

2.1 TEOS 和 MTMS/MTES 复合制备

Meng 等^[26] 将体积比为 $1:1:2$ 的 TEOS、MTMS 和 EtOH 混合, 浸入海藻酸盐纤维水凝胶后用 H_2O 洗涤凝胶, 经冷冻干燥制备海藻酸盐纤维复合气凝胶。该气凝胶的孔隙率为 95.6%, 体积密度为 0.026g/cm^3 , 比表面积为 $80\text{m}^2/\text{g}$, 吸油能力为自身质量的 65 倍。Yoon 等^[27] 将质量比为 $4:1$ 的 EtOH 和 NaOH 水溶液混合, 添加溶剂质量 3.2% 和 2.1% 的 TEOS 和 MTMS 室温保持 2h, 均匀分布到泡沫混凝土中, 施加 $5 \sim 10\text{toor}$ 的负压 2h 后在室温干燥 24h, 重复 3 次制备出纳米硅气凝胶泡沫混凝土。该材料的导热系数为 $0.086\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 接触角为 120.8° , 表观密度为 0.31g/cm^3 , 28d 抗压强度为 0.78MPa , 在建筑结构保温材料领域有巨大的应用潜力。Parin 等^[28] 将摩尔比为 $2:4:0.1$ 的 EtOH/TEOS + MTES、 $\text{H}_2\text{O}/\text{TEOS} + \text{MTES}$ 、HCl/TEOS+MTES 混合搅拌 30min 后, 用 EtOH 稀释至 SiO_2 浓度为 1.3mol/L , 按 4.8cm/min 的速度沉积在铝基体上, 常压加热制备 SiO_2 复合涂料, 该产品在高温、高蒸汽环境中具有良好的耐久性, 且有轻微疏水行为, 是一种有前途的滴状冷凝促进剂。

2.2 TEOS 复合其他硅源制备

Liang 等^[29]将摩尔比为 1:0.2:0.83:0.096~0.86 的 TEOS、H₂O、EtOH、NH₃·H₂O 混合后浸入铝基板室温搅拌 4h,加入与 TEOS 摩尔比为 1:1 的乙烯基三乙氧基硅烷搅拌 3h 后用 EtOH 清洗后在 60℃ 干燥 2h,制备出最大净水接触角为 154.9° 的疏水气凝胶薄膜。Başgöz 等^[30]将 5g 稻壳灰在 95℃ 下加入到 150mL 1mol/L NaOH 溶液中,过滤后得到水玻璃溶液,经 1mol/L H₂SO₄ 中和后加入 1/10 体积的 TEOS,凝胶后在室温下老化 24h 后用 H₂O 清洗,最后在 120℃ 干燥 1h 制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 2.2g/cm³,比表面积为 241m²/g,平均颗粒大小为 100nm 左右。

2.3 其他复合硅源制备

Chen 等^[31]在 7.5mL EtOH 中加入摩尔比为 2:1 的 APTES 和对苯二甲醛,加入到 MTMS 中超声处理 10min,加入乙酸和 1mL H₂O,超声处理后密封凝胶,60℃ 下老化 12h 后,用 EtOH 浸泡 4 次(12h/次),40℃ 真空干燥后在 80℃ 干燥制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 0.071g/cm³,接触角大于 140°,杨氏模量为 29.4~893.9kPa,在分离/提取特殊有机污染物和油类方面具有广阔的应用前景。Chen 等^[32]将质量比为 9:1:5:30 的(MTMS+TESEA)、PDMS、CTAB、H₂O 混合搅拌 30min,加入 3% (质量分数)的三芳基磺酸盐,用波长为 365nm 的 250W LED 灯以光强为 400mW/cm² 对溶液进行光催化后,利用体积比为 1:1 的水和 2-丙醇溶液洗去未反应的溶剂,最后在 40℃ 干燥制备硅气凝胶。该气凝胶的密度为 0.098g/cm³,孔隙率为 94.8%,可用于油水分离。

3 结语与展望

综上,无论是单一硅源还是复合硅源,在常压条件下以乙醇/水为溶剂制备硅气凝胶,缩短了制备周期,降低了生产成本,避免了复杂的溶剂替换和表面修饰过程,使硅气凝胶的制备过程变的更加安全、高效、环保,同时产品性能达到了预期的要求。这有助于开发出更多、更有效的硅气凝胶制备方法,加快硅气凝胶产品的大面积推广应用。同时通过添加增强体材料,可进一步提高硅气凝胶及其复合材料的性能,扩展硅气凝胶的应用领域,开发出更多满足人们需求的新型硅基气凝胶材料。因此,在常压条件下以乙醇/水为溶剂制备硅气凝胶及其相关复合材料的研究,必将成为下一阶段硅气凝胶研究

领域中的热点。

参考文献

- [1] Salimian S, Zadhoush A. Water-glass based silica aerogel; unique nanostructured filler for epoxy nanocomposites[J]. Journal of Porous Materials, 2019, 26(6): 1755-1765.
- [2] 赵洪凯, 许亚军. 硅气凝胶增强增韧的研究进展[J]. 无机盐工业, 2019, 51(1): 12-15.
- [3] Kistler S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. Nature, 1931, 127(3211): 741.
- [4] Liu H, Chu P, Li H, et al. Novel three-dimensional halloysite nanotubes/silica composite aerogels with enhanced mechanical strength and low thermal conductivity prepared at ambient pressure[J]. Journal of Sol Gel Science & Technology, 2016, 80(3): 651-659.
- [5] Liu H, Li T, Shi Y, et al. Thermal insulation composite prepared from carbon foam and silica aerogel under ambient pressure[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2015, 24(10): 4054-4059.
- [6] Gao B, Lu S, Kalulu M, et al. Synthesis of silica aerogel monoliths with controlled specific surface areas and pore sizes[J]. Materials Research Express, 2017, 4(7): 075020.
- [7] Li W, Li Fengyun, Zhuo Fanlu, et al. Preparation of silica aerogels using CTAB/SDS as template and their efficient adsorption[J]. Applied Surface Science, 2015, 353(30): 1031-1036.
- [8] 王少伟, 邵亚国. 二氧化硅气凝胶/玻纤棉复合材料导热性的研究[J]. 玻璃纤维, 2019(1): 9-14.
- [9] He F, Zhou L, Zhang X, et al. Synthesis and anisotropic properties of properties of alumina-silica aerogels constructed by silica sols anfiltrated into unidirectional frozen alumina templates[J]. Ceramics International, 2019, 45(9): 11963-11970.
- [10] 赵晶晶, 沈军, 邹丽萍, 等. 纯水体系 SiO₂ 纳米多孔材料的低成本制备与表征[J]. 无机材料学报, 2015, 30(10): 1081-1084.
- [11] Chen D, Wang X, Ding W, et al. Silica aerogel monoliths derived from silica hydrosol with various surfactants[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3192-3202.
- [12] Sanosh K, Ehsan U, Antonio L, et al. Synthesis of silica cryogel-glass fiber blanket by vacuum drying[J]. Ceramics International, 2016, 42(6): 7216-7222.
- [13] 张小婷, 汪潇, 杨浩远, 等. pH 值对纤维增强 SiO₂ 气凝胶隔热材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2668-2672, 2679.
- [14] Yang Y, Yorong, Li Fangxian, Xiao Min, et al. TEOS and Na₂SiO₃ as silica sources; study of synthesis and characterization of hollow silica nanospheres as nano thermal insulation materials[J]. Applied Nanoence, 2020, 10(6): 1833-1844.
- [15] Huang Yajun, He Song, Chen Guangnan, et al. Fast preparation of glass fiber/silica aerogel blanket in ethanol & water solvent system[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 505: 286-291.
- [16] Luo Yan, Li Zhi, Zhang Wei, et al. Rapid synthesis and characterization of ambient pressure dried monolithic silica aerogels

- in ethanol/water co-solvent system[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 503-504: 214-233.
- [17] Zhang J, Kong Y, Jiang X, et al. Synthesis of hydrophobic silica aerogel and its composite using functional precursor[J]. *J Porous Mater*, 2020, 27(1): 295-301.
- [18] Du Dongxuan, Jiang Yonggang, Feng Junzong, et al. Facile synthesis of silica aerogel composites via ambient-pressure drying without surface modification or solvent exchange[J]. *Vacuum*, 2020, 173: 109117.
- [19] Cheng Xudong, Li Congcong, Shi Xiaojing, et al. Rapid synthesis of ambient pressure dried monolithic silica aerogels using water as the only solvent[J]. *Materials Letters*, 2017, 204: 157-160.
- [20] Yun S, Guo T, Zhang J, et al. Facile synthesis of large-sized monolithic methyltrimethoxysilane-based silica aerogel via ambient pressure drying[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2017, 83(1): 53-63.
- [21] Shao Zaidong, He Xiaoyong, Cheng Xuan, et al. A simple facile preparation of methyltriethoxysilane based flexible silica aerogel monoliths[J]. *Materials Letters*, 2017, 204: 93-96.
- [22] Zhu Jundong, Hu Jiang, Jiang Chongwen, et al. Ultralight, hydrophobic, monolithic konjac glucomannan-silica composite aerogel with thermal insulation and mechanical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 207: 246-255.
- [23] He J, Zhao H, Li X, et al. Superelastic and superhydrophobic bacterial cellulose/silica aerogels with hierarchical cellular structure for oil absorption and recovery[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 346(15): 199-207.
- [24] He X, Cheng X, Zhang Y, et al. Multiscale structural characterization of methyltriethoxysilane-based silica aerogels[J]. *Journal of Materials Ence*, 2018, 53(2): 994-1004.
- [25] Chen Junyong, Yue Xian, Xiao Zhou, et al. In-situ synthesis of hydrophobic polyurethane ternary composite induced by hydroxyethyl cellulose through a green method for efficient oil removal[J]. *Polymers*, 2020, 12(3): 509.
- [26] Meng C, Zhang H, Zhang S, et al. The preparation of hydrophobic alginate-based fibrous aerogel and its oil absorption property[J]. *Sol-Gel Sci Technol*, 2018, 87: 704-712.
- [27] Yoon H S, Lim T K, Jeong S M, et al. Thermal transfer and moisture resistances of nano-aerogel-embedded foam concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117575.
- [28] Parin R, Rigon M, Bortolin S, et al. Optimization of hybrid sol-gel coating for dropwise condensation of pure steam[J]. *Materials*, 2020, 13(4): 878.
- [29] Liang Jin, Hu Yunchu, Wu Yiqiang, et al. Facile formation of superhydrophobic silica-based surface on aluminum substrate with tetraethylorthosilicate and vinyltriethoxysilane as co-precursor and its corrosion resistant performance in corrosive NaCl aqueous solution[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 240: 145-153.
- [30] Başgöz Öyküm, Güler Ömer. The unusually formation of porous silica nano-stalactite structure by high temperature heat treatment of SiO₂ aerogel synthesized from rice hull[J]. *Ceramics International*, 2020, 46: 370-380.
- [31] Chen D, Gao H, Jin Z, et al. Vacuum-dried synthesis of low-density hydrophobic monolithic bridged silsesquioxane aerogels for oil/water separation; effects of acid catalyst and its excellent flexibility[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018, 1(2): 933-939.
- [32] Chen Y, Yang H, Nie J, et al. Synthesis of highly flexible silica aerogels by photoacids generation[J]. *Porous Mater*, 2017, 25(4): 1027-1034.

—————
(上接第 217 页)

- [23] Zhu F C, Su J J, Wang M J, et al. Study on dual-monomer melt-grafted poly(lactic acid) compatibilized poly(lactic acid)/polyamide 11 blends and toughened melt-blown nonwovens[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, 49(6): 1-25.
- [24] 朱斐超. 尼龙 11/埃洛石纳米管复合聚乳酸材料及其增强增韧熔喷非织造材料的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [25] 夏忠福. 聚合物驻极体气体和空气过滤材料在环境净化工程中的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 15(8): 57-58.
- [26] 任煜, 李猛, 尤祥银. 驻极处理对聚乳酸熔喷材料性能的影响[J]. *纺织学报*, 2015, 36(9): 13-17.
- [27] Zhang J, Chen G, Bhat G S, et al. Electret characteristics of melt-blown polylactic acid fabrics for air filtration application[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 137(4): 48309-48314.
- [28] 于斌, 韩建, 余鹏程, 等. 驻极体对熔喷用 PLA 材料热性能及可纺性的影响[J]. *纺织学报*, 2013, 34(2): 82-85.
- [29] 蔡诚, 唐国翌, 宋国林, 等. 纳米 SiO₂ 驻极体/聚乳酸复合熔喷非织造材料的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(3): 486-493.
- [30] 黄海超, 宋国林, 唐国翌, 等. 驻极体-增塑剂复合改性聚乳酸熔喷非织造材料的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(3): 563-571.
- [31] Yu B, Wang M J, Sun H, et al. Preparation and properties of poly(lactic acid)/magnetic Fe₃O₄ composites and nonwovens[J]. *RSC Advances*, 2017, 7: 41929-41935.
- [32] 黄翔, 王与娟, 樊丽娟, 等. 新型功能性空气过滤材料研究进展[J]. *暖通空调*, 2009, 39(1): 49-52.
- [33] Łatwińska M, Sójka-Ledakowicz J, Chruściel J, et al. PLA and PP composite nonwoven with antimicrobial activity for filtration applications[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 2013: 1-9.
- [34] Kudzin M H, Mrozińska Z. Biofunctionalization of textile materials. 2. antimicrobial modification of poly(lactide) (PLA) nonwoven fabrics by fosfomycin[J]. *Polymers*, 2020, 12(4): 768-783.