

不同硅铝比粉煤灰制备 AF/Si-Al 气凝胶的综合性能研究

高立彦,任苑茹,梁海霞*

(太原理工大学环境与生态学院,山西太原 030000)

摘要:选用 3 种不同硅铝比粉煤灰(0.9、1.3、2.0)为原料,制备了芳纶纤维增强 SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶(AF/Si-Al 气凝胶)复合材料。结果表明,粉煤灰的硅铝比显著影响 Si-Al 气凝胶的孔径分布及综合性能:硅铝比低时,小孔比例高,材料表现为刚性,具有较好的单轴抗压能力;硅铝比高时,大孔比例增加,材料的柔韧性显著提高。通过引入芳纶纤维,该复合材料增强了机械强度和结构完整性,同时保持了优异的隔热性能。该方法为利用粉煤灰制备 Si-Al 气凝胶提供新思路,并为气凝胶复合材料的开发奠定了理论基础。

关键词:SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶;硅铝比;芳纶纤维;孔径分布;机械性能;热性能

中图分类号:X750

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0144-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.026

Comprehensive properties of AF/Si-Al aerogel prepared from fly ash with different Si/Al ratios

GAO Li-yan, REN Yuan-ru, LIANG Hai-xia*

(College of Environment and Ecology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Fly ash with different Si/Al ratios (0.9, 1.3 and 2.0) is used to prepare aramid fiber-reinforced SiO₂-Al₂O₃ aerogel (AF/Si-Al aerogel). The results demonstrate that Si/Al ratio of fly ash influences significantly the pore size distribution and overall performance of the aerogel. The aerogel with a low Si/Al ratio exhibits a higher proportion of small pores and better compressive strength, while that with a high Si/Al ratio has a higher proportion of large pores, presenting an improved flexibility and a better bending performance. Additionally, the addition of aramid fiber enhances the mechanical strength and structural integrity of the composite while maintaining excellent thermal insulation performance. This study provides a new approach for the high-value utilization of fly ash to make Si-Al aerogel, and lays a theoretical foundation for the development of aerogel composite.

Key words: SiO₂-Al₂O₃ aerogel; Si/Al ratio; aramid fiber; pore size distribution; mechanical properties; thermal performance

SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶(Si-Al 气凝胶)是一种兼具高比表面积(500~1 200 m²/g)、高孔隙率(>99%)及低密度(0.03~0.05 g/cm³)的先进功能材料。发达的介孔网络(孔径为 5~100 nm)赋予其优异的隔热、吸声和耐火性能,使之在航空航天、建筑、催化等领域展现出广泛的应用潜力^[1]。

为降低原料成本,越来越多的研究开始探索廉价硅铝源的替代可能性^[2],其中粉煤灰(FA)因其硅铝总含量高而成为备受关注的候选材料^[3-4]。Shen 等^[5]以 FA 为原材料,通过碱熔-酸浸-常压干燥制备出 Si-Al 气凝胶,其比表面积为 800 m²/g,经 900℃热处理 2 h 后为 74.88 m²/g,显示出了较好的耐高温性能。尽管 FA 在降低成本方面具有显著优

势,但由于其种类繁多,且成分比例因煤种不同而变化^[6],导致硅铝比(S/A)存在较大差异。例如,不同煤种形成的 FA 中, SiO₂ 含量为 15%~60%、Al₂O₃ 含量为 5%~35%。其中,烟煤 FA 的 SiO₂ 含量为 20%~60%、Al₂O₃ 为 5%~35%;次烟煤 FA 的 SiO₂ 含量为 40%~60%、Al₂O₃ 为 20%~30%;褐煤 FA 的 SiO₂ 含量为 15%~45%、Al₂O₃ 为 10%~25%^[7]。此外, Si-Al 气凝胶作为一种双组分气凝胶,其微观结构受硅铝比的显著影响^[8],这也直接决定了其综合性能的优劣。因此,如何选择适宜硅铝比的 FA 来制备不同类型的气凝胶,从而进一步优化其综合性能,成为当前研究面临的关键挑战。

然而, Si-Al 气凝胶因颗粒间颈的连接较为薄

收稿日期:2025-04-07;修回日期:2025-08-04

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U24A2047);山西省专利转化计划项目(202401010)

作者简介:高立彦(2000-),男,硕士生,研究方向为固废资源化处理, gly16634447360@163.com;梁海霞(1983-),女,博士,副教授,研究方向为微生物资源与生态、废弃物资源化利用、生态修复,通讯联系人, lianghaixia@tyut.edu.cn。

弱,具有脆性大、强度低等特点,限制了其在实际应用中的发展潜力。因此,Si-Al 气凝胶复合材料得到了更多关注和研究^[8]。最常见的策略是制备纤维/气凝胶复合材料,通过引入纤维作为增强相,能够显著改善气凝胶的机械强度和韧性,并在较高应力下保持其结构完整性^[9]。其中,芳纶纤维(AF)因其低密度、低导热系数、高机械强度以及良好的耐热性,成为增强气凝胶的理想选择^[10-11]。

本研究以 3 种硅铝比 FA 为原料,引入芳纶纤维作为增强相,制备了 AF/Si-Al 气凝胶复合材料。通过分析不同硅铝比对气凝胶微观结构的影响,进一步探讨了其综合性能(如机械性能和热性能)随硅铝比变化的规律,为 FA 制备高性能 Si-Al 气凝胶提供了新思路,并为其大规模利用奠定了理论基础。

1 实验

1.1 原料与试剂

本实验所用 FA 分别取自耀光、大河土和国金发电厂,如表 1 所示,硅铝比分别为 0.9、1.3、2.0,3 种 FA 均含有大量的硅铝元素。芳纶纤维(6 mm)、无水碳酸钠、浓硫酸(98%)、盐酸多巴胺、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)及三(羟甲基)氨基甲烷(Tris)等试剂均购自麦克林,所有化学试剂纯度均为分析纯。

表 1 3 种 FA 的化学成分

厂家	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	其他元素(SO ₃ 、CaO、 Fe ₂ O ₃ 等)/%	S/A
耀光发电厂	22.4	25.8	51.8	0.9
大河土发电厂	42.8	31.8	25.4	1.3
国金发电厂	46.2	22.8	31.0	2.0

1.2 仪器与设备

Zetium 型 X 射线荧光光谱,由荷兰 PANalytical 公司生产;SU-8600 型场发射扫描电子显微镜(SEM),由日立高新技术公司生产;ALPHA 型红外光谱分析仪(FT-IR)由德国布鲁克公司生产;Aeris 型 X 射线衍射仪(XRD),由荷兰 PANalytical 公司生产;MTS E43.104 型电子万能试验机,由美特斯工业系统公司生产;ASAP2020 型比表面积以孔隙度分析仪,由麦克默瑞提克公司生产;LPC 467HT 型激光导热仪,由德国耐驰公司生产。

1.3 芳纶纤维改性

为提高芳纶纤维与气凝胶基体的界面结合力,增强复合材料的综合性能,同时确保纤维本身性能不受影响,对芳纶纤维进行表面改性。首先,将芳纶

纤维浸泡在 1.2×10^{-3} mol/L 的 SDBS 溶液中,清洗纤维表面以去除疏水性物质及杂质,增强表面活性。浸泡 30 min 后,取出纤维并在 60℃ 下干燥 4 h,确保完全干燥。随后,将干燥后的纤维浸入 2 g/L 的多巴胺溶液中(pH=8.5),并在室温下缓慢搅拌 24 h,使多巴胺通过氧化自聚合形成均匀的聚多巴胺(PDA)涂层。

1.4 FA 制备气凝胶流程

FA 制备 Si-Al 气凝胶的流程为:将碳酸钠和 FA 混合研磨,然后将混合物置于马弗炉中,在 750℃ 下烧结 2 h^[12-14]。将烧结产物浸入硫酸溶液中搅拌 2 h^[15]。通过真空抽滤得到的酸浸液用作制备气凝胶的 Si-Al 溶胶。将所得湿凝胶进行常压干燥 24 h 后,最终得到 Si-Al 气凝胶。

2 结果与讨论

2.1 芳纶纤维增强 FA 基硅铝气凝胶的制备策略

如图 1 所示,FA 制备芳纶纤维增强 SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶复合材料(AF/Si-Al 气凝胶)流程为:FA 经碱熔、酸浸、过滤 3 步得到硅铝溶液后,将芳纶纤维均匀分散在硅铝溶液中。芳纶纤维作为支撑骨架,防止气凝胶在干燥过程中的收缩和结构坍塌,将所得 AF/Si-Al 溶胶进行常压干燥 24 h,最终得到 AF/Si-Al 气凝胶。

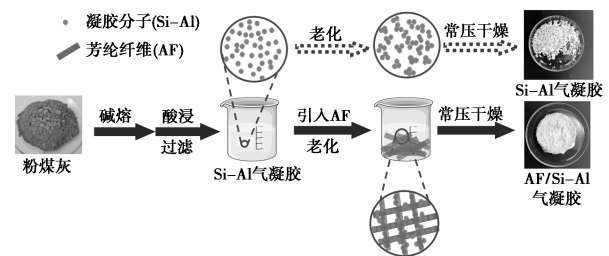
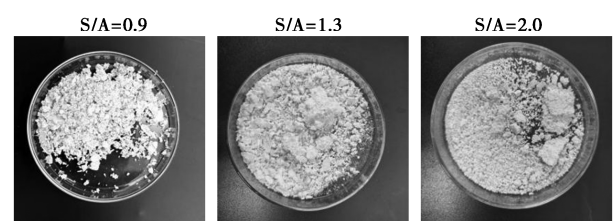
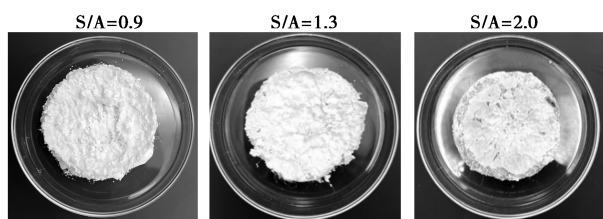


图 1 FA 制备 AF/Si-Al 气凝胶的流程

以不同硅铝比 FA 为原料制备的气凝胶[图 2(a)],均呈现出破碎的颗粒形态。而通过引入纤维作为增强体制备的复合材料[图 2(b)],均形成了形态完整的块体结构。与未添加纤维的样品相比,复合材料不仅保留了块体的完整性,还表现出一定的机械强度。



(a) Si-Al 气凝胶

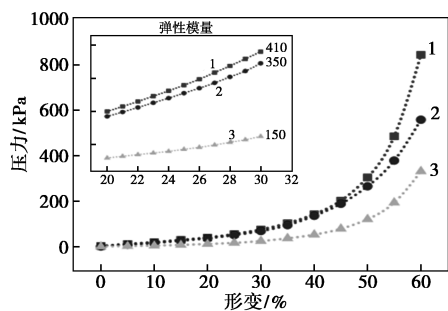


(b) AF/Si-Al 气凝胶

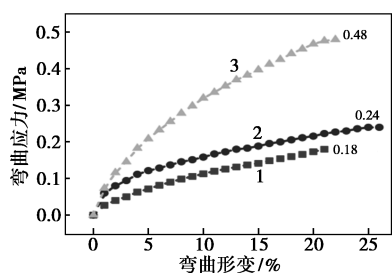
图 2 不同硅铝比 FA 制备的 Si-Al 气凝胶和 AF/Si-Al 气凝胶

2.2 FA 硅铝比对 AF/Si-Al 气凝胶机械性能的影响

芳纶纤维作为支撑骨架掺入到气凝胶基体中,可以有效维持气凝胶的结构完整性,分散外力以避免应力集中,从而提高机械强度并改善脆性^[16-17]。图 3(a)呈现了 AF/Si-Al 气凝胶在单轴压缩实验中的结果,0.9-0 表示未加入芳纶纤维,即纤维长度为 0 mm,0.9-6 代表加入 6 mm 纤维的 AF/Si-Al 气凝胶。所有材料的压缩过程可分为 3 个阶段:接触阶段、线性阶段和弹塑性阶段^[16]。线性阶段集中在 20%~30%的应变区间,其斜率对应材料的弹性模量。在这一阶段,气凝胶的纳米孔结构承受主要外力,直观地反映了气凝胶本身的弹性。从结果可以看出,当 S/A=0.9 时,材料具有最大的弹性模量,为 410 kPa。随着硅铝比的增加,弹性模量逐渐降低至 150 kPa。



(a) 单轴压缩



(b) 三点弯曲

1—0.9-6; 2—1.3-6; 3—2.0-6

图 3 不同硅铝比 AF/Si-Al 气凝胶样品的机械强度

芳纶纤维作为 Si-Al 气凝胶的骨架,不仅能够承受轴向压力,还能有效抵抗弯曲应力,从而赋予材料一定的弯曲强度。由图 3(b) AF/Si-Al 气凝胶的三点弯曲实验结果可知,当材料 S/A=0.9-6 时,其弯曲强度为 0.18 MPa,而当材料 S/A=2.0-6,其弯曲强度为 0.48 MPa。与单轴压缩强度的变化相反,随着硅铝比的增加,AF/Si-Al 气凝胶的弯曲强度逐渐增加。

由单轴压缩和三点弯曲结果可以得出,随着硅铝比的增加,材料的单轴抗压强度逐渐降低,而弯曲强度则逐渐增加。

从实验结果可以看出,硅铝比显著影响 AF/Si-Al 气凝胶的机械性能。综合了气凝胶的各项指标,可以发现,当硅铝比较低时,材料的单轴压缩强度和弹性模量优于其弯曲强度和弯曲模量,表明此时复合材料更能有效承受纵向压力。而随着硅铝比的增加,弯曲强度和弯曲模量优于单轴压缩强度和弹性模量,提升了材料对弯曲应力的抵抗能力。

2.3 FA 硅铝比对 AF/Si-Al 气凝胶热性能的影响

2.3.1 导热率

如图 4 所示,硅铝比对于气凝胶的导热率存在显著影响。未引入纤维时,随着硅铝比的增加,气凝胶的导热率逐渐升高。当 S/A=0.9 时,导热率为 0.0226 W/(m·K);当 S/A=2.0 时,导热率增加至 0.0263 W/(m·K)。加入纤维后,导热率相较于 Si-Al 气凝胶略有提高,为 0.0232~0.0283 W/(m·K),各样品的导热率呈现类似的变化趋势。

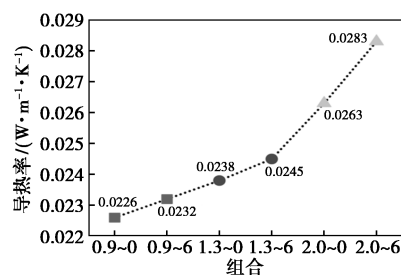


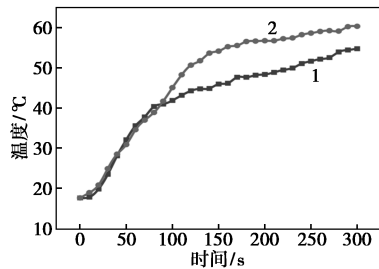
图 4 不同气凝胶样品的导热率

研究表明,孔径分布是影响气凝胶导热性能的关键因素之一^[18-19]。因此,产生这种现象的原因可能是不同硅铝比气凝胶的孔径分布不同。小孔能够有效抑制气体分子的自由运动,减少气体导热,而大孔则会增加气体的自由程,进而提高整体导热率。

2.3.2 隔热效果

气凝胶与芳纶纤维复合后形成了完整的块体结构,在保持完整块体的前提下,AF/Si-Al 气凝胶表现出优异的隔热性能。将 AF/Si-Al 气凝胶放置于

酒精灯上方,模拟高温环境(外焰的平均温度为 519.9°C),采用温度计对材料表面进行测量。如图5所示,经过5 min加热后, $S/A=0.9-6$ 组合的气凝胶表面温度仅为 57.5°C ,而 $S/A=2.0-6$ 组合的气凝胶由于导热率相对较高,表面温度升至 61.0°C 。尽管存在差异,但两种材料均展现出卓越的隔热性能。这表明,芳纶纤维的引入不仅在机械性能方面提供了增强作用,同时对气凝胶基体的热传导特性影响较小,仍能保持优良的隔热效果^[20]。



1—0.9-6;2—2.0-6

图5 $S/A=0.9-6$ 和 $S/A=2.0-6$ 两种气凝胶材料的隔热性能

2.4 不同硅铝比 AF/Si-Al 气凝胶的形貌和结构分析

2.4.1 AF/Si-Al 气凝胶的微观形貌分析

图6(a)、(c)、(e)为3种 AF/Si-Al 气凝胶的 SEM 图。可以看出,气凝胶包裹在芳纶纤维表面,与其紧密结合,并聚集形成3D网络结构。图6(b)、(d)、(f)为3种材料相对应的微观放大图,所有样品均表现出多孔特性及典型的三维网络结构。区别在于,随着硅铝比的增大,气凝胶网络结构的内部孔径发生显著变化:小孔比例逐渐减少,而大孔比例逐渐增多。

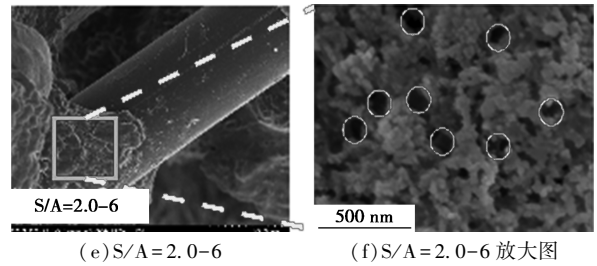
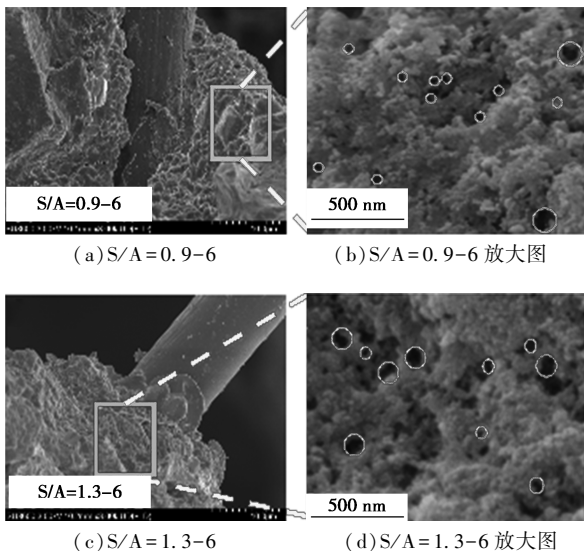
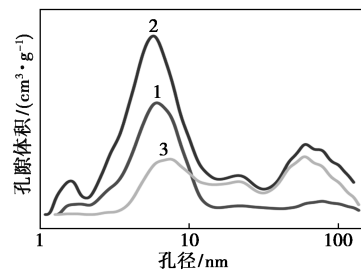


图6 不同硅铝比 AF/Si-Al 气凝胶的 SEM 图

2.4.2 孔径分布

如图7所示,3种气凝胶样品的孔径主要分为小孔($\leq 50\text{ nm}$)和大孔($> 50\text{ nm}$)两种类型,但两者的占比随着硅铝比的变化显著不同。当 $S/A=0.9$ 时,气凝胶内部以小孔为主,占比高达92%。随着硅铝比的增加, $S/A=2.0$ 时,大孔比例增加至31%,而小孔比例相应减少至69%。



1— $S/A=0.9$;2— $S/A=1.3$;3— $S/A=2.0$

图7 不同硅铝比 AF/Si-Al 气凝胶的孔径分布图

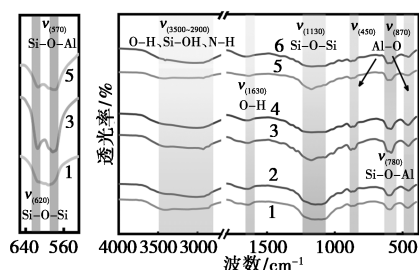
硅含量的增加(即 S/A 的升高)会加速凝胶颗粒的聚集,形成不均匀的网络结构^[21]。因此,在常压干燥条件下,不均匀的网络结构导致干燥过程中应力分布不均,从而产生更多的大孔结构。

硅铝比的变化会引起孔径分布的改变,进而影响气凝胶的综合性能。孔径大小是影响气凝胶机械性能和热性能的根本原因^[19]。对于机械性能而言,较大的孔径使气凝胶更加柔韧,而随着孔径减小,气凝胶逐渐从柔性转变为刚性。当 $S/A=0.9$ 时,气凝胶内部以小孔为主体,气凝胶表现为刚性,单轴压缩强度和弹性模量更优,而随着硅铝比的增加,气凝胶内部大孔占比增多,气凝胶则展现出更好的柔韧性(弯曲强度和弯曲模量)。

对于热性能而言,小孔能够有效抑制气体分子的自由运动,减少气体导热,而大孔则会增加气体的自由程,进而提高整体导热率^[19]。综合图5的结果可知,随着硅铝比的增加,气凝胶内部小孔比例降低,大孔比例增多,进而导致导热率增加。

2.4.3 FT-IR 分析

如图 8 所示,FT-IR 结果系统地揭示了不同硅铝比对 Si-Al 气凝胶结构的调控作用。 $1\ 130\ \text{cm}^{-1}$ 的显著吸收峰对应于 Si-O-Si 键的不对称伸缩振动,是硅铝气凝胶骨架结构的典型特征。 $1\ 632\ \text{cm}^{-1}$ 的弱峰归因于吸附水的 H-O-H 弯曲振动, $2\ 900\sim 3\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 的宽峰则反映了表面 O-H 基团和 Si-OH 的伸缩振动,表明气凝胶具有丰富的表面羟基。在 $560\sim 640\ \text{cm}^{-1}$ 区域,随着硅铝比的增加, Si-O-Si ($620\ \text{cm}^{-1}$) 和 Si-O-Al ($570\ \text{cm}^{-1}$) 键的振动分离显著,由原本的重叠单峰逐渐演变为两个独立的小峰^[22],表明硅铝比对硅铝骨架结构存在显著影响。此外,在 $3\ 500\sim 2\ 900\ \text{cm}^{-1}$ 区域,随着芳纶纤维的引入,宽化的大峰主要来源于芳纶纤维表面的 N-H 键以及 PDA 的 -OH 与气凝胶基体表面 -OH 基团之间的氢键作用,证明纤维与气凝胶基体之间的强界面相互作用。同时,芳纶纤维在 $3\ 318\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰对应 N-H 键的伸缩振动,未因与气凝胶的相互作用而发生明显偏移,表明芳纶纤维保持了其自身的结构完整性。

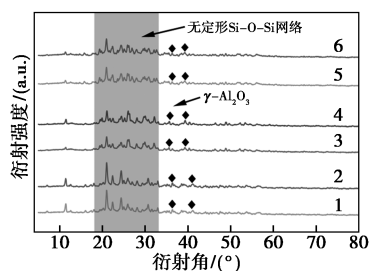


1—0.9-0; 2—0.9-6; 3—1.3-0; 4—1.3-6; 5—2.0-0; 6—2.0-6

图 8 不同硅铝比 Si-Al 气凝胶和 AF/Si-Al 气凝胶的 FT-IR 图

2.4.4 X 射线衍射 (XRD) 分析

如图 9 所示,XRD 结果进一步证实了 FT-IR 光谱的推断。所有样品在 $10\sim 30^\circ$ 的衍射区域表现出



1—0.9-0; 2—0.9-6; 3—1.3-0; 4—1.3-6; 5—2.0-0; 6—2.0-6

图 9 不同硅铝比 Si-Al 气凝胶和 AF/Si-Al 气凝胶的 XRD 图

宽而弱的衍射峰,这是无定形硅铝气凝胶的典型特征。尽管掺入了芳纶纤维,衍射峰的强度和位置未发生明显变化,表明纤维的加入未破坏气凝胶的主要微观结构。

FT-IR 和 XRD 的结果表明,硅铝比的变化显著影响了气凝胶的微观结构,而纤维表面多巴胺基团的引入通过氢键作用增强了基体与纤维界面相互作用,同时未对气凝胶的微观结构产生破坏。

3 结论

(1) 硅铝比对气凝胶微观结构及性能的影响。随着硅铝比的增加,气凝胶的孔径分布发生显著变化:小孔比例减少,大孔比例增多。低硅铝比 ($S/A=0.9$) 样品以小孔为主,表现出优异的单轴抗压性能;高硅铝比 ($S/A=2.0$) 样品以大孔为主,表现出更好的弯曲性能和柔韧性。这表明硅铝比是影响气凝胶微观结构和机械性能的关键因素。

(2) 芳纶纤维的增强作用。通过引入芳纶纤维作为支撑骨架,显著增强了气凝胶的结构完整性和机械性能。复合材料在保持气凝胶优异隔热性能的同时,大幅提高了其抗压强度和弯曲强度。

(3) AF/Si-Al 气凝胶的导热性能与隔热效果。随着硅铝比的增大,气凝胶的导热率略有增加,但均保持在低导热范围 [$0.022\ 4\sim 0.026\ 3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]。引入芳纶纤维后,复合材料导热率略有提升 [$0.023\ 2\sim 0.028\ 3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],但隔热性能依然优异。例如, $S/A=0.9-6$ 样品在高温 (519.9°C) 测试中,表面温度仅为 57.5°C ,展现出卓越的隔热能力。

参考文献

- [1] Almeida C M, Ghica M E, Durães L. An overview on alumina-silica-based aerogels [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 282: 102189.
- [2] Wu X, Shao G, Cui S, *et al.* Synthesis of a novel Al_2O_3 - SiO_2 composite aerogel with high specific surface area at elevated temperatures using inexpensive inorganic salt of aluminum [J]. *Ceramics International*, 2016, 42 (Part A): 874-882.
- [3] Sayehi M, Tounsi H, Garbarino G, *et al.* Reutilization of silicon- and aluminum-containing wastes in the perspective of the preparation of SiO_2 - Al_2O_3 based porous materials for adsorbents and catalysts [J]. *Waste Management*, 2020, 103: 146-158.
- [4] 邢静璐, 齐德娥, 秦身钧, 等. 粉煤灰中有价元素的高值化利用研究进展 [J]. *现代化工*, 2023, 43 (7): 39-43.
- [5] Shen M, Jiang X, Zhang M, *et al.* Synthesis of SiO_2 - Al_2O_3 composite aerogel from fly ash: A low-cost and facile approach [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2020, 93 (2): 281-290.
- [6] 湛燕. 粉煤灰综合利用研究进展 [J]. *山东化工*, 2024, 53 (17): 119-122.

(下转第 154 页)

时,CMCS 溶液 pH 为 6.5、CMCS 投放量为 0.37 g、BC 投放量为 0.3 g 时,载药微球的包封率和载药量达到最高,分别为 $84.37\% \pm 0.47\%$ 和 $19.74\% \pm 0.11\%$ 。BC@CPMC 和 BC@PMC 在 50%乙醇溶液中的 BC 释放呈现先快后慢的趋势,整个药物释放过程没有明显的突释,其释放机制属于药物扩散和骨架溶蚀相结合。BC@CPMC 在一定条件下可以分别被溶菌酶和纤维素酶降解,表明该载药微球可以在自然环境中降解。

参考文献

- [1] 张贵森.不同壁材高效氯氰菊酯微囊悬浮剂应用及环境特性的影响[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [2] 徐汉虹.植物化学保护学[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [3] 何华,徐存华,孙成,等.高效氯氰菊酯在土壤中的降解动态[J].中国环境科学,2003,23(5):43-45.
- [4] 许春丽.多功能农药载药体系设计与调控释放性能研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [5] 潘兴鲁,董丰收,刘新刚,等.中国农药七十年发展与应用回顾[J].现代农药,2020,19(1):1-5,23.
- [6] Zhao X, Cui H X, Wang Y, *et al.* Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 66(26):6504-6512.
- [7] Abbaszadeh N, Zirak N, Shirinbayan M, *et al.* Controlled release from polyurethane films; Drug release mechanisms[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(12):50083.
- [8] 张微微,胡静,包晓丽.聚氨酯微胶囊应用研究进展[J].应用技术学报,2021,21(1):21-29.
- [9] Pang Y X, Li X, Wang S W, *et al.* Lignin-polyurea microcapsules with anti-photolysis and sustained-release performances synthesized via pickering emulsion template[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2018, 123:115-121.
- [10] Zhang W B, Zhang Y, Liang H Y, *et al.* High bio-content castor oil based waterborne polyurethane/sodium lignosulfonate composites for environmental friendly UV absorption application[J]. *Industrial Crops & Products*, 2019, 142:111836.
- [11] 范燕香,周红军,周新华,等.羧甲基壳聚糖-蓖麻油基聚氨酯农药缓释微球的制备及性能[J].精细化工,2024,41(1):91-99.
- [12] Shariatnia Z. Carboxymethyl chitosan: Properties and biomedical applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120:1406-1419.
- [13] 陈麒丞.改性壳聚糖为壁材的阿维菌素微胶囊制备及其性能研究[D].扬州:扬州大学,2020.
- [14] Xu C L, Cao L D, Zhao P Y, *et al.* Emulsion-based synchronous pesticide encapsulation and surface modification of mesoporous silica nanoparticles with carboxymethyl chitosan for controlled azoxystrobin release[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 348:244-254.
- [15] Kalliola S, Repo E, Srivastava V, *et al.* Carboxymethyl chitosan and its hydrophobically modified derivative as pH-switchable emulsifiers[J]. *Langmuir*, 2018, 34(8):2800-2806.
- [16] 孙慧君.溶菌酶酶解分肽的研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2014.
- [17] 陈浩凡,潘仕荣,胡瑜.不同取代羧甲基壳聚糖体外酶降解的研究[J].中国药师,2005,8(10):807-809.
- [18] Liu J, Xia W S. Purification and characterization of a bifunctional enzyme with chitosanase and cellulase activity from commercial cellulase[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 30(1):82-87.
- [19] 胡运玖,左奕,郭均,等.聚己内酯载药微球的制备及释药性能研究[J].材料导报,2015,29(2):29-32,56.
- [20] 蔡杰慧,杨英全,郑燕菲.载姜黄素类化合物 PCL-PEG-PCL 微球的制备及释药性、抗氧化性研究[J].现代化工,2022,42(7):201-206. ■
- [7] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(3):327-363.
- [8] 张勇,高相东,姚佳祺,等. SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶及纤维增强复合材料制备技术研究进展[J].材料导报,2022,36(23):53-61.
- [9] Yu H, Jiang Y, Lu Y, *et al.* Quartz fiber reinforced Al₂O₃-SiO₂ aerogel composite with highly thermal stability by ambient pressure drying[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 505:79-86.
- [10] Mazrouei S Z, Naeimirad M, Peterek S, *et al.* Multiple assembly strategies for silica aerogel-fiber combinations-A review[J]. *Materials & Design*, 2022, 223:111228.
- [11] Li Z, Cheng X, He S, *et al.* Aramid fibers reinforced silica aerogel composites with low thermal conductivity and improved mechanical performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 84:316-325.
- [12] 李华鑫,陈俊勇,乐弦,等. Al₂O₃-SiO₂ 复合气凝胶的制备与表征[J].材料导报,2019,33(18):3170-3174.
- [13] 张宇娟,张永锋,孙俊民,等.高铝粉煤灰提取氧化铝工艺研究进展[J].现代化工,2022,42(1):66-70.
- [14] 郑峰伟,孙成,陈富金,等.粉煤灰中氧化铝提取的研究进展[J].现代化工,2018,38(3):37-41.
- [15] 陈沐阳,公彦兵.粉煤灰硅提取技术研究进展[J].现代化工,2023,43(11):46-50.
- [16] 李杉杉,尚诗杰,王娜娜,等.对位芳纶纤维界面改性技术研究进展[J].复合材料学报,2025,3:1192-1206.
- [17] Wang H, Huang Y, Liu S, *et al.* A review of silica fiber-based aerogels: Composition, construction methods, mechanical enhancement strategies and applications[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 220:113367.
- [18] Li Z, Gong L, Cheng X, *et al.* Flexible silica aerogel composites strengthened with aramid fibers and their thermal behavior[J]. *Materials & Design*, 2016, 99:349-355.
- [19] Liu J, Liu J, Shi F, *et al.* A facile pore size controlling strategy to construct rigid/flexible silica aerogels for super heat insulation and VOCs adsorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450:138196.
- [20] 徐凛,姜勇刚,冯军宗,等.纤维增强 Al₂O₃-SiO₂ 气凝胶隔热复合材料的制备和耐温隔热性能[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(4):461-466.
- [21] Mel G E, Shmakov A N, Larichev Y V, *et al.* Effect of the concentration of aluminum on the adsorption, texture, and structure characteristics of a mesoporous mineral mesophase of the SBA-15 type[J]. *Kinetics and Catalysis*, 2009, 50(3):456-460.
- [22] La P V, Deganello G, Scirè S, *et al.* Effect of the Al/Si atomic ratio on surface and structural properties of sol-gel prepared aluminosilicates[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2003, 174(2):482-488. ■

(上接第 148 页)