

# 界面增强二氧化硅气凝胶复合功能材料的制备及其性能研究

房爱省<sup>1</sup>, 李海明<sup>2</sup>, 李洪彦<sup>2\*</sup>

(1. 华燧(天津)新材料科技有限公司, 天津 300350;  
2. 天津城建大学材料科学与工程学院, 天津 300384)

**摘要:**以正硅酸乙酯(TEOS)为前驱体,通过溶胶-凝胶法制备了具有静电作用相界面的聚合物/SA复合材料。通过核磁共振波谱仪(NMR)、傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、热重分析仪(TGA)、Zeta电位检测仪等对试样进行表征。结果表明,通过引入带电单体甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(MTC)成功制备了具有静电作用相界面的SA复合材料,保持了原有纳米多孔结构。二氧化硅相和聚合物相之间较强的静电相互作用有效阻止了共聚物的团聚。在热降解过程中受静电力的限制,减小了活性自由基的碰撞概率。静电作用相界面具有较高的界面热阻,可以提高SA复合材料的热稳定性,并可以有效进行载荷转移。

**关键词:**SiO<sub>2</sub>气凝胶;聚合物增强;相界面;导热性能

中图分类号:TB332

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)03-0131-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.03.024

## Preparation and performance study of interface reinforced silica aerogel composite functional materials

FANG Ai-xing<sup>1</sup>, LI Hai-ming<sup>2</sup>, LI Hong-yan<sup>2\*</sup>

(1. Huayi (Tianjin) New Materials Technology Co., Ltd., Tianjin 300350, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Polymer/SA composites with electrostatically interacting phase interfaces are prepared through the sol-gel method with ethyl orthosilicate (TEOS) as a precursor. The specimens are characterized by means of nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy, thermogravimetric analysis (TG), and Zeta potential detection. Results show that SA composites that have phase interfaces with electrostatic interaction and maintain the original nano-porous structure are successfully prepared through adding methacryloyloxyethyl trimethyl ammonium chloride (MTC) that is a charged monomer. The strong electrostatic interaction between silica phases and polymer phases prevents effectively the agglomeration among copolymers. The collision probability of active radicals reduces due to the limitation of electrostatic force during thermal degradation. The phase interfaces with electrostatic interaction have a high interfacial thermal resistance, which improves the thermal stability of SA composites and enables load transfer to conduct effectively.

**Key words:** silica aerogel; polymer reinforcement; phase interface; thermal conductivity

二氧化硅气凝胶(SA)是一种以胶体粒子聚结形成的具有三维网络结构的非晶固体材料<sup>[1]</sup>,具有高孔隙率(80%~95%)、高比表面积(400~1100 m<sup>2</sup>/g)、低密度(0.001~0.3 g/cm<sup>3</sup>)和低导热系数等特点,广泛应用于隔热、隔音、催化传输、吸附过滤和光电子等领域<sup>[2-5]</sup>。然而,独特的Si—O—Si骨架网络结构同样会给SA带来一些缺陷,气凝胶颗粒之间结合力弱导致其力学性能差、脆性高、韧性低、易开裂等<sup>[6-7]</sup>。现阶段,溶胶-凝胶法结合超临界干燥为制备SA主要方法<sup>[8]</sup>。将硅源经过水解缩合后形

成湿凝胶,湿凝胶再经过老化与干燥后即可得到SA。但由于其固有的低密度和易碎性,在保证材料完整性的情况下极大地增加了材料加工处理过程的复杂性。

近年来,针对SA固有缺陷的解决措施主要集中于提升Si—O—Si网络的韧性和稳定性<sup>[9-12]</sup>。通过引入各种有机基团和功能性材料来实现对气凝胶化学结构和网络骨架的有效调控,从而得到二氧化硅气凝胶复合材料,以达到增强或弥补气凝胶性能的目的。因此,为了保留SA的独特优势并解决其

收稿日期:2024-05-08;修回日期:2025-01-04

基金项目:天津市自然科学基金(18JQNJC03000)

作者简介:房爱省(1982-),男,学士,工程师,主要从事保温隔热气凝胶工艺的研究,f@huayinm.com;李洪彦(1985-),男,博士,教授,主要从事绿色化学建材和纳米复合材料研究,通讯联系人,li.hongyantcu@foxmail.com。

力学性能差等问题,二氧化硅气凝胶复合材料已逐渐成为保温隔热材料领域的研究热点<sup>[13-20]</sup>。因此,笔者通过溶胶-凝胶法将甲基丙烯酸甲酯(MMA,聚合物主体)、甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(MTC,改性带电单体)与SA复合制备具有静电作用相界面的聚合物/SA复合材料。研究了相界面的结构及其对复合材料力学性能和导热性能的影响机制。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

正硅酸乙酯(TEOS)、氨水,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;无水乙醇、盐酸,天津市永大化学试剂有限公司生产;正己烷、甲基丙烯酸甲酯,西陇科学股份有限公司生产;甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵,天津光复精细化工研究所生产;过氧化苯甲酰(BPO),天津市江天化工技术有限公司生产。

电子天平(JY1002型),上海双旭电子有限公司生产;数控超声波清洗器(YZ-250DB型),上海越众仪器设备有限公司生产;电热鼓风干燥箱(WGL-45B型),天津市泰斯特仪器有限公司生产;CO<sub>2</sub>超临界干燥设备(200 mL),南通市华安超临界萃取有限公司生产;真空气氛节能箱式电炉(SX-G03163Q型),天津中环实验电炉有限公司生产;场发射扫描电子显微镜(HELIOS NanoLab 600i型),USA FEI公司生产;傅里叶变换红外光谱仪(Perkin-Elmer-2000型),USA PERKINELMER公司生产;核磁共振光谱仪(UNITY plus-500型),USA Varian公司生产;热重分析仪(Rigaku TA-50型),Japan Rigaku Corporation生产;时域热反射仪(TF-LFA),USA Linseis Inc生产;拉曼光谱仪(inVia型),UK Renishaw生产;比表面积/孔径分析仪(Quabrorb SI-3MP型),USA Quantachrom3e生产;Zeta电位仪(Brookhaven Zetasizer型),USA Brookhaven Instruments Ltd.生产。

### 1.2 试样的制备

#### 1.2.1 二氧化硅气凝胶(SA)的制备

将TEOS、乙醇和去离子水混合,得到摩尔比为1:8:3.75的前驱体溶液。在前驱体溶液中加入盐酸,调节pH为3~4,用磁力搅拌器搅拌60 min,使混合物均匀分散。将混合液水解16 h,加入0.5 mol/L NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O,调节pH。将混合物搅拌至形成凝胶,加入乙醇溶液并在60℃下老化24 h。然后用正己烷溶剂置换3次(1次约3 h)得到SiO<sub>2</sub>湿凝

胶,超临界干燥得到SA。

#### 1.2.2 PMMA-SA的制备

取10 g MMA,加入0.06 g BPO,通过磁力搅拌器于20℃搅拌5 min。加入0.3 g SA,经超声处理15 min后将混合物于60℃水浴加热24 h,得到PMMA-SA。

#### 1.2.3 P(MMA/MTC)的制备

取10 g MMA,加入0.55 g MTC(75%),在磁搅拌下加入0.07 g BPO。将温度加热至85℃并保持45 min,直至预聚物变黏稠,用冷却水将温度迅速控制在40℃左右得到P(MMA/MTC)。

#### 1.2.4 P(MMA/MTC)-SA的制备

将SA和P(MMA/MTC)置于三颈圆底烧瓶中,于60℃搅拌30 min,在氮气气氛下加入1.0%过氧化苯甲酰。在氮气气氛下继续超声处理直到聚合完成,悬浮液变为固体(4~5 h)。然后用三氯甲烷(CHCl<sub>3</sub>)作为溶剂对固体进行磁力搅拌,得到均匀的分散体。将分散液浇铸在玻璃板上,得到厚度均匀的薄片(约4 mm),将样品从玻片上剥离得到P(MMA/MTC)-SA。

#### 1.2.5 KH570/PMMA-SA的制备

取10 g MMA,加入0.05 g BPO,然后通过磁力搅拌器于20℃搅拌5 min;搅拌完成后加入0.6 g KH570,继续搅拌60 s。加入0.3 g SA,经超声处理15 min后,将混合物于60℃水浴加热24 h,得到PMMA-KH570-SA。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SiO<sub>2</sub>气凝胶复合材料的化学成分分析

<sup>1</sup>HNMR谱被用来判断样品中聚合物的组成。PMMA、P(MMA/MTC)和P(MMA/MTC)-SA在CDCl<sub>3</sub>中的<sup>1</sup>HNMR谱如图1所示。从图1中可以看出,在PMMA的核磁共振谱中,3.61 ppm处的强峰是由MMA中甲基的质子引起的,7.25 ppm的强峰归因于CDCl<sub>3</sub>。在P(MMA/MTC)的核磁共振谱中,3.59 ppm处的强峰归因于甲基丙烯酸甲酯中与酯基相邻的-CH<sub>3</sub>的质子。1.66 ppm和3.48 ppm处的弱峰是由MTC中的季铵基团分配给-CH<sub>2</sub>-和-N<sup>+</sup>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>的质子引起的。由于MTC含量较少,因此对应的信号相对较弱。此外,在0.8~2.0 ppm处的峰是由聚合物中的其他甲基和亚甲基的质子引起的。通过观察P(MMA/MTC)-SA的核磁共振谱可以发现,除了一些可以忽略不计的偏移外,P(MMA/MTC)-SA波谱与P(MMA/MTC)的波谱

极其相似,并且均未检测到与未反应单体双键相关的质子信号,说明成功制备了 $\text{SiO}_2$ 气凝胶复合材料。

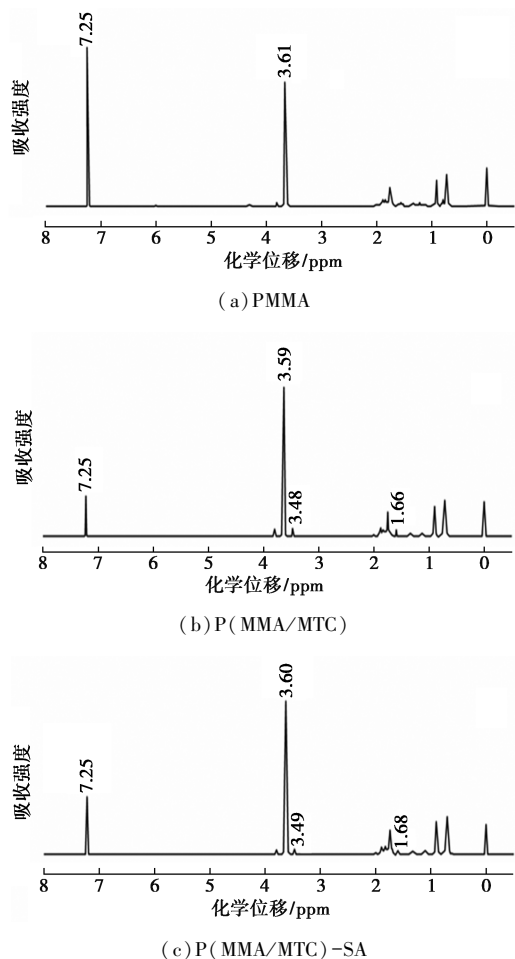


图1 各样品的 $^1\text{H}$ NMR谱

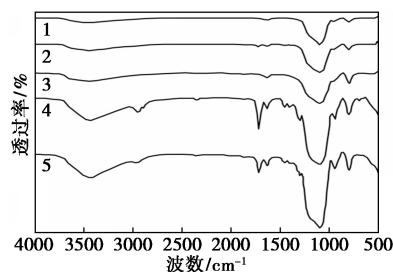
Zeta 电位值被用来确定复合材料静电作用相界面的形成。在室温和 pH 为 7 的条件下, SA、P(MMA/MTC) 和 P(MMA/MTC)-SA 的 Zeta 电位如表 1 所示。从表 1 可以看出, 由于 SA 表面的硅烷醇基团与空气中的水发生电离形成了 $\text{SiO}^-$ , SA 的 Zeta 电位值约为 $-38\text{ mV}$ 。P(MMA/MTC) 的 Zeta 电位约为 $25\text{ mV}$ , 这是由于引入 MTC 中带正电荷的 $-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ 基团导致的。而 P(MMA/MTC)-SA 的 Zeta 电位约为 $-18\text{ mV}$ , 这正是由于在复合过程中 $-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ 基团的正电荷被游离 $\text{SiO}^-$ 基团上的负电荷中和所导致的。这一现象进一步确定了 P(MMA/MTC) 共聚物链通过静电作用被有效吸附

表 1 SA、P(MMA/MTC) 和 P(MMA/MTC)-SA 的 Zeta 电位值

样品	SA	P(MMA/MTC)	P(MMA/MTC)-SA
Zeta 电位/ $\text{mV}$	$-37.8$	$24.7$	$-17.8$

在 SA 骨架上, 为静电作用相界面的形成提供了有力证明。

SA、PMMA、P(MMA/MTC)、PMMA-SA、P(MMA/MTC)-SA 分别经过索氏提取后残留 SA 的 FT-IR 谱图如图 2 所示。从图 2 谱线 1 中可以看出, 在 $800\text{ cm}^{-1}$ 和 $1100\text{ cm}^{-1}$ 处出现了由 $\text{Si}-\text{O}$ 拉伸振动引起的吸收峰, 在 $3440\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 SA 样品表面 $-\text{OH}$ 基团引起的伸缩振动峰。 $1648\text{ cm}^{-1}$ 和 $1082\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的强峰是 SA 中 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 引起的振动吸收峰。 $1630, 3500\text{ cm}^{-1}$ 左右出现残余水引起的干扰吸收峰。从图 2 谱线 2 中可以看出, 在 $2954\text{ cm}^{-1}$ 和 $1740\text{ cm}^{-1}$ 左右出现了分别由 $\text{C}-\text{H}$ 和 $\text{C}=\text{O}$ 键的伸缩振动引起 PMMA 的特征吸收峰。从图 2 谱线 4 中可以看出, 在 P(MMA/MTC) 的红外光谱中, $1510\text{ cm}^{-1}$ 和 $2360\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为 $\text{C}-\text{C}$ 的拉伸振动和 $\text{NH}_2^+$ 的拉伸振动。从图 2 谱线 3 中可以看出, 在 PMMA-SA 中提取的 SA 的红外光谱中存在一些极其微弱的 SA 和 PMMA 的特征吸收峰, 表明 PMMA-SA 经过索氏提取后几乎没有残留聚合物。同时证明了 PMMA 和 SA 之间的 van-de-Waals 界面的相互作用较差。从图 2 谱线 5 中可以看出, 在 P(MMA/MTC)-SA 中提取的 SA 的红外光谱中, MMA 的羰基吸收带出现在 $1725\text{ cm}^{-1}$ 处。 $1453\text{ cm}^{-1}$ 处的弱吸收带对应于 MTC 中季铵基团 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动。表明经过充分的索氏提取后, 静电作用相界面能够起到定向吸附作用, 使残留的聚合物链仍然附着在一起。通过对比图 2 谱线 3 和谱线 5 可以发现, 不同相界面对于 SA 中有机相的吸附作用存在差异性影响, 静电作用相界面能够有效提高 PMMA-SA 基复合材料的稳定性。



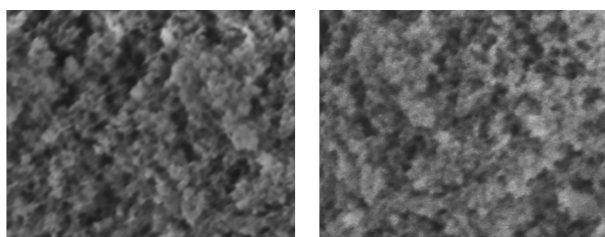
1—SA; 2—PMMA; 3—PMMA-SA 经索氏提取的 SA; 4—P(MMA/MTC); 5—P(MMA/MTC)-SA 经索氏提取的 SA

图2 各样品的红外谱图

## 2.2 $\text{SiO}_2$ 气凝胶复合材料的孔结构分析

SA 与 P(MMA/MTC)-SA 的 SEM 图如图 3 所示。由图 3(a) 中可以看出, SA 内部的纳米颗粒呈

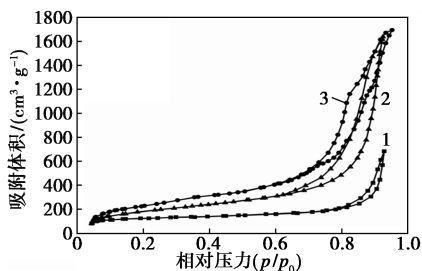
单分散球形,直径约为 20 nm。通过 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的无规则分布组成三维网络结构。颗粒间孔隙结构分布相对均匀,具有较高的孔隙率。由初级粒子和次级粒子组成的 SA 整体呈海绵状。从图 3(b)中可以看出,经静电相互作用将共聚物与 SA 连接后,孔隙分布的均匀性减弱。但是改性后的气凝胶复合材料仍然保持了纳米多孔和海绵状结构,有机相共聚物均匀分布在二氧化硅骨架上,没有出现团聚现象。



(a) SA (b) P(MMA/MTC)-SA

图 3 SA 与 P(MMA/MTC)-SA 的 SEM 图

PMMA-SA、P(MMA/MTC)-SA 和具有共价键界面的 KH570/PMMA-SA 的氮气吸附脱附曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,所有等温线均显示出典型的 IV 型等温线,样品均存在介孔孔隙的特征分布。采用 BJH 法获得的 PMMA-SA、P(MMA/MTC)-SA 和 KH570/PMMA-SA 的比表面积和平均孔径如表 2 所示。从表 2 中可以看出,在所有检测样品中,PMMA-SA 的比表面积最小,平均孔径最大。这是由于 SA 骨架与有机聚合物 PMMA 在聚合过程中分布不均匀以及团聚所致。SA 与 PMMA 相界面间的范德华相互作用不能有效阻止共聚物的团聚。具有静电作用相界面的 P(MMA/MTC)-SA 的比表面积大于 PMMA-SA。MTC 中的带电部分—N<sup>+</sup>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 与 SA 中大量的—OH 相互吸引,对共聚物均匀分散在二氧化硅气凝胶骨架内部起到关键作用,同时较强的静电相互作用也有效阻止了共聚物发生团聚。



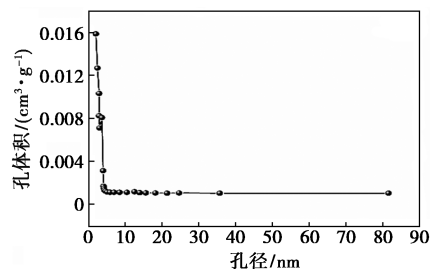
1—PMMA-SA; 2—P(MMA/MTC)-SA; 3—KH570/PMMA-SA

图 4 PMMA-SA、P(MMA/MTC)-SA 和 KH570/PMMA-SA 的氮气吸附脱附曲线

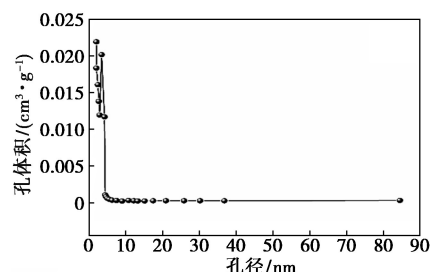
表 2 各样品的比表面积和平均孔径

样品	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
PMMA-SA	183.59	23.77
P(MMA/MTC)-SA	501.07	14.18
KH570/PMMA-SA	624.61	12.11

SA 与 P(MMA/MTC)-SA 的孔径分布曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,SA 与 P(MMA/MTC)-SA 的所有孔径几乎都在 75 nm 以下,更多的孔径主要集中在 5~25 nm。此时孔隙中的气体分子只能附着在纳米级孔隙的孔隙壁上,从而失去自由流动的能力,在这种情况下材料近乎于真空状态,从而无法参与热量的传递,使热量的传导受到很大的限制。



(a) SA



(b) P(MMA/MTC)-SA

图 5 SA 和 P(MMA/MTC)-SA 的孔径分布

### 2.3 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合材料的力学性能分析

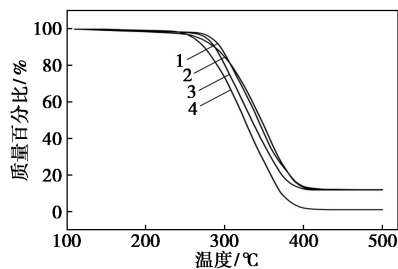
SA、PMMA-SA、KH570/PMMA-SA 和 P(MMA/MTC)-SA 的抗压强度如表 3 所示。从表 3 中可以看出,SA 的抗压强度较低无法检测。引入 PMMA 后,SA 的抗压强度得到改善。随着 P(MMA/MTC) 的引入,P(MMA/MTC)-SA 的抗压强度达到 3.74 MPa,这是由于在聚合物链中加入了带正电的 MTC 链段,而分子中的负电荷有效提高了聚合物链刚性。结果证明静电作用相界面的有效荷载传递能力。而共价键相界面作为一种有效的荷载传递方式使 KH570/PMMA-SA 的抗压强度得到显著提升,约为 5.06 MPa。

表3 各样品的抗压强度

样品	SA	PMMA- SA	P(MMA/MTC)- SA	KH570/ PMMA-SA
抗压强度/MPa	0.05	1.10	3.74	5.06

## 2.4 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合材料的热学性能分析

PMMA、PMMA-SA、KH570/PMMA-SA 和 P(MMA/MTC)-SA 的 TGA 曲线如图 6 所示,相应的各样品的热降解参数如表 4 所示。从图 6、表 4 中可以看出,在空气气氛中 PMMA 的降解温度为 252.7℃,在 321.6℃ 时样品质量下降 50%。此时高温下 PMMA 分子链发生随机断裂。而 PMMA-SA 的  $T_0$  和  $T_{50}$  高于 PMMA,这主要归因于 SA 无机相的引入。由 SiO<sub>2</sub> 颗粒组成的无机 3D 骨架具有较高的热稳定性,同时使热解产生的活性基团与相邻有机相聚合物的碰撞概率降低。因此添加 SA 后样品的热稳定性得到改善。KH570/PMMA-SA 的  $T_0$  和  $T_{50}$  高于 PMMA-SA,具有良好的热稳定性。材料的热稳定性在某种程度上会受其热导率的影响。对于 KH570/PMMA-SA,通过化学键将 SA 与聚合物相连接产生共价键相界面,使其具有更有效热量传播路径。复合材料的导热性得到了改善,在高温环境下材料的热通量很容易达到平衡,有效避免了材料中局部高温区域的产生,同时提高热稳定性。P(MMA/MTC)-SA 的  $T_0$  和  $T_{50}$  分别为 273.2℃ 和 341.6℃。静电作用在热降解过程中起到了抑制作用,自由基之间的碰撞不仅受到刚性骨架的阻碍,还受到静电力的限制。同时带电 MTC 有效提高分子



1—PMMA-SA; 2—KH570/PMMA-SA;  
3—P(MMA/MTC)-SA; 4—PMMA

图6 各样品的 TGA 曲线

表4 各样品的热降解参数

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_{50}/^\circ\text{C}$
PMMA	252.7	321.6
PMMA-SA	271.4	338.1
KH570/PMMA-SA	284.5	347.8
P(MMA/MTC)-SA	273.2	341.6

链刚性,因此使得 P(MMA/MTC)-SA 的热稳定性相比 PMMA-SA 稍有提升。

SA、PMMA-SA、KH570/PMMA-SA 和 P(MMA/MTC)-SA 热导率如表 5 的所示。从表 5 中可以看出,SA 作为超绝热材料,导热系数仅为 0.022 W/(m·K)。相比之下 PMMA-SA 具有较高的导热系数,这主要是由于 PMMA 的部分导热使复合材料的隔热性能明显下降。具有共价键相界面的 KH570/PMMA-SA 相比其他样品有着较高的导热系数,约为 0.258 W/(m·K)。共价键相界面的产生为复合材料提供了更多地热量传播路径,因此使 KH570/PMMA-SA 具有较高的导热系数。相比之下具有静电作用相界面的 P(MMA/MTC)-SA 的导热系数仅为 0.031 W/(m·K)。通过静电作用相连接的复合材料可以起到控制热流的作用,从而提高复合材料的隔热性能。说明 P(MMA/MTC)-SA 具有较好的热稳定性的同时,还兼具有优异的隔热性能。

表5 各样品的导热系数

样品	SA	PMMA- SA	P(MMA/MTC)- SA	KH570/ PMMA-SA
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.022	0.193	0.031	0.258

为了进一步探究不同相界面对材料隔热性能的影响,采用 TDTR 技术分别测定了 PMMA-SA(范德华力)、KH570/PMMA-SA(共价键)、P(MMA/MTC)-SA(静电作用)的界面导热系数,如表 6 所示。从表 6 中可以看出,PMMA-SA 和 P(MMA/MTC)-SA 的  $G$  值分别为 33.6 MW/(m<sup>2</sup>·K) 和 42.2 MW/(m<sup>2</sup>·K)。具有共价键相界面的 KH570/PMMA-SA 的  $G$  值为 64.2 MW/(m<sup>2</sup>·K),远高于具有非共价键相界面的 PMMA-SA 和 P(MMA/MTC)-SA。通过共价键连接有着较强的界面结合强度,可以有效进行热量传输。此外,共价键可以作为 SA 与聚合物之间的热量传输桥梁,扩大了接触面积,形成更多的热传导通道,因此, KH570/PMMA-SA 具有较高的界面导热系数。而作为非接触式的静电作用相界面,其热隔绝性能优于共价键相界面复合材料。

表6 各样品的界面导热系数

样品	PMMA- SA	KH570/ PMMA-SA	P(MMA/MTC)- SA
界面导热系数/(MW·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	36.62	64.20	42.23

### 3 结论

为提高 SA 的力学性能并保持其低导热系数的固有特性,通过溶胶-凝胶法制备了 SA。以静电作用为基础将带电单体 MTC 与 MMA 的共聚物成功吸附到 SA 表面,制备了具有静电作用相界面的 P(MMA/MTC)-SA 复合材料。对 P(MMA/MTC)-SA 的微观形貌、孔隙结构、力学性能和热学性能进行表征。

(1)孔结构分析结果表明,P(MMA/MTC)-SA 复合材料的平均孔径为 14.18 nm,孔径分布范围主要集中在 5~25 nm,有效保持了 SA 原有的纳米多孔结构。

(2)力学性能分析结果表明,引入带正电的 MTC 链段形成的静电作用相界面使复合材料的抗压强度达到 3.74 MPa,有效提高了复合材料的荷载传递能力。

(3)热学性能分析结果表明,静电作用起到抑制效果,提高了复合材料的热稳定性。作为非接触式的静电作用相界面可以起到控制热流的作用,显著提高了复合材料的保温隔热性能。

### 参考文献

- [1] 汪玉林,张云海,程利航,等.二氧化硅气凝胶及复合体的应用研究进展[J].有机硅材料,2023,37(3):64-67,89.
- [2] 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.
- [3] Ye X, Chen Z, Ai S, *et al.* Microstructure characterization and thermal performance of reticulated SiC skeleton reinforced silica aerogel composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 177: 107409.
- [4] Al Soubaihi R M, Saoud K M, Ye F, *et al.* Synthesis of hierarchically porous silica aerogel supported Palladium catalyst for low-temperature CO oxidation under ignition/extinction conditions [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 292: 109758.
- [5] Feng Q, Chen K, Ma D, *et al.* Synthesis of high specific surface area silica aerogel from rice husk ash via ambient pressure drying [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 539: 399-406.
- [6] 刘青松,张桂华,李承东.不同金属氯化物催化制备聚甲基硅倍半氧烷气凝胶及其性能研究[J].化工新型材料,2024,52(2): 139-144,150.
- [7] 王胜,刘鑫,张自豪,等.阻隔型隔热保温涂料的研究进展[J].现代化工,2023,43(S1):44-48.
- [8] 徐广平,何江荣,宋一华. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维增强 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合材料的制备及其隔热机理 [J]. 材料导报, 2013, 27(2): 112-115, 120.
- [9] 魏鹏湾,闫共芹,赵冠林,等.二氧化硅气凝胶复合隔热材料研究进展[J].无机盐工业,2016,48(10):1-6.
- [10] Yun S, Luo H, Gao Y. Ambient-pressure drying synthesis of large resorcinol-formaldehyde-reinforced silica aerogels with enhanced mechanical strength and superhydrophobicity [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(35): 14542-14549.
- [11] Wang X, Jana S C. Synergistic hybrid organic-inorganic aerogels [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(13): 6423-6429.
- [12] Wu X, Shao G, Shen X, *et al.* Evolution of the novel C/SiO<sub>2</sub>/SiC ternary aerogel with high specific surface area and improved oxidation resistance [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 330: 1022-1034.
- [13] Yu H, Jiang Y, Lu Y, *et al.* Quartz fiber reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogel composite with highly thermal stability by ambient pressure drying [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 505: 79-86.
- [14] Sun T, Zhuo Q, Liu X, *et al.* Hydrophobic silica aerogel reinforced with carbon nanotube for oils removal [J]. Journal of Porous Materials, 2014, 21(6): 967-973.
- [15] Lee K J, Choe Y J, Kim Y H, *et al.* Fabrication of silica aerogel composite blankets from an aqueous silica aerogel slurry [J]. Ceramics International, 2018, 44(2): 2204-2208.
- [16] 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.
- [17] Shi D, Sun Y, Feng J, *et al.* Experimental investigation on high temperature anisotropic compression properties of ceramic-fiber-reinforced SiO<sub>2</sub> aerogel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 585: 25-31.
- [18] Maghsoudi K, Motahari S. Mechanical, thermal, and hydrophobic properties of silica aerogel-epoxy composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135(3): 45706.
- [19] Mohammadi A, Moghaddas J. Synthesis, adsorption and regeneration of nanoporous silica aerogel and silica aerogel-activated carbon composites [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 94: 475-484.
- [20] Zhang H, Fang W Z, Wang X, *et al.* Thermal conductivity of fiber and opacifier loaded silica aerogel composite [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 21-31. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>