

基于DMDMS/VTMS共前驱体法制备柔性硅基气凝胶

吕红丽¹ 罗丽娟² 郑振荣¹ 李红晨¹ 赵晓明¹

(1 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 气凝胶的易碎性、亲水性和高成本限制了其在民用领域的应用。本文提出了一种以二甲基二氧基硅烷(DMDMS)和乙烯基三甲氧基硅烷(VTMS)为共前驱体,采用常压干燥技术制备柔性疏水的聚倍半硅氧烷气凝胶的简单方法,研究了不同硅源配比对气凝胶结构和性能的影响。结果表明,当 $n(\text{DMDMS}/\text{VTMS})=2:3$ 时,硅基气凝胶是三维纳米多孔结构,具有低密度(0.13 g/cm^3)、低热导率 $[2.919\times 10^{-2}\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 和超疏水性(151°)的特点,在50%形变下,500次压缩循环后最大应力无明显变化。这种简单工艺制备的柔性气凝胶在隔热领域有着广阔的应用前景。

关键词 聚倍半硅氧烷气凝胶,疏水性,柔性,低热导率

中图分类号:O648

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.006

Preparation of Flexible Silicon-based Aerogels by DMDMS / VTMS Co-precursor Method

LV Hongli¹ LUO Lijuan² ZHENG Zhenrong¹ LI Hongchen¹ ZHAO Xiaoming¹

(1 School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Due to the fragility, hydrophilicity and high cost, the application of aerogels in civil fields is limited. In this paper, the flexible and hydrophobic polysilsesquioxane aerogel has been prepared using dimethyldimethoxysilane (DMDMS) and vinyltrimethoxysilane (VTMS) as co-precursors through atmospheric pressure drying. The effects of different silicon source ratios on the structure and properties of aerogels were studied. When $n(\text{DMDMS}/\text{VTMS})=2:3$, the silicon-based aerogel exhibits a three-dimensional nanoporous structure, which has low density (0.13 g/cm^3), low thermal conductivity $[2.919\times 10^{-2}\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ and superhydrophobicity (151°). Its maximum stress shows no significant change after 500 compression cycles under 50% deformation. According to this simple preparation process, the flexible aerogel has promising application prospects in the field of thermal insulation.

Key words Polysilsesquioxane aerogel, Hydrophobicity, Flexibility, Low thermal conductivity

0 引言

SiO_2 气凝胶是一种具有微纳米网络的三维多孔材料,具有低密度、高孔隙率($\sim 99.8\%$)、低热导率 $[0.01\sim 0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 等优异的性能^[1],这些突出的性能使其在隔热、吸附、航空航天等领域有着广泛的应用前景^[2-4]。传统上,纯 SiO_2 气凝胶是由水玻璃或四乙氧基硅烷为前驱体制成,表现出高亲水性、脆性、低强度和“掉粉”等力学问题,在外力作用下会发

生不可逆破坏^[5-6],这极大地限制了 SiO_2 气凝胶的应用。

研究人员已经开发出不同的方法来提高 SiO_2 气凝胶的力学性能,如共前驱液法、聚合物交联法和纤维增强法等^[7]。选择带有不水解的有机基团(如甲基,乙基,乙烯基等)的两种或几种硅烷作为硅源^[8-10],经过水解缩聚反应后形成含有有机基团的无机硅氧网络,有机基团的存在降低了硅氧刚性网络

收稿日期:2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目((52003071);北京市科技新星计划(Z211100002121090)

第一作者简介:吕红丽,1997年出生,硕士,主要研究方向为柔性隔热气凝胶复合材料。E-mail:2692035769@qq.com

通信作者:郑振荣,1981年出生,教授,主要研究方向为热防护纺织品的开发与性能研究。E-mail:tianjinzhengzr@163.com

的交联密度,从而赋予气凝胶纳米骨架弹性和柔韧性^[11],常见硅烷如甲基三乙氧基硅烷、甲基三甲氧基硅烷(MTMS)、二甲基二甲氧基硅烷(DMDMS)和乙烯基三甲氧基硅烷(VTMS)等^[12-15]。

C. LIU等^[16]以MTMS和DMDMS为共前驱体,通过常压干燥法制得的气凝胶具有良好的力学强度,在75%的应变下可获得高达40 kPa的高抗压强度。G. HAYASE等^[17]采用VTMS和乙烯基甲基二甲氧基硅烷制备的气凝胶有如棉花般的柔韧性,可从80%的单轴压缩和三点弯曲中恢复其原来的形状。这种共前驱体法制得的气凝胶克服了传统气凝胶的脆弱易碎的缺点,可以提高气凝胶的力学性能。

聚合物交联法^[18]可以制备具有一定柔性的气凝胶,但会出现密度增加,隔热性降低等问题^[19],X. D. WU等^[20]选用六亚甲基二异氰酸酯作为改性交联剂,所制备的硅基气凝胶在4.2%的应变下弹性模量高达18 MPa,气凝胶力学性能大大提高,但孔隙率降为85.4%,密度增加至0.32 g/cm³。

纤维增强法可以显著提高力学性能,李治^[21]以芳纶纤维为增强相,将纤维逐层地分散在凝胶中,制备纤维/SiO₂气凝胶复合材料弯曲强度可达0.18 MPa,弹性模量可达0.14 MPa,但材料的孔隙率、热导率随着纤维含量的增加而增大。X. ZHANG等^[22]将莫来石纤维/晶须作为增强相,开发的硅气凝胶纳米复合材料具有1.32 MPa(30%压缩应变)的优异压缩应力和0.034 W/(m·K)的热导率。值得注意的是,为提高气凝胶相与纤维相的相容性,克服复合材料硬质、粉末脱落的问题,通常要对纤维进行静电纺丝、高压均质^[23]等处理,硅基气凝胶的柔性也直接影响着材料的力学性能和使用性能,所以,硅烷前驱体的优化是制备气凝胶复合材料的基础。

无论是聚合物增强法还是纤维增强法,选择合适的前驱液对于制备具有一定力学性能的硅气凝胶具有积极的作用。本文以DMDMS和VTMS为杂化前驱体,经酸碱一锅法和常压干燥法制备兼具低密度、柔性超疏水性和低热导率的聚倍半硅氧烷气凝胶。

1 实验

1.1 原材料

DMDMS、VTMS,分析纯,中国上海阿拉丁化工有限公司;冰醋酸,分析纯,中国天津科密欧化工有限公司;无水乙醇,分析纯,中国上海阿拉丁化工有限公司;甲醇,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;尿素、十六烷基三甲基氯化铵(CTAC),分析纯,中国上海阿拉丁化工有限公司。

1.2 硅基气凝胶的制备

固定无水乙醇、CTAC、尿素、冰醋酸(5 mM)的质量比为1:1:5:14,将上述材料混合,搅拌10 min获得均匀溶液,将一定体积的DMDMS和VTMS共前驱液加入到混合溶液中,在室温下剧烈搅拌45 min。在这个阶段,溶液成弱酸性,DMDMS和VTMS主要发生水解反应。将溶胶转移到不同尺寸的密闭容器中,在80°C下存放20 h。

湿凝胶在室温下用甲醇溶液浸泡30 h,期间进行3~5次甲醇置换,经过数次按压去除残留的化学反应物质。最后将洗涤过的凝胶室温下干燥7~10 d,得到聚倍半硅氧烷气凝胶,DMDMS与VTMS摩尔比分别为4:1、3:2、2:3、1.5:3.5、1:4,所得气凝胶的编号分别为SA1、SA2、SA3、SA4、SA5。

目前,研究较多的是含有甲基的聚倍半硅氧烷,为进一步探究乙烯基团的引入对聚倍半硅氧烷气凝胶结构的影响,本文做了对比实验,选取SA3的实验方案,共前驱液替换为DMDMS和MTMS,其他参数不变,所得气凝胶编号为DM,探究SA3与DM结构的不同。

1.3 测试及表征

采用日本Hitachi公司的S4800型冷场发射扫描电子显微镜观察样品的微观形貌。通过美国Quantachrome的Autosorb-iQ-C型全自动比表面积分析仪测定样品的吸附-脱附曲线。使用美国Pekin-Elmer公司的Frontier FT-IR光谱仪对样品的化学结构进行分析。通过德国Netzsch有限公司的STA 449F5型综合热分析仪在10°C/min的加热下测试了样品从室温到800°C的热效应。压缩试验是在深圳万测试验设备有限公司的TES-OM-202008A型电子万能试验机上进行的。热导率通过瑞典Hot Disk有限公司的TPS-2500S热导率分析仪测定。水接触角(θ)通过德国Dataphysics公司的OCA15pro型接触角仪器测量。

2 结果与分析

2.1 硅基气凝胶的化学反应

硅基气凝胶的制备流程如图1所示,前驱液通过简单的一锅法进行水解缩聚反应,再经过常压干燥技术即可获得硅基气凝胶。

DMDMS和VTMS的反应式如下,在酸性催化剂下发生水解反应(图2、图3),甲氧基变为羟基,水解后1分子DMDMS、VTMS分别含有2、3个羟基。在碱性条件下,硅氧键会发生缩聚反应,4分子DMDMS缩聚后形成的大分子链主要为线性链状结构(图4),4分子VTMS中可参与缩聚反应的羟基更多,经过缩聚后形成环状分子链结构(图5),由此可知,VTMS引入到DMDMS反应体系中可以丰富DMDMS高分子链的形状结构,在适当的反应条件下,DMDMS和VTMS不断发生缩聚反应形成三维网络(图6),单组分

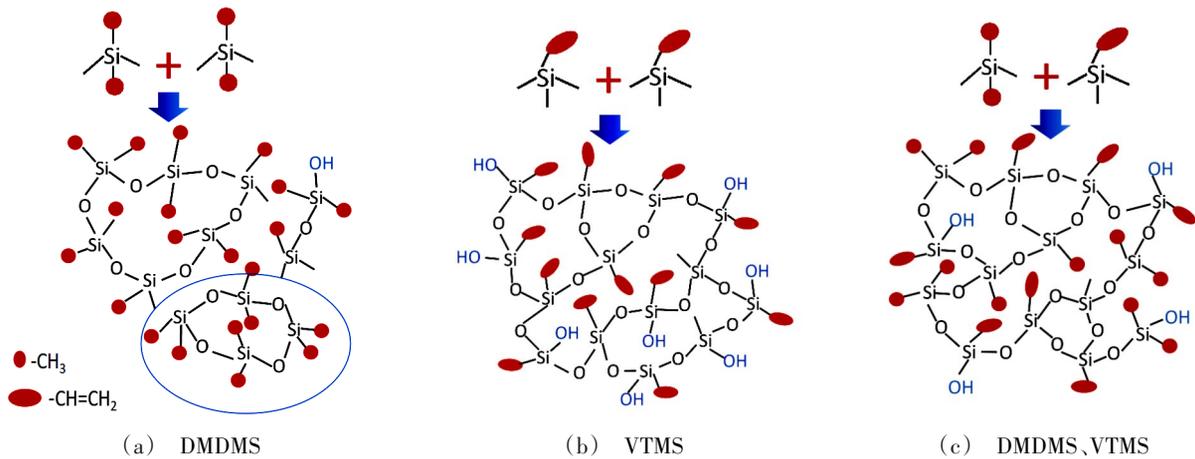


图7 硅基气凝胶的网络结构

Fig. 7 Network structure of aerogels

2.2 硅基气凝胶的红外光谱分析

图8是5种气凝胶样品的FTIR光谱, 1127 cm^{-1} 处的强特征峰是由 SiO_2 气凝胶网络中 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键的不对称拉伸引起的伸缩振动, SA3在此处的特征峰较明显。 835 cm^{-1} 处的吸收峰可归因于 $\text{Si}-\text{C}$ 弯曲振动, 表明所有样品都已成功用来自 DMDMS 的疏水基团 ($\text{Si}-\text{CH}_3$) 进行了修饰。 1638 cm^{-1} 处的吸收峰代

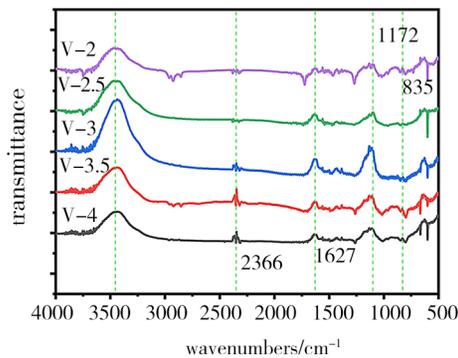


图8 不同气凝胶样品的红外光谱

Fig. 8 Infrared spectra of different aerogel samples

表 $\text{C}=\text{C}$ 的拉伸震动^[26], 随着乙烯基含量增加, 两种振动峰有显著的增加趋势, 证实了 VTMS 参与凝胶化反应。

2.3 硅基气凝胶的结构分析

硅基气凝胶呈现柔软块状, 从实物图9中可以看出, 气凝胶为整体式白色块状结构, SA2 的表面最光滑, 随着乙烯基的增加网络结构减弱, 在抵抗干燥期间会表现出较低的表面张力, 外表面逐渐变得粗糙, SA5 有褶皱生成且表面出现碎纹。

为了探究乙烯基团的引入对气凝胶微观结构的影响, 对比了 DM 和 SA3 的 SEM 照片, 如图10所示, 硅基凝胶聚集形成团簇, 团簇之间相互连接, 进一步交联形成密集的三维网络骨架, 对 SEM 中气凝胶颗粒直径进行了测量, 可以观察到两种硅基材料的粒径均在 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$, DM 的颗粒形状较均匀, 而乙烯基硅烷制得的凝胶颗粒发生粗化, 经化学反应后可以在 SiO_2 团簇表面形成有机层, SA3 的颈部区域连接处更稳固。



图9 硅基气凝胶的宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology of silicon-based aerogels

硅基气凝胶的介孔是由直径为 $2\sim 50\text{ nm}$ 左右的二级粒子堆叠而成, 三维纳米网络骨架相互连接所形成的介孔结构可以使材料具有极好的隔热性能, 研究表明硅基气凝胶具有典型的介孔结构^[27], 总孔容积 $0.52\text{ cm}^3/\text{g}$, 比表面积 $97.78\text{ m}^2/\text{g}$ 。为探究乙烯

基团的引入对气凝胶内部孔结构的影响, 对 SA3 测试了 N_2 吸附-脱附曲线(图11)。SA3 气凝胶表现出典型 IV 型等温线, 在相对高压区域显示出滞后环, 这是因为在中孔处发生的毛细管凝聚效应^[28], 这也说明所制备的气凝胶具有介孔材料特征^[29]。

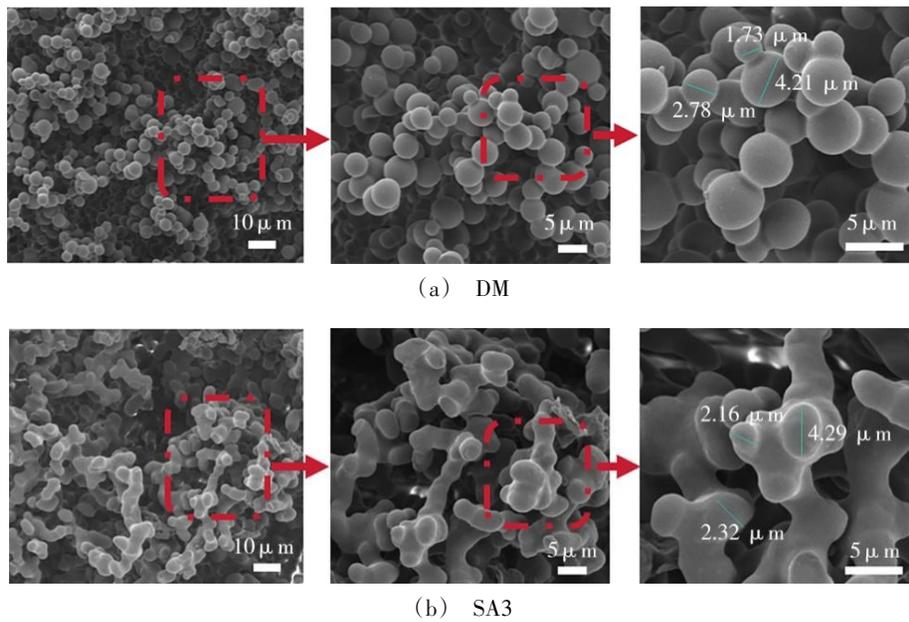


图 10 不同硅基气凝胶材料微观形貌

Fig. 10 Microstructure of different silicon-based aerogel materials

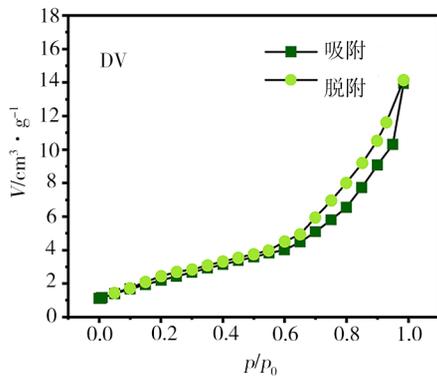


图 11 吸附-脱附曲线

Fig. 11 Adsorption-desorption curve

2.4 硅基气凝胶的疏水性和隔热性分析

传统的不含疏水基团的硅凝胶在常压干燥时表面的羟基接触水分会发生聚合反应并使凝胶收缩变形,造成孔结构坍塌,所得气凝胶多为粉末状,因此疏水改性是通过常压工艺制备柔性超疏水硅基气凝胶的一个关键步骤^[30]。此项工作中,DMDMS和VTMS硅烷前驱体中 $-CH_3$ 和 $-CH=CH_2$ 在溶胶-凝胶过程中保持不变,即在凝胶过程中已完成了疏水改性,简化了制备工艺,减少了有机溶剂的使用。如图12所示,硅基的疏水性随着乙烯基含量的增加呈现先增加后降低的趋势,SA3具有优异的疏水性能,接触角高达 155° ,这是由于未水解的有机基团完全覆盖在 SiO_2 骨架的表面,使得样品具有低固液界面能^[31]。

硅基的密度随乙烯基的增加而小幅度增加,最低密度低至 0.13 g/cm^3 ,最高密度仅为 0.17 g/cm^3 ,材料符合气凝胶的低密度特征。SA展示了较低的热导

率,平均为 $3.28 \times 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,具有良好的隔热性能(图13)。

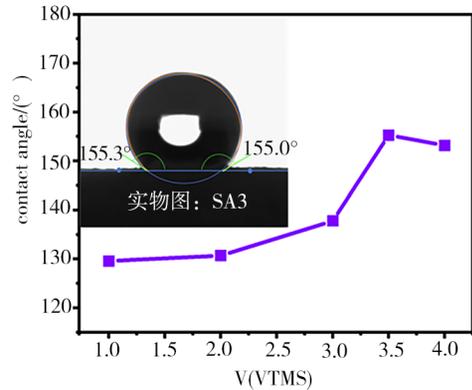


图 12 硅基气凝胶的接触角

Fig. 12 Density and contact angle of silicon-based aerogels

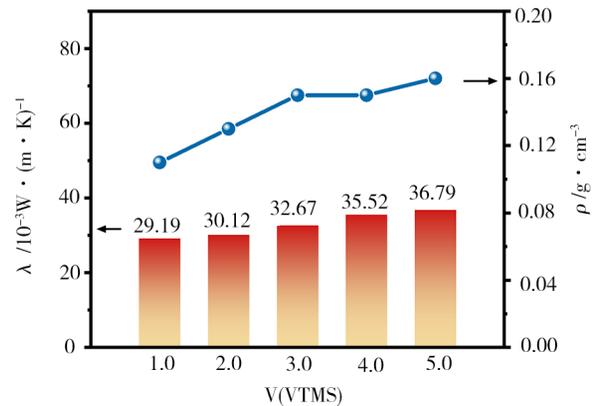


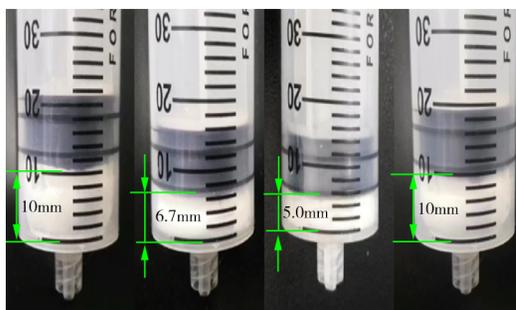
图 13 硅基气凝胶常温下的热导率和密度

Fig. 13 Thermal conductivity and density of silicon-based aerogels at room temperature

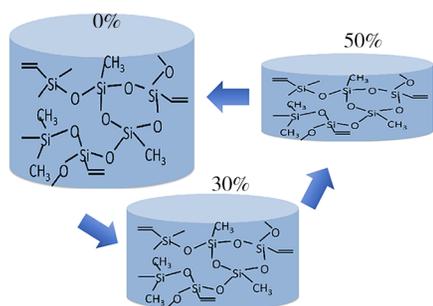
2.5 硅基气凝胶的压缩性能分析

硅烷前驱体中不参与反应的甲基、乙烯有机基宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

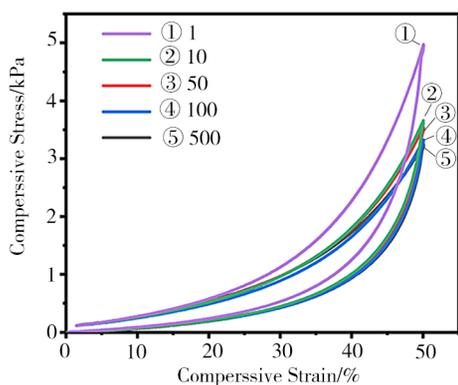
团之间的相互排斥提供了气凝胶一定程度的柔性。在所有合成气凝胶中,复合气凝胶SA3显示出良好的可压缩性,可以承受50%的外部压缩并且在压力释放后可以迅速恢复到原始体积,没有任何机械断裂[图14(a)]。图14(b)显示了SiO₂气凝胶的微观结构



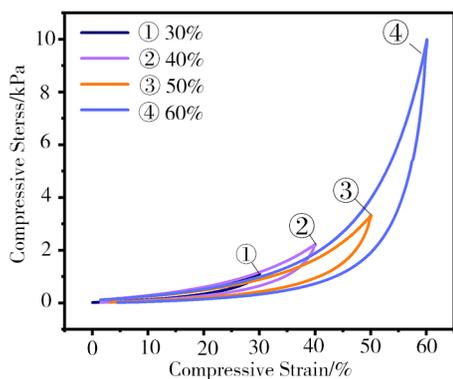
(a) 在30%、50%压缩的宏观变化图



(b) 微观结构变化图



(c) 循环压缩500次的压缩曲线



(d) 在不同应变下压缩曲线

图14 SA3气凝胶的压缩性能

Fig. 14 Compression properties of SA3 aerogels

构压缩回复的整个过程,在50%形变下不同循环的压缩应力-应变曲线如图14(c)所示,材料经过500次循环后应力无明显变化,在第1个循环到第500个循环的过程中,最大压缩应力呈一定程度的下降趋势,在随后的循环里,气凝胶的各项力学性能指标并未发生明显的变化。气凝胶最大压缩应力始终保持在初始值的50%以上,与普通易碎的硅基气凝胶相比,SA3气凝胶可以承受高压压缩应变。进一步探索SA3气凝胶在不同形变下的压缩曲线[图14(d)],压缩至60%后仍具有回弹性。

2.6 硅基气凝胶的热稳定性分析

图15为SA3气凝胶在空气氛围的TG-DSC曲线,硅基气凝胶在261和483℃处有两个明显的放热峰,主要是由于乙烯基和甲基的氧化引起的。硅基气凝胶在150℃时开始热分解,在180℃处达到最大失重率,加之气凝胶分子结构内部的不稳定^[32],使得材料的热稳定性和残重率有极大幅下降,在800℃时残重率为60%。

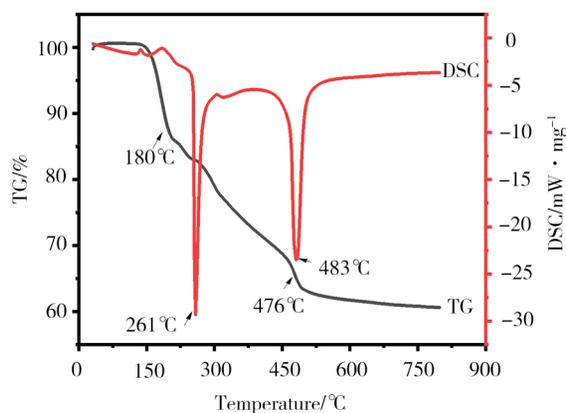


图15 SA3样品的TG-DSC分析

Fig. 15 TG-DSC analysis of SA3 samples

3 结论

以DMDMS和VTMS硅烷作为共前驱液,通过一锅法和常压干燥法成功制备柔软的乙烯基硅气凝胶材料。当 $n(\text{DMDMS}/\text{VTMS})=2:3$ 时,制得的气凝胶表面光滑平整,具有均匀的纳米介孔三维网络结构、 0.13 g/cm^3 的低密度、 $2.919 \times 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的低热导率和 151° 的高疏水角。与纯SiO₂气凝胶相比,甲基和乙烯基有机基团的引入增强了硅基气凝胶的力学性能,压缩至50%后可以恢复原始尺寸,经过500次循环压缩后应力为3.5 kPa。通过简单低耗制备出的这种柔性气凝胶将在隔热领域有着广阔的应用前景。

参考文献

[1] LAMY-MENDES A, SILVA R F, DURAES L. Advances in carbon nanostructure-silica aerogel composites: a review[J].

Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 1340–1369.

[2] 冯坚, 冯军宗, 姜勇刚. 柔性氧化硅气凝胶隔热复合材料的制备和性能[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(2): 42–46.

FENG J, FENG J Z, JIANG Y G. Preparation and properties of flexible silica aerogel composites for thermal insulators[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(2): 42–46.

[3] HUANG H, WU C, WU S Q, et al. Super-flexible, thermostable and superhydrophobic polyimide/silicone interpenetrating aerogels for conformal thermal insulating and strain sensing applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 441: 136032.

[4] 梁馨, 罗丽娟, 谭珏, 等. 美国空间探测器热防护材料发展现状及趋势. 材料导报, 2016, 30(S1): 551–557.

LIANG X, LUO L J, TAN Y, et al. Current status and trend of thermal protection material for space exploration in current status and trend of thermal protection material for space exploration in America[J]. Materials Reports, 2016, 30(S1): 551–557.

[5] MALEKI H, DURAES L, PORTUGAL A. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 385: 55–74.

[6] KARAMIKAMKAR S, NAGUIB H E, PARK C B. Advances in precursor system for silica-based aerogel production toward improved mechanical properties, customized morphology, and multifunctionality: a review [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 276: 102171.

[7] HAJAR M, LUISA D, ANTONIO P. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 385: 55–74.

[8] HE S, CHEN X F. Flexible silica aerogel based on methyltrimethoxysilane with improved mechanical property [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 463: 6–11.

[9] LERMONTOV S A, SIPYAGINA N A, MALKOVA A N, et al. Methyltrimethoxysilane-based elastic aerogels: effects of the supercritical medium on structure-sensitive properties [J]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2015, 60: 488–492.

[10] ZU G Q, KANAMORI K, MAENO A, et al. Superflexible multifunctional polyvinylpolydimethylsiloxane-based aerogels as efficient absorbents, thermal superinsulators, and strain sensors [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(31): 9722–9727.

[11] NADARGI D Y, LATTHE S S, HIRASHIMA H, et al. Studies on rheological properties of methyltriethoxysilane (MTES) based flexible superhydrophobic silica aerogels [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009, 117(3): 617–626.

[12] LI J, ZHAO G L, ZHAO C, et al. Preparation of methyltrimethoxysilane derived silica aerogel films via ambient

pressure drying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(S1): 518–521.

[13] 王鲁凯. 双交联聚有机硅氧烷气凝胶的制备及其性能研究[D]. 国防科技大学, 2019.

WANG L K. Synthesis and properties of doubly cross-linked polyorganosiloxane aerogels [D]. National University of Defense Technology, 2019.

[14] FENG J, ZHAO N, JIANG Y G, et al. Preparation and characterization of Si-C-O aerogels using tetraethoxysilane and dimethyldiethoxysilane as precursors dimethyldiethoxysilane as precursors [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S3): 458–461.

[15] 罗艺, 夏书海, 牛波, 等. 柔性有机硅气凝胶的制备及其高温无机化转变研究 [J]. 无机材料学报, 2014(2): 14542–14549.

LUO Y, XIA S H, NIU B, et al. Preparation and high temperature inorganic transformation of flexible silicone aerogels [J]. Journal of Inorganic Materials, 2014(2): 14542–14549.

[16] LIU C, WU S J, YANG Z F, et al. Mechanically robust and flame-retardant silicon aerogel elastomers for thermal insulation and efficient solar steam generation [J]. ACS Omega, 2020, 5(15): 8638–8646.

[17] HAYASE G, KANAMORI K, HASEGAWA G, et al. A superamphiphobic macroporous silicone monolith with marshmallow-like flexibility [J]. Angewandte Chemie, 2013, 52(41): 10788–10791.

[18] WU Y W, ZHANG W C, YANG R J, et al. Ultralight and low thermal conductivity polyimide-polyhedral oligomeric silsesquioxanes aerogels [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303(2): 1700403.

[19] JIANG L, KATO K, MAYUMI K, et al. One-pot synthesis and characterization of polyrotaxane-silica hybrid aerogel [J]. ACS Macro Letters, 2017, 6(3): 281–286.

[20] WU X D, MAN J W, LIU S J, et al. Isocyanate-crosslinked silica aerogel monolith with low thermal conductivity and much enhanced mechanical properties: Fabrication and analysis of forming mechanisms [J]. Ceramics International, 2021, 47(19), 26668–26677.

[21] 李治. 增韧疏水性二氧化硅气凝胶制备及燃烧性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2017.

LI Z. Study on Reinforced Hydrophobic Silica Aerogels and Their Combustion Performance [D]. University of Science and Technology of China, 2017.

[22] ZHANG X, ZHANG T, YI Z, et al. Multiscale mullite fiber/whisker reinforced silica aerogel nanocomposites with enhanced compressive strength and thermal insulation performance [J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28561–28568.

[23] 桓珊. 芳纶纳米纤维气凝胶的结构设计与性能研究[D]. 天津工业大学, 2021.

HUAN S. Structure Design and Performance Study of Aramid Nanofiber Aerogel. Tiangong University, 2021.

[24] HWANG S W, JUNG H H, HYUN S H, et al. Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2007, 41(2): 139-146.

[25] WU G Y, YU Y X, CHENG X, et al. Preparation and surface modification mechanism of silica aerogels via ambient pressure drying [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 129(1-2): 308-314.

[26] EHGARTHNER, CR, GRANDL S, FEINLE A, et al. Flexible organofunctional aerogels [J]. Dalton Transactions, 2017, 46: 8809-8817.

[27] WU X D, ZHONG K, DING J, et al. Facile synthesis of flexible and hydrophobic polymethylsilsesquioxane based silica aerogel via the co-precursor method and ambient pressure drying technique [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 530: 119826.

[28] HE S, HUANG D M, BI H J, et al. Synthesis and characterization of silica aerogels dried under ambient pressure

bed on water glass [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2015, 410: 58-64.

[29] SING K S W, WILLIAMS R T. Physisorption hysteresis loops and the characterization of nanoporous materials [J]. Adsorption Science & Technology, 2004, 22 (10): 773-782.

[30] MULIK S, SOTIRIOU-LEVENTIS C, CHURU G. Cross-linking 3D assemblies of nanoparticles into mechanically strong aerogels by surface-initiated free-radical polymerization [J]. Chemistry of Materials, 2008, 20(15): 5035-5046.

[31] YUE S, LI X L, YU H J, et al. Preparation of high-strength silica aerogels by two-step surface modification via ambient pressure drying [J]. Journal of Porous Materials, 2021, 28: 651-659.

[32] 姚鸿俊, 王飞, 朱召贤, 等. 柔性有机硅气凝胶复合材料的制备及性能研究 [J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(6): 26-32.

YAO H J, WANG F, ZHU Z X, et al. Preparation and properties of flexible silicone aerogel composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(6): 26-32.

《宇航材料工艺》征订启事

·中国科学引文数据库核心期刊 ·中国中文核心期刊 ·中国科技论文统计源期刊
·国际宇航文摘(IAA)、美国化学文摘(CA)、金属文摘(METADEx)收录核心期刊

- 《宇航材料工艺》创刊于1971年,是国内外公开发行的国家级科技期刊
- 入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网及万方数据资源系统数字化期刊群等
- 在第二届国家期刊奖评比活动中获百种重点期刊奖
- 荣获2022年度中国航天科技期刊优秀奖
- 在航空航天领域高质量科技期刊分级目录中排在T3区
- 由航天材料及工艺研究所主办
- 主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践
- 主要栏目有:专论、综述、计算材料学、新材料新工艺、测试分析、工程实践、知识窗、科技信息、成果简介以及会议信息等
- 适合于航空航天、冶金、石油化工、机械电子、轻工、汽车、造船等部门,从事材料工艺研究生产的科研技术人员、管理人员及高校师生阅读
- 中国标准连续出版物号 ISSN 1007-2330, CN 11-1824/V, 双月刊102页,开本尺寸为210mm×297mm,逢双月出版,彩色印刷,每期定价为40.00元,全年总价为240.00元

欢迎各界读者订阅!

本刊参加了天津半导体杂志社的联合征订,可汇款至天津半导体杂志社,邮编300220,注明“订阅《宇航材料工艺》,代号9769”。也可直接在编辑部、淘宝或微店订阅。

开户银行:建行首体南路支行

账户名称:航天材料及工艺研究所

账号:2170005102(务必将订单与银行回执发至编辑部邮箱)

通信地址:100076 北京市9200信箱73分箱18号《宇航材料工艺》编辑部

联系人:钱 昆,电话:010-68383267;传真:010-68383237, E-mail:703@china.com