

引用:侯德旺,徐宇泽,郭聪,等. 弹性石墨烯气凝胶热界面材料的制备及性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026, 39(4):565-572.

Citation:HOU Dewang, XU Yuze, GUO Cong, LIU Lin, LI Chengjie. Preparation and properties of elastomeric graphene aerogel thermal interface materials[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(4):565-572.

文章编号 1672-6634(2026)04-0565-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025110008

# 弹性石墨烯气凝胶热界面材料的制备及性能研究

侯德旺<sup>1</sup>,徐宇泽<sup>1</sup>,郭聪<sup>1</sup>,刘霖<sup>1</sup>,李成杰<sup>1,2</sup>

(1. 江苏海洋大学 环境与化学工程学院,江苏 连云港 222005; 2. 江苏省海洋资源开发研究院(连云港),江苏 连云港 222005)

**摘要** 石墨烯气凝胶是由石墨烯通过分子间作用力形成的具有连续3D网络结构的材料,具有质轻、密度低和导热性能优异等优点,在高性能热界面材料应用展现出较大的应用前景。然而,纯石墨烯气凝胶孔隙率大、力学弹性较差,限制了其在热界面材料中的实际应用。基于此,采用氧化石墨烯(GO)和天然胶乳(NRL)为原料,通过化学还原自组制备了石墨烯/天然胶乳复合气凝胶(GNA),利用石墨烯片层间的 $\pi$ - $\pi$ 相互作用力,成功构建了连续的三维导热通路,复合材料垂直方向上的导热系数达到 $0.35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;同时在石墨烯气凝胶的孔隙中填充天然胶乳,赋予复合气凝胶优异的力学强度和弹性,拉伸强度最高达 $3.0\text{ MPa}$ 以上,断裂伸长率超过 $400\%$ 。这项工作为石墨烯气凝胶基热界面复合材料的热管理应用提供了新思路。

**关键词** 石墨烯气凝胶;天然胶乳;热界面材料;导热系数

中图分类号 TQ427.26;TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Preparation and properties of elastomeric graphene aerogel thermal interface materials

HOU Dewang<sup>1</sup>,XU Yuze<sup>1</sup>,GUO Cong<sup>1</sup>,LIU Lin<sup>1</sup>,LI Chengjie<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Jiangsu Institute of Marine Resources Development (Lianyungang), Lianyungang 222005, China)

**Abstract** Graphene aerogel is a material with a continuous 3D network structure formed via intermolecular forces between graphene sheets. It exhibits advantages such as lightweight, low density, and excellent thermal conductivity, showing great potential for application in high-performance thermal interface materials. However, the high porosity and poor mechanical elasticity of pure graphene aerogels limit their practical use in such applications. To address this, this study employed graphene oxide (GO) and natural rubber latex (NRL) as raw materials to fabricate a graphene/natural rubber latex composite aerogel (GNA) through chemical reduction and self-assembly. By leveraging the  $\pi$ - $\pi$  interactions between graphene layers, a continuous three-dimensional thermally conductive pathway was successfully constructed, achieving a

收稿日期:2025-11-21

基金项目:中国博士后科学基金项目(2024M751205);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(21KJB430028)资助

通信作者:李成杰,男,汉族,博士,副教授,江苏省双创博士,研究方向:高性能高分子复合材料,E-mail:licj\_poly@jou.edu.cn;

刘霖,男,汉族,博士,教授,江苏省“六大人才高峰”高层次人才,研究方向:绿色催化材料,E-mail:liulin@jou.edu.cn.

vertical thermal conductivity of 0.35 W/(m·K) in the composite. Meanwhile, the incorporation of natural rubber latex into the pores of the graphene aerogel endowed the composite with outstanding mechanical strength and elasticity, including a tensile strength of over 3.0 MPa and an elongation at break exceeding 400%. This work provides a new strategy for the application of graphene aerogel-based composites in thermal management.

**Keywords** graphene aerogel; natural rubber latex; thermal interface materials; thermal conductivity

## 0 引言

随着电子技术的迅速发展,电子元器件的集成度和组装密度不断提高,导致电子产品的功耗和热量迅速上升<sup>[1]</sup>。高温会影响电子设备的稳定性和服役寿命,因此排出多余热量成为需要解决的紧迫问题<sup>[2]</sup>。散热的核心在于热源和散热器之间的热界面材料(TIMs)<sup>[3]</sup>,为了填充近乎绝热的空气,TIMs 需要具有高纵向导热系数和良好的可压缩性,以实现优异的传热效果<sup>[4]</sup>;因此,研究制备具有优异导热性能的弹性 TIMs 对于电子器件热管理领域具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前工业上常用的 TIMs 通常是通过向柔性聚合物基体中填充高导热填料(如氮化硼、氮化铝、氧化铝、碳纳米管、石墨烯等)制备而成<sup>[6]</sup>;然而,这些传统 TIMs 通过提高导热填料含量来增加导热系数,导致 TIMs 的加工能力和机械性能变差,随着温度和使用时间增加,其性能也会大幅下降,已无法满足不断增长的散热需求,因此迫切需要开发高效传热的新型 TIMs<sup>[7]</sup>。石墨烯是由单层  $sp^2$  杂化碳原子构成的、具有六边形蜂窝状晶体结构的二维碳材料,以其超高的本征导热系数被视为一种具有巨大潜力的导热材料<sup>[8]</sup>。但由于石墨烯的二维特性,其纵向导热性能有限,因此需要设计三维网络结构和延长传热路径,从而提高传热性能<sup>[9]</sup>。石墨烯气凝胶拥有连续的三维网络结构,可将石墨烯优异的平面导热性延伸至多个方向,形成连续的传热通路<sup>[10]</sup>。此外,石墨烯复合气凝胶具有低密度等特点<sup>[11]</sup>,在高性能 TIMs 领域具有极大的应用前景。然而,纯石墨烯气凝胶存在孔隙率大、弹性差的问题,无法有效填充散热器和热源之间的空隙,限制了其实际应用<sup>[12-13]</sup>。为解决这些问题,研究者尝试通过浸渍环氧树脂等聚合物对其进行改性,Wang 等人<sup>[14]</sup>通过无冻干工艺制备了具有远程定向结构的低密度石墨烯气凝胶,浸渍环氧树脂制备得到了石墨烯/环氧复合材料,当石墨烯体积分数为 1.84%时,导热系数达到 11.6 W/(m·K)。Han 等人<sup>[15]</sup>通过化学气相沉积改变气凝胶骨架的孔隙空间,实现了还原氧化石墨烯-碳纳米管-垂直富边石墨烯(rGO-CNT-VG)的共价交联,所制备的 rGO-CNT-VG/环氧复合材料的导热系数为 2.46 W/(m·K),是 rGO/环氧复合材料的 5.1 倍;Liu 等人<sup>[16]</sup>通过双向冷冻法构筑了片层孔壁堆叠致密且垂直取向的各向异性石墨烯气凝胶,气凝胶孔壁优异的热传导能力赋予环氧树脂复合材料极高的垂直导热系数,在石墨烯体积分数为 2.30%时,垂直方向导热系数高达 20.0 W/(m·K);这些方案虽然取得了较高的导热性能,但并未考虑到柔性对 TIMs 实际应用的影响。环氧树脂的引入往往导致材料刚性增加,牺牲了关键的柔性弹性回复能力,使其难以紧密贴合电子器件的不规则散热界面,也无法抵御动态工况下的机械振动与热循环形变,最终仍难以满足高效散热与界面适配的双重实际要求。

天然橡胶具备优异的压缩弹性与柔性,可很好地满足 TIMs 对界面填充性和动态形变耐受性的需求,但其自身极低的导热性又限制了直接应用,必须通过导热改性突破性能瓶颈<sup>[17]</sup>。基于上述分析,将天然橡胶与石墨烯气凝胶相结合,发挥天然橡胶的高弹性和石墨烯优异的高导热特性,制备石墨烯/天然橡胶复合材料可作为一种思路。因此,本文以氧化石墨烯(GO)和天然胶乳(NRL)为原料,利用表面活性剂对 NRL 进行稳定化处理,以抗坏血酸为还原剂,采用化学还原自组装法制备石墨烯/NRL 复合材料。研究 GO 与 NRL 比例对其力学性能和导热性能的影响,旨在获得具有优异导热和力学性能的石墨烯气凝胶基弹性 TIMs。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

GO 分散液(10 mg/mL,粒径为 8~22  $\mu\text{m}$ )购自于常州第六元素材料科技股份有限公司;浓缩 NRL(固

含量为62%)购自于济南世纪天成化工有限公司;抗坏血酸购自于广东西陇科学股份有限公司;非离子表面活性剂 TERGITOTLM 15-S-9 购自于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水乙醇购自于天津市永大化学试剂有限公司;其他材料均为市售。

## 1.2 材料制备

将稳定的 NRL( $\text{pH}=10$ )直接滴入 GO 溶液( $\text{pH}=2$ )中时,由于两者之间的强静电相互作用会出现肉眼可见的沉降和絮凝,为保证 NRL 在 GO 溶液中均匀分散,需要使用表面活性剂 TERGITOTLM 15-S-9 对其进行稳定。吸附在 NRL 颗粒上的表面活性剂分子可以在  $\text{pH}=2$  的条件下,将其表面电荷从正变为负,增强与 GO 的排斥力,以防止沉降和絮凝的发生。具体操作如下:称取 10 g 固含量为 60% 的 NRL 浓缩液并向其中加入 10 g 去离子水,得到固含量为 30% 的 NRL 乳液;向稀释完的 NRL 乳液中加入 NRL 固含量 5% 的表面活性剂,磁力搅拌 2 h。

称取 6 g GO 分散液,向其中加入 6 g 去离子水,先使用磁力搅拌机搅拌 5 min,超声分散 10 min,配制成浓度为 5 mg/mL 的 GO 分散液。随后,取 6 mL 配置好的 GO 分散液,按 GO 与 NRL 的质量比为  $1:x$  ( $x=0,10,20,30$  和  $40$ )向其中加入稳定后的 NRL 乳液,磁力搅拌 10 min,再向加入 60 mg 抗坏血酸,继续搅拌 5 min;搅拌完成后将其倒入圆柱形塑料模具中,在  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  下预还原 1 h,冷却至室温后放入  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冰箱中冷冻 4 h,随后在室温下解冻,在  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  继续还原 5 h(GO 还原产率约为 71%),得到石墨烯/NRL 复合水凝胶。使用浓度为 1% 的乙醇水溶液洗涤后,在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  下干燥 12 h,得到石墨烯/NRL 复合气凝胶,命名为 GNA- $x$ 。

将 GNA 放入特定的热压模具中,在  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  和 10 MPa 下,热压 10 min 得到 GNA 薄膜。由于纯石墨烯气凝胶(GA)及 GO 与 NRL 的质量比为  $1:10$  的 GNA,脆性较大,弹性较差,无法作为 TIMs 使用,因此本文主要研究 GNA-20、GNA-30 和 GNA-40。图 1 为 GNA 材料的制备流程图及三维导热网络示意图。

## 1.3 材料微观结构及性能表征

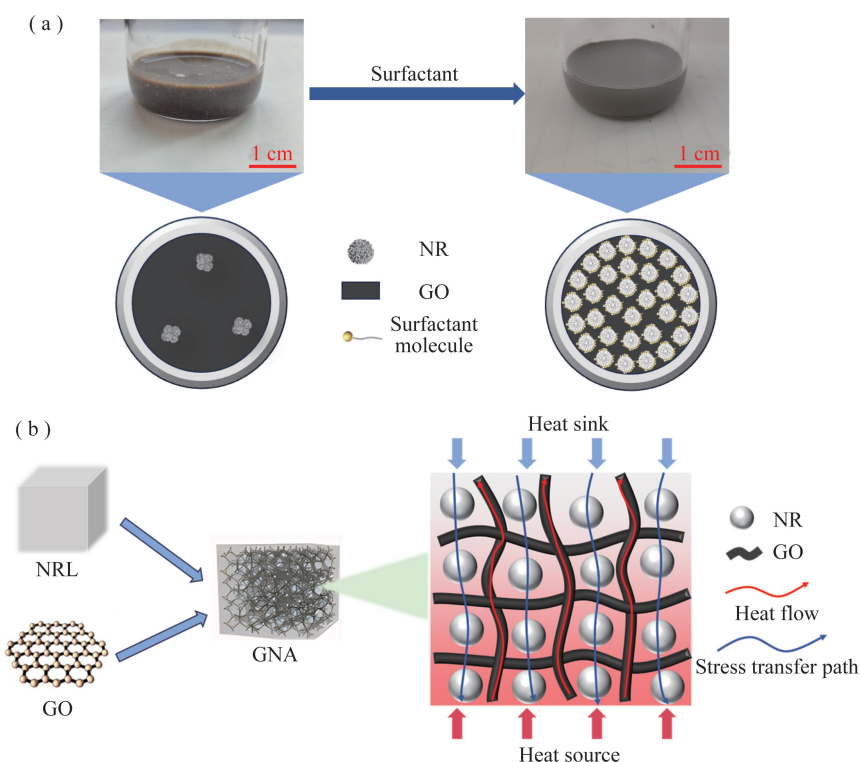
采用美国赛博飞世尔公司 Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)分析气凝胶的结构组成。使用日本电子株式会社 JEOL JSM-5900 LV 型扫描电子显微镜(SEM)进行形貌和低温脆断断面形貌分析。使用德国耐驰公司 Netzsch STA 449 F3 Jupiter 型热重(TG)分析仪对 GNA 进行热重分析。实验在氮气气氛中进行,温度范围  $40\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $10\text{ K/min}$ ,气流速率为  $50\text{ mL/min}$ 。使用日本理学株式会社 Rigaku D/max III B 型 X 射线粉末衍射仪(XRD)表征材料的晶体结构和物相组成。采用深圳三思纵横科技股份有限公司 UTM4304-G 型号电子万能试验机,测试样品在不同应变情况下的压缩应力-应变曲线。试样采用裁刀裁切成哑铃形状,按照相应的国家标准(GB/T 528-2009)进行测试,以  $500\text{ mm/min}$  的速度进行三次拉伸测试取平均值。采用德国 Fluke 公司 FLUKE 60S+ 红外热成像仪进行热流响应性能测试。测试升温速率的热流响应时,将待测样品置于  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的热台,每隔 20 s 对样品表面进行捕捉拍照并记录温度变化,用红外热成像仪记录样品表面温度随时间的变化。采用德国耐驰公司 Netzsch LFA 467 型激光热导仪测量材料的导热系数和热扩散系数,样品尺寸为  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。

# 2 结果与讨论

## 2.1 GNA 的形貌结构

图 1 为 NRL 加入表面活性剂前后对比以及 GNA 复合材料的三维网络构建示意图,可以看到,表面活性剂的加入可以形成稳定胶乳并明显提升 GO 的分散性,将 NRL 浸渍在石墨烯气凝胶中制备 GNA 复合材料,以构建石墨烯连续三维导热网络结构。

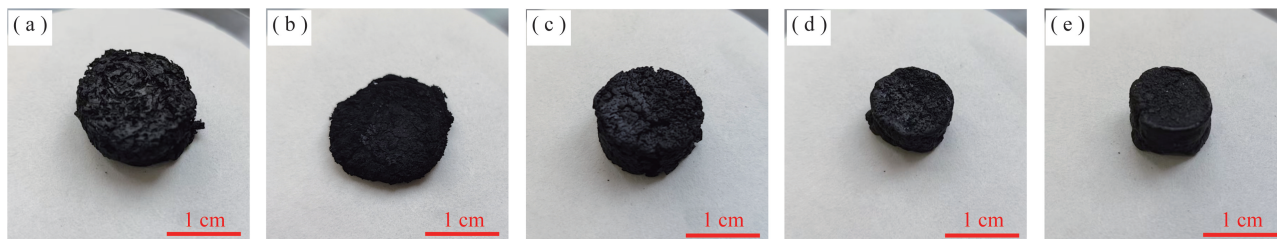
图 2 为 GNA- $x$  样品的光学照片。从图中可以看出,随着 NRL 含量增加,石墨烯气凝胶的孔隙率逐渐降低,当  $m(\text{GO}):m(\text{NRL})$  达到  $1:40$  时,GNA-40 已形成密实的橡胶弹性体,同时其密度也不断增加。这是由于在化学还原自组装过程中,NRL 固化并填充在石墨烯气凝胶的孔隙中,在干燥过程中天然橡胶中的水分不断流失,导致其体积不断收缩。NRL 的含量越高,其体积收缩率越大,密度也越高。



注: (a) GO 加入表面活性剂前后对比图; (b) GNA 的制备及三维导热网络示意图。

图 1 GO 溶液中均匀分散过程和 GNA 的制备流程图及三维导热网络示意图

Fig. 1 Process diagram of uniform dispersion in GO solution, preparation process of GNA and schematic diagram of three-dimensional thermal conductivity network



注: (a) GA; (b) GNA-10; (c) GAN-20; (d) GNA-30; (e) GNA-40。

图 2 GNA-x 的光学照片

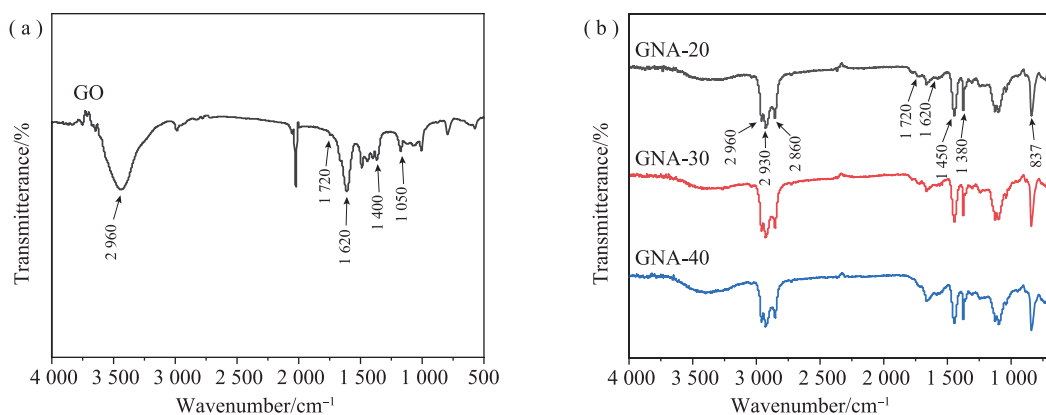
Fig. 2 Optical photos of synthesized GNA-x

## 2.2 GNA 的结构分析

图 3 为 GO 及 GNA-x 的 FTIR 光谱。可以看出,GO 在  $3420\text{ cm}^{-1}$  处呈现宽且强的吸收峰,对应羟基( $\text{—OH}$ )的伸缩振动峰; $1720\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应 GO 边缘的羧基( $\text{—COOH}$ )中羰基( $\text{C=O}$ )的伸缩振动; $1620\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应  $\text{—OH}$  的弯曲振动和碳碳双键( $\text{C=C}$ )的环振动; $1400\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应  $\text{C—H}$  的弯曲振动; $1050\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应环氧基团( $\text{C—O—C}$ )的伸缩振动。对于 GNA, $3420\text{ cm}^{-1}$  处的羟基( $\text{—OH}$ )伸缩振动峰消失, $1620\text{ cm}^{-1}$  处的一  $\text{OH}$  的弯曲振动和  $1720\text{ cm}^{-1}$  的  $\text{C=O}$  的伸缩振动峰明显减弱,表明通过抗坏血酸的还原,GO 的含氧基团数量减少,证实了其部分还原及石墨烯气凝胶形成。同时,FTIR 光谱中也出现了明显的天然橡胶的特征吸收峰: $2960\text{ cm}^{-1}$  对应  $\text{C—H}$  对称伸缩振动吸收峰, $2930\text{ cm}^{-1}$  和  $2860\text{ cm}^{-1}$  分别对应  $\text{—CH}_2\text{—}$  的  $\text{C—H}$  不对称和对称伸缩振动吸收峰, $1450$  和  $1380\text{ cm}^{-1}$  对应  $\text{C—H}$  面外变形振动和不对称变形振动吸收峰, $837\text{ cm}^{-1}$  对应  $\text{—CH=CH}_2$  的  $\text{C—H}$  面外变形振动吸收峰<sup>[18]</sup>,证明了 GNA 复合材料的成功制备。

利用 XRD 研究了添加不同含量 NRL 后还原 GO(rGO)层间距的变化。如图 4 所示,GA 的特征衍射峰

位于约  $25.1^\circ$ , 对应于石墨烯典型的(002)晶面衍射<sup>[19]</sup>, 当引入 NRL 后, GNA 的衍射峰表现出明显的向低角度偏移的趋势; 且随着 NRL 在复合体系中比例增加, GNA 的衍射峰位置进一步向低角度偏移。这是由于 NRL 是碱性乳液体系, 它的增加消耗了一部分抗坏血酸, 导致 rGO 片层上残留了更多的含氧基团, 这使得 rGO 片层间  $\pi$ - $\pi$  堆叠相互作用减弱, rGO 片层之间的层间距增加, 对 GNA 中三维导热网络的形成有一定影响。



注: (a) GO; (b) GNA- $x$ 。

图3 样品的 FTIR 光谱

Fig. 3 FTIR spectra of samples

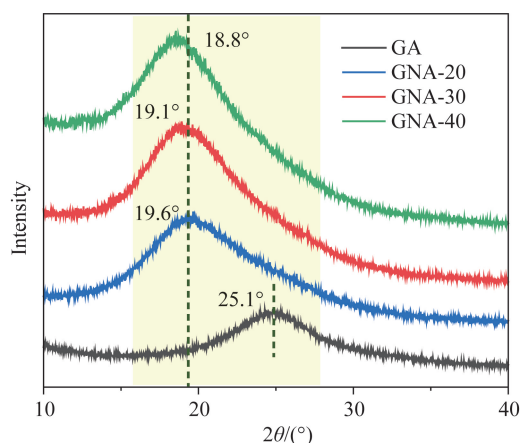


图4 样品的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of samples

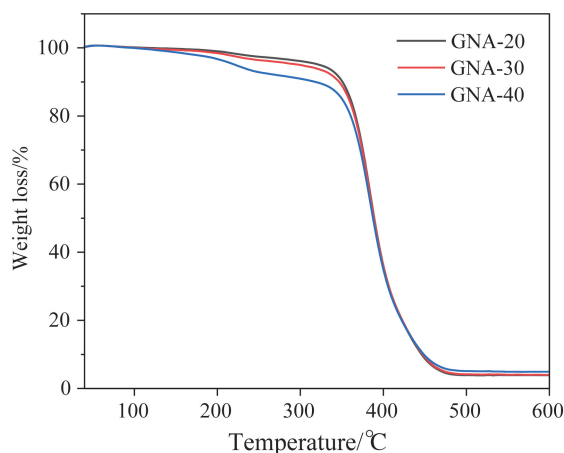


图5 GNA- $x$  的 TG 曲线

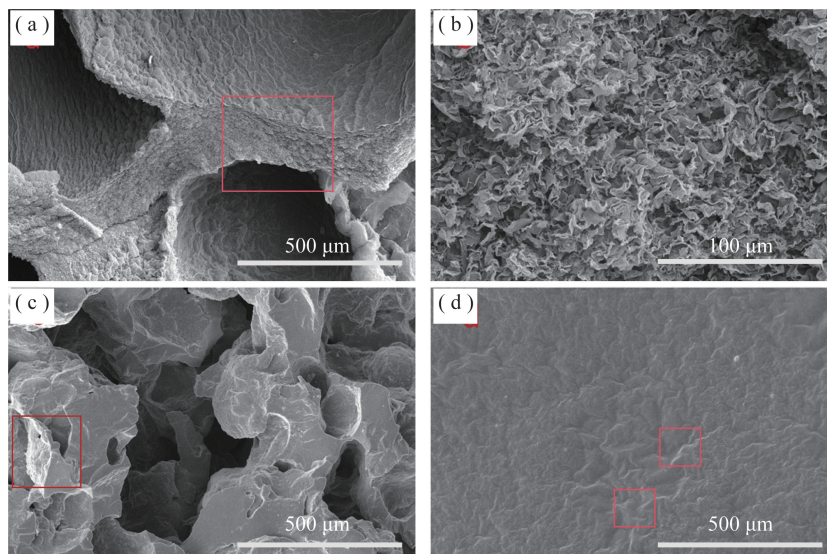
Fig. 5 TG curves of GNA- $x$

图5为GNA的TG曲线,从图中可以看出,GNA的热失重过程中有两个阶段,第一个阶段发生在  $185^\circ\text{C}$  附近,与GO中含氧官能团的热降解及部分结合水的损失有关,较高比例的NRL导致GO中含氧官能团的数量相对较多,因此在该阶段,高比例NRL的GNA热失重率相对较高;第二个阶段从  $300^\circ\text{C}$  开始,为GNA的主要分解阶段,主要与天然橡胶分子链的热分解有关。此外,随NRL含量的增加,主要分解阶段以及热失重后的残碳率基本一致,表明不同含量NRL对GNA的热稳定性影响不大。

### 2.3 GNA微观结构与力学性能

图6为GA和GNA的SEM图像。可以看出,GA和GNA具有丰富的孔隙和多孔结构,孔径约为几百微米,两者内部均形成了丰富的三维孔结构,石墨烯片层间存在大量交联网络,这些结构构成了连续的三维导热通路,为热量的传递提供了有效的传输路径。在GNA的SEM图像中,由于弹性NRL填充于石墨烯气凝胶孔结构中,极大增强了其弹性和力学性能,这有利于TIMs在安装和使用过程中与界面的紧密贴合。但NRL的弱碱性环境部分消耗了抗坏血酸,导致GO的还原程度降低,片层表面残留较多含氧官能团,使得石墨烯片层间的 $\pi$ - $\pi$ 堆叠相互作用减弱,片层直接连接减少,三维网络的连续性受到一定程度的影响,这与XRD测试中观察到的层间距增大趋势一致。与此同时,可明显观察到天然橡胶分子填充于气凝胶的内部孔隙中,部分石墨烯片层则分散于橡胶基体内,被橡胶相隔离,这一结构差异虽对复合材料的导热性能略有影

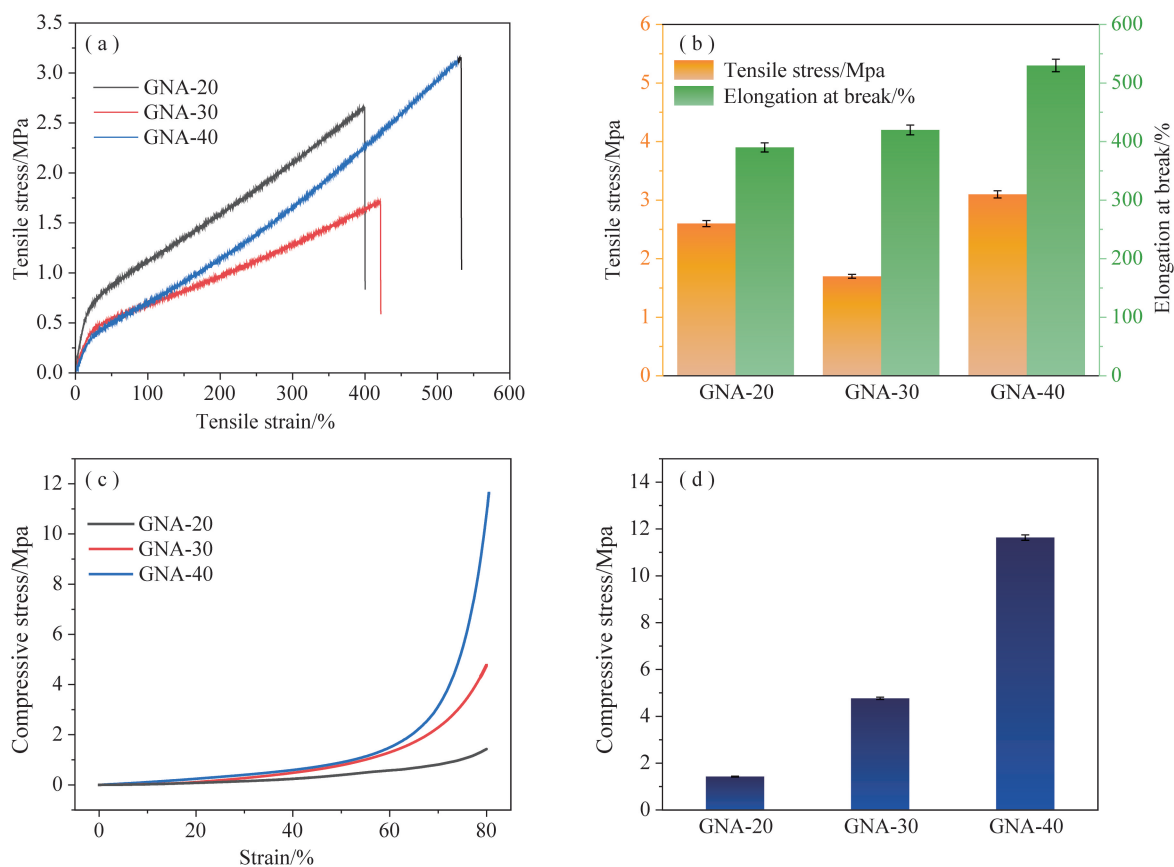
响,但 NRL 的填充效应与界面相互作用恰好弥补了 GA 的脆性短板,赋予材料优异的拉伸、压缩及回弹性能。



注:(a,b) GA;(c,d) GNA。

图 6 样品的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of samples



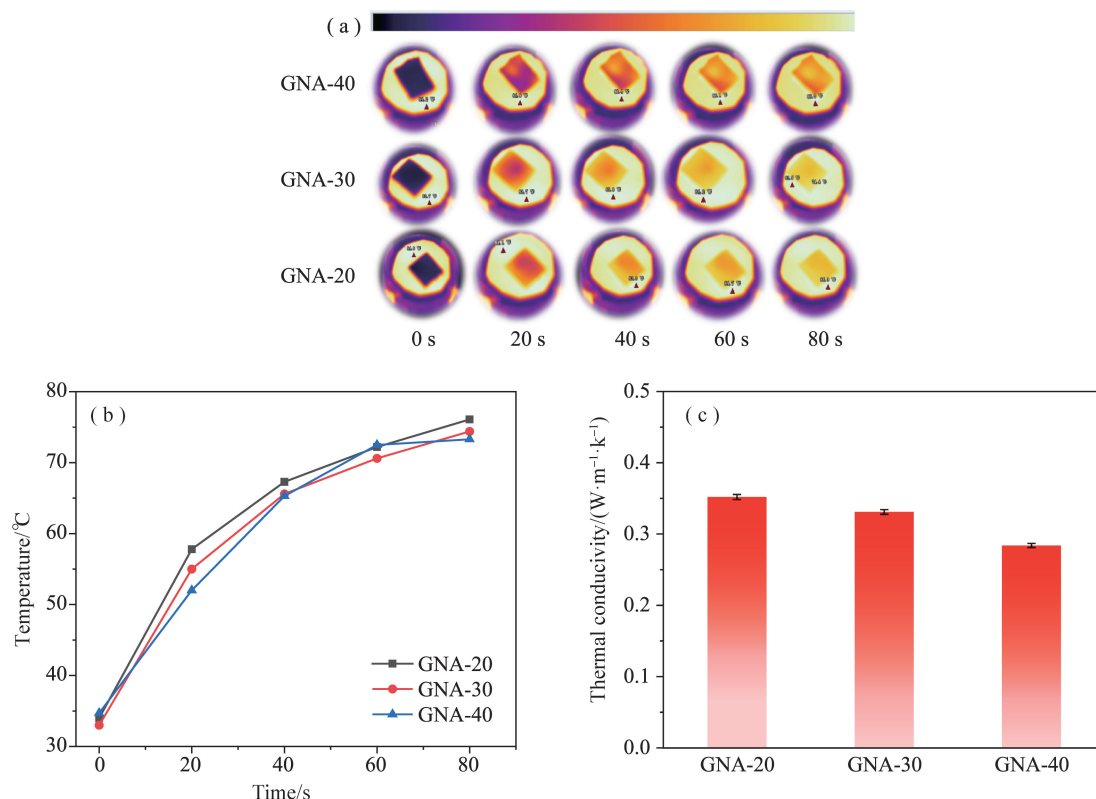
注:(a) 应力-应变曲线;(b) 拉伸强度和断裂伸长率;(c) 压缩应力-应变曲线;(d) 在 80%应变下的压缩性能。

图 7 GNA-x 的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of GNA-x

为系统评估 GNA 的力学性能,本研究对 GNA-x 样品进行了标准化处理,使用平板热压机将不同 GNA 样品热压成 1 mm 厚的薄膜,最后使用万能拉力测试机进行拉伸测试。图 7(a,b)为不同 GNA 样品的拉伸性能。从图中可以看出随着 NRL 含量的增加,GNA 的断裂伸长率不断提升,均大于 400%,这是由于 NRL

具有高弹特性,NRL增加了复合气凝胶材料的可拉伸性和柔顺性;但在相同的伸长率下,高石墨烯负载量的GNA展现出更高的拉伸强度,表明石墨烯的增强作用。同时,NRL中的蛋白质分子可以与GNA中残存的含氧基团形成弱氢键相互作用,从而提高了拉伸强度<sup>[20]</sup>。从图7(c,d)中可以看出,随着NRL比例的增加,GNA材料的压缩强度不断提高,这是因为NRL的填充使得GNA中的孔隙不断减少,密度不断提高,赋予了GNA材料较强的可压缩性,良好的柔性使其能紧密贴合电子器件的不规则散热界面,有利于降低界面热阻<sup>[21]</sup>;同时,赋予材料抗机械振动与热循环形变能力,适用于汽车电子、可穿戴设备等动态热管理场景,在保障导热通路完整性的同时,为器件提供减震缓冲保护,实现“力学-导热”双功能集成。



注:(a) 红外热成像照片;(b) 温度-时间曲线;(c) 导热系数。

图8 GNA-*x* 的传热性能

Fig. 8 Heat transfer performances of GNA-*x*

## 2.4 GNA 导热性能

图8(a, b)为GNA-*x* 的红外热成像和温度随时间的变化曲线。可以看出,在相同的升温时间内,随着NRL比例的增加,GNA的升温速率变化较慢,样品的表面温度小于低比例NRL的GNA样品,而随着石墨烯含量的增加,GNA的升温速率不断提高,表现出显著的热响应性。这是由于高比例石墨烯片层间通过 $\pi$ - $\pi$ 堆叠在GNA材料中形成了更密集的三维导热通路。相反,随着NRL比例的增加,石墨烯片层间相互作用减弱,石墨烯片层被天然橡胶分子隔离,导致导热通路减少,导热能力下降。这一结果与SEM形貌和导热系数测试结果一致。图8(c)为GNA材料的导热系数,当 $m(\text{GO}):m(\text{NRL})$ 为1:40时,垂直导热系数为0.284 W/(m·K),而在1:30和1:20时,GNA的垂直导热系数分别为0.332和0.352 W/(m·K)。与常见TIMs相比,GNA的导热效率与常规硅基导热垫片相当,优于纯天然橡胶,且兼具高弹性优势,弥补了硅脂无弹性、传统垫片柔韧性不足的短板。一般而言,聚合物材料的平面导热高于垂直导热,垂直导热性能通常较低[0.05~0.2 W/(m·K)],需要填充大量导热填料才能明显提高导热系数,然而这也可能导致加工困难和力学性能下降等问题。本研究制备的弹性GNA材料其垂直导热系数已超过0.35 W/(m·K),相较于未改性的天然橡胶及目前大多数橡胶材料[<0.2 W/(m·K)],显著提升,且减少了传统高填料复合导致的加工与力学性能劣化问题。该GNA有望作为新型非硅基TIMs用于电子器件的热管理。

### 3 结论

本文以 GO 和 NRL 为原料,采用抗坏血酸化学还原自组装结合常压干燥工艺,成功制备了 GNA。研究表明,rGO 片层通过  $\pi$ - $\pi$  相互作用构建了连续的三维多孔骨架,形成高效声子传输路径;NRL 均匀包覆并填充于石墨烯网络间,形成独特的复合结构,协同增强了材料的力学性能与结构稳定性,使其拉伸强度超过 3.0 MPa,断裂伸长率高于 400%。该气凝胶的垂直导热系数达 0.35 W/(m·K),显著优于纯天然橡胶,并具备优异的热响应性能;通过调控 GO 与 NRL 的含量,可有效平衡导热与力学性能,赋予材料良好的可设计性,以适应柔性电子、可穿戴设备、高功率密度电子器件等不同应用场景的特定需求。本研究不仅验证了石墨烯三维网络与聚合物复合策略在协同提升材料导热与力学性能方面的有效性,也为开发面向实际热管理应用的高性能、可定制化非硅基 TIMs 提供了新思路与可行途径。

### 参 考 文 献

- [1] LUO Y D, ZHUO H O, CHEN X L, et al. High thermal conductive Cu-diamond composite sheets reinforced with single-layer diamond prepared by a three-step electroplating process[J]. *Diamond and Related Materials*, 2025, 152: 111984.
- [2] CAROLINE S C, RAVINDRAN A, GHOSH K, et al. Growth of succulent shaped fluorine incorporated Ni-Co LDH (F-NiCo(OH)<sub>2</sub>): elevating supercapacitor efficiency[J]. *Small*, 2025, 21(34): e70014.
- [3] 郭华超,王良旺,郭志强,等. 高导热聚合物/石墨烯热界面材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(9): 1-6.
- [4] LU N, ZHANG X, HUANG K, et al. 3D-printed graphene skeletons for highly-efficient thermal conductivity enhancement and superior compressibility of thermal interface composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 270: 111280.
- [5] 余翠娟,叶益聪,堵永国,等. 新型热界面材料-纳米银纸的性能研究[J]. *中国材料进展*, 2025, 44(4): 373-379.
- [6] ZHANG B, DOU Z L, YUAN R, et al. General approach to hydrolysis resistive aluminum nitride and its high-performance thermal interface materials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(45): 62721-62731.
- [7] ZENG J H, LI X C, LIANG T, et al. Thermally conductive and self-healable liquid metal elastomer composites based on poly(ionic liquid)s[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 194: 108922.
- [8] 孙晓颖,卢健卓,赵震. 石墨烯负载单原子 Pt 吸附甲醛的理论计算[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(2): 98-103.
- [9] LIU Q C, ZHANG Y, DONG H Y, et al. Programmable strains in a two-dimensional (2D) material monolayer[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(33): 30125-30136.
- [10] 朱成席,项赫,景颂扬,等. 聚丙烯腈基碳纤维表面三维导热结构构筑及其复合材料导热性能提升[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(6): 3135-3144.
- [11] ROZHNOVA E, BAIMOVA J. Morphology of graphene aerogel as the key factor: mechanical properties under tension and compression [J]. *Gels*, 2025, 11(1): 3.
- [12] DOS SANTOS-GÓMEZ L, GARCÍA J R, MONTES-MORÁN M A, et al. Ultralight-weight graphene aerogels with extremely high electrical conductivity[J]. *Small*, 2021, 17(41): 2103407.
- [13] WANG S S, XU Y J, MA Y, et al. Multifunctional nanocomposites reinforced by aligned graphene network via a low-cost lyophilization-free method[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 243: 110250.
- [14] HAN L Y, LI K Z, LIU H M, et al. Heterogeneous stacking strategy towards carbon aerogel for thermal management and electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142839.
- [15] LIU P F, LI X F, MIN P, et al. 3D lamellar-structured graphene aerogels for thermal interface composites with high through-plane thermal conductivity and fracture toughness[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 13(1): 22.
- [17] YUAN W R, ZHOU H, FENG L Y, et al. Ultralow thermal contact resistance for graphene composite films enabled by liquid metal gallium microcapsules[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 215: 110011.
- [18] ZHAO D, YU L, LIU D X. Ultralight graphene/carbon nanotubes aerogels with compressibility and oil absorption properties[J]. *Materials*, 2018, 11(4): 641.
- [19] 王昊,王熙宇,熊英,等. 萘基反应型石墨烯分散剂及其在增强聚乙烯醇复合薄膜中的应用[J]. *应用化学*, 2024, 41(12): 1712-1720.
- [20] ZHANG X F, YANG G H, ZONG L, et al. Tough, ultralight, and water-adhesive graphene/natural rubber latex hybrid aerogel with sandwichlike cell wall and biomimetic rose-petal-like surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 12(1): 1378-1386.
- [21] ZHAN Y J, WU K. Preparation of ultra-high thermal conductivity and excellent flame retardant MXene/f-PS nanocomposite film by a simple electrostatic self-assembly approach[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 519: 165443.

(责任编辑:陈梦圆)