

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.023

改性纳米纤维素气凝胶/聚乳酸复合材料的制备及耐候性能

李春漫, 张鑫, 常维纯, 茹畅

(国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司, 河北廊坊 065000)

摘要: 传统的生物基可降解材料聚乳酸(PLA)因脆性大、韧性低和耐候性差的缺点,极大地限制了其进一步发展。开发具有优异耐候性和力学性能的生物基可降解复合材料,应用于管道保冷体系,减少对化石资源的依赖十分重要。通过冷冻干燥法制备改性纳米纤维素气凝胶,再通过溶液浸渍法与 PLA 复合,获得不同配比的戊二醛(GA)改性纳米纤维素气凝胶(GA-NC)/PLA 复合材料。经过力学、老化实验结果表明,当 GA 添加量为 0.02 mL,PLA 与二氯甲烷的质量比为 1:5 时,GA-NC/PLA 复合材料的力学性能及抗老化性能最佳,在保持三维结构均匀性和压缩回弹性的同时,耐候性显著提升,GA-NC/PLA 复合材料能有效抑制老化导致的材料黄变,说明 GA 交联在提升材料抗老化性能中具有关键作用。

关键词: 戊二醛/纳米纤维素/聚乳酸复合材料;管道保冷;耐候性;化学稳定性;压缩回弹性

中图分类号: TQ35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0182-07

Preparation and weather resistance of modified nanocellulose aerogel/polylactic acid composites

LI Chunman, ZHANG Xin, CHANG Chunwei, RU Chang

(National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Science and Technology Research Institute Branch, Langfang 065000, China)

Abstract : The traditional biodegradable material polylactic acid (PLA) exhibits high brittleness, low toughness, and poor weather resistance, which significantly limits its further development. It is imperative to develop bio-based biodegradable composite materials with excellent weather resistance and mechanical properties for applications in pipeline cooling systems to reduce dependence on fossil resources. Modified nanocellulose aerogels were prepared using a freeze-drying method and subsequently compounded with polylactic acid via a solution immersion method to obtain glutaraldehyde (GA)-modified nanocellulose aerogels/polylactic acid (GA-NC/PLA) composites with varying ratios. Experimental results show that when the GA content is 0.02 ml and the ratio of PLA to dichloromethane is 1:5, the GA-NC/PLA composite exhibits optimal performance. While maintaining 3D structural uniformity and compression resilience, the composite's weathering resistance is significantly enhanced. The GA-NC/PLA composite effectively inhibits yellowing caused by aging, indicating that GA crosslinking plays a key role in improving the material's anti-aging properties.

Keywords : glutaraldehyde/nanocellulose/polylactic acid composite ; pipeline insulation ; weather resistance ; chemical stability ; compressive resilience

管道保冷材料在能源、化工、冷链物流等领域至关重要,传统材料(如聚氨酯、玻璃棉、气硅等)存在导热系数高、环境不友好、耐低温性能不足等问题。气凝胶材料因其超低导热系数、轻质、耐极端

温度等特性,成为新一代高效保冷材料的研究热点,而纤维素气凝胶复合材料凭借其生物基来源、可降解性和可调控性能,更具突破性潜力。生物基复合材料因其独特的环境友好特性,由天然来源的

基金项目: 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司科学研究与技术开发项目(ZYZL-DTXNY-202204)

通信作者: 李春漫,教授级高级工程师,主要研究方向为管道化学,节能环保新材料

收稿日期: 2025-06-18

引用格式: 李春漫,张鑫,常维纯,等. 改性纳米纤维素气凝胶/聚乳酸复合材料的制备及耐候性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 182-188.

LI Chunman, ZHANG Xin, CHANG Chunwei, et al. Preparation and weather resistance of modified nanocellulose aerogel/polylactic acid composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 182-188.

增强体和基体组成的生物材料,已成为各国科学研究的焦点。生物基复合材料不仅对环境友好,而且在减少对化石资源依赖方面具有重要意义^[1-2]。

在全球可持续发展与“双碳”目标的推动下,生物基可降解材料成为替代化石基材料的核心方向^[3],聚乳酸(PLA)因良好的生物相容性和可降解性备受关注^[4]。PLA是一种线性脂肪族聚酯类聚合物^[5],但脆性大、韧性低且耐候性差,在复杂环境中易老化降解导致力学性能骤降,严重限制其在户外工程、管道保冷等长期服役场景的应用,是产业化的关键瓶颈^[6,7]。开发兼具优异力学性能与耐老化性能的PLA基复合材料成为研究热点^[8-9]。纳米纤维素(NC)具有高比表面积、高强度及生物可再生性,但由于其易吸湿、难分散、界面相容性较差,在复合材料中的应用仍需进一步优化^[10]。通过将NC与PLA复合,可结合两者的优势,改善PLA的力学性能。阳思思等^[11]总结了NC对PLA复合材料性能的影响,指出NC具有良好的增强作用,能有效提高PLA的力学性能、热稳定性和结晶度。Islam等^[12]研究了混合纳米纤维素(HNC)对PLA复合材料性能的影响,指出HNC能增强PLA的力学强度,提高热稳定性,并改善结晶度。王占红^[14]研究了纳米纤维素(CNC)对PLA复合材料的影响,结果表明,适量CNC(如质量分数0.1%)可显著增强PLA薄膜的拉伸强度和拉伸弹性模量,但过量添加可能影响材料的稳定性,CNC能有效改善PLA的力学性能、结晶性及吸附能力。对NC进行表面化学改性调控NC与PLA的界面相容性以提升复合材料耐候性,是提升NC/PLA复合材料在户外工程、管道保冷等长期服役环境下使用寿命的重要方法。

笔者以戊二醛(GA)改性NC为原料制备纤维素气凝胶骨架,与PLA复合制备GA-NC/PLA复合材料,重点研究提升复合材料的耐老化性能的方法。结果表明,以GA为交联剂及表面改性剂处理NC后,成功制备出结构规整、性能优异的三维NC气凝胶。将其与PLA复合,成功制备出GA-NC/PLA复合材料。材料经过72 h老化试验后,仍保持优异的压缩回弹性,且未发生明显黄变。通过扫描电子显微镜(SEM)观察老化处理前后GA-NC/PLA复合材料的微观形貌,发现其微观结构没有明显变化。GA-NC/PLA复合材料在保持三维结构均匀性和压缩回弹性的同时,耐候性显著提升。该研究为解决

PLA易老化问题提供全新方案,也为生物基可降解材料在苛刻环境中的应用奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

NC:原料为棉花,磺化纳米纤维素的水溶液,固含量4.0%,直径为4~10 nm,长度为100~500 nm,pH为4.0,深圳市奇宏科技有限公司;

GA:固含量50%,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

PLA:重均分子量(M_w)为80 000,上海麦克林生化科技股份有限公司;

二氯甲烷(DCM):分析纯,天津市恒兴化学试剂制造有限公司。

1.2 主要仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Tensor 27,德国Bruker公司;

X射线衍射仪(XRD):D8 Advanced,德国Bruker公司;

精密电子天平:AL104,梅特勒-托利多公司;

真空干燥箱:DZF-100,郑州长城科工贸有限公司;

冷冻干燥机:ZLGJ-30,宁波新芝生物科技有限公司;

万能材料力学测试仪:TST-C1007A,泰仕特仪器(福建)有限公司;

SEM:S-4800,日本Hitachi公司;

老化箱:BHO-401A,上海一恒实验仪器有限公司。

1.3 样品制备

图1为样品制备流程图。如图1所示,将NC与GA按不同比例混合,分别为10 g NC+0 mL GA,10 g NC+0.01 mL GA,10 g NC+0.02 mL GA,10 g NC+

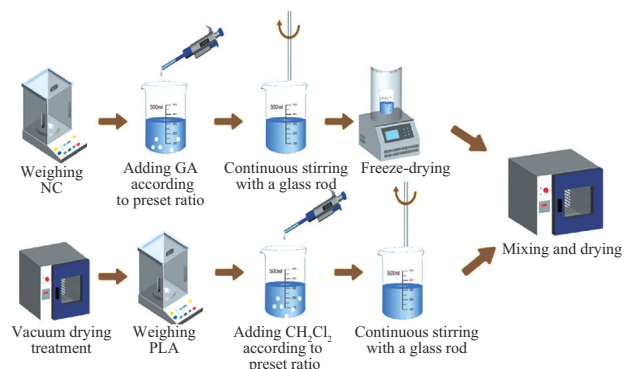


图1 样品制备流程图

Fig. 1 Samples preparation flow chart

0.03 mL GA, 10 g NC+0.04 mL GA, 样品分别记为 GA/NC-1, GA/NC-2, GA/NC-3, GA/NC-4, GA/NC-5。通过机械搅拌方式均匀混合,形成均匀半透明凝胶状物质,将混合溶液置于低温环境,4℃环境下反应 24 h,后转移至-20℃下深度冷冻。最后将凝胶置于冷冻干燥机中进行冷冻干燥处理。确定最佳 GA 添加量为 0.02 mL (GA/NC-3)。

将 PLA 预处理后,按不同比例溶于 DCM 溶液中,分别为 1.5 g PLA+7.5 mL CH₂Cl₂ 和 1.5 g PLA+15 mL CH₂Cl₂, 记为 PLA-1 和 PLA-2。通过溶液浸渍法将 GA/NC-3 分别与 PLA-1, PLA-2 溶液复配,分别记为 GA-NC/PLA-1, GA-NC/PLA-2, 后置于聚四氟乙烯板上干燥处理,得到最终产物 GA-NC/PLA 复合材料。

1.4 测试与表征

1.4.1 FTIR 测试

采用 FTIR 仪对 GA/NC 气凝胶和 GA-NC/PLA 复合材料进行测试,分析交联改性前后样品的红外特征峰变化。测试前,样品置于 55℃ 真空干燥箱中干燥去除水分后充分研磨,后使用压片机压片,设置压力 1.5 TONS,持续 1.5 min。测试范围为 4 000~500 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹。

1.4.2 SEM 测试

采用 SEM 对 GA-NC/PLA 复合材料的微观形貌进行观察,研究交联改性前后样品的结构变化,分析材料的孔隙结构以及界面结合状态。

1.4.3 XRD 测试

采用 XRD 分析 GA-NC/PLA 复合材料的晶体结构,以研究交联改性前后样品的结晶度变化。X 射线源为 CuKα,调整衍射仪的参数,扫描速度为 5°/min,扫描范围为 10°~60°。

1.4.4 老化实验测试

为研究复合材料的耐老化性能,将样品置于老化试验箱中进行加速老化实验。设置温度为 45℃ 观察材料老化后复合材料形貌的变化,老化时间 72 h。

1.4.5 力学性能测试

使用万能材料试验机对复合材料的力学性能进行表征,测试其压缩回弹性能。设置压缩和回复的速率为 5 mm/min,温度 25℃,循环的圈数为 100 次,获得应力-应变循环曲线。按 GB/T 7759.1-2015 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 GA-NC 气凝胶的结构及性能表征

为探究 GA 对 NC 的交联改性效果,采用 FTIR 仪对 GA/NC 气凝胶及 GA-NC/PLA 复合材料的化学结构进行表征,分析特征官能团的变化规律。如图 2 所示,NC 具有典型的 O—H 伸缩振动峰(3 339 cm⁻¹)、C—H 伸缩振动峰(2 897 cm⁻¹)以及 C—O—C 伸缩振动峰(1 080~1 180 cm⁻¹)^[12]。由图 2 可知,通过 GA 改性后的 NC,随着 GA 浓度的增加,O—H 伸缩振动峰的强度逐渐下降,说明 GA 成功与 NC 发生反应,部分羟基被缩醛键取代^[13]。随着 GA 浓度的增加,GA 形成缩醛键(C—O—C),使 NC 形成更加刚性的三维网络结构^[14],导致 C—H 振动受限。NC 在 GA 表面发生交联作用,增强了三维 GA/NC 气凝胶的化学稳定性和结构刚性^[15]。

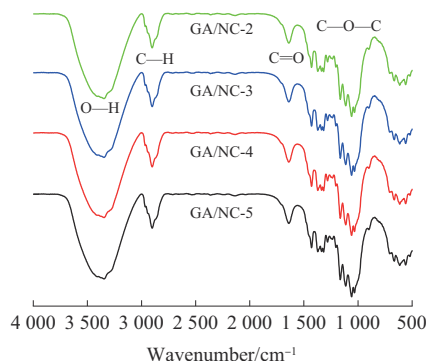


图2 GA/NC 复合材料的 FTIR 曲线

Fig. 2 FTIR curves of GA/NC composites

图 3 为 GA/NC 气凝胶的 XRD 图谱。如图 3 所示,不同配比的 GA/NC 气凝胶在 2θ 为 15.6° 和 22.5° 附近均出现明显衍射峰。经过 GA 改性后,纤维素结晶结构依旧保持,但随着 GA 含量的增加,峰强度减弱,宽度变窄,说明 GA 影响了 NC 的结晶度。经过 GA 改性后的 NC,醛基与羟基发生缩醛反应,

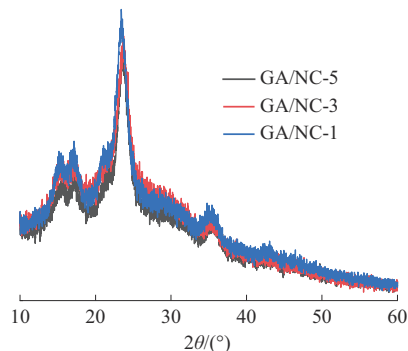


图3 GA/NC 气凝胶的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD spectra of GA/NC aerogels

减少了自由羟基的含量,内部氢键重新排列,导致结晶度下降^[6]。观察不同配比的XRD峰位,发现主要衍射峰15.6°和22.5°处并未发生显著的红移与蓝移,表明GA对NC的层间距离影响较小。适量的交联有助于增强材料的整体性能,但是过度交联不利于复合材料整体性能的提升。

GA-NC/PLA气凝胶因其环保性和可降解性受到广泛关注,但其耐老化性能(尤其是暴露于光、热、湿气等环境时)是实际应用中的关键挑战。图4为不同GA添加量的GA/NC气凝胶经72 h加速老化试验后的外观变化。GA/NC复合材料的黄变现象是多种因素协同作用的结果,主要包括热氧老化引发的分子链氧化、自由基降解导致的结构破坏、紫外光照射诱发的发色基团生成,以及交联剂GA的用量和材料自身结晶度差异带来的影响^[17]。在老化过程中,材料分子链发生断裂并生成小分子降解产物,这些产物进一步与氧气反应形成含羰基或共轭双键的发色物质,从而加剧黄变程度。

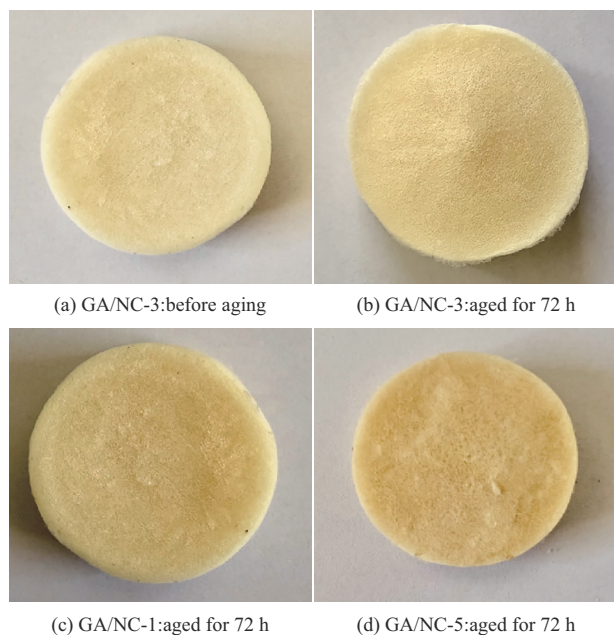


图4 GA/NC气凝胶老化处理前后对比例片

Fig. 4 Comparison photos of GA/NC aerogel before and after aging treatment

GA与羟基反应形成的三维交联网络,通过增强结构致密性提升材料耐老化性能,限制分子链运动并降低羟基等活性基团数量,减少氧化降解;同时提升力学稳定性以维持结构完整,封闭易降解基团,从而协同增强材料耐候性,使羟基变化与性能改善形成完整逻辑^[18]。从图4的直观对比可见,GA/

NC-3的黄变程度显著低于GA/NC-5,其表面色泽更接近未老化样品的初始状态,且无明显的局部暗沉或斑点出现。当GA用量不足时(如GA/NC-1),NC体系中残留的大量自由羟基易参与氧化反应,导致降解速率加快,黄变明显;而当GA用量过高时(如GA/NC-5),过度交联使体系刚性增强,分子链柔韧性下降,反而加速了材料的降解进程,黄变程度加剧。这一结果表明,适量的GA交联可通过与NC中的羟基发生缩醛反应,有效减少自由羟基含量,从而抑制氧化降解,延缓黄变^[13]。

为了进一步研究GA/NC气凝胶的耐老化性能,通过SEM观察对比了老化处理前后GA/NC气凝胶的微观形貌照片。如图5所示,图5a和图5b为GA/NC-3未老化样品,图5c和图5d为GA/NC-3经过72 h老化处理后。从图5可以看出,未老化时,GA/NC气凝胶呈连续均匀的三维网状结构,低倍视野下纤维交织形成规整孔隙,高倍放大可见纤维连接紧密,孔隙数量少、尺寸均一,体现戊二醛交联对骨架的稳定构建;老化处理后,低倍图中孔隙显著增多、孔径扩大,网络出现空洞化,高倍细节显示纤维表面及交织处破损、孔隙边界粗糙,表明老化使GA/NC气凝胶的纤维骨架降解、交联结构受损,导致孔隙暴露扩张。尽管老化引发结构劣化,GA/NC气凝胶仍维持连续三维网络框架,佐证戊二醛交联对其耐老化性能的强化作用,为后续与PLA复合材料的结构稳定性奠定微观基础。结合FTIR,老化照片及SEM结果可知,GA/NC-3气凝胶具有最优的耐老化性能,后续选取GA/NC-3与PLA复合,进一步研究

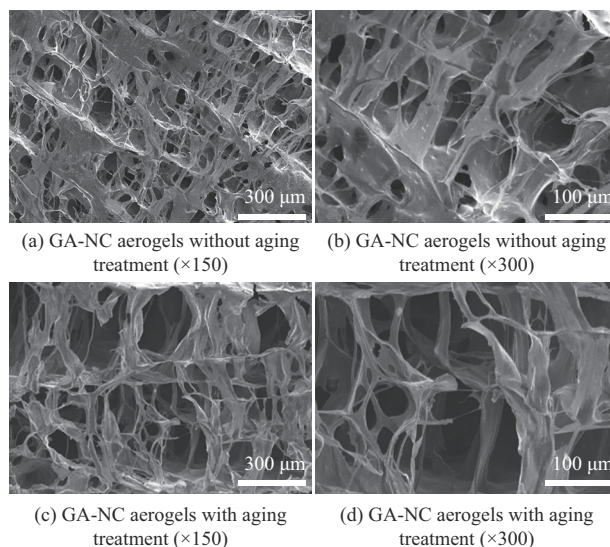


图5 GA/NC气凝胶在不同放大倍数下的SEM照片

Fig. 5 SEM photos of GA/NC aerogel at different magnifications

复合体系的性能。

2.2 GA-NC/PLA复合材料的结构及性能表征

图6为GA-NC/PLA复合材料的FTIR图。由图6可见,GA/NC-3与PLA复合后,体系中O—H伸缩振动峰的强度进一步减弱。这一现象表明,PLA分子可能与GA/NC-3中的羟基形成氢键,使部分自由羟基参与氢键络合作用,从而降低了游离羟基的数量。综合分析可知,GA的交联作用已通过缩醛反应减少了NC体系中的羟基含量,而PLA与改性NC间的氢键相互作用进一步降低了羟基活性,共同提升了材料的化学稳定性^[19]。

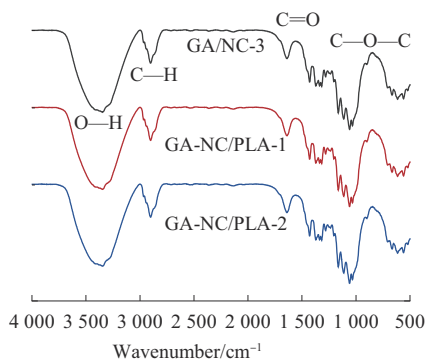


图6 GA-NC/PLA复合材料FTIR曲线

Fig. 6 FTIR curves of GA-NC/PLA composites

图7为GA-NC/PLA和NC/PLA复合材料老化72 h照片。如图7所示,为不同配比的GA-NC/PLA

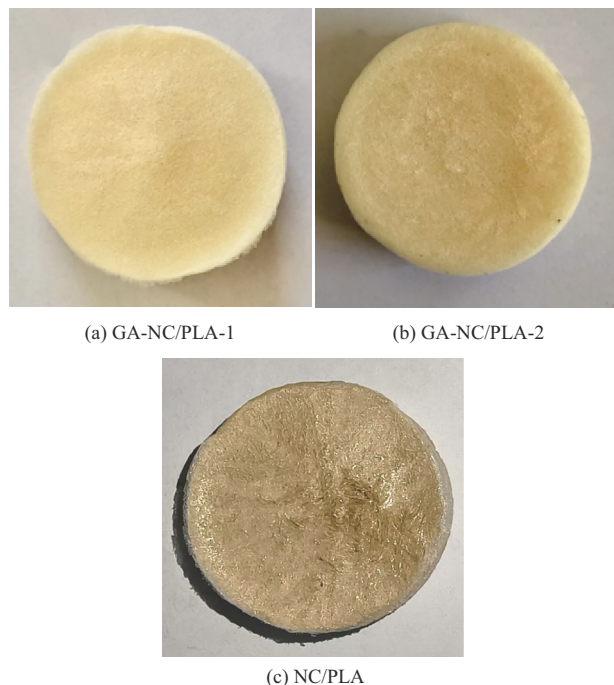


图7 GA-NC/PLA和NC/PLA复合材料老化72 h照片

Fig. 7 Photos of GA-NC/PLA and NC/PLA composites after 72 hours of aging

复合材料与未改性的NC/PLA复合材料经过72 h老化处理后的图片。两组样品对比可见,未改性的NC/PLA样品经过72 h老化处理后颜色明显更深黄,呈现出更严重的老化降解特征。未改性的NC/PLA样品在老化后,因材料降解导致的黄变明显,而GA-NC/PLA复合材料(尤其是GA-NC/PLA-1),在老化过程中颜色变化不明显,未出现显著黄变现象。这一差异清晰表明,经GA交联改性的纤维素气凝胶与PLA复合后得到的GA-NC/PLA复合材料在抗老化性能上表现更优。说明加入GA交联改性的纤维素气凝胶,结构更稳定,与PLA复合后体系能有效抑制老化导致的黄变趋势。

通过SEM进一步对比观察了GA-NC/PLA复合材料老化前后的微观形貌,如图8所示。由图8可见,未经老化处理的GA-NC/PLA复合材料,PLA均匀包覆在纤维素气凝胶骨架上,界面结合良好,未出现明显分层现象。复合后PLA填充了纤维素气凝胶骨架中的孔隙,表面孔隙较少。经过老化处理后的GA-NC/PLA复合材料,材料依旧保持较好的结构规整性,但是表面出现了更多的孔隙,说明照射过后的复合物有一定的老化,但是变化并不明显。上述结果表明GA-NC/PLA复合材料具有良好的耐候性。

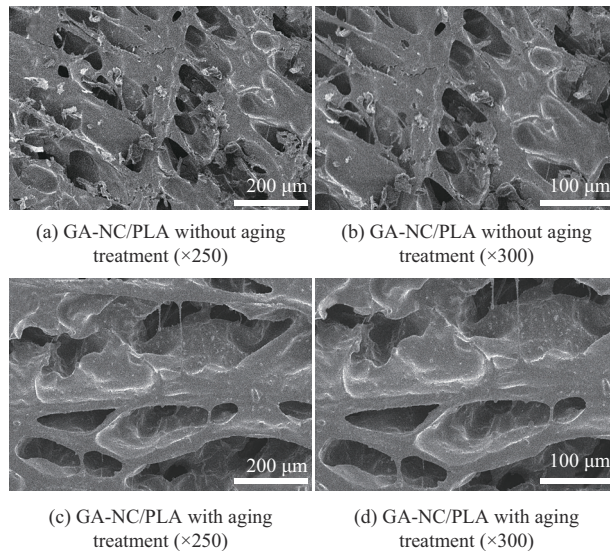


图8 GA-NC/PLA复合材料在不同放大倍数下老化前后的SEM照片
Fig. 8 SEM photos of GA-NC/PLA composites before and after aging treatment at different magnifications

NC气凝胶与PLA形成的复合材料展现出优异的性能,尤其在力学性能方面表现突出。从图9可见,GA-NC/PLA复合材料具有优异的力学性能,表

现出良好的力学稳定性,即便在受压状态下仍保持优异的非线性弹性行为。未经过老化处理GA-NC/PLA复合材料的压缩循环曲线,经过100次循环压缩后,样品可恢复原状,展现出卓越的耐疲劳性与结构稳定性,能通过坚韧的三维纤维素气凝胶骨架网络高效释放压力。这种超可压缩性与弹性得益于精心设计的层级波形结构,使材料在受力时可通过结构形变缓冲外力,卸载后快速复位。当材料受压时,片层间的纤维发生弯曲形变以吸收能量;外力撤除后,纤维凭借自身弹性恢复原状,从而提升气凝胶整体稳定性。此外,NC较大的长径比使其相互交叉重叠形成致密网络,而PLA可均匀填充于气凝胶孔隙中,借助NC的高比表面积实现与骨架的紧密黏结,不仅对体系起到增韧作用,更强化了结构整体性。

图9b所示是经过老化处理72 h的GA-NC/PLA复合材料的压缩循环曲线,经老化处理的材料在多次循环压缩后仍能较好地恢复至初始形态,形变恢复能力强劲,且压缩过程中的迟滞损失少。这表

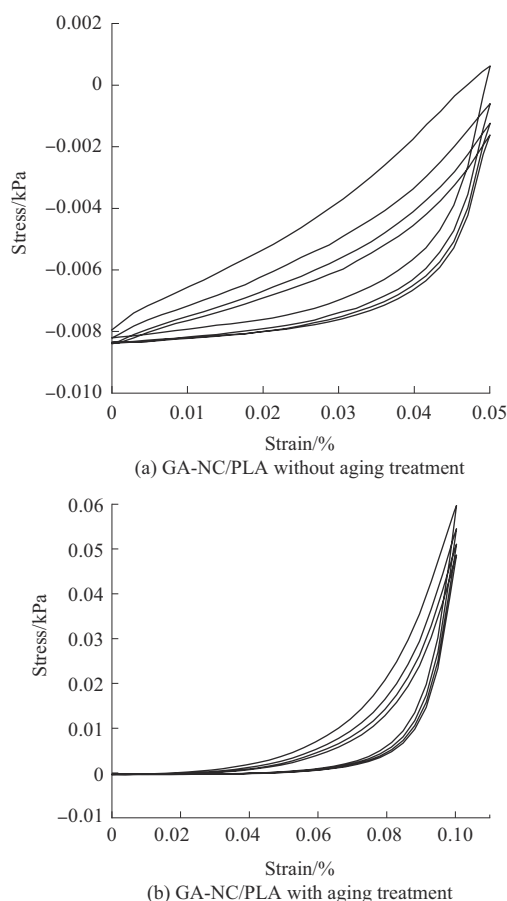


图9 GA-NC/PLA复合材料的循环压缩回弹曲线

Fig. 9 Cyclic compression recovery curves of GA-NC/PLA composites

明,该复合材料在经历老化后依然保持着较强的形变恢复能力和结构稳定性,彰显出优异的耐久性与力学性能^[13],进一步印证了纤维素气凝胶骨架与PLA构成的复合结构在保障材料力学性能持续性方面的关键作用。该体系在管道保冷领域具有很大的应用潜力,纤维素气凝胶复合材料在管道保冷领域的研究,不仅可突破传统材料的性能瓶颈,还具有显著的环保和经济效益。

4 结论

采用GA交联改性NC制备三维纤维素气凝胶,并以其为增强骨架,通过溶剂浸渍法制备了GA-NC/PLA复合材料,分析了其微观结构、力学性能及耐老化性能。结果表明,GA改性NC的自由羟基减少,化学稳定性提高,PLA够均匀填充于纤维素气凝胶三维网络中,使材料整体结合力增强。力学测试显示,GA-NC/PLA复合材料具有优异的压缩回弹性能及耐老化性能,经过72 h老化实验后,GA-NC/PLA复合材料仍保持压缩回弹性,且没有发生明显黄变。该GA-NC/PLA复合材料有望应用于管道保冷,不仅可解决传统材料的污染问题,还能通过性能优化满足工程需求,是绿色低碳技术的重要突破。未来需聚焦耐老化性能提升、低成本工艺开发和标准化体系建立,以推动其产业化应用。

参考文献

- [1] 李慧丽. 生物质对聚乳酸基复合材料结晶性能及降解行为的影响研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
LI Huili. Study on the effect of biomass on the crystallization properties and degradation behavior of polylactic acid-based composites [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.
- [2] ISLAM M M, ISLAM M A, RAHMAN A N M M, et al. Development of hybrid nanocellulose-reinforced PLA biocomposites from waste jute bags and ramie fabric with enhanced mechanical and thermal properties[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(12): 19 263–19 281.
- [3] 甘典松, 刘跃军, 欧阳环, 等. 生物基PA56/512于GF/PA66复合材料轨道扣件的应用[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 117–121, 134.
GAN Diansong, LIU Yuejun, OUYANG Huan, et al. Application of bio-based PA56/512 copolymer in track fasteners of GF/PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 117–121, 134.
- [4] 王占红. 纳米纤维素/聚乳酸复合材料的制备、结构及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
WANG Zhanhong. Preparation, structure and properties of nanocellulose/polylactic acid composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [5] 马文静, 王瀚文, 徐菲, 等. 石墨烯负载磷-氮复合阻燃剂的合成及

- 其在聚乳酸改性中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(1):43-52.
- MA Wenjing, WANG Hanwen, XU Fei, et al. Synthesis of graphene-supported phosphorus-nitrogen combined flame retardant and application in modification of polylactic acid[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(1):43-52.
- [6] 张月莉, 陈英哲, 雷雅铄, 等. 聚乳酸增韧改性的进展[J]. 塑料, 2025, 54(1):176-180.
- ZHANG Yueli, CHEN Yingzhe, LEI Yashuo, et al. Progress on toughening modification of polylactic acid[J]. Plastics, 2025, 54(1):176-180.
- [7] 李鑫榕, 梁诗滢, 胥菲菲, 等. 新型生物可降解材料聚乳酸的研究进展[J]. 广州化工, 2024, 52(22):10-12.
- LI Xinrong, LIANG Shiyan, XU Feifei, et al. Research progress on new biodegradable material polylactic acid[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(22):10-12.
- [8] 查明红, 文辉, 马洪生, 等. 阳离子淀粉/纳米纤维素复合体系施胶对纸张性能的影响研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(12):52-61.
- KUI Minghong, WEN Hui, MA Hongsheng, et al. Study on the effects of cationic starch/nanocellulose composite system sizing on the properties of paper[J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(12):52-61.
- [9] 彭旋华, 陈京环, 刘金刚, 等. 纳米纤维素增强热塑性疏水聚合物复合材料的研究进展[J]. 中国造纸, 2024, 43(12):40-51.
- PENG Xuanhua, CHEN Jinghuan, LIU Jingang, et al. Research progress of nanocellulose reinforced thermoplastic hydrophobic polymer composite materials[J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(12):40-51.
- [10] 宫贵贞, 石荣乐. 纳米SiO₂/聚乳酸复合膜的性能及机理[J]. 塑料, 2025, 54(1):113-119.
- GONG Guizhen, SHI Rongle. Properties and mechanism of nano-SiO₂/polylactic acid composite films[J]. Plastics, 2025, 54(1):113-119.
- [11] 阳思思, 吴红枚, 刘玉媛, 等. 聚乳酸/纳米纤维素复合材料的制备与性能研究进展[J]. 塑料科技, 2022, 50(7):124-128.
- YANG Sisi, WU Hongmei, LIU Yuyuan, et al. Progress in preparations and properties of PLA/nanocellulose composites[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(7):124-128.
- [12] 咸玉龙. 聚乳酸/纤维素纳米晶复合材料的制备及其熔喷材料性能的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- XIAN Yulong. Preparation of polylactic acid/cellulose nanocrystal composites and study on properties of their melt-blown materials [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021.
- [13] XIAO Z B, JIA S H, BAO H Q, et al. Protection of agarwood essential oil aroma by nanocellulose-graft-polylactic acid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183:743-752.
- [14] 柴洪彬. 聚乳酸/纤维素纳米晶复合材料的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- CHAI Hongbin. Preparation and performance study of polylactic acid/cellulose nanocrystal composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [15] 段佳骥, 刘佳林, 夏逸慧, 等. 紫外交联改性丝素蛋白的制备及溶胀性能测试[J]. 广东化工, 2021, 48(18):55-57.
- DUAN Jiaji, LIU Jialin, XIA Yihui, et al. Test on UV crosslinking and swelling properties of silk fibroin[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(18):55-57.
- [16] SAEED U, RATHUR S U, ALTURAIF H, et al. Effect of coupling agent on softwood kraft nanocellulose fibril-reinforced polylactic acid biocomposite[J]. Journal of Nanomaterials, 2021, 2021(4):1-13.
- [17] MAITRA M, ADARI R, RADHA P. Sustainable packaging films: Polylactic acid-surface-modified nanocellulose-pectin biocomposite to extend shelf life of strawberry fruit[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025; 1-15. DOI: 10.1007/s13197-024-06195-7.
- [18] 袁禧龙, 赵阳, 赖锦清, 等. 戊二醛改性聚乙烯醇/聚碳酸亚丙酯复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(6):88-94.
- YUAN Xilong, ZHAO Yang, LAI Jinqing, et al. Preparation and performance study of glutaraldehyde modified polyvinyl alcohol/poly(propylene carbonate) composites[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(6):88-94.
- [19] 朱佳杰. 基于紫外交联的阳离子交换膜的优化制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- ZHU Jiajie. UV-crosslinking-based optimized preparation and performance study of cation exchange membranes[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.