

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.019

棉秆废弃物对环氧树脂复合材料性能的影响

李旭^{1,2}, 马扶宸^{1,2}, 樊东焱^{1,2}, 刘晓阳^{1,2}, 杜涛^{1,2}, 钱大益^{1,2}, 闫秀玲^{1,2}, 宋剑斌^{1,2}

(1.伊犁师范大学化学化工学院,新疆伊宁 835000; 2.新疆维吾尔自治区生物质资源清洁转化与高值利用重点实验室,新疆伊宁 835000)

摘要: 棉秆(CS)作为一种丰富且可再生的天然纤维资源,其在复合材料中的应用潜力等待深入挖掘。采用湿法处理工艺,用钛酸酯偶联剂(TC)对CS纤维进行表面处理,再将其与环氧(EP)树脂混合,采用模压工艺制备复合材料。借助傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪、万能力学试验机、电子简支梁冲击试验机、动态热机械分析(DMA)和扫描电子显微镜(SEM)等,研究TC用量对复合材料形态结构、力学性能、DMA以及疏水性能的影响。结果表明:当TC用量占填料质量的0.5%时,CS-TC/EP复合材料的包覆效果最佳。材料的弯曲和冲击强度较未改性前分别提高了44.64%和66.32%,达到74.43 MPa和3.21 kJ/m²。FTIR结果表明,偶联剂的引入并未对CS纤维骨架结构造成影响,偶联剂成功包覆在CS纤维表面。DMA结果表明,复合材料的最大储能模量从271.5 MPa提升到393.3 MPa。SEM分析进一步说明,偶联剂的引入改善了纤维与树脂之间的界面结合能力,增强了材料的力学性能。TC包覆处理使复合材料的疏水性能得到提高。

关键词: 钛酸酯偶联剂;棉秆;环氧树脂;界面性能;力学性能

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0141-06

Effects of cotton stalk waste on properties of epoxy resin composites

LI Xu^{1,2}, MA Fuchen^{1,2}, FAN Dongyan^{1,2}, LIU Xiaoyang^{1,2}, DU Tao^{1,2}, QIAN Dayi^{1,2}, YAN Xiuling^{1,2}, SONG Jianbin^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, YiLi Normal University, Yining 835000, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Clean Conversion and High Value Utilization of Biomass Resources, Yining 835000, China)

Abstract : As an abundant and renewable natural fiber resource, the application potential of cotton straw(CS) in composites is waiting to be deeply explored. CS fibers were surface treated with titanate coupling agent(TC), and then mixed with epoxy resin (EP), and the composites were prepared by molding process. With the help of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), universal mechanical testing machine, electronic simple support beam impact testing machine, dynamic thermomechanical analysis (DMA) and scanning electron microscope(SEM), the influence of the dosage of different coupling agents on the morphological structure, mechanical properties, dynamic thermo-mechanical properties and hydrophobic properties of composites was studied. The results show that CS-TC/EP composite has the best coating effect when the amount of the coupling agent TC is 0.5% of the filler mass. The bending and impact strength of the composites are increased by 44.64% and 66.32%, respectively, compared with the unmodified ones, can reach 74.43 MPa and 3.21 kJ/m². FTIR results show that coupling agent does not affect the structure of CS fiber, and is successfully coated on the surface of the CS fiber. The results of DMA show that the maximum energy storage modulus of composites is increased from 271.5 MPa to 393.3 MPa. The SEM analysis further states that the introduction of the coupling agents improve interfacial binding ability between the fiber and the resin, and enhance the mechanical properties of the composites. TC coating treatment improves the hydrophobic properties of the composite.

Keywords : titanate coupling agent ; cotton stalks ; epoxy resin ; interface performance ; mechanical property

基金项目:伊犁师范大学提升学科综合实力专项项目(22XKZZ15),伊犁师范大学科研创新团队培育计划“污染控制及定向功能化材料设计科研团队”项目(CXZK2021002),新疆科技厅重点研发项目(2023B01014)

通信作者: 宋剑斌,教授/博导,博士生导师,研究方向为固体废弃物及生物质复合材料

收稿日期: 2024-12-08

引用格式: 李旭,马扶宸,樊东焱,等.棉秆废弃物对环氧树脂复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(2):141-146.

LI Xu, MA Fuchen, FAN Dongyan, et al. Effects of cotton stalk waste on properties of epoxy resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 141-146.

新疆作为我国最大的棉花种植基地,每年可产出约4 000万t棉秆(CS)^[1]。长期以来,CS在农村地区大多被视为农业废料进行处理,一部分被用作燃料焚烧,其余的则随意堆积在田间地头,这无疑造成了巨大的资源浪费。相较于木粉、竹粉等生物质填料,CS纤维的柔韧性^[2]更为突出,在制成产品后,能承受一定程度的弯曲和拉伸而不易断裂。环氧(EP)树脂具备优异的黏结性能^[3],能够充分浸润CS纤维,与CS纤维表面形成紧密的物理及化学结合。此外,EP树脂本身具有较高的强度和模量,与CS纤维复合后,可显著增强复合材料的整体力学性能。这样一来,原本被浪费的CS资源得以焕发出新的生机与价值。

生物质复合材料的研究与应用已成为材料科学领域的一个重要方向。Laksham等^[4]以香蕉纤维和锯末为原料,在聚酯基体中分别作为增强成分和填充成分,研制出生物复合隔板。Shaikh等^[5]采用田口法制备香蕉-槟榔纤维填充EP基复合材料。Raja^[6]将楝树纤维和甘蔗灰结合在EP树脂基体中,用于开发轻质材料。结果显示该材料具有优异的力学性能,拉伸强度为49.14 MPa,弯曲强度为49.91 MPa,表现出强大的回弹性。然而,由于天然纤维与树脂之间界面结合能力差,导致复合材料的力学性能、耐水性以及热稳定性不佳^[7]。因此,为改善树脂与纤维之间界面结合能力差的问题,Shang等^[8]发现当CS纤维质量分数达到20%,复合材料的冲击强度提高了56.31%,维卡软化温度显著提高了23.05%。Li等^[9]利用CS纤维与聚乳酸和聚丙烯制备的复合材料,具有优良的力学性能。

笔者依据生物质复合材料的特点及发展趋势,利用模压法制备CS/EP树脂复合材料。首先采用钛酸酯偶联剂(TC)对CS纤维进行表面修饰,以改善其与树脂之间的界面性能,从而提升材料的力学性能、热稳定性和耐水性等。以期实现CS废弃物在汽车、交通运输及建筑等领域的规模化应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

EP树脂:E-51,南通星辰合成材料有限公司;

二亚乙基三胺-丁基缩水甘油醚共聚物:593,中石化巴陵石油化工有限公司;

TC:NDZ-201,东莞市康锦新材料有限公司;

CS:新疆本地采集。

1.2 仪器及设备

小型平板硫化机:CREE-6014B-30T,东莞市科锐仪器科技有限公司;

万能力学试验机:UTM-1432 s,承德市金建检测仪器有限公司;

电子简支梁冲击试验机:XJJD-5,承德市金建检测仪器有限公司;

动态热机械分析(DMA)仪:Q800,美国TA公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Cary630,美国Agilent有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):QuattroS,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 试样制备

首先,对CS进行粉碎操作,而后进行筛分处理,获取粒径处于40~100目(350~630 μm)区间的粉末。用蒸馏水洗净,将其放置在80 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中进行干燥处理,直至其达到恒重,备用。将TC按与CS质量比分别为0.2%,0.5%,1%和2%的比例加入盛有无水乙醇的烧杯中,进行搅拌,直至TC完全溶解。随后,将CS置于该烧杯内,持续搅拌3 h后进行过滤取出。采用模压法制备CS-TC/EP复合材料,将表面处理后的CS纤维(CS-TC)按质量比55%的占比添加到含有固化剂二亚乙基三胺-丁基缩水甘油醚共聚物的EP树脂中,持续搅拌直至两者混合均匀,再将其放置于模具内。随后,将模具转移至平板硫化机,在70 $^{\circ}\text{C}$ /8 MPa的条件下进行固化,固化时间为60 min。进一步升高温度至120 $^{\circ}\text{C}$,进行深度固化2 h,得CS-TC/EP复合材料。

1.4 测试与表征

FTIR分析:在室温下,用FTIR仪测定改性前后CS的化学结构,波数范围在4 000~500 cm^{-1} 。

力学性能分析:参照GB/T 1843-2008和GB/T 9341-2008标准,对复合材料进行无缺口冲击强度测试和三点弯曲强度测试。每组测试5个,取平均值。

DMA分析:采用DMA仪测试复合材料的储能模量(E')、损耗因子($\tan\delta$)及玻璃化转变温度(T_g)。温度范围在30~150 $^{\circ}\text{C}$,测试频率1 Hz,升温速率3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

SEM分析:取弯曲断裂后的试样,表面喷金处理,用SEM观察复合材料的断裂面。

吸水率:称取干燥好的试样记为 m_1 ,再将其放

置在盛满水的烧杯中。每隔一段时间将其取出并擦去表面水分,记为 m_2 。复合材料吸水率(x)根据公式(1)计算。

$$x = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

良好的界面相容性有助于应力的有效传递。当复合材料承受外力时,优异的界面相容性能够确保应力顺利传递^[10]。即CS与树脂之间的界面性能越强,复合材料的弯曲性能越好。图1为CS-TC/EP复合材料弯曲强度随TC含量的变化。由图1可知,复合材料的弯曲强度随TC用量的增加呈先增大后减小的趋势。当TC偶联剂的用量达到CS质量的0.5%时,复合材料表现出最优异的弯曲强度,相较于未改性时提高了44.64%。一方面,经TC处理后的CS纤维表面会形成一层偶联剂薄膜,这不仅减少了纤维表面的缺陷,还增大了与树脂的接触面积;另一方面,TC通过其短碳链烷烃部分与植物纤维表面的羟基发生如图2所示的化学反应,成功构建Ti—O—C化学键,从而紧密地锚定在植物纤维之上^[11]。与此同时,TC分子另一端的长碳链烷烃能

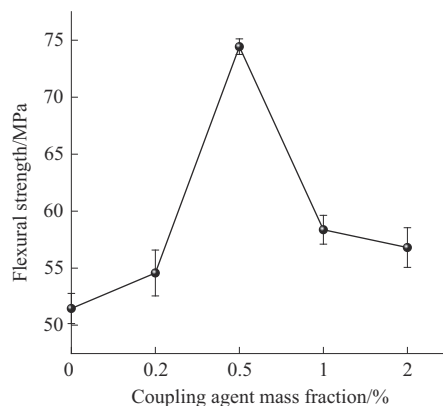


图1 不同TC质量分数时CS-TC/EP复合材料的弯曲强度

Fig. 1 Flexural strength of CS-TC/EP composites with different mass fraction of TC

够与树脂基体发生物理缠绕,显著增强两者的界面结合强度,使应力能够更高效地从EP树脂基体传递至植物纤维增强体上,充分发挥植物纤维的增强作用,从而改善了纤维与树脂之间的界面性能^[12]。然而,当进一步提高TC用量时,复合材料弯曲强度却不升反降,原因在于:TC本身属于一种有机化合物,当用量过大时,多余偶联剂会在复合材料内部发生团聚现象。这些微观上的缺陷会增加应力集中点,进而导致复合材料力学性能下降。

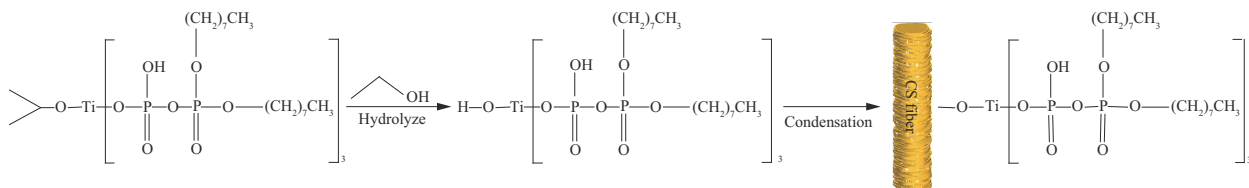


图2 TC改性CS纤维机理图

Fig. 2 Mechanism diagram of CS fiber modified by TC

图3为不同TC质量分数时CS-TC/EP复合材料的冲击强度。由图3可知,复合材料冲击强度和弯

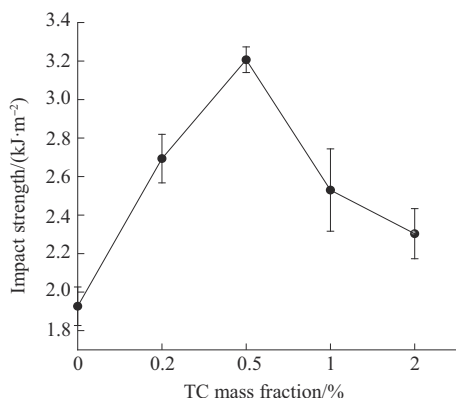


图3 不同TC质量分数时CS-TC/EP复合材料的冲击强度

Fig. 3 Impact strength of CS-TC/EP composites with different mass fraction of TC

曲强度变化趋势相似。当TC质量分数达到CS的0.5%时,复合材料的冲击强度达到最大值3.21 kJ/m²,相较于未改性时增大了66.32%。未经过改性的CS纤维表面呈现极性,与非极性树脂之间的界面结合力差,在与树脂的界面连接处极易产生缺陷,进而导致材料的抗冲击性能较差。TC通过包裹CS纤维表面,促使纤维由极性向非极性转变,使得纤维在基体中更容易分散均匀。又因为TC中的羟基、羧基等基团能够与CS表面的羟基以及树脂中的极性基团产生氢键。这种强烈的相互作用取代了CS与树脂之间简单的机械黏结,提高了两者的界面结合能力。另一方面,TC分子上的长链可与树脂分子发生交联^[13]。当复合材料受到外力作用时,这些交联点发挥桥梁的作用,将应力传递到植物纤维上,

提高了植物纤维的承载能力,进而提升了复合材料的冲击强度。然而,随着TC用量的增加,会在界面处形成过厚的偶联剂层,使其无法与纤维和基体充分交联,降低了界面结合强度。在受力时,会影响应力在纤维与树脂之间的有效传递,从而导致力学性能下降。

2.2 FTIR 分析

为验证对CS纤维进行表面处理,TC是否成功包覆在纤维表面及其显著影响复合材料力学性能的原因,对改性前后的CS纤维进行FTIR分析,结果如图4所示。改性前后在 2856 cm^{-1} 和 2923 cm^{-1} 处为甲基和亚甲基的C—H伸缩振动峰,这说明TC并未对CS纤维的有机骨架结构造成破坏。经TC改性后出现了三个新的特征峰,分别是: 652 cm^{-1} 处的Ti—O—Ti的吸收峰,该吸收峰证明了在改性过程中,Ti元素以化学键合的形式存在^[14]; 1322 cm^{-1} 处为TC上的P=O双键的吸收峰,此峰的存在进一步证实了TC分子在CS纤维表面的附着。出现在 3400 cm^{-1} 附近的吸收带是由CS纤维表面—OH伸缩振动引起的,改性后发现,—OH引起的伸缩振动峰半峰宽明显减小,这表明TC与CS纤维表面上的羟基发生反应形成化学键合,使得羟基数量明显减少^[15]。通过这种相互作用,改善了复合材料中纤维与树脂的界面性能,进而提升了力学性能。

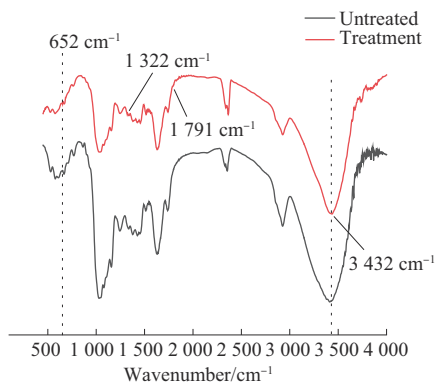


图4 TC改性CS纤维的FTIR谱图

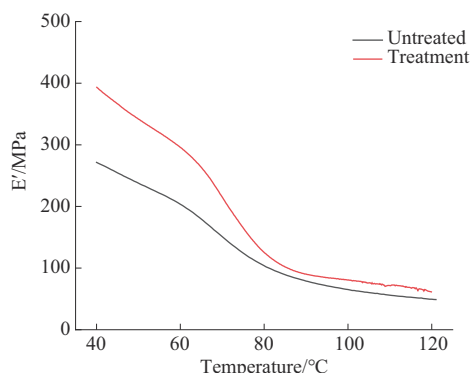
Fig. 4 FTIR spectra of titanate coupling agent modified CS fiber

2.3 DMA 分析

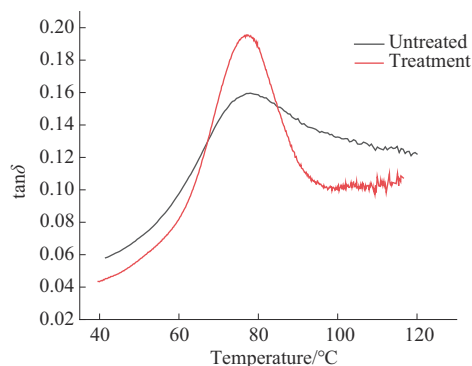
储能模量(E')是材料在发生形变过程中由于弹性形变而储存的能量大小的量度。图5是CS-TC/EP复合材料的 E' 和损耗角正切($\tan\delta$)随温度变化图。通过图5a可以看出,随着温度的持续升高,复合材料的 E' 均呈现出下降的趋势。这主要是因为随

着温度进一步升高,分子链的运动更加自由,分子链更容易通过链段运动来耗散能量,而不是将能量以弹性势能的形式储存起来,所以材料的弹性响应逐渐减弱, E' 下降。除此之外,CS/EP复合材料的 $E'_{\max}$ 仅为 271.5 MPa ,而CS-TC/EP复合材料,其 E' 却能够高达 393.3 MPa ,提升了44.8%。这是由于TC可以改善植物纤维的分散性。TC分子吸附在植物纤维表面,使纤维之间产生一定的空间位阻,从而减少纤维团聚^[16]。当纤维均匀分散在基体中时,在承受外力时能够更加有效地发挥其增强作用。每一根纤维都能更好地参与到应力分担中,这有助于提高复合材料的整体刚度,植物纤维就可以分担更多的载荷,从而提高了整个复合材料的刚度。

$\tan\delta$ 作为衡量材料能量耗散情况的关键指标,其数值为损耗模量(E'')与 E' 的比值。通过图5b可以发现,CS-TC/EP复合材料的 $\tan\delta$ 要大于CS-TC/EP。这说明 E'' 在与 E' 的比较中占比更大,也说明材料的黏性成分更为显著。这也很好证明了偶联剂的引



(a) E' of CS-TC/EP composites varies with temperature



(b) $\tan\delta$ of CS-TC/EP composites varies with temperature

图5 CS-TC/EP复合材料的 E' 和 $\tan\delta$ 随温度的变化

Fig. 5 E' and $\tan\delta$ of CS-TC/EP composites varies with temperature

人可通过改善纤维与树脂之间的界面结合强度使材料内部黏性阻力增大,更容易产生内摩擦,从而导致能量以热的形式损耗掉^[17]。随着温度的逐渐上

升, $\tan\delta$ 达到最大值, 此时的温度则对应着复合材料的 T_g 。改性前后复合材料 T_g 相近, 均为 78°C , 说明 TC 改性并未对复合材料的 T_g 产生影响。这是因为 TC 自身的长链烷基基具有柔性的结构, 虽然能够改善界面相容性, 但在一定程度上抵消因界面结合增强而对聚合物分子链运动的限制作用^[18], 导致材料的玻璃化转变温度变化不大。

上述结果充分表明, 添加 TC 偶联剂能够有效地改善纤维与树脂之间的界面性能, 纤维与基体之间的形成良好的化学键合, 增强分子间的相互作用力, 导致界面摩擦增大, 进而对 EP 树脂分子链段的运动能力形成限制, 最终成功地实现了复合材料刚度和热稳定性的显著提升。

2.4 SEM 形貌分析

图 6 是经 TC 处理前后复合材料断裂面的 SEM 照片。图 6a 和图 6b 是采用未经 TC 处理的 CS 纤维填充的 EP 复合材料。从图中能观察到, CS/EP 复合材料在断裂面处存在明显的不平整状态。进一步放大后, 可以发现其表面存在孔洞和缝隙。这一现象产生的主要原因是: CS 纤维与 EP 树脂之间的界面性能较差, 致使 EP 树脂对纤维的包覆效果难以达到理想状态。如此一来, 当复合材料受到外力时, 极易出现拔丝现象^[19]。而反观使用经 TC 处理后的 CS 纤维制备的复合材料(图 6c, 图 6d), 其断裂面整体上光滑平整。放大后, 并未出现明显的孔洞和缝隙。这一情况充分表明, 经过 TC 处理后, 纤维与树脂之间的界面结合能力得到了改善。由此可见, 通过选用 TC 对 CS 纤维进行包覆处理, 有效地改善了复合材料中树脂与填料之间的界面性能, 促使复合材料力学性能得以提升。

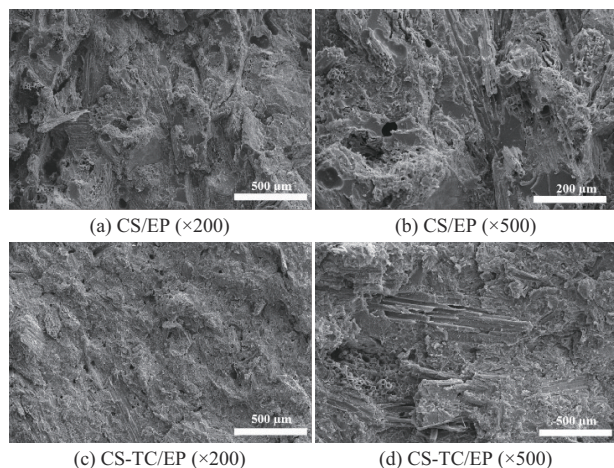


图 6 CS/EP 和 CS-TC/EP 复合材料的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photos of CS/EP and CS-TC/EP composites

2.5 吸水率分析

复合材料在 1~96 h 吸水率变化曲线如图 7 所示。通过对比可以发现, 随着 TC 的引入, 复合材料的吸水率降低。当 TC 质量分数达到 CS 质量的 0.5% 时, 复合材料表现出最强的疏水性。CS 纤维由纤维素、半纤维素和木质素组成, 含有大量的亲水基团($-\text{OH}$), 这是导致材料吸水的原因之一^[19]。一方面, TC 可与其发生反应形成化学键, 如酯键等, 从而减少了纤维表面羟基的数量, 进而降低了复合材料的吸水率。另一方面, TC 除了与羟基发生反应外, 另一端还改善了纤维与树脂之间的界面结合能力。TC 能够覆盖 CS 表面的极性基团, 减少了 CS 表面能够吸附水分子的位点, 从而有效地降低了吸水率。当 TC 用量较少时, 就无法很好地对纤维进行有效的包裹, 在界面连接处容易产生孔洞和缝隙, 形成水分子浸入的通道。同理, 当 TC 用量过大时, 过量的 TC 不能与 CS 表面的基团完全反应, 多余的 TC 会在 CS 表面形成团聚现象。这些团聚的 TC 分子本身会吸附水分子, 同时也会影响复合材料的物理结构, 使内部缺陷增多, 导致水分子更容易渗透, 降低了材料的疏水性能。

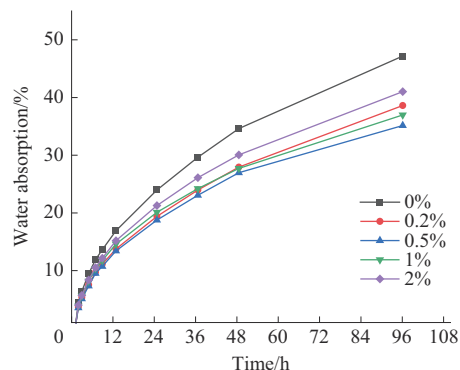


图 7 CS-TC/EP 复合材料 1~96 h 吸水率变化情况

Fig. 7 Changes in water absorption of CS-TC/EP composites for 1~96 h

3 结论

采用 TC 改性的方式对 CS 纤维进行包覆处理, 得出如下结论。

(1) 借助 TC 对 CS 纤维进行包覆改性处理, 并未损坏纤维的骨架结构, 同时改善了纤维在 EP 树脂中的分散性以及树脂之间的界面性能。当 TC 质量分数为 CS 的 0.5% 时, CS-TC/EP 复合材料的冲击和弯曲强度相较于未改性时分别增加了 66.32% 和 44.64%。

(2) DMA 结果表明 TC 处理后 CS-TC/EP 复合材料的 E' 提高了 44.8%, $\tan\delta$ 提高证明纤维与树脂界面

性能增强,因TC为柔性结构,复合材料的 T_g 变化不明显。

(3) FTIR分析证实TC成功包覆CS纤维表面,改善纤维与树脂界面性能。SEM结果表明,CS-TC/EP复合材料断裂后断面平整,无大量孔洞和缝隙,进一步印证TC偶联剂通过改善界面相容性提升复合材料的力学性能。

(4)吸水率结果显示,TC的引入减少纤维表面羟基数量,且随树脂与纤维相容性提高,减少水分子从孔隙浸入,提升复合材料材料疏水性。

参考文献

- [1] 马文鹏,赵宇曦,刘斌,等.基于文献计量学的棉花秸秆研究现状与热点分析[J].中国沼气,2023,41(1):13-20.
MA Wenpeng, ZHAO Yuxi, LIU Bin, et al. Research status and hotspot analysis of cotton straw based on bibliometrics[J]. China Biogas, 2023, 41(1):13-20.
- [2] 蔺焘,郭文静,方露,等.棉秆单根皮部纤维的形态及性能研究[J].北京林业大学学报,2013,35(1):109-113.
LIN Tao, GUO Wenjing, FANG Lu, et al. Morphology and properties of bast fiber of single cotton stalk[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(1):109-113.
- [3] RAJA T. Innovative lightweight materials using sugarcane ash and neem fiber epoxy matrix composite for sustainable applications[J]. Results in Engineering, 2025, 25. DOI: 10.1016/j.rineng. 2024. 103720.
- [4] LAKSHAM S, HITISH H. Experimental investigations of epoxy-resin-banana-fiber-saw dust bio-composite material for potential application as partitioning board[J]. Materials Today: Proceedings, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.01.237.
- [5] SHAIKH Z A, MAHESHWARI A S. Optimization of composition parameter of banana-areca fiber epoxy based composite material for impact strength using taguchi method[J]. Materials Today Proceedings, 2024, 112: 1-5.
- [6] RAJA T. Innovative lightweight materials using sugarcane ash and neem fiber epoxy matrix composite for sustainable applications[J]. Results in Engineering, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103720.
- [7] 张薇,路琴,刘思思,等.PLA木塑复合材料性能研究及界面处理分析[J].工程塑料应用,2020,48(2):39-43.
ZHANG Wei, LU Qin, LIU Sisi, et al. Performance research and interface treatment analysis of PLA wood-plastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2):39-43.
- [8] SHANG J, ABDUREXIT A, JAMAL R, et al. Waste cotton stalks enhancing the impact and crystallization performances of polylactic acid/polypropylene composite with PP-g-MAH compatibilizer[J]. Composites Science and Technology, 2024, 249. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110485.
- [9] LI Z, SHANG J, ABDUREXITE A, et al. Improving the performance of polylactic acid/polypropylene/cotton stalk fiber composites with epoxidized soybean oil as a high efficiency plasticizer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.137814.
- [10] YOU J, JEE S M, LEE Y M, et al. Carbon fiber-reinforced polyamide composites with efficient stress transfer via plasma-assisted mechanochemistry[J]. Composites Part C: Open Access, 2021, 6. DOI:10.1016/j.jcomc.2021.100209.
- [11] 高丽敏.不同长径比秸秆纤维(粉)增强PLA复合材料的制备与性能研究[D].西安:西安理工大学,2024.
GAO Limin. Preparation and properties of pla composites reinforced with straw fiber(powder) of different aspect ratio[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [12] ZHANG Y, DING C, ZHANG N, et al. Surface modification of silica micro-powder by titanate coupling agent and its utilization in PVC based composite[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124933.
- [13] SUN H, Qi Y, ZHANG J. Surface organic modified magnesium titanate particles with three coupling agents: characterizations, properties and potential application areas[J]. Applied Surface Science, 2020, 520. DOI:10.1016/j.apsusc.2020.146322.
- [14] LI D, LI J, MA X. Study on the structure and properties of poly (3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/rubberwood fiber composites modified with titanate coupling agent[J]. Wood Research, 2021, 66(1):49-56.
- [15] 吕生华,晏移寒,郭子轶,等.钛酸酯偶联剂改性二氧化钛/环氧树脂基超疏水涂层的制备及其性能研究[J].陕西科技大学学报,2024,42(4):86-93.
LYU Shenghua, YAN Yihan, GUO Ziyi, et al. Study on preparation and properties of titanate coupling agent modified titanium dioxide/epoxy resin based superhydrophobic coating[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2024, 42(4):86-93.
- [16] ZHAO L, DING Y, LI S, et al. Silane treatment for sisal fibers to improve the degradation resistance and interface with cement matrix[J]. Construction and Building Materials, 2024, 429. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136435.
- [17] 李亚莎,宋鹏,谢昊,等.硅烷偶联剂改性对SiO₂/PI复合材料热力学与介电性能的影响[J].绝缘材料,2023,56(2):110-117.
LI Yaping, SONG Peng, XIE Hao, et al. Effect of silane coupling agent modification on thermomechanical and dielectric properties of SiO₂/PI composite[J]. Insulating materials, 2023, 56(2):110-117.
- [18] 刘传志,杨庆生.聚合物分子链微结构-力学性能关系的数据驱动模型[J].固体力学学报,2021,42(5):532-542.
LIU Chuazhi, YANG Qingsheng. A data-driven model for the relationship between molecular chain microstructure and mechanical properties of polymers[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2021, 42(5):532-542.
- [19] 马扶宸,杜涛,刘伟,等.薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J].工程塑料应用,2024,52(2):51-56.
MA Fuchen, DU Tao, LIU Wei, et al. Preparation and mechanical properties of lavender distillation residue/epoxy resin composites [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(2):51-56.