

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.009

表面处理对亚麻/聚乳酸复合材料性能的影响

孙靖博¹, 方春月¹, 王建刚², 王春红¹, 邹专勇³

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 绍兴市质量技术监督检测院, 浙江绍兴 312366;

3. 绍兴文理学院, 绍兴市高性能纤维及制品重点实验室, 浙江绍兴 312000)

摘要: 为改善亚麻纤维与聚乳酸基体之间的界面结合, 分别采用碳酸氢钠和硬脂酸对亚麻织物进行表面处理(在碳酸氢钠处理的基础上进行硬脂酸处理), 并通过热压工艺制备了表面处理前后的亚麻/聚乳酸复合材料。通过X射线衍射、水接触角和断面形貌表征手段, 探究了表面处理前后亚麻织物性能及其复合材料的界面结合情况, 并分析碳酸氢钠和硬脂酸处理对复合材料力学性能和热稳定性的影响。结果表明, 经过碳酸氢钠处理的亚麻织物与聚乳酸之间的界面结合得到了改善, 与未处理的复合材料相比, 经过碳酸氢钠处理的复合材料拉伸强度提高了11.2%, 弯曲强度提高了4.7%, 但复合材料的热稳定性相较于纯聚乳酸有所下降, 而热分解后的600℃质量残余率增加到6.31%。经过硬脂酸处理的亚麻织物表现出良好的疏水性, 水接触角达到112.7°, 通过观察复合材料断面形貌, 发现纤维与基体的界面无明显间隙, 界面结合得到了显著改善。与未处理的复合材料相比, 经过硬脂酸处理的复合材料拉伸强度提高了18.2%, 弯曲强度提高了17.6%; 与经过碳酸氢钠处理的复合材料相比, 经过硬脂酸处理的复合材料的初始分解温度有所下降, 但质量损失50%时的温度和最大分解速率下的温度均有所提升, 600℃时质量残余率有所降低。

关键词: 亚麻纤维; 聚乳酸; 硬脂酸; 碳酸氢钠; 复合材料; 表面处理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0065-07

Effect of surface treatment on properties of flax/polylactic acid composites

SUN Jingbo¹, FANG Chunyue¹, WANG Jiangang², WANG Chunhong¹, ZOU Zhuanyong³

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Shaoxing Testing Institute of Quality Technical Supervision, Shaoxing 312366, China;

3. Shaoxing Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract : In order to improve the interface bonding between flax fiber and polylactic acid matrix, the surface of flax fabric was treated with sodium bicarbonate and stearic acid (Stearic acid treatment was based on sodium bicarbonate treatment) respectively, and flax/polylactic acid composites before and after surface treatment were prepared by hot pressing process. By means of X-ray diffraction, water contact angle and fracture morphology, the properties of the flax fabric and the interfacial bonding of the composites before and after surface treatment were explored, and the surface treatment effects of sodium bicarbonate and stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of the composites were analyzed. The results show that the interface bonding between the flax fabric treated with sodium bicarbonate and polylactic acid is improved. Compared with the untreated composite, the tensile strength of the composites treated with sodium bicarbonate increases by 11.2% and the flexural strength increases by 4.7%. However, the thermal stability of the composite decreases compared with that of pure polylactic acid, and the mass residual rate at 600℃ after thermal decomposition increases to 6.31%. The flax fabric treated with stearic acid shows good hydrophobicity, whose water contact angle reaches 112.7°, and the cross-sectional morphology of the composite treated with stearic acid shows that the interface bonding between the fibers and the matrix is significantly improved, with no obvious gap. Compared with the untreated composite, the tensile strength of the composites treated with stearic acid increases by 18.2%, and the flexural strength increases by 17.6%. Compared with the composites treated with sodium bicarbonate, the initial decomposition temperature of the composites treated with stearic acid decreases, but the temperature at 50% mass loss and temperature at maximum decomposition rate increase, and the mass residual rate at 600℃ is reduced.

Keywords : flax fiber ; polylactic acid ; stearic acid ; sodium bicarbonate ; composite ; surface treatment

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2024008)

通信作者: 王建刚, 高级工程师, 研究方向为纺织品和纺织化学品质量技术基础和有害化学品的检测

收稿日期: 2025-03-31

引用格式: 孙靖博, 方春月, 王建刚, 等. 表面处理对亚麻/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 65-71.

SUN Jingbo, FANG Chunyue, WANG Jiangang, et al. Effect of surface treatment on properties of flax/polylactic acid composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 65-71.

聚乳酸作为一种绿色环保的热塑性聚合物,在生物聚合物中占有重要地位,广泛应用在生物医药、包装、纺织纤维等领域^[1],但由于聚乳酸韧性很差^[2],往往需要将增韧材料与聚乳酸复合来提高材料的力学性能。亚麻纤维(Flax)因具有资源丰富、比刚度和比强度等力学性能较高的特点受到研究人员的广泛关注^[3],早期研究发现在聚乳酸中添加亚麻纤维可使复合材料的拉伸强度提高50%,且质量分数为30%的亚麻纤维可以将聚乳酸的拉伸弹性模量从3.4 GPa增加到8.4 GPa^[4]。

亚麻/聚乳酸复合材料的制备方法常取决于亚麻纤维的结构。短亚麻纤维复合材料常使用挤出和注射成型,主要由于此方法可以限制纤维的降解并且可以改善纤维在基体中的分散从而易于加工^[5]。王刚等^[6]利用注塑挤出工艺制备了多种不同亚麻纤维含量的亚麻/聚乳酸复合材料,结果显示含有质量分数40%亚麻纤维的复合材料的力学性能最优,拉伸强度为63.5 MPa,冲击强度为5.58 kJ/m²。而亚麻织物复合材料通常使用热压成型的制备工艺,刘常衡^[7]通过层叠热压制备的亚麻/聚乳酸复合材料具有良好的弯曲及冲击性能。

复合材料的力学性能不仅与纤维增强体和基体本身性能有关,也与纤维和基体之间的界面结合有关,考虑到亚麻纤维因亲水性较强而与聚合物基体的相容性较差,研究人员尝试对亚麻纤维进行表面处理来改善界面结合以确保基体和纤维之间有效的应力传递^[8-9]。碱处理是一种常用的麻纤维处理法,通过使用氢氧化钠^[10]或碳酸氢钠^[11]可以去除亚麻纤维中的半纤维素、木质素和蜡,使纤维产生粗糙的表面,并且由于直径的减小使纤维长宽比得到改善,从而实现纤维和聚合物基体之间更好地结合^[12],另外,适量的碳酸氢钠浓度对纤维本体结构损伤程度较低。除此之外,接枝二氧化钛纳米粒子^[13]、填充纳米颗粒^[14]和扁桃酸^[15]以及二氧化硅涂层^[16]也可以提高复合材料的力学性能。

硬脂酸是一种使用非常简便且处理效果较好的表面处理剂,由直链烷基和一个羧基基团构成,有研究发现,硬脂酸的羧基基团可以在一定条件下与天然纤维的羟基基团发生酯化反应,降低天然纤维的亲水性^[17-18]。Lei等^[17]使用硬脂酸对天然纤维进行浸泡,使纤维表面呈现出疏水状态,增加了天然纤维和环氧树脂的界面结合,提升了力学性能。

同样的处理方法,Russo等^[18]发现经硬脂酸处理的麻纤维与聚丙烯树脂也表现出了良好的界面结合,与纯聚丙烯相比,复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别提高了3.39%和13.97%。

因此,在前人研究的基础上,笔者分别探究碳酸氢钠和硬脂酸表面处理(在碳酸氢钠处理基础上进行硬脂酸处理)亚麻纤维对亚麻/聚乳酸复合材料性能的影响。采用热压法制备亚麻/聚乳酸复合材料,通过X射线衍射(XRD)、水接触角和断面形貌等表征手段来探究表面处理前后亚麻纤维的结构和性能及相应亚麻/聚乳酸复合材料的界面结合情况,并对复合材料进行力学性能测试和热重(TG)分析,以研究表面处理对材料力学性能和热稳定性的影响,为高性能亚麻/聚乳酸复合材料的制备提供参考。

1 实验方法

1.1 主要原材料

亚麻织物:经纬密度为42根/cm×42根/cm,克重215 g/m²,晋州市学松织布厂;

聚乳酸:3052D,美国Nature Works公司;

碳酸氢钠:分析纯,重庆澍翊科技有限公司;

硬脂酸:分析纯,福晨(天津)化学试剂有限公司;

无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热鼓风干燥箱:DHG-9070A,上海市一恒科学仪器有限公司;

塑料制品液压机:Y/TD71-45A,天津市天锻压力机有限公司;

XRD仪:DX-2700BH,丹东浩元仪器有限公司;

接触角测试仪:OCA40 Micro,北京东方德菲仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):TM-1000,日本株式会社日立高新技术那柯事业所;

万能强力机:Instron3369,美国Instron公司;

TG分析仪:Pyris Diamond TG/DTA,日本Pekin Elmer公司。

1.3 试样制备

1.3.1 亚麻织物表面处理

将亚麻织物放置在100℃热水中煮20 min并进行搅拌,去除织物表面的浆料,洗涤干净在80℃烘箱中干燥2 h;将干燥的亚麻织物在5%的碳酸氢

钠溶液中浸泡 5 d;之后使用蒸馏水对织物进行清洗,然后在烘箱中干燥 3 h,温度设定 80 °C,得到碳酸氢钠表面处理的亚麻织物(Flax- NaHCO_3)。在乙醇溶液中加入硬脂酸,在 45 °C 下搅拌 30 min 制备质量分数 2% 的硬脂酸溶液,为了避免硬脂酸溶液在室温下发生凝固,将碳酸氢钠处理后的亚麻织物在 45 °C 的硬脂酸溶液中浸泡 3 h,得到硬脂酸表面处理的亚麻织物(Flax- NaHCO_3 -SA)。未处理的亚麻织物用 Flax 表示。

1.3.2 亚麻/聚乳酸复合材料制备

首先将聚乳酸颗粒和亚麻织物在 80 °C 烘箱中干燥 3 h 去除多余水分;使用液压机将聚乳酸颗粒热压成 1 mm 厚的薄膜,热压温度设定为 170 °C,压力为 20 MPa,时间为 2 min;4 层亚麻织物和 5 层聚乳酸薄膜全部以相同方向交替堆叠放置在尺寸为 180 mm×180 mm×2 mm 的模具中,用液压机热压为亚麻/聚乳酸复合材料(亚麻纤维质量分数为 30%),模具温度为 170 °C,压力为 10 MPa,时间 15 min,自然冷却到室温,分别制备出未表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料(FPC)、碳酸氢钠表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料(FPC- NaHCO_3)和硬脂酸表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料(FPC- NaHCO_3 -SA)。纯聚乳酸用 PLA 表示。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 XRD 测试

XRD 光谱采集参数为:Cu $\text{K}\alpha$ X 射线辐射源(波长 $\lambda=1.54 \mu\text{m}$), 2θ 为 5°~80°,扫描速度为 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

1.4.2 接触角测试

将至少 10 个体积为 2 μL 的脱气水滴滴在亚麻织物上并利用接触角测试仪进行分析。

1.4.3 SEM 表征

对亚麻及复合材料拉伸断面喷金处理,加速电压为 15 kV,观察样品表面及断面微观形态。

1.4.4 亚麻织物断裂强力测试

断裂强力按照 GB/T 3923.1-1997 测试,标准隔距为 200 mm,测试速度为 50 mm/min,所测得的数据为 5 次测量所得的平均值。

1.4.5 复合材料力学性能测试

拉伸性能按照 ASTM D638-10 测试,测速速度是 5 mm/min,所测得的数据为 5 次测量所得的平均值。

弯曲性能按照 ASTM D790-17 测试,测试速度

为 2 mm/min,所测得的数据为 5 次测量所得的平均值。

1.4.6 复合材料 TG 分析

在氮气环境下进行 TG 分析,升温速度为 10 °C/min,温度范围从室温到 600 °C。

2 结果与讨论

2.1 XRD 测试结果分析

图 1 是硬脂酸、亚麻纤维与表面处理的亚麻纤维的 XRD 图。从图 1 可以看出,未处理亚麻织物的主要特征峰分别位于 $2\theta=15.1^\circ$, $2\theta=16.7^\circ$, $2\theta=22.9^\circ$ 和 $2\theta=34.5^\circ$ 处,对应于 I 型纤维素 ($1\bar{1}0$)(110)(200) (004) 晶面。经过碳酸氢钠处理过的亚麻纤维的纤维素晶体结构没有发生明显变化。而经过硬脂酸表面处理的亚麻织物中,可以看到在 $2\theta=21.6^\circ$ 处的衍射峰与硬脂酸在此位置的衍射峰相同,从而表明硬脂酸在表面处理后的亚麻织物中是以晶体形式存在的,且 $2\theta=21.6^\circ$ 处的衍射峰可归属于硬脂酸单斜晶 C 型^[18]。

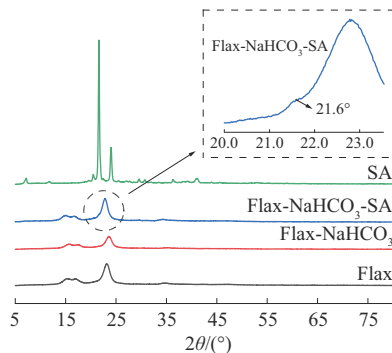


图 1 硬脂酸(SA)、亚麻纤维与表面处理的亚麻纤维的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of stearic acid (SA), flax fiber and surface-treated flax fiber

2.2 水接触角测试结果分析

图 2 为表面处理前后亚麻织物在不同测试时间下的水接触角图。由图 2 观察得出,未表面处理的亚麻织物(见图 2a)具有吸水性,这归因于亚麻纤维含有的大量羟基基团和纤维内部微孔、通道的毛细作用来吸收和传输水分,致使实验中亚麻织物吸收水分不完全的原因可能是织物表面存在不易去除的杂质、亚麻纤维本身存在的果胶等疏水物质和残余的纺织浆料;而经过弱碱处理的亚麻织物(见图 2b)吸水性能显著提升,吸水速度更快,当水珠一接触织物表面,织物就对水珠产生了吸附作用,在 5 s 时已看不到水珠的存在,但弱碱处理是否会去除表面杂质、浆料等部分还需通过 SEM 观察得知。图 2c

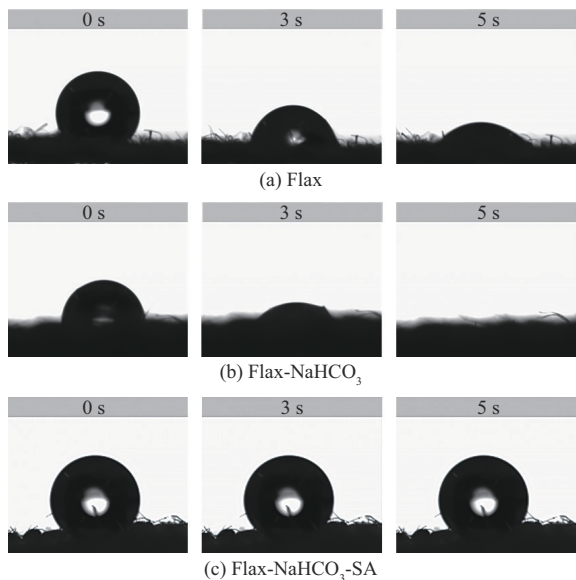


图2 表面处理前后亚麻织物在不同测试时间下的水接触角图

Fig. 2 Water contact angle diagram of flax fabric before and after surface treatment under different testing time

为硬脂酸处理的亚麻织物水接触角测试图,明显看出经硬脂酸处理的织物呈现出了良好的疏水性能,并在一定时间内持续不吸收水分,经测试其最终接触角度为 112.7° 。亚麻织物出现疏水效果的原因是硬脂酸的尾部有较长的疏水烷基链,其头部的羧基也会与亚麻纤维的羟基发生反应,致使亚麻织物表面疏水化^[19]。

2.3 SEM表征结果分析

图3为表面处理前后的亚麻纤维的SEM照片。从图3a观察可知,未处理的亚麻纤维表面有大量的杂质和残留的纺织浆料。图3b是经过碳酸氢钠处理后的亚麻纤维,可以看到处理过的纤维表面变得相对光滑,说明表面处理去除了纤维表面上的大量杂质和纺织浆料,并且亚麻纤维表面未出现用氢氧化钠处理后的裂纹和粗糙结构,原因可能是碳酸氢钠属于弱碱,对亚麻纤维并未损伤过度,这与肖雄^[20]的研究成果一致。图3c为硬脂酸处理后的亚麻纤维SEM照片,与图3b对比,硬脂酸处理后的亚麻纤维表面相对光滑,可以很明显地观察到硬脂酸将亚麻纤维完全包裹,并在其表面形成了一层均匀的膜。

图4为表面处理前后的亚麻/聚乳酸复合材料的断面SEM照片。通过观察图4a可以发现,未表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料中的亚麻纤维和聚乳酸界面结合较差,两者之间存在较大的间隙,说明聚乳酸并未良好地浸润亚麻纤维,亚麻纤维与聚乳酸基体之间存在较弱的界面结合,这在一定情况

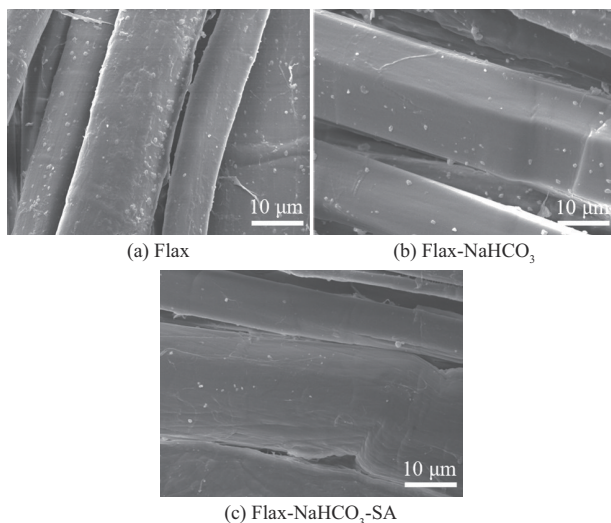


图3 表面处理前后亚麻纤维的SEM照片

Fig. 3 SEM photos of flax fiber before and after surface treatment

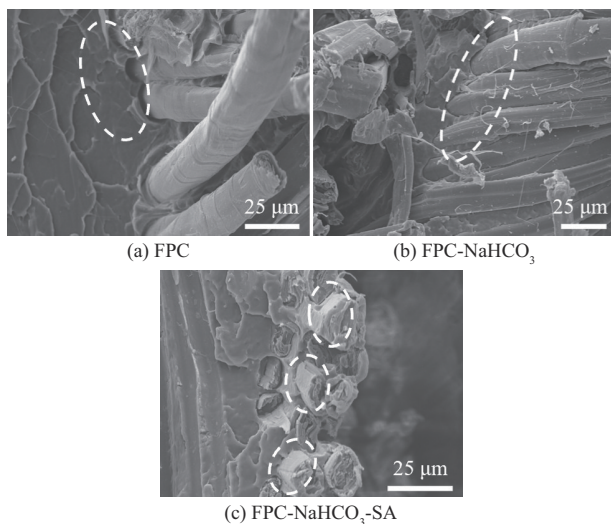


图4 表面处理前后复合材料的断面SEM照片

Fig. 4 SEM photos of fracture surface of composites before and after surface treatment

下会影响复合材料的力学性能。与图4a相比,图4b中经过碳酸氢钠表面处理的亚麻纤维与聚乳酸基体之间的相容性有所提高,但界面还是存在一些细小的间隙,除此之外,碳酸氢钠处理使亚麻纤维暴露了一些纤维素微纤。通过观察图4c,发现经过硬脂酸处理的亚麻纤维与聚乳酸基体之间的界面相容性增加,两者之间并未出现明显的间隙,并且断面也较为平整,主要以纤维和基体的断裂为主,这表明了硬脂酸具有提高纤维和基体界面结合强度的效果。

2.4 亚麻织物及亚麻/聚乳酸复合材料的力学性能分析

图5为表面处理前后的亚麻织物断裂强力。从

图5可以看出, Flax, Flax- NaHCO_3 和Flax- NaHCO_3 -SA的断裂强力依次增加。Flax- NaHCO_3 的断裂强力为389.19 N,与未处理亚麻织物相比提高了20.1%,这是由于亚麻纤维上的杂质等物质的去除使纤维之间的接触面积增大,增加了纤维之间的抱合力,从而提高了亚麻织物的断裂强力。Flax- NaHCO_3 -SA的断裂强力为408.43 N,与未处理亚麻织物相比提高了26.0%,是因为硬脂酸在亚麻纤维上的均匀分布可以消除纤维表面上的应力集中,从而进一步提高了织物的断裂强力。

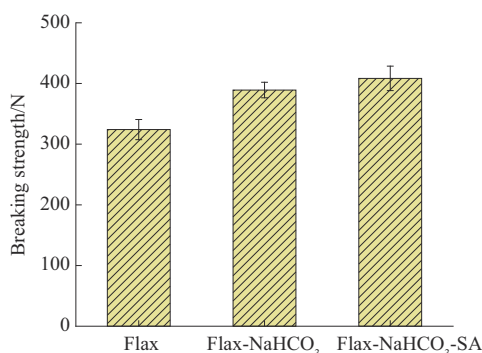


图5 表面处理前后亚麻织物的断裂强力

Fig. 5 Breaking strength of flax fabric before and after surface treatment

图6和图7分别为表面处理前后的亚麻/聚乳酸复合材料拉伸性能和弯曲性能。从图6和图7可知FPC, FPC- NaHCO_3 和FPC- NaHCO_3 -SA复合材料的拉伸强度和弯曲强度都依次增加。其中FPC- NaHCO_3 -SA的力学性能最优,拉伸强度和弯曲强度分别为97.5 MPa和141.08 MPa,与未表面处理的FPC相比各提升了18.2%和17.6%。FPC- NaHCO_3 力学性能次之,拉伸强度和弯曲强度分别为91.7 MPa和125.68 MPa,与未表面处理的FPC相比各提升了11.2%和4.7%。

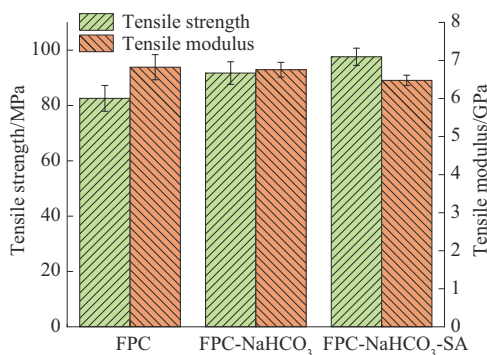


图6 表面处理前后复合材料的拉伸性能

Fig. 6 Tensile properties of composites before and after surface treatment

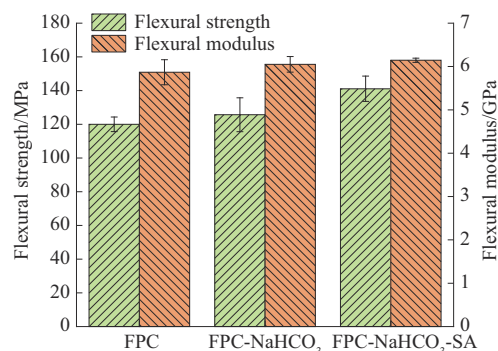


图7 表面处理前后复合材料的弯曲性能

Fig. 7 Flexural properties of composites before and after surface treatment

复合材料的强度不仅与亚麻织物本身断裂强力有关,亚麻纤维与聚乳酸之间的界面结合情况也会影响复合材料的力学性能。结合图4的SEM照片发现,碳酸氢钠和硬脂酸的处理都减小了亚麻纤维与聚乳酸基体之间的界面间隙。其中,碳酸氢钠的弱碱性处理一方面去除了纤维表面的杂质和浆料,极大程度地清洁了亚麻纤维表面,提高了亚麻纤维与聚乳酸的界面结合,另一方面会暴露更多的纤维素微纤,从而提高亚麻纤维与聚乳酸的机械连锁。在弱碱处理的基础上,硬脂酸的处理降低了亚麻纤维的极性,使亚麻纤维表面呈现良好的疏水性,减少了亚麻纤维与聚乳酸之间的极性差异,从而使纤维与基体之间紧密结合在一起,界面没有明显的间隙,这种增强的界面结合使得复合材料在受力时能够更有效地将载荷从聚乳酸基体传递到纤维增强体上,减少界面失效,从而提高了复合材料的力学性能。

由于聚乳酸分子链的状态会影响复合材料的模量^[21],而笔者所用低浓度的碳酸氢钠和硬脂酸只对亚麻纤维进行表面处理,并不会对聚乳酸分子链产生影响,因此3种复合材料的拉伸弹性模量和弯曲模量没有发生显著变化。而FPC- NaHCO_3 -SA拉伸弹性模量略微下降是因为复合材料在拉伸过程中,亚麻纤维上硬脂酸层的存在可能使纤维与基体之间发生界面滑移,因此在受到拉伸时,纤维和基体之间的相对位移增加,导致复合材料整体的刚性下降,拉伸弹性模量降低。

2.5 亚麻/聚乳酸复合材料的热稳定性

图8和表1分别是纯聚乳酸与亚麻/聚乳酸复合材料的TG与DTG曲线和热分解特征参数,表1中 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$ 和 $T_{50\%}$ 分别代表纯聚乳酸和复合材料质量损

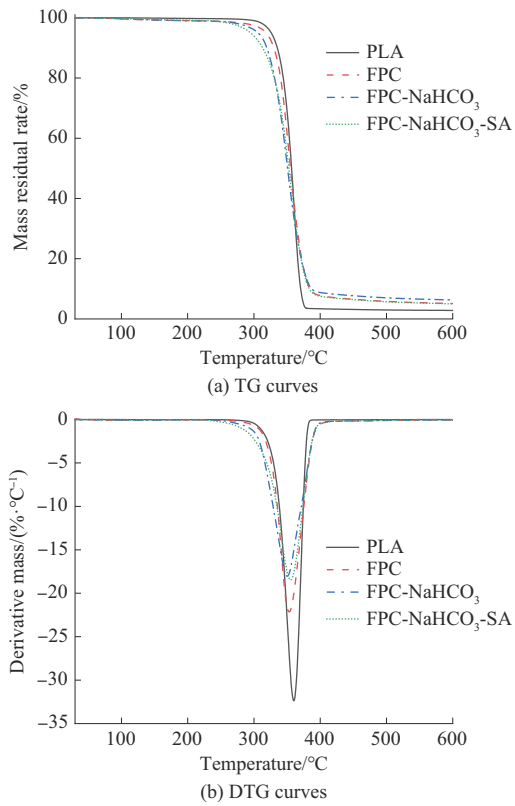


图8 纯聚乳酸与亚麻/聚乳酸复合材料的TG和DTG曲线

Fig. 8 TG and DTG curves of pure polylactic acid and flax/polylactic acid composites

失为5%,10%和50%时的热分解温度,其中 $T_{5\%}$ 被认为是材料的初始分解温度^[22], T_p 的含义是纯聚乳酸和复合材料在最大分解速率下的温度,其数值是DTG曲线中的峰值温度。

从图8和表1可以发现,未表面处理的亚麻/聚

乳酸复合材料的各质量损失温度与纯聚乳酸相比均有所下降,这是因为复合材料中亚麻纤维的半纤维素和木质素等成分会在早期分解^[23],从而降低了复合材料的整体热稳定性,但未处理亚麻/聚乳酸复合材料的600℃质量残余率由纯聚乳酸的2.84%提高到了5.12%。经过碳酸氢钠处理的亚麻/聚乳酸复合材料的 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$ 和 $T_{50\%}$ 进一步下降,与未处理复合材料相比初始分解温度下降了约12℃,复合材料的热稳定性有所下降,这是因为碳酸氢钠处理后亚麻纤维表面暴露的羟基基团增加了纤维的吸水性,而吸收的过多水分会在高温下导致复合材料内部结构产生缺陷^[21],从而加速分解。经过硬脂酸表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料的热稳定性分析可分为两部分,在前期热分解时,复合材料的 $T_{5\%}$ 和 $T_{10\%}$ 分别又下降了11.27℃和6.28℃,表明其热稳定性在前期失重时很差,但与碳酸氢钠处理的复合材料相比,后期热分解时的 $T_{50\%}$ 有所升高,复合材料的 T_p 也有明显提升,由350.27℃升高到了355.50℃,说明其在高温下的热稳定性有所增强,除此之外,复合材料在600℃时的质量残余率有所下降,从6.31%下降到5.01%,比未处理的复合材料的质量残余率还要略低。这是因为经过硬脂酸表面处理后,复合材料中的亚麻与聚乳酸的界面结合性能得到较好的改善,当复合材料受热时,聚乳酸紧紧包裹住亚麻纤维形成一个整体,使得热应力可以得到稳定扩散,因此硬脂酸表面处理后的复合材料在热分解后质量残余率有所降低。

表1 纯聚乳酸与亚麻/聚乳酸复合材料的热分解特征参数

Tab. 1 Thermal decomposition characteristic parameters of PLA and flax/polylactic acid composites

Samples	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{50\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	Mass residual rate at 600 °C/%
PLA	325.99	334.99	356.99	359.99	2.84
FPC	318.34	329.85	354.85	353.35	5.12
FPC-NaHCO ₃	306.26	319.27	350.77	350.27	6.31
FPC-NaHCO ₃ -SA	294.99	312.99	352.50	355.50	5.01

Notes: $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ are thermal decomposition temperatures at 5%, 10% and 50% mass loss respectively; T_p is temperature at maximum decomposition rate.

3 结论

(1)用碳酸氢钠处理亚麻纤维不仅去除了纤维表面的杂质,还使纤维暴露了更多的纤维素微纤,这改善了亚麻纤维与聚乳酸之间的界面结合,但界面仍存在细小间隙,而硬脂酸处理使亚麻纤维表面呈现出了良好的疏水性,并且亚麻纤维和聚乳酸基体界面几乎没有明显的间隙。

(2)与未处理复合材料相比,经碳酸氢钠处理后的复合材料拉伸强度和弯曲强度分别提高了11.2%

和4.7%,而硬脂酸处理后的复合材料力学性能最优,拉伸强度和弯曲强度分别达到97.5 MPa和141.08 MPa,分别提升了18.2%和17.6%。

(3)与未表面处理的亚麻/聚乳酸复合材料相比,碳酸氢钠处理后的复合材料热稳定性变差,并且600℃质量残余率有所升高,而经过硬脂酸表面处理的复合材料的初始分解温度继续下降,但在热分解后期其 $T_{50\%}$ 和 T_p 均有所提升,而600℃质量残余率有所降低。

参考文献

- [1] MURARIU M, DUBOIS P. PLA composites: From production to properties[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107: 17–46.
- [2] 陈颢, 顾书英, 任杰. 聚乳酸/天然纤维复合材料成型加工研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(9): 102–105.
CHEN Xie, GU Shuying, REN Jie. Research progress on processing of PLA/natural fiber composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(9): 102–105.
- [3] 左祺. 苧麻增强复合材料双尺度混合优化模型研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
ZUO Qi. Investigation of dual-scale improved rule of mixture model in ramie reinforced composite[D]. Tianjin: Tiangong University, 2023.
- [4] OKSMAN K, SKRIFVARS M, SELIN J F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid(PLA) composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(9): 1 317–1 324.
- [5] ALIOTTA L, GIGANTE V, COLTELLI M B, et al. Thermo-mechanical properties of PLA/short flax fiber biocomposites[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(18). DOI:10.3390/app9183797.
- [6] 王刚, 王利平. 亚麻纤维/聚乳酸复合材料的力学性能、热稳定性及降解性能研究[J]. *塑料科技*, 2025, 53(1): 98–102.
WANG Gang, WANG Liping. Study on mechanical properties, thermal stability and degradation performance of polylactic acid bacteria/flax fiber composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(1): 98–102.
- [7] 刘常衡. 植物纤维增强聚乳酸复合材料的性能研究[D]. 山东: 山东理工大学, 2019.
LIU Changheng. Research on properties of plant fiber reinforced poly(lactic acid) composites[D]. Shandong: Shandong University of Technology, 2019.
- [8] LATIF R, WAKEEL S, ZAMAN KHAN N, et al. Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(1): 15–30.
- [9] DE ARAUJO ALVES LIMA R, KAWASAKI CAVALCANTI D, DE SOUZA E SILVA NETO J, et al. Effect of surface treatments on interfacial properties of natural intralaminar hybrid composites[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(1): 314–325.
- [10] HUNER U. Effect of chemical surface treatment on flax-reinforced epoxy composite[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2018, 15(6): 808–821.
- [11] FIORE V, SCALICI T, VALENZA A. Effect of sodium bicarbonate treatment on mechanical properties of flax-reinforced epoxy composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(8): 1 061–1 072.
- [12] XIA X L, LIU W T, ZHOU L Y, et al. Modification of flax fiber surface and its compatibilization in polylactic acid/flax composites[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2016, 25(1): 25–35.
- [13] WANG H G, XIAN G J, LI H. Grafting of nano-TiO₂ onto flax fibers and the enhancement of the mechanical properties of the flax fiber and flax fiber/epoxy composite[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 76: 172–180.
- [14] SHERIEF Z, XIAN G J, THOMAS S, et al. Effects of surface grafting of copper nanoparticles on the tensile and bonding properties of flax fibers[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2017, 24(5): 651–660.
- [15] KUMAR R, YAKUBU M K, ANANDJIWALA R D. Flax fibre reinforced polylactic acid composites with amphiphilic additives[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2010, 39(10): 437–444.
- [16] BAYART M, GAUVIN F, FORUZANMEHR M R, et al. Mechanical and moisture absorption characterization of PLA composites reinforced with nano-coated flax fibers[J]. *Fibers and Polymers*, 2017, 18(7): 1 288–1 295.
- [17] LEI L L, ZHAO B B, CHENG Z F, et al. Improving the interfacial adhesion and mechanical properties of flax fiber reinforced composite through fiber modification and layered structure[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 221. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119305.
- [18] RUSSO P, VITIELLO L, SBARDELLA F, et al. Effect of carbon nanostructures and fatty acid treatment on the mechanical and thermal performances of flax/poly propylene composites[J]. *Polymers*, 2020, 12(2). DOI:10.3390/polym12020438.
- [19] SBARDELLA F, RIVILLA I, BAVASSO I, et al. Zinc oxide nanostructures and stearic acid as surface modifiers for flax fabrics in polylactic acid biocomposites[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 177: 495–504.
- [20] 肖雄. 表面处理对亚麻纤维及其复合材料力学性能影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
XIAO Xiong. Influence research of surface treatment on mechanical properties of flax fiber and its composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [21] 李勇刚, 吴华伟, 王春红, 等. 四[β-(3, 5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯对汉麻秆粉/聚乳酸木塑复合材料力学及热稳定性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(7): 4 139–4 148.
LI Yonggang, WU Huawei, WANG Chunhong, et al. Effect of pentaerythritol tetrakis[3-(3, 5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate] on mechanical properties and thermal stability of hemp straw powder/polylactic acid wood-plastic composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4 139–4 148.
- [22] 高金玲, 李媛, 储则中, 等. PLA/硫酸钙晶须复合材料制备及其性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(10): 17–23.
GAO Jinling, LI Yuan, CHU Zezhong, et al. Preparation and properties of PLA/phosphogypsum whisker composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(10): 17–23.
- [23] 王妮. 麻秆粉/聚乳酸木塑复合材料的制备与性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
WANG Ni. Preparation and properties of hemp stalk powder/polylactic acid wood-plastic composites[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.