

工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的湿法制备及其吸声性能研究

马涣佳, 徐铭健, 杨青峰, 李明东, 郑永杰*, 赵红*
(齐齐哈尔大学 轻工与纺织学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: **目的** 以工业大麻纤维和聚乳酸纤维为原料, 通过湿法制备工业大麻/聚乳酸纤维复合材料, 并探究其力学性能和吸声性能。**方法** 利用非织造和热压工艺湿法制备得到不同质量比(8:2、7:3、6:4、5:5)的工业大麻纤维/聚乳酸纤维复合材料, 对材料进行结构及性能测试, 探究聚乳酸纤维对工业大麻纤维的力学性能和吸声性能的影响。**结果** 随着聚乳酸纤维比例的增加, 材料力学性能逐渐增强。其中, 质量比为5:5的材料力学性能最好; 聚乳酸纤维越多, 材料的吸声系数越低, 质量比为8:2的材料吸声性能最好。**结论** 工业大麻/聚乳酸纤维复合材料具有良好的吸声性能和力学性能。

关键词: 工业大麻; 聚乳酸纤维; 吸声; 包装

中图分类号: TB484 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)03-0019-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.003

Wet Preparation and Sound Absorption of Industrial Hemp/Polylactic Acid Fiber Composites

MA Huanjia, XU Mingjian, YANG Qingfeng, LI Mingdong, ZHENG Yongjie*, ZHAO Hong*

(School of Light Industry and Textiles, Qiqihar University, Heilongjiang Qiqihar 161000, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare industrial hemp/polylactic acid fiber composites by wet method with industrial hemp fiber (PLA) and polylactic acid fiber (HF) as raw materials, and explore the mechanical properties and sound absorption properties of the composites. Industrial hemp fiber/polylactic acid fiber composites with different mass ratios (8 : 2, 7 : 3, 6 : 4, 5 : 5) were prepared by non-woven and hot pressing wet method. The structure and properties of the materials were tested to explore the effects of polylactic acid fiber on the mechanical properties and sound absorption properties of industrial hemp fiber. With the increase of the mass ratio of polylactic acid fiber, the mechanical properties of the material were gradually enhanced. Among them, the mass ratio of 5 : 5 resulted the best mechanical properties. The more polylactic acid fiber, the lower the sound absorption coefficient of the material, and the mass ratio of 8 : 2 resulted the best sound absorption property. Industrial hemp/polylactic acid fiber composites have good sound absorption and mechanical properties.

KEY WORDS: industrial hemp; polylactic acid fiber; sound absorption; packaging

近年来, 噪声污染已经严重危害人们的生活和健康^[1-2], 被称为世界环境四大污染之一。吸声材料作为降低噪声的有效手段, 在建筑、交通、工业等领域得到广泛应用^[3]。目前, 市面上应用的吸声材料主要有无机

和金属纤维材料、合成纤维和纳米纤维材料^[4], 其中玻璃纤维和矿棉使用最多, 其吸声和隔热性能优良, 但会对身体造成潜在的危害, 并会对环境造成危害, 因此开发低成本、无污染、健康且环保的吸声材料势在必行^[5]。

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 黑龙江省教育厅基本业务费(145309304)

*通信作者

工业大麻纤维(HF)是天然纤维的一种,其复合材料具有低密度、成本效益低等优点^[6],并具有良好的可用性和环保的生物降解性,在吸声领域应用广泛^[7]。Oldham等^[8]制备了大麻纤维复合材料,该复合材料中含有85%的大麻纤维,另有15%的再生聚酯作为黏合剂,结果发现大麻纤维复合材料的吸声性能优于芦苇材料。聚乳酸纤维(PLA)是由玉米、甜菜等可再生资源作为原料发酵制取乳酸、经过聚合进而纺丝成型制成纤维^[9],由于其生物降解性和可回收性^[10],因而成为高强度热塑性环保聚合物^[11]。聚乳酸纤维的使用显著节约了能源,并减少温室气体排放,这些因素对于环境可持续发展至关重要^[12]。Zhang等^[13]研究制备了具有吸声性能的废大麻/聚乳酸纤维复合材料,但未研究该复合材料的具体优化过程和吸声原理,为今后研究废大麻/聚乳酸纤维复合材料的吸声性能提供了可能^[14]。

本研究以工业大麻纤维为原料,添加可降解低熔点聚乳酸纤维,根据2种纤维的热力学性能得到湿法制备工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的最佳工艺条件,并采用热重分析法(Thermogravimetry Analysis, TG)、差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)、傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)、X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)等手段进行表征分析,测试其力学性能、吸声性能,考察了不同质量比例对材料吸声性能和力学性能的影响。此外,所采用的材料均为可降解材料,具有一定的经济效益和社会效益。聚乳酸和大麻纤维复合材料在环保和可持续性方面具有明显优势,对于满足包装工程行业逐渐增长的应用需求具有较大的潜力。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:工业大麻纤维,主体长度为20.8 mm,采自讷河青色草原现代农牧业发展有限责任公司;聚乳酸纤维,双组分短纤2D×51 mm,采自泉州斯马丁进出口贸易有限公司。

主要仪器:XB 220A电子天平,Precisa称重设备有限公司;GBJ-A纤维疏解器,长春市月明小型试验机有限责任公司;ZT6-00抄片器,中通试验装备有限责任公司;FB118-50梳理机,青岛尚佳义纺织机械有限公司;短切麻纤维重组吸声材料联合试验机,上海衡翼精密仪器有限公司;B5-2热压机,阿普莱斯电器有限公司;TM2101-T5拉力试验机,广东艾斯瑞仪器科技有限公司;JTZB驻波管吸声系数测试系统,北京世纪建通科技股份有限公司;Spotlight400傅里叶变换红外光谱仪,美国PE公司;SmartLab X射线衍射仪,上海仁特检测仪器有限公司;H-7650扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.2 工业大麻/聚乳酸纤维复合材料湿法制备

以工业大麻纤维和聚乳酸纤维为基础材料,首先将其短切后放入电子天平称量,然后将2种纤维混合,并利用纤维疏解器对混合物进行疏解,以确保均匀混合。接着将混合纤维转移至抄片器中分散均匀,并在湍流条件下形成片状结构。抄片完成后,自然阴干整理得到纤维毡。在阴干过程结束后,对该纤维毡喷洒水(用水量约占总质量的10%,以便于针刺工艺),然后进行针刺定型处理。最后,通过热压工艺制备出工业大麻/聚乳酸复合材料的成品。

在热压温度为135℃、热压时间为5 min、热压压强为0.65 MPa条件下使用热压机制备工业大麻/聚乳酸纤维复合材料,得到不同质量比(8:2、7:3、6:4、5:5)的复合材料。

1.3 性能测试

1) 力学性能分析。据GB/T 1040系列要求制备试样条。样品呈哑铃形,以确保在拉伸试验过程中应力分布均匀且符合标准规定。在拉力试验机上对样条进行拉伸试验,记录测得的数据,得到拉伸强度及断裂强度数据后进行分析。

2) 吸声性能分析。JTZB驻波管吸声系数测试系统基于驻波比法原理,符合GB/T 18696.1—2004《声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第1部分:驻波比法》及ISO 10534-1:1996《声学 阻抗管中吸声系数和比阻抗率的测量 第1部分:驻波比法》等相关规范。该系统主要由计算机发声与处理软件、频谱分析仪、扬声器、功率放大器和驻波管等组成。其工作流程如下:计算机发出声音→功率放大器增强信号→扬声器产生单频音→在驻波管内形成驻波→探头检测→通过拾音器收集数据→频谱分析仪进行数据处理并传输至计算机。

测试所用的驻波管是一个金属直筒,一端安装待测样品,另一端连接到计算机控制的扬声器。在测试过程中,由计算机的声卡输出音频信号,通过功率放大,在扬声器中生成单一频率的声音,这些声音在狭窄的管道内传播。当声音遇到样品时发生反射现象,由于反射波与入射波相位和方向相反,导致叠加效应,从而彼此干涉形成驻波,并在某个位置出现压力最大值(p_{\max})与最小值(p_{\min})情况,其间距约为1/4个波长。这2个极值可以用式(1)~(2)表达,而驻波比 n 及反射系数 r 则可通过式(3)~(4)进行计算。

$$P_{\max}=p_0(1+|r|) \quad (1)$$

$$P_{\min}=p_0(1-|r|) \quad (2)$$

$$n = \frac{|P_{\max}|}{|P_{\min}|} = \frac{1+|r|}{1-|r|} \quad (3)$$

$$|r| = \frac{n-1}{n+1} \quad (4)$$

根据吸声系数定义, 它与反射系数之间关系可以用式 (5) 表达。通常情况下, 频谱分析仪或噪声计所记录的是声压级, 而非实际声压 p , 根据两者关系可得出声压级差 ΔL , 计算见式 (6), 而吸声系数则依据式 (7) 进行推算。

$$a = 1 - |r|^2 \frac{4n}{(n+1)^2} \quad (5)$$

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min} = 20 \lg p_{\max} / \varphi_0 - 20 \lg p_{\min} / \varphi_0 = 10 \lg n \quad (6)$$

$$a = \frac{4 \times 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{\left(1 + 10^{\frac{\Delta L}{20}}\right)^2} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 结构表征分析

2.1.1 耐热性能分析

图 1 展示了不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 TG 和 DTG 曲线。从 TG 曲线观察到, 当聚

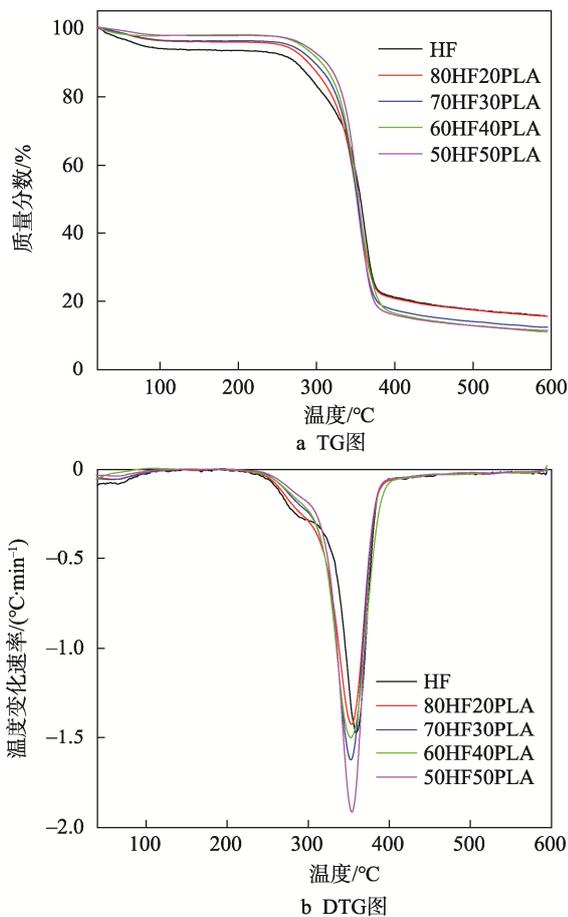


图 1 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 TG 和 DTG 曲线

Fig.1 TG and DTG curves of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

乳酸纤维含量增加时, 热分解温度逐渐升高, 使材料表现出更好的热稳定性。DTG 曲线显示, 随着聚乳酸比例提升, 第 1 个失重峰和第 2 个失重峰均向左移动, 同时 290.83 °C 处峰值有所降低, 这主要由工业大麻纤维含量变化引起。

不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的热重数据见表 1。从表 1 可知, 当聚乳酸和大麻混合时, 其最大分解温度低于单纯大麻样品; 在 600 °C 时, 混合样品的残留率低于单纯大麻的残留率, 并呈现依次降低的趋势, 表明复合样品具有良好的热稳定性。

表 1 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的热重数据

Tab.1 TG data of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

样品	最大分解温度/°C	样品残留率/%
HF	359.04	15.63
80HF20PLA	353.75	15.62
70HF30PLA	352.04	12.40
60HF40PLA	352.39	11.06
50HF50PLA	354.14	11.45

2.1.2 聚乳酸含量对复合材料物理性质的影响分析

图 2 为不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 DSC 曲线, 温度在 172 °C 处的峰值为复合材料皮芯结构聚乳酸芯层熔化的温度, 皮层熔化温度的对应峰在 DSC 曲线中已不显示, 可见皮层在 135 °C 时已完全融化, 且 172 °C 的峰值随着聚乳酸纤维的含量增加而增大。

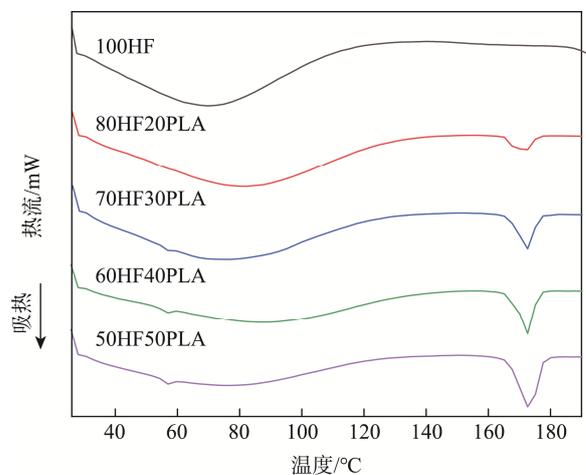


图 2 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 DSC 曲线

Fig.2 DSC plots of industrial hemp/polylactic acid composites with different mass ratios

表 2 为不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 DSC 数据, t_g 为玻璃化转变温度, t_m 为熔融峰温度, 玻璃化转变温度受到许多因素的影响, 如支链结构、空间效应、链柔性、交联、分子量和相互作用。从表 2 可知, 添加不同质量比 PLA 对材料玻璃化转变温度影响较小, 表明聚合物链段的作用相对较弱; 玻璃化转变表现为链段的松弛, 加入少量材料, 链段不会显著改变。

表 2 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 DSC 数据

Tab.2 DSC data of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

样品名称	$t_g/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$
80HF20PLA	55.2	173.4
70HF30PLA	56.9	172.6
60HF40PLA	56.6	173.9
50HF50PLA	56.7	173.6

2.1.3 纯物质及复合材料的 FTIR 分析

为了探究复合材料的化学键及其官能团结构, 采用 FTIR 对所制备不同质量比的工业大麻纤维聚乳酸纤维进行分析。

如图 3 所示, 3418 cm^{-1} 处的峰值与大麻纤维中的纤维素和半纤维素的—OH 基团伸缩振动有关, 而 2996 cm^{-1} 处则是 PLA 纤维中—CH₂ 的不对称伸缩振动峰。 2916 cm^{-1} 的峰源对应于木质素 C—O 键的伸缩振动; 1748 cm^{-1} 和 1636 cm^{-1} 这 2 处的峰分别对应于大麻纤维中木质素 C=O 的伸缩振动及 PLA 纤维酯键 C=O 的伸缩振动^[15]。 1463 cm^{-1} 和 1371 cm^{-1} 处为大麻纤维中纤维素与木质素弯曲振动所产生的信号, 其中 1371 cm^{-1} 处特指由半纤维素引起的弯曲震荡。此外, 1060 cm^{-1} 处也有 1 个峰^[16], 这主要是由于 PLA 中的酯键以及大麻中的 C—O 键(包括糖苷键、酚基及醚键)的伸缩运动造成。 898 cm^{-1} 处则反映了 β -葡萄糖苷键震荡。在工业大麻/聚乳酸复合材料中, 随着 PLA 含量增加, 3418 cm^{-1} 处的信号强度逐渐减弱; 而 1060 、 1748 、 2996 cm^{-1} 处的特征峰则随之增强。

当声音进入这些纤维时, 葡萄糖^[17]分子内碳原子与氧原子的运动会使相邻的大分子链段之间形成更多空间, 从而使声音传播路径变得复杂且蜿蜒。这种结构上的变化使声波在内部往返传播时被吸收并消耗掉。氢键的较强结合力, 使大分子链段无法自由移动。当声能作用于这些链条时, 会引发主链发生震荡, 并推动氢键及其他单一化学键旋转, 从而在不同分子链段之间产生更多的摩擦力, 使声能最终转化为热能或机械能。

2.1.4 物质结构分析

工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 XRD 图谱如图 4 所示, 其中主峰分别位于 14.8° 和 22.52° 处, 对应于纤维素晶体结构中的(101)面及(002)面, 是典型的纤维素 I 型^[18]。聚乳酸特征峰则出现在 16.4° 处^[19]。在复合材料中都能看到这 2 种纤维特征峰, 聚乳酸特征峰随聚乳酸添加量的增加而增大, 同时工业大麻特征峰减弱, 这表明复合材料制备成功。

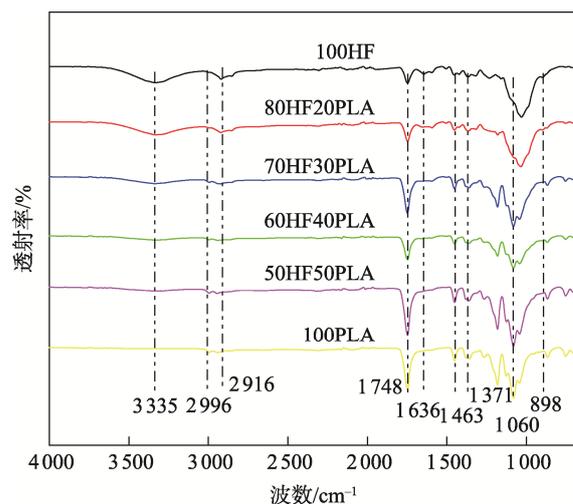


图 3 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 FT-IR 图谱

Fig.3 FT-IR profiles of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

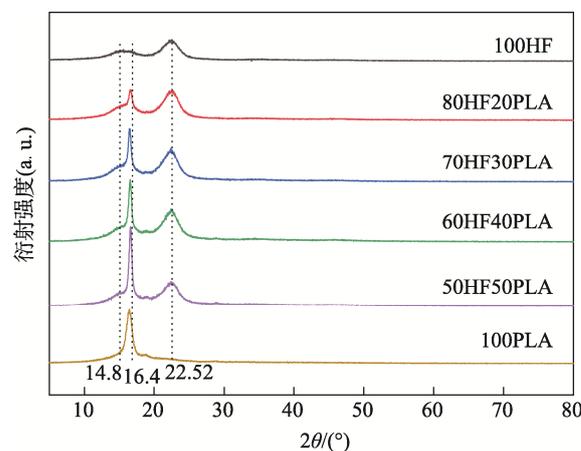


图 4 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的 XRD 图谱

Fig.4 XRD profiles of industrial hemp/polylactic acid composites with different mass ratios

2.1.5 SEM 分析

图 5 展示了不同质量比制备的工业大麻/聚乳酸复合材料 SEM 图像, 可见经过热压的复合材料呈现紧密排列, 有一定数量竖向排列的纤维。当声音进入这些复合材料时, 一部分被工业大麻内部吸收消耗, 另一部分透过这些纤维, 还有一部分因折射作用进入

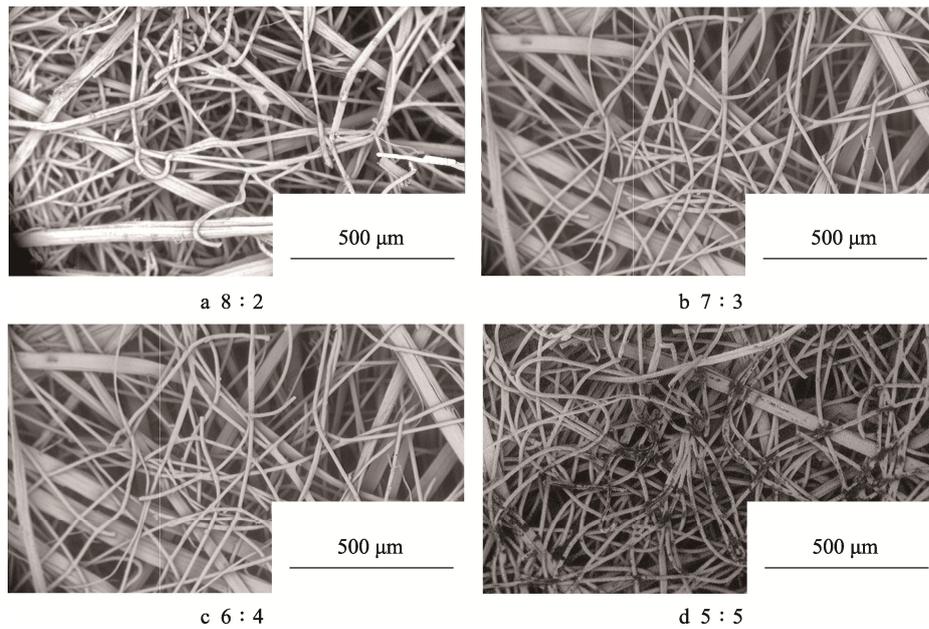


图 5 不同质量比工业大麻纤维/聚乳酸纤维复合材料 SEM 图
Fig.5 SEM image of hemp industrial fiber/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

其他的大麻纤维。此过程同样会消耗掉声音。随着聚乳酸质量比的增加, 在工业大麻之间传播声音减少, 从而影响了其吸声性能, 但同时也使复合材料整体结构更加紧凑, 提高了复合材料的力学性能。

2.2 力学性能分析

利用万能试验机对该复合材料进行力学性能评估, 结果见表 3。当聚乳酸含量逐步提高时, 该复合材料的拉伸强度及断裂强度都有明显提升, 这证明聚乳酸纤维含量直接影响其力学性能。

表 3 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

不同质量比复合材料	8 : 2	7 : 3	6 : 4	5 : 5
最大力/kgf	3.13	3.50	3.65	5.46
最大力点的变形/mm	3.93	6.88	7.30	4.87
断裂伸长率/%	29.13	37.61	35.99	30.59
拉伸强度/MPa	2.06	2.29	2.36	3.57
弹性模量/MPa	26.97	16.61	13.44	41.14
断裂力/kgf	1.65	1.82	1.66	2.86
弹性模量/MPa	26.97	16.61	13.44	41.14
断裂强度/MPa	1.05	1.20	1.09	1.86

注: 1 kgf=9.806 65 N

2.3 吸声性能分析

图 6 展示了不同质量比(8 : 2、7 : 3、6 : 4、5 : 5)工业大麻/聚乳酸复合材料的吸声能力。从图 6 可见,

所有复合材料的吸声系数均>0.2, 认定为有效吸声材料。在 200~2 000 Hz 范围内, 随着频率上升, 其对应的吸声系数逐渐增高, 并在 2 000 Hz 达到最高点。然而, 当聚乳酸比例增加时, 此指标略有下降, 这是因为聚乳酸在热压过程中软化, 与内部组织良好结合, 使此区间内的声波未绕过任何纤维, 从而增强了摩擦力并消耗了能量, 提高了整体吸声性能。在 2 000~4 000 Hz 范围内, 随着聚乳酸比例增长, 吸声系数缓慢下降, 在 5 : 5 质量比下最低降至 0.8, 但 2 500 Hz 之后又开始缓慢回升。在同一频率下, 当 PLA 质量分数为 20%时, 该复合材料展现最佳吸声性能。

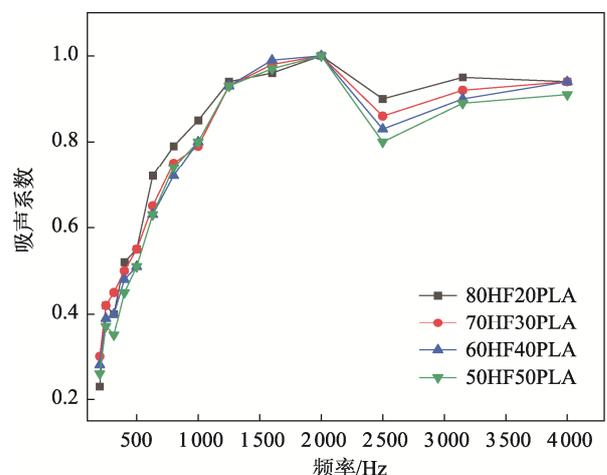


图 6 不同质量比工业大麻/聚乳酸纤维复合材料吸声性能

Fig.6 Sound absorption performance diagram of industrial hemp/polylactic acid fiber composites with different mass ratios

3 结语

本研究成功制备了工业大麻/聚乳酸纤维复合材料,并对其力学性能、吸声性能进行了测试。结果表明,随着工业大麻/聚乳酸纤维复合材料中聚乳酸纤维质量比的增加,材料力学性能逐渐增强。聚乳酸纤维越多,材料的吸声系数越低。该复合材料具有良好的吸声性能和力学性能,可应用于包装吸声领域。未来研究可进一步优化复合材料结构,提高其吸声性能,并探索其在其他领域的应用。

参考文献:

- [1] RASTEGAR N, ERSHAD-LANGROUDI A, PARSIMEHR H, et al. Sound-Absorbing Porous Materials: A Review on Polyurethane-Based Foams[J]. Iranian Polymer Journal, 2022, 31(1): 83-105.
- [2] BHINGARE NIRMALA H, PRAKASH S. Effect of Polyurethane Resin Addition on Acoustic Performance of Natural Coconut Coir Fiber[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(8): 2902-2913.
- [3] MARTÍNEZ B, BERNAT-MASO E, GIL L. Applications and Properties of Hemp Stalk-Based Insulating Biomaterials for Buildings: Review[J]. Materials (Basel), 2023, 16(8): 3245.
- [4] GAO J J, ZHU J, LUO J J, et al. Investigation of Microporous Composite Scaffolds Fabricated by Embedding Sacrificial Polyethylene Glycol Microspheres in Nanofibrous Membrane[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 20-29.
- [5] ZHU X D, WU Q L, WANG Q W, et al. Recent Advances in the Sound Insulation Properties of Bio-based Materials[J]. Bioresources, 2014, 9(1): 1764-1786.
- [6] JANG E S. Sound Absorbing Properties of Selected Green Material: A Review[J]. Forests, 2023, 14(7): 13-66.
- [7] ZIMNIEWSKA M. Hemp Fibre Properties and Processing Target Textile: A Review[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2022, 15(5): 1901.
- [8] OLDHAM D J, EGAN C A, COOKSON R D. Sustainable Acoustic Absorbers from the Biomass[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(6): 350-363.
- [9] 王心蕊, 马晓彤, 韩鑫宇, 等. 不同水滑石含量聚乳酸抗菌膜的性能研究[J]. 包装工程, 2021, 42(11): 131-136. WANG X R, MA X T, HAN X Y, et al. Preparation and Properties of Antibacterial ZnAl-PHBA-LDH Poly(lactic Acid) Composite Films[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(11): 131-136.
- [10] 詹伟招, 罗文翰, 刘庭源, 等. 天然纤维素增强聚乳酸复合材料性能研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 113-121. ZHAN W Z, LUO W H, LIU T Y, et al. Progress on Properties of Natural Cellulose Reinforced Polylactide Composites[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 113-121.
- [11] SIVARAJ R. Novel Techniques for Enhancing Performance of Genetic Algorithms[J]. AI Communications, 2015, 29(4): 545-546.
- [12] RAJESHKUMAR G, SESHADRI S A, DEVNANI G L, et al. Environment Friendly, Renewable and Sustainable Poly Lactic Acid (PLA) Based Natural Fiber Reinforced Composites: A Comprehensive Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310(10): 127483.
- [13] ZHANG D D, ZHOU X H, GAO Y, et al. Structural Characteristics and Sound Absorption Properties of Waste Hemp Fiber[J]. Coatings, 2022, 12(12): 1907.
- [14] ADESINA I, BHOWMIK A, SHARMA H, et al. A Review on the Current State of Knowledge of Growing Conditions, Agronomic Soil Health Practices and Utilities of Hemp in the United States[J]. Agriculture, 2020, 10(4): 129.
- [15] 杨新钰, 王甲超, 刘慧, 等. 聚乳酸/聚氨酯复合材料的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 152-158. YANG X Y, WANG J C, LIU H, et al. Preparation and Properties of PLA/TPU Composites[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 152-158.
- [16] MOAZZEN N, KHANMOHAMMADI M, GAMARUDI A B, et al. Optimization and Infrared Spectrometric Evaluation of the Mechanical Properties of PLA-Based Biocomposites[J]. Journal of Macromolecular Science Part a-Pure and Applied Chemistry, 2019, 56(1): 17-25.
- [17] GUAN M J, ZHANG Z W, YONG C, et al. Interface Compatibility and Mechanisms of Improved Mechanical Performance of Starch/Poly(Lactic Acid) Blend Reinforced by Bamboo Shoot Shell Fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(35): 47899.
- [18] SENTHAMARAIKANNAN P, KATHIRESAN M. Characterization of Raw and Alkali Treated New Natural Cellulosic Fiber from *Coccinia Grandis* L[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 186: 332-343.
- [19] 陈康, 廖承钢, 徐斌, 等. 纳米二氧化钛含量对秸秆/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 34-39. CHEN K, LIAO C G, XU B, et al. Effects of Nano Titanium Dioxide Content on Properties of Straw/Poly(lactic Acid) Composites[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 34-39.