

汉麻秆芯隔热保温包装复合材料的制备及性能研究

杨青峰^{1a}, 赵红^{1a,1b*}, 马涣佳^{1a}, 张括^{1a}, 李明东^{1a}, 周天², 郑永杰^{1a,1b}

(1. 齐齐哈尔大学 a. 轻工与纺织学院 b. 寒区麻及制品教育部工程研究中心, 黑龙江齐齐哈尔 161006; 2. 济宁职业技术学院, 山东 济宁 272000)

摘要: **目的** 为提高汉麻秆芯的利用率, 减少生物质废弃物对环境造成的污染, 以汉麻秆芯为原材料, 玻化微珠复配做保温填充物, 水泥充当胶凝剂, 制备一种环保抗压的包装保温材料。**方法** 分析汉麻秆芯和玻化微珠的不同复配掺量, 对复合材料保温性能、抗压性能、吸水性能和干密度的影响, 在最优配比下对比未掺入秆芯的复合材料。**结果** 保温性能提高 60.6%, 干密度降低 52%, 吸水率提高 18.4%, 同时满足抗压强度等级 MU3.5。在此最优配比基础上用不同浓度的 NaOH 溶液对汉麻秆芯进行处理, 并分析微观结构的 SEM 图。用 NaOH 质量分数为 4% 的溶液处理汉麻秆芯, 掺入质量分数为 20% 的汉麻秆芯与 7% 的玻化微珠复配, 抗压能力提升至 5.9 MPa, 导热系数下降至 0.124 3 W/(m·K), 在满足抗压的基础上保温性能最优。**结论** 汉麻复合材料可为包装防护提供一种新型生物质保温填充材料。

关键词: 汉麻秆芯; 包装填充材料; 轻质保温; 抗压

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0025-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.004

Preparation and Properties of Composite Materials for Heat Insulation Packaging of Hemp Stalk Core

YANG Qingfeng^{1a}, ZHAO Hong^{1a,1b*}, MA Huanjia^{1a}, ZHANG Kuo^{1a},
LI Mingdong^{1a}, ZHOU Tian², ZHENG Yongjie^{1a,1b}

(1. a. College of Light Industry and Textile, b. Engineering Research Center for Hemp and Product in Cold Region of Ministry of Education, Qiqihar University, Heilongjiang Qiqihar 161006, China;

2. Jining Polytechnic, Shandong Jining 272000, China)

ABSTRACT: To increase the utilization of hemp stalk core and reduce the environmental pollution caused by biomass waste, the work aims to use hemp stalk core as a raw material, vitrified microbeads as insulation fillers and cement as binders, to develop an eco-friendly and compressive packaging insulation material. The effects of various ratios of hemp stalk core and vitrified microbeads on the insulation performance, compressive strength, water absorption, and dry density of the composite material were analyzed. The composite materials without hemp stalk core were compared at the optimal ratio. The insulation performance increased by 60.6%, the dry density decreased by 52%, and the water absorption increased by 18.4%, meeting the compressive strength grade of MU3.5. Based on this optimal ratio, the hemp stalk core was treated with NaOH solutions of different concentrations, and the SEM images of microstructure were analyzed. After treatment with a mass fraction 4% NaOH solution, combined with 20% hemp stalk core and 7% vitrified microbeads, the compressive strength increased to 5.9 MPa, and the thermal conductivity decreased to 0.124 3 W/(m·K), achieving optimal insulation performance while maintaining compressive strength. Hemp composite materials can provide a

收稿日期: 2024-10-19

基金项目: 黑龙江省教育厅基本业务费 (145309304)

*通信作者

new biomass insulation filler for protective packaging.

KEY WORDS: hemp stalk core; packaging filler; light-weight heat preservation; pressure resistance

秸秆是农作物生产的副产品,产量巨大。若处理不当,焚烧或堆积秸秆会造成严重的环境污染问题。包括秸秆在内的生物质废弃物^[1]的利用不仅能有效缓解农业废弃物的处理问题,还能为新型复合材料^[2-3]的制备提供方向,从而减少天然资源的消耗。汉麻秸秆包括外部的韧皮纤维和内部的秆芯,其韧皮纤维经脱胶等一系列加工处理可用于纺织,而内部的秆芯常不能合理利用,但用汉麻秆芯制备轻质保温的低成本填充包装材料成为重要探索方向。

Viel等^[4]研究汉麻秸秆的胶合性能并确定胶合参数,通过胶黏剂与汉麻秸秆的界面结合情况,分析复合材料的力学、热学、吸音性能,制备的复合材料可应用于包装、建筑等领域。梁尔珊等^[5]通过对木薯秸秆粉进行改性,研究不同粒径和含量的木薯粉对材料性能的影响,制备的板材提高了废弃物的利用率。赵红等^[6]分别对汉麻秆芯和玉米秸秆进行发泡实验,随着填充物和填充比例的不同,发泡体的缓冲性能和回弹率各不相同,但高效利用了生物质废弃物,并制备出可降解的发泡填充材料。鲍圆圆等利用发泡技术^[7],对秆芯改性^[8]实现缓冲包装。这种材料具有较好的力学强度和缓冲性能,常用于替代不可降解的塑料包装材料,主要替代聚苯乙烯泡沫。在包装过程中泡沫的抗拉压性能不如木质板材^[9]表现优越,但木质板材的保温性能^[10-12]较差。为了减少泡沫作为填充材料,可用汉麻秆芯复合材料代替泡沫作填充,从而提升包装材料整体的抗压性能^[13-14]和保温效果。

本研究提出以汉麻秆芯^[15]作为主要原材料,加入玻化微珠^[16]以增强保温性能,使用少量水泥作为胶凝剂,并添加聚乙烯醇纤维以增强复合材料的连接强度。该汉麻秆芯水泥复合材料可作为泡沫材料的替代方案,在木质板材包装材料中作为填充物,成为一种新型环保材料,满足力学性能^[17],并具有良好的保温性能^[18-21],特别适合替代传统的塑料和纸质材料。该复合材料以其低成本、高资源利用率等特性,可带动社会的低碳环保发展。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料:汉麻秆芯,粒径为10~20目,江西恩达麻世纪股份有限公司;玻化微珠(闭孔珍珠岩),直径为0.5~1.0 mm,河北隆盛保温建材;聚乙烯醇纤维,长度为5~8 mm,安徽皖维高新材料股份有限公司;普通硅酸盐水泥,规格PO42.5,广州市双虹建材有限公司;粉煤灰,I级,河南安州亿化工公司;NaOH,

天津市凯通化学试剂有限公司。

仪器:Precisa XB 220A型电子天平,瑞士普利赛斯公司;尚得力搅拌机,江阴市尚得力机械有限公司;微机控制电液伺服压力试验机YAW-2000型,济南思达测试技术有限公司;快速导热系数测定仪,天津英贝尔科技发展有限公司;Phenom pure,复纳科学仪器上海有限公司;电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 汉麻秆芯复合材料制备

将汉麻秆芯粉碎,秆芯粒径可通过10目(2 mm)筛,不能通过20目(0.85 mm)筛,其长度约为5 mm,留下备用。称取水泥2 000 g、粉煤灰200 g,导入搅拌机内。再根据汉麻秆芯占水泥质量的百分比,按每组试验要求称取玻化微珠、聚乙烯醇的质量,将上述复合材料干混搅拌均匀。由于汉麻秆芯掺量不同,每组用水量各不同,前期通过小样实验确定水灰比,1~4组的水灰比分别为:0.44、0.65、0.8、0.1。按比例取实验用水倒入搅拌机充分搅拌60 s,为确保试样的密实性,减少空隙率,将搅拌后的浆料分3次倒入模具。当地9月份气温为(20±5)℃,相对湿度为(80±10)%,养护24 h后脱模,自然养护28 d,完成汉麻水泥复合材料的制备,具体制备流程如图1所示。

1.3 材料性能测试

导热性能:根据GB/T 10297—2015《非金属固体材料导热系数的测定 热线法》,用快速导热系数测定仪测量导热系数。试件导热系数的计算见式(1)~(2)。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi\Delta\theta(r,t)} \ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{P}{4\pi L} \times \frac{1}{A} \quad (1)$$

$$A = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(t_2/t_1)} \quad (2)$$

式中: λ 为导热系数,W/(m·K); A 为 θ - $\ln t$ 线性曲线的斜率,K/s; P 为线段加热功率,W; θ 为热线温度,K; t 为对应温度的加热时间,s; L 为线段长度,m。

吸水率与干密度:在试样养护28 d后,分别称取每组试样的质量,记为 m_0 ;将每组的2块试样放入烘干箱,温度调至65℃连续烘干到复合材料恒质量为止,称取质量记为 m_1 ;再将每组剩余2块试样放入容积为3 000 mL的烧杯中,加水没过试样20~30 mm,24 h后将试样捞出,待试样不再凝聚成水滴,称其质量记为 m_2 。含水率和吸水率的计算见式(3)~(4)。

$$W_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

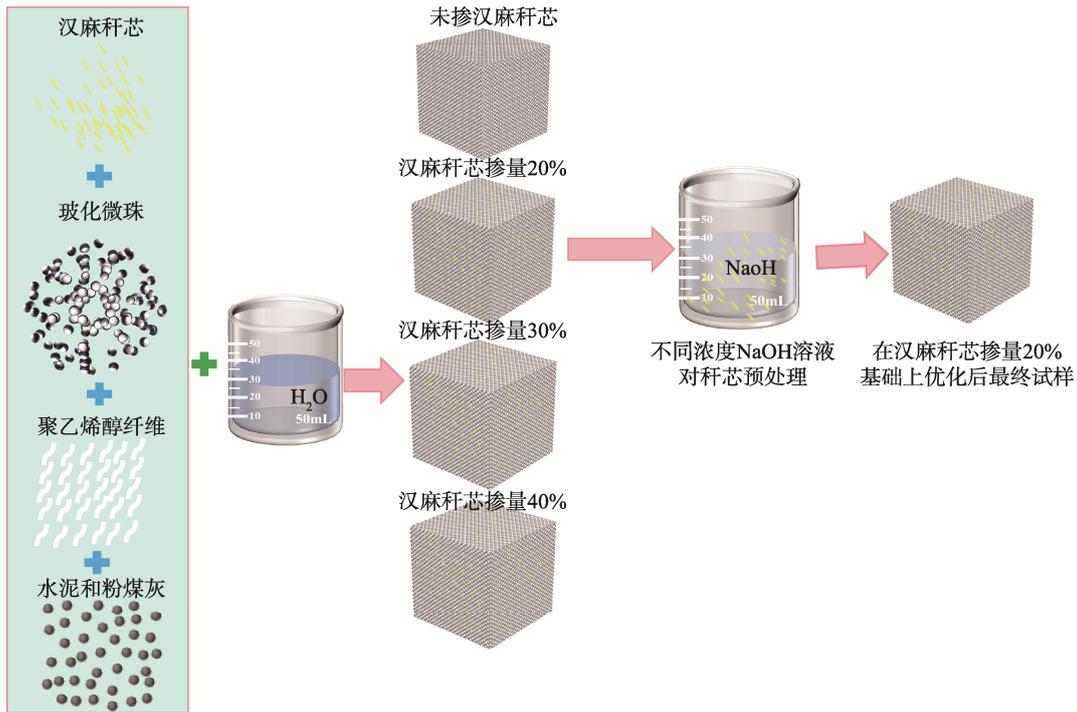


图 1 汉麻复合材料制备流程

Fig.1 Flow chart of preparation of composite materials for hemp

$$W_2 = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_1 为含水率, %; m_0 为养护 28 d 后的质量; m_1 为烘干恒质量; W_2 为吸水率, %; m_2 为浸水 24 h 后的质量。

湿密度 ρ (g/cm^3)、干密度 D (g/cm^3) 的计算见式 (5) ~ (6)。

$$\rho = \frac{m_0}{v} \times 100\% \quad (5)$$

$$D = \frac{\rho}{(1+W_1)} \quad (6)$$

采用 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》, 以及 YAW-2000 微机控制电液伺服压力试验机进行抗压性能检测, 对于 100 mm×100 mm×100 mm 的非标准试块, 抗压强度取 0.95 进行计算, 见式 (7)。

$$f_c = \frac{p}{A} \quad (7)$$

式中: f_c 为试件抗压强度, MPa; p 为立方体所受压力, N; A 为立方体截面面积, mm^2 。

2 结果与分析

2.1 保温性能

本研究所用汉麻秆芯复合材料, 按照表 1 配方制备。从图 2 可知, 随着汉麻秆芯掺量的增加, 复合材料的导热系数逐渐降低。当汉麻秆芯掺量相同时, 导

热系数会随玻化微珠掺量的增加而降低。在汉麻秆芯掺量为 30% 时, 导热系数最低为 0.118 97 W/(m·K)。当秆芯掺量为 40% 时, 导热系数升到 0.137 7 W/(m·K), 这是因为过多的汉麻秆芯掺量会导致复合材料结构松散, 空隙率增多, 保温效果变差。这说明并非汉麻秆芯越多, 复合材料保温性能越好, 同时当汉麻秆芯掺量 > 30% 时, 随着玻化微珠掺量的增加, 复合材料保温性能不再明显增强。综上, 选择玻化微珠掺量为 7% 的配方增强复合材料保温性能。

2.2 吸水性能

由图 3 可以看出, 随着汉麻秆芯掺量的增加, 复合材料吸水率逐渐上升。未掺入汉麻秆芯和汉麻秆芯掺量为 30% 时, 随着玻化微珠掺量的增加, 吸水率逐渐上升。未掺入汉麻秆芯的复合材料, 玻化微珠掺量为 7% 时对比未掺入玻化微珠, 吸水率上升 42.7%。汉麻秆芯为 30% 时, 当玻化微珠掺量为 7% 时, 对比未掺入玻化微珠, 吸水率上升 60%。说明复合材料具有良好的吸湿性能, 可为包装材料提供一种相对干燥的储存环境。

2.3 抗压性能

由图 4 可知, 随着汉麻秆芯掺量的增加, 抗压强度降低, 同时在汉麻秆芯掺量一定的条件下, 随着玻化微珠掺量增加, 抗压强度逐渐降低。当秆芯掺量为 20% 时, 平均抗压强度为 4.65 MPa。当秆芯掺量为 30% 时, 平均抗压强度为 1.53 MPa, 因此在满足复合材料具有一定抗压能力的基础上, 汉麻秆芯掺量选择 20%。

表 1 汉麻秆芯复合材料配方
Tab.1 Formulation of composite materials for hemp stalk core

| 编号 | 汉麻秆芯质量分数/% | 玻化微珠质量分数/% | 聚乙烯醇纤维质量分数/% | 粉煤灰质量分数/% | 水灰比 (m_w/m_c) |
|----|------------|------------|--------------|-----------|-------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0.44 |
| 2 | 0 | 3 | 0.4 | 10 | 0.44 |
| 3 | 0 | 5 | 0.8 | 10 | 0.44 |
| 4 | 0 | 7 | 1.2 | 10 | 0.44 |
| 5 | 20 | 0 | 0.4 | 10 | 0.65 |
| 6 | 20 | 3 | 0 | 10 | 0.65 |
| 7 | 20 | 5 | 1.2 | 10 | 0.65 |
| 8 | 20 | 7 | 0.8 | 10 | 0.65 |
| 9 | 30 | 0 | 0.8 | 10 | 0.80 |
| 10 | 30 | 3 | 1.2 | 10 | 0.80 |
| 11 | 30 | 5 | 0 | 10 | 0.80 |
| 12 | 30 | 7 | 0.4 | 10 | 0.80 |
| 13 | 40 | 0 | 1.2 | 10 | 1.10 |
| 14 | 40 | 3 | 0.8 | 10 | 1.10 |
| 15 | 40 | 5 | 0.4 | 10 | 0.44 |
| 16 | 40 | 7 | 0 | 10 | 0.44 |

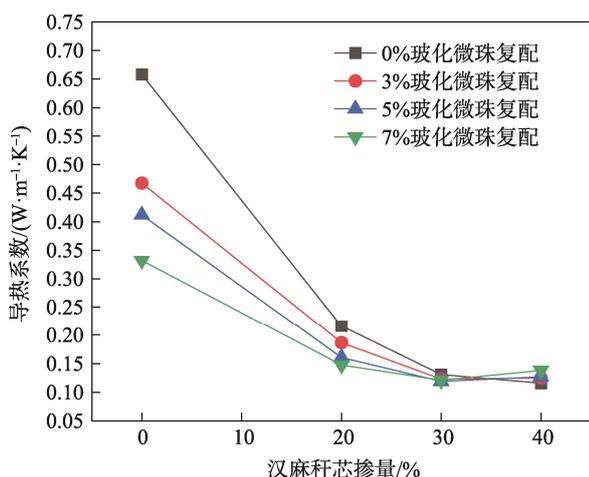


图 2 复合材料导热系数
Fig.2 Thermal conductivity of composite materials

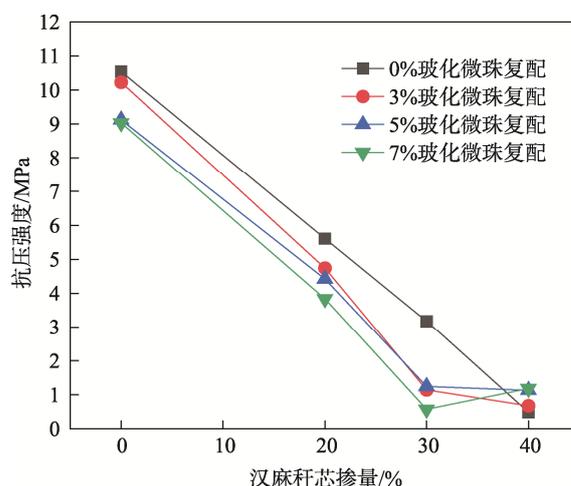


图 4 复合材料抗压强度
Fig.4 Compressive strength of the composite materials

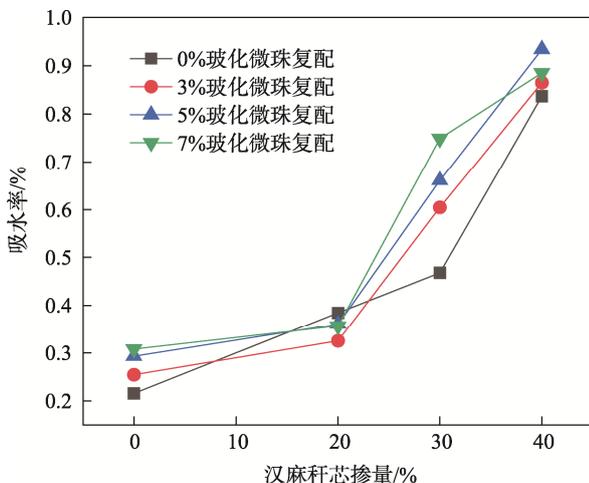


图 3 复合材料吸水性能
Fig.3 Water absorption properties of composite materials

2.4 材料干密度

由图 5 可知,随着汉麻秆芯掺量的增加,复合材料干密度降低,材料质量逐渐减轻。当汉麻秆芯掺量为 20%时,干密度平均为 0.85 g/cm³,比未掺入汉麻秆芯时降低 36.56%。在汉麻秆芯掺量不变时,玻化微珠掺量越多,复合材料干密度越低。复合材料干密度与导热系数接近正相关的关系,与吸水率呈负相关。这说明玻化微珠的掺入可降低材料密度,更利于制备一种质轻保温的包装材料。

2.5 复合材料 FT-IR 分析

图 6 表明,掺入汉麻秆后的复合材料会影响水泥发生水化反应,汉麻秆芯中木质素的红外光谱特征包括在 1 595 cm⁻¹(芳香骨架振动)和 1 505 cm⁻¹(C=C

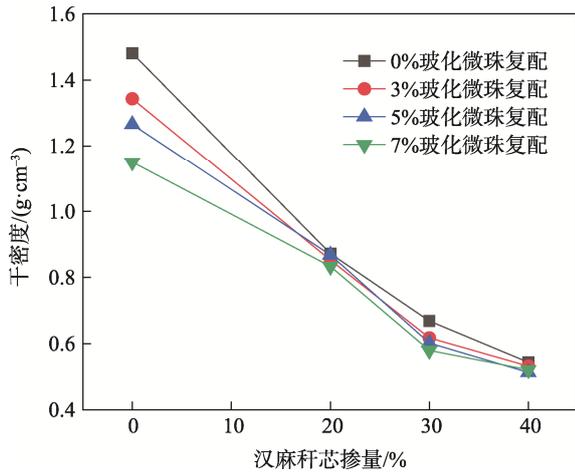


图 5 复合材料干密度
Fig.5 Dry density of composite materials

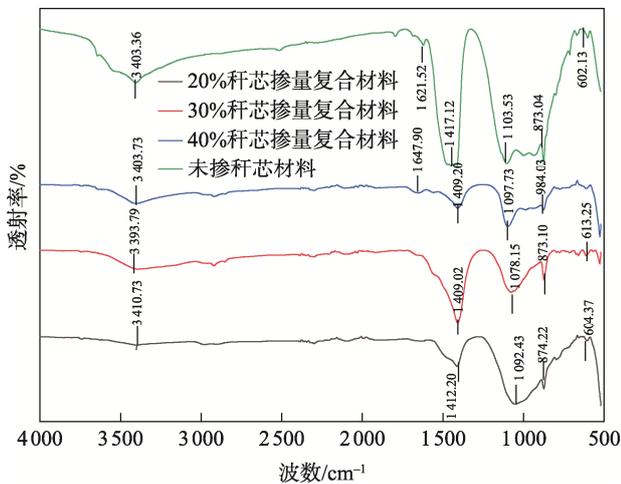


图 6 不同汉麻秆芯比例的 FTIR 图
Fig.6 FTIR plots of different ratios of hemp stalk cores

振动)的吸收峰。此外,木质素还会在 $1\ 215\ \text{cm}^{-1}$ (C—O—C 伸缩振动)和 $1\ 030\ \text{cm}^{-1}$ (羟基振动)处表现出特征峰。C—O 和其他有机官能团在 $1\ 000\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 区域,秆芯水泥复合材料中出现了更明显的峰,这是由秸秆中木质素、纤维素和半纤维素的有机官能团引起的。 CaCO_3 在 $1\ 410\ \text{cm}^{-1}$ 附近,对应于 CO_3^{2-} 的不对称伸缩振动;另一个位于 $870\ \text{cm}^{-1}$,对应于 CO_3^{2-} 的弯曲振动。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的特征吸收峰位于 $3\ 642\ \text{cm}^{-1}$,对应于 OH 离子的伸缩振动,是水泥水化反应的产物之一。对比掺入汉麻秆芯的复合材料,表明掺入秆芯影响复合材料水化状态,从微观角度解释了复合材料随汉麻秆芯掺量增加而抗压能力降低的原因。

2.6 实验优化

根据以上分析可知,汉麻秆芯掺量是复合材料性能的主要影响因素。不同秆芯配比下的复合材料如图 7 所示。秆芯掺量从 20% 增长到 30% 时,抗压强度

平均值从 $4.58\ \text{MPa}$ 降到 $1.53\ \text{MPa}$,强度下降了 66.6%;导热系数平均值由 $0.178\ 7\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 下降到 $0.123\ 3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,降幅为 31%,随着玻化微珠复配聚乙烯醇纤维的增加,复合材料保温性能逐渐提升。为满足基础抗压要求,汉麻秆芯掺量选择 20%;同时为提升复合材料保温性能,用 7% 掺量的玻化微珠复配。



图 7 不同秆芯配比下的复合材料
Fig.7 Composite materials at different stalk core ratios

2.6.1 汉麻秆芯预处理

为了更好地优化实验设计,改善有机秆芯与无机水泥和玻化微珠复配的界面结合强度,提高复合材料的抗压性能和保温性能,对汉麻秆芯进行改性处理,选择不同质量分数的 NaOH 溶液,分别为 2%、3%、4%、5%、6%,浸泡 24 h 后将秆芯反复清洗,直到 pH 值为 7~8,尽可能使材料呈现中性,烧杯内的固液质量比约为 1:9。过滤掉多余的水分,在干燥箱内烘干至质量恒定。设置水泥质量 2 000 g、汉麻秆芯质量分数为 20%,玻化微珠为 7% 复配,粉煤灰为 10%,水灰比为 0.65。研究不同质量分数的 NaOH 溶液(2%、3%、4%、5%、6%)对复合材料性能的影响,24 h 后脱模,养护 28 d 后对试样进行检测。

从图 8 可见,随着溶液 NaOH 质量分数的增加,复合材料的抗压强度先升高后下降,导热性能则是先降低后升高,当 NaOH 溶液质量分数为 4% 时,抗压强度达最大为 $5.81\ \text{MPa}$,上升 6.4%;导热系数为 $0.124\ 2\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,下降 0.4%。整体观察,复合材料导热性能的变化幅度并不大,因为该实验都是在上述最优实验配比的基础上进行的,影响复合材料导热性能的最重要因素为汉麻秆芯的掺量,此实验汉麻秆芯的掺量都为 20%。经不同质量分数的 NaOH 溶液处理的汉麻秆芯复合材料,比未处理汉麻秆芯的复合材料抗压性能强,这是因为 NaOH 溶液对汉麻秆芯表皮有影响。处理后的秆芯表面比未处理的表面更粗糙,增加了复合材料的接触面积,同时水泥对汉麻秆芯的包裹能力会增强,进而提高了材料之间的凝聚力,使其抗压强度得到提升。

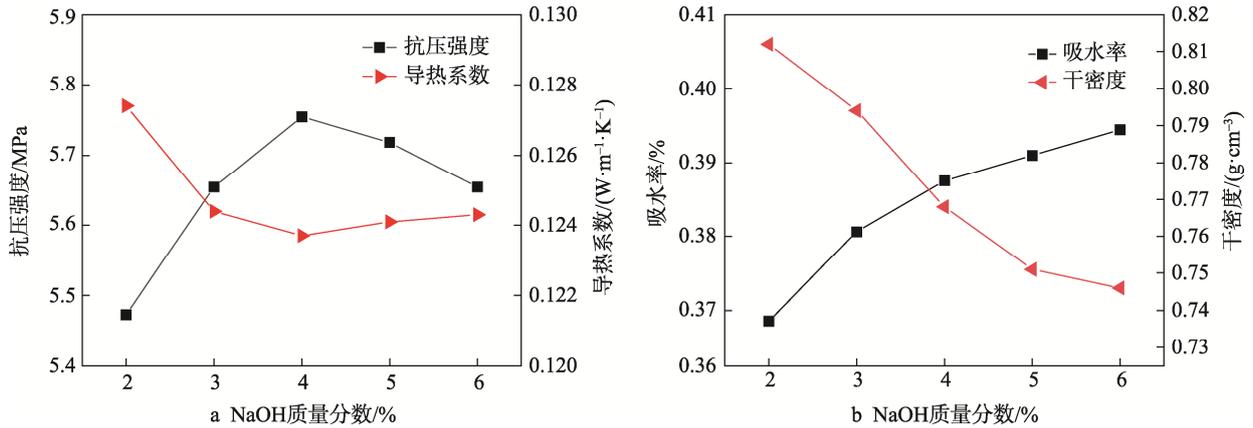


图 8 不同浓度 NaOH 溶液处理秆芯后复合材料的抗压性能与导热性能
 Fig.8 Compressive and thermal conductivity properties of composite materials treated with different concentrations of NaOH solution

从图 8 可观察到，随着 NaOH 溶液浓度的增加，吸水率上升，干密度下降。溶液浓度的增加可提高秆芯外表皮的粗糙程度，增加接触面积，甚至破坏外表皮。在 NaOH 溶液质量分数为 4% 时出现拐点，吸水率为 0.38%，干密度为 0.77 g/cm³。当溶液质量分数为 6% 时，秆芯外皮受损严重，微观结构中可清晰观察到木质部中的导管，影响纤维整体的吸水性能，因此升幅降低。

2.6.2 复合材料的微观结构分析

为了观察 NaOH 溶液处理后汉麻秆芯表面的变化情况，用飞纳扫描电子显微镜对不同溶液浓度下的汉麻秆芯复合材料的形貌进行观察，并进行分析。

从图 9 可观察到，随着 NaOH 溶液浓度的增加，对秆芯表皮处理程度逐渐增大，图 9a 是未处理的工业大麻秆芯，表皮未被破坏、裂纹少，相对光滑。如图 9b 所示，经过 2%NaOH 溶液的处理，表皮出现开裂现象，但裂缝没有图 9c 明显，4%NaOH 溶液处理后的秆芯已经脱落了大量的纤维外表皮，纤维束排列明显。如图 9d 所示，秆芯表皮层下导管清晰，可观察到纤维束之间连接的缝隙，秆芯破损严重。NaOH 溶液浓度越高，秆芯表面越粗糙。图 10a 是未经 NaOH 溶液处理的秆芯复合材料，可观察到有很少水泥附着在秆芯表面，并且水泥与秆芯连接不牢固，中间有缝隙。图 10b 是 2%NaOH 溶液处理后的秆芯复合材料，可看出表面附

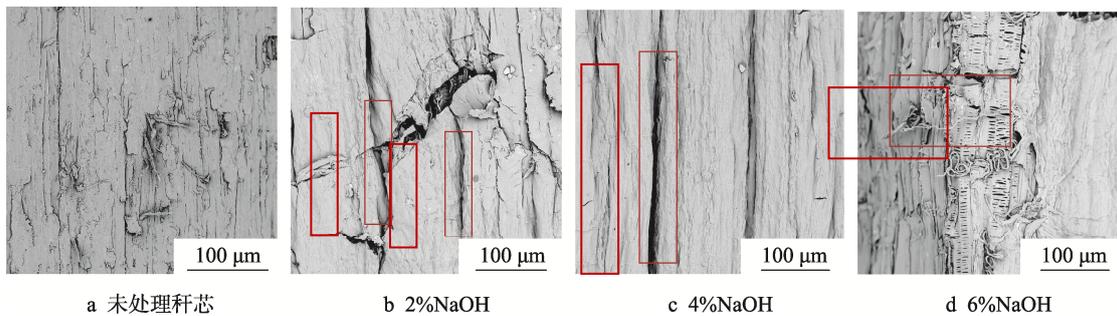


图 9 不同浓度 NaOH 溶液处理秆芯 SEM 图
 Fig.9 Microstructure of the stalk core treated with different concentrations of NaOH solution

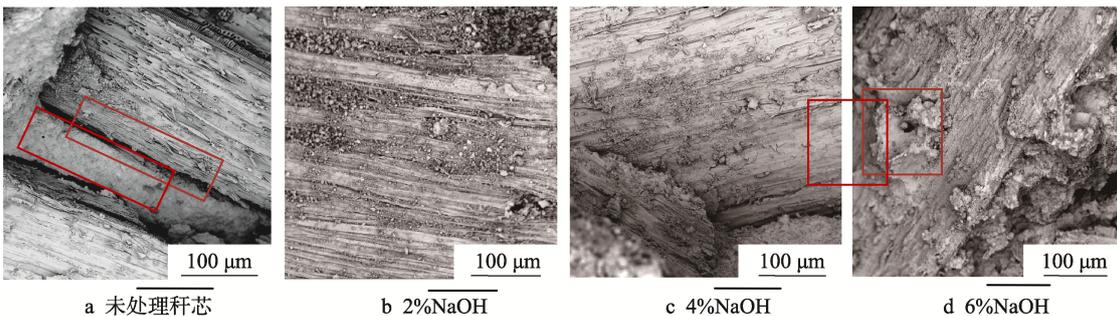


图 10 不同 NaOH 溶液处理后复合材料 SEM 图
 Fig.10 SEM images of composite materials treated with different concentrations of NaOH solution

着部分水泥,且随着 NaOH 溶液浓度的增加,秆芯与水泥的结合量增多。如图 10c 所示,水泥包裹秆芯密实且均匀,有利于提高复合材料的抗压性能。如图 10d 所示,秆芯表面也与水泥密实结合,但秆芯整体破坏严重,导致其与水泥结合不均匀,从而降低抗压性能。

2.6.3 复合材料 XRD 分析

溶液处理前后的汉麻秆芯 XRD 图如图 11 所示,主峰出现在 22° 附近 (2θ),在未经处理的汉麻秆芯中可看出 22.5° 处的主峰强度相对较高,表明未经处理的样品中纤维素结晶区较多,结晶度较高。经 4% NaOH 处理的汉麻秆芯,同一位置的峰强度有所减弱,且峰变得更宽,表明碱处理后纤维素的结晶度降低。未经处理的秆芯在低角度区域 15° 左右有一个宽而低的峰,这是典型的无定形区的表现,代表纤维素、半纤维素和木质素的无定形成分。NaOH 处理后的秆芯,低角度区域的无定形峰明显减弱,表明部分无定形的半纤维素和木质素被 NaOH 溶解和去除,使无定形区减少。4% NaOH 浓度较低,不足以去除秆芯中所有的木质素、半纤维素和其他非纤维成分,可有效提升秆芯界面的结合能力。但从 SEM 中观察到 6%NaOH 溶液会破坏秆芯内部结构,降低复合材料的性能。

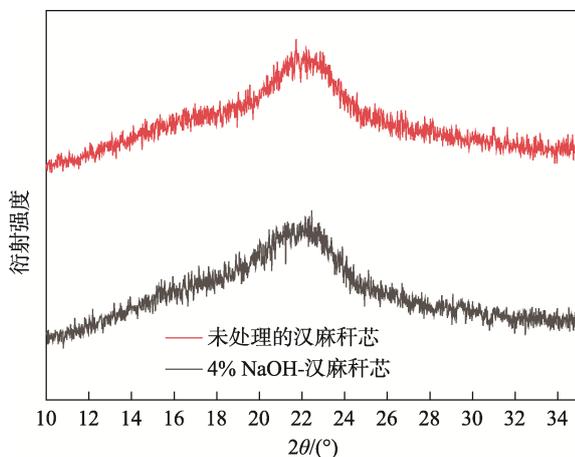


图 11 溶液处理前后的汉麻秆芯 XRD 图
Fig.11 XRD patterns of hemp stalk cores before and after solution treatment

3 结论

研究不同质量比的工业大麻秆芯与玻化微珠复配,对复合材料的保温性能、抗压性能、干密度和吸水率的影响,同时对工业大麻秆芯进行改性处理,得出不同浓度的 NaOH 溶液对复合材料界面结合程度和性能的影响。

1) 随着汉麻秆芯掺量的增加,材料保温性能和吸水率上升,干密度下降。在满足基本抗压强度等级

MU3.5 的条件下,选择保温效果最好的材料配比。当 20%汉麻秆芯掺量和 7%玻化微珠复配时,复合材料表现出综合性能最佳的保温效果和抗压能力,同时从微观角度运用 FT-IR 分析汉麻秆芯掺量增加对水泥发生水化反应的影响,从而影响复合材料的抗压性能。

2) 在最优配比条件下,汉麻秆芯用不同浓度的 NaOH 溶液预处理,随着 NaOH 溶液的升高,抗压强度先增加后下降。当以质量分数为 4%NaOH 溶液处理时,复合材料的抗压性能和保温性能得到提升,抗压性能达到 5.9 MPa,导热系数下降为 $0.1243 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;从 XRD 图看出同一位置的峰强度有所减弱,且峰变得更宽,表明碱处理后纤维素的结晶度降低。从 SEM 可观察到随着 NaOH 溶液浓度的增加,秆芯表面越粗糙,与水泥结合面积增加越多,当 NaOH 溶液质量分数为 6%时,秆芯受损严重,复合材料的性能下降。

3) 优化后的实验方案可为包装运输提供一种同时具有抗压和保温功能的汉麻秆芯复合材料,符合实际应用需求。这为满足低碳环保的包装材料需求提供了一种可行的解决方案,在未来探究复合材料的保温与界面改性方向有更大发展空间。

参考文献:

- [1] PHIRI R, RANGAPPA S M, SIENGCHIN S, et al. Development of Sustainable Biopolymer-Based Composites for Lightweight Applications from Agricultural Waste Biomass: A Review[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, 6(4): 436-450.
- [2] BHARDWAJ A, ALAM T, SHARMA V, et al. Lignocellulosic Agricultural Biomass as a Biodegradable and Eco-Friendly Alternative for Polymer-Based Food Packaging[J]. *Journal of Packaging Technology and Research*, 2020, 4(2): 205-216.
- [3] SEN K Y, BAIDURAH S. Renewable Biomass Feedstocks for Production of Sustainable Biodegradable Polymer[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, 27: 100412.
- [4] VIEL M, COLLET F, PRÉTOT S, et al. Hemp-Straw Composites: Gluing Study and Multi-Physical Characterizations[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(8): E1199.
- [5] 梁尔珊, 郭双薇, 赖文苑, 等. 木薯秸秆/高密度聚乙烯复合材料的制备与性能研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(5): 8-15.
- [6] LIANG E S, GUO S W, LAI W Y, et al. Preparation and Properties of Cassava Straw/High Density Polyethylene Composites[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(5): 8-15.
- [6] 赵红, 郑永杰, 谭斌, 等. 汉麻秆芯/玉米秸秆充填缓

- 冲发泡材料的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 149-156.
- ZHAO H, ZHENG Y J, TAN B, et al. Properties of Hemp Straw Core/Corn Straw Buffer Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 149-156.
- [7] HUANG J Y, JIN B H, ZHANG X T, et al. High Energy Absorption Efficiency and Biodegradable Polymer Based Microcellular Materials *via* Environmental-Friendly CO₂ Foaming for Disposable Cushioning Packaging[J]. Polymer, 2024, 292: 126612.
- [8] 鲍园园, 庞少峰, 赵向飞, 等. 生物质秸秆的改性及其发泡材料的应用研究进展[J]. 功能材料, 2021, 52(4): 4071-4082.
- BAO Y Y, PANG S F, ZHAO X F, et al. Progress in Modification of Biomass Straw and Application of Foaming Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(4): 4071-4082.
- [9] 韩梦瑶, 李祥瑞, 余佳明, 等. 秸秆增强木塑复合材料的研究与应用[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 119-122.
- HAN M Y, LI X R, YU J M, et al. Research and Application of Straw Reinforced Wood Plastic Composites[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(9): 119-122.
- [10] CHEN C, WANG K, WONGSO I, et al. Postharvest Blanching and Drying of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L) with Infrared and Hot Air Heating for Enhanced Processing Efficiency and Microbial Inactivation[J]. Drying Technology, 2023, 41(9): 1454-1468.
- [11] COSTANTINE G, MAALOUF C, MOUSSA T, et al. Experimental and Numerical Investigations of Thermal Performance of a Hemp Lime External Building Insulation[J]. Building and Environment, 2018, 131: 140-153.
- [12] SHEWALUL Y W, QUIROZ N F, STREICHER D, et al. Fire Behavior of Hemp Blocks: A Biomass-Based Construction Material[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 108147.
- [13] HE H, ZHANG H G, YANG J J, et al. Effect of Pressing Pressure on the Mechanical Properties and Water Resistance of Straw/Sawdust-Magnesium Oxychloride Cement Composite[J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131362.
- [14] PENG H X, WALKER P, MASKELL D, et al. Structural Characteristics of Load Bearing Straw Bale Walls[J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 122911.
- [15] BARBHUIYA S, BHUSAN DAS B. A Comprehensive Review on the Use of Hemp in Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127857.
- [16] 姚韦靖, 韩金秀, 方冉, 等. 秸秆/聚丙烯纤维-玻化微珠保温混凝土基本性能正交试验[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6): 1-8.
- YAO W J, HAN J X, FANG R, et al. Orthogonal Experiment on Basic Properties of Thermal Insulation Concrete Mixed with Straw, Polypropylene Fiber and Glazed Hollow Beads[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6): 1-8.
- [17] 韩江伟, 张恩泽, 郭雅, 等. 不同棉花秸秆灰掺量对复合胶结体系力学性能试验研究[J]. 中国建材科技, 2023, 32(6): 92-94.
- HAN J W, ZHANG E Z, GUO Y, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Composite Cementitious System with Different Cotton Straw Ash Content[J]. China Building Materials Science & Technology, 2023, 32(6): 92-94.
- [18] OTHMANE H, ABOUBAKR E H, SARA E H, et al. Sustainable Approach to Mortar Production Using Mint Stem Aggregates: Investigating the Thermal, Mechanical, and Physical Performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(10): 17828.
- [19] MOUATASSIM C, MORAD S, OTHMANE H, et al. Thermal and Mechanical Characterization of Adobes Bio-Sourced with Pennisetum Setaceum Fibers and an Application for Modern Buildings[J]. Construction and Building Materials, 2022, 326(8): 126809.
- [20] HORMA O, CHANNOUF S, EL HAMMOUTI A, et al. Enhancing Concrete Sustainability Using Crushed Peanut Shells: An Analysis of Thermophysical Properties, Durability, and Application Potential in Construction[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109434.
- [21] 赵志颖, 陈平, 鹏飞, 等. 复合材料包装箱保温功能设计及验证[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 159-163.
- ZHAO Z Y, CHEN P, PENG F, et al. Design and Verification of Composite Thermal Insulation Storage Containers[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 159-163.