

以竹代塑产品在包装领域应用现状

刘美仙^{1a, 2, 3}, 程峥^{1a, 2, 3*}, 毛凯韵^{1a, 2, 3}, 肖乃玉^{1a, 2, 3},
刘义存^{1b}, 张雪琴^{1a, 2, 3}, 钟乐^{1a, 2, 3}, 仲芸芸^{1a, 2, 3}

(1.仲恺农业工程学院 a.轻工食品学院 b.园艺园林学院, 广州 510225; 2.广东省食品
绿色包装工程技术研究中心, 广州 510225; 3.岭南特色食品绿色加工与
智能制造重点实验室, 广州 510225)

摘要: **目的** 介绍不同种类竹材包装的生产加工方式及其应用, 并对以竹代塑产品在包装领域的发展进行展望, 以期以竹代塑产业发展提供借鉴和参考。 **方法** 总结不同以竹代塑产品生产工艺和性能的特点, 分析原竹包装和经过化学改性竹包装技术在包装领域的应用现状和存在问题。 **结果** 可以在竹包装材料加工过程中添加功能助剂, 或者对竹基材进行物理或化学改性, 以及生产设备的机械化和智能化延伸, 提升以竹代塑产品的品质和货架期。 **结论** 以竹代塑产品的广泛应用势必会推动以竹代塑产业的可持续高质量发展, 为提高竹包装品质和内装产品安全性提供了借鉴和参考。

关键词: 竹材; 以竹代塑; 包装; 发展趋势

中图分类号: TB489 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)11-0022-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.003

Application Status of Bamboo (as a Substitute for Plastic) Products in Packaging Field

LIU Meixian^{1a, 2, 3}, CHENG Zheng^{1a, 2, 3*}, MAO Kaiyun^{1a, 2, 3}, XIAO Naiyu^{1a, 2, 3}, LIU Yicun^{1b},
ZHANG Xueqin^{1a, 2, 3}, ZHONG Le^{1a, 2, 3}, ZHONG Yunyun^{1a, 2, 3}

(1. a. College of Light Industry and Food Technology, b. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Engineering Research Center of Food Green Packaging, Guangzhou 510225, China; 3. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510225, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the way of production and processing and application of different kinds of bamboo packaging, and prospect the development of bamboo (as a substitute for plastic) products in the packaging field, so as to provide reference for the development of bamboo (as a substitute for plastic) industry. The characteristics of production processes and properties of different bamboo (as a substitute for plastic) products were summarized, and the application status and existing problems of original bamboo packaging and chemically modified bamboo packaging technology in the packaging field were analyzed. Functional additives could be added in the processing of bamboo packaging materials, or the physical or chemical properties of bamboo substrates might be modified, mechanization and intelligent extension of production equipment can be conducted, to improve the quality and shelf life of bamboo (as a substitute for plastic) products. The wide application of bamboo (as a substitute for plastic) products will inevitably

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (22108086); 广州市基础与应用基础研究-优秀博士“续航”项目 (2024A04J2301); 仲恺农业工程学院仲恺学者人才项目 (KA23YY31819)

*通信作者

promote the sustainable and high-quality development of the bamboo (as a substitute for plastic) industry, providing reference for improving the quality of bamboo packaging and the safety of internal products.

KEY WORDS: bamboo; bamboo as a substitute for plastic; packaging; development trend

以竹代塑产品是以竹材为原料,按照标准加工流程,配以或不配以包括胶黏剂在内的应力材料等辅料,经物理和/或化学加工方式制成,并进行包装领域应用以替代塑料制品的天然生物质材料^[1]。以竹代塑产品在包装领域的应用可以被认为是将不同物理性能的竹材通过现代竹工业加工,并通过使用场景配以适合的加工方式生产的包装^[2]。竹子本身具有一种“竹琨”的特殊成分,该成分可以使竹材具有天然防螨、除虫的功能,同时具有抑菌杀菌、吸湿透气等特点,可以增加内装产品的保质期,因此,竹材包装被认为是极具生态、经济价值,适用于各种包装场合^[3-4]。美国《科学进展》杂志警告,2050年,地球上将有超过130亿t塑料垃圾,蓝色地球很有可能变成“塑料星球”,为了有效消除“白色污染”,发展全植物来源新型包装材料迫在眉睫^[5-7]。今年的政府工作报告中,“大力推进现代化产业体系建设,加快发展新质生产力”居于2024年政府工作十大任务首位,我国竹资源丰富,用新技术改造提升传统以竹代塑产品产业,发展新质生产力是推动以竹代塑产品在包装领域高质量发展的内在要求和重要着力点^[8]。然而,随着以竹代塑产品市场的高速发展,竹材包装产品质量性问题也时有发生,备受消费者关注^[9]。以竹代塑产品的生产技术作为竹包装加工生产的重要环节,在竹包装的质量、产品安全性和应用领域等方面发挥重要的作用。因此,本文通过介绍竹材配以不同加工方式生产的竹材包装类型,并对以竹代塑产品在包装领域的应用进行展望,以期以竹代塑产品的发展提供借鉴和参考。

1 竹材的特征

竹子属于禾本目禾本科竹亚科,是速生的草本

植物,茎多为木质材质,中间略空,有节且多而密;竹叶为狭披针形,其叶面呈深绿色。我国是世界上最主要的竹产国,竹子分布于我国20多个省市,占世界竹种的55%,占世界总面积的35%,素有“竹子王国”之誉。竹材种植便捷、绿色环保、可降解、可再生,与木材相比,竹子的生长周期更短,水分膨胀率更低,纤维生长方向的强度更高,具有替代塑料的天然优势^[10-11]。竹类纤维细长、挺硬、壁厚腔小、密度大,平均长度在1.5~2.1mm,平均宽度为15μm,其长宽比为110~200。表1为常用的不同竹种物理性能比较^[12]。

2 竹材包装的分类和特点

竹包装可以根据解剖特性、物理特性、加工方式、应用方式、贮存方式等多个维度对其进行分类,根据最常用划分依据,即根据竹材的使用方式将其分为原竹包装、竹编织包装、竹板材包装、竹纤维包装、竹笋壳包装,具体内容见表2所示^[10]。从表2可以看出,根据竹产品呈现方式的不同,竹包装所需的加工方式也有所区别,不同的竹包装类型的加工流程见图1。

2.1 原竹包装

原竹包装指原料经预处理,包括碳化、蒸煮等物理方式和/或加入特殊助剂等方式,去除竹材内的糖类和蛋白质等抽提物,起到抑制微生物生长,以提高防霉、防蛀及耐久性,进而延长原竹包装产品的使用期限。防霉处理过程中,选择的防霉剂主要包括壳聚糖-铜复合物、纳米级颗粒中的金属化合物等,其具有热稳定性、抗霉活性强等特性^[13-14]。

表 1 常用不同竹种的物理性能比较
Tab.1 Comparision of the physical properties of various commonly used bamboo species

种类	产地	长度/mm		宽度/μm		长度比	壁腔比
		平均	一般	平均	一般		
慈竹	四川	2.15	1.17~4.17	18.07	15.5~21.3	120	7.10
箭竹	云南	1.79	0.56~3.92	14.25	2.6~39.0	134	1.87
绿竹	福建	1.83	1.69~1.96	14.75	11.9~17.6	118	3.21
毛竹	湖北	2.63	1.03~4.23	26.00	13.0~39.0	124	3.55
毛竹	浙江	2.67	1.29~4.05	23.35	11.9~34.8	157	5.04

表 2 竹包装的分类及其特点
Tab.2 Classification and characteristics of bamboo packaging

类型	定义	特点	举例
原竹包装	本身无须过多加工处理的竹竿和竹箨	原料经预处理	竹筒杯、竹筒饭、竹筒酒、竹碗、竹茶叶筒等
竹编织包装	将竹竿加工成竹篾	以挑和压的方法构成经纬交织结构	编制竹桶、竹筐、竹篓、竹篮、竹箱等
竹板材包装	经过物理化学处理和机械切割，再借助胶黏剂，加工成的人造板材	经热压、组合制成一定形状的容器	竹收纳盒、竹编胶合板、竹材层压板、竹复合板、高强覆膜竹胶板等
竹纤维包装	对竹纤维或竹微丝进行提取	需经特殊工艺处理	竹浆造纸、水刺无纺布、竹纤维面料等
竹笋壳包装	将竹笋外皮洗净垫平	原料经预处理	竹笋壳包粽子、竹皮餐具、笋壳拖鞋、笋壳工艺包装等

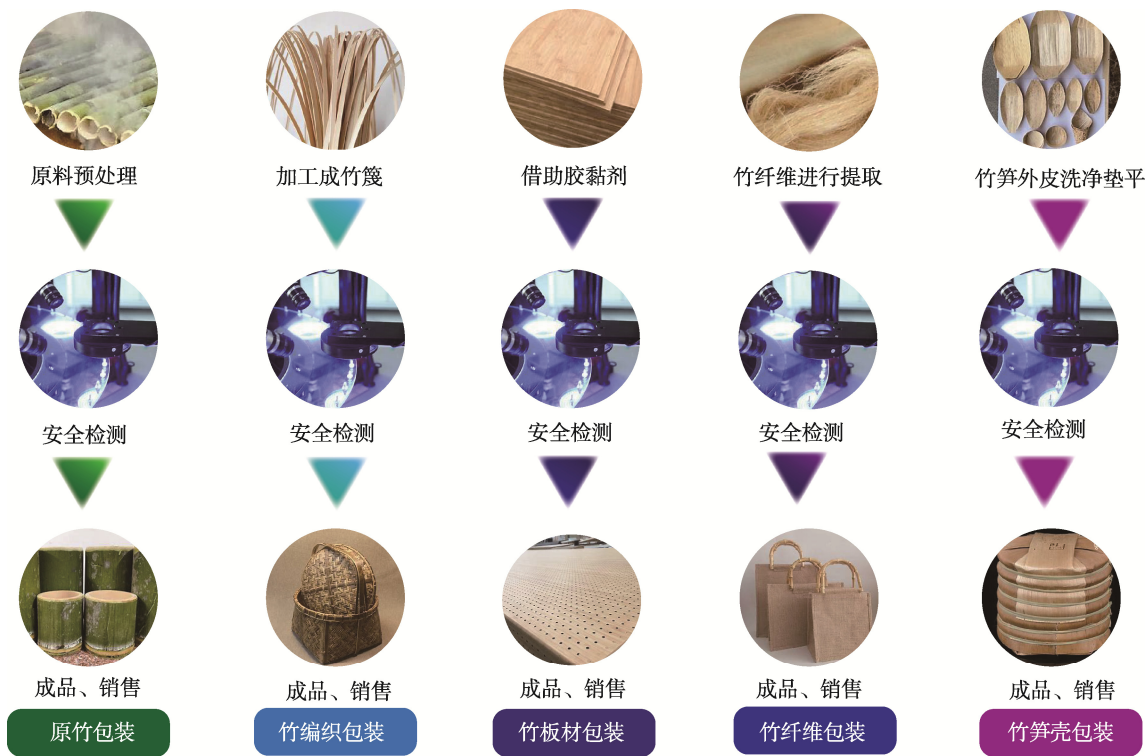


图 1 竹包装加工流程
Fig.1 Bamboo packaging process

目前,通过物理改性和化学改性对原竹包装进行防霉、防蛀处理。在处理工艺中,可加入碱溶液和铜盐溶液,以提升原竹包装绿泽^[15]。物理方法包括热处理和微波或射线处理,化学处理包括浸渍和提取处理等方法^[16]。原图包装不同处理方式见图 2。虽然通过添加防霉剂等化学处理的原竹包装可以保持较低的微生物感染率,但是该技术对竹奶茶筒、竹碗、竹茶叶筒等直接接触食品的原竹包装不宜使用。此外,添加防腐剂后,原竹包装仍然存在一定的化学物质残留,可通过直接接触或浸出到环境中,仍然存在安全风险^[17]。因此,近些年通过改善介孔结构材料、纳米级颗粒材料等方法提高原竹包装的产品质量和应用范围。介孔结构材料可以是一种抗菌材料,其巨大表面积和孔体积用于吸收更多的防霉剂,防止化学物质

浸出。Wu 等^[18]研究了介孔铝硅酸盐用于 Cu-B-P 防霉剂,结果表明介孔薄膜在内部与防霉剂结合,提高了原竹包装防霉性。Yu 等^[19]研究了不同提取方法(沸水和质量分数为 1.0%的 NaOH (FJ 组);沸水和质量分数为 1.0%的 HCl (FS 组);质量分数为 1.0%的 HCl (去离子水)、质量分数为 1.0%的 NaOH 和沸水 (SJ 组);质量分数为 1.0%的 NaOH 和质量分数为 1.0%的 HCl (FJS 组);未经处理的式样 (C 组))对竹子包括淀粉、可溶性糖等营养物质进行消除或迁移,结果表明,C 组、FJ 组、FS 组和 SJ 组试验后提取的标本分别显示出 0%、29.4%、27.5%和 15.0%的防霉效率,有效地抑制柑橘假单胞菌等霉菌,但保护不够有效,FJS 组提取的防霉效率高达 96.9%,具有非常好的防霉性能。Chen 等^[20]以松香酸浸渍研究了竹材结

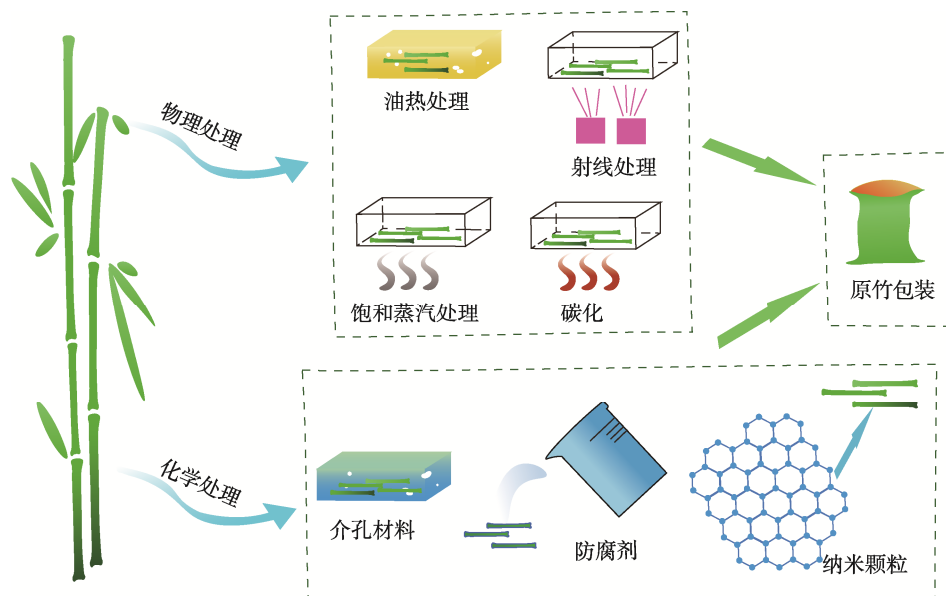


图 2 原竹包装不同处理方式

Fig.2 Different processing methods of original bamboo packaging

构、热稳定性、耐水性的影响以及添加不同的霉素对防霉性的影响;改性后,竹子密度增加了 43.3%,憎水性和抗溶胀效率分别提高到 10.91%和 27.83%,增强了防霉性能,实现了零霉菌覆盖率。Liu 等^[21]将银纳米颗粒掺入 TiO_2 纳米颗粒中,这种组合在可见光下光催化活性增强,通过原位生长方法将高度分散的 Ag 和 TiO_2 纳米粒子固定在竹子表面, TiO_2 纳米粒子的光催化功能和 Ag 纳米粒子的杀菌作用,竹子的防霉能力显著增强。Dhivyabharathi 等^[22]制备姜黄素增强的银还原氧化石墨烯纳米片 (Cur-AgrGONSs),以进行竹子耐霉测试 (30 d),未处理的原始竹材 99% 感染了霉菌,只添加石墨烯较未处理的竹材感染率减少了 20%,而含有 Cur-AgrGONS 的竹子样品没有显示出任何菌丝体生长。此外,Wang 等^[23]将含铜纳米颗粒 (CuNP) 浸涂于竹子表面,在浸涂了 CuNP 的竹子 (30 d) 表面未发现霉菌,水接触角达到 $(151.3 \pm 1.9)^\circ$,改性竹子的抗霉等级为 10。然而,关于介孔材料和纳米级颗粒的金属成分在储存、包装酸性的食品过程中的不稳定情况,以及它们进入食品是否会发生化学变化,从而对人体健康造成危险等方面研究较少,需要深入探讨。

2.2 竹编织包装

竹编织,即用竹丝、软化竹束以挑和压的方法构成经纬交织结构,竹编工艺主要分为材料处理、编织和收尾 3 个阶段,竹编按照形态可以大致分为平面编织 (竹杯垫等) 和立体编织 (竹筐等) 结构^[24]。通过热处理 (例如,饱和蒸汽、油等) 和化学试剂 (NaOH 等) 进行软化和减少亲水基团,从而降低断裂模量 (Modulus of Rupture, MORs)、弹性模量 (Modulus of Elasticity, MOEs) 和提高竹编织包装的耐水性^[25]。热处理对化

学成分的变化见图 3^[26]。

然而,化学试剂通常成本高,还会破坏竹纤维的细胞结构,因此在工业上常采用热改性使得竹材软化^[27]。Zhang 等^[28]研究热处理后的化学成分变化对竹材吸附动力学性质的影响,结果表明,热处理后表面润湿性降低,多糖降解和木质素热交联导致竹的亲水 OH、C=O 和 C—O 基团减少,尺寸稳定性提高。Li 等^[29]对竹子进行蒸汽处理,2 组的 MORs 和 MOEs 在湿润条件下均较干燥条件下显著降低,且其减幅与样品的吸水率呈线性相关,通过高温处理过程中亲水基团的演化,提高尺寸稳定性。然而,过度热处理会使生物质材料的主要成分热解,导致竹的物理和力学性能下降,在热处理过程中也存在着随着不同加热介质的作用而导致热处理后的竹材质量参差的现象^[30]。因此,已有实验证明真空热改性是一种提高竹子耐水性和减少虫害的环保方法,与以往使用氮气或油等介质进行加热的研究相比,具有防止竹表面氧化、导热均匀等优点^[31]。Zhang 等^[32]研究了真空热改性对竹子力学性能的影响,平衡含水率降低了 4%~27%,密度降低了 11%~18%,表明竹材性能在该温度范围内软化。Yu 等^[33]研究了竹子在真空处理热改性过程中的内在性能,结果表明,热处理后表面颜色变深,水接触角的最大增加幅度为 160%,疏水性增加,极大地提高了竹产品质量。然而,热处理后部分纤维素链分解,导致力学性能下降和表面润湿性降低,从而加速了霉变和腐烂。此外,对不同物种的竹材,其全纤维素等化学组成存在差异,导致其性能也存在明显差异^[34]。Hartono 等^[35]对 6 种竹子进行力学、化学性能的研究,全纤维素、 α 纤维素等物质含量会对含水率、拉伸强度等有影响。结果表明,细胞壁的厚度将取决

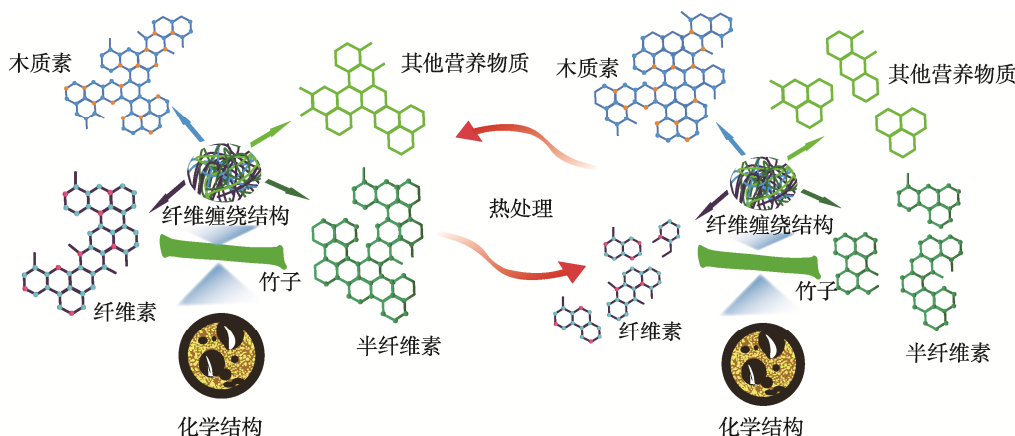


图3 热处理对化学成分变化

Fig.3 Schematic diagram of chemical composition change by heat treatment

于全纤维素和 α 纤维素,会影响材料的密度、木质素作为多糖成分周围的基质,提供了刚度和抗压强度。Gu等^[36]研究毛竹细胞壁的纳米力学性能受化学成分的影响,随着热处理时间的增加,部分纤维素链分解,致密结构被破坏,导致竹细胞壁的MOEs和硬度降低(190℃时,MOEs降低了52%,硬度降低了59%)。因此,需要通过大量的实验来确定最佳性能的竹子加工参数,确保加工过程不会开裂。尽管热改性已广泛应用于竹材软化加工,但含水率、温度、处理时间是竹子成功软化的主要参数,但复合参数变量对竹子的物理力学和微观结构特性的影响尚未得到太多探索。

大多数情况下,复合材料的强度会小于单根纤维本身,竹编织结构可用于构建复合材料,将竹编织天然经纬交织结构用于将天然纤维填充至复合材料,增强复合材料力学特性^[37]。Karthik等^[38]研究了硅烷处理棉/竹编织杂化纤维增强环氧树脂聚合物复合层压板钻孔行为的实验,用相应的经纬方向在层压板填充了棉/竹编织物复合材料,并且硅烷与天然纤维素中的OH基团结合,增加了纤维和基体之间连接区域的力学性能。将竹编织结构引入竹纤维/低密度聚乙烯复合材料中以提高力学性能,该复合材料在竹纤维中体积分数为45%时具有优异的性能,拉伸强度达到33.842 MPa,弯曲强度达到36.658 MPa,比未添加竹编织结构的材料分别提高了65.01%、81.46%。此外,该复合材料保持了良好的疏水性,水接触角达到93.71°,具有优异的力学性能和疏水性^[39]。竹编织结构还用于增强重组竹性能的影响,竹束编织后重组竹的结构更加均匀,截面上的密度分布更加均匀,形成效率和均匀性有了显著提高,竹编重组竹的尺寸稳定性可以满足竹材包装的标准要求^[40]。

2.3 竹板材包装

竹板材料是以截短的竹管劈开、滚动和分散获得的竹束为复合单元。然后,捆扎、浸渍、组装和热压,

将原有的薄壁、一定锥度的竹子制成宽度较大的扁平竹板^[41]。竹子可以作为生物材料和复合产品的原材料,如胶合板、定向刨花板等。竹板材包装经过扁平化竹板加以热压、组合制成一定形状的容器(例如,竹箱、竹酒包装盒等)。竹扁平技术通过在高温下进行软化,半纤维素分解,竹子的薄壁细胞萎缩扭曲,使得竹子的吸湿性降低,可以提高竹子利用率^[42-43]。当暴露在高温下时,竹组织表现出黏弹性行为,使竹秆在压力下变平^[44]。Tang等^[45]研究采用天然桐油对不同温度(23~160℃)下的扁平竹子进行改性,在160℃下用桐油改性后,扁平竹子的水分膨胀和收缩分别减少了43.00%和20.93%以上。桐油通过延缓水在横向上的输送和延缓水分子与细胞壁的结合来改善扁平竹子的尺寸稳定性。Yuan等^[46]表示软化和压扁处理的竹子细胞壁的力学性能高于未处理的竹子。在扁平化过程中,实质细胞变得紧凑,竹纤维的MOEs从16.14 GPa增加到18.75 GPa,硬度从0.58 GPa增加到0.77 GPa。

竹板材的性能受热处理和黏合剂的影响^[47]。常用的黏合剂有地质聚合物、有机、生物基、单宁黏合剂和热塑性薄膜,其具有耐腐蚀、耐老化、黏结强度高、力学性能好等特性^[48-49]。竹板材的内部黏结强度和黏合剂的效率、黏合剂液滴尺寸、黏合剂的含量会影响黏合剂覆盖表面的程度,从而影响竹板材的性能。Medved等^[50]表示(黏合剂固化温度为180℃,黏合剂质量分数为7.5%~12%)随着黏合剂含量的增加和粒径的增加,表面覆盖率增加。黏合剂浸入竹板材表面如图4所示。然而,某些基于甲醛的黏合剂的使用与甲醛的释放有关,这对人类和环境健康造成严重危害。在工业上应用最广泛的解决方案是使用无甲醛、生物基等固有的自黏特性的黏合剂来制造完全无黏结剂的板材,以部分或全部替代化石树脂^[51]。然而,玉米淀粉等天然胶黏剂的使用也受到抗真菌性差、制造工艺复杂、湿黏接强度弱等因素的限制^[52]。异氰酸

酯基团 ($-NCO$) 为高度不饱和的结构, 有较高的反应活性, 为了增加竹板材与胶黏剂之间的界面黏附性, 工业上常用二异氰酸酯作为偶联剂, $-NCO$ 可与竹细胞壁中结合的水和羟基的共价键形成聚氨酯和缩二脲结构, 以提高黏附性能^[53-54]。Wahyu 等^[55]通过在胶黏剂配方中添加聚合甲基二苯基二异氰酸酯, 研究了天然橡胶胶乳作为胶黏剂的可行性。证明了生产与干颗粒质量相关的质量分数为 20% 的复合胶黏剂刨花板的适用性, 制备了无甲醛刨花板, 其断裂模量 (MOR) 为 4.02 MPa、弹性模量 (MOE) 为 441.00 MPa、内黏结强度 (Internal Bond Strength, IB) 为 0.19 MPa。Wu 等^[56]研究了以甲苯二异氰酸酯为偶联剂、不饱和聚酯树脂为黏合剂制成的竹刨花板的力学强度、热稳定性和界面黏合性。结果表明, 复合材料内部之间形成共价键, 可显著提高力学强度。竹子具有规则的多孔纤维结构。钟乐等^[57]试验发现, 甲苯在倾斜的竹板材上流下的长度已接近试件长度的 1/2, 在横向的扩散宽度达试件宽度的 1/5 以上, 表明竹板材表面对甲苯的吸收能力较强, 对内包装产品也会产生不利的影响。因此, 要对竹板材包装表面实施防污处理以增强耐污能力。聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) 是一种流行的膜材料, 随着膜孔径的不断减小, 膜对低分子量的蛋白结合就越牢固, 使得在附膜材料表面形成致密的薄膜, 以阻止外界不利成分浸入, 为未来提高竹板材包装材料的防污能力提供了一种潜在的新方法^[58]。Yang 等^[59]采用甲基丙烯酸磺基甜菜碱修饰氧化石墨烯纳米粒子来提高 PVDF 膜的抗污染能力。结果表明, 添加质量分数为 0.75% 的复合纳米粒子的 PVDF 膜具有最佳的防污能力。Hui 等^[60]研究了 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸与甲基丙烯酸甲酯的两亲性无规共聚物, 以增强 PVDF 的防污性能。虽然, 目前对竹板材包装防污性能的研究还不够完善, 但是随着竹材包装的多元化、机理研究的不断深入, 以及竹板材生产技术的不断完善, 竹板材包装在以竹代塑产品中的应用将得到快速发展。

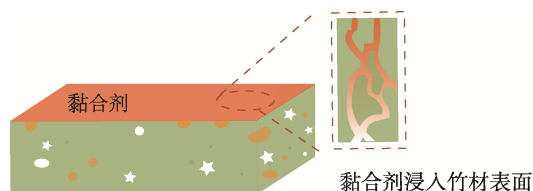


图 4 黏合剂浸入竹板材表面
Fig.4 Adhesive dipped into surface of bamboo board

2.4 竹纤维包装

竹纤维是以竹子为原料, 经过特殊的加工工艺处理, 把竹子中的纤维素提取出来。竹纤维含有较高的

全纤维素、水溶性物质和灰分含量, 纤维壁厚窄、管腔小, 可以作为纸浆原料替代品^[61]。

竹纤维可分为再生竹纤维和天然竹纤维^[62]。不同纤维的提取方式见图 5。竹纤维的提取可以通过机械崩解、化学处理和生物处理从竹子中分离出来, 机械提取方法所需的能耗相对较低, 但产生的纤维长度和细度并不均匀, 纤维短而脆、韧性差。化学提取方法可以生产出性能更好的竹纤维, 如可以降低纤维的吸湿性, 但残留的化学物质对人体健康有害。生物方法是通过酶原对竹材进行脱胶, 但生物活性受温度、酸度等条件的影响, 使得纤维生产效率低^[63-64]。Hu 等^[65]探索了一种物理化学结合的竹材工业纤维分类提取方法, 可以提高竹纤维的利用率。竹纤维具有较大的长径比和比表面积, 其纤维紧密缠结和交织, 更程度的纤维分离具有更好防水性能, 纤维之间的黏结强度更大, 因此竹纤维可作为增强材料, 以增强聚合物复合材料在可生物降解包装中的应用^[66-67]。Omar 等^[68]对在食品工业中以改性竹纤维为基础的生物复合淀粉膜作为食品包装材料的应用进行了评价。Thipchai 等^[69]探讨了竹纤维素纳米晶体配以脆性、防潮性较差的木薯淀粉基形成复合薄膜, 在添加了 0.4 g 纳米晶体后, 纳米复合薄膜的刚度增加, 复合薄膜的最大拉伸强度为 4.2 MPa。然而, 竹纤维具有亲水性, 羟基不能与聚合物疏水性基体有效反应, 导致天然纤维中分子之间的氢键断裂, 羟基或其他极性基团与水形成新的键, 导致界面不相容, 进而导致纤维在基体中分散不均匀, 复合材料界面结合力弱。为了提高复合材料的力学性能, 可以通过机械和/或化学法来增强竹纤维与基体之间的界面强度^[70-71]。Olonisakin 等^[72]采用蒸汽预处理方法对竹纤维进行改性, 将纤维暴露在高温蒸汽中, 通过去除杂质和增加纤维的表面积来增强竹纤维基体的黏附性, 断裂伸长率和冲击韧性比可生物降解塑料, 如聚乳酸酯提高了 1 倍以上。Tian 等^[73]采用聚丙烯酸酯基润湿剂 BYK-358N 改善了竹纤维与环氧树脂基体之间的界面黏接。结果表明, 体积分数为 1% 的润湿剂处理的复合材料界面的剪应力为 24.36 MPa、抗拉强度为 111.54 MPa, 比未处理的复合材料分别提高了 165.7% 和 99.7%, 润湿剂的加入可以有效提高复合材料的界面相容性。因此, 竹纤维作为增强材料可增加竹生物降解包装的应用。

纸浆模塑是一种也叫“立体造纸”的包装材料^[74]。立体造纸流程见图 6。以一定浓度的竹纤维浆, 用特殊的模具在适当压力、温度等条件下, 经真空吸附使纤维均匀分布在模具表面, 脱水后形成具有一定几何形状的湿胚纸浆半成品, 再经干燥、喷涂阻隔涂层、热压整形而形成的环保型包装制品^[75-76]。然而, 制成的包装制品力学性能、湿强度 and 安全性极大地限制了纸浆模塑包装的应用, 例如在制浆过程中由于脱墨不完全、阻隔涂层化学物质的迁移等都是在日用品、食品

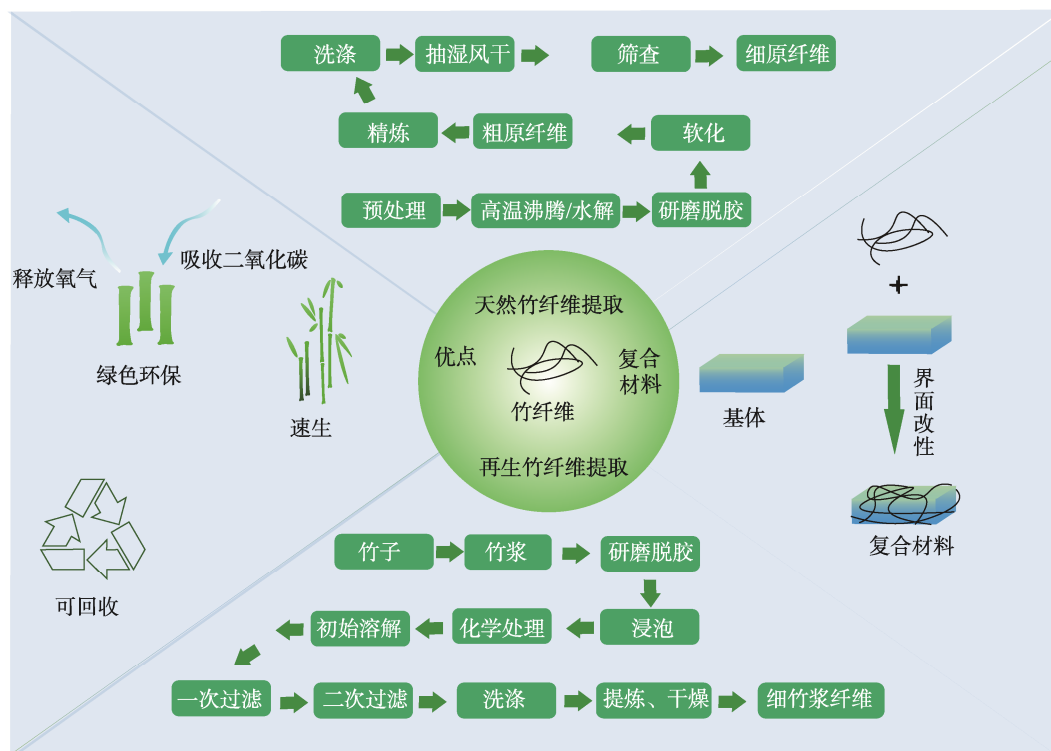


图 5 不同纤维提取方式
Fig.5 Different fiber extraction methods

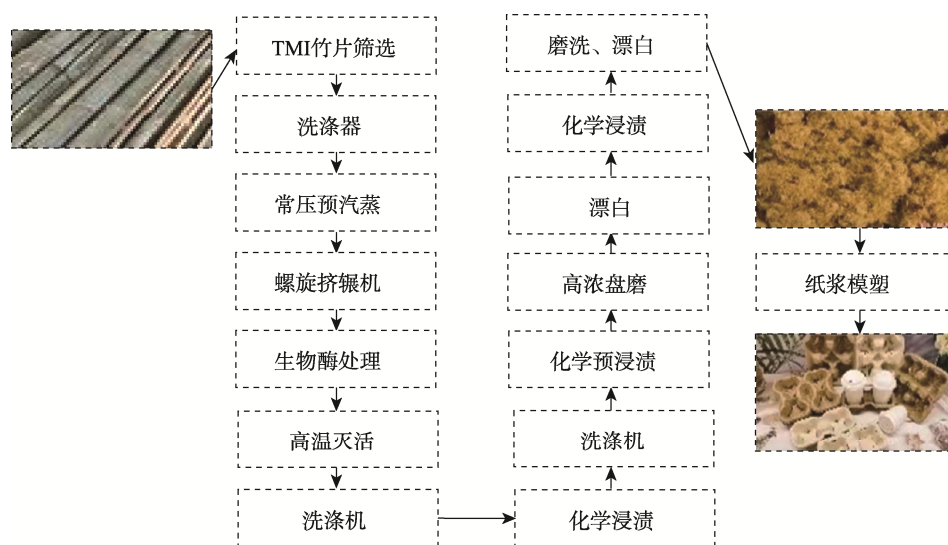


图 6 立体造纸流程
Fig.6 Three-dimensional paper making flow chart

等领域，与产品直接接触包装的安全隐患^[77]。竹纤维平均纤维宽度较小，因此力学性能较弱，将短纤维的甘蔗渣与长竹纤维结合，形成更紧密的交织网络。对纤维进行改性，以有效地将纤维素纤维的润湿性从亲水性转变为疏水性，增强复合材料的力学性能^[78]。Liu 等^[79]研究了混合纤维的形貌和纸浆模塑的性能，纤维分布分析表明，竹浆中长纤维（3.0~4.5 mm）的百分比（3.1%）明显高于甘蔗渣浆中长纤维的百分比（0.6%），但竹纤维的平均纤维宽度（18.6 μm ）明显

小于甘蔗渣纤维（24.1 μm ），在所得餐具中形成丰富的物理缠绕，其高拉伸强度、优异的热稳定性、优异的疏水性和低重金属含量具有食品容器所需的优越性能。为增强纸浆模塑包装的阻隔性，可生物降解聚合物，如聚乳酸、壳聚糖和多糖，可用作纸浆模塑包装应用的阻隔涂层^[80]。Zhu 等^[81]通过交联壳聚糖/单宁提取物作为可生物降解和可再制浆的纸张涂层，结果表明，水蒸气透过率从 1 252.9 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降低到 298.6 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，透氧率由 597.1 $\text{cm}^3/[\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa})]$

下降到 $136.2 \text{ cm}^3/[\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa})]$, 赋予了阻隔涂层之后的纸包装具有优异的耐油性和气体阻隔性。Kumar 等^[82]研究了丙烯酸酯化环氧化大豆油在纸张涂层应用中的用途。结果发现,该基体即使在高温下也是稳定的,证明了聚合物材料在纸质基材上的稳定性,从而通过降低涂层材料的风险,增加其在食品包装中的实用性,该涂层纸表现出优异的耐油性和耐水性。

3 竹包装的发展现状及趋势

竹子作为一种重要的生态、工业和文化生物质资源,是一种极具潜力的绿色资源,竹材必将有更加广泛的应用空间,以成为我国的朝阳林业产业^[83]。杜娟等^[84]表示竹材可与光敏、湿敏、气敏等新型功能包装材料之间发生化学反应,以达到增加竹包装功能,开发出对外界环境具有识别与提醒功能的材料型智能竹包装。

竹材的改性是提高竹材产品性能的一项技术,化学改性、蒸汽处理、高压静电场改性和氧等离子体改性等工艺已应用于竹纤维或面板的改性,以改善与增强元件或基体的界面^[85]。天然蜡是开发疏水表面的绝佳候选材料,而角质化表面处理是一种成熟的疏水工艺,蜡处理的退火工艺有利于竹制品的保护^[86-87]。Guan 等^[88]为提高竹子的疏水性和防霉性能,在不同的退火温度(78、80和83℃)下浸渍食品级棕榈蜡和石蜡的混合物来制备了角质化竹子。在83℃的退火温度下,角质竹外层表面的初始接触角达到 110.73° ,表面能降低了53.6%,角质竹子的吸水性和尺寸稳定性显著提高。Du 等^[89]在天然竹基材上配以松香和纳米碳酸钙,制备具有自洁性和防霉性能的坚固稳定的超疏水涂层,超疏水竹材料适用于所有类型的竹包装。竹子在使用生物精炼工艺生产增值产品方面具有很高的潜力,具有生产低聚木糖作为增值产品的可能性,是石油化合物的替代资源,适用于发展可持续环保包装^[90]。抗菌包装有助于保护商品,使其不被外界条件所影响而变质。Ren 等^[91]利用竹实质细胞制备用于抗菌食品包装的纳米纤维素原纤维复合薄膜。Hai 等^[92]使用一种将甲壳素纳米纤维和竹纤维素纳米纤维混合,以无需化学溶解的甲壳素和纤维素原料制成的绿色纳米复合材料。该复合材料具有良好的物理性能和生物降解性,有望应用于食品包装领域。生物质材料本质上是不透明的,但可以对其进行改性使其半透明,竹子也有可能用于制备透明包装材料,在丰富多种包装材料、满足包装设计行业对新材料的需求方面具有巨大潜力。Wang 等^[93]将竹子转化为具有高透光率和良好强度的透明材料,研发了高强度、低导热性的竹子。Wu 等^[94]以毛竹为原料,研究探讨了制备具有一定透光性和高机械抗拉强度的多层透明竹,有望用于新型包装材料。

新发展趋势下,以竹代塑产业新质生产力的关键着力点在于“以竹代塑产品加工技术及其减碳固碳的研究与应用”,产品性价比高、顺应需求的创新加工技术是以竹代塑产业转型升级的主要体现。一种从竹子中提取的坚固、轻质的生物基材料,通过加工工艺使竹子的细胞壁更柔软,并暴露更多的纤维素纳米纤维,从而通过热处理使竹子具有优异的致密化结构,其卓越的力学性能与竹子的可再生和可持续性,以及可扩展的智能化制造工艺相结合,扩大以竹代塑产品在包装领域的应用范围^[95]。在当今环保趋势下,丰富的竹子资源促进了竹材在包装领域的发展,但竹子及其制品由于其亲水基团众多、孔隙丰富,在高湿环境下易吸湿,需对其进行特殊处理才能拓展竹包装的使用领域。

4 结语

随着我国以竹代塑政策的不断落实,以及新质生产力的不断发展,竹材包装的应用领域不断被挖掘,以竹代塑产品将迎来巨大的发展势头。不同加工方式是作为最终呈现各种类型竹材包装的重要环节,对竹包装的使用方式和保质期起到至关重要的作用。因此,开发新型竹材包装,并且通过机械化、自动化、智能化的生产技术来提升竹包装的防水、防潮、防霉、抗菌等性能,拓宽以竹代塑产品类型和应用领域,势必会推动竹材包装产业的高质量发展,为竹包装走进各行各业、千家万户奠定基础。

参考文献:

- [1] CHEN X Y, CHEN F M, JIANG H, et al. Replacing Plastic with Bamboo: Eco-Friendly Disposable Tableware Based on the Separation of Bamboo Fibers and the Reconstruction of Their Network Structure[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(19): 7401-7418.
- [2] WEI X, GU S H, LI X J, et al. Bamboo as a Substitute for Plastic: Underlying Mechanisms of Flexible Deformation and Flexural Toughness of Bamboo at Multiple Scales[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 204: 117351.
- [3] AHARI H, SOUFIANI S P. Smart and Active Food Packaging: Insights in Novel Food Packaging[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 657233.
- [4] 刘一山, 张俊苗, 房桂干, 等. 推行竹浆纸一体化实现竹子造纸持续发展[J]. 中国造纸, 2023, 42(8): 55-60.
- IU Y S, ZHANG J M, FANG G G, et al. Implementing Bamboo-Pulp-Paper Integration and Promoting Sus-

- tainable Development of Bamboo Papermaking[J]. China Pulp & Paper, 2023, 42(8): 55-60.
- [5] 贾平凡. 首个全球“限塑令”要来了[N]. 人民日报海外版, 2022-03-03(006).
JIA P F. The First Global "Plastic Limit" is Coming[N]. People's Daily Overseas Edition, 2022-03-03(006).
- [6] 朱昕华. 把小竹子做成大产业[N]. 闽北日报, 2023-08-30(001).
ZHU X H. Making Small Bamboo into a Big Industry[N]. Min Bei Daily, 2023-08-30(001).
- [7] 侯云春, 赵旭东. 专家学者齐聚“竹博会”共话“双碳”目标与竹产业创新发展[N]. 四川经济日报, 2023-09-08(002).
HOU Y C, ZHAO X D. Experts and Scholars Gathered at the "Bamboo Expo" to Discuss the "Double Carbon" Goal and the Innovation and Development of the Bamboo Industry[N]. Sichuan Economic Daily, 2023-09-08(002).
- [8] 罗建文. 新质生产力是马克思主义生产力理论的新发展[J]. 学术交流, 2024(4): 5-20.
LUO J E. The New Quality Productive Force is the New Development of Marxist Productive Force Theory[J]. Academic Exchange, 2024(4): 5-20.
- [9] ZONG Y R, CHEN X H, LUO X, et al. Effect of Bamboo Culm Grading on the Properties of Flattened Bamboo Boards[J]. Forests, 2023, 14(6): 1120.
- [10] 彭建祥. 竹质天然材料在包装中的应用解析[J]. 美术观察, 2014(5): 130-131.
PENG J X. Analysis on the Application of Bamboo Natural Materials in Packaging[J]. Art Observation, 2014(5): 130-131.
- [11] SUN X F, HE M J, LI Z. Novel Engineered Wood and Bamboo Composites for Structural Applications: State-of-Art of Manufacturing Technology and Mechanical Performance Evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118751.
- [12] 陈铭, 郭琳, 郑笑, 等. 中国 15 个主产区毛竹纤维形态比较[J]. 南京林业大学学报, 2018, 61(6): 7-12.
CHEN M, GUO L, ZHENG X, et al. Comparison of Cell Morphology of Moso Bamboo Fibers from Fifteen Main Producing Regions in China[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2018, 61(6): 7-12.
- [13] CHEN S Q, SHAN Y Y, LIU C L, et al. Antimildew Effect of Three Phenolic Compounds and the Efficacy of Antimildew Sliced Bamboo Veneer[J]. Molecules, 2023, 28(13): 4941.
- [14] LI J P, WU Z X, BAO Y J, et al. Wet Chemical Synthesis of ZnO Nanocoating on the Surface of Bamboo Timber with Improved Mould-Resistance[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2017, 21(8): 920-928.
- [15] HE L, LIN C, LU X, et al. Improving the Anti-Mould Property of Moso Bamboo Surface by Using a Bamboo Green Colour Preservation Approach[J]. Wood Material Science & Engineering, 2023, 1(18): 161-171.
- [16] LIAN H Y, LI P S, XU Y T, et al. A Simple and Sustainable Method for Preparing High-Strength, Lightweight, Dimensional Stable, and Mildew Resistant Multifunctional Bamboo[J]. Construction and Building Materials, 2024, 415: 135027.
- [17] XU J Y, ZHOU Z Z, ZHANG X C, et al. A Simple and Effective Method to Enhance the Mechanical Properties, Dimensional Stability, and Mildew Resistance of Bamboo Scrimber[J]. Polymers, 2023, 15(20): 4162.
- [18] WU Z Z, ZODIAC P, WANG W, et al. Mesoporous Aluminosilicate with Cu-B-P Antifungal Agent to Improve Mildew Resistance in Bamboo[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(209): 273-282.
- [19] YU H, DU C, HUANG Q, et al. Effects of Extraction Methods on Anti-Mould Property of Bamboo Strips[J]. BioResources, 13(2): 2658-2669.
- [20] CHEN Y, YE X Y, WANG D W, et al. Stepwise Modification with 2,3-epoxypropyl Trimethyl Ammonium Chloride Cationization and Rosin Acid Impregnation to Improve Water Repellency and Mold-proof Property of Bamboo[J]. Industrial Crops and Products, 2023(193): 116248.
- [21] LIU G G, LU Z, ZHU X, et al. Facile In-Situ Growth of Ag/TiO₂ Nanoparticles on Polydopamine Modified Bamboo with Excellent Mildew-Proofing[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16496.
- [22] DHIVYABHARATHI B, CHENG I L. Surface Functionalization of Bamboo with Silver-Reduced Graphene Oxide Nanosheets to Improve Hydrophobicity and Mold Resistance[J]. Coatings, 2022, 12(7): 980.
- [23] WANG D, HU C S, GU J, et al. Bamboo Surface Coated with Polymethylsilsesquioxane/Cu-Containing Nanoparticles (PMS/CuNP) Xerogel for Superhydrophobic and Anti-Mildew Performance[J]. Journal of Wood Science, 2020, 66(1): 33.
- [24] 杨哲. 竹编工艺在现代食品包装设计中的应用研究[J]. 中国包装, 2023, 43(11): 112-114.
YANG Z. Application of Bamboo Weaving in the Design of Modern Food Packages[J]. China Packaging, 2023, 43(11): 112-114.
- [25] CHEN H, WU J Y, SHI J J, et al. Dimensional Stability and Mold Resistance of Bamboo Slivers Treated by Alkali[J]. BioResources, 2022, 17(2): 2827-2848.
- [26] LI X R, PENG H Z, NIU S H, et al. Effect of High-Temperature Hydrothermal Treatment on Chemical, Mechanical, Physical, and Surface Properties of Moso Bamboo[J]. Forests, 2022, 13(5): 712.
- [27] WANG X Z, CHENG D L, HUANG X N, et al. Effect of High-Temperature Saturated Steam Treatment on the Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Moso Bamboo[J]. Journal of Wood Science, 2020, 66: 52.
- [28] ZHANG Y M, YU Y L, LU Y, et al. Effects of Heat Treatment on Surface Physicochemical Properties and Sorption Behavior of Bamboo (*Phyllostachys Edulis*)[J].

- Construction and Building Materials, 2021, 282: 122683.
- [29] LI X Z, JI S J, LI T, et al. The Physical, Mechanical and Fire Performance of Bamboo Scrimper Processed with thermal-treated Bamboo Bundles[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 205: 117549.
- [30] LOU Z C, HAN X, LIU J, et al. Nano-Fe₃O₄/Bamboo Bundles/Phenolic Resin Oriented Recombination Ternary Composite with Enhanced Multiple Functions[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 226: 109335.
- [31] YANG Y H, CHUNG M J, WU T L, et al. Characteristic Properties of a Bamboo-Based Board Combined with Bamboo Veneers and Vacuum Heat-Treated round Bamboo Sticks[J]. Polymers, 2022, 14(3): 560.
- [32] ZHANG Z C, WEI Y, WANG J Q, et al. Effect of Thermal Modification on Axial Compression Properties and Hardness of Laminated Bamboo[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134747.
- [33] YU Y, ZHANG C, WANG X Z, et al. Investigation of the Relationship Between Surface Colour, Contact Angle and Chemical Properties of Heat-Treated Bamboo[J]. Wood Material Science and Engineering, 2023, 3(18): 783-791.
- [34] KELKAI B U, SHUKLA S R, PUAL B N, et al. Effect of Softening Duration on Physical, Mechanical and Microstructural Properties of Flattened Densified Bambusa Bambos[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 74: 106821.
- [35] HARTONO R, ISWANTO A H, PRIADI T, et al. Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Six Bamboo from Sumatera Island Indonesia and Its Potential Applications for Composite Materials[J]. Polymers, 2022, 14(22): 4868.
- [36] GU W J, ZHANG W G, TAO H, et al. Effect of Hydrothermal Treatment on Mechanical and Microscopic Properties of Bamboo[J]. Forests, 2024, 15(2): 281.
- [37] LIU S J, LIU L J, YANG K L, et al. Reinforcing the Mechanical Properties of Bamboo fiber/Low density Polyethylene Composites with Modified Bamboo-Woven Structure[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(25): 10359-10369.
- [38] KARTHIK A, SATHISH K P, RAJESH L, et al. Experimental Study on Drilling Performance of Silane Treated Cotton/Bamboo Hybrid Fiber Reinforced Epoxy Polymer Composites[J]. Polymers, 2023, 15(14): 3075.
- [39] ARUN A P, KALIAPPAN S, ATRAYANN L, et al. Mechanical, Fracture Toughness, and Dynamic Mechanical Properties of Twill Weaved Bamboo Fiber-Reinforced Artocarpus Heterophyllus Seed Husk Biochar Epoxy Composite[J]. Polymer Composites, 2022, 11(43): 8388-8395.
- [40] HE S, XU J, WU Z X, et al. Effect of Bamboo Bundle Knitting on Enhancing Properties of Bamboo Scrimper[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(3): 1071-1078.
- [41] FU Y, FANG H, DAI F Y. Study on the Properties of the Recombinant Bamboo by Finite Element Method[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 115: 151-159.
- [42] YUAN T C, XIAO X, ZHANG T, et al. Preparation of Crack-Free, Notch-Free, Flat Bamboo Board and its Physical and Mechanical Properties[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 174: 114218.
- [43] LOU Z C, WANG Q Y, SUN W, et al. Bamboo Flattening Technique: A Literature and Patent Review[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79(5): 1035-1048.
- [44] AKINBADE Y, HARRIES K A, SHARMA B, et al. Variation of Through-Culm Wall Morphology in P. Edulis Bamboo Strips Used in Glue-Laminated Bamboo Beams[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117248.
- [45] TANG T, ZHANG X B, FEI B H. Tung Oil Improves Dimensional Stability of Flattened Bamboo[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2023, 81(6): 1543-1555.
- [46] YUAN T C, HAN X, WU Y F, et al. A New Approach for Fabricating Crack-Free, Flattened Bamboo Board and the Study of Its Macro-/Micro-Properties[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79(6): 1531-1540.
- [47] BRITO F M S, PAES J B, DA SILVA OLIVEIRA J T, et al. Physico-Mechanical Characterization of Heat-Treated Glued Laminated Bamboo[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 719-727.
- [48] JORDA J, CESPRINI E, BARBU M C, et al. Quebracho Tannin Bio-Based Adhesives for Plywood[J]. Polymers, 2022, 14(11): 2257.
- [49] ZHANG Y, HE Y, YU J Y, et al. Fabrication and Characterization of EVA Resins as Adhesives in Plywood[J]. Polymers, 2023, 15(8): 1834.
- [50] MEDVED S, GRUDNIK J. Influence of Resin Content on the Surface Covered with Adhesive[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 104: 102698.
- [51] FEDERICA V, SASCHA B, DIEGO R, et al. Approaching Self-Bonded Medium Density Fiberboards Made by Mixing Steam Exploded Arundo Donax L. and Wood Fibers: A Comparison with pMDI-Bonded Fiberboards on the Primary Properties of the Boards[J]. materials, 2023, 16(12): 4343.
- [52] OKTAY S, KIZILCAN N, BENGU B. Oxidized Cornstarch -Urea Wood Adhesive for Interior Particle-board Production[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 110: 102947.
- [53] XIE X W, ZHANG C L, WENG Y X, et al. Effect of Diisocyanates as Compatibilizer on the Properties of BF/PBAT Composites by in Situ Reactive Compatibilization, Crosslinking and Chain Extension[J]. Materials, 2020, 13(3): 806.

- [54] NKEUWA W N, ZHANG J L, SEMPLER K E, et al. Bamboo-Based Composites: A Review on Fundamentals and Processes of Bamboo Bonding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 235: 109776.
- [55] WAHYU H, NANA A, SANDI A, et al. Performance of Eco-friendly Particleboard from agro-Industrial Residues Bonded with Formaldehyde-Free Natural Rubber Latex Adhesive for interior Applications[J]. *Polymer Composites*, 2022, 4(43): 2222-2223.
- [56] WU Z Z, ALADEJANA J T, LIU S Q, et al. Unsaturated Polyester Resin as a Nonformaldehyde Adhesive Used in Bamboo Particle Boards[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(4): 3483-3490.
- [57] 钟乐, 占奇峰, 翟万京, 等. 竹材拼板特性及其在普洱茶包装中的应用研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(9): 50-53.
- ZHONG (L /Y), ZHAN Q F, ZHAI W J, et al. Study of Bamboo Plywood's Characteristics and Its Application in Pu'er Tea Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(9): 50-53.
- [58] LI M M, YANG Y L, ZHU L J, et al. Antifouling High Permeability Membrane Composite Positive Permeability Membrane Based on Reactive Polyvinylidene Fluoride Porous Substrate[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 654: 130144.
- [59] YANG Z N, FAN Y P, MA X M, et al. Antifouling Capability of Polyvinylidene Fluoride Ultrafiltration Membranes Prepared with Poly Sulfobetaine Methacrylate-Modified Graphene Oxide[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 686: 133270.
- [60] HUI W, CUI M B, HENG C, et al. Enhanced Permeability and Antifouling Properties of Polyvinylidene Fluoride Ultrafiltration Membrane with Hydrophilic P(AMPS-co-MMA) Copolymer[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 25(140): 53968.
- [61] MOHAMMAD J H, RUPAK K G, ATANU K D, et al. Investigation of the Potentiality of Five Bamboo Species in Biorefinery Through Analysis of Chemical Profiles[J]. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2022, 42(3): 204-210.
- [62] XU D D, HE S, LENG W Q, et al. Replacing Plastic with Bamboo: A Review of the Properties and Green Applications of Bamboo-Fiber-Reinforced Polymer Composites[J]. *Polymers*, 2023, 15(21): 4276.
- [63] GABRIEL T, BELETE A, SYROWATKA F, et al. Extraction and Characterization of Celluloses from Various Plant Byproducts[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 158: 1248-1258.
- [64] MUHAMMAD A, RAHMAN M R, HAMDAN S, et al. Recent Developments in Bamboo Fiber-Based Composites: A Review[J]. *Polymer Bulletin*, 2019, 76(5): 2655-2682.
- [65] HU M, WANG C H, LUA C, et al. Investigation on the Classified Extraction of the Bamboo Fiber and Its Properties[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2020, 12(17): 1798-1808.
- [66] OCHI S. Mechanical Properties of Bamboo Fiber Bundle-Reinforced Bamboo Powder Composite Materials[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2022, 80(2): 263-275.
- [67] ZHAO W J, ZOU Y P, ZHANG W F, et al. Effect of Fiber Separation Degree on the Properties of Bamboo Fiber Composites[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2023, 81(5): 1249-1259.
- [68] OMAR F N, HAFID H S, ZHU J Y, et al. Starch-Based Composite Film Reinforcement with Modified Cellulose from Bamboo for Sustainable Packaging Application[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104392.
- [69] THIPCHAI P, PUNYODOM W, JANTANASAKULWON G K, et al. Preparation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Bamboos and Their Application in Cassava Starch-Based Film[J]. *Polymers*, 2023, 15(12): 2622.
- [70] LIU L J, YUAN Z Q, FAN X K, et al. A Review of Interfacial Bonding Mechanism of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composites[J]. *Cellulose*, 2022, 29(1): 83-100.
- [71] DEPUYDT D E C, SOETE J, ASFAW Y D, et al. Sorption Behaviour of Bamboo Fibre Reinforced Composites, why Do they Retain Their Properties?[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 119: 48-60.
- [72] OLONISAKIN K, LIN H P, PAN H J, et al. Fiber Treatment Impact on Toughness and Interfacial Bonding in Epoxidized Soya Bean Oil Compatibilized PLA/PBAT Bamboo Fiber Composites[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 107790.
- [73] TIAN B, DONG W, JIE Y, et al. Wetting Mechanism and Interfacial Bonding Properties of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 213: 108951.
- [74] 程峥, 黄鸿禧, 刘美仙, 等. 纸浆模塑研究进展[J]. *造纸科学与技术*, 2023, 42(5): 27-33.
- CHENG Z, HUANG H X, LIU M X, et al. Research Progress of Pulp Molding[J]. *Paper Science & Technology*, 2023, 42(5): 27-33.
- [75] ZHI H L, JUN J T, KUANG M M, et al. Nonlinear Compression Behavior Research of Molded Pulp Material[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2499: 012006.
- [76] LI M Y. Study on Waterproof Pulp Molding Products Manufactured by Wet-parison Spraying Process[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2539: 012077.
- [77] ZHU Y K, LI L, HOU Y S, et al. Investigation into the Characteristics of Bagasse Processed with 3C-DES and the Production of Chemimechanical Pulp for Pulp

- Molded[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 447: 141652.
- [78] LAVINE M S. Food Packaging from Sugarcane and Bamboo[J]. *Science*, 2021, 371(6524): 40-41.
- [79] LIU C, LUAN P C, LI Q, et al. Biodegradable, Hygienic, and Compostable Tableware from Hybrid Sugarcane and Bamboo Fibers as Plastic Alternative[J]. *Matter*, 2020, 3(6): 2066-2079.
- [80] AZIN A, BINH M T, TIZAZUT H M. Recent Progress in Sustainable Barrier Paper Coating for Food Packaging Applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 181: 107566.
- [81] ZHU Q H, TAN J H, LI D D, et al. Cross-Linked Chitosan/Tannin Extract as a Biodegradable and Repulpable Coating for Paper with Excellent Oil-Resistance, Gas Barrier and UV-Shielding[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 176: 107399.
- [82] KUMAR V, KHAN A, RABNAWAZ M. A Plant Oil-Based Eco-Friendly Approach for Paper Coatings and Their Packaging Applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 176: 107386.
- [83] LIN T Y, ZHI C L, XIN H, et al. Fabrication of a Novel Magnetic Reconstituted Bamboo with Mildew Resistance Properties[J]. *Materialstoday*, 2020, 23: 101086.
- [84] 杜娟, 章紫艳. 传统竹包装的现代转型研究[J]. *美术文献*, 2023, 196(2): 91-93.
- DU J, ZHANG Z Y. Research on the Modern Transformation of Traditional Bamboo Packaging[J]. *Fine Arts Literature*, 2023, 196(2): 91-93.
- [85] TANG K, JIANG Y Z, CHEN L, et al. Fabrication of Laminated Bamboo Composites from Small Diameter Bamboo (*Neosinocalamus Affinis*) by Sand Blasting Surface Modification[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115377.
- [86] DO AMARAL L M, DE SOUZA RODRIGUES C, POGGIALI F S J. Assessment of Physical, Mechanical, and Chemical Properties of *Dendrocalamus Asper* Bamboo after Application of Wetting and Drying Cycles[J]. *Advances in Bamboo Science*, 2023, 2: 100014.
- [87] SHREYA G, JAYANTH I, GREWAL H S. Development of Natural Wax Based Durable Superhydrophobic Coatings, 2021, 171: 113871.
- [88] GUAN M J, LI Y J, XU X J, et al. Anti-Mold and Hydrophobicity of Cutinized Bamboo Prepared via Different Annealing Processes[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115399.
- [89] DU J, YANG K L, YUAN Z Q, et al. Preparation of a Robust and Stable Superhydrophobic Coating with Self-Cleaning and Mold Resistance Properties on Natural Bamboo Substrate[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134454.
- [90] SONG Y, LEE Y G, AHN Y S, et al. Utilization of Bamboo as Biorefinery Feedstock: Co-Production of Xylo-Oligosaccharide with Succinic Acid and Lactic Acid[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 372: 128694.
- [91] REN D, WANG Y, WANG H K, et al. Fabrication of Nanocellulose Fibril-Based Composite Film from Bamboo Parenchyma Cell for Antimicrobial Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 210: 152-160.
- [92] HAI L, CHOI E S, ZHAI L D, et al. Green Nanocomposite Made with Chitin and Bamboo Nanofibers and Its Mechanical, Thermal and Biodegradable Properties for Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 144: 491-499.
- [93] WANG X, SHAN S, SHI S Z, et al. Optically Transparent Bamboo with High Strength and Low Thermal Conductivity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 1662-1669.
- [94] WU Y, WANG J, WANG Y, et al. JProperties of Multilayer Transparent Bamboo Materials[J]. *Properties of Multilayer Transparent Bamboo Materia*, 2021, 6(49): 33747-33756.
- [95] CHEN C J, LI Z H, MI R Y, et al. Rapid Processing of Whole Bamboo with Exposed, Aligned Nanofibrils Toward a High-Performance Structural Material[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5194-5202.