

# 生物质基天然纤维包装材料的研究现状及发展趋势

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.05.010

黄品歌<sup>1</sup> 张 艳<sup>1</sup>  
孟 毅<sup>2</sup> 叶 君<sup>3</sup>  
李 强<sup>1,4</sup>

1. 华中农业大学  
工学院  
湖北 武汉 430070
2. 山东博汇纸业股份有限公司  
技术部  
山东 淄博 256405
3. 华南理工大学  
轻工科学与工程学院  
广东 广州 510641
4. 华中农业大学  
园艺林学学院  
湖北 武汉 430070

**摘 要:** 随着国家“限塑令”与“禁塑令”的推行, 塑料替代品的研制成为了当前研究的热点。综述了近年来以生物质纤维及其衍生纳米纤维为基础的绿色环保包装材料的发展, 包括天然纤维增强复合塑料替代品、纸浆模塑基塑料替代品、纤维素和纳米纤维素基可降解塑料替代膜材料等。这些生物质基天然纤维包装材料具有绿色、环保、可降解等特性, 具有革新未来绿色包装的巨大潜力。

**关键词:** 限塑令; 禁塑令; 生物质; 天然纤维; 绿色包装; 塑料替代品

**中图分类号:** TB484.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2022)05-0066-09

**引文格式:** 黄品歌, 张 艳, 孟 毅, 等. 生物质基天然纤维包装材料的研究现状及发展趋势 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 66-74.

## 0 引言

近年来我国包装行业发展较快, 包装行业传统封装用品材质以塑料和纸质为主<sup>[1]</sup>。以快递包装为例, 纸箱类快递包装约占 44.03% (按件数记), 塑料袋类包装约占 33.50%, 套袋纸箱约占 9.47%。2019 年包装行业进出口份额中, 塑料包装以 225.86 亿美元的出口额位居第一, 占出口总额 64.49%; 进口额为 125.48 亿美元, 占进口总额的 89.38%<sup>[2]</sup>。为应对塑料带来的污染, 自 2007 年以来我国陆续颁布了不同程度的限塑令, 例如 2020 年 1 月 19 日, 国家发展和改革委员会和生态环境部发布《关于进一步加强塑料污

染治理的意见》, 简称新版“限塑令”。绿色可持续发展已经成为我国先进制造业升级与产业革新的迫切需求。具有轻量化、可降解、可再生、可回收等特点的现代绿色包装材料, 将更好地引领未来包装行业的可持续发展。

现有的生物包装材料主要为生物质基包装材料, 主要包括淀粉基生物包装材料、纤维素基合成材料、蛋白质膜材料、纸浆模塑包装材料、甲壳素及壳聚糖基复合材料等<sup>[3]</sup>。相对于非生物质基包装材料, 生物质基包装材料具有良好的生物可降解性<sup>[4-5]</sup>, 能够在自然界中依靠微生物分解; 此外还具有原材料可再生、来源丰富、成本低廉、无污

收稿日期: 2022-07-17

基金项目: 华中农业大学高层次人才引进项目 (11042210001)

作者简介: 黄品歌 (2000-), 女, 湖北孝感人, 华中农业大学硕士生, 主要研究方向为农业秸秆高值化综合利用, E-mail: 1759796249@qq.com

通信作者: 李 强 (1986-), 男, 四川江油人, 华中农业大学研究员, 博士生导师, 主要从事农业秸秆高值化综合利用技术与装备研究, E-mail: qiang-li@mail.hzau.edu.cn

染等特点, 可以大幅度减少对环境的污染, 具有广阔的应用前景。

在所有生物质基包装材料中, 以天然纤维为基础的包装材料正日益成为主力军。天然纤维通常包括竹纤维、麻纤维、木纤维等<sup>[6]</sup>。这些天然纤维常被用于复合材料的增强, 比如麻纤维增强聚乳酸、竹纤维增强塑料等<sup>[7]</sup>。因此, 以天然纤维为基础的绿色复合包装材料具有很大的发展潜力<sup>[8-9]</sup>。

## 1 天然纤维增强复合塑料替代品

### 1.1 麻纤维增强塑料

天然植物纤维主要分为木质植物纤维和非木质植物纤维。木质植物纤维包括木、棉、竹等植物纤维, 非木质植物纤维以麻纤维为主<sup>[10]</sup>。绿色复合材料是以可降解塑料为基础, 使用天然纤维作增强材料的复合材料。绿色复合材料不仅用于日常生活, 在建筑、医学、汽车工业等领域也得到了广泛应用<sup>[11]</sup>。

首先, 苧麻纤维与聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 复合, 然后采用 3D 打印技术制备出生物质复合材料<sup>[12]</sup>。这项研究采用原位浸渍 3D 打印工艺制备出了不同铺层方式的样件, 利用准静态侵彻测试考察了铺层方式、支撑跨距、增强材料等对材料性能的影响<sup>[8]</sup>。最终结果显示, 在样件中加入连续苧麻纤维分别使单向和正交的强度提升了 51.5% 和 52.9%。正交铺层的复合材料样件与单向铺层相比, 吸收的能量和最大侵彻力分别提升了 24.9% 和 13.1%。打印样件的侵彻力和能量吸收能力, 随着跨距比的降低而显著增加, 跨距比为 10 时的正交铺层复合材料与跨距比为 5 时相比, 强度提升了 202.4%。最后通过样件的多尺度失效特征分析及侵彻机理研究, 揭示了 3D 打印生物质复合材料的铺层结构与侵彻性能的关系, 正交铺层复合材料具有更好的侵彻性能。

其次, 汉麻水刺非织造布与聚己二酸 / 对苯二甲酸丁二醇酯 (polybutylene adipate terephthalate, PBAT) 微孔膜进行结合, 制备出了具有防水、可降解等优点的绿色环保可降解医用防护材料<sup>[13]</sup>。该研究首先采用水刺工艺将汉麻、棉纤维混合制备非织造布; 然后利用非溶剂致相分离法, 在汉麻 / 棉水刺非织造材料上制备 PBAT 微孔膜, 并且从铸膜液浓度、膜厚度、微孔膜 / 水刺非织造布复合膜的平均孔径、预蒸发时间 4 个方面, 分别进行了单因素实验, 确定了复合膜的最佳制备工艺。该研究制备了 PBAT 微孔

膜 / 汉麻水刺非织造布复合膜, 探索了复合膜的最优制备工艺, 探究了复合膜的防水性, 为未来医用防护服提供了新的材料, 同时为汉麻的高值化利用提供了新的研究方法。

### 1.2 竹纤维增强塑料

竹纤维是一种天然纤维材料, 竹纤维以其强度大、硬度高、细胞壁厚而著称, 竹纤维表层微纤的取向角很小, 几乎与纤维轴平行, 被认为是大自然的玻璃纤维<sup>[14-16]</sup>。竹纤维织物经特定加工后具有很高的绿色环保性、良好的透气性、独特的回弹性、瞬间吸水性及较强的纵向和横向强度等, 目前已经有竹纤维抗菌口罩、袜子、床上用品等产品<sup>[17]</sup>。Entegriion 公司将竹纤维和玻璃纤维复合, 率先制成了抑菌透气、吸湿性良好的医用绷带, 用于止血以及其他医疗用途<sup>[18]</sup>。竹纤维受到越来越多行业的重视与利用, 广泛用于纺织、建筑等行业。

天然纤维增强塑料在汽车领域得到了广泛应用。例如, 德国 BASF 公司将黄麻、亚麻等天然纤维用作增强材料, 与热塑性材料聚丙烯制作出麻纤维增强热塑性复合材料<sup>[11]</sup>。这种材料具有质量轻、环境友好、价格低等优点, 各项性能突出。日本三菱公司用竹纤维和聚氨酯树脂为基材, 研制出了一种复合材料以替代目前使用的材料, 降低材料的生产成本和二氧化碳的排放<sup>[19]</sup>。国内许多科研单位也进行了相关研究, 采用无纺布工艺和热压工艺制备了汽车用竹纤维增强聚丙烯复合材料, 并对竹纤维含量、制作结构和改性处理对复合材料的力学性能、吸湿性能的影响进行了研究<sup>[11]</sup>。目前, 用竹纤维作增强材料, 以热塑性树脂如聚丙烯为基体, 采用无纺布技术和热压工艺制备的汽车零部件和汽车内饰等, 已经工业化生产并成熟应用<sup>[19-20]</sup>。

闫雯等<sup>[21]</sup>提出以价格更低的无机隔热颗粒代替部分竹纤维, 制备得到竹纤维 - 隔热颗粒复合芯材, 以进一步降低隔热板的成本。在该研究中, 以竹纤维作为芯材的支撑材料, 用隔热颗粒对纤维之间的三维网络结构进行填充, 丰富了芯材的三维结构, 提高了真空绝热板 (vacuum insulation panel, VIP) 的保温性能。与未添加隔热颗粒的竹纤维芯材 VIP 相比, 添加了隔热颗粒的竹纤维芯材具有更好的稳定性和耐候性, 服役寿命也较长。当隔热颗粒的添加质量分数由 0 增加至 30% 时, 竹纤维间形成的三维网状结构中分布着较多的隔热颗粒, 能有效阻碍热的传递。

当添加质量分数增加至 50% 时, 由于竹纤维间形成的三维网络结构中分布的隔热颗粒越来越多, 导致芯材内部结构更致密, 形成导热通道, 固体传热增大, VIP 的导热系数增大。因此隔热颗粒的最优添加质量分数为 30%。硼系化合物、磷系化合物和氮系化合物组成的磷氮硼系阻燃剂常用于竹材阻燃。此外, 纳米二氧化硅、纳米无水碳酸美也被证实可以提高竹材的阻燃性<sup>[22]</sup>。

## 2 纸浆模塑基塑料替代品

### 2.1 纸浆模塑基一次性餐具

纸浆模塑通常以纸浆、甘蔗渣浆、竹浆、木浆等天然植物纤维为原料, 加入各种功能性添加剂, 在纸浆成型机上塑造出不同形状的纸制品。自 2008 年国家“限塑令”的颁布以来, 纸浆模塑市场展示出了巨大的潜力<sup>[23]</sup>。纸浆模塑制品主要包括纸浆模塑餐具、纸浆模塑精品工业包装和纸浆模塑基缓冲包装。目前, 大多数的模制纸浆是用二次纤维制成, 然而二次纤维中残留有大量油墨和化学物质, 从食品安全性来说, 并不适用于食品包装。

为了开发出可再生、可生物降解和安全的塑料食品容器替代品。Liu C. 等<sup>[24]</sup>以糖业残留的甘蔗蔗渣废物作为可再生和食品安全的原料制备纸浆。长竹纤维具有长纤维、高机械强度、低成本等优点, 可以替代价格较高的针叶木浆。向甘蔗蔗渣中添加长竹纤维, 短甘蔗蔗渣纤维可以与长竹纤维物理交织在一起, 形成紧密的网络, 进一步增强最终产品的机械性能。为了提高模制纸浆产品的抗水性, 向纸浆中添加烷基酮二聚体(alkyl ketone dimer, AKD)来改性纤维。食品级安全的 AKD 浆内施胶纸浆纤维并采用精密的成型工艺, 增加了纤维之间的疏水性和氢键。最后制造出来的模制纸浆餐具, 具有食品容器所需的高抗拉强度、优异的油稳定性和低重金属含量等卓越性能。这种模制纸浆餐具中的有毒物质含量低于国际标准, 其中铅含量为 0.3633 mg/kg, 没有检测到砷。此外, 该纸浆模塑餐具在自然条件下 60 d 内即可大部分生物降解。重要的是, 生产模制纸浆餐具的二氧化碳排放量低于常用的聚苯乙烯(polystyrene, PS)塑料产品和传统造纸。因此, 这种可扩展的纸浆模塑餐具是传统非生物降解塑料甚至是 PLA 产品的理想替代品。但目前出口至欧美的商品, 主要是针叶/阔叶配浆产品。

除了上述提到的纸浆模塑制品外, Wang H. Q. 等<sup>[25]</sup>用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  来处理含有木质素的纸浆, 然后经模压制成了纸浆午餐盒。该纸浆午餐盒具有 43 MPa 的高机械强度和 30 d 以上的湿稳定性, 是塑料午餐盒的理想替代品。S. F. Curling 等<sup>[26]</sup>探索了生产圆托盘时用废谷物秸秆替代纸纤维的可能性, 结果显示, 含秸秆纤维质量分数为 80% 的托盘材料与聚苯乙烯相比具有更好的拉伸性能。虽然其弯曲模量较低, 但可以通过增强托盘厚度来改善弯曲强度的缺陷。重要的是用秸秆纤维制作的纸托盘被废弃后, 4 周内便可被生物降解 20%。Wang H. T. 等<sup>[27]</sup>为了完善纸浆模塑制品缓冲性能的评估方法, 提出了等效面积理论, 并经过实验和理论分析获得了纸浆模塑托盘的缓冲系数和最大应力曲线, 建立了纸浆模塑的设计模型。

### 2.2 纸浆模塑基精品包装

近年来, 随着纸浆模塑的进一步研发和优化, 纸浆模塑包装材料逐渐应用到更多新兴领域, 如电子产品包装、化妆品包装、精密仪器包装、食品包装和五金包装等。上述这些包装统称为纸浆模塑精品包装。与一般的纸浆模塑工业包装制品相比, 纸浆模塑精品包装制品的技术含量更高。目前我国纸浆模塑行业已经形成规模, 涉及机械、电子、造纸等多个领域<sup>[28]</sup>。王章苹等<sup>[29-30]</sup>采用组合包装的方法, 用纸浆模塑与 A 型瓦楞纸板设计出了红酒包装和瓷碟缓冲包装。所设计的红酒包装具有质量轻、缓冲性能好、耗材少的优点, 能满足红酒包装的保护和美观功能。结构优化后瓷碟缓冲包装能很好地实现对瓷碟的保护。何艳萍<sup>[31]</sup>设计了用作笔记本电脑包装的两头折叠式衬垫, 并对衬垫进行性能测试, 分析跌落性能曲线, 论证了纸塑结构取代泡沫作缓冲衬垫的可靠性。

### 2.3 纸浆模塑基缓冲包装

纸浆模塑材料除被用于制造餐具以外, 更广泛地用作缓冲包装材料。纸浆模塑在生产之初由于制品粗糙、厚度大等特点, 被主要用作缓冲包装类产品<sup>[32]</sup>。纸浆模塑的缓冲作用主要是依靠结构单元及其组合的不同几何形状来实现。常见的纸浆模塑缓冲结构单元主要有 4 种类型: 肋状、塔状、座状和椅状<sup>[33]</sup>。纸浆模塑主要是通过自身变形、延长激励时间来吸收能量起到缓冲的作用<sup>[34]</sup>。我国在 20 世纪末引进了第一套纸浆模塑生产线, 该生产线以生产鸡蛋托为主, 最终纸浆模塑蛋托在国内被广泛应用, 开创了纸浆



模塑应用的先例<sup>[35]</sup>。D. G. Eagleton 等<sup>[36]</sup>构建了纸浆模塑材料的缓冲曲线, 并与膨胀聚苯乙烯 (expanded polystyrene, EPS) 泡沫的缓冲曲线进行了比较。结果表明, 在低静载荷、低高度、单次冲击情形下, 纸浆模塑制品表现出优秀的缓冲性。当静载荷超过 5 kPa、从高处跌落、受多次冲击时, 纸浆模塑制品的缓冲特性不如 EPS。W. Somchai 等<sup>[37]</sup>对芒果运输的缓冲包装进行了研究, 比较了纸浆模塑包装和泡沫网包装的性能。经过 24 d 的振动实验, 结果显示纸浆包装的防振性能与泡沫网没有明显差别, 但纸浆包装在防止芒果质量减轻和变色方面有明显优势。因此, 纸浆包装在水果运输方面有巨大潜力。

### 3 纤维素基塑料替代品

#### 3.1 纤维素基农业地膜

地膜覆盖技术已广泛应用于现代农业。地膜覆盖可保持土壤的温度和湿度, 改善土壤的微生物活动, 防止杂草生长, 从而提高农作物的产量和质量。利用地膜覆盖技术, 可使谷物和经济作物的产量分别提高 20%~35% 和 20%~60%<sup>[38]</sup>。自 2016 年以来, 全球农业覆盖物市场每年持续增长 5.6%, 预计这一增长将持续到 2030 年<sup>[39]</sup>。传统农业覆盖物大多由聚乙烯 (polyethylene, PE) 制成, PE 是一种石油衍生的不可再生和不可生物降解的合成聚合物, 如今农业实践中大量使用 PE 膜已经造成了严重的塑料污染。

2021 年, Xu Y. M. 等<sup>[40]</sup>以木质纤维素 (竹子) 衍生物 (carboxymethyl cellulose, CMC) 为主要原料, 通过戊二醇交联聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 制成了竹纤维素基液体农业地膜。竹纤维素基农业地膜是一种可再生、可生物降解的农业地膜, 可以作为传统塑料农业地膜替代品。CMC 是一种水溶性聚合物, 具有很强的可加工性。与其他木质纤维素生物物质 (如木材、能源作物和农业废弃物) 相比, 竹子虽然具有长纤维素纤维, 但其利用率仍然较低。因此, 将竹子制成农业地膜可使这种未充分利用的木质纤维素高值化, 为农业的可持续发展提供了新的途径, 同时可推动生物经济的发展。在上述研究中, 竹子的竹青 (外层)、竹肉 (中间层) 和竹黄 (内层) 3 个部分被分离并分别制成地膜。不同部分具有不同的细胞密度、组成和结晶度, 将竹青、竹肉和竹黄进行去木质素和醚化之后制成 CMC, 其中竹肉制成的 CMC 的取代度最高。首先将 CMC 与 PVA 混合,

再用戊二醛作为交联剂添加到混合物中, 反应后产生的交联混合物为 CMC-PVA 交联混合物。只需要将 CMC-PVA 交联混合物喷洒在土壤上, 就可以迅速形成一层薄膜覆盖在土壤表面。竹肉基地膜具有良好的力学性能、透射度、吸湿性以及出色的土壤保湿性, 且该地膜在使用 60 d 内约有 64% 被生物降解, 无需后续处理。因此, 竹肉基地膜可以作为当前塑料地膜的替代品。

此外, 黄麻基地膜也得到了开发。徐洁等<sup>[41]</sup>以麻纤维和 CMC 为原材料, 采用流延成膜法制成了可降解、无污染的环保地膜。在 CMC 与黄麻质量比为 58 : 42, 136 °C 下烘焙 49 min 的最优条件下, 制备了 CMC/黄麻地膜, 其透气量 56.16 mm/s, 透湿量 110.129 g/(m<sup>2</sup>·h), 干、湿抗张指数分别为 15.115 (N·m)/g 和 3.095 (N·m)/g。此类 CMC/黄麻地膜经过了防水处理, 更能适应农作物生长, 是塑料农业地膜的理想替代品。

除上述提到的几种纤维素基复合膜之外, 淀粉也被用作与纤维素复合。例如用醋酸纤维素 (cellulose acetate, CA) 与热塑性淀粉 (thermoplastic starch, TPS) 共混, 用双螺杆挤压法将 PCA/TPS 共混物挤压制成薄膜。CA 是一种重要的纤维素酯类衍生物, 向 CA 里加入少量的增塑剂制作成热塑性材料 PCA (plasticized CA)。在共混膜中, PCA 作为增强材料为膜提供了高机械强度、高抗拉强度和良好的尺寸稳定性, 而增塑剂本身将进一步改进膜的硬度、抗拉强度、耐热性和尺寸稳定性。这种 PCA/TPS 在高温下具有优异的加工性能, 有望在未来成为一种新型环保、经济的传统塑料替代品<sup>[42]</sup>。

#### 3.2 纳米纤维素增强塑料替代品

纳米纤维素是通过物理、化学或生物处理等方法, 从纤维原料中分离出的至少有一维在纳米尺寸范围内的纤维素材料。它不仅具有天然纤维素无毒、再生、可降解的性质, 还具有纳米材料的典型特性, 如密度低、比表面积大、吸附能力强、机械强度高。纳米纤维素根据其纤维素来源、加工条件、尺寸、功能和制备方法可分为 3 大类: 纤维素纳米晶体 (cellulose nanocrystals, CNC)、纤维素纳米纤维 (cellulose nanofibril, CNF) 和细菌纳米纤维素 (bacterial cellulose, BC)<sup>[43]</sup>。

2021 年, Li Q. 等<sup>[44]</sup>用 CNF、PVA 和聚环氧乙烷 (polyethylene oxide, PEO) 通过静电纺丝技术制

成了可自清洁、可生物降解和可重复使用的口罩，以替代传统聚丙烯（polypropylene, PP）塑料制成的口罩。目前使用的口罩主要是N95口罩和外科口罩，口罩中有一层PP熔融吹织织物用于过滤颗粒和飞沫。在该研究中，PVA作为口罩的主要成分，PEO作为增塑剂提高可纺性，CNF用来增强力学性能。CNF本身的增强以及CNF和前体聚合物之间形成的丰富氢键，可以极大地改善口罩的机械性能，抵抗口罩使用时的外部物理损伤。短链PEO聚合物作为增塑剂，用来提高PVA和CNF混合物的可纺性，而CNF在PVA和PEO之间形成复杂的氢键，进一步提高口罩的力学性能。口罩制造中使用的静电纺丝技术可以生产直径均匀、静电吸引力强的纳米纤维，使口罩具有卓越的病原体可过滤性和透气性。此外，通过负载具有光催化功能的纳米 $\text{TiO}_2$ ，使该口罩具有抗菌和光催化活性，因此口罩可以在太阳光下照射10 min实现100%的杀菌。经测试该口罩的耐磨性、长期过滤效率和成本效益远超过现在的商用口罩。这款自清洁、可生物降解的口罩，为可持续地制造和加工下一代可重复使用和可生物降解防疫口罩提供了另一种方式，在实际应用中具有巨大潜力。

纳米纤维素在其他包装材料中有着广泛的应用。例如，宋月等<sup>[45]</sup>对微纤化纤维素（microfibrillated cellulose, MFC）复合环氧树脂（epoxy resin, EP）水性涂料进行了研究，以MFC和EP为原料通过共混法得到不同浓度的MFC/EP复合水性涂料。实验结果表明，MFC质量分数为0.6%时MFC/EP复合水性涂料具有更好的力学性能。与现有涂料相比，该涂料具有更好的热稳定性、耐磨性、硬度和柔韧性。A. P. Mathew等<sup>[46]</sup>以微晶纤维素（microcrystalline cellulose, MCC）为增强剂，以PLA为基质制备了可生物降解的复合材料，并探讨了不同MCC含量对材料机械性能的影响。实验结果表明，随着MCC含量的增加，材料的拉伸强度得到了改善，但抗拉强度和断裂伸长率出现下降。日本的Ryohei M.博士与他的团队<sup>[47]</sup>一直致力于推广纳米纤维素复合材料和可降解塑料。他们用纳米纤维素-聚乳酸制作成了各式各样的餐具，并将其品牌命名为“Nano Sakura”。他们团队下一步将继续研究塑料袋、食品盒等各种塑料制品及其塑料替代品。

此外，其他多糖类生物高分子也在功能包装材料中被广泛应用，例如MFC、羧甲基化微纤化纤维素

（carboxymethylated microfibrillated cellulose, C-MFC）、壳聚糖、阳离子淀粉、海藻酸钠和聚乙烯醇被用来提高食品包装的防油性能。实验结果显示，壳聚糖与C-MFC层层自组涂布可以明显提高防油纸的防油性<sup>[48]</sup>。

### 3.3 木质素-纤维素复合材料基塑料替代品

受天然植物细胞壁中木质素、纤维素增强功能的启发，木质素-纤维素复合材料被用于制备可降解塑料替代品<sup>[49]</sup>。Bai F. T.等<sup>[50]</sup>开发了一种坚固且稳定的木质素-纤维素复合材料（lignin-cellulose composite, LCC）。将甘蔗渣用酶水解产生的纳米纤维素杂交木质素复合物（nano-cellulose hybrid lignin complex, CHLC）添加到从松树中提取的漂白纤维浆中，制成了木质素-纤维素膜。木质素作为水稳定的增强基质，通过CHLC中的纳米纤维素与纤维素的氢键有效地引入纤维和纤维网络空隙，从而显著提高了LCC的抗拉强度和水分稳定性。LCC的抗拉强度（70 MPa）和热稳定性（>350 °C）明显高于大多数石油基塑料。LCC的湿抗拉强度（28 MPa）是纤维素膜（1.2 MPa）的23倍多。这种新开发的LCC可作为吸管等日常消费品的基础材料，或者取代不可生物降解的医用包装塑料，其应用潜力巨大。

近年来一个重要发展是，Xia Q. Q.等<sup>[51]</sup>使用原位木质素再生方法直接从木材粉末中合成了一种新的木质纤维生物塑料，这种塑料具有机械强度高、可扩展、可防水、可生物降解和可回收的优点。在该研究中，可生物降解和可回收的低共熔溶剂（deep eutectic solvent, DES）被用来破坏纤维素之间的氢键以及分解木质素，从而有效解构木材。原位再生木质素作为天然胶水，将纤维素微/纳米纤维紧密包裹和连接在一起，形成均匀且高固体含量的浆液，在室温下蒸发水分后，最终获得了尺寸高达100 cm × 15 cm × 0.1 cm的木质纤维素生物塑性薄膜。该生物塑料绿色、可回收。以生物质为原料生产稳定、坚固和可生物降解的生物塑料打开了塑料生产的新思路。

## 4 结语

绿色包装材料的广泛应用对解决我国包装领域的白色污染问题有着举足轻重的影响。尽管现在绿色包装材料还难以完全取代塑料，但纤维素基塑料替代品、纸浆模塑基塑料替代品等绿色包装材料的开发

已经得到了大力发展。未来可能需要进一步结合纳米技术、电化学技术等使绿色包装材料朝着轻量化、高阻隔性、可降解、智能化的方向发展,世界生物材料包装工业将会有更广阔的发展。

#### 参考文献:

- [1] 贾海慧, 李冬梅, 王宇峰, 等. 我国绿色包装材料发展方向[J]. 中国科技信息, 2021(20): 113-114.  
JIA Haihui, LI Dongmei, WANG Yufeng, et al. Development Direction of Green Packaging Materials in China[J]. China Science and Technology Information, 2021(20): 113-114.
- [2] [佚名]. 2019年我国塑料包装占包装业进出口额首位[J]. 中国包装, 2020, 40(6): 13.  
[Anon]. In 2019, China's Plastic Packaging Accounted for the First Import and Export Volume of Packaging Industry[J]. China Packaging, 2020, 40(6): 13.
- [3] 王集合. 生物包装材料前程远大[J]. 绿色包装, 2018(1): 76-78, 83.  
WANG Jihe. Biological Packaging Materials Have a Bright Future[J]. Green Packaging, 2018(1): 76-78, 83.
- [4] WEBER C J, HAUGAARD V, FESTERSEN R, et al. Production and Applications of Biobased Packaging Materials for the Food Industry[J]. Food Additives and Contaminants, 2002, 19(S1): 172-177.
- [5] VAN DE VELDE K, KIEKENS P. Structure Analysis and Degree of Substitution of Chitin, Chitosan and Dibutylchitin by FT-IR Spectroscopy and Solid State  $^{13}\text{C}$  NMR[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 58(4): 409-416.
- [6] 高旭, 席蓓, 马婧, 等. 天然植物纤维复合材料的研究进展[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 60-65.  
GAO Xu, XI Bei, MA Jing, et al. Research Progress of Natural Plant Fiber Composite Materials[J]. Journal of Northwest Minzu University (Natural Science), 2021, 42(4): 60-65.
- [7] 李智鑫, 张才前. 纤维增强聚丙烯复合材料研究进展[J]. 纺织科技进展, 2021(6): 6-9, 52.  
LI Zhixin, ZHANG Caiqian. Research Progress of Fiber Reinforced Polypropylene Composites[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2021(6): 6-9, 52.
- [8] HOLBERY J, HOUSTON D. Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications[J]. JOM, 2006, 58(11): 80-86.
- [9] LI X, TABIL L G, PANIGRAHI S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2007, 15(1): 25-33.
- [10] 倪敬达, 于湖生. 天然植物纤维增强复合材料的研究应用[J]. 化纤与纺织技术, 2006, 35(2): 29-33.  
NI Jingda, YU Husheng. Study on Plant Fiber Reinforced Composite Materials[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2006, 35(2): 29-33.
- [11] 张毅. 竹纤维在汽车复合材料上的应用研究[J]. 竹子学报, 2020, 39(2): 89-93.  
ZHANG Yi. The Application of Bamboo Fiber in Automobile Composites[J]. Journal of Bamboo Research, 2020, 39(2): 89-93.
- [12] 程平, 彭勇, 汪旭, 等. 3D打印连续苧麻纤维增强聚乳酸复合材料的准静态侵略性能[J/OL]. 材料导报, [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220627.0948.004.html>.  
CHENG Ping, PENG Yong, WANG Kui, et al. Quasi Static Penetration Property of 3D Printed Continuous Ramie-fiber Reinforced Polylactic Acid Composites [J/OL]. Materials Reports, [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220627.0948.004.html>.
- [13] 杨璐, 高涵超, 王春红, 等. PBAT微孔膜/汉麻水刺非织造布复合功能膜的制备及防水透湿性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 103-110.  
YANG Lu, GAO Hanchao, WANG Chunhong, et al. Preparation and Waterproof and Moisture Permeability of PBAT Microporous Membrane/Hemp Spunlaced Nonwovens Composite Functional Membrane[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(6): 103-110.
- [14] SUMMERSALES J, DISSANAYAKE N, VIRK A, et al. A Review of Bast Fibres and Their Composites. Part 1: Fibres as Reinforcements[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1329-1335.
- [15] SUMMERSALES J, DISSANAYAKE N, VIRK A, et al. A Review of Bast Fibres and Their Composites, Part 2: Composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1336-1344.
- [16] LI S H, ZENG Q Y, XIAO Y L, et al. Biomimicry of Bamboo Bast Fiber with Engineering Composite Materials[J]. Materials Science and Engineering: C,



- 1995, 3(2): 125-130.
- [17] 周依莎, 邓鑫, 焦晓岚, 等. 不同改性方法对竹纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1): 143-147.
- ZHOU Yisha, DENG Xin, JIAO Xiaolan, et al. Effects of Different Modification Methods on Properties of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1): 143-147.
- [18] 王建建. 生物医用纤维及其应用领域研究现状[J]. 纺织科技进展, 2022(6): 14-16, 31.
- WANG Jianjian. Research Status of Biomedical Fiber and Its Application[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2022(6): 14-16, 31.
- [19] JINDAL U C. Development and Testing of Bamboo-Fibres Reinforced Plastic Composites[J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(1): 19-29.
- [20] ABDUL KHALIL H P S, BHAT I U H, JAWAID M, et al. Bamboo Fibre Reinforced Biocomposites: A Review[J]. Materials and Design, 2012, 42: 353-368.
- [21] 闫雯, 董旭, 张志诚, 等. 竹纤维-隔热颗粒复合芯材真空绝热板的制备[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 208-216.
- YAN Wen, DONG Xu, ZHANG Zhicheng, et al. Preparation of Vacuum Insulation Panels with Core Materials of Bamboo Fiber/Thermal Insulation Particle Composites[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 208-216.
- [22] 赵博文. 阻燃竹质包装材料的制备及其机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- ZHAO Bowen. Study on Preparation and Mechanism of Bamboo Packaging Materials with Flame Retardant[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.
- [23] 中国造纸杂志社产业研究中心. 纸浆模塑行业发展现状及趋势(二)[J]. 中国造纸, 2022, 41(6): 80-88.
- Industry Research Center, China Pulp and Paper Magazines Publisher. Development Status and Trend Analysis of Molded Fiber Products Industry (2)[J]. China Pulp and Paper, 2022, 41(6): 80-88.
- [24] 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.
- [25] WANG H Q, WANG J L, SI S R, et al. Residual-Lignin-Endowed Molded Pulp Lunchbox with a Sustained Wet Support Strength[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113756.
- [26] CURLING S F, LAFLIN N, DAVIES G M, et al. Feasibility of Using Straw in a Strong, Thin, Pulp Moulded Packaging Material[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 97: 395-400.
- [27] WANG H T, GUO Y, LUO G. Mechanical Properties of Molded Pulp Pallet[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 121: 216-220.
- [28] 吴福胜. 精品工业包装纸浆模塑制品成型工艺技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- WU Fusheng. The Research of Technic Methods of the Fine Industrial Packaging Pulp Molded Products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [29] 王章苹, 袁圆, 叶强. 红酒缓冲包装结构设计研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(22): 5998-6001.
- WANG Zhangping, YUAN Yuan, YE Qiang. Structure Design of Red Wine Cushioning Packaging[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(22): 5998-6001.
- [30] 王章苹, 张金. 基于陶瓷瓷碟包装的缓冲结构设计研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8420-8424.
- WANG Zhangping, ZHANG Jin. Research on Buffer Structure Design Based on Ceramic Dish Packaging[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(22): 8420-8424.
- [31] 何艳萍. 笔记本电脑纸浆模塑缓冲包装结构设计及测试[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- HE Yanping. Structural Design and Test on Molded Pulp Packaging of Notebook[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [32] 张雪, 张红杰, 程芸, 等. 纸基包装材料的研究进展、应用现状及展望[J]. 中国造纸, 2020, 39(11): 53-69.
- ZHANG Xue, ZHANG Hongjie, CHENG Yun, et al. Research Progress, Application Status and Prospects of Paper-Based Packaging Materials[J]. China Pulp and Paper, 2020, 39(11): 53-69.
- [33] HOFFMANN J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(5): 211-220.
- [34] 曹世普, 郭奕崇, 马玉林. 纸浆模塑工业包装制品缓冲机理研究及有限元模拟[J]. 中国包装工业, 2002(7): 34-37.

- CAO Shipu, GUO Yichong, MA Yulin. Investigation on the Cushioning Mechanism of Modeled Pulp and Simulation Through Finite Element Method[J]. China Packaging Industry, 2002(7): 34-37.
- [35] 张新昌, 王永光. 国产纸浆模塑工业包装生产设备及其发展[J]. 机电信息, 2003(16): 23-25.
- ZHANG Xinchang, WANG Yongguang. Domestic Pulp Molding Industrial Packaging Production Equipment and Its Development[J]. Mechanical and Electrical Information, 2003(16): 23-25.
- [36] EAGLETON D G, MARCONDES J A. Cushioning Properties of Moulded Pulp[J]. Packaging Technology and Science, 1994, 7(2): 65-72.
- [37] SOMCHAI W, PANYA S. Novel Packaging Material for Mango Transportation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 472: 2805-2809.
- [38] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White Revolution' to 'White Pollution': Agricultural Plastic Film Mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001.
- [39] 许咏梅, 房世杰, 马晓鹏, 等. 农用地膜污染防治战略研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 96-102.
- XU Yongmei, FANG Shijie, MA Xiaopeng, et al. Prevention and Control Strategy for the Pollution of Agricultural Plastic Film[J]. Strategic Study of CAE, 2018: 20(5): 96-102.
- [40] XU Y M, LI Q, MAN L P. Bamboo-Derived Carboxymethyl Cellulose for Liquid Film as Renewable and Biodegradable Agriculture Mulching[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 611-617.
- [41] 徐洁, 杨建平, 郁崇文, 等. CMC/黄麻地膜制备工艺优化[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(1): 25-29, 43.
- XU Jie, YANG Jianping, YU Chongwen, et al. Optimization in Preparation of CMC/Jute Mulch Films[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2020, 48(1): 25-29, 43.
- [42] ALLAN R F M, CÍCERO C P, ANA P B, et al. Starch, Cellulose Acetate and Polyester Biodegradable Sheets: Effect of Composition and Processing Conditions[J]. Materials Science and Engineering C, 2017, 78: 932-941.
- [43] 朱亚崇, 吴朝军, 于冬梅, 等. 纳米纤维素制备方法的研究现状[J]. 中国造纸, 2020, 39(9): 74-83.
- ZHU Yachong, WU Chaojun, YU Dongmei, et al. Research Status of Nanocellulose Preparation Methods[J]. China Pulp and Paper, 2020, 39(9): 74-83.
- [44] LI Q, YIN Y, CAO D, et al. Photocatalytic Rejuvenation Enabled Self-Sanitizing, Reusable, and Biodegradable Masks Against COVID-19[J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 11992-12005.
- [45] 宋月, 王欣, 牛耕芜, 等. 纤维素微纤丝复合环氧树脂水性涂料制备工艺及性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1654-1657.
- SONG Yue, WANG Xin, NIU Gengwu, et al. Study on Preparation Technology and Properties of Microfibrillated Cellulose Composite Waterborne Epoxy Resin Coating[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(7): 1654-1657.
- [46] MATHEW A P, OKSMAN K, SAIN M. Mechanical Properties of Biodegradable Composites from Poly Lactic Acid (PLA) and Microcrystalline Cellulose (MCC)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 97(5): 2014-2025.
- [47] [佚名]. 日本公司以纳米纤维素和可生物降解的塑料复合材料制作餐具[J]. 塑料工业, 2019, 47(6): 144.
- [Anon]. Japanese Companies Use Nano-Cellulose and Biodegradable Plastic Composite Materials to Make Tableware[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(6): 144.
- [48] 高文龙. 基于可降解材料的食品包装防油纸的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- GAO Wenlong. Study on Grease Resistance of Several Biodegradable Materials in Food Packaging Greaseproof Paper[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2016.
- [49] TUCK C O, PÉREZ E, HORVÁTH I T, et al. Valorization of Biomass: Deriving More Value from Waste[J]. Science, 2012, 337: 695-699.
- [50] BAI F T, DONG T T, CHEN W, et al. Nanocellulose Hybrid Lignin Complex Reinforces Cellulose to Form a Strong, Water-Stable Lignin-Cellulose Composite Usable as a Plastic Replacement[J]. Nanomaterials, 2021, 11(12): 3426-3439.
- [51] XIA Q Q, CHEN C J, YAO Y G, et al. A Strong, Biodegradable and Recyclable Lignocellulosic Bioplastic[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(7): 627-635.

(责任编辑: 邓光辉)



## Biomass-Derived Nature Fibers for Packaging Materials: The State-of-the-Art and Future

HUANG Pin'ge<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, MENG Yi<sup>2</sup>, YE Jun<sup>3</sup>, LI Qiang<sup>1,4</sup>

( 1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Department of Technology, Shandong Bohui Paper Industrial Co., Ltd., Zibo Shandong 256405, China;

3. School of Light Industry and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

4. College of Horticulture & Forestry Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China )

**Abstract:** With the implementation of “Plastic bag restriction” and “Ban on free plastics bags”, alternatives of plastics have been significantly sought after recently. Recent developments in green packaging derived from biomass fibers and nanofibers are reviewed, including natural fiber-reinforced composite, pulp molding-based plastic substitute, cellulose and nanocellulose based degradable plastics. These bio-based packaging materials derived from nature are green, environmentally friendly and biodegradable, and have great potential to revolutionize future green packaging.

**Keywords:** plastic bag restriction; ban on free plastic bags; biomass; natural fiber; green packaging; plastic alternatives

.....

( 上接第 21 页 )

## Analysis on Sustainable Design Method of Paper Packaging Container Based on Variable Structure and Function

XIAO Yingzhe, LUO Jingming

( College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China )

**Abstract:** The structural variability of paper packaging is a design method that makes use of the preset structure of packaging to carry out modification design, so that the packaging can be reused. On the basis of summarizing the basic design methods such as pre pasting, pre folding and pre die cutting, the main design directions for realizing the variability of functional structure are put forward, including the integration of packaging products, the generalization of packaging modification and the creation of packaging entertainment culture, which could provide useful design reference and development ideas for the sustainable design of the structure of paper packaging containers.

**Keywords:** paper packaging structure; variability; packaging function; sustainable packaging design