

基于3D打印的新型中药渣复合材料：迈向绿色制造与高值化利用之路

权 雪¹, 耿 婷^{2*}, 张 丽², 姚卫峰²

1. 中国药科大学药学院, 江苏南京 211198

2. 南京中医药大学翰林学院 泰州市中医药大健康产品开发重点实验室 泰州市中药质量与产业化工程研究中心, 江苏泰州 225300

摘要: 随着中医药产业的快速发展, 中药生产过程中产生大量的固体废弃物, 造成严重的资源浪费和环境压力。同时, 熔融沉积成型3D打印技术凭借其高度定制化、设计灵活和原料节约等优势, 在多个领域获得广泛应用。然而, 目前常用的打印材料多存在脆性高、易断裂、易凹陷、功能单一等局限。中药渣中富含约40%的纤维素, 可作为天然增强相, 用以改善打印材料的力学性能并实现资源的高值化利用。通过综述中药渣的分类与物质构成、处置方式从传统到绿色环保的变革, 突出了新型中药渣复合材料的优势、性能优化关键、制备工艺及其在3D打印产品开发中的应用潜力; 并总结了目前面临的挑战及未来发展方向, 为推进中药废弃物高值化利用和新型绿色打印材料的开发提供理论参考。

关键词: 3D打印; 中药药渣; 新型复合材料; 高值化利用; 熔融沉积成型

中图分类号: R28 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)02-0729-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.02.030

Novel composite materials for Chinese herb residues based on 3D printing: A path towards green manufacturing and high-value utilization

QUAN Xue¹, GENG Ting², ZHANG Li², YAO Weifeng²

1. School of Pharmacy, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China

2. Taizhou Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine and Comprehensive Health Products Development, TaiZhou Engineering Research Center for Quality and Industrialization of Traditional Chinese Medicine, Nanjing University of Chinese Medicine Hanlin College, Taizhou 225300, China

Abstract: With the rapid development of the traditional Chinese medicine industry, a large amount of waste is produced during the processing of traditional Chinese medicine, especially Chinese herb residues, which lead to severe resource waste and environmental pressure. Meanwhile, due to its advantages of high customizability, design flexibility, and material efficiency, fused deposition modeling 3D printing technology is gaining widespread adoption across various fields. However, commonly used printing materials are often limited by high brittleness, susceptibility to cracking and denting, and lack of functionality. Containing approximately 40% cellulose, Chinese herb residues can serve as a natural reinforcing phase to enhance the mechanical properties of printing materials, thus enabling high-value utilization of resources. This article provides a comprehensive review of the classification and material composition of Chinese herbal residues, as well as the transformation of their disposal methods from traditional to green and environmentally friendly approaches, highlights the advantages of new Chinese herbal medicine residue composite materials, the key points for performance optimization, the preparation process, and their application potential in the development of 3D printed products. This article summarize the current challenges and future development directions in this interdisciplinary field, aiming to provide theoretical insights for advancing the high-value utilization of waste and the development of novel green printing materials.

Keywords: 3D printing; Chinese herb residues; advanced composite material; high-value utilization; fused deposition modeling

收稿日期: 2025-09-04

基金项目: 国家中医药管理局监测统计中心中医药监测统计研究课题(2025JCTJA44); 江苏省高校哲学社会科学项目(2025SJYB1715); 校级科研创新团队项目(HLXYKC202102)

作者简介: 权 雪, 研究方向为药学。E-mail: 289087499@qq.com

*通信作者: 耿 婷, 博士, 教授, 从事中药质量标准及药动学研究。E-mail: yilinger110@126.com

2025年3月，国务院办公厅印发的《关于提升中药质量促进中医药产业高质量发展的意见》，从科技创新、产业转型升级等8个方面系统规划了中医药产业的发展路径。在国家政策持续强化、行业标准日趋严格及国民健康意识提升的共同驱动下，中药资源的需求量正迅速增长。同时，中药生产过程中产生的大量废弃物的处置问题也日益凸显。中药废弃物主要是指中药资源产业化过程中产生的非药用部分、未达标药用部分，及中药煎煮或提取后产生的废渣、废水和废气等^[1]。据统计，目前我国中药材的年产量可达7000万t，仅加工过程产生的中药渣就高达约3500万t^[2]，药材原材料的平均利用率低于30%^[3]，造成巨大的资源浪费。因此，中药渣的资源化循环利用已成为当下亟需解决的问题。

3D打印是一种新兴的增材制造技术，通过将可黏合材料层层叠加，把抽象的三维模型转化为实体物件^[4]。与传统的加工模式相比，3D打印具有高效、产品多样化和设计空间无限等优势，能够在原材料用量最小化的前提下，实现复杂结构的精准制造，在科研、教育及商业等领域推动和引领“第三次工业革命”。其中，熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)是最常见的3D打印技术，通过将熔化的塑料丝材料逐层堆叠构建物体。由于打印成本低、快速安全、结构简单，FDM成为中小型3D打印机中应用最广泛的技术^[5]。近年来，由于3D打印技术在定制化产品中的优势，其在零件制造、食品健康、日常生活用品等领域亦引起广泛关注。

目前，3D打印常用材料如聚乳酸、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile butadiene styrene, ABS)、聚丙烯、高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)等多存在脆性高、易断裂、易凹陷、功能单一等缺陷^[6]。现有研究中，多种固体废弃物已被用于3D打印材料的改性，如硅铝基废弃物能增强力学性能，农林废弃物可改善韧性，但它们或面临加工性差，或功能提升有限等瓶颈^[7]。相较之下，中药渣中含量近40%的纤维素能有效改善传统材料的力学弱点^[8]；同时，其复杂的天然纤维结构及残留的活性成分，有望为打印制品赋予抗菌、抗氧化等生物功能，这是多数废弃物所不具备的特质。因此，将中药渣用于开发新型3D打印复合材料，不仅能实现废弃物的高值化利用、缓解环境压力，还可显著提升材料的综合性能并拓展其功能

性，具有突出的研究价值与应用前景。综上，本文通过文献查阅，梳理该领域最新研究进展，厘清从复合材料制备到性能优化、再到应用创新的全技术链条，并指出当前面临的技术挑战与未来发展方向，为从事该领域工作的科研工作者提供有益借鉴。

1 中药渣的资源多样性与物质构成

1.1 资源多样性

中药渣主要来源于中药饮片的加工与炮制、中成药的生产、生物制药过程等环节，其中以中成药和中药饮片加工过程中产生的药渣占比最大^[9]。

1.1.1 中药饮片药渣 中药饮片药渣主要来源于植物药，其残渣中通常富含纤维素、半纤维素、木质素及淀粉等物质。由于处方差异，不同中药饮片药渣的化学成分存在较大区别，可根据其剩余物质的组成进行针对性利用。如茜草作为化瘀止血药，其药渣主要包含纤维素、木质素及部分残留的蒽醌类化合物^[10]。其中，纤维素作为主要多糖类成分，可赋予药渣良好的力学性能和结合能力^[11]；木质素则有助于提升药渣的结构稳定性和热稳定性^[12]；而残留的蒽醌类化合物仍保留一定的抗炎、化瘀与止血生物活性，为后续开发功能性材料提供了可能^[13]。

1.1.2 中成药药渣 中成药药渣主要来源于工业化生产中提取、分离、浓缩等环节产生的固体废弃物。与传统中药渣相比，中成药经生产大规模提取后有效成分残留较低，但其物理化学结构仍具有较高的利用价值。由于处方固定、批量大、成分相对稳定，中成药药渣更适用于规模化、标准化的资源利用。虽然同一品种的药渣成分因组方药材不同而有差异，但整体上呈现出较好的规律性。刘倩等^[14]通过对21种中成药渣中的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维等常规营养成分进行检测，发现同一品种药渣成分的质量分数误差低于5%，表明其成分稳定。尽管有部分活性成分在提取过程中流失，药渣仍可保留抑菌、调节肠道、增强免疫等作用^[15]，显示出良好的开发价值。

1.1.3 生物制药药渣 生物制药的原料药为蛋白质、淀粉、矿物质、维生素等成分。经过发酵等制药工艺后，产生的药渣主要由未完全利用的原料基质及微生物菌丝体构成。经干燥等预处理后，该类药渣富含多种有机质，并含有较高水平的氮、磷、钾等矿物元素^[16]，可作为优质的有机基质原料，广泛用于土壤改良、栽培基质或有机肥料等领域。

1.1.4 民族药(藏药)药渣 藏药药渣的成分与中

药或中成药药渣较为接近，多含有大量的纤维素、淀粉和木质素等。此外，藏药药渣通常还会含有部分在中药中使用较少的特色药材残留，如红景天、堪巴草、雪莲花等。这些成分为其资源化利用提供了独特的方向与潜力，可针对其特性进行特殊开发与转化应用。

1.2 物质构成

由于组方药味和处理方式的不同，中药渣的化学成分存在较大差异，其中纤维素、半纤维素、木质素等成分占有较大比重^[17]。

1.2.1 纤维素 纤维素作为植物细胞壁的主要骨架物质，在各种药渣中大量存在，基于其分子上大量羟基的相互作用，纤维素中含有众多分子间与分子内氢键，大大提高了纤维素分子链的刚性^[18]。因此，若能有效利用纤维素的特殊结构，通过增韧剂、增容剂、抗氧剂等的加入，改善中药渣复合材料的韧性、伸长率和抗拉强度等力学性能^[19]，有望制备出性能优异的3D打印新型复合材料，从而实现中药渣由废弃物向高附加值资源的转化。

1.2.2 半纤维素 半纤维素是由木糖、半乳糖等不同类型单糖构成的异质多聚体，在植物组织中含量仅次于纤维素，是微纤丝之间的“黏合剂”“填充剂”。半纤维素溶解性较纤维素好，在稀碱溶液中即可溶解，更容易提取，是木质纤维素高值化研究的重要对象^[20]。近年来，半纤维素被广泛用于多糖基复合水凝胶、纤维素/半纤维素复合膜等新型材料制备和改善^[21]。

1.2.3 木脂素 木脂素是由苯丙烷单元通过醚键和碳-碳键连接而成的不溶性芳香族高聚物，广泛存在于除苔藓和藻类外所有植物的细胞壁中^[22]，具有抗菌、抗氧化、阻隔水蒸气等优良特性^[23]。但由于木脂素结构复杂、溶解性差且微生物与酶难以与之接触，其降解过程较为困难，这是当下木脂素应用推广的最大阻碍。

1.2.4 其他 除纤维素、半纤维素、木脂素外，中药渣中还含有粗蛋白、粗多糖等有机物，可经简单处理后作为动物饲料利用^[24]；另有微量元素和中药材残留活性成分^[9]，可基于具体剩余情况作为开发切口。

2 中药渣的处置方式变革：从传统废弃到环保资源化

我国中药制药企业数量众多，一家大型企业每年的药渣排放量可达数千吨。为降低处理成本，许

多企业仍采用填埋或焚烧等方式进行处置^[25]。由于中药渣含水量较高，填埋产生的变质腐烂、药物残留会严重影响周边的农业及水体生态环境；而焚烧导致的二噁英等有毒气体或土壤酸化与地下水污染，更是造成了难以修复的损伤^[26]。此外，中药渣大多具有一定的药理毒性，部分药渣重金属超标，难以直接循环利用。在国家可持续发展战略推动下，针对中药渣处置不当造成的资源浪费和环境污染等问题，目前已有多项环保型处置新技术正在不断开发与推广中。

2.1 有效成分再提取

中药材成分复杂，经不同设备与工艺处理可不同程度地提取其活性物质。目前，绝大多数中医院药房采用水提法处理药材，但该方式对水溶性较差的成分提取有限，导致大量活性物质仍残留于药渣中未能充分利用^[9]。通过优化提取工艺和改变处理方式，可从原本废弃的药渣中进行二次提取，获得更多有效成分，从而提高药材的整体利用率。王君明等^[27]研究发现，地黄醇提物及地黄醇提后的药渣经水提所得成分仍具有抗抑郁活性，为地黄药渣的深度开发和资源化利用提供了科学依据。

2.2 新型栽培基质

食用菌传统栽培基质多为杂木屑、棉籽壳等材料。然而，近年来木屑价格持续上涨，棉籽壳也被发现存在一定安全隐患，种植户对经济可行、供应稳定且安全可靠的新型基质需求迫切。中药渣含水量较高，这一特性虽不利于填埋处理，却使其适宜作为食用菌栽培的基质原料。王慧杰^[28]研究发现，使用板蓝根等中药渣与醋渣混合制备的栽培基质，比单一醋渣基质显著提高了食用菌产量。青岛市食用菌工作站与华钟公司合作推广该技术，实现了中药渣的全年资源化利用，同时为当地菇农在1年内节约成本、增加收益近300万元^[29]。

2.3 新型材料开发

中药渣中富含优质纤维素，良好的韧性使其成为多种轻工业生产的潜在原料。已有研究尝试将中药渣用于纸张制造，结果表明，药渣所制纸张不仅抗拉强度和耐破指数高、更利于长期保存，且生产过程中不产生含硫化合物，极大减轻了造纸废水处理的负担^[30-31]。此外，中药渣还可与多种可降解塑料复合，形成性能优异、成本较低的木塑复合材料，既缓解了药渣处置难题，也为新型增材市场提供了新的发展路径。如中药渣/聚乳酸复合材料、

中药渣/ABS 复合材料等，均可作为 3D 打印的新型复合材料。

3 新型中药渣复合材料的分类体系与性能优化关键

3.1 中药渣/聚乳酸复合材料

聚乳酸是一种从玉米中提取的生物塑料，可经生物分解形成乳酸，对环境负荷较小。聚乳酸具有良好的生物相容性和抗水抗油性，在食品包装、生物医药、零件等领域均有应用。作为 FDM-3D 打印最常用的热塑性塑料，聚乳酸具有熔融无刺激性气味、热稳定和力学性能强等特点^[32]，但仍难以满足医疗和结构件应用中高强度、高耐性的要求，而中药渣纤维素的加入可使聚乳酸的性能有所改善。李向丽等^[33]研究表明，200 °C 条件下经 20 min 热处理的剑麻纤维可与聚乳酸实现良好的界面结合，所制得复合板材拉伸模量和弯曲强度均达到极大值，植物纤维内部形成的交联结构使材料承载的外力得到有效分散，从而提升了材料的机械性能。Verma 等^[34]研究发现，采用 5% 的 NaOH 溶液对中药渣进行预处理，可有效去除纤维表面的半纤维素和蜡质，显著增加纤维表面粗糙度，增强与聚乳酸基体的机械互锁作用和界面结合强度，极大提升了材料的韧性和耐久性。该碱处理技术为中药渣/聚乳酸复合材料提供了一种有效的界面改性方法。

3.2 中药渣/ABS 复合材料

ABS 是一种由丙烯腈、丁二烯和苯乙烯组成的三元共聚物，属于非结晶性热塑性材料，具有良好的耐低温性、抗冲击性、低蠕变性、优异的尺寸稳定性和易加工性。ABS 表面光泽度高，可用于印刷、上色、电镀、烫金等，目前市面上约 70% 的塑料外观件采用 ABS 制成。然而，由于 ABS 在加工时易卷翘，熔融时会产生刺激性气味，导致其应用范围受到限制，从而在环境友好型应用领域（如可降解产品）的市场接受度不及聚乳酸等材料。陈荣源等^[35]利用基于拉伸流变的叶片挤出机，研究中药渣/ABS 复合材料的结构与性能，发现当挤出机转速为 30 r/min、加工温度为 200 °C 时，该复合材料表现出最优的综合力学性能。即中药渣作为增强填料引入 ABS 体系，不仅能提升材料性能，也有助于实现资源的循环利用。另有研究发现，在中药渣/ABS 复合材料中，最需提升的性能为耐高温能力。由于异相成核作用，使用 40 目筛分所得药渣粉末制备的复合材料，其耐高温性能优于 60 目及

更细粉末所制材料。表明在中药渣粉碎过程中，无需过度追求粉末的细腻程度，适度保留部分长纤维结构，将有助于提升复合材料在高温环境下的加工性能与应用表现。但是由于颗粒较粗，纤维包覆效果较差，材料吸水率上升，且较大颗粒的加入会延长塑化时间、增大剪切阻力，因此在制备过程中需加入适量的增塑剂或增韧剂配合使用，以改善熔体的流动性能^[8]。

3.3 中药渣/聚丙烯复合材料

聚丙烯是一种性能优异、成本低廉的热塑性合成树脂，属于聚烯烃家族。聚丙烯材料耐热性较好，可在 100 °C 以上长期使用，150 °C 不受外力下不变形，适用于高温消毒环境。同时，聚丙烯还具有较好的透明性、光泽度，低吸水性和水蒸气渗透性。但是，聚丙烯材料收缩率大，制作成的厚壁制品易凹陷，用于 3D 打印时通常需使用增塑剂、增韧剂等进行改性。其中增塑剂通常为高沸点、难挥发的低相对分子质量酯类化合物，如邻苯二甲酸二丁酯等，少量添加即可显著提高聚合物的塑性和熔体流动性，有助于改善加工性能；增韧剂多为固体材料，如丙烯酸树脂，可降低复合材料脆性，提高抗冲击性能；界面相容剂则能够通过其活性基团与中药渣纤维表面的羟基以及聚丙烯分子链发生相互作用，在二者之间形成分子桥接，显著改善界面结合状况，提高复合材料的力学性能。冯彦洪等^[36]以爆破处理后的山芝麻、广藿香、三叉苦等中药渣为填料，以马来酸酐接枝聚丙烯为界面相容剂，制备多种中药渣/聚丙烯复合材料并进行测试。结果表明，木脂素含量高的山芝麻根等药渣制备的复合材料弯曲强度和弯曲模量较高；而纤维素含量低、半纤维素含量高的三叉苦药渣制备的复合材料综合性能较差。

3.4 中药渣/HDPE 复合材料

HDPE 是一种无毒、无味的热塑性树脂，结晶度高、化学性质稳定，室温下不溶于任何有机溶剂，耐酸、碱及各种盐类，在高温与低温环境下都能保持良好的机械性能。但 HDPE 容易发生环境应力开裂现象，传统方法通常是在树脂中加入抗氧剂和紫外线吸收剂来延缓老化，虽能缓解问题，但未能从根本上改变材料的微观结构。而中药渣的加入则能通过界面增强、细化晶粒等机制主动提升其抗开裂能力，效果更为显著和持久。Mendes 等^[37]通过挤出和注塑获得由 HDPE 和废咖啡渣制成的生态复合材

料, 较纯 HDPE 而言, 其弹性模量增加 49%、弯曲模量增加 108%、弹性增加 13%, 且废咖啡渣的加入可有效保持 HDPE 基质的热分布, 不会导致加工修改, 在绿色环保的前提下完成了对材料的优化。

4 新型中药渣复合材料的制备工艺

通常情况下, 中药渣经粉碎、过筛、干燥后, 与打印材料按一定比例熔融共混。根据药渣成分和特性的不同, 可适当添加增韧剂、增容剂等改进复合材料性能。本文以中药渣和聚乳酸为例, 基于小型单螺杆挤出机介绍复合材料制备的主要步骤(图 1)。

4.1 中药渣的预处理

将中药渣初步过筛除去灰尘、碎屑等, 60 °C 干燥去除药渣纤维内外水分, 打粉, 过 9 号筛, 室温下采用 5 wt% NaOH 溶液对其进行碱处理 2~4 h, 除去半纤维素和表面蜡质, 暴露更多-OH 基团, 增强与聚乳酸的界面黏附。使用蒸馏水反复冲洗至浸出液呈中性以彻底清除残余碱性物质^[38]。将中和后的药渣在 60 °C 条件下 2 次干燥, 至含水率低于 2%, 以防止在储存过程中结块, 并提高挤出流动性及线材的表面质量与力学性能。

4.2 配方的设计优化

实验多选择以中药渣为基础材料(质量分数为

5 wt%~15 wt%), 聚乳酸为主要基质(质量分数为 82 wt%~92 wt%)。为了克服聚乳酸与天然纤维间的界面弱黏附, 可在混合材料中添加 2 wt% 的马来酸酐接枝聚乳酸相容剂, 马来酸酐官能团可与纤维表面-OH 基团架桥结合从而在“纤维-基体”界面实现 20%~30% 的拉伸强度提升^[39]。同时, 适量的抗氧化剂可捕获高温加工过程中产生的自由基, 从而降低聚乳酸在 180 °C 以上连续熔融时的热氧化降解。

4.3 复合材料的挤出工艺

复合材料的挤出主要包括混合、湿化、挤出 3 个过程^[40]。首先, 中药渣与聚乳酸在混料机中以恒速干法预混合 5 min, 将混合原料置入挤出机物料漏斗。物料在螺杆塑化阶段依次经过 3 段加热区(前段 T₁、中段 T₂、机头 T₃), 利用分区控温策略(170、180、175 °C)使聚乳酸充分熔融并实现对药渣纤维的彻底湿化。当螺杆以 18 r/min 转速输出熔体时, 熔融物通过直径为 1.75 mm 精密模口得到定径主尺寸后, 立即由 23 °C 的室温风冷平衡内外温度。牵引系统以 1.8 : 1 的速比将固化后的线材拉伸并送入收卷机, 收卷张力控制在 0.18 N·m 内, 以约 0.22 kg/h 的产率稳定挤出直径(1.75±0.05) mm 的药渣-聚乳酸复合线材。

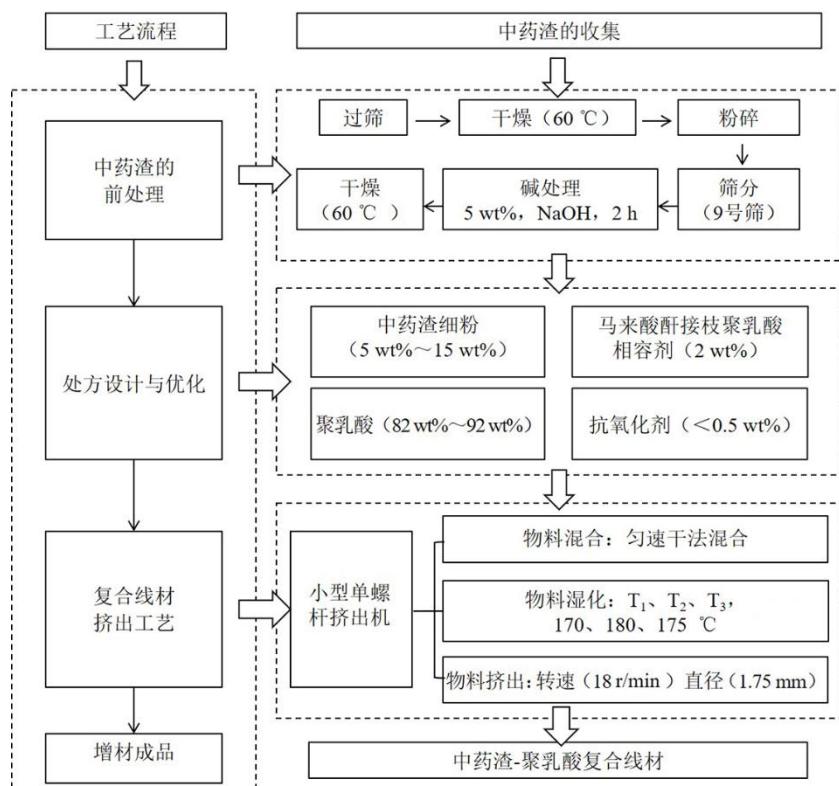


图 1 新型中药渣复合材料的制备工艺流程图

Fig. 1 Preparation process flow diagram of novel Chinese herbal residue composite materials

5 基于新型中药渣复合材料的3D打印产品开发

由于3D打印技术在定制化产品中的独特优势，其在生物医学、功能性材料、个性化生活用品等领域引起广泛关注。同时，现代中药学亦借助前沿技术的创新与发展，进一步促进传统中医药与高新技术相融合，为人们提供更优质、精准的健康服务。

5.1 生物医学工程产品开发

基于3D打印技术开发的骨组织支架在骨组织工程和再生方面有巨大潜力，为骨缺损的修复和功能重建提供了方案。将具有强骨、补骨等相关功效的中药活性成分与3D打印材料融合可打印出可降解支架。研究发现，搭载中药续断和聚多巴胺的聚乳酸支架，具有明显的提高成骨细胞活性的功能，且活性受中药断续含量敏感调节^[41]。大量研究均表明，中药渣中仍保留中药的部分有效成分。若考虑用中药渣代替中药活性成分，可在提升支架效果的同时，减少对3D打印材料韧性的要求。

5.2 功能性吸附材料产品开发

王力波等^[42]采用FDM-3D打印技术，通过对活性炭外部微观结构的精准设计与打印，实现了中药药渣的高值化转化。具体流程为药渣经粉碎、过筛、高温催化后离心得高纯度纤维素，再与增韧剂、溶解剂等混合，形成可打印浆料；利用打印机挤压成型原理，将混合物打印成预先设计的螺旋蜂窝状结构，最后经氧化锌活化法制得高性能药渣活性炭。该法制得的活性炭孔隙结构可控、吸附面积较传统活性炭显著提升，成本低、效率高，对工厂化生产中的质量控制、环境改善及健康安全具有积极意义。

5.3 绿色园艺资材产品开发

Rivera等^[43]以咖啡渣/聚乳酸复合材料为原料，通过FDM-3D打印技术研制出一款可生物降解花盆。其最优打印方案为将200 μm左右的废咖啡渣与羧甲基纤维素、黄原胶及水以50:8:1.2:100比例混合，采用14号喷头（1.6 mm内径）、1.6 mm喷嘴直径、1.0 mm层高及300 mm/min的挤出速度进行打印。羧甲基纤维素和黄原胶作为可生物降解的黏合剂与增稠剂，显著改善了材料的流动性和成型稳定性。所制得花盆废弃后可家中堆肥处理，实现了药渣的高值化与绿色循环。

5.4 抗菌日用产品开发

周武艺等^[44]基于澳洲茶树本身的抗菌作用，利用澳洲茶树精油提取后剩余废渣制备了一款具有抗菌活性的复合微球，并将其与一种可生物降解的

热塑性塑料聚己内酯混合，以柠檬酸三丁酯为增塑剂，发明了一种具有抗菌活性的、可用于低温3D打印笔的澳洲茶树渣3D打印复合线材。该材料的出现解决了当前市面上的低温3D打印笔线材无抗菌能力或抗菌剂有毒的问题，使3D打印技术以一种低成本且高安全性的方式融入更多人的生活。通过低温3D打印笔，家具修复、教育启蒙等方面创意产品将在生活中大量出现。

6 挑战与未来展望

当前，将3D打印技术有效应用于中药渣复合材料制备及产品开发仍面临诸多挑战。（1）原料层面，由于中药质量、用途及处理方式的不同导致材料组成复杂、成分多样、理化性质不一，进而使3D打印设备难以实现标准化调控，极大地影响打印精度与成品率。（2）辅料层面，考虑到产品类型与用途不同，应根据实际需求在原料中选择性地添加粘合剂、矫味剂、助流剂等辅料，以维持3D打印设备的工作质量，改善产品质量。（3）产品层面，由于中药渣中含有大量的纤维素，3D打印产品表面较为粗糙。若通过升级设备或模型改善外观，则会显著提高成本，因此，平衡产品质量与经济性成为推广过程中的关键难题。（4）监管层面，3D打印产品跨过多类经营领域，界定模糊且可能涉及医疗保健范畴，既要有科学严谨的数据支撑以防虚假营销，又要加快审批进度，避免漫长复杂的程序阻碍其产业化进程。（5）认知层面，普通消费者可能会将“药渣”“废料”与“垃圾”“苦味”等负面印象联系起来。如何通过产品设计和营销扭转这种认知，将其转化为“天然”“环保”“绿色”的象征，是一个巨大的营销挑战。

因此，中药废弃物的开发与应用是未来材料科学与资源循环利用领域的重要方向。通过科学的组分设计与工艺优化，中药渣复合材料不仅在力学性能方面显著增强，还可实现材料的多功能化，如较高的生物相容性和良好的热稳定性。此外，其生物降解特性亦高度契合当前全球可持续发展的迫切需求。3D打印作为一种数字化制造技术，可以打印出具有复杂结构和功能的三维制品，为中药废弃物的高值化利用提供了重要的技术载体。未来，随着材料性能的进一步优化和打印技术的不断升级，中药渣复合材料在生物医学、环境保护、智能包装等领域的应用也将更加广泛。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 龙旭, 卢莹磊, 王珂莹, 等. 中药固体废弃物的能源化发展——“双碳”经济转型中的机遇与挑战 [J]. 中草药, 2025, 56(6): 1877-1887.
- [2] 王明威, 周林, 刘顺会, 等. 中药渣资源化利用探讨 [J]. 广东药科大学学报, 2017, 33(1): 140-143.
- [3] 陶迎泰, 郭清毅, 陈芳, 等. 中药产业化过程中固体副产物的综合利用研究进展 [J]. 中国中医药信息杂志, 2024, 31(3): 174-179.
- [4] 刘冬涵, 梁军, 罗菊元, 等. 3D 打印技术在制剂工艺中的研究进展与应用 [J]. 中草药, 2019, 50(17): 4013-4019.
- [5] 邓文强. 基于 FDM 与铣削的桌面级增减材复合加工机床设计 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(12): 114-118.
- [6] 李丽华. 生物基聚酯功能微球的制备及应用 [D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- [7] 申水玥, 李媛媛, 李云龙, 等. 改性硅铝基废渣固化/稳定 Pb、Cd 污染土工程特性研究 [J]. 工业建筑, 2025, 55(3): 223-230.
- [8] 包玉衡. 中药渣/PLA 复合材料的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [9] 杨冰, 丁斐, 李伟东, 等. 中药渣综合利用研究进展及生态化综合利用模式 [J]. 中草药, 2017, 48(2): 377-383.
- [10] 张晓燕, 龚苏晓, 张铁军, 等. 药用植物废弃物再利用研究现状 [J]. 中草药, 2016, 47(7): 1225-1229.
- [11] 陈阳, 林宁. 纤维素纳米晶的表面接枝修饰及聚酯复合材料的力学增强效应 [J/OL]. 高分子学报, (2025-09-28) [2025-10-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1857.O6.20250926.1041.004>.
- [12] Xu W Y, Pranovich A, Uppstu P, et al. Novel biorenewable composite of wood polysaccharide and polylactic acid for three dimensional printing [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 187: 51-58.
- [13] 王晓雅. 甘草药渣发酵预处理、总黄酮提取及生物活性研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [14] 刘倩, 钟伟, 杨雪, 等. 21 种常用中药渣的营养价值分析及抑菌效果评价 [J]. 饲料研究, 2022, 45(12): 94-99.
- [15] 史海艳, 徐玉国, 房洪英, 等. 中药药渣再生综合利用的研究进展 [J]. 中国当代医药, 2025, 32(20): 195-198.
- [16] 汤少红, 石伟勇, 董越勇. 生物制药药渣资源化利用途径的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 234-236.
- [17] 恽辰珂. 甘草药渣等典型中药固废物的抗性屏障特征及高效资源化利用研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2025.
- [18] 贾宁. 纤维素基可降解生物材料的制备及表征研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [19] 李卫红, 包玉衡, 雷文, 等. 中药渣复合材料研究现状 [J]. 塑料, 2017, 46(5): 81-83.
- [20] 张政委, 曹吏轲, 冯梦真, 等. 木质纤维素材料在可持续包装中的研究进展 [J]. 包装工程, 2025, 46(15): 62-71.
- [21] 张婉靖, 卢燕, 商赛男, 等. 木质生物质细胞壁半纤维素-纤维素相互作用研究进展 [J]. 材料导报, 2025, 39(13): 302-308.
- [22] 赵佳玥, 宗志洁, 彭玺元, 等. 真菌降解木质素的酶及其代谢途径研究进展 [J/OL]. 林业科学, (2025-08-29) [2025-09-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1908.S.20250829.1449.006>.
- [23] 苏婧媛, 刘欣, 韩益, 等. 木质素的提取及其与壳聚糖复合材料的应用研究进展 [J]. 中国造纸, 2025, 44(9): 8-15.
- [24] 卿馨文. 中药渣综合利用研究现状及展望 [J]. 现代农业科技, 2024(7): 116-123.
- [25] 周会年, 徐惠斌, 王威宇, 等. 中药渣与褐煤混磨混燃特性实验研究 [J/OL]. 过程工程学报, (2025-09-15) [2025-10-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4541.TQ.20250912.1450.004>.
- [26] 牟永旭, 谢田炜, 郭欣, 等. 中药渣资源化再利用的研究探讨 [J]. 中药与临床, 2024, 15(5): 94-99.
- [27] 王君明, 冯卫生, 崔瑛, 等. 地黄醇提物及其药渣水提物抗抑郁作用的比较研究 [J]. 中国药学杂志, 2014, 49(23): 2073-2076.
- [28] 王慧杰. 中药渣醋渣栽培平菇试验 [J]. 郑州牧业高等专科学校学报, 2000, 20(3): 177-178.
- [29] 王向积, 王永显, 周俊英, 等. 变废为宝节能增效发展循环经济——中药渣栽培食用菌及其综合利用实践及思考 [J]. 食用菌, 2007(4): 4-5.
- [30] 吕毅东. 富含灵芝的中药渣用于制浆造纸和制备多孔炭材料的研究及应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [31] 无限极(中国)有限公司. 一种利用废弃中药渣造纸制浆的方法: 中国, CN201610994370.0 [P]. 2017-02-15.
- [32] 胡玉杰, 曾永红, 刘永红, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺研究进展 [J/OL]. 复合材料科学与工程, (2025-09-26) [2025-10-01]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.20250926.1446.002>.
- [33] 李向丽, 董晓龙, 冯彦洪, 等. 热处理剑麻/PLA 复合材料的制备与力学性能研究 [J]. 塑料科技, 2012, 40(8): 72-75.
- [34] Verma D, Goh K L. Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies [J]. *J Compos Sci*, 2021, 5(7): 175.
- [35] 陈荣源, 刘全金, 郭锐标, 等. 叶片挤出机制备中药渣

- 纤维/回收 ABS 复合材料的结构与性能研究 [J]. 高分子通报, 2014(2): 105-110.
- [36] 冯彦洪, 张叶青, 李向丽, 等. 几种中药渣/PP 复合材料的制备与性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(5): 121-124.
- [37] Mendes J F, Martins J T, Manrich A, et al. Thermo-physical and mechanical characteristics of composites based on high-density polyethylene (HDPE) e spent coffee grounds (SCG) [J]. *J Polym Environ*, 2021, 29(9): 2888-2900.
- [38] Cai M, Takagi H, Nakagaito A N, et al. Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber-reinforced composites [J]. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2016, 90: 589-597.
- [39] Sanivada U K, Mármol G, Brito F P, et al. PLA composites reinforced with flax and jute fibers-a review of recent trends, processing parameters and mechanical properties [J]. *Polymers*, 2020, 12(10): 2373.
- [40] Hamat S, Ishak M R, Salit M S, et al. The effects of self-polymerized polydopamine coating on mechanical properties of polylactic acid (PLA)-kenaf fiber (KF) in fused deposition modeling (FDM) [J]. *Polymers*, 2023, 15(11): 2525.
- [41] Yeh C H, Chen Y W, Shie M Y, et al. Poly(dopamine)-assisted immobilization of Xu Duan on 3D printed poly(lactic acid) scaffolds to up-regulate osteogenic and angiogenic markers of bone marrow stem cells [J]. *Materials*, 2015, 8(7): 4299-4315.
- [42] 王力波, 方康平, 彭秋然, 等. 基于 3D 打印的中药废渣制活性炭技术研究 [J]. 节能, 2020, 39(6): 59-61.
- [43] Rivera M L, Bae S S, Hudson S E. Designing a sustainable material for 3D printing with spent cofee grounds [A] // *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference* [C]. PA: Association for Computing Machinery, 2023: 294-311.
- [44] 周武艺, 聂健良, 郑文旭, 等. 一种澳洲茶树复合微球及其 3D 打印复合材料的制备方法: 中国, CN115284478A [P]. 2022-11-04.

[责任编辑 赵慧亮]