

# 超声-生物酶协同废纸脱墨工艺的经济性分析与成本优化路径探索

黄秋昀<sup>1</sup> 黄慧妍<sup>2</sup> 杨金玉<sup>3</sup> 王 昊<sup>4</sup> (通讯作者)

南宁学院 广西南宁 530200

**摘要:** 废纸作为重要的可再生资源,其高效清洁利用对缓解中国纤维原料短缺、推动造纸工业可持续发展具有重要意义。超声-生物酶协同脱墨技术因其环保、高效及提升纸浆质量的潜力备受关注。本文旨在构建超声-生物酶协同脱墨工艺(下称“超声酶工艺”)的成本模型,系统分析其经济性,并探讨关键成本因素及优化策略。研究将通过文献分析、模型构建和比较分析法,剖析该工艺相较于传统方法的成本效益。通过工艺参数优化、系统集成及原辅料的合理选择,超声酶工艺有望在化学品消耗、环保成本及产品附加值方面展现综合经济优势。

**关键词:** 超声脱墨; 生物酶脱墨; 成本分析; 成本优化

## 一、绪论

### (一) 研究背景、意义及国内外现状

中国是全球最大的纸张生产国和消费国,再生纸浆是中国造纸工业最重要的纤维原料来源,2023年消耗量占纸浆总消耗量的54%。然而,自中国全面禁止废纸进口(“禁废令”)以来,国内高质量废纸原料供应紧张,废纸利用率亦有所下降,提升国内废纸处理技术水平和利用效率迫在眉睫。国家大力推行循环经济发展战略,“十四五”规划明确了废纸利用目标,并强调发展绿色低碳技术。传统工艺难以符合日益严格的环保要求和高质量再生浆需求。<sup>[1]</sup>超声酶工艺结合了超声波的物理作用与生物酶的催化特性,具有减少化学品用量、降低环境污染、温和处理纤维并可能提升纸浆品质的潜力。<sup>[2]</sup>国内外已有研究探索了超声波或生物酶单独用于脱墨的效果,以及两者协同作用的机理和初步效果。<sup>[3]</sup>例如,研究表明超声波可增强酶的及性与传质效率,甚至可能直接增强部分酶的催化活性。<sup>[4]</sup>然而,针对该协同技术系统性的经济性分析,特别是成本构成、与传统工艺的经济效益对比以及具体的成本优化路径研究尚不充分,这制约了其工业化推广的步伐。因此,深入研究超声酶工艺的经济性并寻求成本

优化方案,对于推动其产业化应用、促进造纸行业技术进步和绿色转型具有重要的理论价值和现实指导意义。

### (二) 研究目标、主要内容与方法

本研究的核心目标在于:一是系统构建成本分析框架,识别其关键成本构成要素;二是基于此框架,对其经济性进行评价,并与传统工艺进行比较,分析其潜在的经济优势与挑战;三是探讨并提出针对性的成本优化策略,为该技术的工业化应用提供经济可行性支持。主要研究内容包括:

(1) 超声酶工艺的原理、流程特点及其主要的固定成本和可变成本构成分析。

(2) 建立经济性评价模型,选择合适的经济指标,并对关键成本驱动因素进行分析。

(3) 与典型的传统工艺在主要经济技术指标上进行对比分析。

(4) 从工艺参数优化、原辅料选择与管理、系统集成与自动化、规模化生产及副产物资源化利用等多个角度,提出超声酶工艺的成本优化路径。

本研究将主要采用文献研究法,系统梳理国内外相关研究成果和行业数据;比较分析法,对比不同技术方案的优劣;模型分析法,构建成本与效益评估模型;并结合案例数据(若无可获取的直接工业案例,则基于文献报道的实验或中试数据进行匡算与分析),力求研究结论的客观性和实用性。

## 二、超声酶工艺的成本特性与经济性分析基础

### (一) 工艺原理、流程及主要成本构成

超声酶工艺的核心是利用超声波的物理效应与生物

**项目基金:** 2024年大学生创新创业训练计划《绿意生态——高水分生物质材料发酵除臭技术》(编号:202411549026)

**作者简介:** 黄秋昀(2003.9—),女,壮族,广西贺州人,本科,单位:南宁学院,研究方向:能耗成本控制,能耗管理。

酶的催化特性共同作用于废纸纤维和油墨。超声波通过空化效应、机械振动及局部热效应，有效剥离油墨颗粒，并可能改善纤维结构，为酶的作用创造更有利的条件。生物酶（如纤维素酶、半纤维素酶、脂肪酶等）则通过特异性催化降解油墨或纤维与油墨的结合界面，促进油墨的脱除，且作用条件温和，对纤维损伤小。两者的协同作用旨在实现“1+1>2”的效果，提高脱墨效率，减少化学品依赖，并改善纸浆质量。典型的工艺流程一般包括废纸分拣、碎解制浆、超声处理模块、生物酶反应模块、油墨分离、纸浆净化筛选、浓缩等环节。该工艺的主要成本构成可分为：

固定成本：主要包括专用设备投资等初期投入。

可变成本（运行成本）：

废纸原料成本：根据不同等级废纸的市场价格和采购量确定，是重要的成本项。

酶制剂成本：所选酶种的单价及吨浆耗用量是核心可变成本之一。

能源消耗：超声波设备运行的电耗是新增能耗点，但整体工艺可能因反应条件温和、后续处理简化而实现综合节能。泵送、搅拌等常规电耗亦需计入。

水资源消耗及废水处理成本：虽然目标是减少化学品和污染物，但仍有水耗和相应的处理费用。

辅助化学品成本：可能需要的少量pH调节剂、消泡剂、环保型捕集剂等。

人工成本：设备操作、维护及管理人员的薪酬。

设备维护与折旧：设备的日常维护费用及按年限计提的折旧。

### （二）经济性分析方法与关键指标

对超声酶工艺进行经济性分析，首先需明确分析的边界条件和基本假设。边界条件包括生产规模、所处理的废纸类型、目标再生浆的质量等级及预期用途。基本假设则涉及设备使用寿命、资金折现率、主要原辅材料（废纸、酶、能源）的平均价格水平、产品（再生浆）的预期销售价格等。成本效益分析模型框架的构建是核心步骤。该模型应能系统核算项目的总投资（固定资产投资和流动资金）、年度总成本（固定成本摊销和可变运行成本）、年度总收益（再生浆销售收入，并可考虑因质量提升或替代原生浆带来的增值收益）。为全面评估其经济性，将选择以下关键经济评价指标：

单位产品成本（元/吨浆）：反映生产每吨合格再生脱墨浆所需的总成本。

投资回收期（PBP，年）：包括静态投资回收期和动态投资回收期。

净现值（NPV）：在设定的折现率下，项目未来现金净流量的总现值，用于判断项目的绝对盈利能力。

内部收益率（IRR）：使项目净现值等于零的折现率。

盈亏平衡点：确定项目达到不亏不赚时的产量或销售额水平。

通过对这些指标的计算和分析，可以为该工艺的经济可行性和投资决策提供量化依据。

### 三、超声酶工艺的经济性评价与影响因素

#### （一）核心成本要素（酶、超声、原料）的经济影响分析

超声酶工艺的经济性高度依赖于几个核心成本要素的有效控制。

酶制剂成本影响主要体现在：

酶的种类与价格：不同类型（如纤维素酶、脂肪酶、漆酶等）及不同来源（国产、进口）的酶制剂价格差异显著。

酶的添加量与效率：吨浆酶耗量是决定酶成本的关键。超声波的协同作用有望提高酶的催化效率，从而可能降低酶的有效添加量，达到降本目的。

酶的稳定性与失活：酶在超声、温度、pH等条件下的稳定性及失活速率，影响其实际利用效率和补充频率。

超声系统成本：

设备投资：工业级大功率超声波反应器及其配套电源、控制系统的初期投资相对较高。

能源消耗：超声波发生器本身消耗电能，是主要的运行成本之一。其能耗与超声功率、作用时间、处理量及能量转换效率密切相关。

维护成本：超声换能器等核心部件的寿命及更换维护成本也需考虑。

废纸原料成本：废纸作为主要原料，其成本对整体经济性影响巨大。

原料等级与价格：不同等级的废纸采购价格差异大。

预处理成本：废纸进厂后的分拣、除杂、碎解等预处理工序产生的成本。

供应稳定性与价格波动：国内废纸市场价格受政策、回收率、季节性等多种因素影响，存在波动风险。酶成本占比过高将削弱技术的经济竞争力，而超声波带来的酶效提升或化学品替代的经济价值，则可弥补其设备投资和能耗。

#### （二）与传统工艺的经济效益比较及敏感性分析

为评估超声酶工艺的经济竞争力，与广泛应用的传统工艺进行比较。

经济效益比较维度：

**直接成本：**对比在相同处理规模和原料条件下，两者在化学品、能源、水资源消耗、设备折旧、人工及维护等方面的单位运营成本。

**环保成本：**比较废水排放量、COD/BOD浓度及处理成本；脱墨污泥产生量及处置成本。

**产品价值：**评估再生浆的质量差异（白度、强度、尘埃度）及其对售价的影响。

**纤维得率：**化学法可能对纤维造成一定损伤导致得率下降，而温和的协同技术有望保持较高得率。

**综合经济效益评估：**基于上述比较，综合计算和分析两种工艺的投资回报率（ROI）、净现值（NPV）等指标判断。

**敏感性分析：**识别影响比较结果的关键参数，如酶制剂价格、超声设备价格、电价、废纸与成品浆价差、环保税费标准等。

#### 四、超声酶工艺的成本优化路径

##### （一）工艺操作参数的优化与集成

工艺参数的精细调控是实现成本与效益平衡的核心。

**超声参数优化：**针对不同废纸种类和油墨特性，系统优化超声波的频率（常用20–60kHz）、功率密度、作用时间、脉冲模式（占空比）以及反应体系温度。目标是在保证有效剥离油墨、强化酶作用的同时，最大限度地降低超声设备的能耗，并避免对纤维造成不必要的损伤。

**酶反应条件优化：**精确选择和复配高效的脱墨酶种（如纤维素酶、半纤维素酶、脂肪酶、酯酶、漆酶等），并对其添加量、反应pH值（通常中性或弱碱性）、温度（通常40–60℃）及反应时间进行优化。目标是在超声协同下，用最少酶量、在最短时间内达到理想效果，从而直接降低酶成本。

**系统集成与过程控制：**优化超声处理单元与酶反应单元的耦合方式，以及与前后工序（如碎解、浮选/洗涤）的衔接。推广应用在线监测与智能控制系统，对关键参数进行实时监控和自动调节，确保工艺稳定运行在最优状态，减少人为波动带来的物耗和能耗增加。同时，加强水循环利用和余热回收，降低综合水耗和能耗。

##### （二）原料、辅料及规模化生产的降本策略

**废纸原料的优化管理：**建立严格的废纸进厂质量检验和分级标准。根据市场价格和技术适应性，灵活调整不同等级废纸的配比。加强废纸的预处理（如高效干式筛选、除杂），去除硬质杂物、塑料薄膜和部分“不粘物”，可减少后续超声和酶的有效消耗，保护设备，并提高成品浆质量，间接降低成本。

**酶制剂及辅助化学品的经济选用：**与酶制剂供应商建立长期合作，通过批量采购、参与前期菌种筛选或酶制剂定制开发等方式，努力降低高性能复合酶制剂的采购成本。对于少量必需的辅助化学品（如pH调节剂），优先选用价格低廉、环保且与酶活兼容的品种。

**规模化生产的经济效应：**随着生产规模的扩大，单位产品分摊的固定资产投资（如超声设备、反应釜）和部分固定运营成本（如管理费用）会降低。大规模生产也有利于在原料采购、酶制剂采购中获得更好的议价能力，从而降低单位成本。

**副产物（脱墨污泥）的资源化利用：**超声酶工艺产生的污泥量和特性可能与传统化学法不同。积极探索其减量化和资源化利用途径，如用于制备建筑材料（砖、水泥辅料）、土壤改良剂（需确保无害化）或进行热解气化能源回收等。

#### 五、结论与展望

通过构建成本模型和比较分析，系统探讨了超声酶工艺的经济性。主要结论认为：该协同技术在理论上和初步实践中展现出降低化学品消耗、减少环保处理成本、提升再生纸浆质量和附加值的潜力，具备优于传统工艺的综合经济效益前景。关键成本驱动因素包括酶制剂价格、超声设备投资与能耗、以及废纸原料成本和质量。通过对工艺参数（超声、酶应用）、原辅料选择、系统集成及规模化生产等方面的持续优化，可有效控制并降低其运行成本。本研究的局限性在于，部分经济性分析可能依赖于文献报道的实验室或中试数据进行匡算，与真实的工业大规模生产数据可能存在差异。

展望未来，随着高效低成本专用复合酶制剂的开发、节能型大功率工业超声设备技术的进步，以及智能化控制技术的应用，超声酶工艺的经济性将得到进一步提升，有望成为废纸清洁高效利用的重要技术路径。

#### 参考文献

- [1]徐清华, 秦梦华, 石淑兰, 等.旧报纸纤维素酶/半纤维素酶与漆酶协同脱墨工艺[J].中国造纸, 2004, (08): 8–11.
- [2]林影.生物酶在造纸工业绿色制造中的应用[J].生物工 程学报, 2014, 30(01): 83–89.DOI: 10.13345/j.cjcb.130425.
- [3]王志杰, 杜敏.超声波技术及其在造纸工业中的应用[J].纸和造纸, 2005, (01): 74–76.
- [4]陈劲柏.对酶法与物理法联合脱墨的探究[J].国际造纸, 2014, 33(06): 46–53.