基于工艺仿真的生物酶废纸脱墨技术经济性评价

肖思柠 李清丽 陆秀芬 *

南宁学院，广西 南宁 530200

摘 要：为评估生物酶废纸脱墨产业化可行性，本文以年产 9.9 万 t 脱墨浆（300 t/d）为基准，建立实验室参数到吨浆成本和投资指标的映射模型。酶法吨浆成本 3467 元 /t，较化学法（3820 元 /t）降低约 353 元 /t；年净节约约 3300 万元，投资 1 亿元时回收期约 3.0 a，NPV（8%，10 a）约 12140 万元，IRR 约 30.7%。废纸得率、电价和规模是关键变量，在废纸价格高、能源成本高、环保约束强的地区具备产业化替代条件，但需配套复合酶或固定化酶技术以降低风险。

关键词：生物酶脱墨；化学脱墨；工艺仿真；技术经济评价；产业化替代；敏感性分析

DOI：10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202610022

0 引言

废纸再生可缓解纤维资源紧张和降低碳排放，但传统化学脱墨依赖 NaOH、Na_2SiO_3、H_2O_2 及大量表面活性剂，存在化学品用量大、废水 COD/BOD_5 高、能耗高和纤维损伤等弊端 [1][2]。生物酶脱墨可在温和条件下剥离油墨并降低废水负荷 [2][3]，Lee 等 [1] 和 Pathak 等 [2] 报道了酶法在废水和油墨去除率上的优势。然而，实验室结果直接放大面临原料波动、酶成本、停留时间和公用工程约束等不确定性 [4][8]，本文定量回答其替代条件。

1 实验室参数基础

酶法脱墨常用酶包括纤维素酶、淀粉酶、脂肪酶、木聚糖酶和漆酶等，通过水解纤维表面或氧化降解油墨粘结层剥离油墨 [1][2][8]。典型工艺窗口见表 1：张玉双等 [4] 以 1.2 U/g 纤维素酶获得白度 70.25% ISO；王凤等 [6] 采用角质酶与表面活性剂协同脱墨效果优于单一酶；刘晓丽等 [7] 以 2 U/g 纤维素酶处理混合办公废纸，油墨去除率明显提高。徐红霞等 [5] 提出复合酶脱墨剂用量 0.1 – 0.6 kg/t、温度 35 – 55 ℃、时间 60 – 120 min 的工业窗口。

表1 典型实验室酶法脱墨参数

酶种 / 体系	酶用量	温度 /℃	pH	浆浓 /%	时间 /min	效果指标	来源
纤维素酶	1.2 U/g	55 – 60	4.5 – 5	9	15	白度 70.25% ISO	[4]
角质酶 + 表活	10 U/g+0.2%	50	—	—	30	白度和油墨去除率提高	[6]
纤维素酶 + 表活	2 U/g	55	8.5	6	60	油墨去除率明显提高	[7]
复合生物酶脱墨剂	0.1 – 0.6 kg/t	35 – 55	—	—	60 – 120	适用于办公废纸	[5]

酶法化学品支出下降，但酶制剂构成新成本项；复合酶或酶与表面活性剂协同可在更宽窗口维持活性，降低运行风险 [6][7]。

2 工艺仿真建模

工艺仿真边界为“废纸进厂—脱墨浆外送”，包括碎浆、混合调浓、酶反应或化学处理、浮选 / 洗涤、浓缩和废水处理六个单元。映射规则：酶用量按干浆折算为 kg/t；温度和 pH 保持优化窗口；反应时间按混合效率与反应器体积换算；得率保留系数酶法 84%、化学法 82%；公用工程按单元负荷确定，蒸汽、水、废水和污泥量均较化学法降低。模型进行了质量闭合校验。

工业混合效率、停留时间分布和原料异质性会使实际效果偏离小试最优值，本文通过敏感性分析覆盖不确定性，输出与文献成本及废水负荷趋势一致。

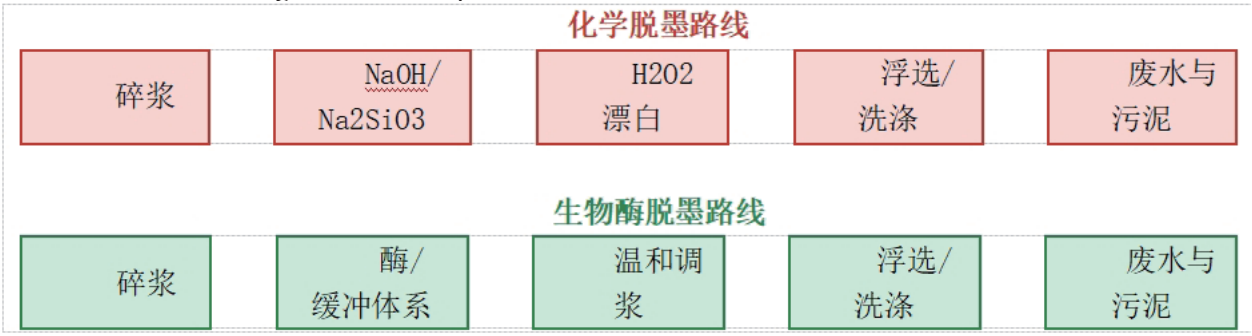


图1 化学脱墨与生物酶脱墨工艺对比流程

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

主要输入假设见表 2。化学品与公用工程单价取行业区间，改造投资和运维针对 300 t/d 产线估算，关键参数均纳入敏感性分析以保证稳健性。

表2 基准情景主要假设与输入

项目	基准值 / 说明
额定产能	300 t/d，年运行 330 d，年产约 9.9 万 t 绝干脱墨浆
废纸到厂价	2 000 元 /t（湿基含水率 12%）
化学法总得率	82%（模型假设）
酶法总得率	84%（模型假设）
化学法化学品	NaOH 30、Na_2SiO_3 20、H_2O_2 15、表面活性剂 3、螯合剂 1 kg/t 浆
酶法化学品	缓冲剂 2、NaOH 3、表面活性剂 1.5、酶 0.4 kg/t 浆
公用工程	电 0.65 元 /kWh、蒸汽 190 元 /t、新鲜水 4.5 元 /m^3、废水处理 18 元 /m^3
人工维修等	120 元 /t 浆
改造投资	10 000 万元（含酶反应槽、加药自控、仪表及配套升级）
新增运维	20 元 /t 浆；折现率 8%、评价期 10 a

3 技术经济评价

基于表 2，化学法和酶法吨浆成本分别为 3820 元 /t 和 3467 元 /t，酶法降低约 353 元 /t，主要来自化学品减量、蒸汽电力节省和得率提高带来的废纸节约。扣除运维 20 元 /t 后净节约约 333 元 /t，年净节约约 3299.6 万元。投资 1 亿元时回收期约 3.0 a，NPV（8%，10 a）约 12140 万元，IRR 约 30.7%。

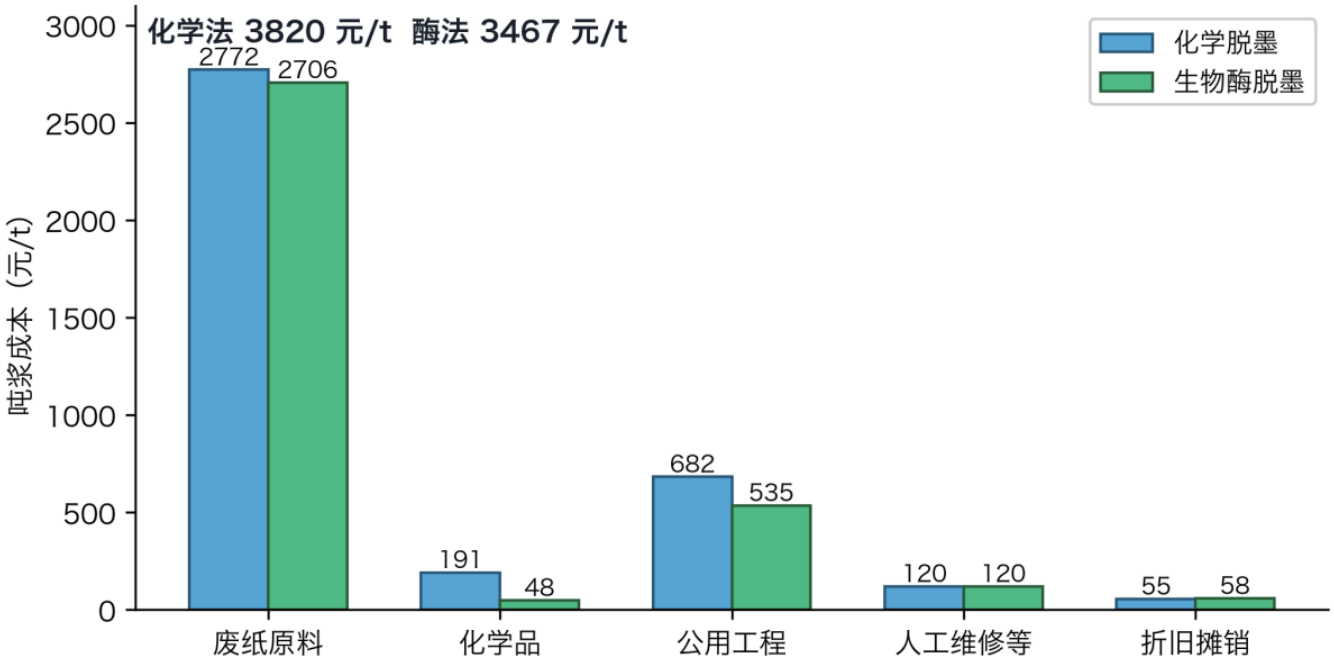


图2 吨浆成本构成对比

表3 不同规模情景技术经济指标汇总

指标	100 t/d	300 t/d	500 t/d
化学法吨浆成本 /（元 /t）	3 995.12	3 820.12	3 765.12
酶法吨浆成本 /（元 /t）	3 638.83	3 463.83	3 408.83
吨浆成本差 /（元 /t）	356.29	356.29	356.29
年净节约 /（万元 · a^{-1}）	1 109.8	3 299.6	5 548.8
静态回收期 /a	约 9.0	约 3.0	约 1.8
NPV（8%，10 a）/ 万元	约 -2 550	约 12 140	约 28 270

表 3 显示，固定成本随规模摊薄，100 t/d NPV 仍为负，300 t/d 以上转正，500 t/d 回收期降至约 1.8 a。敏感性分析表明废纸得率影响最大（80%–87% 对应 3374–3533 元 /t），电价次之，酶价和酶用量影响温和；企业决策应综合废纸价格、电价、碳收益和环保成本，避

免仅以酶价高低为依据[9][10]。

4 产业化替代路

产业化应优先选择废纸价格高、能源 / 水处理成本高、环保约束强、废纸质量可控的地区，单线产能不宜小于 100 t/d。改造保留碎浆、浮选和洗涤单元，新增酶制剂计量与恒温反应槽及 pH 在线控制，同步升级废水处理并预留碳减排接口。主要风险包括原料波动、酶制剂供应与活性批次差异、复合酶 / 固定化技术成熟度不足；建议采用复合酶 / 固定化酶循环使用、建立废纸分级标准、分阶段改造验证后推广[1][3][5]。

5 结论与展

本文以工艺仿真为桥梁，将实验室酶法脱墨参数映射到年产 9.9 万 t 工业规模。酶法吨浆成本较化学法降低约 353 元 /t，1 亿元投资回收期约 3.0 a，NPV 约 12140 万元。废纸得率、电价和规模是关键变量，未来需结合全生命周期评价量化外部收益。

参考文献：

[1] Lee C K, Ibrahim D, Ibrahim C O, Wan Rosli W D. Enzymatic and chemical deinking of mixed office wastepaper and old newspaper: paper quality and effluent characteristics[J]. BioResources, 2011, 6(4): 3859−3875.

[2] Pathak P, Bhardwaj N K, Singh A K. Optimization of chemical and enzymatic deinking of photocopier waste paper[J]. BioResources, 2011, 6(1): 447−463.

[3] Kumar A, Dutt D. A comparative study of conventional chemical deinking and environment−friendly bio−deinking of mixed office wastepaper[J]. Scientific African, 2021, 12: e00793.

[4] 张玉双，刘婧，陈礼辉，等 . 混合办公废纸的纤维素酶脱墨 [J]. 纸和造纸，2014，33(1): 4−7.

[5] 徐红霞 . 应用于办公废纸的脱墨再利用方法 [J]. 中华纸业 ,2021,42(22):50−51.

[6] 王凤，龙柱，吴美燕，等 . 角质酶 / 表面活性剂体系对混合办公废纸的协同脱墨作用 [J]. 化工学报，2017，68(12): 4750−4755.

[7] 刘晓丽，邱丙中，聂爱玲，等 . 混合办公废纸纤维素酶法脱墨工艺研究 [J]. 包装工程，2018，39(13): 47−51.

[8] 丁凯凯，张国宏，张鑫淼，等 . 生物酶在废纸脱墨中的应用综述 [J]. 造纸装备及材料，2024，53(11): 1−4.

作者简介：肖思柠（2006.01—），女，汉族，广西玉林人，研究方向：资源循环工艺仿真、绿色造纸技术经济评价。

项目信息：广西大学生创新创业训练计划《酶力新生》编号：S202511549076。