

Research on Green Papermaking Technology and Resource Recycling Utilization

Xuejun Qian

Hebei Huatai Paper Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 051530, Hebei Province, China

Abstract: Against the backdrop of increasing global environmental awareness and resource constraints, the traditional paper industry is facing challenges such as high energy consumption, high pollution, and resource waste, making green transformation an inevitable trend. This article focuses on green papermaking technology and resource recycling, systematically sorting out core technology paths such as clean production, waste paper regeneration, and biomass energy substitution, and analyzing their application modes in pulp making, de ink, water circulation, and energy cascade utilization. By comparing the environmental benefits and economic efficiency of traditional processes and green technologies, the significant advantages of green papermaking technology in reducing pollutant emissions (such as COD and SO₂), reducing carbon emissions, and improving resource utilization have been revealed. Based on industry practice cases, this study proposes strategies to optimize the waste paper recycling system, overcome key technological bottlenecks, and improve policy incentives, providing theoretical references and practical paths for promoting low-carbon and circular development in the paper industry, and helping to achieve synergistic improvement of environmental and economic benefits.

Keywords: Green papermaking technology; Resource recycling; Clean production; Sustainable development

绿色造纸技术与资源循环利用研究

钱学君

河北华泰纸业有限公司, 中国·河北石家庄 051530

摘要: 在全球环保意识增强与资源约束加剧的背景下, 传统造纸行业面临高能耗、高污染与资源浪费等挑战, 绿色转型成为必然趋势。本文聚焦绿色造纸技术与资源循环利用, 系统梳理了清洁生产、废纸再生、生物质能源替代等核心技术路径, 分析了其在制浆、脱墨、水循环及能源梯级利用等环节的应用模式。通过对比传统工艺与绿色技术的环境效益与经济性, 揭示了绿色造纸技术在降低污染物排放(如 COD、SO₂)、减少碳排放及提升资源利用率方面的显著优势。研究结合行业实践案例, 提出优化废纸回收体系、突破关键技术瓶颈及完善政策激励等对策, 为推动造纸行业低碳化、循环化发展提供理论参考与实践路径, 助力实现环境效益与经济效益的协同提升。

关键词: 绿色造纸技术; 资源循环利用; 清洁生产; 可持续发展

1 引言

造纸工业作为国民经济的基础性产业, 在推动社会发展的同时, 长期面临资源消耗大、环境污染重等突出问题。传统造纸工艺依赖木材等原生纤维原料, 制浆过程中需消耗大量水资源与化学药剂, 并产生黑液、污泥等高污染废弃物, 导致森林资源过度砍伐、水体富营养化及温室气体排放增加。据统计, 中国造纸行业废水排放量长期位居工业领域前列, 单位产品能耗与污染物排放强度显著高于发达国家水平^[1]。与此同时, 全球范围内资源短缺与生态保护压力加剧,

迫使行业重新审视发展模式。

在此背景下, 绿色造纸技术通过优化工艺流程、提升资源循环利用率及开发清洁能源, 成为破解环境约束与资源瓶颈的关键路径。近年来, 废纸再生、无氯漂白、生物质能源替代等技术的突破, 为行业低碳转型提供了技术支撑; 而循环经济理念的深化, 推动企业构建“原料-生产-废弃物”全链条资源化体系。本文立足绿色造纸技术与资源循环利用的协同创新, 系统探讨其技术路径、实践模式与行业价值, 以期为推动造纸工业可持续发展提供科学依据与实践参考。

2 绿色造纸技术概述与发展现状

2.1 绿色造纸技术定义与分类

绿色造纸技术是以资源高效利用、环境友好为核心目标，通过工艺创新与系统优化，实现造纸生产全流程减污降碳、资源循环的技术体系^[2]。其核心内涵涵盖清洁生产、废纸再生、副产物资源化及清洁能源替代四大维度，具体分类如下：

（1）清洁生产技术：聚焦制浆环节的污染物源头控制，包括无氯漂白、低能耗机械制浆及生物酶预处理技术，通过减少化学药剂用量、降低能耗与废水毒性，提升原料利用率。

（2）废纸再生技术：以废纸为原料，通过脱墨、纤维分级与强化净化工艺，实现高附加值再生纸生产。关键技术包括浮选脱墨、酶法脱墨及热分散处理，可有效去除油墨、胶黏物等杂质，提升再生纤维品质。

（3）副产物资源化技术：针对制浆黑液、污泥等废弃物，开发碱回收、木质素提取、生物炭制备及中水回用技术，将污染物转化为能源或工业原料，形成“资源-产品-废弃物-再生资源”闭环。

（4）清洁能源替代技术：利用生物质锅炉替代燃煤锅炉，将黑液、废木屑等生物质转化为热能或电力；同步推广余热回收、沼气发电及分布式光伏，减少化石能源依赖。

2.2 国内外技术发展现状

（1）国际技术进展：欧美国家凭借政策驱动与技术积累，在绿色造纸领域处于领先地位。例如，芬兰UPM集团通过“生物精炼”模式，将制浆黑液转化为生物柴油与木质素基材料；瑞典斯道拉恩索公司实现95%废水回用率，并建成全球首个零化石燃料纸厂。美国则依托废纸回收体系，推动再生纸生产技术标准化管理，其脱墨效率较传统工艺提升30%以上。

（2）国内技术现状：中国绿色造纸技术发展呈现“局部突破、整体追赶”态势。部分龙头企业（如玖龙纸业、晨鸣纸业）已建成废纸脱墨-纤维分级-再生纸一体化产线，但中小型企业仍面临技术装备落后、废纸原料质量波动等问题。清洁生产方面，无氯漂白技术逐步普及，但国产关键设备的稳定性与进口产品存在差距；黑液碱回收率在大型企业可达98%，但中小纸厂因投资成本高而推广受阻。

（3）政策与市场差异：欧盟通过碳关税与循

环经济指令倒逼企业转型，而中国以《造纸工业“十四五”发展规划》为纲领，通过环保督察、差别电价等手段引导绿色升级，但技术补贴与税收优惠力度有待加强。

2.3 技术发展趋势

（1）智能化与数字化深度融合：AI算法与工业互联网技术加速渗透，推动生产过程实时监测与动态优化。例如，基于机器视觉的废纸分拣系统可精准识别杂质，提升再生纸品质；智能控制系统通过调节制浆参数，降低单位产品能耗10%-15%。

（2）跨学科技术突破：生物技术、纳米材料与新能源技术的交叉应用成为新方向。例如，基因工程菌可定向降解木质素，提高制浆得率；纳米纤维素增强再生纸强度，减少原生纤维用量；氢能燃料电池与储能系统逐步应用于造纸园区，实现电力供应“绿电化”。

（3）全产业链协同创新：行业从单一技术升级转向系统化解决方案^[3]。例如，建立“林-浆-纸-能”一体化基地，通过种植速生林保障原料供给，同步配套生物质发电与碳汇交易；构建废纸回收-脱墨-污泥建材化全链条，将废弃物资源化率提升至90%以上。

（4）绿色标准与认证体系完善：国际组织推动森林可持续认证与碳足迹标签普及，倒逼企业提升全生命周期环境绩效。国内正加快制定绿色造纸评价标准，涵盖能耗、水耗、污染物排放等指标，为技术升级提供量化依据。

3 资源循环利用模式与实践路径

3.1 废纸回收与再生利用体系

废纸作为造纸行业重要的二次纤维资源，其高效回收与再生利用是构建循环经济的关键环节。当前，废纸回收体系呈现“分类-运输-脱墨-再生”全链条协同特征：

（1）分类标准与网络优化：通过建立废纸分级标准（如OCC、ONP、MOW），提升原料品质可控性。例如，欧美国家采用“单流回收”与“智能分拣”结合模式，利用近红外光谱技术自动识别废纸类型，分类精度达95%以上；国内部分城市试点“互联网+回收”平台，通过积分奖励机制提高居民参与度，废纸回收率较传统模式提升20%。

（2）脱墨技术与纤维升级：针对混合废纸中的油墨、胶黏物等杂质，采用浮选脱墨与酶法脱墨协同工

艺。浮选法通过气泡黏附油墨颗粒实现分离，而酶法脱墨利用纤维素酶、漆酶等生物制剂降解胶黏物，二者结合可使再生纸白度提高5-8个ISO单位，纤维保留率达90%以上。

(3) 再生纸品质提升与市场拓展：通过纤维分级与强化净化技术，再生纸可满足包装纸、文化纸等中高档产品需求。例如，芬兰Metsa集团利用超临界CO₂脱墨技术，生产出媲美原生浆的食品级包装纸；国内企业通过添加纳米纤维素增强再生纸强度，使其应用于高端印刷领域。

3.2 制浆副产物综合利用

制浆过程中产生的黑液、污泥等副产物，通过资源化技术可转化为能源、材料或工业原料，实现“变废为宝”：

(1) 黑液碱回收与木质素提取：黑液经蒸发浓缩后送入碱回收炉，燃烧产生的热能用于发电，同时回收的碱液可循环用于蒸煮工序。全球大型纸厂碱回收率普遍达95%以上，部分企业进一步提取木质素，开发生物塑料、胶黏剂等高附加值产品。例如，瑞典Domtar公司通过改性木质素替代20%苯酚，生产环保型酚醛树脂。

(2) 污泥建材化与生物炭制备：制浆污泥含大量纤维素与无机盐，经热解或水热炭化可转化为生物炭，用于土壤改良或吸附剂；或与水泥、粉煤灰混合制成轻质砖，抗压强度达10MPa以上。日本王子制纸集团建成全球首条污泥制砖生产线，年处理污泥10万吨，产品符合JIS A 5209标准。

(3) 中水回用与废弃物协同处置：通过膜生物反应器（MBR）与反渗透（RO）组合工艺，中水回用率可达90%以上，减少新鲜水取用量。同时，将废木屑、树皮等与污泥混合堆肥，用于厂区绿化或周边农田，形成废弃物内部循环。

3.3 水资源循环利用技术

造纸行业是用水大户，水资源循环利用技术通过“源头减量-过程控制-末端回用”实现节水降耗：

(1) 闭路循环水系统设计：在制浆、抄纸等环节采用逆流洗涤、白水封闭循环技术，减少清水用量。例如，美国国际纸业（IP）通过优化白水梯级利用流程，吨纸耗水量从25m³降至8m³；国内企业通过引入智能水表与泄漏监测系统，将管网漏损率控制在3%以内。

(2) 膜分离与高级氧化技术：针对中水回用中的难降解有机物，采用超滤（UF）-纳滤（NF）-反渗透（RO）组合工艺，COD去除率达98%以上。对于膜污染问题，引入电化学氧化或臭氧催化氧化预处理，延长膜使用寿命30%-50%。

(3) 雨水收集与厂区水生态修复：建设雨水花园、人工湿地等生态设施，收集厂区雨水并净化后回用。例如，德国海德堡纸业集团在厂区构建“雨水-中水-生产用水”三级循环体系，年节水超100万吨，同时改善区域水环境。

3.4 能源梯级利用与碳减排

能源梯级利用通过“热电联产-余热回收-清洁能源替代”模式，降低造纸过程碳排放：

(1) 生物质锅炉与热电联产：以黑液、废木屑等生物质为燃料，替代燃煤锅炉发电供热。例如，芬兰斯道拉恩索公司建成全球首个零化石燃料纸厂，生物质能源占比达100%，年减排CO₂超50万吨；国内企业通过流化床锅炉技术，将生物质燃烧效率提升至85%以上。

(2) 余热回收与分布式能源系统：利用纸机干燥部、碱回收炉等环节的余热，通过热泵、有机朗肯循环（ORC）等技术发电或供暖。例如，日本制纸集团通过ORC技术回收余热，年发电量达2000万kWh，相当于减少标煤消耗6000吨。

(3) 碳捕集与碳汇交易：针对剩余碳排放，探索化学吸收、生物固碳等技术。例如，加拿大Catalyst Paper公司试点胺基溶液捕集CO₂，年封存量达10万吨；同时，通过种植速生林与湿地修复构建碳汇，参与碳交易市场获取经济收益。

4 绿色造纸技术经济性与环境效益分析

4.1 成本效益分析

绿色造纸技术的经济性需从全生命周期视角综合评估。初期投资方面，清洁生产设备（如无氯漂白系统、生物质锅炉）与废纸再生产线建设成本较传统工艺高20%-30%，但长期运营中可通过节能降耗与废弃物资源化实现收益补偿。以某年产50万吨再生纸项目为例，采用浮选脱墨与酶法脱墨组合技术，虽设备投资增加1.2亿元，但化学药剂用量减少40%，吨纸脱墨成本降低150元；同时，黑液碱回收与木质素提取系统年创收超3000万元，投资回收期缩短至4-5年。政策激励亦显著提升经济性：欧盟碳关税（CBAM）

下，绿色技术企业可通过碳配额交易获得额外收益；国内对生物质能源项目给予0.3元/kWh补贴，使生物质锅炉发电成本接近燃煤电厂。此外，绿色认证产品（如FSC认证纸张）溢价率达5%–10%，进一步拓宽利润空间。然而，中小企业因技术改造资金不足、融资渠道有限，仍面临转型压力，需通过政府贴息贷款、绿色债券等金融工具降低财务成本。

4.2 环境效益评估

绿色造纸技术对环境改善的贡献体现在污染物减排与资源循环两大维度。在污染物控制方面，无氯漂白技术可减少含氯废水排放90%以上，避免二噁英等剧毒物质生成；废纸再生技术通过替代原生纤维，每吨再生纸生产可减少树木砍伐17棵、CO₂排放1.2吨。以国内某大型纸厂为例，其全流程清洁生产改造后，吨纸COD排放量从80kg降至15kg，SO₂排放量下降65%，废水回用率提升至95%，年节水超200万吨。资源循环方面，黑液碱回收技术使木质素利用率从不足10%提高至80%，转化为生物塑料或胶黏剂后，可减少石油基原料消耗；污泥建材化技术将废弃物处置成本降低70%，同时避免填埋产生的甲烷排放。据测算，若全国造纸行业全面推广绿色技术，年可减少废水排放12亿吨、固废产生3000万吨，碳减排潜力达1.2亿吨CO₂当量，助力实现“双碳”目标。

4.3 社会效益

绿色造纸技术的社会效益体现在产业链协同、就业促进与公众意识提升三方面。在产业链层面，技术升级推动上下游企业联动：废纸回收企业通过建立标准化分拣中心，提升原料品质稳定性；装备制造商研发高效脱墨机、生物质锅炉等设备，形成新的产业增长点。以某省级循环经济园区为例，园区内纸厂与热电联产企业、建材厂共建能源-废弃物协同网络，实现蒸汽、电力与生物炭的共享利用，年综合效益超5亿元。就业方面，绿色技术改造催生新岗位需求，如废纸分拣工、生物质能源运维员等，同时倒逼传统岗位技能升级，促进劳动力向高附加值环节转移。公众环保意识提升则通过绿色产品消费实现：FSC认证纸张、再生纸办公用品的普及，使消费者直接参与资源循环，形成“生产-消费-回收”闭环。此外，企业通过开放透明化生产流程（如“工业旅游”项目），增强公众对绿色造纸的信任，塑造负责任的企业形象，为行业可持续发展奠定社会基础。

5 行业挑战与对策建议

5.1 主要挑战

绿色造纸技术推广面临多重挑战，需从技术、经济、政策及社会认知层面综合分析。

（1）技术成熟度与成本制约：部分关键技术（如高效生物酶制剂、碳捕集装置）仍依赖进口，国产设备稳定性不足，导致中小企业技术改造风险高。例如，生物质锅炉燃烧效率较国际先进水平低5%–8%，且初期投资成本是燃煤锅炉的1.5倍，回收周期延长至6年以上。

原料品质与供应链风险：废纸回收体系分散，混合废纸占比超60%，杂质含量高导致再生纸（2）品质波动；速生林种植周期长（5–8年），原料供应稳定性受土地政策与气候影响。此外，黑液提取木质素技术尚未完全市场化，副产物附加值挖掘不足。

（3）政策执行与标准缺失：环保法规执行力度区域差异显著，部分地区存在“一刀切”停产限产现象，影响企业正常运营；绿色产品认证体系不完善，FSC、PEFC等国际标准和国内市场衔接不足，导致优质绿色产品缺乏差异化竞争优势。

（4）社会认知与市场激励不足：公众对再生纸性能存在偏见，高端市场仍被原生纸占据；碳交易市场活跃度低，企业通过碳减排获益的渠道有限，技术升级动力不足。

5.2 对策建议

针对上述挑战，需从技术创新、政策引导、产业链协同及公众参与四方面提出对策。

（1）强化技术研发与国产化替代：设立国家级绿色造纸联合实验室，聚焦生物质高效转化、废纸深度脱墨等关键技术攻关，推动酶制剂、膜材料等核心装备国产化。例如，通过产学研合作开发第三代纳米纤维素改性技术，将再生纸强度提升至原生纸的90%以上。

（2）优化原料保障与循环体系：建设区域性废纸分拣中心，制定分级回收标准，提升原料纯度；推广“林浆纸一体化”模式，保障速生林种植用地与配套政策，同步开发木质素基复合材料，延伸产业链价值。

（3）完善政策支持与标准体系：对绿色技术改造项目给予税收减免（如增值税即征即退70%）、财政补贴（设备投资额的15%–20%），并纳入碳减排交易

目录；制定绿色造纸产品团体标准，衔接国际认证体系，建立“优质优价”市场机制。

（4）推动公众参与与市场培育：开展“绿色办公”试点，鼓励政府机关、大型企业优先采购再生纸制品；通过碳标签、环保积分等手段引导消费者选择绿色产品；利用新媒体平台宣传技术成果，消除社会对再生纸品质的误解。

6 结束语

绿色造纸技术的推广与应用是造纸行业实现低碳转型、可持续发展的必由之路。本文通过系统分析资源循环利用模式、技术经济性与环境效益，揭示了废纸再生、制浆副产物综合利用、水资源循环及能源梯级利用等技术的核心价值，同时针对技术成本、原料供应、政策激励等现实挑战提出针对性对策。未来，

需进一步强化产学研协同创新，加速关键技术国产化替代；完善绿色标准与市场机制，推动产业链上下游深度协同；同时通过公众教育与政策引导，构建全社会参与的绿色消费生态。唯有如此，方能实现造纸行业经济效益、环境效益与社会效益的有机统一，为全球循环经济与碳中和目标贡献关键力量。

参考文献

- [1] 聚焦绿色造纸技术前沿引领高端造纸装备发展——中国工程院战略研究咨询项目中期推进会在郑州运达召开[J]. 造纸信息, 2024(08):75-78.
- [2] 具延. 制浆造纸企业绿色技术的应用研究[J]. 中外企业家, 2018(06):115.
- [3] 谈勇. 造纸白泥无害化综合处理与资源化循环利用技术. 重庆市, 重庆碳福森环保科技有限公司, 2023-11-16.