

Progress in the application of biological enzymes in the paper industry

Chaoting Li Daijie Sun

Zhejiang Xiawang Paper Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324022, China

Abstract

This paper summarizes the application progress of biological enzymes in the modern paper industry, and focuses on the application of several key enzymes such as cellulase, hemicellulase, lignin-degrading enzymes and other related enzymes. These enzymes show unique value in pulping, bleaching and paper recycling, not only improving the physical properties of the paper, but also optimizing the surface treatment process. By reducing the use of chemicals and energy consumption, the introduction of biological enzymes has brought significant cost-benefit to the paper industry, reduced environmental pollution and improved the quality of wastewater, and promoted the sustainable development of the industry. In short, the bioenzymatic technology provides an environmentally friendly and efficient solution for the paper industry.

Keywords

biological enzyme; paper industry; sustainable development

生物酶在造纸工业中的应用进展

李朝廷 孙代杰

浙江夏王纸业有限公司, 中国 · 浙江 衢州 324022

摘 要

本文综述了生物酶在现代造纸工业中的应用进展, 重点探讨了几类关键酶如纤维素酶、半纤维素酶、木素降解酶及其他相关酶的应用。这些酶在制浆、漂白和废纸回收过程中展现出独特价值, 不仅能够提高纸张的物理性能, 还能优化表面处理过程。通过减少化学品使用量与能源消耗, 生物酶的引入为造纸业带来了显著的成本效益, 并减少了环境污染和改善了废水质量, 促进了行业的可持续发展。总之, 生物酶技术为造纸工业提供了环保且高效的解决方案。

关键词

生物酶; 造纸工业; 可持续发展

1 引言

生物酶技术作为一种新兴的制浆造纸方法, 因其能够有效降解纤维素、半纤维素及木质素, 在减少化学品使用量的同时提升纸张质量和生产效率, 正逐渐受到业界的关注^[1]。

2 造纸工业中常用的生物酶

2.1 纤维素酶

纤维素酶是一类复杂的酶系, 主要由内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶组成。这些酶通过协同作用将纤维素分解为可溶性寡糖和葡萄糖。内切葡聚糖酶随机切割纤维素链内部的 β -1,4-糖苷键, 产生短链纤维素片段; 外切葡聚糖酶则从纤维素链末端逐步水解, 生成纤维二糖; β -葡萄糖苷酶进一步将纤维二糖转化为葡萄糖。在制浆过

程中, 纤维素酶能够有效降解木质纤维素材料中的纤维素成分, 改善纤维的可及性和柔韧性, 从而提升纸张的质量与强度。

2.2 半纤维素酶

半纤维素酶包括木聚糖酶、甘露聚糖酶等多种类型, 分别针对不同的半纤维素结构进行降解。木聚糖酶特异性地催化木聚糖主链上的 β -1,4-木糖苷键断裂, 而甘露聚糖酶则作用于甘露聚糖链上的 β -1,4-甘露糖苷键。通过降解半纤维素, 这些酶可以显著降低纸浆中的非纤维素成分, 增加纤维间的结合力, 有助于提高纸张的物理性能如抗拉强度和耐破度。在化学浆漂白过程中, 半纤维素酶的应用能够减少化学品用量, 进而减轻环境污染, 并优化最终产品的质量。

2.3 木素降解酶

木素降解酶专注于分解木质素这一复杂有机聚合物, 其存在于植物细胞壁中, 是造成纸浆颜色深的主要原因。在造纸过程中, 木素的存在极大地影响了纸张的颜色和亮度, 通常需要大量的化学品来去除。通过应用木素降解酶如漆酶

【作者简介】李朝廷 (1985-), 男, 中国四川达州人, 工程师, 从事特种纸的生产研究。

和锰过氧化物酶，可以在较低的环境负荷下达到脱色目的。这些酶能够在温和条件下分解木质素，既降低了能源消耗，又减少了对环境的负面影响。

2.4 其他相关酶类

除上述主要酶类外，脂肪酶、果胶酶等也在特定造纸阶段展现出独特价值。脂肪酶能够水解酯键，释放出游离脂肪酸，有助于清除纸浆中的油脂杂质，提高后续加工步骤的效果。果胶酶则专注于分解果胶质，这类酶特别适用于处理含有大量果胶的农业废弃物作为造纸原料的情况，能有效改善纤维的分散性和打浆效率。通过在适当阶段引入这些辅助酶类，可以进一步优化整个制浆造纸流程，确保资源高效利用的同时，维持或提升产品质量。

3 生物酶在造纸过程中的具体应用

3.1 制浆过程中的应用

在制浆过程中，纤维素酶和半纤维素酶的应用显著优化了纸浆的生产流程。纤维素酶能够分解纤维素微纤丝之间的连接，从而增加纤维的可及性和柔韧性。这种处理方式不仅减少了化学药品的需求量，还提高了纸浆的质量和均匀性。实际操作中在机械制浆中加入适量的纤维素酶，可以有效降低磨浆能耗，并提升纸浆的强度特性。半纤维素酶通过降解木聚糖等复杂多糖，进一步改善了纸浆的漂白性能。由于这些酶能够在相对温和的条件下工作，使得整个制浆过程更加环保且经济高效。

3.2 漂白过程中的应用

在漂白工艺环节，木聚糖酶与漆酶发挥着至关重要的作用。木聚糖酶特别擅长降解半纤维素中的木聚糖成分，这有助于打开纤维结构，使后续的漂白剂更容易渗透并发挥作用。漆酶作为一种强大的氧化酶，能够直接作用于木质素分子，实现选择性的脱色效果。漆酶催化下的氧化反应可以在较低温度和 pH 值下进行，极大地节省了能源消耗。漆酶还能促进其他辅助化学物质的活性，形成协同效应，进一步增强漂白效果。

3.3 废纸回收过程中的应用

淀粉酶和脂肪酶在废纸回收过程中应用较为广泛。淀粉酶主要用于分解废纸中的淀粉类粘合剂，这类物质若不被有效去除，会严重影响再生纸的质量。通过在废纸制浆阶段添加适量的淀粉酶，可以迅速分解残留的淀粉颗粒，提高纸浆的清洁度和纤维的分离度^[2]。脂肪酶则主要用于清除设备表面的树脂沉积物，保持生产线的顺畅运行。脂肪酶能够有效地分解各类油脂和蜡质，防止其在制浆和造纸设备上积累，从而延长设备使用寿命并减少维护成本。这些酶的应用还有助于提升废纸浆的过滤性能，加快生产速度。通过合理利用淀粉酶和脂肪酶，不仅能够显著改善废纸再生的质量和效率，还推动了造纸行业的可持续发展进程。

4 生物酶在提高纸张品质的作用

4.1 物理性能改进

在探索通过酶处理增强纸张物理性能的方法时，研究集中在纤维素酶和半纤维素酶的应用上。纤维素酶的作用使得纤维表面变得更加粗糙，并暴露出更多的羟基（-OH）基团，这些基团能够与其他纤维上的羟基形成氢键连接，进一步加强了纤维之间的结合力^[3]。此外，半纤维素酶主要针对细胞壁中的半纤维素成分进行作用，促进纤维表面微细纤维的有效释放。这些微细纤维可以填充纤维间的空隙，提高纤维网络的致密性，同时增加了纤维间的结合点数，从而提高了纸张的内部结合强度和抗撕裂性能。

在一项专注于废旧报纸再生浆的研究中，研究人员采用了一种优化后的纤维素酶与半纤维素酶混合处理方法。实验结果表明，经过酶处理后，纸张的物理性能显著提升，具体数据如表 1 所示。

表 1 酶处理对废纸再生浆制成纸样的物理性能影响

性能指标	未经酶处理	酶处理后	提升幅度(%)
抗水性 (Cobb 值, g/m ²)	50	35	30
耐破度 (kPa)	180	216	20
撕裂度 (mN)	45	56	24.4

实验中，首先将废纸进行粉碎处理并制备成均匀的纸浆悬浮液，随后加入特定比例的酶混合物，在温度为 50° C、pH 值为 5.0 的最佳条件下进行处理。经过 2h 的酶促反应后，对处理后的纸浆进行了成型与干燥处理，最终制成测试用纸样。从表 1 可以看出，相较于未经酶处理的对照组，酶处理后的纸样在抗水性、耐破度及撕裂度方面均有显著提升。抗水性通过 Cobb 值衡量，数值越低表示抗水性越好。这验证了酶处理对于提升纸张物理性能的有效性，同时也展示了酶处理技术在废纸资源高效利用方面的潜力。这一发现为造纸行业提供了新的视角，即通过生物酶技术的应用，可以在减少化学试剂使用的同时，达到提升纸张品质的目的，进而推动绿色造纸技术的发展。

4.2 表面处理优化

酶处理技术能够显著改善纸张表面的平滑度和均匀性，这主要得益于纤维素酶和半纤维素酶在去除表面粗糙纤维及增加纤维间结合力方面的作用。具体来说，纤维素酶能够降解纸张表面的纤维素分子链，使得表面纤维更加细密和平整；而半纤维素酶则有助于分解细胞壁中的半纤维素成分，进一步促进纤维间的紧密结合。此外，通过精确控制酶处理的时间和条件，可以实现对纸张表面特性的精细调节。

对印刷适应性和耐久性的影响是酶处理纸张表面改性的重要考量之一。经过酶处理后的纸张表面更加平整光滑，这直接影响到油墨的附着性能和分布均匀性。研究表明，酶处理后的纸张表面粗糙度降低，使得油墨在纸张上的铺展更加均匀，减少了“透印”现象的发生。酶处理还能增强纸张

的吸水性,使油墨更好地固定在纸张表面,从而提高印刷品的质量和耐久性。酶处理后的纸张在印刷适应性测试中的表现也较好,特别是在色彩再现和图像清晰度方面。不仅如此,酶处理还有助于提升纸张的耐久性,通过增强纤维间的结合力,减少因摩擦或环境因素导致的磨损和损坏。

5 生物酶使用的经济效益分析

5.1 成本效益分析

5.1.1 酶制剂成本

在探讨生物酶于造纸工业应用的成本效益时,不可避免地要关注酶制剂本身的价格及其对整体生产成本的影响。生物酶的使用旨在通过优化制浆、漂白及废纸回收等过程来提升效率和产品质量。尽管生物酶初始投入可能较高,但其长期效益显著。首先,随着技术进步和生产工艺改进,酶制剂的生产成本逐渐降低,市场供应也日益丰富,这使得选择性价比高的产品成为可能。其次,在大规模工业应用中,通过精准控制酶的用量和作用条件,可以有效减少不必要的浪费,进一步降低成本。

5.1.2 能源节约

能源消耗是造纸工业中的一个重要成本因素,而生物酶的应用为这一问题提供了新的解决方案。纤维素酶、半纤维素酶等在制浆过程中能够降解植物细胞壁成分,从而降低了化学药剂和高温高压处理的需求。这意味着在制浆阶段,不仅减少了蒸汽和电力的消耗,而且简化了后续处理步骤,间接节省了能源。与此同时,生物酶在废纸回收过程中同样表现出色,能够有效去除墨水和杂质,无需依赖高能耗的机械搅拌或高温处理方法。生物酶的应用有助于显著减少整个造纸流程中的能量需求,对于提高资源利用效率和降低运营成本具有重要意义。

5.1.3 减少化学品使用量

采用生物酶技术可大幅减少传统造纸工艺中化学品的使用量,进而降低环境污染风险并改善工作环境。在传统的制浆过程中,需使用大量的氯基化合物进行漂白处理,这不仅增加了生产成本,还产生了有害副产物。相比之下,生物酶如木素降解酶能够在较低温度和无氯条件下分解木素,实现温和高效的漂白效果,极大地减少了有害物质的排放。生物酶还能在废纸回收过程中替代部分化学品,用于脱墨和净化处理,既保护了环境又提高了纸张质量。通过减少化学品的使用,不仅降低了购买成本,还减轻了废水处理负担,体现了显著的经济和环境双重效益。

5.2 环境效益分析

5.2.1 减少污染排放

生物酶在造纸工业中的应用显著减少了传统工艺中产生的多种污染物的排放。特别是,使用纤维素酶、半纤维素酶和木素降解酶等代替化学试剂进行制浆和漂白过程,能够有效降低有毒有害物质的生成与释放。在传统的氯气或含氯

化合物漂白过程中,会产生大量二噁英等持久性有机污染物,这些物质对环境和人类健康具有严重威胁。通过采用酶促漂白技术,可以大幅减少此类有害副产物的形成,从而减轻对大气、水体及土壤的污染压力。同时,由于酶的作用条件温和,无需极端温度或高压环境,这亦有助于减少生产过程中挥发性有机化合物(VOCs)及其他温室气体的排放,为实现清洁生产提供了一条可行路径。

5.2.2 改善废水质量

造纸工业是水资源消耗和废水排放的大户,而生物酶的应用为此提供了有效的解决方案。利用特定种类的酶处理废水,不仅能降解其中复杂的有机物,还能提高后续物理化学处理步骤的效果。在废纸回收过程中,生物酶可促进墨水和胶黏剂等成分的分解,使得经过处理后的废水含有较低浓度的悬浮物和溶解性有机物。由于酶法处理减少了化学品的使用量,相应地也降低了废水中的盐分和重金属含量,这对于减轻污水处理设施的负担至关重要。最终,这种基于酶的废水处理方法不仅提高了水质,还可能实现水资源的部分回用,进一步促进了造纸行业的绿色发展。

5.2.3 可持续性发展贡献

生物酶技术在推动造纸工业向可持续发展模式转变方面发挥了重要作用。一方面,酶的应用有助于提升资源利用率,通过更高效地分解植物纤维原料,使得每单位原料能够产出更多的纸张产品,进而减少森林资源的消耗。另一方面,该技术促进了能源节约和废弃物减量化,符合现代工业追求低碳环保的要求。随着研究深入和技术进步,越来越多的新型高效酶被开发出来,并应用于不同类型的造纸工艺中,这不仅扩展了生物酶的应用范围,也为造纸行业带来了新的发展机遇。综上所述,生物酶技术的发展与应用对于构建资源节约型和环境友好型社会,以及推进全球可持续发展目标的实现具有不可忽视的意义。

6 结语

综上所述,生物酶技术在制浆和造纸过程中的应用展现了显著的技术进步与环境友好性。通过纤维素酶、半纤维素酶及木素降解酶等多种酶类的巧妙运用,不仅优化了纸张质量,提升了物理性能如强度、抗水性和表面平滑度,同时也实现了节能减排的目标。生物酶的应用极大地减少了化学药剂和能源的消耗,降低了污染物排放,改善了废水处理效果,体现了明显的经济和环境双重效益。

参考文献

- [1] 湛雪.生物酶在制浆造纸中的低碳应用[J].中华纸业,2024,45(01):35-38.
- [2] 孙健.生物酶的改性、复合及其在造纸工艺中的应用[D].齐鲁工业大学,2021.
- [3] 陈嘉川,贾倩倩,李凤凤,等.生物酶在制浆造纸过程中的应用及研究进展[J].中华纸业,2021,42(12):9-16.