

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240197

网络首发日期: 2025-10-28; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20251027.1628.016>

高性能木聚糖酶助漂硫酸盐针叶木浆的研究

曲钰, 惠岚峰, 郭雯雯, 刘忠, 宋飞飞, 王清硕

(天津市制浆造纸重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 研究耐酸XYS酶和耐碱及耐高温VYBRANT 701酶两种商品木聚糖酶在 $O(X_1D_0)E_P D_1$ 和 $OD_0(X_2E_P)D_1$ 漂序中的助漂效果。结果表明,XYs酶助漂二氧化氯漂段、VYBRANT 701酶助漂碱抽提漂段,硫酸盐针叶木浆漂后ISO白度可达86.5%, $O(X_1D_0)E_P D_1$ 漂后浆所得纸页的抗张指数和耐破指数分别提高了10.4%、10.9%;扫描电子显微镜和纤维分析仪检测发现,助漂后的纤维表面出现破损、剥皮、细小纤维增多、纤维卷曲度增大等现象,表明纤维表面的木聚糖被降解,使纤维细胞壁的结构更松散、孔隙增大,有助于后续漂液的渗透以及木素的去除。

关键词: 木聚糖酶; 生物漂白; 无元素氯漂白; 硫酸盐浆

中图分类号: TS745

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)02-0048-06

High-Performance Xylanase-Assisted Bleaching of Kraft Coniferous Pulp

QU Yu, HUI Lanfeng, GUO Wenwen, LIU Zhong, SONG Feifei, WANG Qingshuo

(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering,

Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The bleaching-assisting effects of acidotolerant resistance xylanases XYs and alkaline resistance and thermostable resistant xylanase VYBRANT 701 in the $O(X_1D_0)E_P D_1$ and $OD_0(X_2E_P)D_1$ drift sequences were studied in the current research. The results showed that the whiteness of kraft coniferous pulp after bleaching reached 86.5% ISO in the bleaching stage of XYs enzyme-assisted chlorine dioxide bleaching section and VYBRANT 701 enzyme-assisted bleaching alkali extraction bleaching section, and the tensile index and bursting index of the paper sheets obtained from $O(X_1D_0)E_P D_1$ bleached pulp increased by 10.4% and 10.9%, respectively. Scanning electron microscope and fiber analyzer showed that the bleached fiber surface exhibited surface damage and peeling, an increase in fine fibers, and higher degree of fiber curl. These observations indicated that the xylan on the fiber surface was degraded, making the structure of the fiber cell wall looser and the pores larger, which was conducive to the subsequent penetration of the bleaching solution and the removal of lignin.

Key words: xylanase; bio-bleaching; elemental chlorine free bleaching; kraft pulp

引文格式:

曲钰, 惠岚峰, 郭雯雯, 等. 高性能木聚糖酶助漂硫酸盐针叶木浆的研究[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41(2): 48-53.

QU Y, HUI L F, GUO W W, et al. High-performance xylanase-assisted bleaching of kraft coniferous pulp[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41(2): 48-53.

纸浆漂白是指去除未漂浆中残余木素和其他有色杂质,提高纸浆白度、强度的过程^[1]。随着国家对环保要求的日益严苛,选择合适的清洁漂白剂以及节约能耗的漂白工艺成为研究的焦点。生物漂白因具

有温和、绿色、节能等特点而受到重视,其中木聚糖酶助漂的研究较为活跃^[2]。木聚糖酶是一类可以将木聚糖降解为单糖和寡糖的酶的总称,主要有内切 β -木聚糖酶、外切 β -木聚糖酶、 β -木糖苷酶^[1]。Viikari

收稿日期: 2024-10-05; 修回日期: 2025-01-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2105503)

作者简介: 曲钰(1999—),女,山东人,硕士研究生;通信作者: 惠岚峰,教授, hlfeng@tust.edu.cn

等^[3]提出木聚糖酶漂白处理硫酸盐浆的方法,随后许多发达国家进行研究和生产试验,并成功将木聚糖酶用于纸浆漂白的工业生产中^[4]。我国针对不同来源和用途的木聚糖酶应用于纸浆漂白也进行过许多试验研究,证明木聚糖酶能够提高纸浆白度、改善纸浆可漂性、减少后续漂白剂用量^[5-7]。

在工业生产过程中,木聚糖酶用于制浆造纸时仍以酸性或中性的使用环境为主,酶的最适反应温度大多在 40~75℃^[8]。Zhou 等^[9]利用两种商品木聚糖酶处理混合阔叶木硫酸盐浆,处理后节省 20%的二氧化氯用量,纸浆 ISO 白度达到 84%,其中酶预处理阶段的条件为:酶用量 5 U/g、pH 7.0、温度 70℃、预处理时间 60 min。此研究虽然减少了漂白化学品的用量,但是在木聚糖酶预处理前后对 pH 和温度进行调节的工序造成了化学品和能源的过多消耗,因此木聚糖酶漂白工艺需要木聚糖酶能具有耐热、耐碱的特性。为了满足此项要求,研究人员聚焦分离、改造生产木聚糖酶的新菌株,使用于制浆造纸工业生产的碱性木聚糖酶的种类和数量均有所增加,一部分已经实现商业化。Nagar 等^[10]从枯草芽孢杆菌 SV-205 中分离出一种耐碱的木聚糖酶,该酶预处理阶段条件为酶用量 12.5 IU/g、pH 10.0、温度 60℃、预处理时间 120 min,与对照组相比可使 ISO 白度提高 1.08%,卡伯值降低 0.8,二氧化氯的消耗量减少 19.01%。这些木聚糖酶的耐碱性较之前有所提高,但大部分酶仍无法同时适应蒸煮后 pH 11.0 以上的强碱环境以及 90℃以上的高温。

木聚糖酶 XYS 具有较好的耐酸性,木聚糖酶 VYBRANT 701 具有较好的耐热性和耐碱性,极有可能与现今造纸工业的漂段条件相契合。本研究在优化各漂段工艺条件的基础上,探究适应不同 pH 和温度的商品木聚糖酶是否能与漂剂进行协同处理,简化漂白工段,为纸浆漂白提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

未漂硫酸盐针叶木浆,湖南骏泰浆纸有限责任公司,未漂浆 ISO 白度 30%,卡伯值 25.0;耐酸性木聚糖酶 XYS,宁夏夏盛实业集团有限公司,酶活力 3.086×10^5 U/g,无纤维素酶活力;耐碱性、耐高温木聚糖酶 VYBRANT 701,巴克曼实验室化工(上海)有限公司,酶活力 4.075×10^5 U/g,纤维素酶活力 $1.24 \times$

10^4 U/g;二氧化氯漂液(二氧化氯质量浓度 6.5 g/L)、乙酸-乙酸钠缓冲液,实验室自制。其他化学试剂均为分析纯试剂。

TU-1810 型紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;070E-983542 型白度测定仪、02 969920 型耐破度测试仪、SE-009 型撕裂度测试仪、SE062 抗张强度测试仪、912 型纤维分析仪,瑞典 L&W 公司;RK-2A-KWT 型纸页成型器,奥地利 PTI 公司;No. 2615 型蒸煮锅,日本 Kumagai Riki Kogyo 公司;JSM-IT300 LV 型扫描电子显微镜(SEM),日本电子株式会社。

1.2 无元素氯(elemental chlorine free, ECF)漂白

将蒸煮后的硫酸盐针叶木浆先进行氧脱木素处理,然后洗涤至中性;将上述经过氧脱木素的纸浆进行漂白,漂白工序为 $D_0E_PD_1$,每段漂白结束后将纸浆洗涤至中性。根据木聚糖酶的不同适应条件和优化后各漂段的工艺参数,讨论酶的不同添加位置,尝试在 D_0 段加入 XYS 酶 [$O(X_1D_0)E_PD_1$]、 E_P 段加入 VYBRANT 701 酶 [$OD_0(X_2E_P)D_1$] 进行助漂,并与 XYS 酶单独用作预处理段($OX_1D_0E_PD_1$)和未使用酶($OD_0E_PD_1$)进行对比。上述工序中: D_0 指第一段二氧化氯漂段, E_P 指过氧化氢增强的碱抽提漂段, D_1 指第二段二氧化氯漂段,O 指氧脱木素漂段。

将漂白后的纸浆疏解后用快速纸页成型器抄造定量为 60 g/m^2 的手抄片,进行物理性能的检测。

1.3 针叶木浆纤维形貌及性能测定

采用扫描电子显微镜观察木聚糖酶预处理前后针叶木纤维形貌的变化;采用纤维分析仪分析纤维的成分和含量变化。按照 GB/T 1546—2018《纸浆卡伯值的测定》测定纸浆卡伯值,分别按照 GB/T 7974—2013《纸、纸板和纸浆 蓝光漫反射因数 D65 亮度的测定(漫射/垂直法,室外日光条件)》、GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min)》、GB/T 455—2002《纸和纸板撕裂度的测定》、GB/T 454—2020《纸 耐破度的测定》测定手抄片的白度、抗张强度、撕裂强度、耐破强度。

2 结果与讨论

2.1 木聚糖酶处理段工艺条件优化

2.1.1 酶用量对酶预处理效果的影响

各漂段具体工艺条件见表 1,酶用量对酶预处理效果的影响如图 1 所示。木聚糖酶 X_1 预处理条件

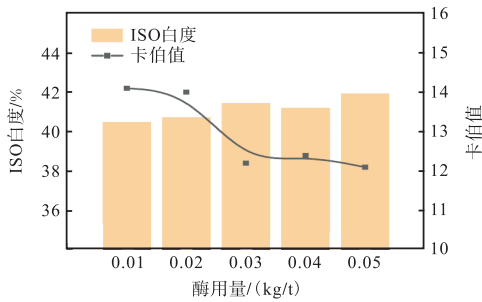
为：漂序 OX₁、浆料浓度 10%、温度 70 ℃、pH 5.0、时间 90 min；木聚糖酶 X₂ 预处理条件为：漂序 OX₂D₀E_PD₁、浆料浓度 10%、温度 80 ℃、pH 7.0、时间 105 min。

表 1 各漂段具体工艺条件

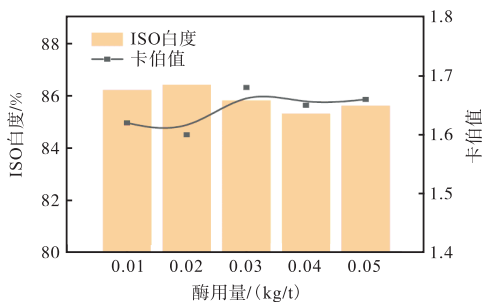
Tab. 1 Specific process conditions of each bleaching section

漂段	化学品及用量	温度/℃	时间/min
O	3% NaOH, 0.8% MgSO ₄	100	60
D ₀	1.8% ClO ₂	65	60
E _P	1% NaOH, 1.2% H ₂ O ₂ , 0.5% MgSO ₄ , 0.2% EDTA	65	100
D ₁	1.2% ClO ₂	65	60

注：O 漂段氧气压力为 0.4 MPa，化学品用量以绝干浆质量为基准。



(a) 木聚糖酶 X₁



(b) 木聚糖酶 X₂

图 1 酶用量对酶预处理效果的影响

Fig. 1 Effect of xylanase dosage on xylanase pretreatment efficiency

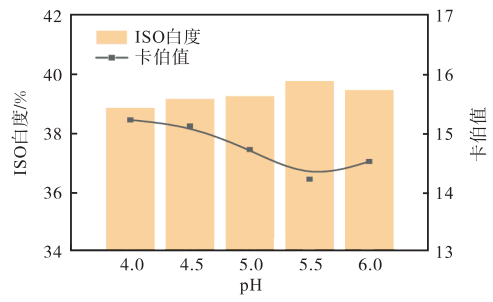
由图 1(a)可以看出，当木聚糖酶 X₁ 用量(相对于绝干浆，下同)达到 0.03 kg/t 时，漂后纸浆卡伯值为 12.2，手抄片的 ISO 白度为 41.2%，说明用该木聚糖酶预处理纸浆，对提高白度有一定作用。这是因为木聚糖酶可溶出纸浆中的部分木聚糖，使纸浆中的残余木素降解或溶出。在酶用量高于 0.03 kg/t 时，白度增加缓慢。与酶用量 0.03 kg/t 时相比，酶用量提高到 0.05 kg/t 时，ISO 白度仅提高 0.4%，卡伯值降低 0.12。因此，从经济角度考虑，选择木聚糖酶 X₁ 用量为 0.03 kg/t。

由图 1(b)可以看出，随着木聚糖酶 X₂ 用量的增加，手抄片的白度呈现先升高后降低最后趋于平缓的

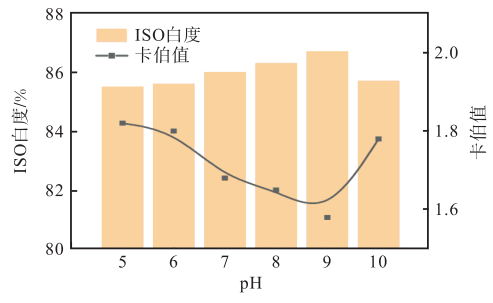
趋势。酶用量的增加会使酶与纤维素分子的接触机会增加，但纤维素分子与酶的结合位点是有限的，因此后续再增加酶用量，酶解作用不明显^[11]。在木聚糖酶 X₂ 用量为 0.02 kg/t 时，手抄片的白度增量最大，从经济角度考虑，选择木聚糖酶 X₂ 用量为 0.02 kg/t。

2.1.2 pH 对酶预处理效果的影响

pH 对酶预处理效果的影响如图 2 所示。木聚糖酶 X₁ 预处理条件为：浆料浓度 10%、酶用量 0.03 kg/t、温度 70 ℃，时间 90 min；木聚糖酶 X₂ 预处理条件为：浆料浓度 10%、酶用量 0.02 kg/t、温度 80 ℃、时间 105 min。



(a) 木聚糖酶 X₁



(b) 木聚糖酶 X₂

图 2 pH 对酶预处理效果的影响

Fig. 2 Effect of pH on xylanase pretreatment efficiency

由图 2 可知：用木聚糖酶 X₁、X₂ 对氧脱木素后的针叶木硫酸盐浆进行酶预处理，随着 pH 的升高，白度呈现先升高后降低的趋势，其中木聚糖酶 X₁ 在酸性条件下可以保持一定的活性，木聚糖酶 X₂ 在碱性条件下处理效果较显著。在木聚糖酶 X₁ 预处理 pH 为 5.5 和木聚糖酶 X₂ 预处理 pH 为 9.0 时，漂后纸浆卡伯值最低且手抄片的白度达到最高值，漂白效果最好；这说明在此条件下，木聚糖酶使纸浆中的半纤维素溶出最多。随着 pH 上升，木聚糖酶活性降低，漂白效果降低。因此，木聚糖酶 X₁ 预处理的最佳 pH 为 5.5，木聚糖酶 X₂ 预处理的最佳 pH 为 9.0。

2.1.3 温度对酶预处理效果的影响

温度对酶预处理效果的影响如图 3 所示。木聚

糖酶 X₁ 的预处理条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.03 kg/t、pH 5.5、时间 90 min;木聚糖酶 X₂ 的预处理条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.02 kg/t、pH 9.0、时间 105 min。

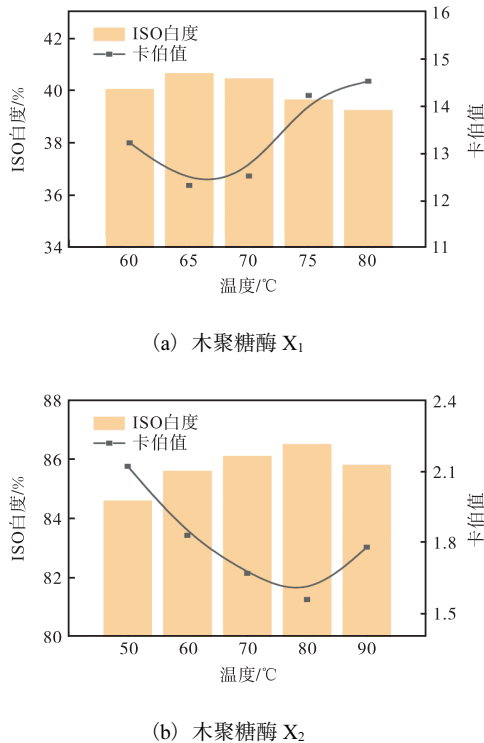


图 3 温度对酶预处理效果的影响

Fig. 3 Effect of temperature on xylanase pretreatment efficiency

由图 3 可知:随着温度的升高,木聚糖酶 X₁、X₂ 处理后手抄片的白度均呈现先升高后降低的趋势,其中 X₂ 酶的耐高温性较好。在温度分别为 65 °C (X₁) 和 80 °C (X₂) 处理后,手抄片白度达到最大值,纸浆卡伯值达到最低值。在一定的温度范围内,且在获取相同木聚糖酶处理效果的前提下,随着处理温度的升高,反应速率逐渐加快;但是,当温度超过临界值时,木聚糖酶可能会因为发生蛋白质热变性而丧失反应活性^[6]。可见,在此实验条件下,木聚糖酶 X₁、X₂ 的较理想预处理温度分别为 65 °C、80 °C。

2.1.4 时间对酶预处理效果的影响

时间对酶预处理效果的影响如图 4 所示。木聚糖酶 X₁ 的预处理条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.03 kg/t、pH 5.5、温度 65 °C;木聚糖酶 X₂ 的预处理条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.02 kg/t、pH 9.0、温度 80 °C。

由图 4 可知:随着两种酶预处理时间的增加,漂后手抄片的白度基本呈现先增加后减小的趋势,并且

在预处理时间分别为 105 min (X₁) 和 90 min (X₂) 时,白度达到最高,之后开始下降。这是由于木聚糖酶能催化水解沉积在纤维表面的木聚糖,使之溶出,使纤维表面呈现多孔状,有利于大分子木素的脱除;但时间延长会降低酶的催化效率,可能导致溶出的木聚糖重新沉积回纤维表面,阻碍木素的溶出,使白度有所降低^[6]。因此,木聚糖酶 X₁、X₂ 的较理想预处理时间分别为 105 min 和 90 min。

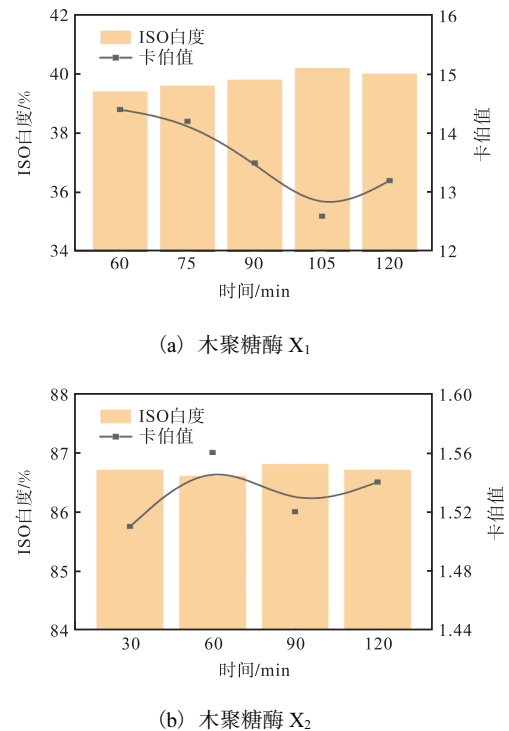


图 4 时间对酶预处理效果的影响

Fig. 4 Effect of time on xylanase pretreatment efficiency

由此可以得出,木聚糖酶 X₁ 预处理的最佳工艺条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.03 kg/t、pH 5.5、温度 65 °C、时间 105 min;X₂ 酶预处理的最佳工艺条件为:浆料浓度 10%、酶用量 0.02 kg/t、pH 9.0、温度 80 °C、时间 90 min。

2.2 木聚糖酶处理前后纤维形貌的分析

通过扫描电子显微镜分析木聚糖酶对针叶木纤维形貌的影响,结果如图 5 所示。从图 5(a)、5(b)可以看出,未经酶处理的针叶木纤维的表面光滑,结构致密,无明显细小纤维。由图 5(c)、5(d)可以看出,经不同木聚糖酶处理后的纤维表面出现明显的破损现象,表面粗糙,结构变得疏松,增加了后续漂液的可及性。这是由于酶分子会吸附于纤维表面,破坏纤维细胞壁外层,造成纤维细胞壁的腐蚀、剥皮和切断,酶分子沿着空隙侵蚀细胞壁内部,改变原有纤维

的内部结构^[12]。

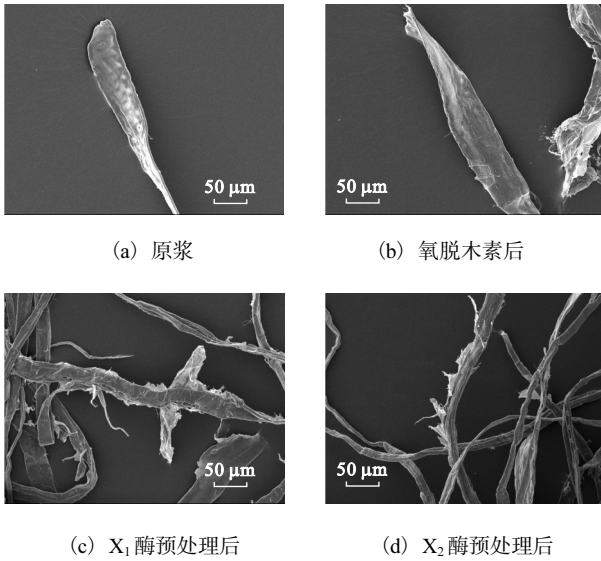


图5 木聚糖酶处理前后的纤维形貌

Fig. 5 Fiber morphology before and after xylanase treatment

2.3 木聚糖酶处理前后纤维的形态学分析

木聚糖酶处理前后纤维的形态学分析结果见表2。由表2可知：木聚糖酶处理对纤维的宽度几乎没有影响，但对纤维长度有切断作用，处理后产生大量纤维碎片，细小纤维占比增大，其中木聚糖酶X₂的处理效果较为显著。酶处理后形态因子降低，扭结角增大，表明酶处理后的纤维更弯曲；但相较于氧脱木素后纤维的弯曲程度，差异并不明显^[13]。

表2 木聚糖酶处理前后纤维的形态学分析结果

Tab. 2 Morphological analysis result of fibers before and after xylanase treatment

浆样	长度/ mm	宽度/ μm	形态 因子/%	扭结角/ (°)	细小纤维 含量/%
原浆	1.78	28.6	85.7	52.6	15.7
氧脱木素后	1.74	28.6	84.2	54.9	15.5
X ₁ 酶预处理后	1.73	28.4	84.8	55.0	15.5
X ₂ 酶预处理后	1.68	28.0	84.7	55.3	17.1

2.4 木聚糖酶处理对后续 ECF 漂白的影

2.4.1 漂段工艺条件优化

在优化木聚糖酶处理漂段工艺条件的基础上，对OX₁D₀E_pD₁漂序中两段二氧化氯处理漂段工艺条件进行优化，木聚糖酶对白度的影响如图6所示。从图6中可以看出，在漂后手抄片的ISO白度为85.7%时，加木聚糖酶X₁漂序的二氧化氯总用量相较于未加酶漂序节省约28.6%。通过单因素法和正交实验法得到优化后二氧化氯处理漂段的工艺条件，D₀段ClO₂用量(相对于绝干浆质量，下同)2.25%、温度80

℃、时间90 min；D₁段ClO₂用量0.75%、温度80℃、时间90 min。

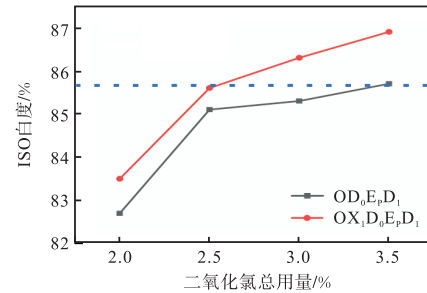


图6 木聚糖酶对白度的影响

Fig. 6 Effect of xylanase on whiteness

2.4.2 木聚糖酶处理对漂后纸页物理性能的影响

在表3所列的工艺条件下，用木聚糖酶对纸浆进行处理，木聚糖酶处理对 ECF 漂后纸页物理性能的影响见表4。

表3 各漂段具体工艺条件

Tab. 3 Specific process conditions of each drifting section

漂段	化学品及用量	温度/℃	时间/min
O	3% NaOH, 0.8% MgSO ₄	100	60
X ₁	见表4下方标注	65	105
D ₀ , X ₁ D ₀	2.25% ClO ₂	见表4下方标注	90
E _p , X ₂ E _p	1% NaOH, 1.2% H ₂ O ₂ , 0.5% MgSO ₄ , 0.2% EDTA	见表4下方标注	100
D ₁	0.75% ClO ₂	80	90

注：O漂段氧气压力为0.4 MPa，木聚糖X₁处理时pH=5.5，化学品用量以绝干浆质量为基准。

表4 木聚糖酶处理对 ECF 漂后纸页物理性能的影响

Tab. 4 Effect of xylanase treatment on physical properties of paper after ECF bleaching

漂序	ISO白度/%	抗张指数/ (N·m/g)	撕裂指数/ (mN·m ² /g)	耐破指数/ (kPa·m ² /g)	卡伯得率/ 值 %
OD ₀ E _p D ₁	85.2	21.2	14.9	1.10	1.93 95.7
OX ₁ D ₀ E _p D ₁	86.3	23.1	14.2	1.19	1.62 95.1
O(X ₁ D ₀)E _p D ₁	86.5	23.4	14.9	1.22	1.66 95.9
OD ₀ (X ₂ E _p)D ₁	86.5	21.4	16.5	1.14	1.65 93.7
OX ₁ D ₀ (X ₂ E _p)D ₁	87.0	20.6	14.4	1.10	1.52 92.3

注：D₀段温度为80℃；X₁D₀段温度为65℃；E_p段温度为65℃，pH为10.5~11.5；X₂E_p段温度为80℃，pH为10.0；OX₁D₀(X₂E_p)D₁中木聚糖酶X₁用量0.015 kg/t，X₂E_p段木聚糖酶X₂用量0.01 kg/t，其余含酶漂段中木聚糖酶X₁用量均为0.03 kg/t，木聚糖酶X₂用量均为0.02 kg/t，酶用量以绝干浆质量为基准。

与常规漂白浆相比，经木聚糖酶处理的纸浆其白度和物理强度均略有提高。与OD₀E_pD₁相比，OX₁D₀E_pD₁漂后手抄片的ISO白度提高了1.1%。与OD₀E_pD₁相比，O(X₁D₀)E_pD₁漂后浆所得纸页的抗张指数和耐破指数分别提高了10.4%、10.9%。与OD₀E_pD₁相比，O(X₁D₀)E_pD₁和OD₀(X₂E_p)D₁漂后手

抄片 ISO 白度均提高了 1.3%。由此可见,将木聚糖酶直接加入漂段中使其与漂白剂协同作用,既能提高白度,保持纸浆的各项物理性能,还可以降低能耗,减少对环境的污染。与直接将酶加入相应漂段相比,在进行两段酶漂且降低两段酶用量的情况下,漂后手抄片 ISO 白度增加 0.5%,但漂后纸张性能略有降低。

3 结 语

木聚糖酶用于纸浆预处理阶段和 $O(X_1D_0)E_P D_1$ 、 $OD_0(X_2E_P)D_1$ 漂序,均提高了漂后纸浆手抄片的白度。将木聚糖酶与漂白剂协同作用后,在减少漂白工段的基础上,漂后 ISO 白度达到 86.5%,纸张的物理强度略有提高,其中 $O(X_1D_0)E_P D_1$ 漂后纸浆所得纸页的抗张指数和耐破指数分别提高了 10.4%和 10.9%。

与酸性木聚糖酶用于酶预处理阶段相比,耐高温、耐碱的木聚糖酶更能适应纸浆漂白的工艺条件,可直接与碱性漂段相结合,使酶的使用更加灵活;酸性木聚糖酶在漂白中的使用略有局限性,只可与酸性漂段(如二氧化氯漂白)相结合或用于酶预处理阶段。

参考文献:

- [1] 林鹿,詹怀宇,付时雨,等. 制浆漂白生物技术与原理[M]. 2版. 北京:中国轻工业出版社,2012.
- [2] 潘梦丽,王春,平清伟,等. 纸浆绿色漂白技术新进展[J]. 中国造纸,2015,34(11):52-58.
- [3] VIHKARI L, KANTELINEN A, SUNDQUIST J, et al. Xylanases in bleaching: from an idea to the industry[J].

FEMS Microbiology reviews, 1994, 13(2/3):335-350.

- [4] 詹怀宇,黄方,李建军,等. 碱法纸浆木聚糖酶辅助漂白的研究与应用[C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第十届学术年会论文集. 北京:中国造纸学会,2001:287-292.
- [5] 周杨. 耐高温木聚糖酶在纸浆漂白中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [6] 王阳,盛杰,刘旭,等. 木聚糖酶预处理在檀皮纤维漂白中的应用[J]. 造纸科学与技术,2019,38(1):59-63.
- [7] 陈阳雷,吉兴香,许凤. 纸浆木聚糖酶生物助漂技术进展[J]. 中国造纸,2017,36(12):74-78.
- [8] 解复红,李文鹏,张克勤. 耐碱和耐热木聚糖酶研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2003(7):72-75.
- [9] ZHOU B Y, WANG Y, JIANG Z H, et al. How do xylanase and hot acid stages differ at enhancing elemental chlorine-free bleaching of hardwood kraft pulp?[J]. Journal of wood chemistry and technology, 2021, 41(4):150-159.
- [10] NAGAR S, GUPTA V K. Hyper production and eco-friendly bleaching of kraft pulp by xylanase from *Bacillus pumilus* SV-205 using agro waste material[J]. Waste and biomass valorization, 2021, 12:4019-4031.
- [11] 刘宁,崔丹丹,黎晨晨. 纤维素酶制备香蕉皮纳米纤维素的工艺条件研究[J]. 中国食品添加剂,2018(2):112-117.
- [12] 陈家杰. 酶促麦草纤维素微纤丝制备、结构及性能的研究[D]. 西安:陕西科技大学,2017.
- [13] 马龙虎,史贺,杨扬,等. 纤维素酶预处理对针叶木纤维形态的影响[J]. 黑龙江造纸,2022,50(2):1-5.

责任编辑:周建军

(上接第 47 页)

- [34] WU H Y, LI X X, SHI L B, et al. Distribution of nematodes in wetland soils with different distance from the Bohai sea[J]. Plant soil and environment, 2008, 54(8):359-366.
- [35] 杨舒涵,王贺,陈磊,等. 松嫩平原异质生境对土壤线虫群落特征的影响[J]. 生物多样性,2024,32(1):75-88.
- [36] BONGERS T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia, 1990, 83:14-19.
- [37] 徐光林,贺梦璇,莫训强,等. 人工湿地与自然湿地的植物群落多样性以及种间联结性[J]. 天津师范大学学

报(自然科学版),2023,43(4):25-32.

- [38] ZHAO J, SHAO Y H, WANG X L, et al. Sentinel soil invertebrate taxa as bioindicators for forest management practices[J]. Ecological indicators, 2013, 24:236-239.
- [39] LI L L, LUO Z Z, NIAN L L, et al. Response of soil nematode community structure and metabolic footprint to nitrogen addition in alfalfa fields on the Loess Plateau[J]. Scientific reports, 2024, 14(1):17640.
- [40] MICHONNEAU F, BROWN J W, WINTER D J. Rotl: an R package to interact with the Open Tree of Life data[J]. Methods in ecology and evolution, 2016, 7(12):1476-1481.

责任编辑:周建军