

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240220

莱赛尔 (Lyocell) 纤维用溶解浆的研究进展

梁美霞¹, 王希超¹, 刘莹莹¹, 刘玮哲², 许愿², 李群¹

(1. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津市制浆造纸重点实验室, 生物基纤维材料全国重点实验室, 天津 300457; 2. 四川环龙新材料有限公司, 眉山 620010)

摘要: 莱赛尔 (Lyocell) 纤维作为一种极具发展潜力的新型绿色纤维, 其性能和应用与溶解浆的制备工艺及特性密切相关。本文系统总结了 Lyocell 纤维用溶解浆的蒸煮工艺、漂白工艺及漂后处理工艺。同时, 归纳了溶解浆的关键性能指标, 包括聚合度、 α -纤维素含量、半纤维素含量、金属离子含量和灰分等。在“双碳”目标与绿色可持续发展的背景下, 深入研究 Lyocell 纤维用溶解浆的相关工艺和性能指标, 不仅有助于提升 Lyocell 纤维的产品质量与生产效率, 还能推动纺织行业向绿色化、高端化转型升级。本综述能够为 Lyocell 纤维的原料优化和工艺改进提供理论支撑, 对促进 Lyocell 纤维产业的长远发展具有重要意义。

关键词: 莱赛尔 (Lyocell) 纤维; 溶解浆; 制浆工艺

中图分类号: TS71⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)04-0035-05

Research Progress in Dissolving Pulp for Lyocell Fiber

LIANG Meixia¹, WANG Xichao¹, LIU Yingying¹, LIU Weizhe², XU Yuan², LI Qun¹

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
2. Sichuan Huanlong New Materials Co., Ltd., Meishan 620010, China)

Abstract: Lyocell fiber, as a new type of green fiber with great development potential, has its performance and application closely related to the preparation process and characteristics of dissolving pulp. This article systematically reviews the cooking process, bleaching process and post-treatment process of Lyocell fiber dissolving pulp. It also summarizes the key performance indicators of dissolving pulp, including degree of polymerization, α -cellulose content, hemicellulose content, metal ion content and ash content. Therefore, under the background of “double carbon” goals and green sustainable development, in-depth study on the relevant processes and performance indicators of Lyocell fiber pulp not only helps improve the product quality and production efficiency of Lyocell fiber, but also promotes the transformation and upgrading of the textile industry toward greener and higher-end. This review provides theoretical support for raw material optimization and process improvement of Lyocell fiber, and is of great significance to promote the long-term development of Lyocell fiber industry.

Key words: Lyocell fiber; dissolving pulp; pulping process

引文格式:

梁美霞, 王希超, 刘莹莹, 等. 莱赛尔 (Lyocell) 纤维用溶解浆的研究进展[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41 (4): 35-39.

Liang Meixia, Wang Xichao, Liu Yingying, et al. Research progress in dissolving pulp for Lyocell fiber[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2026, 41 (4): 35-39.

收稿日期: 2024-10-05; 修回日期: 2026-03-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32001281); 中国博士后面上基金项目(2023M742616); 齐鲁工业大学制浆造纸科学与技术教育部重点实验室开放基金(KF202010)

作者简介: 梁美霞(1997—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生; 通信作者: 刘莹莹, 副教授, lyy@tust.edu.cn

随着石油资源的日益紧缺以及人们环保意识的增强,以石油为原料合成的纤维正在逐渐被新型环保纤维所取代。莱赛尔(Lyocell)纤维被称为21世纪的“绿色纤维”,它通常以N-甲基吗啉-N-氧化物(NMMO)为溶剂形成纤维素溶液,再通过纺丝进行制备。在整个生产过程中使用的NMMO溶剂无污染、无毒,且该溶剂的回收率超过99%^[1]。另外, Lyocell纤维的原料(例如竹子、树木等)来源广泛,其主要成分包括综纤维素(60%~70%)、木素(20%~30%)^[2]。Lyocell纤维制成的产品具有绿色环保、亲水性好、透气性好、手感柔软、抗菌性能好、可生物降解的特点^[3],在服装和家庭纺织品中被广泛使用。

目前, Lyocell纤维在中国的生产主要集中在保定天鹅新型纤维制造有限公司、山东英利实业有限公司、上海里奥纤维企业发展有限公司、新乡白鹭投资集团有限公司等企业^[4],而国际上主要有Lenzing、格雷塞尔以及Hubang Lyocell等公司。由于消费者对环保和可持续纤维的需求不断增长, Lyocell纤维的市场正在经历快速增长阶段。随着Lyocell纤维的不断发展,其溶解浆的需求也在增加^[5]。因此,本文总结了制备Lyocell纤维用溶解浆的方法,阐述了Lyocell纤维用溶解浆的性能指标,并对Lyocell纤维的应用领域进行概述。

1 Lyocell纤维用溶解浆的制备工艺

1.1 蒸煮工艺

1.1.1 预水解硫酸盐法

预水解硫酸盐法(PHK)工艺的生产过程包括预水解(酸预水解、热水预水解和蒸汽预水解)和硫酸盐蒸煮两个阶段。预水解的目的是破坏原纤维素的结构,去除大量的半纤维素以及少量木素。预水解使蒸煮液快速渗透到纤维组织内部,从而提高溶解浆的反应能力^[6]。蒸汽预水解具有加热时间短、反应速度快的特点,通常用于工业生产。硫酸盐蒸煮的目的是去除木素以及剩余的半纤维素^[7]。PHK工艺对原料的适应性强,易于控制浆料的聚合度和黏度,成浆的 α -纤维素含量可达到95%~98%^[8]。除软木外,半纤维素含量高的原料也可用于PHK生产溶解浆。董元锋等^[9]通过PHK连续蒸煮结合(OO)D₀E₀PD₁D₂工艺生产出了高性能溶解浆,ISO白度为91%,戊聚糖含量在2%以下, α -纤维素含量在95%以上。目前,PHK已逐渐成为主流技术。

1.1.2 酸性亚硫酸盐法

酸性亚硫酸盐法(AS)工艺在酸性条件下进行,大部分半纤维素和木素被同时去除,与通过PHK工艺获得的纸浆相比,通过AS工艺获得的纸浆的得率和白度更高^[10]。由于纤维素纤维初生壁被破坏,通过AS工艺获得纸浆的可及性和反应性能高于通过PHK工艺获得纸浆的可及性和反应性能^[11]。另外,通过AS工艺获得的纸浆表现出比通过PHK工艺所得纸浆更宽的聚合度分布,从而导致浆料的 α -纤维素含量较低且相对分子质量的差异性较大^[12]。

1.2 漂白工艺

1.2.1 氧脱木素

氧脱木素是在碱性条件下以分子氧为漂白剂,降低纸浆中木素含量的操作。氧脱木素过程中木素的脱除率高达50%^[13]。王冉冉等^[14]以硫酸盐浆为研究对象,采用两段氧脱木素工艺进行处理,研究发现用碱量、温度、氧气压力等因素是影响该过程的主要工艺参数。在最佳工艺条件下得到纸浆的卡伯值为8.42,黏度为1024 mL/g。

1.2.2 漂白

为了进一步提高纸浆白度,通常在蒸煮和氧脱木素后采用漂白工艺。目前采用较多的漂白工艺有无元素氯漂白(ECF)和全无氯漂白(TCF)^[15]。这两种漂白方法都是少污染或无污染的纸浆漂白工艺^[16]。在ECF漂白中,由于二氧化氯对纤维素损伤较小,所以通常使用二氧化氯漂白^[17]。二氧化氯的漂白作用源于其释放的原子氧以及生成的次氯酸盐,二者共同作用于色素,使其分解。张德敬^[18]采用两段脱木素工艺以及ECF漂白,结合酸处理成功制备出满足天丝溶解浆质量标准的溶解浆,其溶解浆聚合度为610, α -纤维素含量为93.28%,ISO白度为90.10%,铁离子含量为1.88 mg/kg。TCF漂白的漂白剂有臭氧、过氧化氢、氧气等,其中过氧化氢的应用较为广泛^[19]。TCF工艺有绿色环保的特点,漂白过程无污染,不会产生有害物质。目前,全无氯漂白主要运用在非木材和木材原料纸浆中。全瑞平^[20]通过预水解硫酸盐法的蒸煮工艺以及三阶段漂白过程(包括过氧化氢脱木素、螯合处理和过氧化氢漂白),成功制备出溶解浆,浆料最终指标为: α -纤维素含量95.61%,ISO白度83.69%,卡伯值0.80,得率27.46%。

1.3 漂后处理工艺

1.3.1 碱性提取

碱性提取是溶解浆生产中的精炼部分,用于除去

可溶于碱的半纤维素和部分木素, 提高 α -纤维素的含量。碱性纯化通常以冷碱提取 (CCE) 或热碱提取 (HCE) 的方式进行。其中, 在 CCE 过程中, NaOH 的质量分数为 8% ~ 10%, 温度控制在 20 ~ 40 °C^[21], 其反应机制包括纤维溶胀以及半纤维素从内部溶解。冷碱抽提是保护纤维素的最好方法, 属于物理纯化过程。一般而言, 冷碱抽提工艺中的碱消耗可以忽略不计。经冷碱抽提处理后纸浆的纤维素含量可以达到 98% 甚至更高。在 HCE 过程中, NaOH 的质量分数为 0.4% ~ 1.5%, 温度控制在 95 ~ 135 °C。由于碱浓度较低, 纤维不能充分溶胀, 因此纤维深壁中的半纤维素不能被完全去除^[22]。另外, 该过程还存在产率较低、需要消耗额外的化学品和纸浆黏度较低等缺点。陈秋艳等^[23]以漂白浆为原料, 通过碱抽提技术制备溶解浆, 在浆料浓度 10%、NaOH 相对于浆料用量 10%、温度 30 °C、制备时间 60 min 的条件下, 半纤维素脱除率达到 66.71%。通过与酸处理工艺结合, 剩余半纤维素质量分数降至 7.02%, 溶解浆的纤维素纯度提升至 94.25%。

1.3.2 酸处理

酸处理可以去除溶解浆中的耐碱半纤维素和金属离子, 净化纤维素, 最大限度地减少纤维素在后续 NMMO 溶解体系的降解, 提高纤维的溶解性。金属离子在浆料中通常以物理吸附或者游离的形式存在, 在低 pH 和较高温度的条件下可以溶出, 常使用盐酸、硫酸等无机酸去除溶解浆中的金属离子。虽然无机酸去除金属离子的效果好, 但是会使溶解浆的聚合度大幅度降低, 因此可以选择甲酸、柠檬酸、草酸等有机酸进行处理^[24-25]。在酸处理的过程中还可以添加六偏磷酸钠、乙二胺四乙酸 (EDTA) 等螯合剂。螯合剂的作用是与金属离子结合形成水溶性络合物。另外, 酸中电离出的氢离子可与纤维中螯合的金属离子进行离子交换, 使金属离子游离出来, 可以通过水洗除去金属离子。

李盛世等^[26]研究了溶解浆制备过程中硫酸与柠檬酸处理对铁离子去除效果的影响。在酸用量 1%、温度 70 °C、时间 60 min 的条件下, 铁离子的去除效果达到最佳 (图 1^[26])。铁离子的去除过程可分为 3 个阶段: 快速去除阶段、充分去除阶段和残余去除阶段。

1.3.3 酶处理

酶处理技术具有绿色、温和、特异性和高效性的特点, 该技术在生产高质量溶解浆中发挥着重要作用, 但是酶处理存在成本高、条件严格等缺点。酶处

理过程中使用的酶主要是半纤维素酶、纤维素酶以及木素酶。纤维素酶处理破坏了纤维的结构, 增加了纤维的孔隙率, 可以改善溶解浆的反应性能、控制特性黏度、调节相对分子质量等^[27-28]; 与纤维素酶相比, 半纤维素酶 (如甘露糖酶和木聚糖酶) 主要用于纸浆纯化, 可以有效降低半纤维素含量即增加 α -纤维素含量。除此之外, 木聚糖酶还可以辅助漂剂提高浆的白度, 进一步脱除残余木素。木聚糖酶和纤维素酶常用于溶解浆的生产, 并取得了良好的效果^[29-30]。

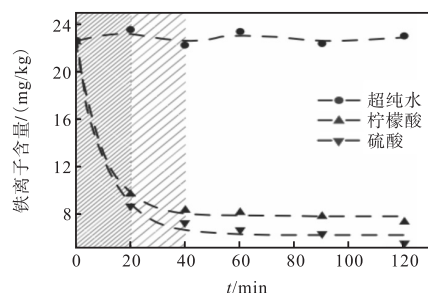
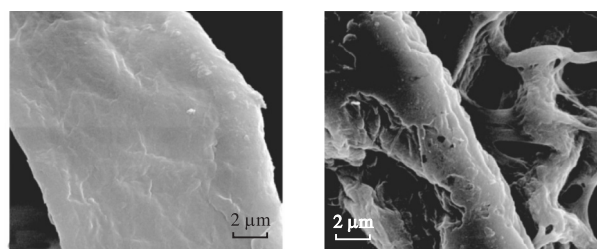


图 1 酸处理时间对铁离子含量的影响

Fig. 1 Effect of acid treatment time on iron ion content

李亚丽等^[31]采用内切纤维素酶对溶解浆进行处理, 发现纤维素酶处理能够显著改善溶解浆的反应性能 (图 2^[31])。田超等^[32]使用木聚糖酶对阔叶木浆进行处理, 溶解浆的 α -纤维素含量从 93.08% 提升到 95.14%。



(a) 未经过酶处理

(b) 酶处理后

图 2 溶解浆纤维的扫描电子显微镜图

Fig. 2 SEM images of dissolved pulp fibers

2 Lyocell 纤维用溶解浆的性能指标

溶解浆中通常含有除纤维素以外的杂质, 如半纤维素、木素和金属离子等。这些杂质对纺丝过程有负面影响。当含有杂质的纸浆进入 Lyocell 溶解系统时, 这些杂质在过滤过程中无法去除, 会进一步影响 Lyocell 纤维的可纺性。Lyocell 纤维用溶解浆的性能指标见表 1。

表1 Lyocell纤维用溶解浆的性能指标

Tab. 1 Performance indicators of Lyocell fiber pulp

检测指标	聚合度	α -纤维素含量/%	铁含量/(mg/kg)	铜含量/(mg/kg)	灰分/%	ISO 白度/%
数值	650 ~ 750	≥ 92	≤ 5	≤ 0.03	≤ 0.1	≥ 93

2.1 聚合度

Lyocell 纤维比黏胶纤维具有更高的强度,对溶解浆的聚合度要求相对较高。高分子化合物的溶解度与相对分子质量有关。一般聚合度越高,相对分子质量越高,溶解度越小,NMMO 与水就越难进入溶解浆内部,可能导致纺丝原液的溶解性变差、黏度增加^[33]。此外,溶解浆的聚合度对 Lyocell 纤维的机械强度有直接影响。一般认为,聚合度低于 200 或高于 1 200 的溶解浆越少越好,虽然高聚合度的溶解浆可制成强度较高的纤维,但是会影响纺丝原液的过滤性能。相反,当溶解浆的聚合度较低时,成品的耐磨性会降低,很难纺出高质量的丝,甚至无法纺出丝。因此,在选择 Lyocell 纤维用溶解浆时,通常选择聚合度为 650 ~ 750。

2.2 α -纤维素含量和半纤维素含量

半纤维素、灰分、金属离子和杂质去除得越彻底,溶解浆中 α -纤维素的含量越高。有研究^[34]表明,适用于 Lyocell 纤维的溶解浆中的 α -纤维素含量一般需要大于 92%。相关研究^[35]表明,半纤维素的含量对纤维的整体结构、原生纤维束的大小和染色性能有直接影响。过高的半纤维素含量会降低纺丝原液的过滤性能并影响可纺性。因此,在实际生产中需要严格控制并适度降低溶解浆中的半纤维素含量,以获得良好的纺丝性能,进而提高成品 Lyocell 纤维的质量和生产效率^[36]。

2.3 金属离子含量和灰分

Lyocell 工艺对溶解浆中金属离子的要求比较高,特别是铁离子、铜离子等,即溶解浆需要具有低含量的金属离子。金属离子的存在状态主要有 4 种,分别为游离态存在于水相中、与纤维形成物理吸附、与木素中的酚羟基和醛基结合以及与纤维中的羧基、糖醛酸基产生螯合^[37]。金属离子的存在,容易导致 NMMO 的降解,从而影响纤维的溶解以及 NMMO 的回收。另外,纺丝原液的过滤和纺丝段的稳定性也会受到其他杂质的影响(如出现喷嘴堵塞的问题),即使有少量金属离子存在,也会对 Lyocell 工艺产生巨大的影响,严重时催化 NMMO 发生放热爆炸,危及生产安全。此外, Lyocell 纤维用溶解浆的灰分含量通常控制在 0.1% 以下^[38]。

2.4 其他

对 Lyocell 纤维而言,白度、水分、灰分、纤维素含量、尘埃度等质量指标是其纤维素纤维的固有特性,这些参数可以参考黏胶纤维的标准。Lyocell 纤维对白度有较高的要求,一般要求溶解浆的白度达到 93% 以上。溶解浆中残留的木素是影响溶解浆白度的重要因素。在 Lyocell 纤维用溶解浆生产过程中必须控制尘埃含量。尘埃度是指溶解浆中不同大小尘埃颗粒的数量。溶解浆中若含有较大粒径的尘埃或尘埃数量过多,可能会导致纺丝过程中喷丝孔的堵塞。随着溶剂的循环使用,系统中的树脂浓度逐渐增加,原液的可纺性变差,导致产品质量下降^[39]。

3 结 语

从长期可持续发展的角度和对纤维自身性能的分析来看, Lyocell 系列新型溶剂纤维素纤维的原料可再生,生产工艺环保,具有显著的社会效益和经济效益,具有巨大的发展潜力。Lyocell 纤维产业化受到限制的主要原因是 Lyocell 纤维所用溶解浆主要依赖进口。因此,有必要开发自己的 Lyocell 纤维产业化技术及设备,用于生产适合 Lyocell 纤维的特种溶解浆。在中国,预水解硫酸盐(PHK)工艺占总产能的 78%。新的处理方法,如改性碱提取、酸提取、酶处理,在提高溶解浆质量方面非常有效。如果能突破这些限制因素,中国的 Lyocell 纤维的发展潜力将是巨大的。制备出符合 Lyocell 纤维要求的溶解浆可以为下游市场提供技术支持,从而建立完整的产业链,为 Lyocell 纤维的产业化作出贡献。

参考文献:

- [1] 刘龙飞,王欣奇,薛振军,等. 酸性改性造纸浆用于 Lyocell 纤维浆粕的研究[J]. 棉纺织技术, 2025, 53(12): 1-7.
- [2] Chen Yuxuan, Zhang Kangjian, Yu Linpeng, et al. Variations in characteristics of bamboo vascular bundles between *Dendrocalamus* and *Bambusa*[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 219: 119140.
- [3] 孔硕,龚琛,倪建萍,等. 杂细胞对 Lyocell 级竹溶解浆溶解性能及可纺性能的研究[J]. 中国造纸, 2024,

- 43(3): 73–81.
- [4] 李明聪, 陈文静, 孙明楷, 等. 高吸湿抗菌 Lyocell 水刺布的制备及性能[J]. 棉纺织技术, 2025, 53(6): 36–40.
- [5] 谢晓丽, 徐峻, 鲁俊良, 等. 针叶木浆制备莱赛尔级溶解浆工艺探究[J]. 造纸科学与技术, 2024, 43(7): 1–4.
- [6] 张兴, 李军荣, 钱丽颖, 等. 云杉预水解硫酸盐法制备 Lyocell 纤维用溶解浆[J]. 毛纺科技, 2024, 52(9): 34–43.
- [7] 牛胜玥, 罗西尧, 林凯睿, 等. 预水解硫酸盐竹浆的漂白工艺研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(7): 24–31.
- [8] 薛丽丽, 刘宇, 杜娟. 漂白硫酸盐木浆生产线改产溶解浆工程实践[J]. 中国造纸, 2022, 41(3): 111–115.
- [9] 董元锋, 刘若飞, 陈德海, 等. 预水解硫酸盐法制备高性能辐射松溶解浆[J]. 中华纸业, 2020, 41(18): 18–25.
- [10] 程艺璇. 玉米秸秆酸性亚硫酸盐预处理工艺优化及对纤维素酶解的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 1–25.
- [11] 陈春霞, 刘一山, 段超, 等. 酸性亚硫酸盐与预水解硫酸盐法溶解浆生产工艺及产品性能的比较[J]. 中国造纸, 2015, 34(12): 66–70.
- [12] Zhang Ying, Xin Donglin, Wen Peiyao, et al. Comparison of alkaline sulfite pretreatment and acid sulfite pretreatment with low chemical loading in saccharification of poplar[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2023, 195: 4414–4428.
- [13] 张彬, 董元锋, 刘温霞, 等. 过氧化氢强化两段氧脱木素[J]. 中国造纸, 2010, 29(5): 14–16.
- [14] 王冉冉, 李兵云, 耿青杰, 等. 粉单竹硫酸盐浆两段氧脱木素工艺[J]. 造纸科学与技术, 2018, 37(4): 1–4.
- [15] 詹怀宇. 国际纸浆漂白技术的新进展[J]. 中国造纸, 1999, 18(4): 38–43.
- [16] 韩善明, 房桂干, 沈葵忠, 等. 漆酶-介体系统处理麦草化学浆全无氯漂白性能的研究[J]. 林产化学与工业, 2002, 22(4): 5–9.
- [17] 王双飞. 非木材纸浆的无元素氯漂白与二氧化氯制备系统的国产化[J]. 中华纸业, 2009, 30(17): 70–72.
- [18] 张德敬. 慈竹制备天丝溶解浆的工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1–58.
- [19] Wang Xiwen, Hu Jian, Liang Yun, et al. TCF bleaching character of soda-anthraquinone pulp from oil palm frond[J]. BioResources, 2012, 7(1): 275–282.
- [20] 仝瑞平. 竹溶解浆预水解液中木素选择性脱除机理的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017: 1–50.
- [21] Arnoul-Jarriault B, Lachenal D, Chirat C, et al. Upgrading softwood bleached kraft pulp to dissolving pulp by cold caustic treatment and acid-hot caustic treatment[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 65: 565–571.
- [22] Schild G, Sixta H. Sulfur-free dissolving pulps and their application for viscose and lyocell[J]. Cellulose, 2011, 18(4): 1113–1128.
- [23] 陈秋艳, 苗庆显, 曹石林, 等. 漂白竹浆碱抽提制备溶解浆的研究[J]. 林产化学与工业, 2016, 36(4): 93–98.
- [24] Granholm K, Harju L, Ivaska A. Desorption of metal ions from kraft pulps. Part 2. Chelation of kraft pulps with different complexing agents and with EDTA in a reducing environment[J]. BioResources, 2010, 5(1): 227–243.
- [25] Wei Zhenke, Wang Daiqi, Chen Yehong, et al. The H-bond evolution of cellulose nanofibrils treated with choline chloride/oxalic acid[J]. Cellulose, 2022, 29(7): 3675–3687.
- [26] 李盛世, 刘梦茹, 秦晓, 等. 绝缘竹浆制备过程中酸处理除铁离子规律研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(6): 28–34.
- [27] Silva C O G, Filho E X F. A review of holocellulase production using pretreated lignocellulosic substrates[J]. Bioenergy Research, 2017, 10(2): 592–602.
- [28] Li Bu, Liu Yundong, Tong Wangkai, et al. Effects of cellulase treatment on properties of lignocellulose-based biochar[J]. Bioresource Technology, 2024, 413: 131452.
- [29] Yang Shuo, Yang Bo, Duan Chao, et al. Applications of enzymatic technologies to the production of high-quality dissolving pulp: a review[J]. Bioresource Technology, 2019, 281: 440–448.
- [30] Loureiro P E G, Cadete S M S, Tokin R, et al. Enzymatic fibre modification during production of dissolving wood pulp for regenerated cellulosic materials[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 717776.
- [31] 李亚丽, 黄六莲, 陈礼辉, 等. 纤维素酶处理改善黏胶纤维级溶解浆反应性能的研究[J]. 中国造纸学报, 2017, 32(4): 1–5.
- [32] 田超, 石瑜, 翟丙彦, 等. 纤维素酶和聚木糖酶处理改善溶解浆性能的研究[J]. 中国造纸, 2018, 37(5): 1–6.
- [33] Chen Chunxia, Duan Chao, Li Jianguo, et al. Cellulose(dissolving pulp) manufacturing processes and properties: a mini-review[J]. BioResources, 2016, 11(2): 5553–5564.
- [34] Ceccherini S, Ståhl M, Sawada D, et al. Effect of enzymatic depolymerization of cellulose and hemicelluloses

(下转第 48 页)

- neous esterification of hemicelluloses from fast-growing poplar wood[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 44(1): 29–39.
- [27] 姜立春, 阮期平, 蒲忠慧, 等. 半纤维素降解菌 J-16 的筛选及产酶特性研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(7): 55–60.
- [28] Wakisaka N, Kobayashi W, Abe T, et al. Solution properties of laccase-treated pectic polysaccharides derived from steam-dried sugar beet pulp[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109712.
- [29] Wu Tongfeng, Liu Chengmei, Hu Xiuting. Enzymatic synthesis, characterization and properties of the protein-polysaccharide conjugate: a review[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131332.
- [30] Rencoret J, Pereira A, Del Río J C, et al. Delignification and saccharification enhancement of sugarcane byproducts by a laccase-based pretreatment[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(8): 7145–7154.
- [31] Parab P, Khandeparker R, Amberkar U, et al. Enzymatic saccharification of seaweeds into fermentable sugars by xylanase from marine *Bacillus* sp. strain BT21[J]. 3 Biotech, 2017, 7: 1–7.
- [32] Moreira L R S, Filho E X F. Insights into the mechanism of enzymatic hydrolysis of xylan[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100: 5205–5214.
- [33] 任颖. 酶与仿酶作用下 LCC 中多糖组分的降解[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015: 1–15.
- [34] Karkas M D, Bosque I, Matsuura B S, et al. Photocatalytic oxidation of lignin model systems by merging visible-light photoredox and palladium catalysis[J]. Organic Letters, 2016, 18(19): 5166–5169.
- [35] Ou Jinfen, Hu Songnan, Yao Lu, et al. Simultaneous strengthening and toughening lignin/cellulose nanofibril composite films: effects from flexible hydrogen bonds[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 453: 139770.
- [36] Goldschmid O. Determination of phenolic hydroxyl content of lignin preparations by ultraviolet spectrophotometry[J]. Analytical Chemistry, 1954, 26(9): 1421–1423.
- [37] Lee J H, Kim T M, Choi I G, et al. Phenolic hydroxyl groups in the lignin polymer affect the formation of lignin nanoparticles[J]. Nanomaterials, 2021, 11(7): 1790.
- [38] Zuo Airen, Dong Huanhuan, Yu Yanying, et al. The anti-tyrosinase and antioxidant activities of flavonoids dominated by the number and location of phenolic hydroxyl groups[J]. Chinese Medicine, 2018, 13: 1–12.
- [39] Quan Wei, Xu Yang, Xie Yiting, et al. In vitro antioxidant properties and phenolic profile of acid aqueous ethanol extracts from *Torreya grandis* seed coat[J]. Molecules, 2022, 27(17): 5560.
- [40] 杨宗美, 王飞, 李媛, 等. 酚类化合物体外自由基清除能力的研究[J]. 广东化工, 2022, 49(13): 40–43.
- [41] Meng Taotao, Ding Yu, Liu Yu, et al. In situ lignin adhesion for high-performance bamboo composites[J]. Nano Letters, 2023, 23(18): 8411–8418.

责任编辑: 周建军

(上接第 39 页)

- on the direct dissolution of prehydrolysis kraft dissolving pulp[J]. Biomacromolecules, 2021, 22(11): 4805–4813.
- [35] Zhang Huiru, Zhang Huihui, Tong Mingwei, et al. Comparison of the structures and properties of lyocell fibers from high hemicellulose pulp and high α -cellulose pulp[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(1): 636–641.
- [36] Kosan B, Thümmel K, Meister F, et al. Suitable dissolving pulps and their impacts on solution spinning of cellulose man-made fibers[J]. Cellulose, 2024, 31(3): 1941–1955.
- [37] Granholm K, Harju L, Ivaska A. Desorption of metal ions from kraft pulps. Part 1. Chelation of hardwood and softwood kraft pulp with EDTA[J]. BioResources, 2010, 5(1): 206–226.
- [38] QB/T 4898—2015 溶解浆[S].
- [39] Guo Yaoxian, Cai Jian, Sun Tianqi, et al. The purification process and side reactions in the N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO) recovery system[J]. Cellulose, 2021, 28(12): 7609–7617.

责任编辑: 周建军