

# 生物质精炼技术与制浆造纸的结合

陈丽卿

(中国制浆造纸研究院有限公司, 北京, 100102)

**摘要:** 生物质精炼技术发展与应用是对传统制浆造纸产业转变发展方式的变革与创新, 对造纸行业可持续发展具有战略意义。文章主要介绍了部分制浆造纸生物质精炼技术, 包括半纤维素的分离纯化及利用、纤维素的高值化利用、黑液中木质素的分离提纯与利用、黑液气化等。

**关键词:** 生物质精炼; 纤维素; 半纤维素; 木质素; 黑液气化

**中图分类号:** TS7

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11981/j.issn.1000-6842.2019.03.77

随着全球经济的发展和资源的不断紧缺, 生物质精炼这一概念被科研人员提出, 其本质是将生物质资源的开发利用当作一个系统的工程问题, 从而使生物质资源的各组分能够得到充分利用。目前, 生物质精炼主要体现在以下 3 个方面: 生物质能源、生物质材料、生物质化学品。

近年来, 由于受经济危机的影响, 劳动力成本大幅增加, 能源成本也大幅增加, 导致了企业的利润被不断压缩, 制浆造纸产业就是其中之一。因此, 把制浆造纸与生物质精炼结合, 实现制浆造纸过程低能耗、低排放, 实现产品多元化, 可增强制浆造纸产业的核心竞争力, 从而缓解制浆造纸产业目前的困境<sup>[1]</sup>。以生物化学和热化学过程为基础的生物质精炼模式可实现对制浆造纸的产业革命, 打破原本产品单一的格局, 让生物质资源得到高效合理利用, 减少对环境的污染, 并有助于实现人类社会、经济的可持续发展<sup>[2]</sup>。与制浆造纸产业相关的生物质精炼主要有: ①半纤维素的分离纯化及利用; ②纤维素的高值化利用; ③黑液中木质素的分离提纯及综合利用; ④黑液气化以产能源(如合成气、电力、蒸汽)或制成化学品; ⑤从塔罗油中提取资源。

## 1 半纤维素的分离纯化及利用

### 1.1 半纤维素的分离纯化

过去 50 多年来, 硫酸盐法制浆已成为最主要的化学制浆方法, 这种方法把占木材质量 20% ~ 30% 的半纤维素和木质素溶于制浆黑液中并随黑液被送去

燃烧, 然而半纤维素热值(13.6 MJ/kg)较低, 仅为木质素热值(27 MJ/kg)的 1/2, 这种利用方式会造成半纤维素资源的严重浪费<sup>[3]</sup>。如果将这些半纤维素转化为生物质产品, 如乙醇、糠醛、半纤维素基涂料等, 则能够让半纤维素的附加值大幅度增加。所以, 在制浆前, 先分离出木质纤维中的半纤维素, 并将其转化为其他具有较高附加值的产品, 该过程就涉及到生物质精炼技术。然而半纤维素结构和性质的不均一性限制了其应用, 因此, 对于半纤维素的高值化利用而言, 半纤维素的分离纯化很重要<sup>[4]</sup>。

常见的分离半纤维素的方法有<sup>[3,5]</sup>: ①物理法, 包括机械辅助分离、高能辐射、超声辅助分离等; ②化学法, 包括酸水解、碱水解、臭氧法、有机溶剂法(有机溶剂与无机酸混合催化)等; ③物理-化学法, 包括蒸汽爆破法、液氨爆破法、CO<sub>2</sub> 爆破法等。通过以上分离半纤维素方法可以得到小分子物质和大分子物质。对于小分子物质, 如聚木糖、木糖、糠醛、木糖醇等, 目前很多工厂都在利用, 并已工业化, 如安徽峰园集团利用玉米芯制备木糖醇、河北春雷集团生产糠醛等<sup>[6]</sup>。对于得到的大分子物质, 由于结构和性质不均一, 对其进一步利用则需要纯化。目前, 半纤维素纯化的方法主要有: 脱色和除蛋白、乙醇沉淀法、超临界二氧化碳沉淀法、柱层析法、膜纯化法等<sup>[7]</sup>。

### 1.2 半纤维素的综合利用

制浆前, 可将从木片中提取出来的半纤维素转化为聚合物、生物质燃料和化学品。其中, 乙醇和糠醛是很有吸引力的产品, 生产流程分别如图 1 和图 2 所

收稿日期: 2019-04-07

作者简介: 陈丽卿, 女, 1984 年生; 工程师; 主要从事造纸类期刊的编辑工作。

E-mail: liqing7785@gmail.com

示<sup>[8]</sup>。随着我国宣布 2020 年全面推广燃料乙醇，燃料乙醇在全球替代化石原料战略中将发挥更大作用。联合国粮食组织预计，2020 年全球燃料乙醇年产量将达到 1.2 亿 t<sup>[9]</sup>。20 世纪 20 年代，美国最先实现了糠醛的商业化生产。截止到目前，糠醛的商业化生产持续了上百年。当今，很多发达国家已不再从事糠醛的商业化生产，而一些发展中国家，如伊朗、中国等，依然在从事糠醛的商业化生产。由文献[10]可知，我国是世界上最大的糠醛生产国，每年生产的糠醛为 20 万 t/a。

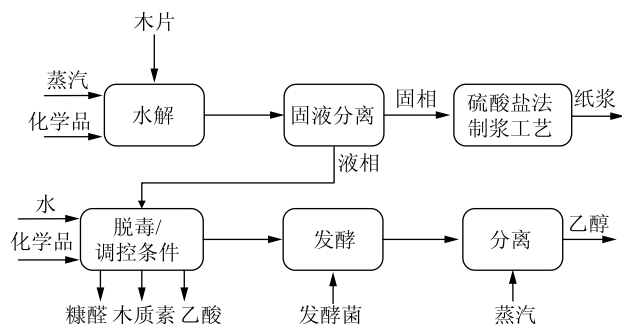


图 1 用木片生产乙醇的工艺流程

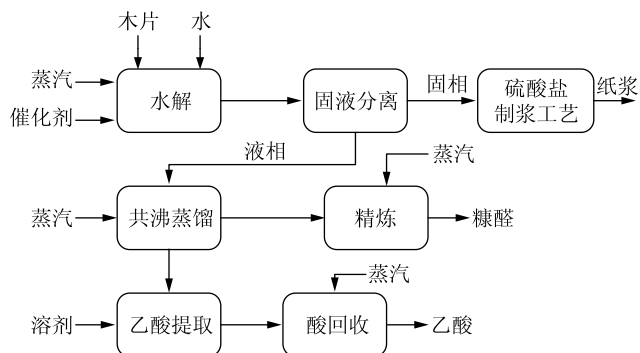


图 2 用木片生产糠醛的工艺流程

在得到结构和性质均一的高聚物半纤维素后，可对其进行酯化、醚化及接枝共聚等改性处理，从而得到可降解材料，如可降解的膜材料、水凝胶材料以及其他吸附材料。其中，水凝胶材料可作为重金属的吸附材料应用于环境治理。

将半纤维素转化为高附加值产品需要考虑能量优化问题。从高鹏和 Marinova 等<sup>[4, 11]</sup>指出，将近中性的预抽提工艺结合到加拿大典型硫酸盐制浆厂会增加 15.5% 的蒸汽需求量；对此，其提出了生物质精炼族的概念，该概念为解决能源成本的增加问题提供了可能性。为了建立基于半纤维素提取与转化的有效益的生物质精炼族，需要优化的参数有 5 个：材料、能耗、运输费用、工厂间距离及预水解液浓度。

## 2 纤维素的高值化利用

### 2.1 溶解浆

溶解浆含有较多的  $\alpha$ -纤维素，并且聚戊糖和灰分含量低，同时尘埃度也较低，具有较好的反应性能，因此其可作为原材料应用于多个领域，如作为肠溶性药片糖衣的原料及作为黏胶纤维的原料等。

据《中国溶解浆市场供需与发展前景研究报告(2018 版)》显示<sup>[12]</sup>，截至 2017 年底，全球溶解浆产能约 800 万 t。其中，包括 Sappi、Aditya Birla、Lenzing、太阳纸业、Bracell 和 Rayonier 在内的前六名生产商产能合计约 444 万 t，占全球产能的 55% 左右。2017 年，我国溶解浆表观消费量达 442 万 t，同比增长 4.2%。但我国溶解浆产能利用率不高，实际产量为 180 万 t，进口依赖率达 59.3%。2013 年，我国开始针对进口溶解浆产品发起反倾销调查。此外，2018 年 8 月，我国政府还决定对原产于美国的溶解浆加收 5% 的关税。以上措施将利好我国溶解浆生产企业的发展，预计未来几年我国溶解浆产量将稳步上升，进口依赖度逐步下降。

溶解浆主要以棉短绒和木材为原料，竹子、芦苇和甘蔗渣等也可作为溶解浆的生产原料，但应用不多。吕卫军等<sup>[13]</sup>指出，生产溶解浆时，针对不同的生产原料，则需要选择相应的生产工艺。例如采用木材为溶解浆生产原料时，可选择的生产工艺是预水解硫酸盐法，也可以使用亚硫酸盐法。此外，竹材溶解浆也主要采用预水解硫酸盐法制备，而棉短绒主要采用碱法蒸煮。

在高温条件下，使用具有游离  $\text{SO}_2$  的亚硫酸氢盐进行蒸煮，该方法即为亚硫酸盐法蒸煮。在进行亚硫酸盐法蒸煮时，需要严格控制原料，通常情况下，选择的木材原料的树脂含量不宜太高。预水解硫酸盐法包含有 2 个环节：预水解和硫酸盐蒸煮。如果想获得具有较高纯度的溶解浆或具有特殊用途的造纸用浆时，可以采用预水解硫酸盐法蒸煮。预水解处理有 3 种比较常用的方式：汽预水解、水预水解及酸预水解。预水解的作用有：第一，可有效控制纸浆的聚合度；第二，可提高纸浆的反应性能，即在酸性的条件下，可破坏纤维的初生壁，暴露出的次生壁因为具有较高的纤维素含量，从而提高纸浆的反应性能；第三，可以有效降低原料中的半纤维素量，即通过改变原料结构，从而使  $\alpha$ -纤维素的含量得到提升。使用碱法蒸煮时，常用 NaOH 溶液进行原料处理，从而使非纤维素物质及低聚物与原料分离。通常情况下，碱

法蒸煮的用碱量为 14% ~ 18%，蒸煮温度控制在 150℃ ~ 175℃。在采用碱法蒸煮时，应尽量避免空气对纤维素聚合度和得率的影响，为了保证蒸煮的均匀性，可适当加入表面活性剂。

几十年来，各国都是用间歇蒸煮系统生产溶解浆。作为世界上第一家使用连续蒸煮系统生产溶解浆的企业，太阳纸业一直致力于对工艺的优化和完善。与间歇蒸煮系统不同，使用连续蒸煮系统可使生产出的溶解浆具有良好的均一性，因此可以用于水解液的综合利用。

## 2.2 纳米纤维素

随着生产力的不断发展和科技水平的不断提升，研究人员对纳米纤维素表现出了极大兴趣，并对其展开深入的研究。纳米纤维素是指在某种维度上具有纳米尺寸的生物质基高分子材料，可通过机械法、化学法、生物法或几者相结合的方法处理纤维而制得。通常，人们所说的纳米纤维素包括：纳米微晶纤维素(NCC)、细菌纤维素(BC)、微纤化纤维素(MFC)及纳纤化纤维素(NFC)<sup>[14]</sup>。

纳米微晶纤维素表面羟基十分丰富，并且比表面积较大。目前，纳米微晶纤维素主要应用于复合膜、纸和纸板添加剂、吸附剂等领域。如果在纸浆中添加纳米微晶纤维素，其可与纸浆纤维结合，从而使纤维之间的结合力大幅度提高。所以，制浆造纸过程中，可以把纳米微晶纤维素作为一种增强剂使用。通过 2,2,6,6-四甲基哌啶氮氧化物(TEMPO)诱导氧化和机械处理可得到纳纤化纤维素，其也可称为纤维素纳米纤丝(CNF)。微纤化纤维素与传统纸浆纤维显著不同，但与纳纤化纤维素具有相似的性质，所以，其也可归为纳米纤维素的范畴。国外研究学者在 30 年前就已经对微纤化纤维素展开研究，并已经出现了相关商业化产品，我国则很少对其展开研究<sup>[15]</sup>。细菌纤维素有很多优点，如其具有较高的抗张强度，具有较高的持水性，具有较高的结晶度等，是一种新型有机绿色的环保材料，因此其可作为纸张添加剂应用在造纸工业中，并且具有广阔的应用前景<sup>[16]</sup>。

随着经济的发展和资源的不断枯竭，各国均对环境问题给予高度重视，因此希望能够通过绿色化学的方式改善这一局面。作为一种具有多种用途的生物质基材料，纳米纤维素有很多优点，可应用在各个领域，比如医学领域、食品领域、化妆品领域等，蕴藏着无限商机。

## 3 黑液中木质素的分离提纯和综合利用

木质素由于是高热值的生物质燃料，又能衍生并

生产出大量的化学品，故被称为木材中的黄金，将木质素从制浆黑液中提取分离的技术很早就引起了人们的重视。从黑液中分离提纯木质素主要方式有 4 种<sup>[17]</sup>。第一种方式是膜分离法。膜分离法主要采用超滤法和电渗析法，其优点是提取的木质素纯度高，其他种类的污染物也各自作为副产物被分离出来；但是，该方法也存在一些不足之处，如各种膜对造纸黑液的适应性较差等<sup>[18]</sup>。第二种方式是化学凝聚法，该方法具有很多优点，如具有较强的工艺适应性及操作灵活性等，但也存在一些不足之处，如沉聚物中含有大量的有机杂质，从而影响木质素分子功能基。第三种方式是酸析法，该方法由于研究得比较全面，相应的工艺发展也比较成熟。其原理是在调节黑液 pH 值时通过加酸完成，从而使钠木质素能够得到有效转化并最终析出。酸析法的优点是操作相对简单，不足之处是可能会对设备造成腐蚀，使废水不能达标排放等。第四种方式是蒸发浓缩法，其原理是通过使用蒸发器进行蒸发。如果想要就近使用液态黑液，就可以使用该方法，但该方法处理后，浓缩的黑液中会存在大量的杂质，这些杂质的存在，会对木质素的改性剂应用产生不利影响。综上所述，木质素分离方式不同会导致产生的产物结构也不同。

木质素具有广泛的用途，在制浆过程中分离出木质素，并通过一系列方法对其进行提纯改性，可以在多个领域发挥作用，如燃料、冶金、建筑等领域中，其还可以用于生产分散剂、乳化剂、螯合剂、酚醛树脂、碳纤维等，且木质素的新产品还在不断开发，应用前景十分广阔<sup>[19]</sup>。

## 4 黑液气化

黑液气化是制浆造纸生物质精炼的重要组成部分，产生的热量可用于半纤维素转化工序，合成气也可用于取代石灰窑的燃油。20 世纪 80 年代，研究人员就对其展开研究。黑液气化过程可以分为 3 个阶段<sup>[20]</sup>：第一个阶段是干燥阶段，第二个阶段是焦化阶段，第三个阶段是气化阶段。在有空气的条件下，部分有机物可与氧气发生反应；反应产生的热量能够让炉温保持在较高状态，从而促进黑液干燥和分解，进而生成焦炭、水、一氧化碳和甲烷；焦炭进一步与二氧化碳或水发生反应，生成氢气和一氧化碳。

与传统碱回收方式相比，黑液气化具有很多优点，如让存在于黑液中的有机物质充分发挥作用，从而避免了资源的浪费。该过程中产生的合成气能够用于生产液态燃料和发电，也可以代替石化能源，用于

动力锅炉和石灰窑,从而减少不可再生资源使用量。

目前,在进行黑液气化时,需要解决的问题有:应能够体现出效益的优越性和技术的可靠性;应能够在商业化规模下回收制浆化学品。国外一些国家已经开始对黑液气化进行应用,随着技术的不断完善,相信其在未来一定可以发挥出更大作用。有研究人员认为<sup>[21]</sup>,黑液气化具有十分可观的商业价值,可用于生产液体燃料并应用在多个领域。所以,黑液气化作为制浆造纸生物质精炼的一个重要组成部分,很值得关注并应加大研究以优化工艺。

## 5 从塔罗油中提取资源

生产针叶木浆时,如果使用的是硫酸盐法,则可获得塔罗油。于建仁等<sup>[20]</sup>指出,可以采用以下方法对粗塔罗油进行精制:碱金属氢氧化物分级皂化法、溶剂萃取法、吸附法、部分酯化分离法及蒸馏法。在这5种方式中,应用最广泛的是蒸馏法,该方法投入资金较少,产品质量较高。由于塔罗油中各主要成分对高温比较敏感,因此常使用减压蒸馏精制粗塔罗油。减压蒸馏有2种常见方式,即连续蒸馏和间歇蒸馏<sup>[22]</sup>;与后者相比,前者具有很多优点,如其能够提高松香和脂肪酸的得率,减少沥青的形成及相关设备的投资,蒸馏时间相对较短,生产能力大等。但从连续蒸煮设备中得到的树脂酸和脂肪酸的浓度不是很高,需要通过如解吸-精馏以进一步得到纯净的高浓度树脂酸和脂肪酸产品<sup>[22]</sup>。

松香酸和脂肪酸是塔罗油的主要成分,使用蒸馏法精制粗塔罗油的方式,可以获得脂肪酸、松香等高附加值产品,其应用范围比较广泛,如可以应用于肥皂、油墨<sup>[23]</sup>等领域中。此外,塔罗油还可被用于生产生物质柴油等绿色燃料。目前,土耳其某企业已经实现将塔罗油用于生产生物质柴油,并取得了一些成果<sup>[20]</sup>。

## 6 结语及展望

将制浆造纸工业和生物质精炼技术相结合,可以有效提升植物纤维资源的利用率,并有效改善我国环境污染问题,促进我国走经济可持续性发展道路。随着科学技术的不断发展和人们环保意识的不断增强,研究人员开始把研究核心投入到生物质精炼技术中。但是,由于对生物质精炼技术的研究时间相对较短,因此该技术的应用范围还很有限。制浆造纸工业具备实现生物质精炼与研发应用生物技术的基本优势条件,但是,其市场不确定性评估、技术转化途径等方

面还需要研究学者进行深入的研究和讨论。

现有的综合林业生物质精炼厂模型都是基于木材硫酸盐制浆厂。而目前,我国非木浆厂较多,用传统碱回收法回收非木浆黑液的效率较低。因此,在对我国造纸原料使用情况进行研究和分析的基础上,让工厂生产工艺与生物精炼技术融合,从而使半纤维素及木质素等物质得到有效分离,以提高其转化率和利用率,可为我国制浆造纸产业实现可持续性发展提供适用的先进技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] YANG X F, HU H C, HUANG L L, et al. Effect of Hot Water Pre-extraction on Kraft Pulping Performance of Bamboo[J]. East China Pulp & Paper Industry, 2014, 45(5): 5.  
杨雪芳,胡会超,黄六莲,等.竹材热水预抽提对硫酸盐法制浆的影响[J].华东纸业,2014,45(5):5.
- [2] MA L F. Biorefinery and Pulping and Papermaking[J]. Hu'nan Papermaking, 2013(2): 4.  
马乐凡.生物质精炼与制浆造纸[J].湖南造纸,2013(2):4.
- [3] DUAN C, FENG W Y, ZHANG Y L. Research progress in pretreatment technologies for woody biomass biorefinery[J]. China Pulp and Paper, 2013, 32(1): 59.  
段超,冯文英,张艳玲.木质生物质精炼预处理技术研究进展[J].中国造纸,2013,32(1):59.
- [4] CONG G P, SHI Y Q, LI S H, et al. The Forest Biorefinery and Its Implementation in the Pulp and Paper Industry: Energy Overview[J]. World Pulp and Paper, 2012, 31(4): 60.  
丛高鹏,施英乔,李四辉,等.林基生物质精炼及其在制浆造纸工业中的实现[J].国际造纸,2012,31(4):60.
- [5] Eggeman T, Elander R T. Process and economic analysis of pretreatment technologies[J]. Bioresource Technology, 2005, 96: 2019.
- [6] MAO C B, NI Y H. Biorefinery: A New Revolution in Green Energy [J]. China Pulp and Paper, 2008, 27(7): 63.  
毛长斌,倪永浩.生物质提炼的研究进展及在造纸工业上的应用[J].中国造纸,2008,27(7):63.
- [7] Mosier N, Wyman C, Dale B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lognocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2005, 96: 673.
- [8] Maryam Moshkelani, Mariya Marinova, Jean Paris. The Forest Biorefinery and Its Implementation in the Pulp & Paper Industry[C]//2nd European Conference on Polygeneration. Spain, 2011.
- [9] China's Industrial Economy Information Network. The variety promotions of Ethanol gasoline around the world[R/OL]. [2017-12-17]. <http://www.cinic.org.cn/xw/hwcj/413704.html>.  
中国产业经济信息网.全球乙醇汽油推广百花齐放[R/OL]. [2017-12-17]. <http://www.cinic.org.cn/xw/hwcj/413704.html>.
- [10] Market Profile of Furfural[R/OL]. [2017-03-24]. [https://www.sohu.com/a/130055457\\_252291](https://www.sohu.com/a/130055457_252291).  
糠醛市场概况[R/OL]. [2017-03-24]. [https://www.sohu.com/a/130055457\\_252291](https://www.sohu.com/a/130055457_252291).
- [11] Marinova M, Mateos-Espejel E, Jemaa N, et al. Addressing the in-

- creased energy demand of a kraft mill biorefinery: The hemicellulose extraction case [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87: 1269.
- [12] The report of dissolving pulp market supply and demand of China and the development prospect (2018 ed.) [R/OL]. [2018-09-26]. [http://www.sohu.com/a/256259567\\_252291](http://www.sohu.com/a/256259567_252291). 中国溶解浆市场供需与发展前景研究报告(2018版)[R/OL]. [2018-09-26]. [http://www.sohu.com/a/256259567\\_252291](http://www.sohu.com/a/256259567_252291).
- [13] LV W J, ZHANG Y, CHEN B. Dissolving Pulp Manufacture Technologies: Current Status and Development Trend [J]. *China Pulp and Paper*, 2012, 31(1): 61.  
吕卫军, 张勇, 陈彬. 溶解浆的生产技术现状与发展[J]. *中国造纸*, 2012, 31(1): 61.
- [14] HuiZe Luo, JuanJuan Li, FengShan Zhou. Advances in Hard Tissue Engineering Materials—Nanocellulose-based Composites [J]. *Paper and Biomaterials*, 2018, 3(4): 62.
- [15] JIANG Z H, WANG H K, YU Y, et al. A Review of Preparation and Properties of Microfibrillated Cellulose Originated from Plants [J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(2): 46.  
江泽慧, 王汉坤, 余雁, 等. 植物源微纤化纤维素的制备及性能研究进展[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(2): 46.
- [16] LV J. The dispersion of bacterial cellulose and its application in papermaking industry [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.  
吕瑾. 细菌纤维素的分散及其在造纸工业中的应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
- [17] ZHAO Y Y. The development prospect of Japanese paper industry under the background of mature market [J]. *China Pulp and Paper*, 2014, 33(8): 79.  
赵旻宇, 编译. 成熟市场背景下的日本造纸工业发展前景[J]. *中国造纸*, 2014, 33(8): 79.
- [18] PENG Y H, LONG C M, CENG Y Q, et al. Research Progress of Biological Treatment of Black Liquor [J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2006, 21(3): 99.  
彭园花, 龙成梅, 曾祥钦, 等. 黑液生物处理研究进展[J]. *中国造纸学报*, 2006, 21(3): 99.
- [19] KUANG S J. Pulp and paper industry and biorefinery [C]//Academic Department at the Chinese Academy of Sciences. *Biomass Refining Technology and Traditional Pulp and Paper Industry*. Beijing: China Science and Technology Press, 2013.  
邝仕均. 制浆造纸工业与生物质精炼 [C]//中国科学学会学术部. *生物质精炼技术与传统制浆造纸工业*. 北京: 中国科学技术出版社, 2013.
- [20] NONG G Z, LI X S, WANG S F. A Review on Gasification of Black Liquor [J]. *China Pulp and Paper*, 2006, 25(10): 54.  
农光再, 李许生, 王双飞. 黑液气化研究现状及进展[J]. *中国造纸*, 2006, 25(10): 54.
- [21] YU J R, ZHANG Z, CHI C C. Prospects for the Combination of Biorefinery with Pulp and Paper Industry [J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2006, 21(1): 80.  
于建仁, 张曾, 迟聪聪. 生物质精炼与制浆造纸工业相结合的研究[J]. *中国造纸学报*, 2006, 21(1): 80.
- [22] HU J, LIU N. The Integrated Development of Biomass Refining and Paper Industry [J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2011, 32(19): 56.  
胡杰, 刘娜. 生物质精炼与造纸业的集成发展[J]. *中华纸业*, 2011, 32(19): 56.
- [23] Costas P, Bokis, Chau-Chyun Chen, Hasan Orbey. A segment contribution method for the vapor pressure of tall-oil chemicals [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1999, 155(2): 193.

## The Combination of Biorefinery with Pulp and Paper Industry

CHEN Liqing

(China National Pulp and Paper Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100102)

(E-mail: liqing7785@gmail.com)

**Abstract:** The development and application of biorefinery technology is the change and innovation of traditional pulp and paper industry, and is essential for the sustainable development of the pulp and paper industry. This paper mainly introduces the pulp and paper biomass refining technologies, including the extraction and comprehensive utilization of hemicelluloses, high-value utilization of cellulose, the separation, purification and utilization of lignin in black liquor, black liquor gasification, etc.

**Keywords:** biorefinery; cellulose; hemicelluloses; lignin; black liquor gasification

(责任编辑:刘振华)