

杨木、法桐、桦木枝桠材的 P-RC APMP 制浆性能比较研究

李龙波¹, 闫家玮¹, 江 闯¹, 朱辉午¹, 王 伟², 杜 炜², 刘钢彪², 刘 苇¹

(1.天津科技大学轻工科学与工程学院, 生物基纤维材料全国重点实验室, 纺织行业高性能纤维湿法非织造材料重点实验室, 天津 300457; 2.濮阳龙丰纸业有限公司, 濮阳 457000)

摘要:系统分析了杨木、法桐和桦木三种阔叶木枝桠材的化学成分、纤维形态,并对比三种原料的 P-RC APMP 工艺适配性。结果表明:在化学组分方面,法桐综纤维素含量最高,木质素含量最低;在纤维形态方面,相较于杨木,法桐和桦木原料纤维均具有更大的纤维长度、宽度和长宽比,平均扭结指数更低;在浆张性能方面,法桐浆张松厚度($3.04 \text{ cm}^3/\text{g}$)和抗张指数($23.34 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{g}$)较高,桦木浆张撕裂指数($8.15 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)最高,杨木浆张白度(75.05%)最高。总体上,法桐在松厚度和抗张指数方面优势显著,桦木撕裂指数最突出,杨木白度表现最佳,三种原料优势各异,制浆企业可根据产品定位合理选择。本研究为拓宽制浆原料来源、推动高得率浆差异化生产提供参考。

关键词:高得率浆;阔叶木;纤维形态;化学组分;强度性能

Comparative Study on P-RC APMP Pulping Performance of Poplar, Platanus and Birch Branches

LI Longbo¹, YAN Jiawei¹, JIANG Chuang¹, ZHU Huiwu¹, WANG Wei², DU Wei², LIU Gangbiao², LIU Wei¹

(1.College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, China Textile Industry Key Laboratory of High-performance Fibers Wet-laid Nonwoven Materials, Tianjin 300457, China; 2.Puyang Longfeng Paper Co., Ltd., Puyang 457000, China)

Abstract: The chemical composition and fiber morphology of three hardwood branchwood materials, poplar, London plane and birch, were systematically analyzed, and their respective suitability for the P-RC APMP (pre-conditioning refiner chemical alkaline peroxide mechanical pulp) process was compared. The results showed that in terms of chemical composition, London plane had the highest holocellulose content and the lowest lignin content. Regarding fiber morphology, compared with poplar, both London plane and birch pulp fibers exhibited higher fiber length, width, and aspect ratio, as well as a lower average kink index. In terms of pulp sheet properties, London plane showed relatively high bulk ($3.04 \text{ cm}^3/\text{g}$) and tensile index ($23.34 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{g}$), birch exhibited the highest tear index ($8.15 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$), and poplar had the highest brightness (75.05%). Overall, London plane exhibited remarkable advantages in bulk and tensile index, birch achieved the highest tear index, and poplar showed the optimal brightness. The three raw

materials possessed distinct superior properties, and pulp mills can make reasonable choices according to product positioning. This study provides a positive reference for broadening the sources of pulping raw materials and promoting the differentiated production of high-yield pulp.

Key words: high yield pulp; hardwood; fiber morphology; chemical composition; strength properties

我国是全球最重要的制浆造纸生产与消费国之一,同时也是主要的木材消耗国,木材供需平衡问题备受关注^[1-2]。自2017年全面实施天然林商业性采伐禁令以来,我国木材供应量减少约10%^[3],这一变化促使造纸行业积极调整原料结构。“限废令”重塑了以国内循环为主的废纸回收与循环利用产业格局,但当前对进口木浆的依存度仍较高且面临供应链风险,亟需扩大国内原生浆产能,构建自主可控的浆纸供应链^[4]。在此背景下,积极开发多元化的原料来源,已经成为制浆造纸工业实现可持续发展的必由之路,对行业长远发展具有重要意义。

目前制浆造纸工业广泛使用的纤维原料主要有速生人工林木材^[5]、竹材及农作物秸秆等^[6],此外废纸再生纤维、蔗渣、芦苇也得到大量应用。速生林具有生长快、产量高、适应性强的特点,可有效缓解制浆造纸木质纤维原料短缺问题;同时,其纤维短、木质素含量低,不仅适用于制造高松厚度纸张,还有利于降低打浆能耗^[7]。我国每年产生7000万~1亿t园林绿化废弃物^[8-9],其中包含大量枝桠材。这类生物质资源富含纤维素(30%~40%)与半纤维素(20%~30%)^[10],是潜在的制浆原料。若直接焚烧极易造成污染;反之,将其用于制浆造纸,不仅能变废为宝,实现资源化利用,还可减少污染、推动绿色循环,兼具经济效益与社会效益。因此,开发得率高、污染小、能耗低的制浆工艺,以适应这类纤维原料的特性,已成为当前制浆造纸工业亟待解决的关键问题^[11]。

预处理盘磨化学处理碱性过氧化氢机械浆工艺(Preconditioning Refiner Chemical Alkaline Peroxide Mechanical Pulp, P-RC APMP)是在碱性过氧化氢机械浆工艺(Alkaline Peroxide Mechanical Pulp, APMP)基础上发展出来的,具有得率高、化学药品用量少等优点,可通过预浸渍与盘磨段多级加药系统实现对游离度、白度及松厚度的调控。P-RC APMP采用两段挤压浸渍和两段盘磨相结合的方式,通过化学法和机械法协同作用改善浆料性能,提高纸浆白度和松厚度。考虑到速生林、园林废弃

物等原料的纤维特性,该工艺在每一段挤压和盘磨之前均实施浸渍处理,以有效促使纤维润胀和软化。该工艺能实现化学试剂在机械处理前对材料的充分浸润和反应,从而有效降低能耗、提高生产效率,同时具备良好的操作灵活性^[12]。

本文以杨木、法桐及桦木枝桠材木片为原料,采用P-RC APMP工艺制浆,系统考察了三种原料的制浆适用性及工艺适配性。通过对比分析浆张的松厚度、抗张强度、撕裂强度、耐破强度及光学性能等关键指标,并结合原料可得性与成本,为生产高松厚度、高白度纸张提供了技术依据与原料选择方案。

1 实验

1.1 原料与试剂

杨木、法桐、桦木的枝桠材木片取自河南某企业,选取具有代表性的部分作为试样用于制浆分析;另取部分样品研磨成木粉,过40~60目筛,平衡水分后用于化学组分分析。

苯、盐酸、硫酸、溴酸钠、溴化钠、可溶性淀粉,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;乙醇,分析纯,山东博城化学有限公司;硝酸,分析纯,固安县永恒五金化工有限公司;冰乙酸、硫代硫酸钠,分析纯,天津市津东天正精细化学试剂厂;亚氯酸钠,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;苯胺、氯化钠、氯化钡,分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;氢氧化钠,分析纯,天津市汇杭化工科技有限公司;碘化钾,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;甲基橙,分析纯,天津市北方天医化学试剂厂;酚酞,分析纯,天津市化学试剂一厂。

1.2 仪器与设备

主要仪器包括:OLYMPUS-CX41型光学显微镜,日本尼康公司;XMTD-7000型恒温水浴锅,北京市永光明医疗器械有限公司;NBW-2620型恒温数显加热台,东莞市鑫耀五金工具有限公司;CWF-1100型高温箱式炉,英国Carbolite公司;DR6000型紫外分光光度计,美国HaCH公司;BL-6176-A-28

型单螺杆挤出机,东莞市宝轮精密检测仪器有限公司;2500-II型盘磨机,日本KRK公司;M10097型快速纸页成型器,德国Frank-PTI公司;13-60-00-0002型机械式万能试验机,荷兰TMI公司;Fiber Tester 912型纤维分析仪、SE009型纸张撕裂度测定仪、SE051型标准厚度仪、SE002型纸张耐破度测定仪、SE062型抗张强度仪、SE070型分光白度仪、535型筛浆机,瑞典L&W公司。

1.3 实验方法

1.3.1 化学成分分析

按照GB/T 2677.1—1993《造纸原料分析用试样的采取》取样,根据表1中所列的相关标准分析木材原料的主要化学组分。其中,纤维素含量采用硝酸-乙醇法测定,每个样品均测量5次,结果取平均值。

表1 原料组分分析采用的国家标准

检测项目	测试标准
综纤维素	GB/T 2677.10—1995
聚戊糖	GB/T 2677.10—1995
酸不溶木质素	GB/T 2677.8—1994
酸溶木质素	GB/T 10337—2008
苯-醇抽出物	GB/T 2677.6—1994
灰分	GB/T 742—2018

1.3.2 P-RC APMP制浆

制浆流程如图1所示,化学药品用量均以绝干浆质量计。主要步骤为:木片经洗涤、脱水后,在70℃热水中预浸渍10 min,随后经螺旋挤压制成木丝;再经一段化学浸渍(0.8% NaOH、0.016% EDTA混合浸渍液,浆浓40%,70℃,处理10 min);浸渍后物料经单螺杆挤出机二次挤压得到细木丝;然后进行二段化学浸渍(3.0% NaOH、3.0% H₂O₂、0.8%Na₂SiO₃、0.01%EDTA混合浸渍液,浆浓40%,80℃,处理40 min);浸渍后物料采用盘磨机进行一段盘磨磨浆(浆浓25%,磨盘间隙0.4 mm);磨后浆料经NaOH-H₂O₂漂

白(2.5% NaOH、3.5% H₂O₂、0.8%Na₂SiO₃和0.01% EDTA混合溶液,浆浓25%,95℃,处理85 min),并调节pH至7.4~7.6;再进行二段盘磨磨浆(浆浓25%,磨盘间隙0.2 mm);最后经消潜、筛分获得成浆,抄造手抄片用于性能检测。

1.3.3 纤维形貌分析

取0.1 g绝干浆分散于100 g水中,搅拌至纤维充分分散。取样后,用甲基橙染色,置于载玻片上,在显微镜下观察纤维形貌。

1.3.4 纤维形态分析

取300 mg绝干浆,加水定容至1 L,取300 mL该浆料,采用纤维分析仪对纸浆纤维进行分析。

1.3.5 浆张的物理性能

将所得纸浆疏解后,采用快速纸页成型器抄造定量为60 g/m²的纸页,在90 kPa真空度、95℃的条件下干燥10 min。随后,按相应国家标准测定以下性能:定量(GB/T 451.2—2023)、厚度(GB/T 451.3—2002)、抗张指数(GB/T 12914—2018)、耐破指数(GB/T 454—2020)、撕裂指数(GB/T 455—2002)、白度(GB/T 22880—2008)、不透明度(GB/T 1543—2005)及光散射系数(GB/T 10339—2018)。

2 结果与讨论

2.1 原料的化学成分

杨木、法桐、桦木的主要化学组分含量如表2所示。由表2可知,三种木材原料的综纤维素含量均超过70%,其中法桐含量最高,为78.34%。与已有研究^[13-15]对比,本研究中法桐、桦木和杨木的各组分测定值均处于正常波动范围,可为后续制浆性能分析提供基础数据支撑。较高的综纤维素含量有助于提高浆料得率并增强原料利用价值,这表明三者在制浆基础潜力上均表现良好。在木质素含量方

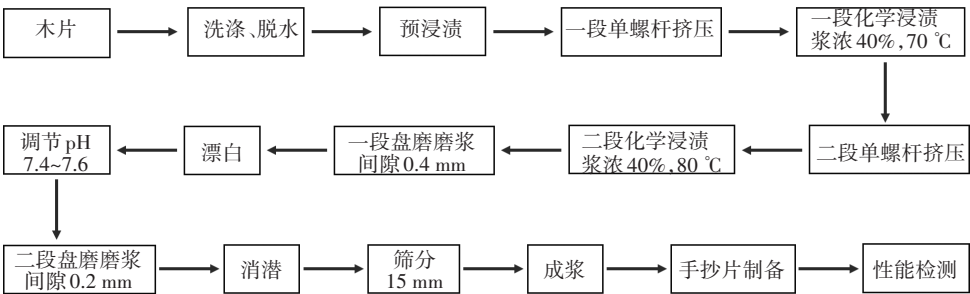


图1 P-RC APMP制浆工艺流程图

面,三者酸不溶木质素介于16%~21%,酸溶木质素含量相近(约为2%),其中法桐酸溶木质素最低,为1.61%。较低的木质素含量可减少化学制浆与漂白过程的化学品消耗,法桐因木质素含量更低而在此方面更具优势。此外,三种木材的苯-醇抽出物含量均在1%~2%之间,灰分含量也均处于较低水平。较低含量的苯-醇抽出物不会阻滞蒸煮,可减少化学品消耗及改善纸浆色泽;原料灰分含量低则有利于降低后续碱回收的难度。综合来看,三种木材原料的组分指标均满足制浆原料的基本要求,可用作制浆原料。

表2 三种原料的主要化学组分含量 %

组分	杨木	法桐	桦木
综纤维素	73.21	78.34	75.55
纤维素	48.61	47.85	43.09
聚戊糖	23.56	24.15	26.78
酸不溶木质素	20.72	16.55	18.24
酸溶木质素	2.00	1.61	1.72
苯-醇抽出物	1.65	1.63	1.39
灰分	0.61	1.72	2.49

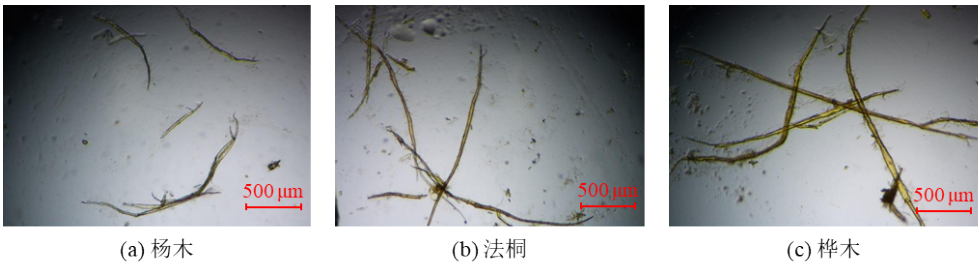


图2 三种原料纤维的光学显微镜图(40倍)

表3 三种原料的纸浆纤维形态参数

原料	平均长度/mm	平均宽度/ μm	双重重均长度/mm	双重重均宽度/ μm	长宽比	平均扭结指数
杨木	0.63	26.42	0.79	27.72	24.12	1.59
法桐	0.83	29.43	1.07	30.83	28.20	1.31
桦木	1.17	36.91	1.52	38.01	31.85	1.15

2.3 纸浆游离度

游离度是评价纸浆滤水性能的重要指标,反映纤维形态及纸浆悬浮液的滤水速率,直接影响抄造过程的稳定性和生产效率^[19]。经一段盘磨后,杨木、法桐和桦木的游离度分别为740、730和770 mL;二段盘磨后分别降至385、360和465 mL。一段盘磨使纤维初步分丝帚化,但仍存在部分粗纤维束;二

2.2 纸浆纤维形貌及形态

由图2可以看到,在光学显微镜下,三种阔叶木纤维均呈典型的细长纺锤形,但微观形貌存在显著差异。杨木纤维整体平均长度较短、直径较小,多数纤维存在明显弯折、扭结,且存在较多细碎断裂的纤维碎片。法桐纤维的长度、直径均处于三种原料的中间水平,纤维存在少量弯折与扭结。桦木纤维平均长度较长,直径较大,纤维形态最为平直,弯折和扭结极少。三种纤维形貌的上述差异会直接影响P-RC APMP制浆各工序中的纤维变化,最终导致成纸在撕裂度、抗张强度、松厚度等性能上的显著差异^[16]。

对三种原料的纤维形态进一步分析(表3),结果表明:法桐和桦木的纸浆纤维长度和宽度均大于杨木,而平均扭结指数则低于杨木。较低的扭结指数表明纤维弯折程度较低,形态更为平直,有助于提高纸张强度^[17];此外,法桐和桦木的纤维长宽比也高于杨木。较大的长宽比意味着成纸时纤维交织更为致密,有利于形成更高强度的纸张^[18]。

段盘磨则进一步促进纤维细纤维化,提高浆料均匀性,从而显著降低游离度。

2.4 浆张性能对比

将三种原料所得纸浆抄造成手抄片(定量控制在60 g/m²),置于标准恒温恒湿环境中平衡后检测其物理性能,结果如图3所示。结果表明:不同原料所得浆张在松厚度和机械强度方面存在显著差异,这些差异源于原料纤维形态及化学组成的不同。松厚度方面,三种浆张均具有较高的松厚度,其中法桐浆张的松厚度最高(3.04 cm³/g),显著高于杨木(2.70 cm³/g)及桦木(2.59 cm³/g);撕裂指数方面,桦木浆张的撕裂指数最高(8.15 mN·m²/g),这与其较长的纤维长度有关,撕裂过程中更多纤维被拔出而非断裂,从而提高了撕裂指数^[20];抗张指数和耐破

指数方面,法桐浆张表现优异,这与其纤维形态特征密切相关。相较于杨木枝桠材纤维,法桐枝桠材纤维平均长度、宽度与长宽比更大,扭结指数更低;纸张抗张强度与耐破强度由纤维交织网络的骨架承载作用和纤维间氢键的界面结合作用共同决定。法桐枝桠材纤维的双壁厚为 9.388 μm ,胞腔径为 8.445 μm ^[21];杨木枝桠材纤维的双壁厚、胞腔径均值范围分别为 3.23~4.36 μm 、11.22~15.90 μm ^[22]。对比可见,杨木枝桠材纤维细胞壁更薄,纤维易于吸水润胀、发生分丝帚化,暴露出大量氢键结合位点;但在 P-RC APMP 磨浆过程中,薄壁纤维更易在机械剪切作用下被切断,浆料中完整长纤维占比低,难以形成连续的纤维交织骨架,纸页受外力作用时易产生应力集中缺陷。与之相比,法桐枝桠材纤维细胞壁较厚,抗切断能力更强,磨浆后可保留更多长纤维,依靠致密的纤维交织网络有效分散应力;尽管纤维分丝程度与氢键结合位点数量低于杨木枝桠材浆,但最终成纸的抗张指数、耐破指数均明显更优。桦木纤维平均长度与宽度更大,扭结指数最低;其枝桠材纤维双壁厚为 6.2 μm ,胞腔径为 17.6 μm 。与杨木纤维相比,桦木纤维更粗大、细胞壁更厚,同等磨浆条件下分丝帚化程度偏低,氢键结合位点暴

露量更少。与法桐枝桠材纤维相比,桦木纤维虽更为宽大,但细胞壁厚度偏小,磨浆后有效长纤维保留率低于法桐,最终成纸的抗张指数与耐破指数偏弱。由此可见,对于对抗张指数、耐破指数要求较高的纸品应用场景,法桐枝桠材更具备应用优势。

纸张的光学性能直接决定其适用领域与产品价值,既是评价纸张使用性能和市场竞争力的关键指标,也为制浆漂白工艺优化与原料选择提供重要参考^[24]。由表 4 可知:杨木浆张的 ISO 白度最高,达 75.05%,法桐次之(69.85%),桦木最低(60.38%)。杨木中的木质素以反应活性更高的紫丁香基(S型)单元为主^[25],有利于抑制醌式发色基团的形成;在碱性过氧化氢漂白中,残留发色基团更易被降解溶出,从而实现更高白度。

高松厚度纸张结构疏松、孔隙较多,增大了光与纤维的作用界面,提高了光在纸页内的吸收和散射效率。法桐浆张的松厚度最高(3.04 cm^3/g),因此法桐浆张的光散射系数、光吸收系数及不透明度均高于桦木、杨木浆张。桦木浆张的松厚度(2.59 cm^3/g),略低于杨木浆张(2.70 cm^3/g),结构更为致密,故其光散射系数、光吸收系数和不透明度均略低于杨木浆张。

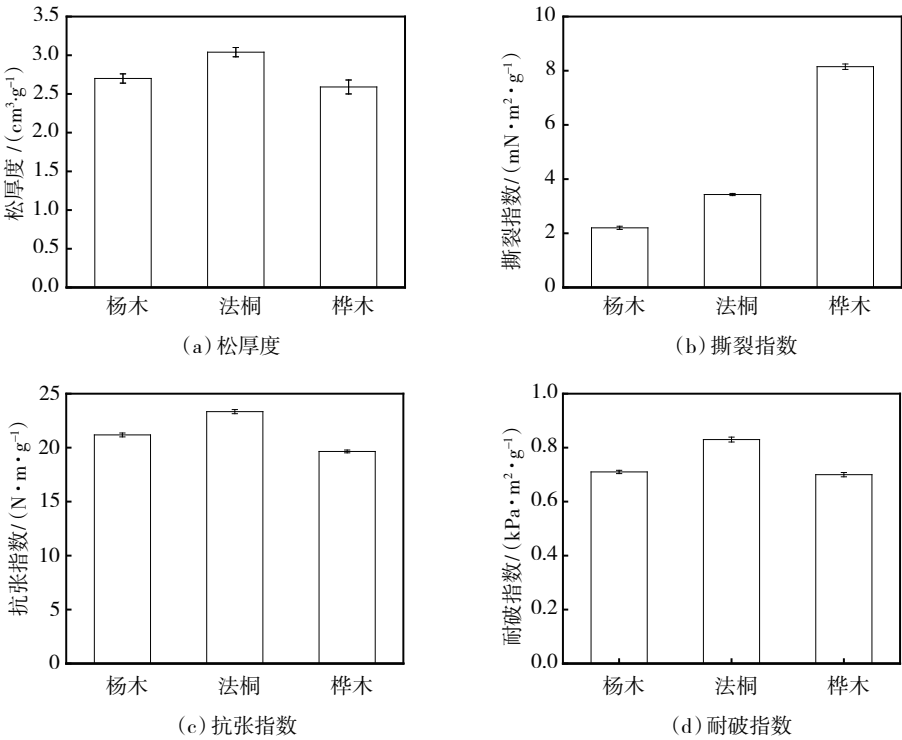


图3 三种原料所得浆张的物理性能

表4 三种原料所得浆张的光学性能

原料	ISO白度/%	不透明度/%	光散射系数/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	光吸收系数/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
杨木	75.05	85.11	40.02	0.31
法桐	69.85	89.35	45.31	0.34
桦木	60.38	84.67	39.28	0.29

2.5 原料可获得性和市场价格对比

在制浆造纸的实际生产中,原料选择不仅取决于其制浆性能,还需综合评估多方面现实因素。首先,原料的市场价格直接影响生产成本和经济效益,高性价比有助于在保证质量的前提下提升市场竞争力;其次,原料的可获得性关乎生产的连续性

与稳定性,若供应受限或过度依赖单一渠道,易导致生产中断或成本波动。由表5可知,杨木在我国种植广泛、供应商众多,可获得性高,价格约为500~800元/t,具备显著的成本优势。桦木主要分布于东北地区和内蒙古东部,价格约为1200~1500元/t,且因产地集中,需额外承担一定的物流成本。法桐作为常见的城市绿化树种,可从园林废弃物中获取,价格约800~1000元/t,具有一定的可持续供应潜力。

综上所述,三种原料中,杨木的可获得性最高、价格最具竞争力;桦木的可获得性较低、综合成本偏高;法桐在来源可持续性方面表现较好,且纸浆性能具有一定优势,是一种有前景的制浆原料。

表5 三种原料的可获得性与市场价格对比

原料	可获得性	采购价格/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	主要分布范围	原料运输便利性	主要供应形式
杨木	高	500~800	广泛分布于华北、西北及东北部分地区	产区多临近造纸工业园区,可实现短途集散	木片、枝桠材
法桐	中	800~1000	主要集中于华东、华中及华南部分城市周边	产区集中于城市及近郊,短途运输便捷,跨区域调运成本较高	枝桠材
桦木	低	1200~1500	主要集中于东北及内蒙古东部	产区较远,需经铁路和公路联运长途运输,成本占比高	原木、枝桠材

注:表格数据来源于惠农网。

3 结论

本文系统研究了杨木、法桐和桦木枝桠材在P-RC APMP工艺下的制浆适应性,得出以下主要结论:

(1)三种枝桠材的化学组分差异显著影响原料在碱性过氧化氢预浸渍、机械磨浆阶段的行为,进而决定了成纸性能差异:法桐木质素含量低、综纤维素含量高;尽管纤维分丝帚化程度不及杨木,但磨浆后长纤维保留率高,能够实现松厚度与抗张性能协同提升。杨木原料结构疏松,木质素易于脱除与漂白,成纸白度的优势明显;桦木聚戊糖含量较高,纤维尺寸更大,纤维交织韧性更强,浆张撕裂强度在三种原料中最高。

(2)与化机浆常用的杨木相比,法桐枝桠材在成本可控的前提下兼具优良纤维形态与成纸力学性能,可作为包装纸、工业用纸等侧重力学强度纸种的理想替代原料;桦木浆撕裂性能优异,但受限于原料分布区域与采购成本因素,更适合于特定高附加值特种纸。

(3)本研究为速生林、园林废弃枝桠材等高得率浆原料的差异化利用提供理论支撑,有助于缓解

优质木材资源供给压力,推动造纸原料结构多元化发展。

参考文献:

[1] 张涵雨,陶建军.中国木材供需分析[J].赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(9):86-89.

[2] 郭辰星,朱震锋,刘嘉琦.新时期中国木材资源供需:现状,问题及方略[J].中国林业经济,2019(5):66-69.

[3] 费本华,漆良华.实施我国国家竹材储备战略计划的思考[J].世界林业研究,2020,33(3):38-42.

[4] 尹鸿翔,张云,李锡杰,等.从浓度限值到总量减排:造纸行业水污染控制的路径演进[J].中国造纸,2026,45(5):111-116.

[5] 高捍东,蔡伟建,王章荣,等.我国纸浆林树种选择与培育技术研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(6):137-143.

[6] 刘文,王浩,李政,等.积极利用非木材纤维资源:解决造纸工业原料短缺问题[J].中国造纸,2021,40(3):95-100.

[7] 裴继诚.植物纤维化学[M].5版.北京:中国轻工业出版社,2024.

[8] 刘学磊,任学勇,宋曙光,等.双碳背景下园林绿化废弃

(下转第48页)