

竹纤维制备技术

陈礼辉 黄六莲 曹石林 著



科学出版社

竹纤维制备技术

陈礼辉 黄六莲 曹石林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍用于造纸工业领域的竹纤维(竹浆)制备新技术,包括竹材硫酸盐法深度脱木素制浆技术、竹浆低污染漂白技术、竹材化学机械法制浆技术;用于纺织工业领域的竹纤维(竹溶解浆)制备新技术,包括预水解硫酸盐法制备竹溶解浆技术、常规硫酸盐法制备竹溶解浆技术、竹溶解浆低污染漂白技术。全书对竹纤维制备工艺技术和相关的制浆、漂白、生物酶处理机理进行了较深入的阐述。

本书可作为从事林业、造纸、纺织等领域相关工作的科技人员和高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

竹纤维制备技术/陈礼辉,黄六莲,曹石林著. —北京:科学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-03-039137-7

I. ①竹… II. ①陈… ②黄… ③曹… III. ①竹林-植物纤维-制备 IV. ①TS102. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271624号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013年11月第一次印刷 印张:20

字数:393 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

我国竹子种质资源、竹林面积、蓄积和产量均居世界首位，素有“竹子王国”之称。竹类植物生长快、伐期短、产量高、用途广泛，竹产业在我国竹产区农村经济中发挥着十分重要的作用。竹材纤维形态介于针叶材和阔叶材之间，竹纤维可应用于造纸工业、纺织工业、林产工业和包装工业等领域。目前竹纤维生产过程中存在竹材利用率不高、生产周期长、生产成本偏高、产品质量不稳定、污染负荷偏高等问题，竹纤维生产技术无法满足我国经济结构调整发展的需要，开发竹材纤维制备新技术，以适应我国天然纤维产品清洁生产的要求，对缓解我国经济发展过程中木材原料短缺的矛盾，保护自然资源和改善生态环境具有重要意义。

本书较系统地介绍应用于造纸工业领域的竹纤维（竹浆）制备新技术，以及应用于纺织工业领域的竹纤维（竹溶解浆）制备新技术，可为竹材资源的深度开发利用提供基础理论资料。第一章主要介绍竹材硫酸盐法深度脱木素制备竹浆新技术；第二章主要介绍竹材预水解硫酸盐法制备竹溶解浆新技术；第三章主要介绍竹材常规硫酸盐法制备竹溶解浆新技术；第四章主要介绍碱性过氧化氢机械法和蒸汽爆破法制备竹浆新技术。

本书绪论由陈礼辉撰写；第一章由黄六莲、曹石林撰写；第二章至第四章由陈礼辉和黄六莲撰写；罗小林、马晓娟参与书稿编写工作。本书是在整理研究生教学和科学研究成果的基础上完成的，全书最后由陈礼辉统一定稿。希望本书可供企业、高等院校和科研院所从事相关专业的研究人员学习参考。

本书的研究工作得到国家自然科学基金（30671637 和 31270638）、科技部农业科技成果转化资金（[2002] 208 号）、中央财政林业科技推广示范项目（[2009] 1 号）、福建省科技重大专项（2004HZ03 和 2008HZ0001）的资助，特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢！作者还要感谢教育作者多年的师长及为本书出版付出辛勤劳动的同仁！在

撰写本书过程中，引用了系列的专著、论文等文献，作者均已在参考文献中列出，在此一并致谢！

由于作者学识有限，书中不妥之处恳请读者不吝指正。

作 者

2013 年 9 月

目 录

前言

绪论	1
一、我国竹子资源概况	2
二、竹纤维的应用	3
三、竹纤维制备技术	6
第一章 硫酸盐法深度脱木素制备竹浆	12
第一节 概述	12
一、硫酸盐法深度脱木素蒸煮技术	12
二、低污染漂白技术	18
第二节 竹材延伸改良连续蒸煮	36
一、竹材原料的化学组成	36
二、竹材硫酸盐法深度脱木素蒸煮影响因素	37
三、竹材硫酸盐法深度脱木素蒸煮工艺	39
四、深度脱木素与常规硫酸盐法蒸煮的比较	45
第三节 竹浆氧脱木素技术	48
一、氧脱木素化学反应原理	48
二、单段氧脱木素	55
三、两段氧脱木素	61
四、单段氧脱木素与两段氧脱木素的对比	68
五、氧脱木素助剂	71
第四节 竹浆氧脱木素过程含氧自由基的表征与控制	75
一、羟基自由基的表征与控制	75
二、超氧阴离子自由基的表征与控制	84
第五节 竹浆无元素氯漂白技术	91
一、二氧化氯漂白	93
二、碱性木聚糖酶预处理	103
三、碱处理	111
四、氧和过氧化氢强化碱抽提	117

第六节 竹浆全无氯漂白技术	124
一、螯合处理	125
二、过氧乙酸漂白	127
三、过氧化氢漂白	129
四、竹浆 OQPaP 全无氯漂白	135
第二章 预水解硫酸盐法制备竹溶解浆	149
第一节 概述	149
一、开发竹溶解浆的意义	149
二、制备竹溶解浆的现有方法及其存在的问题	150
第二节 水预水解硫酸盐法制备竹溶解浆	154
一、水预水解工艺及动力学	154
二、硫酸盐法蒸煮工艺及动力学	172
三、竹溶解浆漂白技术	193
四、竹溶解浆制备过程物理化学性质的表征	206
第三节 蒸汽预水解硫酸盐法制备竹溶解浆	219
一、蒸汽预水解工艺	219
二、聚戊糖溶出动力学	225
三、蒸汽预水解对竹材蒸煮质量的影响	232
四、竹溶解浆漂白工艺	238
第三章 常规硫酸盐法制备竹溶解浆	241
第一节 概述	241
第二节 竹溶解浆制备技术	242
一、常规硫酸盐法蒸煮工艺	242
二、两段氧脱木素	243
三、木聚糖酶处理	248
四、二氧化氯漂白	251
五、碱抽提	255
六、酸处理	258
第三节 竹溶解浆制备过程物理化学性质的表征	262
一、竹溶解浆性能及红外光谱分析	262
二、竹溶解浆纤维微观形态表征	265
三、竹溶解浆 X 射线衍射分析	268
第四章 化学机械法制备竹浆	273
第一节 概述	273
第二节 碱性过氧化氢机械法制备竹浆	274

一、竹材化学预处理	275
二、竹材预浸渍工艺	280
三、竹材碱性过氧化氢机械浆漂白工艺	288
四、竹材碱性过氧化氢机械浆红外光谱分析	292
第三节 蒸汽爆破法制备竹浆	295
一、竹材化学预处理	295
二、竹材化学机械浆制浆工艺	303
三、竹材蒸汽爆破法制浆技术	304
四、竹材蒸汽爆破浆及其配抄瓦楞原纸生产实践	309

绪 论

我国造纸工业是与国民经济发展和社会文明建设息息相关的基础原材料产业，具有资金技术密集、规模效益显著的特点，其产业关联度强，市场容量大，是拉动林业、农业、印刷、包装、机械制造等产业发展的重要力量，具有重要的战略地位^[1]。我国纺织工业作为国民经济支柱产业、重要的民生产业和国际竞争优势明显的产业，在繁荣市场、吸纳就业、增加农民收入、加快城镇化进程及促进社会和谐发展等方面发挥了重要作用^[2]。

造纸工业和纺织工业都离不开纤维原料。造纸工业可以使用植物纤维、动物纤维、矿物纤维、合成纤维等原料进行制浆造纸。目前，造纸工业所用纤维原料绝大部分是植物纤维原料，主要有针叶木和阔叶木等木材原料，以及草类、蔗渣、竹子等非木材原料。纺织工业所用纤维原料主要有天然纤维和化学纤维。天然纤维包括植物纤维（如棉、麻、果实纤维）、动物纤维（如羊毛、兔毛、蚕丝）和矿物纤维（如石棉），化学纤维包括再生纤维（如黏胶纤维、醋酸纤维）、合成纤维（如锦纶、涤纶、腈纶、氨纶、维纶、丙纶等）和无机纤维（玻璃纤维、金属纤维等）^[3]。我国是一个木材资源和石油资源都极其短缺的国家，木材资源和石油资源无法满足造纸工业和纺织工业快速发展的需要，定向培育优质速生材并加工出优质纤维原料成为造纸工业和纺织工业亟待解决的重大问题。

我国地处世界竹子分布的中心，竹类植物资源十分丰富，竹子种质资源、竹林面积、蓄积和产量均居亚太地区之首，在世界上名列前茅^[4]。竹类植物生长快、伐期短、产量高、用途广泛，竹产业在我国竹产区农村经济中发挥着十分重要的作用。竹材被广泛应用于林产工业、建筑行业、工艺装饰、家具装修等领域。然而，目前我国竹产品总体科技含量低、产品附加值不高，现有的竹加工技术已成为竹业发展的瓶颈，制约着竹业经济的又好又快发展。另外，竹纤维应用还不够广泛，生产过程中也存在竹材利用率不高、生产周期长、生产成本偏高、产品质量不稳定、污染负荷偏高等问题，因此竹纤维生产技术无法满足我国造纸工业和纺织工业发展的需

要。开发竹材纤维制备新技术对缓解我国经济发展过程中木材原料短缺的矛盾,保护自然资源和改善生态环境具有重要意义。

一、我国竹子资源概况

竹子是单子叶禾本科多年生植物。竹叶呈狭披针形,长 7.5~16cm,宽 1~2cm,先端渐尖,基部钝形,叶柄长约 5mm,边缘一侧较平滑,另一侧具有小锯齿而粗糙;平行脉,次脉 6~8 对,小横脉尤其显著;叶面深绿色,无毛,背面色较淡,基部具有微毛;质薄而较脆。竹笋长 10~30cm,成年竹通体碧绿,节数一般在 10 至 15 节之间。竹子是常绿(少数竹种在旱季落叶)浅根性植物,对水热条件要求高,地球表面的水热分布支配着竹子的地理分布。全世界竹类植物约有 70 多属、1200 多种,主要分布在热带和亚热带地区,少数竹类分布在温带和寒带。东南亚位于热带,又受太平洋和印度洋季风汇集的影响,雨量充沛,热量稳定,适合于竹子生长,是世界竹子分布的中心。竹子常和其他树种一起组成混交林,处于主林层之下,当上层林木砍伐后,竹子以生长快、繁殖力强的特点很快恢复成次生竹林。随着竹子用途不断扩大,经济价值提高,人们植竹造林,形成人工林。次生竹林和人工竹林又以它强大的地下茎向四周蔓延扩大,世界竹林面积日益扩大,竹子成为重要的森林资源。近十几年来,地球表面森林面积逐年减少,据统计,1988 年以来,热带森林平均每年消失 2425 万 hm^2 ,每分钟消失 46.14 hm^2 。目前,全世界竹林面积约 2200 万 hm^2 ,世界的竹子地理分布可分为三大竹区,即亚太竹区、美洲竹区和非洲竹区^[5]。

我国具有丰富的竹子资源,竹类植物有 500 多种,占世界竹子种类的近一半。竹子地理分布很广,东起台湾省、南至海南省、西起西藏聂拉木地区、北至黄河流域,天然分布范围在北纬 18°~35°,东经 85°~12°。长江流域至黄河流域为散生竹区,北回归线附近的云南、广西、福建、四川、广东等地区为丛生竹区^[6,7]。全国第七次森林资源清查统计显示^[8],我国现有竹林面积 538.10 万 hm^2 ,比第六次清查结果增加 53.84 万 hm^2 ,年均增加 10.77 万 hm^2 ;福建、江西、浙江竹林面积占全国的一半,南方 13 个省(区)竹林面积在 15 万亩(1 亩 $\approx$ 666.67 m^2 下同)以上的县(市)有 130 多个。福建竹类植物有 19 属、200 多种;不仅有适于热带生长的合轴型丛生竹种,还有亚热带生长的单轴型散生竹种和高海拔地区生长的耐寒性强的复轴型混生竹种;

竹林面积 99.6 万 hm^2 ，占全省林业用地面积的 13.2%，占全国竹林面积的 18.6%，是我国竹林第一大省^[9]。中西部省（区）结合退耕还林等林业重点工程建设，建立了一大批竹林培育示范基地，同时竹种结构得到优化，一批优良竹种得到大面积发展和开发利用，形成生态、经济竹林综合发展的新格局^[10]。

竹子是速生型植物资源，其特点和优点表现在生长快，成材周期短，能迅速恢复森林植被，迅速固结表土、减少水土流失，根茎系统庞大且盘根错节，与其他树木相比具有更强的保持水土的作用；一次栽植后可每年发笋、长竹，可连续数十年收获而不破坏竹林的整体结构。竹子具有低产林改造容易、成林时间短、产量高、成本低、纤维质量好等优点，竹材可广泛应用于林产工业、建筑行业、工艺装饰、家具装修、造纸工业和纺织工业等领域。“十五”期间，我国竹业发展突飞猛进，竹资源面积、产品种类和数量迅速增加，产业规模迅速扩大，竹子经营加工及综合利用研发取得重大进展，竹产业化进程明显加快，成为我国林业的四大朝阳产业之一^[11]。

二、竹纤维的应用

（一）竹纤维的特性

竹类原料细胞主要有纤维细胞、薄壁细胞、石细胞、导管、表皮细胞、网壁细胞等 6 种。有用的纤维细胞占细胞总切面的 60%~70%，稍低于木材，而高于一般草类。竹纤维形态在各种、属之间差别不大。在显微镜下观察，纤维形态呈圆柱管状，壁厚腔小，细长，两头近似纺锤状。纤维平均长度一般为 1.5~2.0mm；纤维宽度一般为 15 μm 左右，接近阔叶木纤维，为针叶木纤维的 1/2 或 1/3；纤维长宽比为 120~200，比阔叶木好；纤维壁厚约 5 μm ，纤维内外壁均较平滑。也有部分短而宽的纤维，两端纯尖，胞腔较大，此类纤维多生长于节部。竹类纤维中有一种形态很扁的纤维，是纯纤维质，为竹类纤维所特有的。竹类纤维综合形态特征是纤维细长、壁厚腔小、密度大、纤维较挺硬、透明度高^[6,10,12~15]。

竹材原料的化学成分包括高分子质量物质（细胞壁的主要组分）和低分子质量物质（少量组分），高分子质量物质包括纤维素、半纤维素和木质素，低分子质量物质包括有机物（有机溶剂抽出物）和无机物质（灰分）。

竹材化学组成与阔叶木比较接近。竹材纤维素含量为 45%~52%，半纤维素含量为 17%~25%，木质素含量为 23%~33%。竹材纤维素和木质素含量低于针叶木原料，高于草类原料。竹材半纤维素含量较高，高于针叶木原料，与草类原料相近。竹材有机溶剂抽出物含量和灰分含量较高，均高于木材原料，低于草类原料^[16]。

(二) 竹纤维在造纸工业中的应用

2011 年，我国纸和纸板生产量达到 9930 万 t，但还是满足不了国民经济发展的需要，从国外进口纸（纸板）、纸浆和废纸 4521 万 t。我国造纸工业对进口纤维原料的依存度高达 40% 以上，制约我国造纸工业发展的瓶颈之一是木材原料短缺。2011 年，我国造纸工业原料结构中，木浆 2114 万 t，占 24%（其我国产木浆 814 万 t，占 9%），远远低于世界造纸工业木浆比重占 90% 以上的水平^[17]。木材资源无法满足我国造纸工业发展的需要，为了发展我国造纸工业，必须发展优良、速生造纸用材。

我国竹类植物资源十分丰富，竹类原料纤维形态在各种、属之间差别不大，竹材纤维介于针叶材和草类之间，纤维细长，纤维壁厚，交织力好，是非常好的制浆造纸原料，适宜于制造质优价廉的文化用纸、生活用纸和包装用纸。利用竹子生长快、周期短、可再生、一次造林、永续利用的特点，培育优质丰产竹林，采用先进的生产技术，建立林纸一体化的竹浆生产基地，有利于我国制浆造纸工业得以持续发展，减少纸及纸浆的进口，进而参与国际市场竞争。我国造纸工业“十二五”规划明确提出，继续加快推进林纸一体化工程建设，加快建设林（竹）原料基地；要遵循因地制宜、合理利用的原则，充分利用竹子、芦苇和农业废弃物如秸秆、蔗渣等非木材资源^[18]。

“八五”以前，我国造纸工业在利用竹类制浆造纸方面发展很缓慢。据统计，全国竹类制浆造纸的机制纸厂有 98 家，年产竹纤维（又称为竹浆）9.36 万 t，单独或掺配木浆、草浆生产的纸张品种共 43 种^[19]。1990 年全国竹浆产量虽增到 21 万 t，也只占全国纸浆总产量的 1.6%，远落后于印度。“八五”期间我国竹浆生产有很大的发展，从国外引进了许多先进的技术和设备。新建和扩建了一批大型竹类制浆造纸厂，如福建邵武竹浆厂、广东广宁竹浆厂、江西抚州竹浆厂、江西宜春竹浆厂、四川宜宾竹浆厂等，年

产量为 3 万~5 万 t。目前,我国以竹材为主要制浆原料的规模以上企业有贵州赤天化纸业公司、福建邵武中竹纸业有限责任公司、四川永丰纸业股份有限公司、四川金安浆业有限公司、广东广宁鼎丰纸业有限公司、重庆理文造纸有限公司、广西柳江造纸厂等^[20]。据统计,2011 年我国竹浆产量已达到 192 万 t^[21]。

(三) 竹纤维在纺织工业中的应用

竹纤维是从自然生长的竹子中提取出来的纤维,包括天然竹纤维和化学竹纤维。天然竹纤维也称为竹原纤维,采用物理和化学处理相结合的方法制备竹纤维,主要化学成分是纤维素、半纤维素和木质素。化学竹纤维包括再生竹纤维和竹炭纤维。再生竹纤维是指将竹材制备成 α -纤维素含量高的竹纤维(通常称为竹溶解浆或竹浆粕),然后采用湿法纺丝方法,将溶解浆制成可纺织的再生竹纤维,其制作加工过程与传统的黏胶工艺相似,主要化学成分是 α -纤维素。竹炭纤维是指选用纳米级竹炭,经过特殊工艺加入黏胶纺丝液中,经过常规纺丝工艺纺织出的纤维产品。

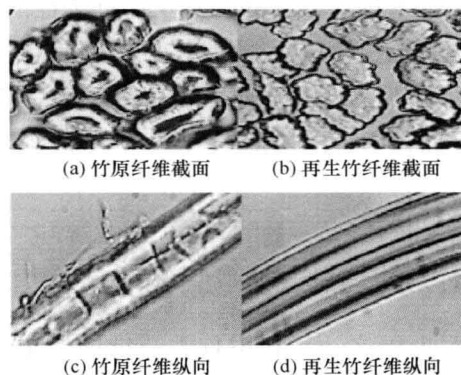


图 0-1 竹原、再生竹纤维的形态结构

由图 0-1 竹纤维形态结构上可以看出,竹原纤维横截面为不规则圆形,纵向有横节,横截面有中腔孔洞;再生竹纤维其横截面边缘为锯齿形,中腔无孔洞,纵向形态光滑,表面有较浅沟槽,有利于吸湿和放湿,具有良好的透气性^[22]。竹纤维制品润滑而细腻,柔软而轻爽,具有棉一样的柔软感,丝绸一样的滑爽感,柔软贴身、亲和肌肤、悬垂性好。夏天使用竹纤

维制品,人体会感到凉爽无比,冬春季节使用既蓬松保暖,又能排除体内多余的热气和水分,具有冬暖夏凉功能。竹纤维中含有“竹醌”抗菌物质,它具有竹子天然的防螨、防臭、防虫特性,不易滋生细菌,具有抗菌、防霉、防蛀的效果,对贴身衣物有防臭除异味之功效。竹纤维具有较强的抗紫外能力,在200~400nm区域内竹原纤维紫外线透过率小于5%,竹原纤维抗紫外能力明显高于再生竹纤维^[22]。在再生竹纤维加工过程中,竹子的天然特性遭到破坏,除臭、抗菌、防紫外线功能有明显下降,因此再生竹纤维的除臭、抗菌、防紫外线性能不如竹原纤维。

竹纤维具有优异的防紫外线、抗菌性、良好的服用性及绿色环保性,受到消费者的青睐,是一种天然环保型绿色纤维。竹纤维纺织品因其固有特性,而备受消费者青睐,产品需求量逐年上升,成为国内外纺织市场的新型材料^[23]。竹纤维既可以纯纺,也可以与棉、毛、麻、丝及合成纤维混纺。竹纤维纱线机织面料可用于制作夹克衫、休闲服、西装套服、衬衫、床单和毛巾等;针织面料适宜制作内衣、汗衫、T恤衫、袜子等。将真丝和竹纤维混纺,用来生产高档纺织品也是一个很好的设计思路。用竹纤维与真丝混纺织成的面料,不仅可以弥补纯真丝绸抗皱性能较差、不挺括、不能机洗的缺憾,而且吸湿、导湿性能和透气性能均得到加强。竹纤维和真丝混纺而成的丝竹面料不仅可以改善传统真丝绸产品的性能,提高档次,而且也顺应了消费者回归自然、追求绿色消费的思想^[24]。

三、竹纤维制备技术

(一) 造纸用竹纤维制备技术

我国是四大发明古国之一,利用竹类造纸的历史悠久,据记载已有1700多年历史,可追溯至晋朝,葛洪《抱朴子》:“逍遥竹素,寄情元毫”中的“竹素”即指用竹材制备成的纸,当时已开始利用嫩竹,经过石灰腌料,制造文化用纸。

现代造纸用竹纤维(竹浆)制备方法有化学法、半化学法、机械法和化学机械法^[25]。竹材化学法制浆包括碱法和亚硫酸盐法。竹材碱法制浆可分为烧碱法、硫酸盐法、多硫化钠法、预水解硫酸盐法、氧碱法、石灰法、纯碱法等。竹材亚硫酸盐法制浆可分为酸性亚硫酸盐法、亚硫酸氢盐法、

中性亚硫酸盐法和碱性亚硫酸盐法等。竹材高得率法制浆按机械处理程度的不同可分为机械法、化学机械法和半化学法,竹材高得率制浆主要包括热磨机械法制浆(TMP)、化学机械法制浆(CMP)、化学热磨机械法制浆(CTMP)、中性亚硫酸盐半化学法制浆(NSSC)和碱性亚硫酸盐半化学法制浆(ASSC)^[25,26]。目前,硫酸盐法制浆是竹材制浆中使用最为广泛的制浆方法,其蒸煮技术主要有传统间歇蒸煮技术、快速置换蒸煮技术(RDH)、新型快速置换蒸煮技术(DDS)、改良的连续蒸煮技术(MCC、EMCC)等^[20]。竹浆洗涤和筛选采用了压力封闭筛选、循环用水逆流洗涤等新技术^[27]。竹浆漂白已由传统的含氯漂白向无元素氯白(ECF)和完全无氯漂白(TCF)方向发展。目前,用得较多的竹浆漂白流程为O-D/C-EO-D。随着人们环保意识的增强和技术水平的提升,有些竹浆厂已取消元素氯的加入,将D/C段改为D段,并在Eo段加入少量的过氧化氢(Eop段),即采用O-D-Eop-D;有少数竹浆厂采用完全无氯漂白(TCF)技术,漂白流程为O-Q-PO及O-Q-O_p-Q-PO^[27]。

(二) 纺织用竹纤维制备技术

以竹材为原料,采用物理、化学相结合的方法制取的纤维是竹原纤维。首先把竹子截断,去掉竹节并剖成竹片,竹片长度根据需要而定,将竹片放入沸水中蒸煮,取出竹片压碎锤成细丝,将竹丝再放入加入化学药品的压力锅中蒸煮,去除部分果胶、半纤维素、木质素;将预处理的竹丝浸入到含有生物酶的溶液中进行生物酶脱胶,生物酶进一步分解竹丝中的木质素、半纤维素、果胶,以获得粗竹纤维;把酶分解后的竹纤维清洗、漂白、上油、柔软、开松梳理,即可获得纺织用的竹原纤维。竹原纤维的制取主要有两个难点:一是竹子单纤维太短、太粗,可纺性差;二是纤维中的木质素含量很高,难以除去。常规的化学脱胶方法工艺流程长,周期长,需消耗大量的能量,且设备腐蚀较严重,对环境污染极为严重,加工出的纤维质量不够稳定。生物脱胶法也有相当大的难度,竹材自身结构紧密,密度很大,而且细胞组织中又有大量空气存在,因此浸渍液很难浸透,势必延长脱胶时间。由于竹原纤维加工难度大,竹原纤维直径不够细,规模化生产的细度一般在400nm以下,可纺性不如再生竹纤维,生产成本也比较高。目前,竹原纤维规模化生产难度较大,竹原纤维在纺织工业中的

推广应用受到很大限制。

通常由造纸工业生产企业、纺织工业生产企业分别完成中间产品竹溶解浆生产和纺织用的再生竹纤维生产。造纸工业生产企业将竹材制备成 α -纤维素含量高的竹纤维（通常称为竹溶解浆或竹浆粕）；纺织工业生产企业采用湿法纺丝方法，将竹溶解浆制备成可用于纺织的再生竹纤维，其制作加工过程基本与黏胶相似。竹溶解浆的制备方法主要有预水解硫酸盐法、亚硫酸盐法、有机溶剂法以及常规硫酸盐强化处理法。预水解硫酸盐法又分为水预水解硫酸盐法、酸预水解硫酸盐法和蒸汽预水解硫酸盐法。预水解硫酸盐法是对竹原料进行预水解及硫酸盐蒸煮相结合的蒸煮方法。在预水解阶段，竹原料中的部分半纤维素在高温条件下与水解介质作用并转入溶液，残留在原料中的半纤维素也受到某种程度的水解，提高了以后碱煮时转入溶液的溶解度。预水解削弱或破坏细胞壁外层中木质素与碳水化合物之间或碳水化合物彼此间的连接，使细胞壁外层松散，从而为蒸煮液的渗透创造了有利条件。水预水解法是竹材溶解浆制备过程常用的预处理方法。用硫酸或者盐酸进行酸预水解，虽然半纤维素的脱除效率较高，但其酸度较高，对设备的耐腐蚀性较强，而且在水解条件激烈时，纤维素的降解也较严重^[28~30]。因为竹材组织致密、半纤维素含量高，采用蒸汽预水解硫酸盐法制备竹材溶解浆，虽然可以减少废水排放量，但是会造成预处理效果不好的问题。亚硫酸盐法曾是生产溶解浆最主要的方法。在酸性亚硫酸盐法制浆过程中，半纤维素和木素同时溶出，而且溶出的聚戊糖不会再次沉积在纤维上^[31]。酸性条件下，抗酸的残余乙酰基及4-O-甲基葡萄糖醛酸基团会阻碍聚木糖吸附到微细纤维上形成相互结晶。亚硫酸盐浆中的残余聚木糖主要存在于次生壁中，从而活性较低。有机溶剂法由于生产规模小，材种应用范围广以及可采用无硫化学品以及全无氯漂白工艺，是一种可供选择的生溶解浆的方法^[31,32]。常规硫酸盐强化处理法是通过硫酸盐法深度脱木素获得低卡伯值硫酸盐浆，然后通过强化氧脱木素、碱性木聚糖酶处理、二氧化氯漂白、碱精制和酸处理等工序，进一步脱除纸浆中的木素和半纤维素，获得高 α -纤维素、高白度的溶解浆^[33]。预水解硫酸盐浆的漂白流程与造纸工业用的竹浆漂白方法相似，可采用O-D-Eo-D漂白流程。常规硫酸盐浆制备溶解浆，必须强化漂白过程，可采用O-O-X-D-Eop-D漂白流程。

（三）本研究领域的展望

随着造纸工业与纺织工业对竹纤维需求量的不断增加，竹材深度脱木素硫酸盐制浆漂白、高得率制浆漂白以及竹溶解浆制备技术将成为研究热点。

我国竹材制浆主要采用立锅间歇蒸煮方式，蒸煮能耗高，劳动强度大，木素脱除率不高，竹浆得率和强度不容易控制。在传统的间歇蒸煮基础上，广东鼎丰纸业有限公司、四川永丰纸业股份有限公司采用新型快速置换蒸煮技术（DDS）生产竹浆，在热能利用、药液分布、控制水平、纸浆得率和强度等方面有进一步地改进^[34]。在连续蒸煮技术方面，贵州赤天化纸业股份有限公司采用世界先进技术连续蒸煮设备和全无氯漂白技术生产竹纤维，该系统在能耗、环保和控制水平等方面更显优势，达到了低能耗、低卡伯值、高得率的目的。在今后一段时期内，新型快速置换蒸煮技术、改良的连续蒸煮技术、低污染漂白技术等技术将成为竹材制浆漂白的发展方向。

机械法制浆主要有磨石磨木浆、热磨机械浆、化学磨木浆、化学热磨机械浆、碱性过氧化氢机械浆。化学热磨机械浆、碱性过氧化氢机械浆（APMP）是在传统的机械浆基础上发展起来的高效制浆技术，与传统的机械浆相比，具有磨浆能低、纸浆强度高、纸浆白度高等优势。碱性过氧化氢机械浆是在漂白化学热磨机械浆（BCTMP）的基础上发展起来的，将制浆与漂白结合在一起，具有污染负荷低、生产过程简单、生产成本低等优势^[35]。竹材组织紧密，材质坚硬，高温处理很难软化竹材，采用热磨机械制浆方法制备竹浆，存在磨浆能耗高、竹浆强度低、竹浆白度低等缺陷。为了降低竹材机械浆磨浆能耗、污染负荷，获得高白度、高强度的竹材机械浆，必须充分地软化竹材，改进预处理技术。在现代木材化学热磨机械浆、碱性过氧化氢机械浆的基础上，发展清洁高效竹材化学机械浆制备关键技术是竹材高得率浆的发展方向。

溶解浆是一种高纯度的化学浆，又称浆粕或精制浆，是黏胶纤维、醋酸纤维素、硝化纤维素、羧甲基纤维素、纤维素醚等产品的生产原料。在溶解浆生产过程中，采用预水解工艺去除半纤维素，预水解介质主要有水、酸、蒸汽等。酸预水解和水预水解硫酸盐法制备溶解浆存在预水解废液量