

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



造纸及其装备科学技术丛书（中文版）

[第七卷]

化学制浆 I

纤维化学和技术

Chemical Pulping Part I
Fibre Chemistry and Technology

[芬兰] Pedro Fardim 著

[中国] 刘秋娟 杨秋林 付时雨 译



中国轻工业出版社

全国百佳图书出版单位

中芬合著 : 造纸及其装备科学技术丛书(中文版)第10卷

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

化学制浆 I 纤维 化学和技术

Chemical Pulping Part I Fibre Chemistry and Technology

[芬兰] Pedro Fardim 著

[中国] 刘秋娟 杨秋林 付时雨 译

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

化学制浆 I 纤维化学和技术/(芬)派卓·法蒂姆
(Pedro Fardim)著;刘秋娟,杨秋林,付时雨译.—北京:
中国轻工业出版社,2017.6
〔中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版);7〕
ISBN 978-7-5184-0668-5

I. ①化… II. ①派… ②刘… ③杨… ④付…
III. ①化学制浆—纤维化学 IV. ①TS743

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 251624 号

责任编辑:林媛 责任终审:滕炎福 封面设计:锋尚设计
版式设计:锋尚设计 责任校对:晋洁 责任监印:张可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:三河市万龙印装有限公司

经销:各地新华书店

版次:2017年6月第1版第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:33.75

字数:864千字

书号:ISBN 978-7-5184-0668-5 定价:200.00元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 传真:85113293

网址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

141231K4X101ZBW

中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)编辑委员会

名誉主任:杨 波 杨志海 余贻骥

顾问:(特聘中国工程院院士)

陈克复 孙优贤 柳百成 陈蕴博 姚 穆

主任:步正发

副主任:钱桂敬

委员:(按姓氏拼音排序)

步正发	巴云平	才大颖	曹春昱	曹朴芳	曹振雷
陈鄂生	陈洪国	陈嘉川	陈克复	陈小康	陈永林
陈蕴博	程言君	崔棣章	杜荣荣	樊 燕	范 泽
房桂干	顾民达	郭海泉	郭永新	何维忠	侯庆喜
胡 楠	胡宗渊	黄孝全	黄运基	贾克勤	江化民
江曼霞	姜丰伟	邝仕均	李 平	李 耀	李朝旺
李发祥	李国都	李洪法	李洪信	李建国	李建华
李金良	李威灵	李祥凌	李有元	李志健	李忠正
林 媛	林美婵	林昭远	刘焕彬	刘铸红	柳百成
陆文荣	马明刚	马思一	马志明	牛 量	牛庆民
庞景方	彭葵生	戚永宜	钱桂敬	裘 峥	邵爱民
沈 滨	沈根莲	宋鸿林	孙润仓	孙树建	孙优贤
孙有根	谭国民	田立忠	童来明	王淼辉	王维俭
王永平	徐 林	徐正源	许本棋	许超峰	许连捷
杨 旭	杨延良	姚 穆	姚献平	于 宏	于学军
袁晓宇	张 辉	张 磊	张 亮	张 熙	张 茵
张国安	张美云	张新平	张战营	赵 伟	赵传山
赵志顺	詹怀宇	郑 晓	钟侠瑞	周景辉	朱根荣

主 编:胡 楠

副主编:姜丰伟 曹振雷 曹朴芳

序

芬兰造纸科学技术水平处于世界前列,近期修订出版了《造纸科学技术丛书》。该丛书共 20 卷,涵盖了产业经济、造纸资源、制浆造纸工艺、环境控制、生物质精炼等科学技术领域,引起了我们业内学者、企业家和科技工作者的关注。

姜丰伟、曹振雷、胡楠三人与芬兰学者马格努斯·丹森合著的该丛书第一卷“制浆造纸经济学”中文版将于 2012 年出版。该书在翻译原著的基础上加入中方的研究内容;遵循产学研相结合的原则,结合国情从造纸行业的实际问题出发,通过调查研究,以战略眼光去寻求解决问题的路径。

这种合著方式的实践使参与者和知情者得到启示,产生了把这一工作扩展到整个丛书的想法,并得到了造纸协会和学会的支持,也得到了芬兰造纸工程师协会的响应。经研究决定,从芬方购买丛书余下十九卷的版权,全部译成中文,并加入中方撰写的书稿,既可以按第一卷“同一本书”的合著方式出版,也可以部分卷书为芬方原著的翻译版,当然更可以中方独立撰写若干卷书,但从总体上来说,中文版的丛书是中芬合著。

该丛书为“中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)”,增加“及其装备”四字是因为芬方原著仅从制浆造纸工艺技术角度介绍了一些装备,而对装备的研究开发、制造和使用的系统理论、结构和方法等方面则写得很少,想借此机会“检阅”我们造纸及其装备行业的学习、消化吸收和自主创新能力,同时体现对国家“十二五”高端装备制造业这一战略性新兴产业的重视。因此,上述独立撰写的若干卷书主要是装备。初步估计,该“丛书”约 30 卷,随着合著工作的进展可能稍许调整和完善。

中芬合著“丛书”中文版的工作量大,也有较大的难度,但对造纸及其装备行业的意义是显而易见的:首先,能为业内众多企业家、科技工作者、教师和学生提供学习和借鉴的平台,体现知识对行业可持续发展的贡献;其次,对我们业内学者的学术成果是一次展示和评价,在学习国外先进科学技术的基础上,不断提升自主创新能力,推动行业的科技进步;第三,对我国造纸及其装备行业教科书的更新也有一定的促进作用。

显然,组织实施这一“丛书”的撰写、编辑和出版工作,是一个较大的系统工程,将在该产业的发展史上留下浓重的一笔,对轻工其他行业也有一定的

借鉴作用。希望造纸及其装备行业的企业家和科技工作者积极参与,以严谨的学风精心组织、翻译、撰写和编辑,以我们的艰辛努力服务于行业的可持续发展,做出应有的贡献。

中国轻工业联合会会长

史正发

2011 年 12 月

中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)的出版
得到了下列公司的支持,特在此一并表示感谢!



UPM

芬欧汇川集团



维美德集团



河南江河纸业有限责任公司



河南大指造纸装备集成工程有限公司



前 言

化学法制浆是制浆造纸厂重要的生产过程之一。本书系统、全面、详细地介绍了化学制浆的原理、技术和设备,包括备料、蒸煮、纸浆的洗涤、筛选与净化、漂白、浆板的抄造和新的纸浆生产线。既有传统工艺,又有新技术以及未来的发展趋势;生产技术及其设备介绍得很详细,是一本非常实用的专业书。正像原著作者所述,这本书如同带领读者在制浆厂里参观,逐步告诉读者,为什么(科研)和如何(生产技术)通过化学制浆,由原料而得到纸浆纤维。

第1章主要论述了植物纤维原料的化学特性、形态学和超微结构以及制浆前木材和非木材原料的加工处理。第2章的主题是化学法制浆,本章介绍主要的制浆方法,重点在于制浆化学和化学工程,例如,化学反应、反应动力学以及控制的工艺参数。在本章的制浆工艺部分读者还会看到现代化浆厂最先进的装备。第3章的重点在于纸浆的洗涤、筛选与净化,突出了其操作原理的重要性以及与浆厂设备相对应的先进工艺。洗涤筛选之后,纸浆便可进行漂白。漂白是第4章的主题,是纸浆生产的关键部分。在这一章读者将学习关于漂白化学品的制备和处理、不同的漂白方法,其重点在木素、碳水化合物和木材抽出物的化学反应以及漂白的化学工程原理。本章的漂白工艺部分给出了有关设备和工艺参数的资料,以便于读者进行设计和完成实验室或生产规模的实验。第5章主要介绍纸浆干燥原理以及现代化的工厂所使用的浆板抄造工艺和设备。第6章侧重于新制浆生产线的设计,并提供有关现代化制浆生产线的资料。最后,对浆厂未来的趋势、非木材制浆以及生物质精炼进行了讨论。

本书适用于制浆造纸及相关行业从事生产、工程设计、科研以及管理等工作的工程技术人员和专业人士,也可作为院校相关专业的教师、研究生、本科生以及职业培训的教学参考书。

本书第1章1.1至1.2.7节由杨秋林翻译;1.2.8至1.3.10节由宋友悦和张晓蒙翻译、刘秋娟修改。第2章由刘秋娟翻译。第3章3.2至3.3节由肖贵华翻译、刘秋娟修改,其余部分由刘秋娟翻译。第4章4.4至4.5节由温建宇翻译、刘秋娟修改,其余部分由刘秋娟翻译。第5章由付时雨翻译。第6章由刘秋娟翻译。范述捷、屈永波和何亮等研究生参与了部分图表的绘制和参考文献的编辑工作,还有一些研究生和本科生结合课程学习翻译了少量内容。全书由天津科技大学刘秋娟统稿。

衷心感谢所有对本书的翻译给予帮助的人们,包括我的同学、学生、同事以及亲朋好友。

由于译者水平所限,加上时间较紧,书中难免存在错误和不当之处,恳请读者和同行专家批评指正,以便今后对本书进行修改和完善。

译者
2015 年 6 月

目 录

CONTENTS

第①章 原料	1
1.1 木材和非木材纤维资源	1
1.1.1 北方森林	2
1.1.2 人工林	3
1.1.3 非木材资源	5
1.2 木材化学、形态学和超微结构	10
1.2.1 木材宏观结构	11
1.2.2 树木生长	13
1.2.3 细胞类型	14
1.2.4 应力木	20
1.2.5 化学成分及分布	21
1.2.6 木材成分化学	25
1.2.7 非木材化学、形态学和超微结构	41
1.2.8 分析方法	49
1.3 木材备料	57
1.3.1 木材原料检测	57
1.3.2 厂区木材贮存管理和贮存时间	59
1.3.3 除冰、锯木和送至剥皮	60
1.3.4 剥皮	65
1.3.5 树皮和废木屑燃料处理	74
1.3.6 削片	80
1.3.7 木片筛选	87
1.3.8 木片贮存和运输	98
1.3.9 水处理	113
1.3.10 木材备料系统	115

参考文献	120
第②章 制浆	133
2.1 化学法制浆发展史	133
2.1.1 亚硫酸盐法制浆	134
2.1.2 硫酸盐法制浆	134
2.1.3 蒸煮器系统的发展	135
2.2 制浆化学	137
2.2.1 化学法制浆工艺和参数	137
2.2.2 化学法制浆的反应原理	139
2.2.3 硫酸盐法制浆的优点和缺点	141
2.2.4 亚硫酸盐法制浆的优点和缺点	142
2.2.5 硫酸盐法制浆	142
2.2.6 亚硫酸盐法制浆	158
2.2.7 木材预水解和水热处理化学	168
2.2.8 有机溶剂制浆方法	170
2.2.9 中性亚硫酸盐半化学法(NSSC)制浆的化学和工艺	175
2.3 制浆的化学工程原理	178
2.3.1 制浆前的处理工艺(pre-pulping process)	179
2.3.2 传质和反应动力学	180
2.3.3 木片的压缩系数及液体流动阻力	194
2.3.4 制浆过程的工艺参数	196
2.4 制浆工艺	202
2.4.1 传统制浆工艺	202
2.4.2 置换间歇蒸煮的基本原理和设备	212
2.4.3 置换间歇蒸煮的工程原理	215
2.4.4 置换间歇蒸煮的操作	218
2.4.5 间歇蒸煮技术的最新发展	228
2.4.6 置换间歇蒸煮的优缺点	230
2.4.7 连续蒸煮总则和蒸煮设备	231
2.4.8 连续蒸煮系统及其操作	234
2.4.9 现代化的连续蒸煮工艺	251
2.4.10 连续蒸煮器技术的发展	260
2.4.11 连续蒸煮的优点和缺点	266
参考文献	267

第③章 纸浆的洗涤、筛选和净化	275
3.1 洗涤原理	275
3.1.1 纸浆在多孔介质中的流动	275
3.1.2 纸浆洗涤过程中的传质	279
3.1.3 洗涤效率	282
3.1.4 不同洗涤系统的效率	289
3.2 洗浆工艺	290
3.2.1 常压扩散洗涤器	291
3.2.2 压力扩散洗涤器	293
3.2.3 带式洗浆机	296
3.2.4 真空洗浆机(真空过滤机,鼓式洗浆机)	297
3.2.5 压力洗浆机(压力过滤机)	299
3.2.6 压榨洗浆机(置换压榨洗浆机)	301
3.2.7 挤浆机	303
3.3 洗涤系统	304
3.4 筛选	305
3.4.1 典型杂质	306
3.4.2 筛选原理	308
3.4.3 筛选机理	308
3.4.4 数字特征	309
3.4.5 筛选设备和操作条件	309
3.4.6 筛选系统示例	310
3.4.7 筛选操作	311
3.5 净化原理	313
3.6 筛选和净化技术	314
3.6.1 除节和洗涤	314
3.6.2 精筛(细筛)	317
3.6.3 转子技术	318
3.6.4 筛板	318
3.6.5 粗渣洗涤	319
3.6.6 轻杂质去除	319
3.6.7 浓缩机	319
3.6.8 除渣器(净化器)	319
3.6.9 漂白浆后净化设备	320

3.7 筛选系统	320
3.7.1 本色浆筛选系统示例	320
3.7.2 后筛选(漂后筛选)	322
参考文献	322
第 4 章 漂白	327
4.1 漂白发展史	327
4.2 漂白化学	332
4.2.1 氯化段的化学反应	332
4.2.2 二氧化氯漂白段的反应	335
4.2.3 氧脱木素(氧气漂白)段的反应	338
4.2.4 过氧化氢漂白段的反应	339
4.2.5 碱抽提段的反应	340
4.2.6 臭氧漂白段的反应	341
4.2.7 过氧乙酸漂白段的反应	343
4.2.8 聚木糖酶处理过程中的反应	344
4.2.9 漂白过程中抽出物的反应	345
4.3 漂白的化学工程原理	346
4.3.1 漂白过程中的传质和反应动力学	346
4.3.2 纤维悬浮液的流变性	352
4.3.3 漂白过程中的单元操作	355
4.4 漂白技术	373
4.4.1 漂白化学品的制备和处理	373
4.4.2 漂白流程的设计	389
4.4.3 氧脱木素段:O 和 OO	393
4.4.4 氯化段:C	397
4.4.5 二氧化氯段:D 和高温 D	398
4.4.6 抽提段:E、(EO)和(EOP)	402
4.4.7 过氧化氢漂白段:P、(PO)和(OP)	404
4.4.8 臭氧段:Z、(ZD)、(DZ)和(Ze)	408
4.4.9 热酸处理段:A 段	414
4.4.10 过氧乙酸漂白	415
4.4.11 多化学品漂白工段	415
4.4.12 酶漂白	416

4.5 结语	416
参考文献	416
第 5 章 纸浆干燥的原理及应用	428
5.1 引言	428
5.1.1 干燥方法	428
5.1.2 干燥对浆质量的影响	430
5.1.3 机械脱水	431
5.1.4 加热脱水	436
5.1.5 浆板干燥设备的总体发展趋势	448
5.2 纸浆干燥过程及其单元操作	451
5.2.1 浆板生产线	451
5.2.2 浆板生产设备	452
5.2.3 浆板机的重要装置	456
5.2.4 浆板干燥部	461
5.2.5 纸浆闪急干燥	470
5.3 浆板分切和打包	472
5.3.1 分切	473
5.4 特例	475
5.4.1 湿抄浆机	475
5.4.2 特种浆——溶解浆的干燥	475
5.5 注释	475
参考文献	476
第 6 章 制浆生产线	480
6.1 背景	480
6.1.1 蒸煮、氧脱木素和漂白之间的分界	481
6.1.2 蒸煮	483
6.1.3 氧脱木素	486
6.1.4 漂白	487
6.1.5 漂白流程的历史性发展	490
6.2 影响制浆生产线设计的因素	491
6.2.1 环境状况	491

- 6.2.2 纸浆厂规模 493
- 6.2.3 生物质精炼方面 494
- 6.3 现代制浆生产线 497
 - 6.3.1 针叶木硫酸盐浆厂 498
 - 6.3.2 阔叶木硫酸盐浆厂 500
 - 6.3.3 亚硫酸盐浆厂 502
 - 6.3.4 非木材浆厂 503
- 6.4 过程控制 505
- 6.5 能量消耗与生产 510
- 6.6 制浆生产线技术趋势 513
- 6.7 未来的趋势 515
- 参考文献 516
- 附录 520

第 1 章 原 料

1.1 木材和非木材纤维资源

植物纤维是所有高等植物中最主要的结构要素。植物纤维由纤维素微纤丝构成,通常这些微纤丝内嵌于非纤维素多糖(半纤维素和果胶)和木素基质中。纤维素是自然界中最丰富的生物聚合物,存在于绿色植物和某些藻类的细胞壁中。微生物纤维素是由不同种类的细菌产生和分泌的(如醋酸杆菌、根瘤菌、假单胞菌等)。木材和棉花主要用于生产商用纤维素产品和纸浆。全球仅有约 7% 的原生纤维素浆是由非木材原料生产的(秸秆占 46%,蔗渣占 14%,以及竹子占 6%)^[1-2]。中国是世界上最大的非木材纸浆生产国,而在欧洲、美国和加拿大,造纸工业几乎全部生产木浆。受全球森林资源减少和木材短缺的影响,寻求可持续的发展方案成为必然。

用于工业用途的原木大约仅占全球原木产量的 1/2。2006 年,全球木材的产量为 35.4 亿 m³,其中约 18.7 亿 m³ 作为薪柴(Fuelwood)被消耗,其余的 16.7 亿 m³ 作为工业木材被消耗^[3]。图 1-1 所示为 2006 年全球原木的产量和消耗量。

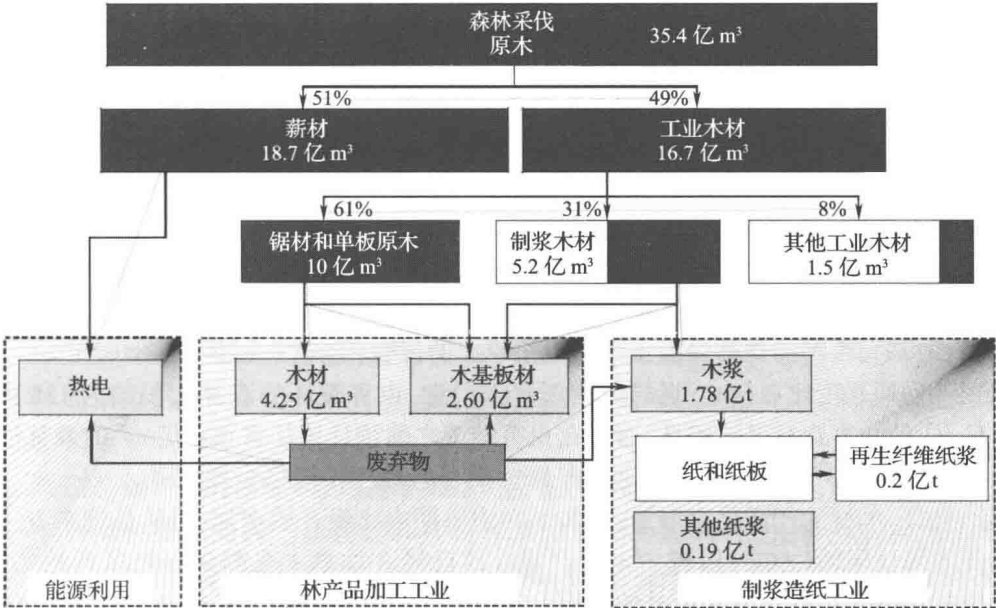


图 1-1 2006 年全球原木产量^[3]

2006 年,作为纸和纸板的原料,全球造纸工业共消耗工业原木 5.2 亿 m^3 、锯材工业产生的木屑废弃物 2.5 亿 m^3 原木当量(RWE)、回用废纸 7.5 亿 m^3 。

在化学浆工业中,根据原木材种和制浆工艺的不同,生产 1t 纸浆要消耗 3.7 ~ 5.6 m^3 的原木。

在规划投资新的制浆厂时,最重要的问题就是要保证可靠的原料供应。即使在最有利的条件下种植最优良的速生材种,也需要 7500 ~ 8000 万 hm^2 的森林面积或 4 倍于芬兰现在的森林面积才能满足全球造纸工业对工业原木的需求。然而,事实上在长时间内很难保证木材原料的可靠供应。

世界森林资源正在逐渐减少。根据联合国粮农组织(FAO)报告,在 2000 年到 2005 年间每年约有 730 万 hm^2 (净值)的林地消失^[4]。与先前的 5 年相比,2006 年森林覆盖率的降低趋势有所减缓,但在 2007 年再次增加。森林覆盖率降低的主要原因是非洲和拉丁美洲对薪柴需求的增加以及畜牧业的发展。颇具矛盾的是,在欧洲等森林工业发达的富庶地区,森林覆盖率却是一直增加的。在拉丁美洲,相比该洲的其他地区,关闭造纸厂的地区森林覆盖率已经增加。

通过对当前和未来的原料供需平衡分析发现,明确原料供应的复杂状况是非常重要的。未来全球纤维供需平衡的发展将与区域生产潜力和林地供应问题密切相关。林地供应与政治和经济决策紧密联系,并受区域政策和生物能源行业发展的影响。

全球主要有 5 个纤维供应区域,其无论是较大的供应变化,还是不连续或过量的纤维供应,都会对全球产生重大影响。这 5 个区域包括:

- (1)北美洲:生产原生木浆,供应和需求再生纤维纸浆;
- (2)拉丁美洲:发展速生阔叶木人工林,供应阔叶木商品浆;
- (3)中国:生产非木浆,进口再生纤维纸浆,生产和进口原生木浆;
- (4)俄罗斯:生产原生木浆,特别是针叶木浆;
- (5)东南亚:发展和供应阔叶木商品浆。

下面概述了主要工业森林的两种形式:北方针叶木为主的森林和人工林。

1.1.1 北方森林

北方森林构成了最大的陆地生物群落,在加拿大、俄罗斯和北欧的一些国家,森林覆盖面积达到 10 亿 hm^2 (见图 1-2)。芬兰、瑞典、加拿大和俄罗斯是众所周知的森林工业国家。本章简要介绍了这些国家的森林资源以及目前木材原料的消耗情况。

加拿大的森林面积占全球森林面积的 6%,其木材产量占全球木材总产量的 7%。加拿大是世界上第二大木材生产国,其产量仅次于美国^[4]。

然而,加拿大西部的森林目前正受到山松甲虫的侵袭,迄今为止还没有出现任何缓和的迹象。根据不列颠哥伦比亚(BC)当局的最新官方消息,虫害破坏的森林面积约为 135 万 hm^2 。超过 5 亿 m^3 的北方森林已被破坏,而且在虫害结束之前预计每年有 0.8 亿 m^3 的森林被破坏。据官方估算,到 2013 年不列颠哥伦比亚省 80% 的可售成年松树将会死亡^[5]。

其结果是,木材的产量将会增加,事实上在中短期内已经开始增加,但从长远来看,需要修改森林年度采伐限额(ACC)以减少木材产量。这已经在加拿大东部部分地区开始实施。美国的科罗拉多也有松甲虫侵害森林的报道。因此,在虫害被控制之前,未来加拿大和美国西部一些州的针叶木供应仍然存在不确定性。