

◎ 李淑君 主编

# 植物纤维 水解技术



化学工业出版社

# 植物纤维水解技术

李淑君 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

植物纤维水解技术/李淑君主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 4  
ISBN 978-7-122-04704-5

I. 植… II. 李… III. 林产化工 IV. TQ353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 012500 号

---

责任编辑: 成荣霞  
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 陈 雨  
装帧设计: 韩 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 化学工业出版社印刷厂  
720mm×1000mm 1/16 印张 16 字数 320 千字 2009 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

植物纤维原料主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，其中纤维素和半纤维素为多糖类物质，能够发生水解，通过水解工艺制得多种产品，如糠醛、酒精等。

糠醛是在 1832 年被德国化学家德贝雷涅尔 (J. W. Döbereiner) 所发现，当时是在由硫酸和二氧化锰混合液用于蔗糖制取甲酸时，从蒸馏产物中偶然发现一种具有特殊气味的油状物，认为是一种副产物而称其为“人造蚁酸油”。其后，于 1845 年又有人从米糠中制取出了同样物质，此后便称其为糠醛了 (furfur——米糠，oleum——油)。当确定了结构以后发现其物理化学性质均很特殊，并有广泛用途，直到 1922 年才在美国采用农业废料 (棉籽壳、稻壳和燕麦壳) 首先实现工业化生产。至今，糠醛仍仅从植物纤维原料通过水解的方法来生产，虽然也有研究者从事于糠醛合成的研究工作 (如氧化脂肪系的二烯)，但未能实施。我国是糠醛生产和出口大国，但是规模小，生产技术水平落后，存在污染较大的问题，与发达国家具有较大差距。我国糠醛行业技术水平急需提高。

植物多糖经水解、发酵生产酒精具有悠久的历史。然而，当以植物纤维为原料时，由于木质素对微生物的抑制作用、纤维素酶活性低等原因使其水解发酵制酒精成本很高。在过去的几十年中植物纤维原料水解制酒精工业一直处于停滞状态，未能得到发展。直至最近几年，由于化石资源危机，生物质能源的利用受到重视，“生物质工程”已列入国家“十一五”重大科技支撑计划项目，以植物纤维原料水解制酒精技术也得到了发展。中粮集团和中石化等能源行业巨头都对燃料乙醇项目表现出浓厚兴趣。河南天冠纤维乙醇产业化示范项目一期工程——5 千吨纤维乙醇生产装置于 2008 年完成建设，并投入运行，顺利实现了纤维酒精的生产。

当前，我国植物纤维水解工业快速发展，但是相关技术资料较少且较落后。为此，编者在收集大量国内外先进生产技术资料的基础上编写了本书，希望促进我国植物纤维水解技术的发展。本书由东北林业大学李淑君主编，其中，第五章由苏文强编写，其他四章由李淑君编写，全书由方桂珍主审。

由于编者水平所限，内容难免有不足和疏漏之处，敬请读者予以指正。

编 者  
2009 年 1 月

# 目 录

绪论 .....	1
一、植物纤维水解工业在国民经济中的作用 .....	1
二、植物纤维水解技术的发展 .....	3
<b>第一章 水解工业的原料 .....</b>	<b>5</b>
第一节 水解工业原料的种类 .....	5
第二节 各种原料化学组成 .....	6
第三节 原料的工艺性质 .....	9
第四节 原料的预处理、储存和运输 .....	15
<b>第二章 植物原料水解工艺 .....</b>	<b>17</b>
第一节 植物原料稀硫酸水解工艺 .....	18
一、固定法水解工艺 .....	18
二、渗滤法水解工艺 .....	20
三、水解工段的主要设备 .....	38
第二节 纤维素的酶水解 .....	47
一、酶的一般特性与分类 .....	47
二、纤维素酶 .....	48
三、纤维素酶水解工艺过程 .....	49
四、纤维素酶水解亟待解决的问题 .....	55
第三节 多糖浓酸水解 .....	57
一、浓酸水解机理 .....	57
二、浓酸水解工艺 .....	60
第四节 高温水解 .....	63
一、挤压法水解 .....	64
二、爆炸法水解 .....	65
<b>第三章 植物原料稀酸水解理论基础 .....</b>	<b>67</b>
第一节 多糖苷键断裂的机理 .....	67
第二节 水解反应的基本动力学特性及影响水解速度的因素 .....	70
一、水解反应的基本动力学特性 .....	70

二、影响多糖水解速度的因素 .....	73
第三节 半纤维素的水解特性与动力学 .....	80
一、半纤维素的水解特性 .....	80
二、半纤维素水解动力学 .....	85
第四节 水解条件下单糖和糠醛的分解与动力学 .....	86
一、水解条件下单糖的分解 .....	86
二、水解条件下呋喃化物的转换 .....	87
三、水解条件下单糖分解动力学 .....	88
第五节 稀酸水解条件下木质素及提取物的转换 .....	90
一、水解条件下木质素的转换 .....	90
二、酸水解条件下提取物的转换 .....	93
第六节 固定法水解条件下单糖得率 .....	94
第七节 渗滤法水解的单糖得率 .....	96
第八节 宏观动力学因素对单糖得率的影响 .....	98
一、扩散过程 .....	99
二、流体动力学因素 .....	100
三、水解液比（液相与固相之比） .....	102
<b>第四章 糠醛生产 .....</b>	<b>104</b>
第一节 糠醛生产的基本原理 .....	104
一、糠醛的生成 .....	104
二、原料种类和特征 .....	105
三、糠醛生产的催化剂 .....	106
四、形成糠醛的反应动力学 .....	107
五、影响糠醛得率的因素 .....	109
第二节 糠醛生产的蒸煮工艺 .....	111
一、一段水解 .....	111
二、二段水解 .....	116
三、其他获得含醛冷凝液的途径 .....	119
第三节 有机酸的中和 .....	120
第四节 糠醛的蒸馏与净化 .....	121
一、糠醛蒸馏的基本原理、工艺流程和条件 .....	121
二、粗糠醛的精制 .....	125
三、糠醛生产中热能和副产物的回收 .....	127
四、几种糠醛蒸馏与精制的工艺实例 .....	135
第五节 典型糠醛生产工艺评述 .....	140
一、美国桂格燕麦公司糠醛间歇式蒸煮-精制工艺 .....	140
二、罗西法间歇式糠醛生产工艺 .....	142
三、罗森柳（赛佛）法间歇生产工艺 .....	142

四、农业呋喃法间歇式糠醛生产工艺	143
五、美国桂格燕麦公司连续水解工艺	145
六、埃斯彻尔-维斯连续水解工艺	147
七、罗森柳连续水解工艺	147
八、最新糠醛生产工艺	149
第六节 糠醛的主要性质和用途	154
一、糠醛的物理化学性质	154
二、糠醛的一般用途	159
第七节 糠醛的再加工产品	161
一、糠醇	162
二、糠醇合成树脂	169
三、四氢糠醇	169
四、其他产品	170
第八节 木糖醇生产	172
一、含聚戊糖原料的预处理	173
二、半纤维素的水解工艺	173
三、戊糖水溶液的化学组成	174
四、戊糖水溶液氢化前预处理	175
五、木糖加氢	179
六、木糖醇溶液的净化与浓缩	181
七、木糖醇结晶	182
八、木糖醇的特性	184
九、木糖醇的主要用途	184
十、制取脱水木糖醇	185
<b>第五章 酒精生产</b>	<b>186</b>
第一节 发酵培养液的预处理	186
一、水解液的化学组成	187
二、水解液的转化	190
三、水解液的中和	192
四、无机营养盐添加	194
五、中和液的净化和冷却	195
第二节 水解酒精生产常用的酵母菌种	198
第三节 酒精发酵生物化学	198
第四节 酒精发酵的工艺过程	201
一、木材水解糖液酒精发酵的特征	201
二、木材水解糖液酒精发酵的适宜条件	201
三、酒精发酵的现象与特征	203
四、酒精发酵工艺计算	204

五、酒精发酵工艺流程·····	205
第五节 酒精精馏浓缩和净化除杂质·····	207
一、蒸发系数 $K$ 及醪液中的杂质·····	207
二、精馏系数 $K'$ 及杂质分类·····	208
三、醪液蒸馏和酒精精馏工艺流程·····	209
第六节 燃料酒精的制备·····	211
第七节 酒精生产副产物的加工·····	214
一、饲料酵母的生产·····	214
二、制备液体和固体二氧化碳·····	231
三、水解残渣木质素的利用·····	232
<b>附录 1 我国常见植物纤维原料化学成分分析表</b> ·····	235
一、木材原料·····	235
二、竹类原料·····	236
三、草类原料·····	236
四、麻类原料·····	237
<b>附录 2 植物纤维原料中聚戊糖含量的分析方法</b> ·····	238
<b>附录 3 糠醛-水溶液的性质</b> ·····	243
<b>附录 4 糠醇的主要性质</b> ·····	246
<b>参考文献</b> ·····	247



# 绪 论

由于化石资源储量的不断减少，植物原料化学与生物技术加工受到了全世界极大的关注。植物原料主要来自于林业和农业生产的植物废料。植物原料与矿物有机原料不同，它是一种再生植物资源，是取之不尽、用之不绝的。据统计，地球上每年借光合作用形成的植物生物量多达 2000 亿吨，从化学本质而言，这些生物量中占多数的是纤维素，其次是木质素和半纤维素，因此又称为植物纤维原料。其中的纤维素和半纤维素都可通过水解反应将大分子转变为相应的单糖，或通过进一步的化学、生物加工，制取其他产品。植物纤维原料将在人类生活中承担越来越重要的角色。

## 一、植物纤维水解工业在国民经济中的作用

水解工业是微生物工业的组成部分，也是现代生物工艺学的一个分支。它是基于对木质化生物质多糖苷键的水解分解作用，使多糖转换成单糖，再将这些单糖进行化学或生物化学的加工，把单糖转变成饲料、酒精、糠醛及其衍生物、木糖与木糖醇，以及其他工业和民用的各种产品，所以植物原料水解工业是最有发展前途的化学与生物化学加工工业之一。现代微生物工业生产出的饲料添加剂复合体，能提高家畜饲料的营养价值，生产饲料酵母和蛋白-维生素浓缩物、饲料水解糖、氨基酸、酵素、维生素、食用抗生素和其他产品。但是从根本而言，水解工业主要包括两大部分：糠醛生产和酒精生产。

由于迫切的能源问题，很多国家企图以农林植物废料制取酒精为内燃机提供燃料。美国、瑞典、巴西、新西兰和其他一些国家在这方面已取得一定的成就。水解生产的发展要决定于市场上石油和非石油产品的价格。

在 20 世纪中叶石油化工飞速发展的时期，与石油化工乙烯加成制酒精相比，植物纤维原料水解制酒精的成本较高，而在竞争中处于下风，糠醛生产则因以石油化工原料生产未曾实现而得以发展。

随着矿物原料储量日益减少，会引起世界对水解工业发展的进一步认识。

### 1. 糠醛生产

糠醛（又称呋喃甲醛，furfural）是一种重要的化工产品，广泛应用于合成塑料、医药、农药等工业，用它直接和间接合成的化工产品有 1600 多种，包括糠醇、马来酸酐、四氢呋喃、呋喃树脂、糠醛树脂、糠酮树脂等。

全球（不含中国）运行中的糠醛生产能力约为 24 万吨/年。其中美国 7.3 万吨/年，西欧 8 万吨/年，其他国家 8 万吨/年。20 世纪 90 年代初期世界糠醛生产的重点已经从发达国家转移到发展中国家，欧美每年至少需进口 5 万吨糠醛。

2005 年以来，糠醛的市场行情十分看好，市场价格每吨在 6000~9000 元之间，甚至更高，而生产成本一般稳定在 3000~4000 元左右，2008 年受成本提高等多种因素影响，每吨糠醛市场价格一度超过万元，经济效益非常可观。

目前我国有 200 余套糠醛生产装置，生产规模一般为 1000~3000 吨/年，根据产量推测，我国糠醛总生产能力超过 20 万吨/年，实际年产量约 10 余万吨。中国糠醛生产能力占全球总生产能力的 50% 左右，中国糠醛工业在世界上占有举足轻重的地位。

国际市场对糠醛的需求客观存在，1994~1995 年美国、西欧对中国建立贸易壁垒后，中国糠醛行业严重萎缩，1995 年中国向世界市场的糠醛供货量下降到 1.37 万吨。由于中国供应量的减少，1996 年出现全球性货源紧张。中国的糠醛价格在国际市场上极具竞争力，近几年中国糠醛出口量激增，年糠醛出口量保持在 3 万吨左右，2008 年第一季度的出口量更是同比 2007 年增加了一倍多（表 0-1）。中国糠醛在国际市场上占有越来越大的市场份额。欧美等发达国家对中国糠醛的依赖程度越来越高，中国糠醛在国际市场上还有一定的拓展空间。

表 0-1 2007/2008 年 1~3 月糠醛出口数量比照表

年 份	2007 年出口量/t	2008 年出口量/t
1 月	1736	2494
2 月	1056	3027
3 月	1588	3778

注：源自糠醛网，2008。

## 2. 酒精生产

酒精（又称乙醇，ethanol 或 ethyl alcohol），是一种无色透明易挥发和易燃的液体，可作为替代燃料。与普通汽油相比，具有比其燃烧更完全、CO<sub>2</sub> 排放量较低、燃烧性能与汽油相似等优良特性，被称为 21 世纪“绿色能源”。

自 20 世纪 90 年代以来，我国对石油能源的需求已进入快速增长时期，石油消费每年不断持续增长。据统计，2004 年我国石油进口量位居世界第二位，已成为世界第二大石油消费国和进口国，2007 年我国石油消费总量达到 3.46 亿吨，石油进口对外依存度已达到 46.05%。

面对国内石油消费需求量的持续增长，加上国际油价持续高价运行下，积极发展生物能源等可再生新能源，以部分替代传统常规能源、应对国家能源安全，具有重要意义。2007 年 9 月，国家颁布了《可再生能源中长期发展规划》，明确提出了我国可再生能源发展的战略重点和总体工作目标。力争到 2010 年，全国可再生能

源消费量达到能源消费总量的 10% 左右, 到 2015 年达到 15%。

我国燃料乙醇生产起步于 2002 年, 2007 年全国四家上规模的燃料乙醇生产公司, 销售燃料乙醇共计 133.2 万吨, 其中吉林燃料乙醇 41.9 万吨, 河南天冠 40.2 万吨, 安徽丰原 34.9 万吨, 中粮肇东 16.2 万吨; 除天冠以小麦为原料外, 其他三家都以玉米为原料。我国第一家获批准的非粮燃料乙醇企业广西中粮生物质能源公司已于 2008 年年初投产, 以木薯为主要原料, 上半年已生产燃料乙醇 2 万多吨。

目前我国在积极鼓励和大力开发利用生物能源发展的同时, 重点开发以木薯、甜高粱、秸秆等为原料的生物能源, 加大对非粮原料生产生物能源的研究, 加大对生物能源技术研究的开发与投入, 建立优先购买自主创新生物能源产品制度, 对生物柴油、生物质发电和经批准生产的生物燃料乙醇等重要生物产品给予大力支持。

我国地少人多, 可作为生物能源的粮食、油料资源很少, 可作为生物能源的生物质资源有巨大潜力。农作物秸秆尚有 60% 可用于生物能源的开发利用, 有约 40% 的森林开采剩余物尚未加工利用。水解工业将会在我国国民经济的发展中发挥越来越重要的作用。

## 二、植物纤维水解技术的发展

植物原料水解的研究工作起始于 19 世纪初期, 而应用于工业生产却是 20 世纪之初。

早在 1819 年法国化学家布拉克诺曾用 91.5% 的硫酸水解过亚麻布和木材。1832 年德国人德博雷涅尔 (J. W. Doeberiner) 在利用硫酸作用于糖和淀粉制取甲酸时, 意外地发现了糠醛。在 1840 年司梯恩豪兹首先从木屑和农业植物秸秆中制取出糠醛。1844 年佩因首先在加压釜中进行木材稀硫酸水解实验。1855 年伯路兹和阿鲁努在法国提出利用浓硫酸在常温下水解木材制取酒精, 这为同年在法国巴黎建设的水解装置打下了技术基础。同年米尔森在布鲁塞尔提出用 2.5% 的硫酸在 100~170℃ 水解粉碎后的木材制取葡萄糖和酒精, 1887 年俄国化学家契尔文斯基提出用 0.5%~1% 的  $H_2SO_4$  和  $HCl$  以木屑制造饲料用糖。1891 年彼尔特兰和费舍尔利用钠汞齐还原 D-和 L-木糖, 合成出了木糖醇。

1894 年瑞典化学家希姆逊正式提出一段木材水解过程: 水解时间 25min, 硫酸浓度 0.5%, 温度 165~170℃, 液比 5, 单糖得率达木材重量的 22%~23%, 硫酸耗量 2.5%~3%, 这种方法在中间试验室的装置中, 乙醇得率为 50~60L/t 绝干木材。

1899 年克拉辛教授在德国提出过浓硫酸水解木材的方法, 依据该法在德国、英国和美国建立过水解酒精厂, 这些工厂以后由于技术问题, 不久就关闭了。

1922 年美国开始掌握糠醛生产技术, 以燕麦壳为原料生产出第一吨商品糠醛。

1926 年法国化学家彼尔梯尔斯在黑格兰 (瑞典) 参与下提出木材浓盐酸水解工艺, 按着该工艺建设了工厂, 1933 年投产, 年产饲料糖 6000~8000t, 该厂从

1934年起生产葡萄糖和酒精，从1939年改产食用酵母。

1926年德国化学家肖勒尔提出渗滤水解工艺，稀酸溶液从反应的物料中滤出并带出形成的糖，1931年第一个渗滤水解厂投产，至1934年该厂已生产出6000t糖，并加工成250万升酒精。后在1936和1937年又相继有两个厂投产，总生产能力达85000升/年。

1934年前苏联开始建设列宁格勒水解厂，1935年12月进行试验性运转。该厂试车时采用一段水解工艺。温度 $175\sim 190^{\circ}\text{C}$ ，硫酸浓度 $0.5\%\sim 0.7\%$ ，水解器容积 $18\text{m}^3$ ，内衬耐酸砖。在1945年提出《列宁格勒渗滤水解规程》。第二次世界大战期间曾组织生产食用纤维素和食用酵母，以其产品作为黑面包和食用蛋白酵母的添加剂（ $10\%\sim 15\%$ ）。

前苏联是主要的木材水解生产国家，农林废弃物开发技术比较先进，列宁格勒水解厂、克拉诺达斯基水解厂、弗尔干水解厂的生产实践对于中国水解工业的发展产生了巨大影响，曾有46个水解厂在运转，其中有37个企业属于医药和微生物工业部，9个企业和车间归其他部门领导。按专业分，18个企业生产酒精、酵母；16个企业生产酵母，并有12个企业生产糠醛、木糖和酵母。从其水解产品总产值看，饲料酵母约占50%，其他商品如酒精占15%，预混饲料（premix）、糠醛和呋喃化合物占10%，木糖醇和脱水木糖醇占2%，其他产品占10%。

其他国家如美国水解工业主要生产糠醛及其衍生物，其产量在世界上占主导地位。

新中国成立前，我国除天津在1932年有一个每天生产几升糠醛（以棉籽壳为原料）的小试验车间外，水解工业是个空白。

我国在新中国成立后开始发展水解工业，1958年，林业部门从前苏联引进植物纤维水解技术及设备，投资4000万元人民币，建立了有代表性的林产化工企业，以木屑为原料，采用稀酸加压渗滤水解工艺，生产乙醇以及其他副产品，如饲料酵母、糠醛、木素活性炭、石膏板等。从1966年至1984年共生产乙醇2万多吨，为国家节省5万多吨粮食。1984年该企业的乙醇最高年产量达3245t，达到了绝干木材产糖率41%、100kg可发酵糖产乙醇52.8L的指标；后来该工艺因生产成本高而停产。近些年因石油价格持续攀升，水解制燃料乙醇工业获得新生。

糠醛厂则因水解是糠醛工业生产的唯一途径，得到了持续的发展，近些年一直保持世界上一个糠醛出口大国的地位。此外也有多个生产木糖醇的生产车间，其产品主要是出口。我国糠醛生产虽具有一定的生产能力，但生产规模小，企业管理不善，尚缺乏具有一定水平的工程技术人员。

# 第一章 水解工业的原料

## 第一节 水解工业原料的种类

自然界中的植物原料年复一年地不断生长和更新，因此，植物纤维是自然界中最丰富的可再生资源。在生物界中，结合于有机体中的碳高达  $27 \times 10^{10}$  t，其中 99% 以上的碳来自植物，约 40% 的植物中的碳是结合在纤维素中的，这意味着植物界中纤维素总量为  $26.5 \times 10^{10}$  t。

植物纤维原料品种繁多，大体上可分为两类：木材纤维原料（针叶木、阔叶木）和非木材纤维原料（竹类、禾草类、韧皮类、籽毛类等）。

植物纤维原料是诸多工业的主要原料，与人类生活密切相关。在植物纤维原料的采集、加工和应用过程中会产生大量的废弃物，如森林采伐、木材加工、农作物加工的植物废料、野生植物以及纤维性生活垃圾等都可以作为水解工业的原料。

水解厂在选择原料时，由于成本问题，必须考虑周边地区内原料的密集程度和原料的工艺性质。产地原料的密集程度决定着原料的运输费用，在很大程度上也决定着水解厂的生产能力。原料的工艺性质，如原料的化学组成，多糖水解性能、过滤性能和散重等都是影响水解工艺参数、产品的得率、设备的生产能力和企业经济效益的重要因素。

森林采伐时可得到 15%~25% 的树枝、伐根、树皮和其他剩余物。在一个森林采伐区里这些物质分布的密集程度取决于森林采伐量。

采伐的树木大部分被送到制材厂，制材可得到 60%~65% 锯材，10%~12% 软废料（锯末）和 20% 硬废料（树皮、板条和刨花）。在现代化企业中，应尽可能地将这些废料作为工业原料加以利用，以提高原料利用率，如作为水解生产的原料，或者作纸板、纤维板生产的原料，以及其他生产的原料等都是很好的途径。

浸提松香生产和栲胶生产的废渣同样可以作为水解生产的原料。阔叶薪材也可作为水解生产的原料。

农作物加工的植物废料，如棉籽壳、玉米芯、葵花籽壳、稻壳、黍壳、麻屑、稻麦草等都可作为水解生产的原料。此外，芦苇也是很好的水解生产原料，但其价

格较高，在经济上不够合理。

## 第二节 各种原料化学组成

植物原料的基本组成如图 1-1 所示。其中能够发生水解，被水解工业所利用的部分就是糖类组分。用水解方法进行植物原料的化学加工时，首先就要注意到原料中多糖组分的含量和种类，并由此把原料分成两类：针叶材原料和以阔叶材为代表的含聚戊糖（也称戊聚糖，在自然界中多以木聚糖或称聚木糖形式存在）原料。针叶材中聚戊糖含量较低，多为 10%（对绝干原料）以下，远低于阔叶材等含聚戊糖原料（一般高于 20%）。含聚戊糖原料除阔叶材外，还有阔叶木材机械加工废料、栲胶生产的废料、农产品加工的植物废料和分解程度低的泥煤等。

含聚戊糖原料中，不仅聚戊糖含量要比针叶材中的含量高，而且这些原料中的半纤维素多糖成分的化学结构和组成是多种多样的。针叶材中的半纤维素基本上是半乳糖葡萄糖甘露聚糖和阿拉伯糖葡萄糖醛酸木聚糖组成的，而阔叶材中的半纤维素则基本上是由葡萄糖醛酸木聚糖组成的。阔叶材半纤维素中的阿拉伯半乳糖的含量也与针叶材的不同，表 1-1 中列出了各种去皮木材试样的化学组成。以糖类的总含量计，针叶材与阔叶材的含量几乎是相等的，其水解单糖的理论得率为绝干原料量的 66%~72%。

表 1-1 各种木材原料对绝干物的化学组成

组 成	对绝干物质含量/%					
	云 杉	松 木	冷 杉	落叶松	白 桦	山 杨
聚糖						
易水解	17.3	17.8	14.9	27.2	26.5	20.3
难水解	48.0	47.7	44.2	39.0	39.4	44.0
总计	65.3	65.5	59.1	66.2	65.9	64.3
聚戊糖(无糖醛酸)	5.1	6.0	5.2	7.8	22.1	16.3
己糖	58.7	59.3	52.5	57.7	40.3	45.4
纤维素	46.1	44.1	41.2	34.5	35.4	41.8
木质素(无灰)	28.1	24.7	29.9	26.1	19.7	21.8
糖醛酸	4.1	4.0	3.6	3.9	5.7	8.0
乙酰基	1.3	2.2	0.8	1.4	5.8	5.6
灰分	0.3	0.2	0.5	0.1	0.1	0.3
树脂(乙醚萃取)	0.9	1.8	0.7	1.1	0.9	2.8
易水解多糖水解液中的单糖						
半乳糖	1.0	2.0	0.8	16.7	1.3	0.8
葡萄糖	2.0	2.8	2.9	1.0	1.9	1.7
甘露糖	9.6	9.6	6.9	4.5	1.2	0.8
木糖	4.1	3.9	3.1	4.2	20.7	16.7
阿拉伯糖	0.8	1.5	1.5	3.6	0.9	0.7
难水解多糖水解液中的单糖						
葡萄糖	51.2	49.0	45.8	36.3	30.3	46.4
木糖	0.9	1.4	1.3	1.0	3.5	1.1
甘露糖	1.3	2.5	2.0	2.3	1.0	0.7

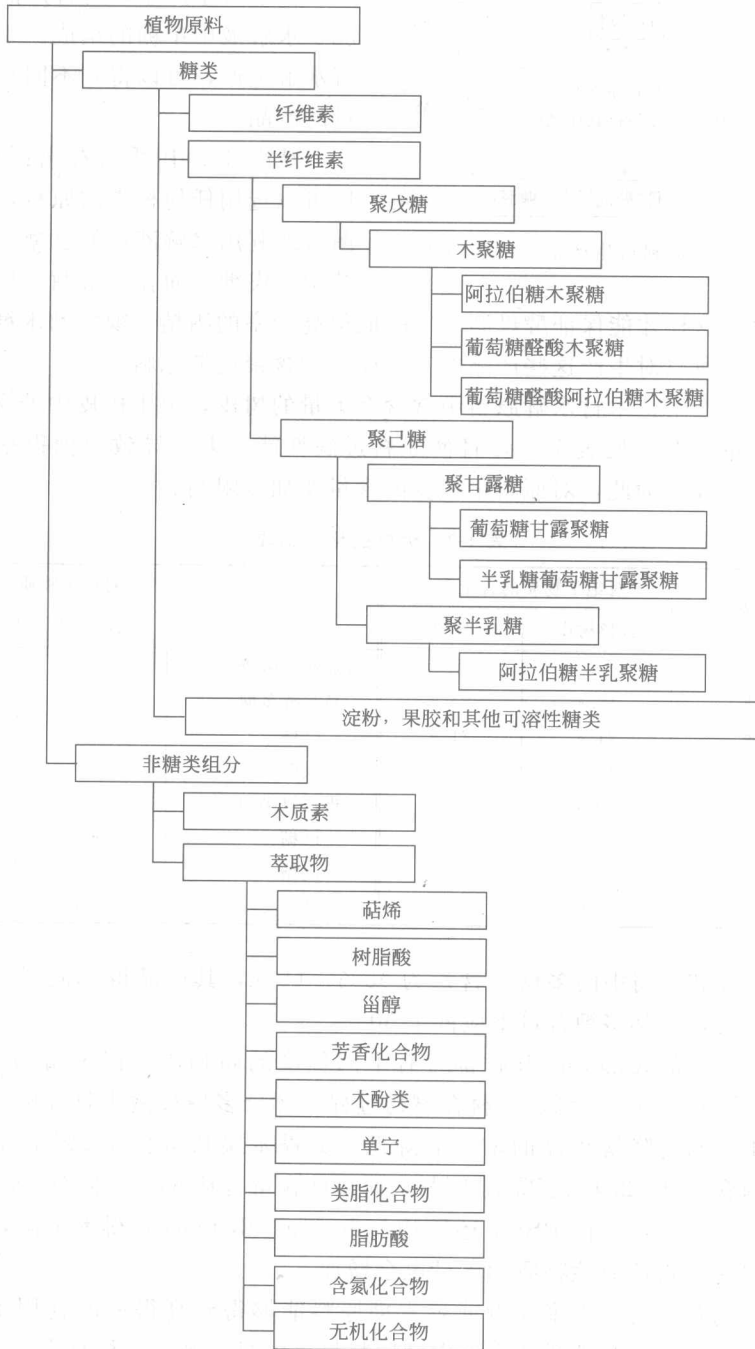


图 1-1 植物原料基本组成

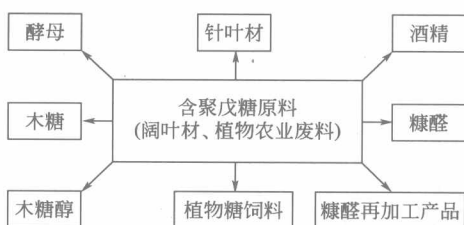


图 1-2 各种原料可生产出的基本产品

在水解生产中，各种产品的得率取决于水解液中单糖的组成。不同原料进行水解生产，可以得到不同种类或不同量的产品。

从图 1-2 中可以看出：水解-酵母厂可以选用任何种类的原料，因为酵母菌既能利用水解液中的己糖，又能利用其中的戊糖。而在水解酒精厂，要优先

选用针叶材，这样才能保证酵母酒精发酵取得高产率的酒精。糠醛和木糖醇是由聚戊糖得到的，所以对生产这些产品的工厂要选用含聚戊糖原料。

在实际生产中，木材水解原料中常含有大量的树皮，由于树皮中糖含量低，使原料中总糖量降低（见表 1-2），且使原料过滤性能变差，导致单糖得率降低，水解液的质量下降。为此，对原料中树皮的含量要加以限制。

表 1-2 树皮的化学组成

组 成	对绝干物质的含量/%		组 成	对绝干物质的含量/%	
	云杉树皮	山杨树皮		云杉树皮	山杨树皮
多糖			水解液的组成		
易水解多糖	19.4	24.3	易水解多糖		
难水解多糖	21.4	21.6	己糖	19.3	9.7
总计	40.8	45.9	戊糖	7.6	16.4
糠醛酸	10.4	14.5	难水解多糖		
乙酰基	1.0	3.8	己糖	19.9	18.1
树脂(乙醇萃取)	10.7	7.5	戊糖	0.5	2.0
灰分	2.1	4.6	总计	47.3	46.2

工业木片和木屑中的多糖总含量为 55%~65%，其产品得率低于相应的去皮木材，经过处理后其多糖含量不应低于 60%。

水解厂加工的大部分阔叶材都含有不同程度的腐朽木。桦木腐朽量为 3%~4%，杨木约为 10%~15%。木材在腐朽过程中部分多糖被微生物降解，多糖的含量会随着木材腐朽降解程度的增加而降低。如桦木腐朽量从 4.2% 增加到 22.4% 时，聚戊糖含量从 22.4% 下降到 19%，而多糖含量也从 64% 下降到 58.9%。当水解这样腐朽的树时，不仅 RS(可还原物 reducing substance) 得率下降，而且水解液中非碳水化合物还原性物质的含量也会增加。

从工艺的角度看，由聚戊糖或聚木糖原料能够得到高得率的食用木糖醇或糠醛。用于生产木糖醇和糠醛的含聚戊糖原料最多的是玉米芯、棉籽壳、燕麦壳（见表 1-3）和甘蔗渣。美国和其他一些国家主要用燕麦壳和甘蔗渣。



表 1-3 农业生产主要植物废料的化学组成 (对绝干料) 单位: %

组 成	玉米芯	棉籽壳	葵花籽壳	燕麦壳	稻 壳	棉 秆	麦 秆
纤维素	31.5	31.4	22.6	28.9	27.9	40.8	38.2
聚戊糖	34.8	21.4	18.4	33.6	17.1	13.6	23.6
聚糖醛酸	7.4	7.7	10.1	5.4	4.4	9.7	4.6
易水解多糖单糖得率	37.9	24.9	19.7	34.7	18.1	20.6	20.5
D-半乳糖	2.1	0.8	0.9	1.3	1.0	2.0	0.8
D-葡萄糖	3.4	1.6	0.8	1.1	3.5	3.1	1.1
D-甘露糖	—	微量	0.5	—	—	0.1	0.5
L-阿拉伯糖	3.8	0.8	4.2	3.2	2.0	1.2	1.6
D-木糖	31.2	20.6	13.2	32.8	13.7	11.3	13.3
L-鼠李糖	—	0.4	0.5	—	—	—	—
难水解多糖单糖得率	33.4	34.2	25.1	28.6	29.1	28.3	37.4
D-葡萄糖	34.9	34.9	25.1	32.2	31.0	40.0	35.0
D-木糖	2.6	1.8	2.4	微量	1.9	2.5	3.1
D-甘露糖	—	0.9	0.4	—	—	—	—
完全水解时 RS 得率	79.3	65.8	49.8	70.4	52.4	60.2	64.6
木质素	15.2	30.6	29.1	27.2	19.0	25.6	25.1
灰分	1.1	2.5	2.1	7.7	18.0	3.5	5.2

农业生产的植物废料长期储存时, 会由于腐朽而降低碳水化合物组分的含量。其中, 玉米芯聚戊糖的损失量可达 25%, 会使木糖醇生产的戊糖水解液的质量下降。为得到高质量的水解液, 就必须选用多糖含量在 65%~68% 以上的原料。

对于水解生产, 除了考虑原料中的总灰分之外, 还要考虑活性灰分的含量。活性灰分通常用与无机组分相作用而消耗的硫酸量来表示。葵花籽壳的总灰分含量为 3.7%, 活性灰分为 2.7%; 玉米芯分别为 3% 和 1.3%; 木材的灰分通常为 0.2%~0.5%。因此水解木材时, 硫酸的附加消耗量比水解农业生产植物废料少 1/2 到 2/3。水解木材时, 中和灰分附加硫酸耗量对每吨绝干原料为 5~12kg; 水解玉米芯时为 24kg; 而水解葵花籽壳则为 44kg。

除了上述提到的含聚戊糖原料之外, 可供木糖醇及糠醛生产用的原料还有高粱秆、蓖麻秆、龙须草、油茶壳、甘蔗渣、甘蔗髓等。

### 第三节 原料的工艺性质

不仅原料的化学组成影响到水解过程的速度、中间产物和最终产品的组成, 而且原料的物理结构、密度、颗粒组成, 以及其他工艺性质也都会对其有影响。

原料的质量和数量基本指标如下:

#### 1. 木材含水率 (湿度)

木材含水率通常以相对湿度和绝对湿度表示。