

Technology of Steam Explosion:
Principles and Applications

蒸汽爆碎技术 原理及应用

陈洪章 刘丽英 编著



化学工业出版社

蒸汽爆碎技术原理及应用

陈洪章 刘丽英 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

蒸汽爆碎技术原理及应用/陈洪章, 刘丽英编著.

北京: 化学工业出版社, 2007. 1

ISBN 978-7-5025-9951-5

I. 蒸… II. ①陈…②刘… III. 粉碎-化工设备

IV. TQ051.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 011133 号

责任编辑: 傅四周 莫小曼

文字编辑: 陈 元 丁建华

责任校对: 边 涛

装帧设计: 张 辉

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: 北京云浩印刷有限责任公司

850mm×1168mm 1/32 印张 8½ 字数 225 千字 2007 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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

蒸汽爆碎 (steam explosion) 是将固体物料, 特别是木质纤维素原料用饱和蒸汽或高压气体处理一定时间后瞬间降至常压的过程。1928 年, 美国的 W. H. Mason 首先发明了蒸汽爆碎技术, 当时该技术使用 7~8MPa 的饱和水蒸气作为介质进行蒸汽爆碎, 只用于纤维板制备的研究。因该技术爆破压力高, 所以难于推广。从 20 世纪 80 年代开始, 该技术又重新得到重视。

国内外大多数研究局限于针对木材原料的蒸汽爆碎, 仍然是先用化学药品预处理木片。笔者基于秸秆与木材在化学组成和结构上的差异, 提出对秸秆不加任何化学药品的无污染低压蒸汽爆碎新技术。进而推广到烟草加工、中草药提取、麻纤维清洁脱胶等行业领域。与此同时, 较遗憾的是, 国内至今没有一本系统介绍蒸汽爆碎技术的专著或出版物。为弥补这一缺憾, 也为了将我们几十年来有关蒸汽爆碎技术的研究成果与国内外的同行进行交流, 在查阅大量文献的基础上, 结合我们自身的工作, 撰写了本书, 希望借此书抛砖引玉, 促进蒸汽爆碎技术更好地广泛应用。

本书分析了蒸汽爆碎技术原理及固体多组分物料蒸汽爆碎组分分离机制, 并对蒸汽爆碎的工艺及设备进行了介绍, 重点对其应用工艺进行了详细阐述。笔者在该方面的研究得到了国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2004CB719700) 和中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KJ CX2-SW-206) 的资助; 另外, 我的十几位硕士和博士研究生的研究工作构成了本书的重要素材; 在本书编著过程中, 参考了大量国内外前辈和同行们撰写的书籍和期刊论文

资料，在此一并表示衷心的感谢。

书中如有不当之处，诚请读者批评指正，并欢迎来函指导。

陈洪章

2006年1月于北京市中关村北二条1号(100080)

中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室

E-mail: hzchen@home.ipe.ac.cn

目 录

第 1 章 蒸汽爆碎技术原理	1
1.1 概述	1
1.1.1 蒸汽爆碎技术的特点	1
1.1.2 蒸汽爆碎技术的主要内容	2
1.1.3 蒸汽爆碎技术的进展与发展趋势	3
1.1.4 蒸汽爆碎的应用领域	7
1.2 蒸汽爆碎技术基础	8
1.2.1 固体多组分物料结构	8
1.2.2 汽相蒸煮物理化学变化	9
1.2.3 蒸汽爆碎过程	11
1.2.4 蒸汽爆碎能耗	11
1.3 蒸汽爆碎处理方式	13
1.4 影响蒸汽爆碎的主要因素	14
1.4.1 纤维原料的种类及来源	15
1.4.2 预浸处理	15
1.4.3 汽爆压力和维压时间	34
1.4.4 爆碎后纤维的后处理方式	38
1.5 蒸汽爆碎的原料形态特性	38
1.5.1 汽爆麦草	38
1.5.2 汽爆玉米秸秆	47
第 2 章 蒸汽爆碎技术工艺及其技术集成	51
2.1 蒸汽爆碎技术工艺过程	51
2.2 Iotech 工艺	51

2.3 Stake 工艺	53
2.4 无污染工艺	59
2.5 汽爆工艺的技术集成(生物炼制)	61
2.5.1 生物炼制的概念	61
2.5.2 生物炼制研究情况	62
2.5.3 生物质原料问题	65
2.5.4 工艺过程经济学问题	66
第3章 蒸汽爆碎技术相关设备	70
3.1 切断除尘设备	70
3.1.1 刀辊式切草机	70
3.1.2 秸秆打包机	80
3.1.3 秸秆散包机	87
3.1.4 螺旋输送机	88
3.1.5 浸洗预处理设备	91
3.2 脱水设备	92
3.2.1 双网挤浆机	92
3.2.2 辊筒脱水装置	93
3.2.3 压榨式脱水机	95
3.3 汽爆设备	96
3.3.1 蒸汽发生器	96
3.3.2 汽爆反应器	107
3.3.3 接收器	114
第4章 蒸汽爆碎木质纤维素的生态产业化开发过程	115
4.1 木质纤维素蒸汽爆碎原理	115
4.1.1 纤维素预处理	116
4.1.2 纤维素原料组分分离技术评价标准	119
4.1.3 纤维素原料组分分离的工艺过程	121
4.1.4 纤维素原料组分分离经济分析	122
4.1.5 结论	123

4.2 固相多组分物料生态产业化开发实例	123
4.2.1 秸秆分级制备再生纤维素及短纤维酶解产业化 开发	123
4.2.2 大麻纤维综合开发技术研究	126
第5章 蒸汽爆碎技术的应用	131
5.1 麻纤维加工	131
5.1.1 大麻纤维	131
5.1.2 剑麻纤维	141
5.2 化纤工业	145
5.2.1 汽爆纤维素制备	145
5.2.2 汽爆麦草的离子液体溶液流变性能	152
5.3 蛋白纤维加工	159
5.3.1 蚕茧加工	159
5.3.2 废弃皮革加工	161
5.4 中草药加工	162
5.4.1 麻黄空气蒸汽耦合汽爆碎壁及麻黄碱的提取	162
5.4.2 灵芝蒸汽爆碎工艺及应用	168
5.5 果蔬加工	170
5.6 海产品加工	171
5.6.1 虾蟹壳	171
5.6.2 海藻	174
5.7 烟草加工	175
5.8 生物质能工业	177
5.8.1 汽爆秸秆发酵生产燃料酒精	178
5.8.2 纤维素发酵生产燃料氢气	190
5.8.3 纤维素发酵燃料沼气	191
5.9 造纸工业	193
5.9.1 木材纤维蒸汽爆碎制浆	193
5.9.2 非木材纤维爆碎法制浆	197
5.9.3 汽爆脱墨	203

5.10	粮食深加工	208
5.11	粗饲料加工	209
5.12	有机肥料加工	215
5.13	环保吸附材料加工	218
5.13.1	汽爆秸秆处理含 Cr(VI) 废水	218
5.13.2	汽爆玉米秸秆吸附分离乙醇的研究	222
5.14	固体废弃物处理——固体垃圾蒸汽爆碎工艺	227
5.14.1	固体垃圾蒸汽爆碎过程	227
5.14.2	汽爆处理垃圾后厌氧消化过程	228
5.15	可降解材料加工	229
5.15.1	国内外利用秸秆生产生态环境材料现状	230
5.15.2	利用秸秆生产生态环境材料市场分析	231
5.15.3	利用秸秆生产生态环境材料工艺流程	233
参考文献		235

第 1 章

蒸汽爆碎技术原理

1.1 概述

1.1.1 蒸汽爆碎技术的特点

蒸汽爆碎（简称“汽爆”）预处理是近年来发展起来的一种预处理方法。原料用蒸汽加热至 $180\sim 235^{\circ}\text{C}$ ，维压一定时间，在突然减压喷放时，产生二次蒸汽，体积猛增，受机械力的作用，其固体物料结构被破坏。

蒸汽爆碎技术最早始于 1926 年，当时为间歇法生产，主要是用于生产人造纤维板。从 20 世纪 70 年代开始，此项技术也被广泛用于动物饲料的生产和从木材纤维中提取乙醇和特殊化学品。80 年代后，此项技术有很大的发展，使用领域也逐步扩大，出现了连续蒸汽爆碎法生产技术及设备，即加拿大 Stake Technology 公司开发的连续蒸汽爆碎法工艺及设备，并产生许多专利。80 年代后期，Stake Technology 公司，将此项技术应用于制浆造纸领域，它与加拿大魁北克大学共同研究，首先对杨木、后对许多非木材纤维原料进行了大量的蒸汽爆碎试验，取得了很好的效果。在此基础上，开发研制了蒸汽爆碎制浆技术和设备，并在制浆废液用于生产动物饲料技术方面也有深入的研究。

蒸汽爆碎的几个优点可归纳如下：①可应用于各种植物生物质，预处理条件容易调节控制；②半纤维素、木质素和纤维素三种组分会在三个不同的流程中分离，分别为水溶组分、碱溶组分和碱不溶组分；③纤维素的酶解转化率可达到理论最大值；④经过蒸汽

爆碎处理后的木质素仍能够用于其他化学产品的转化；⑤半纤维素产生的糖可以被全利用，转化为液体燃料；⑥汽爆过程中产生的发酵抑制物可通过控制汽爆条件而大大降低。该预处理方法适用于硬木、软木、农业废弃物，如蔗渣、麦草、稻草、玉米秸秆和其他非纤维素原料等各种植物生物质，而且正在这方面发挥越来越大的作用。

汽爆的缺点是：原料经汽爆后相对密度降低，体积增大，产生的发酵抑制物需要水洗去除。

1.1.2 蒸汽爆碎技术的主要内容

蒸汽爆碎技术应用领域不断扩大，其研究内容也不断扩大。蒸汽爆碎技术的实施要有相应的配套设备，因此蒸汽爆碎设备的研发是该技术的主要研究内容之一，性质相似的原料可通用相同的设备，对某些特殊的原料则需要特殊的汽爆设备。

由于所有蒸汽爆碎工艺的共同点是短时蒸煮和高压爆碎，因此蒸汽爆碎过程的原理是所有工艺的共同研究内容。不同物料的结构和性质不同，在处理中的变化不一致，因此物料汽爆前后的具体变化也是蒸汽爆碎技术的主要研究内容之一。如对蒸汽爆碎法制浆主要研究不同制浆原料，包括不同软木、不同硬木、不同秸秆、废纸等的预浸处理工艺（添加或不添加化学试剂、添加化学试剂的量、预浸时间、温度、压力等），不同原料的蒸汽爆碎过程（蒸汽压力、温度、维压时间、动力学研究等），不同原料蒸汽爆碎前后的变化和蒸汽爆碎的机理（包括原料纤维的聚合度、结晶度、超微结构如纤维骨架的变化、胞间层分离状况、半纤维素和木质素的变化、各种化学连接键的断裂和形成等），不同原料蒸汽爆碎后的制浆效果（包括纸浆的得率、强度、可漂性等）以及不同原料蒸汽爆碎处理的经济性分析。蒸汽爆碎技术的研究内容除了上述的共性研究外，会随不同的用途有所侧重，如对蒸汽爆碎法制备饲料，则主要是研究饲料汽爆前后的毒性、适口性、可消化性、经济性；对于蒸汽爆碎法预处理发酵固体物料，则主要研究汽爆前后物料的发酵效果、发酵动力学变化和原因分析等。

总之, 蒸汽爆碎技术应包括不同固体物料蒸汽爆碎作用原理及其组分分离机制、固体物料蒸汽爆碎工艺、蒸汽爆碎固体物料的应用和蒸汽爆碎设备等。

1.1.3 蒸汽爆碎技术的进展与发展趋势

蒸汽爆碎技术最早由 Mason 发明并用于制浆过程, 称为 Masonite 法。他采用蒸汽作为操作流体, 在压力 6.9MPa 和温度 558K 时把废材变成适合生产建筑纸板的纸浆。目前蒸汽爆碎技术用于制浆已经工业化, 成为该技术应用最广, 研究最为深入的一个领域。

在 Masonite 工艺基础上, 人们对蒸汽爆碎制浆进行了大量的改进。其中的 Stake 和 Kokta 方法都是先预浸物料 (这一点是 Masonite 工艺所没有的), 然后在高温高压下短时汽蒸, 最后爆碎。不同之处是, 前者在更高的压力 (后期压力约 3MPa) 下连续爆碎作业 (每 4min 喷放一次), 木质素处于流动状态, 有利于纤维分离。值得指出的是, 迄今为止 Stake 工艺 (如图 1-1 所示) 发展最为成熟, 它涉及半纤维素自动水解概念, 即木材一经蒸煮, 其中半纤维素水解形成有机酸游离出来并对木材主要组分的分级起催化作用。

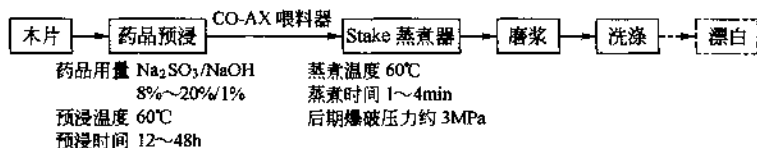


图 1-1 Stake 工艺流程

其他重要的爆碎工艺还有 Iotech 和 Siropulper, 它们主要用于木材利用的前处理。短时蒸煮, 高压爆碎是所有工艺的共同点, 也是蒸汽爆碎技术制浆不同于其他制浆方法的地方。目前除了采用蒸汽和惰性气体加压的工艺外, 有些研究还采取了别的一些加压方式, 如注入 SO_2 、 NH_3 或 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 等, 都取得了良好的效果。

蒸汽爆碎技术引向纸浆生产和废纸处理后的研究成果极其令人注目。以蔗渣、稻草、麦草、玉米秸秆、麻皮/杆、竹子和废纸脱墨为对象的研究表明,草类爆碎浆得率高、强度好、能耗低。蔗渣爆碎浆强度较好,磨浆能耗与化学机械浆(CMP)相当但比化学预热机械浆(CTMP)多,得率(71.7%)和白度较低,但漂白性能良好。蒸煮温度或压力对浆料得率和裂断长影响较大但对撕裂度影响甚小。非木材浆得率较低的原因,Mamers等认为是洗涤损失。Kokta等对阔叶木、针叶木和它们的混合材料进行了爆碎浆的大量研究。试验多数用 Na_2SO_3 作为主要预浸药剂在Stake-tech间歇反应器中进行,温度范围是 $190\sim 200^\circ\text{C}$,其中还包括 N_2 加压和半工业化试验。主要结论归纳如下:爆碎浆得率高(90%以上),与常规化学机械浆比较,强度性能良好,接近KP浆(kraft pulp,硫酸盐浆),磨浆能耗更低(减少40%~60%),白度和不透明度稍低,但漂白性能良好而且返黄率低。

对于蒸汽爆碎浆显著提高纸浆强度并降低磨浆能耗的结论,Kokta的解释是,用高于木质素软化点($153\sim 186^\circ\text{C}$)的温度和高压处理木片令其软化后再爆碎解离,一方面有利于达到同一游离度时降低能耗,另一方面磨浆能耗降低,切断减少,有助改善浆的质量。Chaudhuri的研究也支持这个观点。但是,Law关于黑云杉爆碎浆的研究却得出了不同结论:蒸汽爆碎后纤维从胞间层分离且无明显损伤,只有在较高的温度($>200^\circ\text{C}$)和较长的蒸煮时间(9min)下,爆碎浆的磨浆能耗和强度性能才有可能显示出优越性。由此引发了一场关于“黑云杉是否适合爆碎制浆”的争论。Law等人后来的研究又认为,蒸汽爆碎处理并不能使纤维分离,纤维束的形成只不过是喷放口和收集槽机械碰撞作用于高度软化木片的结果;与常规化学机械浆比较,爆碎浆撕裂度增加,但磨浆能耗并不降低,得率也下降。Heitner也得到了类似结论,一致否认了爆碎浆与常规CMP/CTMP比较能耗大减和质量剧增一说。Heitner还认为爆碎浆磨浆能耗仅是得率的函数,这一点同Kokta认为的磨浆能耗是但不仅是得率的函数的试验结论又相抵触。争论

促进了对蒸汽爆碎技术在制浆方面更细致的研究。人们发现在高温($>200^{\circ}\text{C}$)汽蒸过程中,水解速度较磺化速度更快以致很难保持90%以上的高得率;相同得率下,汽爆浆比CMP离子含量低得多,或者说离子含量相当时,爆碎浆得率较低。Heitner和Law甚至还认为,只有当浆中总离子含量达到 $150\sim 180\text{mmol/kg}$ 时,化学处理对CMP和爆碎浆浆料性能影响的差别才比较明显;无论是阔叶木还是针叶木,浆中总离子含量越低,磨浆阻力越大。

但是,研究者早已在预浸处理问题上达成一致,从理论上讲,主要预浸药剂 Na_2SO_3 既起到抗氧化作用,又磺化木质素使纤维表面亲水基团数量增加;添加少量 NaOH 既有助于木片润胀,又能避免或减轻酸性水解的发生,因此 $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}$ 的预浸匹配是合理的。蒸汽爆碎技术在制造预水解浆和木材综合利用方面受到的重视和起的作用越来越大。

蒸汽爆碎技术已经广泛用于动物饲料加工,尤其是草食动物粗饲料的加工。刘东波等用小鼠对汽爆秸秆的饲用安全性进行测试,通过急性毒性试验、小鼠骨髓细胞微核试验、小鼠骨髓细胞染色体畸变试验和鼠伤寒沙门菌营养缺陷回复突变试验证明,秸秆汽爆后安全无毒,可以作为动物饲料,消化率大大提高,汽爆后产生的寡聚糖可以作为动物肠道有益菌双歧杆菌和乳酸杆菌的碳源和生长因子,可促进动物肠道有益菌群的增殖,阻止病原菌定植,刺激免疫反应,增强动物免疫机能,具有益生素的功能。目前利用蒸汽爆碎技术加工动物饲料已经达到工业化。

利用蒸汽爆碎技术处理秸秆后,进行同步糖化发酵制备燃料酒精,已经成为目前研究的主要内容之一。秸秆经过蒸汽爆碎之后,其酶解率可达 $80\%\sim 90\%$,比未经汽爆的秸秆酶解率提高了 $60\%\sim 70\%$ 。

蒸汽爆碎法处理木质纤维原料的机理既是研究的重点,又是研究的难点。植物纤维原料主要是由纤维素、半纤维素和木质素构成。研究表明,半纤维素在汽爆过程中迅速水解为低分子酸类碎片,木质素在高温高压下软化并发生一定程度的降解,纤维素则较

少降解并保持其结晶性。稻麦草、蔗渣和杨木爆碎浆纤维形态和表面结构的电镜观察认定,纤维在胞间层分离,纤维骨架发生了润胀,并且木质素溶解后在纤维表面发生凝聚和再分布。木质素降解主要是由 β -O-醚键的均裂造成的,定量化分析表明,木质素结构中60%的 β -O-醚键在汽蒸中发生断裂,其中包括羟基的减少,羰基、 α 、 β -不饱和键和C—C键的形成。在纤维素超微结构方面,X射线衍射和核磁共振(NMR)对比研究表明,纤维素结晶度和微细纤维宽度都明显增加,这可能是纤维素分子重新定向排列导致无定形区转化的结果。

上述大多是针对木材,仍然是先用化学药品预处理木片,再进行爆碎。这样,仍然需加入大量化学药品,造成环境污染。

笔者基于秸秆与木材化学组成和结构的差异,提出对秸秆不加任何化学药品的低压汽爆技术。利用汽爆技术开发出了清洁制浆、大麻清洁脱胶、秸秆制备腐殖酸和活性低聚木糖等一系列创新方法,并研制出 3m^3 和 5m^3 具快开门口的汽爆罐,申请了多项国家发明专利。由于汽爆过程中不添加任何化学药品,消除了污染源;在汽爆过程中所降解的半纤维素,可使之资源化,生产高附加值的双歧生长因子。因此,从根本上解决了汽爆的污染问题,大幅度降低了生产成本。目前无污染汽爆技术在秸秆综合利用、烟草加工、造纸工业、中草药提取和麻纤维清洁脱胶等行业应用前景广阔。

另外,天然固体物料一般是多组分混合或按照一定结构组成物料,也称为固相多组分物料。包括木质纤维素原料(木材、秸秆)、动物废弃物(废弃羊毛、皮革碎料等)、中草药原料、丝茧、固体垃圾等。如要清洁利用这些固相多组分物料,必须从原料结构组分清洁分离入手,才能实现这些物料循环高效利用,单一利用其中一种组分,其他组分不能有效分离,就会造成二次环境污染问题。蒸汽爆碎技术是通过汽相蒸煮、机械分离来完成的,它可实现固相多组分物料的清洁经济分离,在木质纤维素原料、动物废弃物、中草药原料、丝茧、固体垃圾等处理中得到有效利用。

1.1.4 蒸汽爆碎的应用领域

蒸汽爆碎技术经过几十年的研究,已逐渐发展到不同国家,用于不同原料的预处理上,并应用于不同领域。

在制糖业中,蒸汽爆碎技术用于生产木糖和木糖醇,可大大简化糖液净化操作。在造纸业中应用最为广泛,与目前广泛应用的化学预热机械浆(CTMP)和化学机械浆(CMP)等制浆方法相比,蒸汽爆碎制浆具有能耗低、污染低、得率高的优点。在饲料行业中,蒸汽爆碎处理的植物纤维可作为反刍动物和大猪的饲料,可大大提高饲料的消化率,并且能增加动物的采食量。在建材业上,蒸汽爆碎处理干法制天然纤维板与传统纤维板制造工艺比较,可大大缩短工艺过程,降低生产成本。汽爆后的木材纤维束(WFB)对水泥水化和防止混合物完全固化,有较强的阻滞作用。糖分析显示,爆碎 WFB 的糖含量高于未爆碎的木材,比气干的和水浸泡过的木材分别增加 20 倍和 10 倍。分解的多聚糖成为主要因素,在抑制水泥固化中扮演重要的角色。因此,高性能的液体色谱分析证明爆碎的 WFB 萃取物中,多聚糖分子质量的主峰出现向低聚合范围漂移,氯化镁被确认为是制约抑制剂影响的化学添加剂,添加剂的用量为 2%~3%和 4%~5%可使水泥快速固化,4%氯化镁和 2%氧化钙的复合化学添加剂,有明显加速水泥固化的作用。

在我国,研究者在 20 世纪 80 年代也开始对蒸汽爆碎技术进行研究,并应用于制浆、饲料、发酵剂、木质纤维素原料预处理等领域。华南理工大学的詹怀宇、黄干强等分别对杨木、蔗渣、毛竹采用蒸汽爆碎技术制浆,并对汽爆纸浆进行了各种性能分析。北京林业大学的赖文衡、潘定如等对 3 种速生毛白杨、桦木、马尾松、麦草等的蒸汽爆碎处理作了研究,并探讨了影响爆碎功率的主要因素。中国科学院过程工程研究所的陈洪章、李佐虎等则对麦草、大麻、中草药、烟草等的蒸汽爆碎的处理作了研究,分析并探讨了蒸汽爆碎的过程和原理。还对汽爆麦草浆的性能、大麻的脱胶效果、中药有效成分的提取率等进行了研究。陈洪章等还利用蒸汽爆碎技

术以秸秆为原料制备低聚木糖，南京林业大学的洪枫、单谷等在这方面也作了尝试。浙江大学陈育如、南京化工大学欧阳平凯等则利用蒸汽爆碎技术处理麦草应用于微生物分解及无胶纤维板的制造。北京理工大学的邵自强采用蒸汽爆碎技术处理纯纤维素用于提高化学反应性能的研究。

蒸汽爆碎技术作为植物纤维预处理的一项新技术，随着研究的深入，相信在植物纤维的高效分离和纤维素预处理活化领域、固体废弃物处理等领域中，会得到更多的关注和更广泛的应用。

1.2 蒸汽爆碎技术基础

1.2.1 固体多组分物料结构

蒸汽爆碎技术多用于固体多组分物料的预处理，特别是木质纤维素原料。木质纤维素原料一般含有纤维素、木质素和半纤维素三大组分，约占固体物料总质量的 80%。对于秸秆，其中纤维素含量一般为 30%~35%，半纤维素含量一般为 25%~30%，木质素的含量一般为 10% 左右。对于木材，其中纤维素含量一般为 45%~50%，半纤维素含量一般为 10%~20%，木质素的含量一般为 25%~30%。除三大类组分外，固体物料还含有蛋白质、脂类、灰分、水分、果胶、低分子的碳水化合物等。其中秸秆的灰分含量一般在 5% 以上（稻草的灰分含量高达 15%），灰分中 60% 以上为二氧化硅；木材的灰分含量一般在 1% 以下，多数为 0.3%~0.5%（对绝干原料）。

纤维素是不溶于水的均一聚糖，由葡萄糖基通过 β -1,4-葡萄糖苷键连接起来的链状高分子化合物（如图 1-2 所示）。纤维素分子常排列在一起以聚集态存在，其中一部分排列比较整齐，有规则，呈现清晰的 X 射线图，这部分称结晶区，排列不整齐，较松弛的部分称无定形区，纤维素的晶体结构常阻碍纤维素的降解。半纤维素是由两种或两种以上的单糖基组成的不均一聚糖，大部分带有短