

Review on Steam Explosion Technology and Equipments

Key Point of Pretreatments for Cellulosic Fuel Ethanol Production

Wenchang Zhuang, Yuxiao Wang*, Xiaochen Bian, Yiting Sun

Xuzhou Engineering Research Center of Bio fuel, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, Jiangsu, China, 221008

Email: wangyuxiao@xzit.edu.cn

Abstract: The straw pretreatment is the key limited factors for commercial production of fuel ethanol as one of the most important renewable energy in the world. In recent years, steam explosion as one of effective lignocellulose material pretreatment technology achieves more and more attention at home and abroad. This paper reviews its principle, impact factors and research progress. Furthermore, steam explosion machines are also introduced in detail.

Keywords: straw pretreatment; fuel ethanol production; steam explosion; renewable energy

蒸汽爆破技术和设备研究进展

木质纤维素燃料乙醇生产的预处理关键技术

庄文昌, 王欲晓*, 卞晓晨, 孙怡婷

徐州工程学院徐州市生物质燃料工程技术研究中心, 江苏徐州, 中国, 221008

Email: wangyuxiao@xzit.edu.cn

摘要:以秸秆为原料生产燃料乙醇是世界范围内可再生能源的发展方向, 预处理是影响其工业化生产的关键因素之一, 而蒸汽爆破是近几年国内外广为瞩目的木质纤维素原料预处理技术。本文综述了该技术的作用原理、影响因素与发展, 并对该技术的关键设备——蒸汽爆破机进行较详细的介绍。

关键词: 秸秆预处理; 燃料乙醇生产; 蒸汽爆破; 可再生能源

1 引言

随着全球经济的快速发展, 以石油、天然气、煤炭为代表的化石能源日益枯竭, 新能源和可再生能源为能源供给提供了重要选择, 有助于在能源需求和环境保护之间寻求平衡。植物纤维具有天然、可再生等特性, 其主要成分为纤维素、半纤维素和木质素, 研究表明利用水解技术可以将其中的纤维素和半纤维素转化为单糖, 并可进一步发酵生产燃料乙醇这种绿金能源^[1]。

农业秸秆中含有大量植物纤维, 我国每年产生的农作物秸秆约为 7.0 亿吨, 相当于 3.0 亿吨标准煤, 但其中 2/3 因缺乏相应的技术和设备而废弃或焚烧, 秸秆预处理技术成为限制其高值化利用的瓶颈^[2-4]。预处理的主要作用是将秸秆外层的木质素破坏掉, 并使其中的纤维素、半纤维素发生一定程度的水解。传统的化学方法如酸法、碱法、氧化法等污染比较严重^[5], 生物酶处理效率低成本高^[6], 近几年蒸汽爆破技术由于具有低成本、

绿色环保等优点, 并可有效地回收半纤维素, 已成为国内外广为瞩目的木质纤维素预处理技术^[7-9]。

2 蒸汽爆破作用机制

植物细胞中的纤维为木素所粘结, 与高温、高压蒸汽作用下, 纤维素结晶度提高, 聚合度下降, 半纤维素部分降解, 木素软化, 横向连结强度下降, 甚至软化可塑, 当充满高压蒸汽的物料骤然减压时, 孔隙急剧膨胀, 产生“爆破”效果, 可部分剥离木质素, 并将原料撕裂为细小纤维, 如图 1 所示。

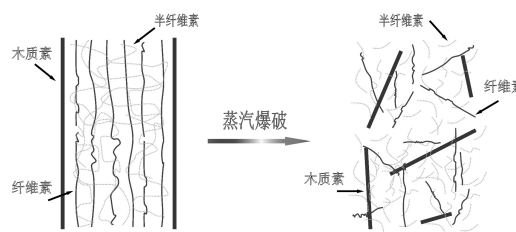


Figure 1. Schematic conversion of lignocelluloses in steam explosion process

图 1 蒸汽爆破过程中木质纤维变化示意图

资助信息: 徐州工程学院青年科研基金 (XKY2008213) 资助项目

蒸汽爆破主要在高压条件下用高温水蒸汽蒸煮纤维原料，并通过瞬间泄压过程实现原料的组分分离和结构变化。可以认为，在蒸汽爆破过程中存在以下几方面作用^[10]：

① 酸性水解作用及热降解作用：蒸汽爆破过程中，高压热蒸汽进入纤维原料中，并渗入纤维内部的空隙。由于水蒸汽和热的联合作用产生纤维原料的类酸性降解以及热降解，低分子物质溶出，纤维聚合度下降。

② 类机械断裂作用：在高压蒸汽释放时，已渗入纤维内部的热蒸汽分子以气流的方式从较封闭的孔隙中高速瞬间释放出来，纤维内部及周围热蒸汽的高速瞬间流动，使纤维发生一定程度上的机械断裂。这种断裂不仅表现为纤维素大分子中的键断裂，还原基增加，纤维素内部氢键的破坏，还表现为无定形区的破坏和部分结晶区的破坏。

③ 氢键破坏作用：在蒸汽爆破过程中，水蒸汽渗入纤维各孔隙中并与纤维素分子链上的部分羟基形成氢键。同时高温、高压、含水的条件又会加剧对纤维素内部氢键的破坏，游离出新的羟基，增加了纤维素的吸附能力。瞬间泄压爆破使纤维素内各孔隙间的水蒸汽瞬间排除到空气中，打断了纤维素内的氢键。分子内氢键断裂同时纤维素被急速冷却至室温，使得纤维素超分子结构被“冻结”，只有少部分的氢键重组。这样使溶剂分子容易进入片层间，而渗入的溶剂进一步与纤维素大分子链进行溶剂化，并引起残留分子内氢键的破坏，加速了葡萄糖环基的运动，最后导致其它晶区的完全破坏，直至完全溶解。

④ 结构重排作用：在高温、高压下，纤维素分子内氢键受到一定程度的破坏，纤维素链的可动性增加，有利于纤维素向有序结构变化。同时，纤维素分子链的断裂，使纤维素链更容易再排列。

3 影响蒸汽爆破的关键因素

3.1 蒸汽爆破前的预浸处理

预浸处理主要目的是提高木质纤维原料中水蒸汽的渗入强度，软化纤维，减少蒸汽爆破的处理强度和还原糖的降解，提高汽爆后固相中的纤维素含量^[11, 12]。

预浸处理试剂主要有酸液、碱液和水。在蒸汽爆破过程中添加 H_2SO_4 或 SO_2 可以有效地促进酶法水解，降低阻碍水解的化合物的生成。甘蔗渣在 220°C ，1%的 H_2SO_4 中处理 30s 后 100 g 甘蔗渣可生成 65.1g

糖^[13]。在碱液中预浸，可使纤维素发生较程度的润胀，纤维素新羟基的形成可以提高对水的吸附。剑麻纤维经过 1%的 NaOH 处理，在 3.71 的爆破强度（3.71 为处理强度指数 $\log R^0$ ，表示时间与温度的对数函数关系）下，木质素含量为 11.21%，纤维素含量为 78.71%^[14]。水也是一种润胀剂，一些非纤维素组分可溶于水。经水浸泡后在 3.71 的爆破强度下，木质素含量为 9.71%，纤维素含量为 78.10%^[14]。

但是预浸处理可能会降低最终的乙醇产率，这主要是由于加入水分会降低传质效率和反应速度。众所周知，液体不可压缩，只有气体才可压缩。若被爆物经浸泡蒸煮导致含水率过高时，植物细胞空隙被液态水充盈，从而影响气体进入植物组织的量，由于汽爆物内部缺乏气体膨胀介质，使得汽爆物无能量汽支持，好比炸弹未装火药或装药量不足，因此不能实现汽爆能量高效转换^[15]。此外，预浸也会对汽爆后液相中还原糖的分布有一定的影响^[16]。

3.2 蒸汽爆破过程的压力与持压时间

汽爆压力和持压时间是影响蒸汽爆破的重要因素。利用高压饱和蒸汽对木质纤维进行预处理，能够增大残留固相物的内孔面积，使大部分半纤维素发生自水解。选择合适的保压时间，则对预处理的效果有着直接的影响。

对于木质纤维，蒸汽爆破典型的反应条件为 0.69~4.83 MPa（相应温度为 $160\sim 260^\circ\text{C}$ ），作用时间为几秒或几分钟^[17]。张德强等^[18]利用蒸汽爆破法进行预处理，当爆破压力由 1.5 MPa 升至 2.5 MPa，纤维素相对含量由 50.7%升至 67.6%，其产物作为培养基，纤维素酶活力也逐渐增加；再升高压力至 2.7 MPa，纤维素相对含量降至 44.2%，对应的纤维素酶活力也降低。孙智谋^[19]研究发现，蒸汽爆破有利于除去稻秆中的木质素，最有效地蒸汽爆破条件是 3.5 MPa、2 min。Overend 等^[20]对木质纤维原料的蒸汽爆破预处理做了大量研究后，以汽爆压力和保压时间为参数，建立了经验数学模型来确定蒸汽爆破的程度，对于任意给定的预处理条件，可计算其效果。

对于同样的爆碎程度，随着压力升高，处理时间大为缩短，以玉米秸秆为例，其预处理结果如表 1。从数据中可以看出，蒸汽爆碎具有短时间实现预处理效果的特点，这对于防止物料变性，产生其他醛类或酸性物质具有显著意义，也极大降低了工业生产的单

位能耗、减少了汽爆产物的污染程度。对蒸汽爆破的研究表明, 相对的低压和较长的保压时间有利于秸秆中纤维素、半纤维素的水解, 但会相应提高汽爆产物的污染程度, 因此选择合适的汽爆压力与保压时间, 从中找到其协同效应的最佳状态, 是进入工业化生产的重要指标^[21]。

Table 1. Impact of steam pressure and holding time for straw pre-treatment

表 1. 汽爆压力与保压时间对预处理结果的影响^[21]

压力 /MPa	保压时间 /s	处理结果	
		出料 pH	COD mg·L ⁻¹
3.5	8	6.5	450
3.0	15	6.3	546
2.5	60	6.0	775
2.0	210	5.8	790

3.3 蒸汽爆破的处理方式及其特点

蒸汽爆破的处理方式可以分为间歇式处理、连续式处理和液相处理 3 种^[22]。间歇式处理是指物料投入密闭反应器后, 依次经过高温高压、骤然爆破的处理, 在此期间不另进行投料, 一批物料处理完毕之后再重新投料。连续式处理是指物料以一定的速度不间断地投入汽爆反应装置, 经过处理后以一定的速度排除, 从而使整个反应器中的物料保持恒定。液相处理则是先将原料粉碎至 1 mm 以下的颗粒, 加水调至浆状, 再通过均质机高压阀进入反应器, 汽爆后物料排出。

间歇式处理成本较低, 设备简单, 目前为实验室和小型工厂广泛采用, 但这种技术无法保证每次汽爆后得到产物的爆破程度相同, 容易导致原料中包埋纤维素、半纤维素的木质素无法破坏, 降低乙醇产量, 并且单位时间原料处理量低, 不利于生产效率的提高。

连续式处理可以使全部原料连续的在稳定的汽爆条件下充分吸收水气, 在泄压时充分破坏木质素鞘, 可有效提高乙醇的产量, 单位时间处理量大, 有利于生产效率的提高, 但设备价格昂贵。

而液相处理需要先对物料进行粉碎, 能耗较高, 处理后物料的含水量大, 容易产生水污染等问题^[23]。

3.4 爆破后的脱毒处理

经蒸汽爆破后的水解物中除了可发酵糖外, 还存在弱酸、呋喃、酚类衍生物等, 这些物质都可能对后续的纤维素酶解和酵母菌发酵产生抑制作用, 因此需

要对这些抑制物进行脱毒处理。

目前对抑制物进行脱毒处理主要采用生物、化学和物理方法。Palmqvist 等^[24]将蒸汽爆破后的原料用里氏木霉进行同步脱毒和纤维素酶生产, 大部分的抑制物在里氏木霉发酵产酶过程中被消耗, 后续的乙醇产量也得到提高。化学方法主要是采用氧化的方式破坏有机抑制物的结构, Oliva^[25]利用 Fenton 反应 $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + 2OH^-$, 产生羟基自由基对蒸汽爆破后的液相抑制物进行脱毒, 主要抑制物的脱除率可高达 90%。溶剂萃取或抽提等物理技术也是进行脱毒的重要方法, 张红漫等^[26]利用乙醇对不同类型的抑制物均具有广泛的亲和力, 且毒性小、易于回收的特点, 采用抽提的方法对抑制物甲酸和乙酸的抽提率可达到 84%和 98%。

4 现有蒸汽爆破设备及其发展方向

蒸汽爆破的技术本质是将渗进植物组织内部被压缩的气体短时间突发性释放完毕, 目的是用较少的能量将原料分解。蒸汽爆破设备是将容器内的原料在毫秒级的时间范围内, 以炸散的形式悬在大气空间。由于其作用时间短, 能量密度高而且集中, 蒸汽分子可以渗透到纤维素与木质素等大分子之间, 可充分的在大分子水平上将物料分解。根据汽爆处理方式的不同, 现有汽爆设备主要分两类: 间歇式与连续式^[27]。

4.1 现有蒸汽爆破设备的特点

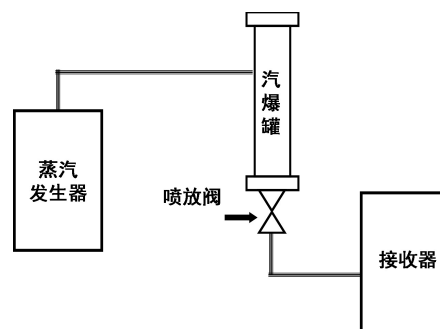


Figure 2. Schematic diagram of intermittent equipment for steam explosion

图 2 间歇式蒸汽爆破设备示意图

4.1.1 间歇式蒸汽爆破设备

间歇式设备主要包括汽爆罐和喷放阀两部分, 其结构如图 2 所示。工作时先将物料装入汽爆罐, 关闭阀门, 保压一段时间后, 快速打开罐体底部的喷放阀,

在短时间内实现罐体内的高压蒸汽夹带物料喷出。中国河南省鹤壁正道重机生产的 QBS-80 分析型蒸汽爆破设备以液化气为加热源，每次处理量为 400 mL，最大压力 12Mpa，由于能在能在 0.00875s 的时间内完成压力的释放，破坏秸秆的内部结构，从而达到木质素与纤维素、半纤维素分离的目的。间歇式设备成本较低，因而主要用于实验室研究，但其不能实现自动、

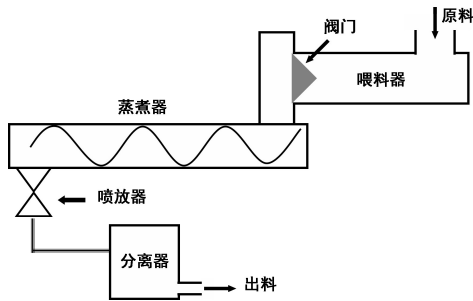


Figure 3. Schematic diagram of continuous equipment for steam explosion

图 3 连续式蒸汽爆破设备示意图

连续生产，很难在工业化生产中得到应用。

4.1.2 连续式蒸汽爆破设备

能实现连续生产且出料质量稳定的连续式汽爆设备主要包括喂料器、蒸煮器、喷放器和分离器四部分，如图 3 所示。工作时切碎的物料经螺旋传输进入喂料器并形成料塞，然后以一定的速度在蒸煮器中移动进行蒸煮搅拌，使物料在高温蒸汽下变软，到达蒸煮器末端的喷放阀后蒸汽夹杂物料间歇喷出，压力瞬间释放破坏物料内部结构，最后将纤维素、半纤维素和木质素进行分离^[28]。

目前被世界范围广泛使用的连续汽爆设备多为加拿大桑普达公司生产^[28]，这类设备蒸煮器内的水分含量不易控制，从而影响出料的质量；喷放阀容易磨损，阀门的使用寿命大大缩短，一般使用周期为一个月；物料难于实现瞬间喷放，不能达到真正意义上汽爆的要求；喷放过程中蒸汽损失量大，造成耗能巨大。

4.2 蒸汽爆破设备的发展方向

随着科技的发展，爆破设备也被不断地改进和完善，连续式设备由于其连续的特性，成为蒸汽爆破工艺实现工业化的必然方向，在计算机控制下连续进料、间歇爆出的数控连续汽爆机日益受到人们的青睐^[12]。

针对加拿大桑普达公司生产的螺杆连续进料设备

防反喷技术耗能大、易磨损的缺点，新型设备大多采用静态汽悬式密封系统，无耗电，可将处于常压下的物料连续送进 4-10Mpa 蒸煮系统中，且无任何泄漏，工作寿命长；为控制蒸煮器中的物料水分，新设备的蒸煮器内不再通入蒸汽，其加热由外循环加热系统完成；在蒸煮器末端增加一个喷放器，并采用单腔小容积大爆出口的设计，爆腔容积一般不超过 0.02m³，进行高频率自动化无磨损机械连续引爆，从而改善原设备喷放阀磨损严重、蒸汽损失大的问题；可采用全不锈钢结构，既增加了结构强度，又避免了糖类有机物质与铁的化学反应。

改进后的数控全自动汽爆机预计可实现其爆出物料温度约为 20℃，其游离蒸汽在毫秒级范围内爆出时间内全部相变为水，无蒸汽逸出，完全符合工程热力学关于“爆”的物理概念。

5 结论与展望

蒸汽爆破预处理技术是目前秸秆预处理中研究与应用较为广泛的一种物理化学方法。利用这种技术可采用高密度装填，理论每吨秸秆用汽量为 1.67m³，当汽爆压力为 2Mpa 时，每吨原料耗蒸汽可仅为 160kg，其经济、节能的特点突出（比单纯机械磨碎法能耗降低 70%）。此外蒸汽爆破预处理技术还具有处理时间短、绿色环保等优点。

当然，蒸汽爆破预处理技术也存在一些不足之处，例如在汽爆过程中会造成木聚糖部分破坏、木素碳水化合物复合体的不完全破坏及阻碍微生物活性的化合物的产生；预处理后的木质纤维原料要经过洗涤以除去抑制物和水溶性半纤维素，一般情况洗涤会脱除 20%~25% 的绝干物质，导致整个多糖得率降低。这些都需要进一步研究汽爆压力、保压时间和预浸处理等因素对预处理效果的影响规律，改进工艺条件。此外，还需要建立一个以产率、耗能和设备磨损为基础的预处理方法评价标准，并寻求经济有效、后续污染小的脱毒方法，以此适应对不同木质纤维原料进行预处理的要求，以实现其工业化的大规模应用。

致 谢

衷心感谢徐州工程学院青年科研基金 (XKY2008213) 对本研究的资助。

References (参考文献)

- [1] Chen Hongzhang. Straw resources ecological high value theory and application [M]. Beijing: Chemical industry press, 2006.1-5.

- 陈洪章. 秸秆资源生态高值化理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 1-5.
- [2] Sun Yongming, Li Guoxue, Zhang Fudao. Status Quo and Developmental Strategy of Agricultural Residues Resources in China [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8), P169-173 (Ch).
孙永明, 李国学, 张夫道. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(8), P169-173.
- [3] Sun Zhengjun, Sun Yongming. Situation and Develop of Agricultural Residues as Energy Resource Utilization in Rural Areas in China[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(1), P6-13 (Ch).
孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能利用的现状与发展 [J]. *中国农业科技导报*, 2006, 8(1), P6-13.
- [4] Shi Lei, Zhao Youcai, Chai Xiaoli. Comprehensive Utilization Techniques Progress of Crop Straws in China [J]. *China Biogas*, 2005, 23(2), P11-14 (Ch).
石磊, 赵有才, 柴晓利. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能利用的现状与发展[J]. *中国沼气*, 2005, 23(2), P11-14.
- [5] Tang Weijun, Xiao Bo, Yang Jiakuan. Research Develop of Biomass Conversion Technology [J]. *Recycling Research*, 2003, 4, P30-32 (Ch).
唐卫军, 肖波, 杨家宽. 生物质转化利用技术研究进展 [J]. *再生资源研究*, 2003, 4, P30-32.
- [6] Lu Peng, Jiang tao, Li Guoxue. Key Points of Ethanol Fermentation of Lignocellulose and Resolving Methods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9), P237-240 (Ch).
路鹏, 蒋涛, 李国学. 木质纤维素乙醇发酵研究中的关键点及解决方案 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9), P237-240.
- [7] Cara Cristóbal, Ruiz Encarnación, Ballesteros Ignacio, J. Negro María and Castro Eulogio. Enhanced Enzymatic Hydrolysis of Olive Tree Wood by Steam Explosion and Alkaline Peroxide Delignification [J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41, P423-429.
- [8] Li Jiebing, Henriksson Gunnar, Gellerstedt Göran. Lignin Depolymerization/Repolymerization and Its Critical Role for Delignification of Aspen Wood by Steam Explosion [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(16), P3061-3068.
- [9] Ma Yinghui, Wang Lianjie. The Latest Research Progress of Pretreatment of Straw [J]. *Cellulose Science and Technology*, 2009, 17(3), P71-78 (Ch).
马英辉, 王联结. 秸秆预处理的最新研究进展 [J]. *纤维素科学与技术*, 2009, 17(3), P71-78.
- [10] Miao Shuangquan, Shao Ziqiang, Ma Fengguo, Miao Jianhe, Tan Huimin. Sisal Fibre Steam Blasting Research [J]. *Cellulose Science and Technology*, 2002, 10(1), P45-56 (Ch).
廖双泉, 邵自强, 马凤国, 廖建和, 谭惠民. 剑麻纤维蒸汽爆破处理研究 [J]. *纤维素科学与技术*, 2002, 10(1), P45-56.
- [11] Kang Peng, Zhen Zongmin, Dong Changqing, Yang Yongpin. Lignocellulose Steam Explosion Pretreatment Technology Research Progress [J]. *Renewable Energy*, 2010, 28(3), P112-116 (Ch).
康鹏, 郑宗明, 董长青, 杨勇平. 木质纤维素蒸汽爆破预处理技术的研究进展 [J]. *可再生能源*, 2010, 28(3), P112-116.
- [12] Luo Peng, Liu Zhong. Steam Explosion of Biomass as a Pretreatment for Conversion to Ethanol [J]. *Forestry Science and Technology*, 2005, 30(3), P53-56 (Ch).
罗鹏, 刘忠. 蒸汽爆破法预处理木质纤维原料的研究 [J]. *林业科技*, 2005, 30(3), P53-56.
- [13] Paul Morjanoff, P. Pisano Gary. Optimization of Steam Explosion as a Method for Increasing Susceptibility of Sugarcane Bagasse to Enzymatic Saccharification [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1987, 29, P733-14741.
- [14] Liao Shuangquan, Ma Fengguo. Study on Fractionation of Steam-exploded Sisal Fiber [J]. *Tropical Plants*, 2003, 24(3), P27-30 (Ch).
廖双泉, 马凤国. 蒸汽爆破处理对剑麻纤维组分分离的影响 [J]. *热带作物学报*, 2003, 24(3), P27-30.
- [15] Walter Kaar, Claudio Gutierrez. Steam Explosion of Sugarcane Bagasse as a Pretreatment for Conversion to Ethanol [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14(3), P277-287.
- [16] Francesco Zimbardi, Emmert Viola, Frank Nanna. Acid Impregnation and Steam Explosion of Corn Stover in Batch Processes [J]. *Industrial Crops and Products*, 2007, 26(2), P195-206.
- [17] Sheldon J. B. Duff, William D. Murray. Bioconversion of Forest Products Industry Waste Cellulosics to Fuel Ethanol: A Review [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 55(1), P1-33.
- [18] Zhang Deqiang, Huang Zhenya, Zhang Zhiyi. Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol by the SSF Process (I) ——Investigation of Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulose [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(6), P43-46 (Ch).
张德强, 黄振亚, 张志毅. 木质纤维生物量一步法(SSF)转化为乙醇的研究(I)——木质纤维原料蒸汽爆破预处理的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(6), P43-46.
- [19] Yang Changyan, Yang Xuemin, Lu Xuesong. Pyrolysis of Straw Obtained from Stagewise Treatment [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2005, 5(4), P379-383(Ch).
杨昌炎, 杨学民, 吕雪松. 分级处理秸秆的热解过程 [J]. *过程工程学报*, 2005, 5(4), P379-383.
- [20] Ralph P. Overend, Esteban Chorne. Fractionation of Lignocellulosics by Steam-Aqueous Pretreatments [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1987, 321, P523-536.
- [21] Jason D. Wright. Ethanol from Biomass by Enzymatic Hydrolysis [J]. *Chemical engineering progress*, 1998, 84(8), P62-74.
- [22] Yan Jun, Feng Lianxun. Study on Steam Exploded Technology [J]. *Modern Agriculture Science and Technology*, 2009, 11, P278-280(Ch).
闫军, 冯连勋. 蒸汽爆破技术的研究 [J]. *现代农业科技*, 2009, 11, P278-280.
- [23] Li Chunling, Jiang kairong. Cellulosic Ethanol Steam Explosion Pretreatment Methods of Research [J]. *Magnificent Writing*, 2010, 11, P165-166(Ch).
李春玲, 姜开荣. 纤维素酒精蒸汽爆破预处理方法的研究 [J]. *华章*, 2010, 11, P165-166.
- [24] Eva Palmqvist, Bärbel Hahn-Hägerdal, Zsolt Szengyel, Guido Zacchi, Kati Réczey. Simultaneous Detoxification and Enzyme Production of Hemicellulose Hydrolysates Obtained after Steam Pretreatment [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1997, 20(4), P286-293.
- [25] Javior M. Oliva, Paul Manzanares, Isa Ballesteros. Application of Fenton's Reaction to Steam Explosion Prehydroly -Sates from Poplar Biomass [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2005, 122(1-3), P887-899.
- [26] Qu Liang, Xu Yong, Zhang Hongman, Huang he, YingHanjie. Detoxification of Steam-exploded Lignocellulosic Material by Ethanol Extraction [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2010, 30(1), P22-26(Ch).
瞿亮, 徐勇, 张红漫, 黄和, 应汉杰. 蒸汽爆破木质纤维原料的乙醇脱毒研究 [J]. *林业化学与工业*, 2010, 30(1), P22-26.
- [27] Song Xianliang, Jiang Jianxin. The Research Progress of Pulping and Size of Steam [J]. *Process and technology*, 2007, 4, P17-19(Ch).
宋先亮, 蒋建新. 蒸汽爆破法制浆的研究进展 [J]. *工艺与技术*, 2007, 4, P17-19.
- [28] Sun Changzheng, Li Chunling, Xie Chenghua. Lignocellulose Steam Explosion Agent and the Status of Research [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2010, 31(1), P54-57(Ch).
孙长征, 李春玲, 解成华. 木质纤维素蒸汽爆破剂的现状及研究 [J]. *化工装备技术*, 2010, 31(1), P54-57.