

## 酸催化蒸汽爆破预处理提高蔗渣酶解性能研究\*

## Study of Acid-catalyzes Steam Explosion Pretreatment to Enhance the Enzymatic Digestibility of Sugar Cane Bagasse

卢波<sup>1,2</sup>, 经艳<sup>3</sup>, 蔡爱华<sup>2</sup>, 覃香香<sup>1</sup>, 周玉恒<sup>1</sup>, 林兰英<sup>2</sup>, 张厚瑞<sup>1\*</sup>LU Bo<sup>1,2</sup>, JING Yan<sup>3</sup>, CAI Ai-hua<sup>2</sup>, QIN Xiang-xiang<sup>1</sup>, ZHOU Yu-heng<sup>1</sup>, LIN Lan-ying<sup>1</sup>, ZHANG Hou-rui<sup>1\*</sup>

(1. 广西植物研究所, 广西桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541004; 3. 唐传生物科技(厦门)有限公司, 福建厦门 361012)

(1. Guangxi Institute of Botany, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China; 3. Biological Technology Company(Xiamen) of Tang Chuan, Xiamen, Fujian, 361012, China)

摘要: 采用常规蒸汽爆破以及酸催化蒸汽爆破对甘蔗渣进行预处理, 利用扫描电镜(SEM)对比观察这两种汽爆方法对残渣表面结构形态的影响, 对比分析汽爆液的糖类、汽爆残渣组分, 最后通过纤维素酶解试验评价汽爆残渣的酶解性能。结果表明, 常规蒸汽爆破和酸催化蒸汽爆破均能提高蔗渣原料的酶解性能, 但是常规蒸汽爆破需要在较高的处理压力(> 2.0 MPa)下才能明显水解半纤维素, 破坏纤维素的天然结晶结构, 显著提高蔗渣的酶解性能。酸催化蒸汽爆破只需很低的汽爆压力(0.7 MPa)就能充分水解蔗渣半纤维素, 而且对蔗渣纤维天然结构的破坏程度也要大得多, 残渣的酶解率达到49.1%, 比常规同一蒸汽爆破压力条件下的酶解率(25.1%)几乎高出一倍。酸催化汽爆残渣的酶解性能随汽爆压力的提高而改善, 从半纤维素到木糖的收率则随压力的升高而降低, 采取两步蒸汽爆破法, 将可以同时获得高的木糖收率和高的纤维素酶解效率。

关键词: 蒸汽爆破 盐酸 酶解性能 蔗渣

中图分类号: TQ92 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2009)04-0441-05

**Abstract** Conventional steam explosion and acid-catalyzes steam explosion were performed to the pretreatment of sugar cane bagasse. SEM were applied to observe the differences of appearance and structure between the residual solids through these two ways. The kinds of sugar in liquid phase and the components of residual solid were analyzed comparably, cellulase hydrolyzation was performed to evaluate the enzymatic cellulose digestibility of residual solid. The results showed that both of the two ways could enhance the enzymatic cellulose digestibility of the bagasse, but high presses (> 2.0 MPa) in conventional steam explosion pretreatment were necessary to cause the hydrolyzation of hemicellulose and the breakage of crude crystal structure of cellulose, and to enhance the enzymatic cellulose digestibility of sugar bagasse evidently. However, a lower steam pressure (0.7 MPa) in acid-catalyzes steam explosion pretreatment could cause the hydrolyzation of hemicellulose adequately and more breakage of crude crystal structure of cellulose, the enzymatic cellulose digestibility of the residue were up to 49.1%, which was near one time as much as 25.1% of conventional steam explosion in the same pressure. The enzymatic digestibility of residue pretreated by acid-catalyzes steam explosion was improved as the steam pressure increased, but

xylose yield from hemicellulose was reduced as the presses increased. The two-steps acid catalyzes steam explosion pretreatment, could obtain high xylose conversion levels from hemicellulose and high enzymatic cellulose digestibility of sugar cane bagasse synchronously.

**Key words** steam explosion, hydrolysis, enzymatic digestibility, sugar cane bagasse

收稿日期: 2009-03-23

修回日期: 2009-09-03

作者简介: 卢波(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事生物化学与微生物学研究工作。

\* 国家自然科学基金项目(2066602), 广西自然科学基金项目(0731033)资助。

\*\* 通讯作者。

蔗渣是甘蔗制糖工业的大宗副产物,绝干蔗渣的产量与蔗糖产量大致相当,具有量大而集中的优势。目前除部分甘蔗渣通过造纸得到合理利用外,大部分仍被用于燃料这种并不经济的方式消耗。因此,人们需要寻找能大规模合理利用蔗渣资源的新途径。在这方面,利用蔗渣制备可发酵性糖浆,进而发酵生产各种人类需要的化工产品,一直受到人们的关注<sup>[1,2]</sup>。

预处理 酶法水解是利用木质纤维素资源制备可发酵性糖浆的一条环保的工艺路线。天然状态下蔗渣的酶解效率一般不超过 10%<sup>[3]</sup>,只有对蔗渣原料进行有效预处理,破坏纤维素天然的结晶结构,去除木质素和半纤维素的保护作用,增加纤维素酶的及性和渗透性,才能提高蔗渣原料的酶解性能<sup>[4]</sup>。在木质纤维素原料众多预处理方法当中,蒸汽爆破法作为一种物理化学方法,以其能有效提高原料酶解性能等优点而备受瞩目<sup>[5]</sup>。

蒸汽爆破是直接用高压水蒸气对木质纤维素原料进行蒸煮,然后瞬间释放至常压而产生爆破效果。蒸汽爆破预处理能实现木质纤维素原料的组分分离和结构改变,有助于提高原料酶水解的效率<sup>[6]</sup>。常规的蒸汽爆破处理一般不添加任何化学物质。如果在物料中添加少量的酸作为催化剂,可以明显提高蒸汽爆破的处理效果<sup>[7,8]</sup>。本文对比研究常规蒸汽爆破和酸催化蒸汽爆破对蔗渣原料表面物理结构特征、组分和含量变化,以及酶解效率的影响,为有效利用蔗渣资源制备可发酵性糖浆提供有益的借鉴。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试剂与amp;设备

#### 1.1.1 原料与amp;酶制剂

甘蔗渣购至广西来宾市制糖厂,晒干并粉碎至颗粒 < 10mm,室温下干燥保存备用。绿色木霉 (*Trichoderma viride*) 产纤维素酶,购自宁夏银川市和氏璧生物技术有限公司。

#### 1.1.2 仪器设备

QB-200型汽爆工艺试验台,河南鹤壁市正道重机集团有限公司生产。该装置主要由汽爆腔、物料收集腔、2台高压蒸汽发生器、启爆执行系统及电气自动化等部件组成;汽爆罐为直立圆筒状,腔体容积 405m<sup>3</sup>,最高压力可达 6 MPa,升压时间 < 5s,点爆时间 < 0.075s; XM60水份分析仪,瑞士,Precisa公司产品;高效液相色谱仪,Waters510,410示差折光光检测器,美国产品;T6紫外可见光分光光度计,北京普析通用仪器有限公司出品;DDS-11A电导率仪,上海智光仪器仪表有限公司出品。

### 1.1.3 主要试剂

36% 盐酸,98% 硫酸,结晶酚,NaOH,酒石酸钾钠,柠檬酸,柠檬酸钠,蒽酮,乙二醇乙醚等。所用试剂均为国产分析纯。

## 1.2 方法

### 1.2.1 实验流程

实验流程如图 1所示

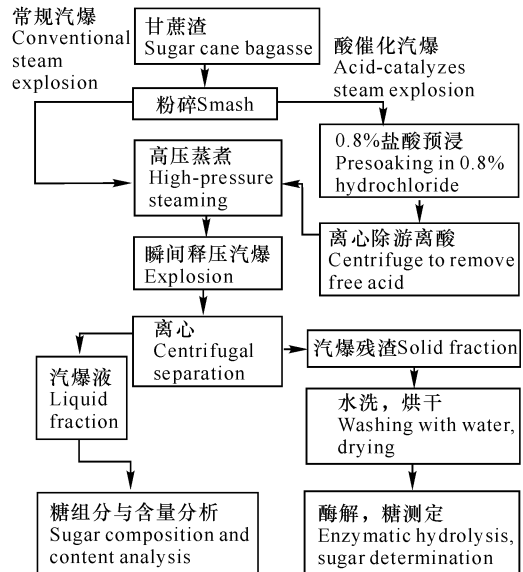


图 1 蔗渣蒸汽爆破处理实验流程

Fig. 1 The experimental set-up used for evaluating the effect of steam explosion on sugar cane bagasse

### 1.2.2 分组与amp;汽爆

试验共分为两组, A组未经酸预浸处理,编号 1~ 10,分别对应的汽爆压力为 0.7MPa, 0.9MPa, 1.1MPa, 1.3MPa, 1.5MPa, 1.7MPa, 1.9MPa, 2.1MPa, 2.3MPa, 2.5MPa; B组经 0.8% (W/W)盐酸预浸处理 24h,编号 1~ 7,各自的汽爆压力分别与 A组对应编号的汽爆压力相对应。

称取绝干蔗渣样品 35g,置于汽爆腔内,在设定的压力蒸煮条件下维持 3min,然后启爆,瞬间泄压收集物料腔内所有样品,密闭于保鲜袋中备用。

### 1.2.3 电镜观察

汽爆物料用水洗至中性, 105<sup>o</sup>C烘干至恒重,过 200目筛。日立 S-3400N扫描电子显微镜观察不同汽爆条件对蔗渣物理结构的影响。

### 1.2.4 水分与amp;糖类分析

设定水份分析仪在 105<sup>o</sup>C将物料烘干至恒重测定含水量。精确称量一定质量的物料,按最终固液比 1: 3加入一定体积的去离子水,混合均匀后离心澄清,并经微孔滤膜过滤后制得检测样液。样品糖类检测采用高效液相色谱法: 色谱柱, BC-100 Ca<sup>3</sup> 糖柱,

(美国, Benson公司产品);流动相:超纯水 1ml/min, 柱温 85℃。

糖含量 (g/100g原料) =

$$\frac{\text{糖浓度 (g/ml)} \times \text{总液体体积 (ml)}}{\text{物料质量} \times (1 - \text{含水量})} \times 100$$

### 1.2.5 木质素、纤维素和半纤维素含量测定

样品水洗至中性, 105℃烘干至恒重, 木质素、纤维素和半纤维素含量的测定按文献 [9] 介绍的方法进行, 即一定质量的样品先后经酸性洗涤剂、水、丙酮洗涤后过滤, 残渣烘干后加入浓度为 2M 的盐酸, 100℃下水解 50min, 3号沙芯漏斗过滤, 滤液稀释一定倍数后用 DNS法测定还原糖含量 (以木糖计), 并计算半纤维素含量; 残渣用 72% 硫酸消化 3h, 然后加一定量水稀释, 放置过夜后过滤, 滤液部分用蒽酮法测定还原糖含量 (以葡萄糖计), 并计算纤维素含量。消化残余部分用水洗至中性, 105℃烘干, 称重后在 550℃灰化, 灰化前后重量差即为木质素质量。

### 1.2.6 纤维素酶活力测定

按文献 [10] 的方法测定纤维素酶的滤纸酶活力。滤纸酶活力定义为: 在 50℃, pH值 4.8 的条件下, 每分钟水解底物产生  $\mu\text{mol}$  葡萄糖的酶量为一个纤维素酶活力单位 (FPU)。

### 1.2.7 纤维素酶解

准确称取水洗后烘干的汽爆残渣 3g, 按 25FPU / g 底物加入纤维素酶和 pH值 4.8, 缓冲强度为 0.05mol/L 的柠檬酸缓冲液 15ml 滴加 2滴 5% (W/W) 山梨酸钾溶液以防止微生物污染, 50℃水浴中水解 48h, DNS<sup>[11]</sup>法测定水解液中总糖质量 (以葡萄糖计), 并计算酶解率:

$$\text{酶解率} (\%) = \frac{0.9 \times \text{葡萄糖质量}}{\text{物料中纤维素质量}} \times 100$$

式中 0.9 为纤维素葡萄糖残基与水解下来的葡萄糖摩尔质量比

## 2 结果和分析

### 2.1 酸催化蒸汽爆破对蔗渣纤维结构的影响

放大 1000 倍对比观察 1.1MPa, 1.3MPa, 1.5MPa 处理的蔗渣汽爆物料, 可清晰地看到酸催化汽爆对蔗渣纤维结构发生的巨大影响。未经酸处理, 汽爆压力为 1.1MPa 时, 蔗渣汽爆物仍表面光滑, 结构坚硬, 与未经汽爆处理的原料并无太大差异。压力增至 1.3MPa, 纤维束表面虽出现破裂, 有细微的卷曲突起使表面变得粗糙, 但纤维束的整体结构仍然完整。即使将爆破压力增至 1.5MPa, 单根纤维也只出现明显的纵向分裂, 其基本结构并未被完全破坏 (图 2, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>) 如果经酸预浸处理, 1.1MPa 的汽爆压

力便能使单根蔗渣纤维发生深度的纵向撕裂和明显的横向断裂。将汽爆压力提高至 1.3MPa, 则蔗渣纤维的纵向、横向分裂程度进一步加剧, 其表面变得高度疏松。将压力增加至 1.5MPa, 蔗渣原本坚硬整齐的结晶结构已经完全破坏, 单根纤维消失, 成为杂乱无章、蓬松的海绵状物 (图 2, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>)。

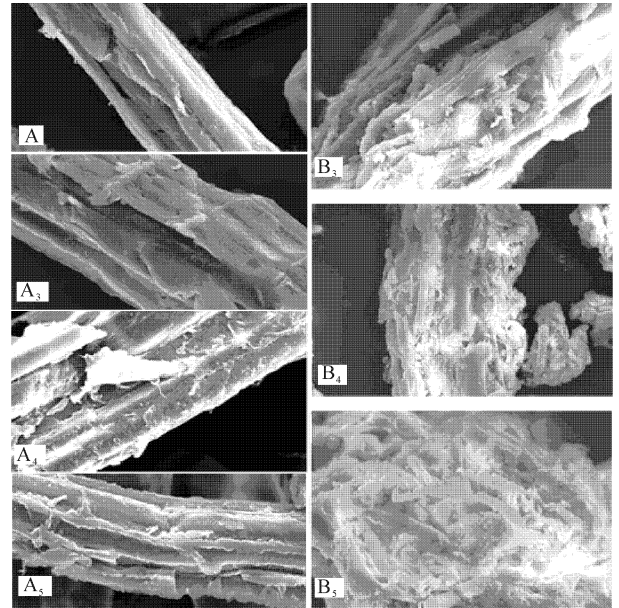


图 2 不同汽爆条件对蔗渣纤维结构的影响

Fig. 2 Effect of steam explosion under different conditions on the structure of sugar cane bagasse

A. 原料: 未处理; A<sub>3</sub>. 常规汽爆处理: 1.1MPa, 3min; A<sub>4</sub>. 常规汽爆处理: 1.3MPa, 3min; A<sub>5</sub>. 常规汽爆处理: 1.5MPa, 3min; B<sub>3</sub>. 酸催化汽爆处理: 0.8% HCl, 1.1MPa, 3min; B<sub>4</sub>. 酸催化汽爆处理: 0.8% HCl, 1.3MPa, 3min; B<sub>5</sub>. 酸催化汽爆处理: 0.8% HCl, 1.5MPa, 3min.

A. Materials no-treatment; A<sub>3</sub>. Conventional steam explosion: 1.1MPa, 3min; A<sub>4</sub>. Conventional steam explosion: 1.3MPa, 3min; A<sub>5</sub>. Conventional steam explosion: 1.5MPa, 3min; B<sub>3</sub>. acid-catalyzed steam explosion: 0.8% HCl, 1.1MPa, 3min; B<sub>4</sub>. acid-catalyzed steam explosion: 0.8% HCl, 1.3MPa, 3min; B<sub>5</sub>. acid-catalyzed steam explosion: 0.8% HCl, 1.5MPa, 3min.

### 2.2 酸催化蒸汽爆破对汽爆液糖组分与含量的影响

在本试验蒸汽压力条件下, 如果蔗渣未经酸预浸处理, 汽爆液中含有的蔗渣半纤维素的降解产物木糖, 并且木糖含量随着爆破压力的增加而提高。当汽爆压力达到 2.5MPa 时, 100g 蔗渣原料水解生成的木糖可达 10.9g。不过, 在本试验的所有汽爆压力条件下, 汽爆液中的葡萄糖含量均很低, 以至未能检测出来 (表 1)。而在酸预浸处理的蔗渣汽爆液中, 木糖含量均明显高于未经酸预浸处理的蔗渣原料, 但含量变化趋势与未经酸预浸处理的正好相反, 即随着汽爆压力的提高, 木糖的含量呈不断降低的趋势 (表 1),

这一结果与罗鹏等<sup>[12]</sup>分析酸催化汽爆麦草汽爆液组分和含量变化的结果是一致的。所有经酸预浸处理蔗渣的汽爆液中均含有葡萄糖,在低于 1.5 MPa 的汽爆液压力条件下,汽爆液中的葡萄糖的含量随着压力的提高而增加,当压力超过 1.5 MPa,则汽爆液中的葡萄糖含量开始随压力升高而下降(表 1)。这一现象在罗鹏等<sup>[12]</sup>的研究中并没有出现。

表 1 爆破液中的糖组分和产量

Table 1 The kinds and yields of sugar in liquid phase after steam explosion pre-treatment

组别 Group	木糖 Xylose yield (g/100g material)	葡萄糖 Glucose yeild (g/100gmaterial)	pH值 pH Value
A <sub>1</sub>	< 1.1	-	> 4.70
A <sub>2</sub>	< 1.1	-	> 4.70
A <sub>3</sub>	1.1	-	4.70
A <sub>4</sub>	1.8	-	4.52
A <sub>5</sub>	2.9	-	4.40
A <sub>6</sub>	4.6	-	4.07
A <sub>7</sub>	7.6	-	3.92
A <sub>8</sub>	9.1	-	3.88
A <sub>9</sub>	10.2	-	3.70
A <sub>10</sub>	10.9	-	3.57
B <sub>1</sub>	18.7	7.4	< 1.50
B <sub>2</sub>	15.6	9.5	< 1.50
B <sub>3</sub>	15.0	13.5	< 1.50
B <sub>4</sub>	13.3	18.6	< 1.50
B <sub>5</sub>	11.8	18.9	< 1.50
B <sub>6</sub>	11.3	15.7	< 1.50
B <sub>7</sub>	9.7	13.0	< 1.50

--: 未检测出 - : Not detected

植物半纤维素是一种非结晶状态的多缩戊糖,其聚合度一般为 80~150 个木糖残基,在酸性催化剂作用下很容易分解成单糖<sup>[13]</sup>。A 组的蔗渣虽然未经酸预浸处理,但是在高温高压的蒸煮过程中,蔗渣半纤维素侧链乙酰基会发生脱乙酰作用生成乙酸,糖类本身在酸性高温条件下也会降解生成一系列复杂的有机酸。在一定条件范围内,汽爆压力越大,蒸煮温度越高,所形成的有机酸含量也越多<sup>[14]</sup>,爆破液中的 pH 值就越低(表 1),从而进一步加速半纤维素水解,使汽爆液中的木糖进一步提高。天然纤维素则是一种具有结晶状态的高聚物,其聚合度一般约为 1500~3000 个葡萄糖残基,它发生酸水解所要求的条件远比半纤维素剧烈得多<sup>[13]</sup>。在本实验的所有压力条件下,所有不经酸预浸处理蔗渣的汽爆液中均未能检测出葡萄糖。它表明,汽爆过程生成的有机酸本身不足以引起纤维素发生显著的水解反应(表 1)。

酸预浸处理不仅极大加速汽爆过程的蔗渣半纤维素的水解,而且会显著引起半纤维素主要水解产物

——木糖发生进一步水解(表 1)。这种现象是不难理解的。半纤维素的降解产物——木糖在较强的酸性条件下性质极不稳定,在高的压力和温度下会发生进一步分解生成糠醛等物质<sup>[15]</sup>。在无机酸催化剂存在的条件下,温度超过 105°C 之后,半纤维素分解反应和木糖分解反应同时进行,两者的反应速度常数 K 都会随着温度的升高而增加,但是木糖的分解反应速度常数 K 明显要比半纤维素的分解反应速度常数 K 要增加得快,温度每增加 10°C,木糖分解速度约加快一倍<sup>[13]</sup>。一旦半纤维素水解完全,则汽爆液中木糖的总含量取决于木糖的分解速度。在本实验的酸催化汽爆条件下,汽爆压力为 0.7 MPa(对应温度为:170.3°C)时木糖的收率达到最大值,超过这一汽爆压力,反应主要以木糖分解为主,其收率急剧下降(表 1)。显然,必须谨慎控制压力条件,蔗渣汽爆液中才能获得较高的木糖收率。

酸预浸处理不仅引起汽爆过程蔗渣纤维结构的严重破坏(图 2),而且也导致纤维素也发生水解,汽爆液葡萄糖显著高于非酸预浸处理(表 1)。不过,酸性高温条件也一样使葡萄糖水解,生成 5 羟甲基糠醛等物质<sup>[15]</sup>。当汽爆压力达到 1.5 MPa 时,汽爆液中的葡萄糖含量达到最高值 18.9 g/100g 原料。此时蔗渣的天然结构也已经完全破坏(图 2)。显然,继续提高汽爆压力已经没有意义。

### 2.3 酸催化蒸汽爆破对汽爆残渣中木质素、纤维素和半纤维素含量的影响

未经浸酸蔗渣的汽爆残渣,其半纤维素的含量随着汽爆压力的增加而明显降低(表 2),这与随压力升高,由半纤维素水解生成的木糖增多的现象相吻合(表 1)。不过,即使用压力高达 2.5 MPa,汽爆残渣中半纤维素保存率仍达到 11%。如果经过酸预浸处理,只需要 0.9 MPa 的压力,蔗渣中的半纤维素便被彻底破坏,汽爆残渣的半纤维素含量接近为零。

非酸处理的蔗渣汽爆残渣中,纤维素含量依汽爆压力升高而升高(表 2)。这种现象的实质是,由于半纤维素随汽爆降解而溶出,纤维素在汽爆残渣中的比例便相对升高所致。如果经过酸预浸处理,则蔗渣汽爆残渣的纤维素含量明显随压力升高而逐步降低。因为即使在本试验最低的压力条件下,酸预浸处理物料不仅其半纤维素几乎完全被破坏,而且纤维素也发生了降解,并在汽爆液中生成了较多的葡萄糖(表 1)。如果压力进一步升高(> 1.5 MPa),则不仅汽爆液中的木糖、葡萄糖受到破坏(表 1),而且残渣中的纤维素含量也会明显降低。显然,在酸预浸处理的蔗渣中并不适合使用过于剧烈的汽爆处理条件,否则会造成

总糖收率大幅降低。

未经酸预浸处理的蔗渣汽爆残渣中木质素含量随汽爆压力的升高而升高。这一现象与陈洪章等<sup>[14]</sup>研究汽爆麦草组分和含量变化情况时出现的现象相吻合。这是由于木质素稳定性高于半纤维素,纤维素的原因造成的。随压力升高,纤维素,半纤维素急剧降解,而稳定的木质素相对降解较少,它在残渣中的比例便相对升高。如果经过酸预浸处理,蔗渣汽爆残渣中木质素的含量几乎高于非酸预浸处理的一倍以上。这从另一个侧面反映,酸预浸处理能极大地增强汽爆过程纤维素与半纤维素的水解效果。

表 2 蔗渣汽爆残渣中主要成分变化

Table 2 The change of the main components in the residue after steam explosion

组别 Group	木质素 Lignin (g/100g residua)	纤维素 Cellulose (g/100g residua)	半纤维素 Hemicellulose (g/100 residua)
A1	< 21.3	< 40.1	> 25.6
A2	< 21.3	< 40.1	> 25.6
A3	21.3	40.1	25.6
A4	21.9	41.9	24.4
A5	22.9	43.8	21.2
A6	22.0	44.6	18.4
A7	22.3	47.5	15.0
A8	24.0	47.7	13.9
A9	24.1	49.7	11.1
A10	24.7	50.0	11.0
B1	34.0	59.4	4.0
B2	36.0	53.4	< 4.0
B3	44.0	49.1	< 4.0
B4	48.0	44.3	< 4.0
B5	50.0	42.2	< 4.0
B6	52.0	33.6	< 4.0
B7	60.0	21.2	< 4.0

#### 2.4 酸催化蒸汽爆破对蔗渣酶解性能的影响

无论是否采用酸预浸处理,蔗渣汽爆残渣的可酶解性都随着汽爆压力的增加而提高(图3)。但是,在同一汽爆压力条件下,经酸预浸处理的汽爆残渣酶解率均高于未经酸预浸处理的汽爆残渣。这不仅是由于酸催化汽爆能更彻底地去除原料中的半纤维素(表1),使纤维素失去保护,而且它能更加明显地破坏纤维素的天然结构(图2),极大增强纤维素酶对底物的吸附性和渗透性。

虽然酸催化爆破在处理压力为 1.9MPa 时残渣的酶解效率达到最大值 80.4% (图3),比同等条件下常规蒸汽爆破处理物料的酶解效率提高了 30.3%,但是在此剧烈的条件下,不仅木糖和葡萄糖(尤其是木糖)发生严重降解,使汽爆液中这两种糖的含量急剧降低(表1),而且残渣中纤维素含量也明显减少(表2)。这样的条件显然不可能获得高的糖浆收率。

虽然无论是否采用酸催化汽爆,汽爆残渣的木质素含量都会随汽爆压力的增加而提高,但是汽爆残渣本身的酶解率并没有因为木质素含量增加而降低。它表明经汽爆处理后,木质素含量不会对汽爆残渣的酶解性能产生明显的不良影响。

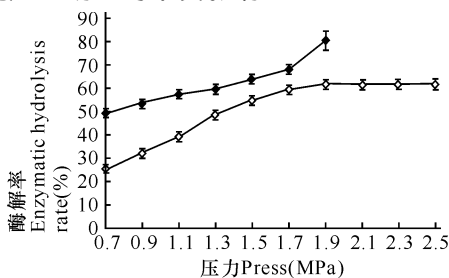


图 3 酸催化汽爆对提高蔗渣汽爆物酶解性能的影响

Fig. 3 The effect of acid-catalyzed steam explosion on improvement of enzymatic digestibility of sugar cane bagasse

◆: B组; ◇: A组. ◆: B group; ◇: A group.

### 3 结论

酸催化蒸汽爆破是一种比常规蒸汽爆破更节能,更有效的蔗渣纤维原料预处理措施。虽然蒸汽爆破是公认的改善木质纤维素酶水解性能的有效预处理措施,但是在没有添加酸作为催化剂的情况下,除非使用极高的蒸汽压力(> 2.0MPa),否则蒸汽爆破对蔗渣原料中半纤维素的水解作用,对纤维素天然结构的破坏程度,以及对提高原料的酶解性能等方面的作用都是有限的。如果原料经酸预浸处理,这种酸催化蒸汽爆破可以在相对低得多的压力(0.7MPa)条件下充分水解半纤维素(表2),而且纤维素天然结构的破坏程度也比未经酸处理的大得多(图2),汽爆物的酶解率(0.7MPa处理时)比常规同一蒸汽爆破压力条件下酶解率几乎高出一倍(图3)。由此可见,利用酸催化蒸汽爆破改善蔗渣纤维酶解性能,在效果及节能方面的优势要比常规蒸汽爆破优越得多。

一次酸催化蒸汽爆破处理蔗渣,难于同时兼顾获得木糖高收率与纤维素高酶解率。酸催化蒸汽爆破在很低的压力下就能将蔗渣半纤维素充分水解(表2),剧烈的条件则会导致半纤维素的水解产物——木糖的迅速降解,严重降低木糖的收率(表1)。要使纤维素获得理想的酶解效果,高的处理强度是必须的(图3)。采用 Soderstrom J等<sup>[16]</sup>提出的两步蒸汽爆破法,即第一步采用较低压力的酸催化蒸汽爆破,水洗残渣回收大部分木糖,再用酸浸固体残渣,继而用较高的压力进行第二次汽爆处理,可能是蔗渣水解当中解决这一问题的有效途径。

(下转第 450页 Continue on page 450)

- Microbiol, 1998, 64( 5): 1852-1859.
- [7] Aristidou A, Penttila M. Metabolic engineering applications to renewable resource utilization [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2000, 11( 2): 187-198.
- [8] Jeffries T W, Jin Y S. Metabolic engineering for improved fermentation of pentoses by yeasts [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2004, 63(5): 495-509.
- [9] Marko K, Maurice T, Jasper D, et al. Evolutionary engineering of mixed sugar utilization by a xylose fermenting *Saccharomyces cerevisiae* strain [J]. Fems Yeast Res, 2005, 5 925-934.
- [10] 萨姆布鲁克 EF, 弗里奇 T, 曼尼阿蒂斯 H 分子克隆实验指南: 第 2 版 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [11] Gietz R D, Schiestl R H, Willems A R, et al. Studies on the transformation of intact yeast cells by the LiAc/SSDN A/PEG procedure [J]. Yeast, 1995, 11 355-360.
- [12] Dekker K A, Yamagata H, Sakaguchi K, et al. Xylose (glucose) isomerase gene from the thermophile *Thermus thermophilus* Cloning, sequencing and comparison with other thermostable xylose isomerase [J]. J Bacteriol, 1991, 173(10): 3078-30831.
- [13] 汪家政, 范明. 蛋白质技术手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第 445 页 Continue from page 445)

参考文献:

- [1] Rao R S, Jyothi C P, Prakasham R S, et al. Xylitol production from corn fiber and sugarcane bagasse hydrolysates by *Candida tropicalis* [J]. Bioresource Technology, 2006, 97( 15): 1974-1978.
- [2] Carlos Martin, Oscar Almazan, Marcelo Marcet, et al. A study of three strategies for improving the fermentability of sugarcane bagasse hydrolysates for fuel ethanol production [J]. International Sugar Journal, 2007, 109 (1297): 33-39.
- [3] Chen H Z, Li Z H. Lignocellulose fractionation [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2003, 11 (4): 31-40.
- [4] Huang Z X, Chen Y Q, Chen R K. A advances in the research of bagasse degradation by enzyme [J]. Bagasse, 2004, 11(4): 52-56
- [5] Cristobal Cara, Encarnacion Ruiz, Ignacio Ballesteros, et al. Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(2): 423-429.
- [6] Karr W E, Holtzapple M T. The multiple benefits of adding non-ionic surfactant during the enzymatic hydrolysis of corn stover [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1998( 59): 419-427.
- [7] Martinez J, Negro M J, Saez R, et al. Effect of acid steam explosion on enzymatic hydrolysis of *O. nervosum* and *C. cardunculus* [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1990, 24/25 127-134.
- [8] Morjanoff P J, Gray P P. Optimization of steam explosion as method for increasing susceptibility of sugarcane bagasse to enzymatic saccharification [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1987, 6(29): 733-744.
- [9] 王玉万, 徐文玉. 木质纤维固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木素的定量分析程序 [J]. 微生物学通报, 1987, 14(2): 81-84.
- [10] Ghose T K. Measurement of cellulase activities [J]. Pure and Applied chemistry, 1987, 59(2): 257-268.
- [11] Qi X J, Gou J X, Han X J, et al. Study on measuring reducing sugar by DNS reagent [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2004, 12(3): 17-20.
- [12] Luo P, Liu Z, Wang G S. Study of acid-catalyzed steam explosion pretreatment for enzymatic hydrolysis of wheat straw [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2006, 26(4): 105-109.
- [13] 江苏省轻化工业厅纤维水解研究所. 植物纤维水解生产 [M]. 北京: 燃料化学工业出版社, 1972 10-11.
- [14] Chen H Z, Li Z H. Studies on the steam explosion of wheat straw I. mechanisms of steam explosion of wheat straw [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 1999, 4(7): 14-22.
- [15] Tanahashi M, Tamabuchi K, Goto T, et al. Characterization of steam exploded wood [J]. Wood Research, 1988, 75 1-12.
- [16] Soderstrom J, Pilcher L, Galbe M, et al. Two-step steam pretreatment of softwood by dilute H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> impregnation for ethanol production [J]. Biomass & Bioenergy, 2003, 24(6): 475-486.

(责任编辑: 邓大玉)