

农作物秸秆超低酸水解的比较

段晓玲,王存文*,李自豪,王为国,覃远航

(武汉工程大学化工与制药学院,绿色化工过程教育部重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:在间歇反应釜中,以超低酸(硫酸质量分数为 0.05%)水解的方法对 5 类 15 种农作物秸秆进行评价,并考察了温度与时间对不同秸秆水解的影响.结果表明:相同条件下,不同种类、同种类不同地区秸秆水解后还原糖浓度有很大差异,这与纤维素、半纤维素及木质素的含量及转化率有关.黑龙江的稻草、玉米秸秆及山东小麦秸秆的还原糖浓度较高,4 种棉花秸秆的还原糖浓度都较低;还发现,木质素含量较高的秸秆,超低酸水解还原糖浓度较低,只是水解了部分半纤维素及极少量的纤维素.

关键词:农作物秸秆;超低酸水解;还原糖;木质纤维素

中图分类号:TQ353.6⁺1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2011.12.002

0 引 言

与传统的化石燃料相比,生物质能源因其可再生,不考虑生产和运输所耗能量,二氧化碳零排放等良好的环境效应,而日益受到重视.而生物质制燃料乙醇是很有应用前景且已经实现工业化生产的一种技术.农作物秸秆是最具有开发潜力的生物质能源之一^[1-3].中国是一个农业大国,具有丰富的秸秆资源.2008 年农作物秸秆总产量为 8.42 亿吨,稻草秸秆占 26.37%、小麦秸秆占 17.36%、玉米秸秆占 21.67%、棉花秸秆占 4.45%、油菜秸秆占 3.88%^[4].因此,我们选用这 5 类主要农作物秸秆进行水解研究.但由于我国幅员辽阔,气候及土壤等多种因素的影响,使得相同种类的秸秆在不同地区的结构有很大的差异,进而影响水解的结果,笔者在 5 类秸秆的主产省进行原料的采集,收集了 15 种秸秆进行研究.

农作物秸秆的水解方法包括浓酸水解、稀酸水解和酶水解.酶制剂生产费用昂贵、水解周期长、原料需要预处理,因此,要实现大规模应用还有很长的路要走;浓酸水解所需的时间长,对设备的腐蚀严重,酸的回收较为困难且环境污染大,限制了该方法的发展及工业化;稀酸水解可以直接将秸秆水解产生单糖,也可作为酶水解的预处理方法,具有较好的可操作性和经济可行性^[5].20 世纪 90 年代以来超低酸(质量分数低于 0.1%)水解

因对反应器材质要求较低,发酵前中和水解液生成的废弃物较少,也不需回收酸液,对环境友好而受到重视^[6].Qian Xiang^[7]在超低酸和 180~230 ℃条件下用间歇反应器研究了纤维素的水解,发现影响水解的因素主要是反应温度、酸的种类及酸的质量分数.Kim^[8]在质量分数为 0.07% 的酸及 205~235 ℃条件下利用压缩渗滤床反应器处理黄杨树,葡萄糖得率为理论得率的 85%以上,葡萄糖质量分数为 2.25%以上.Y Y Lee^[9]对逆流压缩渗滤床超低酸水解反应进行了研究,在质量分数为 0.08% 的酸的条件下,调整其它工况(温度、时间、压力、初始进料速度和液体流速等),硬木纤维素原料的糖得率可以达到 80%~90%.Ballesteros^[10]等研究稀硫酸处理朝鲜蓟,结果表明硫酸质量分数和温度对木糖得率有较大影响,而固体浓度的影响不明显,当原料在 180 ℃、酸质量分数 0.1%、固体浓度 7.5% 时,木糖得率达 90%,并且生成的糠醛产量低.王树荣^[11]等在秸秆超低酸两步水解的研究中发现,在最佳条件(第一步 215 ℃、质量分数 0.05% H₂SO₄、35 min,第二步 180 ℃、无酸、30 min)下原料和总糖的转化率分别为 53.44% 和 23.82%.

本研究选用超低酸水解的方法对国内主要农作物秸秆进行评价,筛选出适宜此方法的农作物秸秆及产地,并对其他秸秆的水解提出建议,为后续的实验及工业化应用提供依据.

收稿日期:2011-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20976140);湖北省自然科学基金项目(2008CDA024)

作者简介:段晓玲(1987-),女,湖北十堰人,硕士研究生.研究方向:生物质能源.

指导老师:王存文,男,教授,博士,博士研究生导师.研究方向:能源化工.*通信联系人

1 实验部分

1.1 原料及试剂

稻草秸秆(湖北武汉、黑龙江哈尔滨郊区),小麦秸秆(湖北武汉、河北石家庄、山东济南郊区),玉米秸秆(湖北武汉、河北石家庄、山东济南、黑龙江哈尔滨、吉林长春郊区),棉花秸秆(湖北武汉、河北石家庄、山东济南、新疆乌鲁木齐郊区),油菜秸秆(湖北武汉郊区),秸秆粉碎过 125 μm 孔径筛,烘干备用;结晶苯酚,氢氧化钠,酒石酸钾钠,3,5-二硝基水杨酸,葡萄糖,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 实验装置

实验装置为自制间歇装置,此系统有主体反应器、电热炉、控制面板、氮气瓶、冷却池组成。主体反应器主要以 360 L 不锈钢为材料,能承受 16 MPa 的压力以及 300 $^{\circ}\text{C}$ 的温度,釜内设置搅拌装置和检测温度的电热偶,搅拌转速和反应温度可通过外部的控制面板显示。

1.3 实验及分析方法

1.3.1 超低酸水解秸秆实验 本课题组前期在超低酸条件下对湖北地区主要农作物秸秆的水解进行了考察,发现硫酸质量分数 0.05%、液固比(v/m)15:1、压力 1.6 MPa、搅拌速率 500 r/min 是最佳工况^[12]。因此,本文在最佳工况下对农作物秸秆进行研究。

准确称取一定质量经处理后的农作物秸秆于干燥的反应釜中,加入配制好的一定体积质量分数为 0.05% 的硫酸溶液,将釜密封。打开搅拌开关使固体与液体混合均匀,关闭搅拌开关。打开控制阀,每次充入定量的氮气后关闭阀。打开控制仪的加热开关,调节加热电压,加热反应釜,待热电偶显示反应釜达到所需温度,开启电机开关,调节转速搅拌开始,此时开始计时,直至反应结束,关闭加热开关,停止搅拌。迅速把反应釜从加热套中取出,将反应器部分放入冷水槽中快速冷却以避免还原糖的降解,待釜体完全冷却至室温,开盖取渣,并清洗过滤,滤渣经干燥后进行称重得到残渣量并收集供分析用。

将反应釜中取出的液体产物静置后,抽滤,并调 pH 至中性,于 8 000 r/min 离心分离机中分离 5 min,收取上层清液。

1.3.2 还原糖浓度的测定 本研究的测定采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法^[13]测量水解液中还原糖含量,用紫外分光光度计进行比色测定。相关计算公式如下:

$$y=0.104\ 35x+0.104\ 3$$

$$y=0.9y\alpha$$

y 为葡萄糖的质量浓度, g/L; x 为所测的吸光度; Y 为还原糖质量浓度, g/L; α 为稀释倍数。

1.3.3 纤维素、半纤维素及木质素成分的分析

用范氏法^[14]测得各农作物秸秆的主要成分及水解残渣的成分,见表 1。纤维素及半纤维素转化率的计算公式如下:

$$w_c = \frac{m_c - m_{cr}}{m_c} \times 100\%; w_h = \frac{m_h - m_{hr}}{m_h} \times 100\%$$

w_c 为纤维素的转化率(%); m_c 为秸秆原样中纤维素的质量(g); m_{cr} 为水解后固体残渣中纤维素的质量(g); w_h 为半纤维素的转化率(%); m_h 为秸秆原样中半纤维素的质量(g); m_{hr} 为水解后固体残渣半纤维素的质量(g)。

表 1 农作物秸秆的组分

Table 1 Component analysis of straw materials

种类	产地	纤维素/ %	半纤维素/ %	木质素/ %	灰分/ %
稻草	黑龙江	32.00	28.75	6.63	4.46
	湖北	33.42	28.60	8.38	3.34
	湖北	25.75	29.25	12.21	3.71
小麦	河北	28.38	32.63	11.37	3.13
	山东	34.10	31.17	10.77	1.44
	山东	37.46	24.63	13.08	0.25
玉米	黑龙江	30.60	43.37	7.07	0.40
	吉林	30.50	29.43	12.70	0.24
	湖北	29.33	28.57	8.80	0.60
棉花	河北	28.58	29.63	8.79	0.29
	湖北	36.53	25.99	16.40	0.40
	新疆	33.73	25.90	18.77	0.17
油菜	山东	32.77	25.83	19.24	0.53
	河北	33.13	29.54	18.00	0.30
油菜	湖北	36.38	31.47	16.50	0.21

2 结果与讨论

2.1 秸秆在相同条件下的还原糖得率

前期研究发现大部分秸秆在 200 $^{\circ}\text{C}$, 10 min 条件下有最大的还原糖质量浓度, 本研究在 200 $^{\circ}\text{C}$ 、10 min、硫酸质量分数 0.05%、液固比(v/m)15:1、压力 1.6 MPa、搅拌速率 500 r/min 的条件下对所有的秸秆进行水解, 结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 在相同的条件下水解, 大部分秸秆的还原糖质量浓度在 11 g/L, 黑龙江的稻草秸秆和玉米秸秆水解所得的还原糖质量浓度较高, 超过 15 g/L。不同地区小麦秸秆的还原糖质量浓度基本在 11 g/L 左右, 棉花秸秆的还原糖质量浓

度都较低(平均 8 g/L). 不同地区的稻草和玉米秸秆水解后还原糖质量浓度有很大差异.

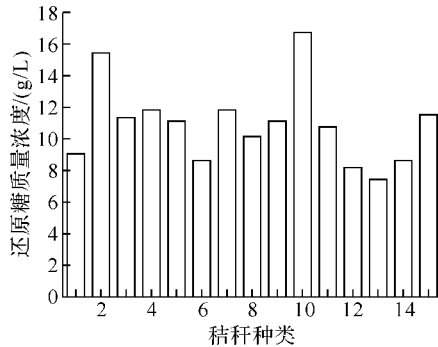


图 1 不同种类秸秆水解的还原糖质量浓度

Fig. 1 Concentration of reducing sugar from different kind of straw hydrolysis

注:1-湖北稻草;2-黑龙江稻草;3-湖北小麦;4-河北小麦;5-山东小麦;6-湖北玉米;7-河北玉米;8-山东玉米;9-吉林玉米;10-黑龙江玉米;11-湖北棉花;12-河北棉花;13-山东棉花;14-新疆棉花;15-湖北油菜.

2.2 温度与时间对不同产地、种类秸秆水解的影响

本课题组在前期研究发现液固比、粉碎度、硫酸质量浓度、压力及搅拌速度对秸秆的水解影响较小,温度和时间影响较大,因此本研究在最佳工况[硫酸质量分数 0.05%、液固比(v/m) 15:1、压力 1.6 MPa、搅拌速率 500 r/min]下研究了温度与时间对不同秸秆水解的影响.

2.2.1 温度与时间对稻草秸秆水解的影响

在最佳工况下研究了温度与时间对稻草秸秆水解的影响,结果如图 2 所示. 由图 2(A)、图 2(B)湖北和黑龙江稻草秸秆在不同温度下随时间的变化趋势基本相同,基本符合 Saeman 的理论^[15],即还原糖浓度随时间先增大后减小,还原糖质量浓度逐渐增大,还原糖的分解速率也逐渐增大,待其分解速率大于生成速率时,还原糖质量浓度就会逐渐降低. 温度越高,还原糖质量浓度达到最大值的时间越早,这是因为随着温度的升高,秸秆中纤维素及半纤维素水解速率得到提高. 然而黑龙江稻草秸秆在 210 °C、湖北稻草秸秆在 220 °C 时,还原糖质量浓度较低,可能由于在此温度下,还原糖的分解速率较大的原因.

湖北稻草秸秆在 210 °C、10 min 条件下达到最大还原糖质量浓度(10.97 g/L),而黑龙江稻草秸秆在 180 °C、20 min 条件下达到最大还原糖质量浓度(15.57 g/L). 由表 1 可知,湖北稻草秸秆比黑龙江稻草秸秆的纤维素及木质素含量都高,结构较不容易破坏. 稻草秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率结果如表 2 所示,黑龙江稻草秸秆的纤维素和半纤维素的转化率都高于湖北稻草

秸秆,进一步证明湖北稻草秸秆结构紧密,不容易被水解. 湖北稻草秸秆还原糖质量浓度较低主要有两个原因,首先,湖北稻草秸秆的结构较难破坏,水解出的还原糖就较少;其次,湖北稻草秸秆达到最大还原糖质量浓度的温度较黑龙江的高,生成的还原糖分解速率较大.

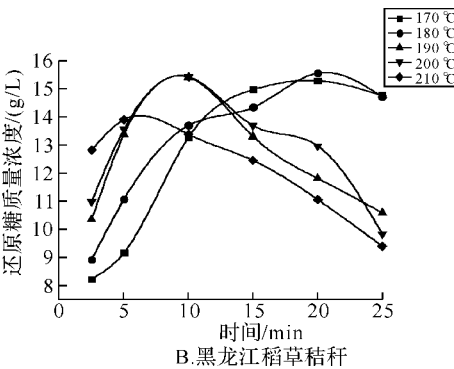
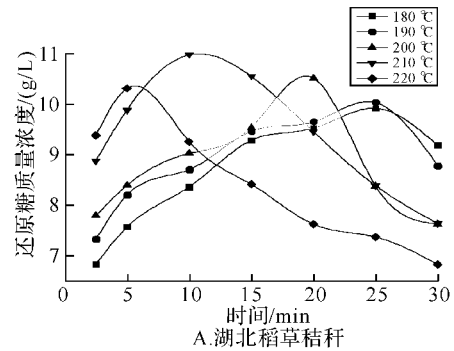


图 2 温度、时间对稻草秸秆水解的影响

Fig. 2 Effects of reaction temperature and time on rice straw hydrolysis

注:A、B 分别为湖北和黑龙江稻草秸秆水解还原糖质量浓度随温度及时间的变化曲线图.

表 2 稻草秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率

Table 2 The conversion ratio of cellulose and hemicellulose after rice straw hydrolysis

产地	纤维素转化率/%	半纤维素转化率/%
湖北	20.64	76.28
黑龙江	26.25	81.47

2.2.2 温度与时间对小麦秸秆水解的影响

在最佳工况下研究了温度与时间对小麦秸秆水解的影响,结果如图 3 所示. 小麦秸秆同稻草秸秆在不同温度下随时间的变化趋势基本相同. 由图 3(A),湖北小麦在 200 °C、10 min 水解有最大还原糖质量浓度(9.740 g/L);图 3(B)所示,河北小麦秸秆在 10 min 前,温度对还原糖质量浓度的影响较小,在 190 °C、20 min 水解有最大还原糖质量浓度(11.675 g/L);图 3(C)所示,山东小麦秸秆在 190 °C、15 min 的还原糖质量浓度较高(16.603 g/L).

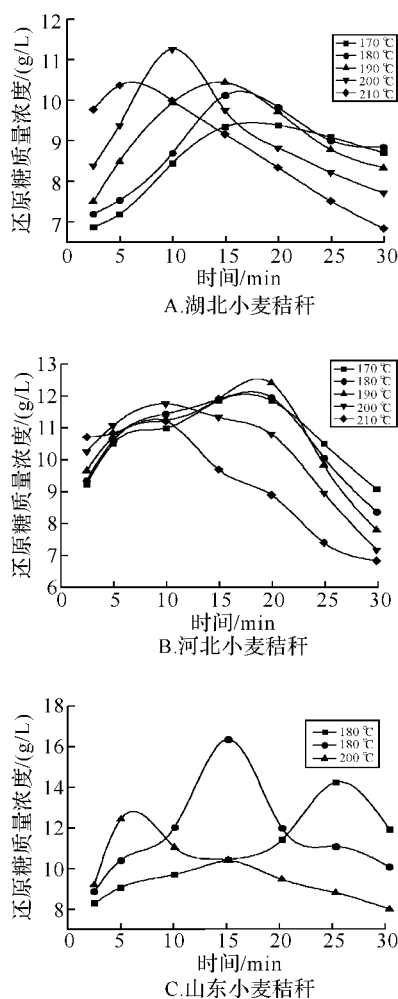


图 3 温度、时间对小麦秸秆水解的影响

Fig. 3 Effects of reaction temperature and time on wheat straw hydrolysis

注: A、B、C 分别为湖北、河北和山东小麦秸秆水解还原糖质量浓度随温度及时间的变化曲线图。

小麦秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率结果如表 3 所示。由表 1、表 3, 河北小麦秸秆的半纤维素含量较湖北和山东的小麦秸秆高, 转化率也较大, 山东小麦秸秆不仅半纤维素的转化率较大, 纤维素转化率也较大。

表 3 小麦水解后纤维素及半纤维素的转化率

Table 3 The conversion ratio of cellulose and hemicellulose after rice straw hydrolysis

产地	纤维素转化率/%	半纤维素转化率/%
湖北	10.23	81.64
河北	15.67	88.96
山东	21.36	87.53

玉米秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率结果如表 4 所示。玉米秸秆的纤维素转化率较低, 主要是半纤维素的水解, 玉米秸秆的木质素含量较低, 这也有利于半纤维素的水解。黑龙江玉米秸

秆水解的还原糖质量浓度最高, 还原糖产率为 40.41%。大连理工大学研究了超/亚临界两步法对玉米秸秆进行水解, 在固液比 1:100、190 °C、40 min 条件下获得最大还原糖产率为 24%, 将低温段水解残渣作为高温段水解的原料, 在 380 °C、20 s 条件下获得最大还原糖产率为 34%^[16]。由于黑龙江的玉米秸秆超低酸水解的还原糖质量浓度较高, 如果能进一步进行二次水解, 使纤维素转化率得到提高, 必将对其工业化具有指导意义。

表 4 玉米秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率

Table 4 The conversion ratio of cellulose and hemicellulose after corn straw hydrolysis

产地	纤维素转化率/%	半纤维素转化率/%
湖北	10.76	81.37
河北	5.51	89.78
山东	14.13	74.43
吉林	9.92	82.06
黑龙江	8.86	90.4

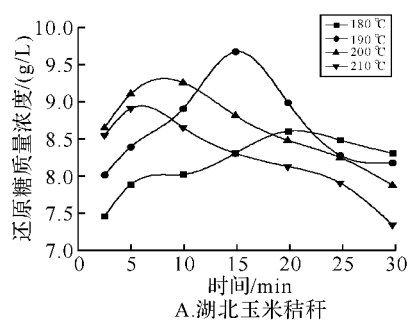
2.2.3 温度与时间对玉米秸秆水解的影响

在最佳工况下研究了温度与时间对玉米秸秆水解的影响, 结果如图 4 所示。湖北玉米秸秆在 180 °C、15 min 有最大还原糖质量浓度 9.667 g/L; 河北玉米秸秆在 190 °C、20 min 有最大还原糖质量浓度 13.006 g/L; 山东玉米秸秆在 170 °C、20 min 有最大还原糖质量浓度 10.656 g/L; 吉林玉米秸秆在 200 °C、10 min 有最大还原糖质量浓度 11.597 g/L; 黑龙江玉米秸秆在 190 °C、5 min 有最大还原糖质量浓度 19.019 g/L。

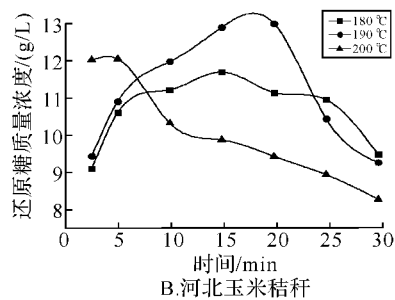
2.2.4 温度与时间对棉花、油菜秸秆水解的影响

在最佳工况下研究了温度与时间对棉花、油菜秸秆水解的影响, 结果如图 5、图 6 所示。棉花秸秆和油菜秸秆的还原糖质量浓度都不高, 湖北、河北、山东棉花秸秆及湖北油菜秸秆在 200 °C、10 min 有最大还原糖质量浓度, 分别为 10.738、8.106、7.500、11.487 g/L, 新疆棉花在 190 °C、10 min 有最大还原糖质量浓度 10.562 g/L。

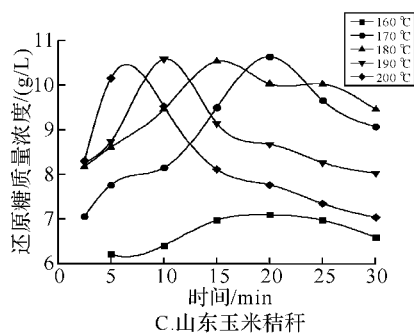
由于农作物秸秆由细胞壁和细胞内容物组成, 其中细胞壁所占的比例一般都在 80% 以上, 细胞壁主要是由纤维素、半纤维素、木质素和蛋白质组成, 这些聚合体与少量的其他成分一同构成了细胞壁复杂的三维立体结构, 油菜秸秆的蜡质、硅酸盐和木质素含量都比较高, 细胞壁的结晶度较高, 木质素与纤维素之间镶嵌形成坚固的酯键结构; 棉花秸秆的木纤维细胞排列整齐, 其胞腔较韧皮部的要大, 其结构与阔叶木非常相似, 两者的木质部结构颇为相似, 结晶度较高^[17-19]。



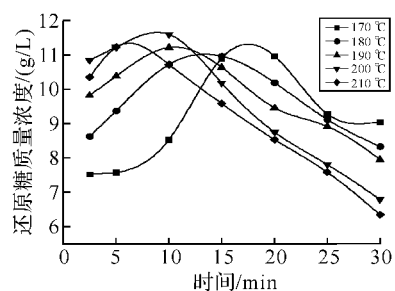
A. 湖北玉米秸秆



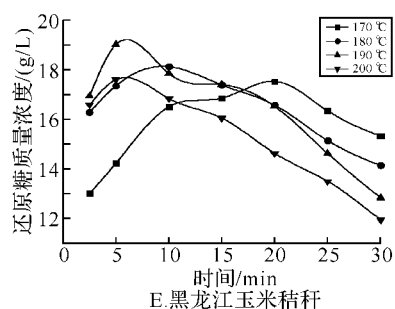
B. 河北玉米秸秆



C. 山东玉米秸秆



D. 新疆棉花秸秆

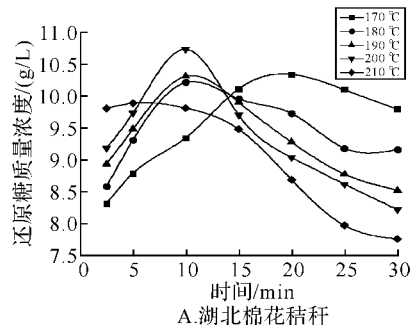


E. 黑龙江玉米秸秆

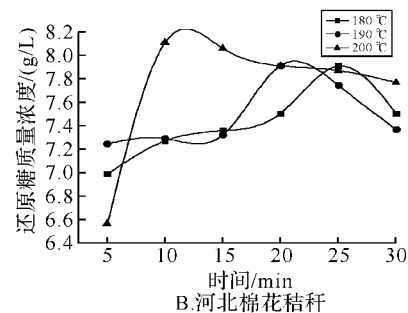
图 4 温度、时间对玉米秸秆水解的影响

Fig. 4 Effects of reaction temperature and time on corn straw hydrolysis

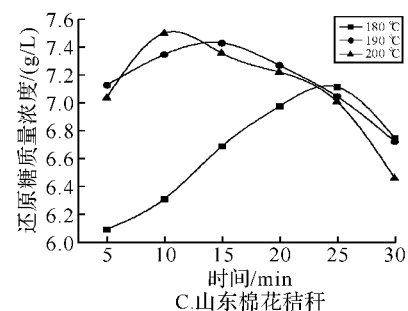
注: A、B、C、D、E 分别为湖北、河北、山东、吉林和黑龙江玉米秸秆水解还原糖质量浓度随温度及时间的变化曲线图。



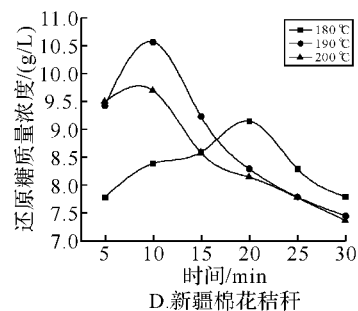
A. 湖北棉花秸秆



B. 河北棉花秸秆



C. 山东棉花秸秆



D. 新疆棉花秸秆

图 5 温度、时间对棉花秸秆水解的影响

Fig. 5 Effects of reaction temperature and time on cotton straw hydrolysis

注: A、B、C、D 分别为湖北、河北、山东和新疆棉花秸秆水解还原糖质量浓度随温度及时间的变化曲线图。

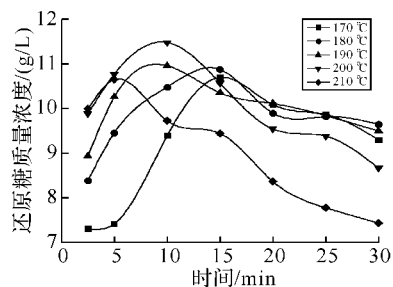


图 6 温度、时间对油菜秸秆水解的影响

Fig. 6 Effects of reaction temperature and time on rapeseed straw hydrolysis

棉花及油菜秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率结果如表 5 所示. 稀酸的水解过程是破坏木质素的缠绕作用与纤维素的结晶结构使其在稀酸的作用下进行水解^[20], 而由表 1 和表 5, 棉花及油菜秸秆的木质素含量较高, 水解时破坏木质素的结构也较难, 半纤维素的转化率较低, 纤维素的转化率极低.

表 5 棉花、油菜秸秆水解后纤维素及半纤维素的转化率

Table 5 The conversion ratio of cellulose and hemicellulose after cotton and rape straw hydrolysis

种类	产地	纤维素转化率/%	半纤维素转化率/%
棉花	湖北	2.37	71.84
	河北	3.63	67.90
	山东	2.77	69.83
	新疆	2.98	71.54
油菜	湖北	7.73	76.19

国内也有对棉花秸秆的水解进行研究^[21-22], 但还原糖的得率都比较低, 有人对棉花秸秆进行碱/微波预处理^[23], 使棉花秸秆中的木质素分子被碱液作用, 纤维结构得到破坏. 在以后的实验中, 对于棉花和油菜秸秆要想得到更高的还原糖, 必须先进行预处理打破其复杂的结构, 分离或脱除秸秆中的木质素, 提高纤维素和半纤维素的转化率.

3 结 语

a. 在 200 ℃、10 min、硫酸质量分数 0.05%、液固比(v/m)15:1、压力 1.6 MPa、搅拌速率 500 r/min 的条件下对所有的秸秆进行水解, 黑龙江的稻草、玉米秸秆的还原糖浓度较高(>15 g/L), 山东小麦秸秆在 190 ℃、15 min 的还原糖质量浓度较高(16.603 g/L), 适宜用超低酸的方法进行水解.

b. 稻草、玉米秸秆木质素质量分数较低(低于 9%), 棉花、油菜秸秆木质素质量分数较高(高于 16%). 木质素质量分数较高的农作物秸秆超低酸水解还原糖质量浓度较低, 只是水解了部分半纤维素及极少量的纤维素, 需要进行预处理打破木质素的缠绕.

c. 超低酸水解对纤维素的结构破坏较少, 纤维素水解转化率较低, 后续还需将残渣在较高温度下进行二次水解.

参考文献:

[1] Hirota W H, Rdrigues R B, Sayer C, et al. Hydrolysis of acetic anhydride; non-adiabatic calorimetric determination of kinetics and heat exchange[J]. Chemical engineering science, 2010, 65: 3849-3858.

[2] 王玉高, 赵炜, 贡士瑞, 等. 纤维素水解的研究进展[J]. 化工时刊, 2009, 5(23): 70-73.

[3] 杨昌炎, 吴祯祯, 郑冬洁, 等. 玉米秸秆微波热解研究[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(6): 20-22, 46.

[4] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 农业资源与农业区划研究所中国农业科学院研究生院, 2010.

[5] 张毅民, 杨静, 吕学斌, 等. 木质纤维素类生物质酸水解研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(1): 48-54.

[6] 庄新姝, 王树荣, 安宏, 等. 纤维素低浓度酸水解制取液体燃料的实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 6(40): 997-1001.

[7] Qian X, Lee Y Y, Troget R W. Kinetics of glucose decomposition during dilute-acid hydrolysis of lignocellulosic biomass[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2004, 113-116: 1127-1139.

[8] Kim J S. Cellulose hydrolysis under extremely low acid and high-temperature condition [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2001, 91: 331-340.

[9] Lee Y Y, Wu Z W, Rwtorget. Modeling of countercurrent shrinking-bed reactor in dilute-acid total-hydrolysis of lignocellulose biomass[J]. Bionre-source Technology, 2000, 71: 29-39.

[10] Ballesteros I, Ballesteros M, Manzaneres P, et al. Dilute sulfuric acid Pretreatment of cardoom for ethanol production [J]. Biochemical Engineering Journa, 2008, 42: 84-91.

[11] 王树荣, 庄新姝, 骆仲决, 等. 木质纤维素类生物质超低酸水解试验及产物分析研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 741-744.

[12] Li Zi Hao, Wang Cun Wen, Duan Xiao Ling, et al. Evaluation of main agricultural biomass for energy utilization in Hubei province[C]. Beijing: The third china energy scientist forum, 2011: 748-753.

[13] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[14] 任靓, 王存文, 王为国, 等. 超临界水非催化稻草秸秆一步法制备还原糖的研究[J]. 生物质化学工程, 2008, 42(4): 31-34.

[15] Saeman J F. Kinetics of wood saccharification, hydrolysis of cellulose and decomposition of sugars in dilute acid at high temperature[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1945, 37: 43-52.

[16] 刘慧屏, 银建中, 徐刚. 超/亚临界水两步法水解玉米秸秆制备还原糖[J]. 化学与生物工程, 2010, 27(11): 47-50.

[17] 王佳堃. 稻草预处理后超微结构及其理化特性变化规律研究[D]. 杭州: 浙江大学动物科学学院, 2006.

[18] 王光宇. 安徽省油菜秸秆资源综合利用方案研究

- [J]. 资源与环境, 2010, 26(3): 234-237.
- [19] 李永刚. 棉秆纤维素、半纤维素和木质素的分离、鉴定以及纤维素的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学理学院, 2007.
- [20] Orozco A, Ahmad M, Rooney D. Dilute acid hydrolysis of cellulose and cellulosic bio-waste using a microwave reactor system[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2007, 85(5): 446-449.
- [21] 张宏喜, 赵秀峰, 魏玲, 等. 棉秆中半纤维素稀酸水解的研究[J]. 昌吉学院学报, 2010(3): 99-102.
- [22] 邓辉, 李春, 李飞, 等. 稀酸预处理棉花秸秆糖化工艺条件的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 610-614.
- [23] 邓辉, 李春, 李飞, 等. 棉花秸秆糖化碱预处理条件优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 208-212.

Comparative study on crop straw hydrolysis under extremely low acid

DUAN Xiao-ling, WANG Cun-wen, LI Zi-hao, WANG Wei-guo, QIN Yuan-hang

(Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education,
School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The hydrolyses of 15 populations of 5 species of crop straw in a batch reactor under extremely low acid (0.05 wt% sulfuric acid) were evaluated, and the effects of reaction temperature and time on the straw hydrolyses were investigated. The results showed that the concentrations of reducing sugar were different for different species and different populations of crop straw collected in different regions, which was due to the different contents of cellulose, hemicellulose and lignin and their different conversion yields. The rice and corn straw from Heilongjiang, and wheat straw from Shandong had higher reducing sugar concentrations than other populations of crop straw, while the 4 populations of cotton straw had lower reducing sugar concentrations than other populations. It was also found that the higher the content of lignin, the lower the concentration of reducing sugar, and only a portion of hemicellulose and a very small portion of cellulose were hydrolyzed.

Key words: crop straw; extremely low acid hydrolysis; reducing sugar; lignocellulose

本文编辑: 张 瑞