

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.021

# 玉米秸秆常压快速液化最佳工艺参数研究<sup>\*</sup>

刘玉环<sup>1</sup> 王应宽<sup>2</sup> 阮榕生<sup>1,3</sup> 李资玲<sup>1</sup> 林向阳<sup>3</sup> 刘成梅<sup>1</sup>

(1. 南昌大学生物质转化教育部工程研究中心, 南昌 330047; 2. 农业部规划设计研究院, 北京 100125;

3. 明尼苏达大学生物产品与生态系统工程系, 圣保罗 MN55108)

**【摘要】** 研究了影响玉米秸秆常压快速液化的4个关键性工艺参数: 液化时间、液化温度、玉米秸秆质量和催化剂质量之间的交互作用。借助于SAS软件, 采用二次回归正交旋转组合设计及响应面法开展系统试验。建立了回归方程, 定量描述了各参数对玉米秸秆液化效率的影响及不同参数之间存在的交互作用, 并推算出当液化剂质量为100 g、液化温度为158℃、液化时间为63 min、玉米秸秆质量17 g和催化剂质量为2.7 g时, 玉米秸秆常压快速液化的残渣率可以达到最小值0.2%, 实现玉米秸秆基本完全液化。

**关键词:** 玉米秸秆 快速液化 工艺参数 交互作用 优化

**中图分类号:** S2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0110-06

## Optimization of Processing Parameters for Rapid Liquefaction of Corn Stover under Atmospheric Pressure

Liu Yuhuan<sup>1</sup> Wang Yingkuan<sup>2</sup> Ruan Roger<sup>1,3</sup> Li Ziling<sup>1</sup> Lin Xiangyang<sup>3</sup> Liu Chengmei<sup>1</sup>(1. *Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China*2. *Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China*3. *Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul MN 55108, USA*)

### Abstract

The four key parameters, including reaction time, reaction temperature, the amount of corn stover charged to definite liquefying reagent, and the dosage of catalyst affect the efficiency of corn stover liquefaction were investigated. With the help of SAS software, rotational quadratic regression design and response surface analysis, the relationships among unliquefied corn stover residue and reaction time, reaction temperature, the amount of corn stover charged to definite liquefying reagent, and the dosage of catalyst were studied. The mutual interaction of the four parameters was quantitatively described. The experimental results showed that with liquefying reagent of 100 g, the reaction temperature of 158℃, the reaction time of 63 min, the amount of corn stover meal charged of 17 g and the catalyst dosage of 2.7 g, the liquefied products could be optimized with only 0.2% unliquefied.

**Key words** Corn stover, Rapid liquefaction, Processing parameters, Interaction, Optimization

### 引言

为了节省化石资源, 减少温室气体排放, 利用液

化木材、作物秸秆等木质纤维素类材料来获得化学产品和燃油受到越来越多的关注。以多元醇类作为溶剂的液化实验开始于20世纪70年代早期<sup>[1-2]</sup>。影

收稿日期: 2011-10-08 修回日期: 2011-11-11

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30960304)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101800)、国际科技合作计划资助项目(2010DFB63750)、国家林业局948资助项目(2010-4-09)、江西省国际合作基金资助项目(2010EHB03200)和江西省科技厅产业化关键技术攻关资助项目(2007BN12100)

作者简介: 刘玉环, 教授, 博士, 主要从事生物质转化工程研究, E-mail: liuyuhuan@ncu.edu.cn

通讯作者: 阮榕生, 教授, 博士, 主要从事生物质转化工程研究, E-mail: ruanx001@umn.edu

响木质纤维素类材料液化效率的内在因素是材料化学组成,特别是木质素的含量及组成<sup>[3-4]</sup>。Rezzoug 等用酸化的乙二醇液化去皮的松木粉,详细分析了温度、时间、催化剂质量等工艺参数对松木液化效率的影响<sup>[5]</sup>。进一步的研究表明,利用环碳酸酯类可以快速液化木质纤维素类材料,其液化木材速度比多元醇快 10 倍以上,液化更为彻底,残余环碳酸酯类在液化过程中全部转化为乙二醇。反应可以在常压回流条件下进行,更易于实际应用<sup>[4]</sup>。影响环碳酸酯类液化木质纤维素类生物质的主要工艺参数为液化时间、液化温度、液料比和催化剂质量<sup>[5-6]</sup>。在国内,童朝晖采用均匀设计法对用环碳酸酯类液化麦草的条件做了研究,初步确定了麦草最优化液化条件。但限于试验设计,没有对液化时间、液化温度、液料比、催化剂质量之间的交互关系作进一步的探讨<sup>[7]</sup>。

玉米秸秆资源是中国最大宗、易得的农业生产下脚料之一。在生物质转化利用中是最常用的对象之一<sup>[8-9]</sup>。玉米秸秆是木质纤维素材料中的一类,其纤维素、半纤维素、木质素质量分数分别为 43%、43%、14%。玉米秸秆目前主要利用途径有:作有机肥料还田、作反刍动物饲料、作燃料直接用于燃烧、经气化、沼气化集中供燃、用作新型建材板原料等<sup>[10]</sup>,增值率较低。木质纤维素类生物质在常压和一定的温度条件下在多元醇类(环碳酸酯类)液化剂中,快速(短到 10 min)转化为分子量分布广泛的液态混合物,含有大量的活性羟基,可以用来制造木材胶粘剂、木质纤维素类模塑材料、聚氨酯泡沫和聚酯薄膜等高分子材料,还可以提取绿色化学品或制备生物燃油,因此具有广阔的实际应用价值<sup>[4,11-12]</sup>。但目前该技术还停留在单因素试验阶段,无法对影响木质纤维素类生物质液化效率的最佳工艺条件及其相互作用进行系统的研究。在 Yan 等关于玉米秸秆在多羟基醇中液化反应动力学研究报告中,也未能对影响液化的关键因素之间的联系作出定量描述<sup>[13]</sup>。二次正交旋转组合设计试验已被广泛应用于工艺参数的优化研究。本文借助于 SAS 软件,采用二次回归正交旋转组合设计及响应面法分析,研究玉米秸秆常压快速液化残渣率与液化时间、液化温度、玉米秸秆质量、催化剂质量 4 因素之间的关系,分析其成因,初步确定秸秆液化的最佳工艺参数。

## 1 原料及试剂

### 1.1 原料及预处理

供试玉米秸秆为江西省进贤县风干的中单 2 号。

将玉米秸秆切成 5 cm 的段,用粉碎机进行粗粉碎,再置于高速粉碎机中粉碎至全部通过 60 目筛,储于密封塑料袋中备用。玉米秸秆的化学成分质量分数如表 1 所示。

表 1 玉米秸秆的化学成分

Tab. 1 Chemical components of corn stover %

成分	质量分数
水分	11.69
灰分	5.43
苯乙醇抽提物	2.09
酸不溶木素	15.05
综纤维素	70.42
粗蛋白	3.32

### 1.2 主要试剂

碳酸乙烯酯:分析纯,购自唐山朝阳化工厂。  
98% 浓硫酸:购自上海勤通化学试剂有限公司。

## 2 试验方法

### 2.1 液化

取一定量的玉米秸秆放入具有搅拌、冷凝回流和温控装置的三口烧瓶中,然后将三口烧瓶放入温控电热套中(图 1),加入 100 g 液化剂和预设剂量的催化剂,在持续搅拌下进行液化反应,到达规定时间后,将烧瓶放入冷水中终止反应。

玉米秸秆在碳酸乙烯酯中快速液化的主要机理,以纤维素为例,参见文献[14]。

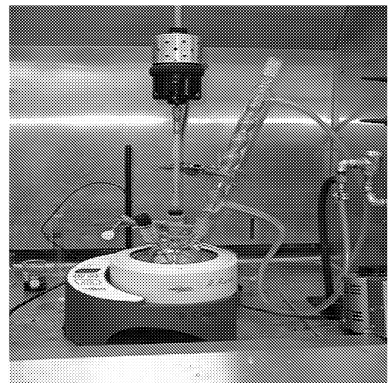


图 1 玉米秸秆液化试验装置

Fig. 1 Test device of corn stover liquefaction

### 2.2 残渣率测定

取 2 g 液化产物、20 mL 二氧六环和水的混合溶液(二氧六环和水的质量比为 8:2)于 80℃ 水浴锅中保温 20 min,期间不断搅拌。混合液体用布氏漏斗垫衬滤纸过滤(中速定量滤纸),再用二氧六环和水的混合溶液反复冲洗至滤液无色。将残渣连同滤纸放入烘箱中于 105℃ 干燥 4 h,恒质量,测残渣量。残渣率定义为二氧六环不溶物占玉米秸秆质量的质

量百分比<sup>[4]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 试验设计

为了分析液化时间、液化温度、玉米秸秆质量、催化剂质量等工艺参数对玉米秸秆常压快速液化效率的影响。固定液化剂用量为 100 g,采用二次正交旋转组合设计,以液化时间、液化温度、玉米秸秆质量、催化剂质量为自变量,常压快速液化的残渣率  $Y$  为响应值。各因素的变化范围如表 2 所示,试验设计及结果如表 3 所示。

表 2 因素水平编码

Tab. 2 Factors and levels

水平	因素			
	液化温度	液化时间	玉米秸秆质量	催化剂质量
	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/\text{min}$	$x_3/\text{g}$	$x_4/\text{g}$
2	170	90	30	3.5
1	160	75	25	3.0
0	150	60	20	2.5
-1	140	45	15	2.0
-2	130	30	10	1.5

#### 3.2 回归方程分析

回归方程的偏回归系数估计值与方差分析结果如表 4 所示。

借助 SAS 软件对试验结果进行统计分析,结果见表 4,回归方程方差  $F = 10.35 > F_{0.01}(14, 16) = 3.45$ ,决定系数  $R^2 = 0.9005$ ,说明此二次回归方程的拟合度较高,因回归方程中  $X_3$ 、 $X_4$  系数的  $t$  检验不显著,故可以省略。残渣率与各因素编码值的回归方程为

$$Y = 11.8657 - 6.7350X_1 - 0.8300X_2 + 3.1613X_1^2 + 1.5638X_2^2 + 3.6763X_3^2 + 4.9838X_4^2 - 2.8888X_1X_2 + 1.1188X_1X_3 - 1.0762X_1X_4 - 3.9162X_2X_3 - 2.8512X_2X_4 - 3.3238X_3X_4 \quad (1)$$

### 4 响应面法分析

响应面法是统计设计试验技术的合成,包括试验设计、建模、检验模型合适性、因子效应的评估、考察以及寻求因子最佳操作条件。响应面(RSA)分析的图形是响应值  $Y$  对各试验因子  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  三维空间曲面图(图 2)。从响应面分析图上可以看出各因子之间的相互作用。

#### 4.1 液化温度和液化时间对残渣率的影响

液化温度和液化时间对残渣率的影响回归方程为

表 3 试验设计及结果

Tab. 3 Experimental design and results

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y/\%$
1	-1	-1	-1	-1	17.84
2	1	-1	-1	-1	9.30
3	-1	1	-1	-1	46.64
4	1	1	-1	-1	8.31
5	-1	-1	1	-1	44.99
6	1	-1	1	-1	51.86
7	-1	1	1	-1	49.48
8	1	1	1	-1	44.03
9	-1	-1	-1	1	9.00
10	1	-1	-1	1	11.01
11	-1	1	-1	1	21.67
12	1	1	-1	1	3.52
13	-1	-1	1	1	47.30
14	1	-1	1	1	16.01
15	-1	1	1	1	26.11
16	1	1	1	1	10.87
17	-2	0	0	0	36.15
18	2	0	0	0	9.39
19	0	-2	0	0	22.19
20	0	2	0	0	10.57
21	0	0	-2	0	5.63
22	0	0	2	0	44.03
23	0	0	0	-2	47.44
24	0	0	0	2	12.68
25	0	0	0	0	11.90
26	0	0	0	0	11.83
27	0	0	0	0	12.09
28	0	0	0	0	12.19
29	0	0	0	0	11.44
30	0	0	0	0	11.12
31	0	0	0	0	12.49

$$Y = 11.8657 - 6.7350X_1 - 0.8300X_2 + 3.1613X_1^2 + 1.5638X_2^2 - 2.8888X_1X_2 \quad (2)$$

如图 2a 所示,在本试验反应条件下,液化反应温度介于 130 ~ 170 °C 之间,残渣率随着液化温度升高而降低;液化时间介于 30 ~ 90 min 之间,随液化时间的延长,残渣率呈下降趋势。较高的反应温度和足够的反应时间是促进玉米秸秆完全液化的必要条件。但其中反应温度在 160 ~ 170 °C 之间对残渣率的影响趋向缓和,液化时间在 60 ~ 90 min 对残渣率的影响也远低于液化时间在 60 min 以下的处理。玉米秸秆是由纤维素、半纤维素和木质素组成的具

表 4 回归方程偏回归系数的估计值及方差分析  
Tab. 4 Estimated value and variance analysis of partial regression coefficient of regression equation

参数	标准	<i>t</i> 检验	$P_r >  t $	
估计值	误差			
$X_1$	-8.911 214	4.118 198	-2.16	0.045 9
$X_2$	3.994 151	2.015 519	1.98	0.065 0
$X_3$	-0.780 240	6.046 558	-0.13	0.898 9
$X_4$	-34.361 429	61.569 250	-0.56	0.584 5
$X_1^2$	0.031 613	0.013 003	2.43	0.027 2
$X_2 X_1$	-0.019 258	0.011 589	-1.66	0.116 0
$X_2^2$	0.006 950	0.005 779	1.20	0.246 6
$X_3 X_1$	0.022 375	0.034 767	0.64	0.529 0
$X_3 X_2$	-0.052 217	0.023 178	-2.25	0.038 7
$X_3^2$	0.147 051	0.052 012	2.83	0.012 1
$X_4 X_1$	-0.215 250	0.347 666	-0.62	0.544 5
$X_4 X_2$	-0.380 167	0.231 778	-1.64	0.120 5
$X_4 X_3$	-1.329 500	0.695 333	-1.91	0.073 9
$X_4^2$	19.935 119	5.201 181	3.83	0.001 5
模型	14	7 004.19	500.30	
剩余	16	773.58	48.35	$F = 10.35$
总和	30	7 777.77		

有超分子结构的有机物质,液化试剂需要得到足够的活化能后才能克服高分子的空间位阻而接近反应部位实现相应的化学反应。但是随着液化温度的升高,液化反应的逆反应,例如缩醛聚合反应和酯化聚合反应也得到加强,反应时间越长聚合反应的程度也越高。对液化产物缩聚反应的机理已经有较多的研究<sup>[3,6]</sup>。

#### 4.2 液化温度和玉米秸秆质量对残渣率的影响

液化温度和玉米秸秆质量对残渣率的影响回归方程为

$$Y = 11.8657 - 6.7350X_1 + 3.1613X_1^2 + 3.6763X_3^2 + 1.1188X_1X_3 \quad (3)$$

如图 2b 所示,在本试验反应条件下,液化剂碳酸乙烯酯质量固定为 100 g,玉米秸秆质量为 10 ~ 30 g。液化温度和玉米秸秆质量的协同作用对残渣率的影响较明显,残渣率在液化温度变化过程中有最小值,在玉米秸秆质量变化过程中也有一个最小值,残渣率的最低值接近响应面的中心区。试验结果揭示,当反应体系中玉米秸秆质量小时,反应温度升高液化反应趋向彻底,逆向聚合反应影响相对较小。但是当体系中玉米秸秆质量增大的情况下,反应物、反应液化中间产物运动阻力增大,聚合甚至碳化现象增多,又出现不利于液化反应的问题。试验

结果为玉米秸秆液化反应器设计过程中强化搅拌提出了警示。

#### 4.3 液化温度和催化剂质量对残渣率的影响

液化温度和催化剂质量对残渣率的影响回归方程为

$$Y = 11.8657 - 6.7350X_1 + 3.1613X_1^2 + 4.9838X_4^2 - 1.0762X_1X_4 \quad (4)$$

如图 2c 所示,在本试验反应条件下,液化剂碳酸乙烯酯质量固定为 100 g,催化剂 98% 的浓硫酸质量介于 1.5 ~ 3.5 g 之间,液化温度和催化剂质量的协同作用较明显,残渣率在液化温度变化过程中有最小值,在催化剂质量变化过程中也有最小值,从响应面的走向来看,残渣率的最低值在响应面的中心区。对试验结果的解释是,当液化温度超过 160℃、催化剂质量大于 3 g 后,玉米秸秆液化过程中,酚醛缩合、羟醛缩合以及酯化缩合反应的速率随着催化剂质量增加和反应时间的延长而有明显的加快。因此控制液化反应的条件以及设法阻滞液化产物的二次缩合反应是未来要突破的重点。

#### 4.4 液化时间和玉米秸秆质量对残渣率的影响

液化时间和玉米秸秆质量对残渣率的影响回归方程为

$$Y = 11.8657 - 0.8300X_2 + 1.5638X_2^2 + 3.6763X_3^2 - 3.9162X_2X_3 \quad (5)$$

如图 2d 所示,在本试验反应条件下,液化时间和玉米秸秆质量的协同作用具有 2 种不同的情况:当玉米秸秆的质量很小时,延长反应时间反而促进缩合反应,增加残渣率;而当玉米秸秆质量较大时,则在一定范围内延长液化时间非常必要。试验结果表明,当生物质被完全液化之前,玉米秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素的醇解反应在一定程度上优先于液化产物的缩合反应。这是木质纤维素快速液化可行性的化学依据。

#### 4.5 液化时间和催化剂质量对残渣率的影响

液化时间和催化剂质量对残渣率的影响回归方程为

$$Y = 11.8657 - 0.8300X_2 + 1.5638X_2^2 + 4.9838X_4^2 - 2.8512X_2X_4 \quad (6)$$

如图 2e 所示,当催化剂质量不足时,液化反应基本无法实现,曲线反映的是一个玉米秸秆先部分水解,而后碳化缩合的情况;只有当催化剂质量较大时,再次表现为残渣率随液化时间的延长呈先下降,随后又由于缩合反应出现残渣率再上升趋势,符合木质纤维素类生物质液化的基本规律。

#### 4.6 玉米秸秆质量和催化剂质量对残渣率的影响

液化时间和催化剂质量对残渣率的影响回归方

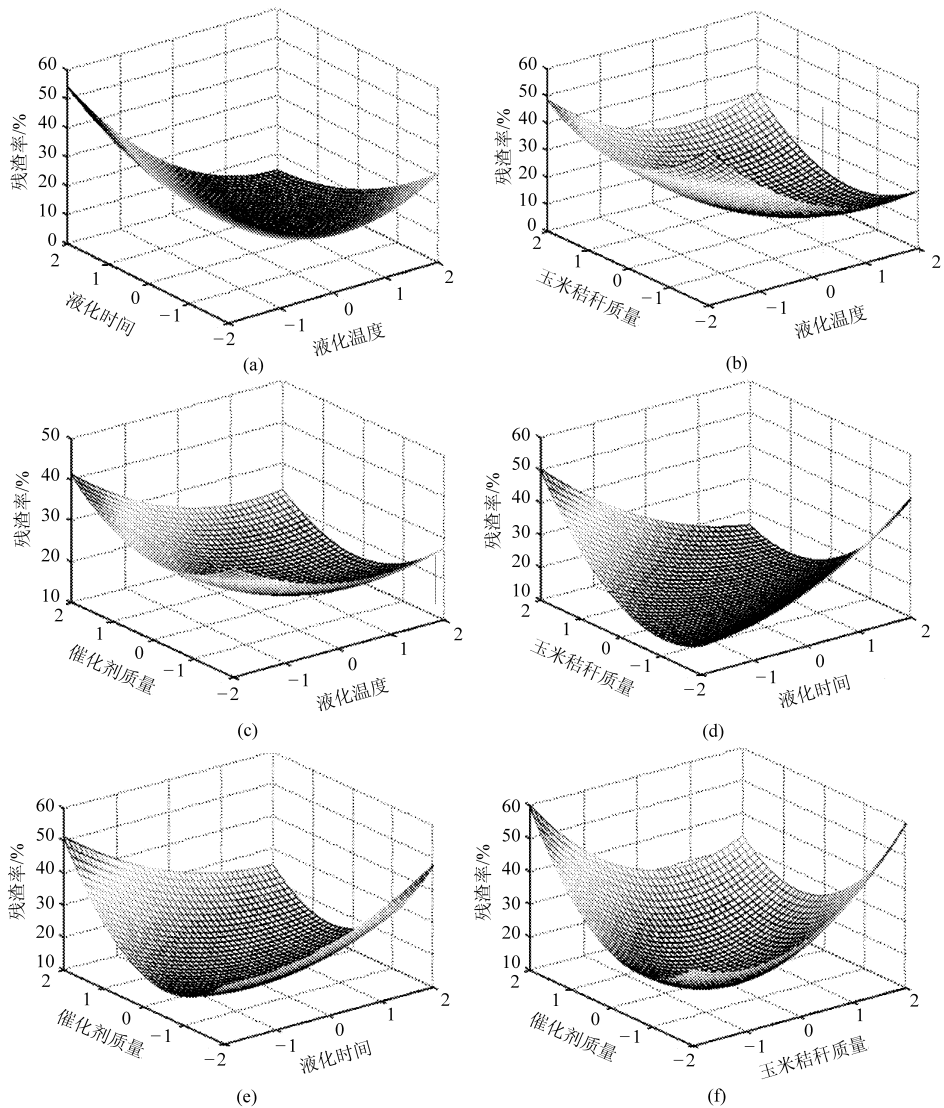


图2 玉米秸秆液化反应条件参数对液化产物残渣率的响应面分析

Fig. 2 Response surface analysis of relationship between unliquefied residue and processing parameters

程为

$$Y = 11.8657 + 3.6763X_3^2 + 4.9838X_4^2 - 3.3238X_3X_4 \quad (7)$$

如图2f所示,玉米秸秆质量和催化剂质量的协同作用非常明显。催化剂质量很小时,总体趋势是液化反应不能顺利实现,表现以碳化为主的倾向。催化剂质量较大时,玉米秸秆质量过大或过小都不利。残渣率的最小值在响应面的中心区。问题的实质仍然是催化剂质量与液化反应及其逆反应的相互关系。

玉米秸秆的液化过程是一个由纤维素、半纤维素和木质素的醇解反应和液化产物酚醛缩合、羟醛缩合和酯化缩合的聚合反应组成的复杂反应过程。但在相对温和的反应条件下,液化反应一定程度上优先于液化产物的缩合反应。综合对图2的响应面分析结果,表明了液化温度、液化时间、玉米秸秆质量、催化剂质量等4个工艺参数之间的交互作用。

同时表明可以通过对多参数进行系统的优化调节促进液化过程,阻滞逆向缩合来提高玉米秸秆的液化效率。当然强化搅拌,避免反应物因缩合、碳化而结焦的现象也是在今后的木质纤维素类生物质常压快速液化设备设计制造过程中必须给予关注的问题。

通过响应面分析,用回归方程求极值,找出玉米秸秆常压快速液化最优工艺为:液化剂质量100g,液化温度158℃,液化时间63min,玉米秸秆质量17g,催化剂质量2.7g时,其常压快速液化的残渣率达到最小值0.2%(预测值)。

#### 4.7 玉米常压快速液化的综合效益分析

玉米秸秆资源丰富,容易收集。本试验结果证明优化后的液化条件,玉米秸秆几乎可以完全被液化,成为高活性的多羟基化合物或玉米秸秆多元醇。

玉米秸秆多元醇可以替代石油基的聚酯多元醇用于聚酯型高分子聚合物和聚氨酯泡沫材料的合成,具有降低上述工业产品生产对石油资源的依赖

性;由于液化产物的结构保留了碳水化合物的部分特征,因此具有生物可降解特性<sup>[15]</sup>。

玉米秸秆多元醇的开发具有提高玉米秸秆经济价值的潜力,因此也可以发展成为农民增收的有效途径。

## 5 结束语

本试验借助 SAS 软件,采用二次正交旋转组合设计,并通过响应面分析法建立了液化条件包

括液化温度、液化时间、玉米秸秆质量、催化剂质量对玉米秸秆常压快速液化残渣率影响的二次多项数学模型,此模型具有较高的拟合度,显示上述 4 因素是控制玉米秸秆液化效率的主导性关键因素。在促进纤维素、半纤维素和木质素醇解为主导性反应的液化反应的同时,抑制液化产物以酚醛缩合、羟醛缩合和酯化缩合为主导性反应的逆向缩合反应是提高木质纤维素类常压快速化学液化的突破口。

## 参 考 文 献

- 1 Thigpen P L, Berry W L. Liquid fuel from wood by continuous operation of the alban, oregon biomass liquefaction facility [A]. Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes VI. Lake Buena Vista, FL., 1982; 1 057 ~ 1 095.
- 2 Yu S M. Solvolytic liquefaction of wood under mild conditions[D]. Berkeley: University of California; 1982.
- 3 湛凡更,涂宾,卢卓敏. 麦草催化热化学液化产物的组成分析[J]. 林产化学与工业, 2003, 23(1): 78 ~ 82.
- 4 Yamada T, Ono H. Rapid liquefaction of lignocellulosic waste by using ethylene carbonate[J]. Bioresource Technology, 1999, 70(1): 61 ~ 67.
- 5 Rezzoug S A, Capart R. Assessment of wood liquefaction in acidified ethyleneglycol using experimental design methodology [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(5): 781 ~ 792.
- 6 涂宾,卢卓敏,湛凡更. 麦草的催化热化学液化研究 I. 反应条件对液化的影响[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(2): 25 ~ 31.  
Tu Bin, Lu Zhuomin, Chen Fangeng. Thermochemical liquefaction of wheat straw I. effects of reaction conditions [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2002, 10(2): 25 ~ 31. (in Chinese)
- 7 童朝晖. 麦草液化及其机理研究[D]. 天津:天津轻工业学院, 2000.
- 8 Sokhansanj S, Turhollow A, Cushman J, et al. Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 23(5): 347 ~ 355.
- 9 Kim S, Bruce E Dale. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: bioethanol and biodiesel[J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 29(6): 426 ~ 439.
- 10 阎文圣,陈颖. 对玉米秸秆综合利用的探讨[J]. 中国农机化, 2003(3): 12 ~ 13.
- 11 谢涛,湛凡更,詹怀宇. 木材液化及其在材料中的应用[J]. 纤维素科学与技术, 2004, 12(2): 47 ~ 53.  
Xie Tao, Chen Fangeng, Zhan Huaiyu. Liquefaction of wood and its application as polymer materials [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2004, 12(2): 47 ~ 53. (in Chinese)
- 12 Kurimoto Y, Takeda M, Koizumi A, et al. Mechanical properties of polyurethane films prepared from liquefied wood with polymeric MDI[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(2): 151 ~ 157.
- 13 Yan Yongbin, Hu Mingming, Wang Zhihua. Kinetic study on the liquefaction of cornstalk in polyhydric alcohols [J]. Industrial Crops and Products, 2010, 32(3): 349 ~ 352.
- 14 刘玉环,阮榕生,林向阳,等. 玉米秸秆液化制备生物高聚物材料的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 116 ~ 120.  
Liu Yuhuan, Ruan Roger, Lin Xiangyang, et al. Preparation of biopolymers from liquefied corn stover [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 116 ~ 120. (in Chinese)
- 15 Yu Fei, Liu Yuhuan, Pan Xuejun, et al. Liquefaction of corn stover and preparation of polyester from the liquefied polyol [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2006, 130(1 ~ 3): 574 ~ 585.