

文章编号:1006-3080(2013)04-0427-06

# 产业化工况下木质纤维素生物炼制过程的流程模拟

乔庆安, 张 建, 鲍 杰

(华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** 针对产业化规模的木质纤维素生物炼制工艺, 在 Aspen plus 流程模拟平台上建立了全过程流程模拟模型。构建了木质纤维素生物炼制中涉及物质的全组分物性数据库, 建立了 Aspen plus 平台上的严格热力学流程模拟模型; 对年加工 300 000 t 玉米秸秆原料生产纤维素乙醇的产业化装置进行了严格流程模拟计算, 从节能减排角度对纤维素乙醇生产过程中的新鲜水用量、废水减排和蒸汽能耗等工程问题进行了分析, 并给出了积极的节能减排解决方案。该模型可以为产业化纤维素乙醇生产技术的 process design、操作优化以及技术经济评价提供设计和优化工具。

**关键词:** 木质纤维素生物炼制; 纤维素乙醇; Aspen plus; 流程模拟; 生物质数据库

**中图分类号:** TQ018

**文献标志码:** A

## Flowsheet Simulation of Industrial Scale Biorefining Processes of Lignocellulose

QIAO Qing-an, ZHANG Jian, BAO Jie

(State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Lignocellulose biorefining has great potentials of feedstock supply and product market in the major agricultural countries. The flowsheet simulation model for the industrial scale biorefining process of cellulosic ethanol production using lignocellulosic feedstocks was established. The physical property database was established based on the materials analysis and parameter estimation methods for the biomass components involved in the lignocellulose processing. The biorefining plant with the processing capacity of 300 000 t corn stover annual for production of fuel ethanol was simulated using the established Aspen plus model and the water and energy consumption of the processes was analyzed. The whole flowsheet balance of the mass and enthalpy data were calculated and used for the design of the processes. The model can be used in the future industrial plants for the process design, operation optimization and economic evaluation.

**Key words:** lignocellulose biorefinery; cellulosic ethanol; Aspen plus; flowsheet simulation; biomass physical data

收稿日期: 2012-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”计划(2011CB707406); 国家“863”项目(2012AA022301); 国家自然科学基金(20976051); 教育部博士点基金(20090074110013); 中国博士后基金(2011M500742/2012T50380/2012M520850); 中央高校基本科研业务费专项资金(WF0913005/1114054/1214025); 上海市重点学科建设项目(B505)

作者简介: 乔庆安(1964-), 男, 吉林农安人, 博士生, 主要从事新能源与化工过程方向研究。E-mail: jh\_qiaoqa@petrochina.com.cn

通信联系人: 鲍 杰, E-mail: jbao@ecust.edu.cn

应用 Aspen plus、ProII 等大型软件进行流程模拟已经成为过程开发、设计、控制、优化等过程工业的常规手段,木质纤维素生物炼制过程的流程模拟也是主要的研究方向之一。Galbe 和 Zacchi<sup>[1]</sup> 在 Aspen plus 平台上对纤维素酶解与发酵生产乙醇的过程进行了尝试,过程中采用较为简明的物性数据库和简化的工艺过程流程模拟模型,对过程废水的循环进行了设计;Byers 等<sup>[2]</sup> 在 Aspen plus 平台上对木屑的稀酸水解工艺和酸回收工艺进行了模拟,并对水解液发酵生产丙酮/丁醇的过程建立了简化模型;Kou 等<sup>[3]</sup> 在 Aspen plus 平台上对生物质的热化学转化过程进行了模拟研究。以上模型所采用的生物质物性数据库较为简单,模拟的实际工艺对象高度简化,也没有实验或工业操作数据的支持,仅可以视为初步的过程设计尝试。

2001 年,美国国家可再生能源实验室(NREL)推出了基于稀酸预处理的玉米秸秆生产纤维素乙醇的过程,在 Aspen plus 平台上建立了年处理量 600 000 t 玉米秸秆的过程模型,并应用该模型进行了技术经济评价<sup>[4-5]</sup>。2011 年,NREL 推出了该模型的更新版,根据 21 世纪前 10 年科研和技术的进步对 2001 版模型进行了修正和更新<sup>[6-7]</sup>。NREL 的 Aspen plus 模型是设计型的,生物质物性数据库较为可靠,但是 NREL 模型属于美国能源部的内部资源,模型所有重要细节没有公布,没有相应的学术论文发表,因而无法应用于美国联邦政府项目之外的所有工业示范和产业化项目。另外,NREL 模型本质上仍是一个普适性的设计型模型,不能应用于特定的过程设计和技术经济评价,对生物炼制中的物耗、能耗、废水排放等指标也缺乏相应的分析。因此,针对新的过程技术目标,研发内容开放的 Aspen plus 流程模拟系统,并将其应用于研发、中试、工业示范、产业化进程设计、技术经济评价和过程优化,是木质纤维素生物炼制领域极为重要的基础性工作之一。

在我们的前期工作中,已经对 Aspen plus 平台上的日产 1 kg 纤维素乙醇的生物炼制微型工厂的流程模拟进行了初步探索<sup>[8]</sup>。本研究采用我们前期研究开发的干法生物炼制技术路线<sup>[9-12]</sup>,以年处理 300 000 t 玉米秸秆原料年产 50 000 t 纤维素乙醇产业化装置为对象(日产燃料乙醇 155 t),对干法生物炼制技术在 Aspen plus 流程模拟平台上进行了严格的计算机流程模拟,从节能减排角度对纤维素乙醇生产过程中的新鲜水用量、废水减排和蒸汽能耗等工程问题给出了积极的解决方案。

## 1 模型对象

本文的流程模拟过程为典型的木质纤维素生物炼制加工,装置整体规模为年加工 300 000 t 玉米秸秆,产品为年产 50 000 t、纯度为 99.5%(质量分数,下同)的燃料乙醇,其中发酵液乙醇质量分数达到 7%以上,年操作时间为 8 000 h。原料为 2011 年秋季收获于吉林省的玉米秸秆,其组成如表 1 所示。拆包、粉碎、除尘后的玉米秸秆原料经过稀硫酸预浸,再通过极限低水用量的高温干式稀酸预处理,得到适于纤维素酶水解的原料;生物脱毒脱除预处理物料所含的糠醛、羟甲基糠醛、乙酸等抑制物后,经中和、磨浆后进入同步糖化与发酵反应器,在纤维素酶的作用下酶解得到可发酵单糖,同时在酿酒酵母的作用下生成乙醇和二氧化碳;发酵液经过固液分离后,液体进入乙醇精馏系统进行二次精馏,获得的含乙醇 90%以上的溶液,之后进入分子筛脱水工段生产纯度在 99.5%的燃料乙醇;固液分离后的固体进入锅炉焚烧生产蒸汽,供预处理和精馏工段使用。流程中,工段 1 为秸秆的前处理工段(秸秆拆包、粉碎、除尘、输送),工段 2 为极限低水稀酸预处理工段,工段 3 为高固体含量同步糖化与发酵工段(Simultaneous saccharification and fermentation, SSF),工段 4 为乙醇精制工段,工段 5 为残渣焚烧工段。

表 1 玉米秸秆原料组成

Table 1 Corn stover feedstock composition

Component	$w_{dry}/\%$
Cellulose	35.81
Xylan	19.53
Lignin	15.76
Arabinan	2.38
Galactan	1.43
Manan	0.60
Ash (Inorganics)	4.93
Acetate	1.81
Protein	3.10
Extract	14.65

工段 2(预处理工段)是间歇操作,但每一操作的时间较短(每一批次操作耗时 10~15 min),生产的预处理物料经过中间罐缓冲后可以给后续工段连续供料,因此可视为连续过程;工段 4(乙醇精馏工段)是连续生产过程;工段 3(同步糖化与发酵工段)是间歇过程,每一批次的操作需要 72 h(3 d)。实现 3

个工段的匹配是工艺设计的关键点之一。操作上的实施方案是以“1 个预处理反应器和 3*n* 个同步糖化与发酵反应器”作为 1 个操作单元。1 个预处理反应器每天为 3 个同步糖化与发酵反应器输送原料,每个同步糖化与发酵反应器接受 1 个预处理反应器 8 h 生产的原料,从而实现整体上的连续性操作。

## 2 流程模拟模型

### 2.1 模型假设

根据模拟对象的特殊性,对生物炼制过程进行了一系列的合理假设和简化,包括:

(1)根据过程连续性的等价性原则,全过程处于连续性操作状态;

(2)过程处于稳定运行状态,不考虑开车和停车状态;

(3)物料在输送过程中的压力降为 0,即忽略输送过程的能耗;

(4)不发生化学反应的固体组分不参与气液平衡计算;

(5)物流的温度变化在独立的换热器中实现,即将各操作模块的散热等价于在绝热的操作模块和独立的换热器中实现。

### 2.2 生物质组分物性数据库

完善的组分物性数据库是准确的流程模拟的前提。本文的流程模拟模型包括 46 个组分,涵盖了所有主要的生物质组分以及生物加工过程设计的组分(见表 2)。物性模型采用了严格的热力学模型。46 个组分中如水、乙醇等常规组分已经包括在 Aspen plus 标准组分数据库中;木质纤维素的关键组分如纤维素、木质素、木聚糖、寡糖、葡萄糖、木糖、阿拉伯糖等的数据库,包括常数数据库、饱和蒸汽压数据库、汽化热数据库、固体摩尔体积数据库、理想气体热容数据库、固体热容数据库、液相热容数据库等,则需通过实验、数据检索、参数估计、功能替代等方法建立。过程物系属于极性非电解质物系,选择 NRTL 作为流程模型的全局物性方法。

### 2.3 模型构建

流程模拟软件使用美国 AspenTech 的 Aspen plus (version 11.0)。根据年处理 300 000 t 玉米秸秆生产 50 000 t 纤维素燃料乙醇过程的流程设计要求,建立的 Aspen plus 平台上的流程模拟模型见图 1。数学模型包括 34 个单元操作设备,75 股物流,46 种组分。模型涉及到的单元操作有反应器、精馏塔、换热器、分离器等。

表 2 流程模拟组分列表

Table 2 Lists of the components in process simulation

Number	Component ID	Type	Formula ID
1	Ethanol	C	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O-2
2	Water	C	H <sub>2</sub> O
3	Glucose	C	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
4	Xylose	C	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
5	Cellulos	C	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
6	Xylan	C	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>
7	Lignin	C	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub> O <sub>x</sub>
8	Arabinan	C	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>
9	Galactan	C	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>
10	Mannan	C	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
11	Protein	C	NaCl
12	Gypsum	C	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
13	Extractil	C	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>
14	USS	C	NaCl
15	Arabiose	C	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
16	Galactos	C	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>
17	Mannose	C	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
18	Acetate	C	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> -1
19	Cellulas	C	CH <sub>x</sub> N <sub>x</sub> O <sub>x</sub> S <sub>x</sub> -2
20	Yeast	C	CH <sub>x</sub> O <sub>x</sub> N <sub>x</sub>
21	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
22	NaOH	C	NaOH
23	NaAc	C	NaAc
24	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
25	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
26	MgSO <sub>4</sub>	C	MgSO <sub>4</sub>
27	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	C	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
28	CSL	C	NaCl
29	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>
30	O <sub>2</sub>	C	O <sub>2</sub>
31	N <sub>2</sub>	C	N <sub>2</sub>
32	Soil	C	CaCO <sub>3</sub>
33	Succinic	C	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> -2
34	Tryptone	C	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
35	NaCl	C	NaCl
36	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	C	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O
37	NaHCO <sub>3</sub>	C	NaHCO <sub>3</sub>
38	NH <sub>4</sub> Cl	C	NH <sub>4</sub> Cl
39	Ca(OH) <sub>2</sub>	C	Ca(OH) <sub>2</sub>
40	Suc-Ca	C	CaCO <sub>3</sub>
41	CaSO <sub>4</sub>	C	CaSO <sub>4</sub>
42	CS	NC	
43	Ecoli.	C	CH <sub>x</sub> O <sub>x</sub> N <sub>x</sub>
44	CaCl <sub>2</sub>	C	CaCl <sub>2</sub>
45	Furfural	C	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>
46	Glycerol	C	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>

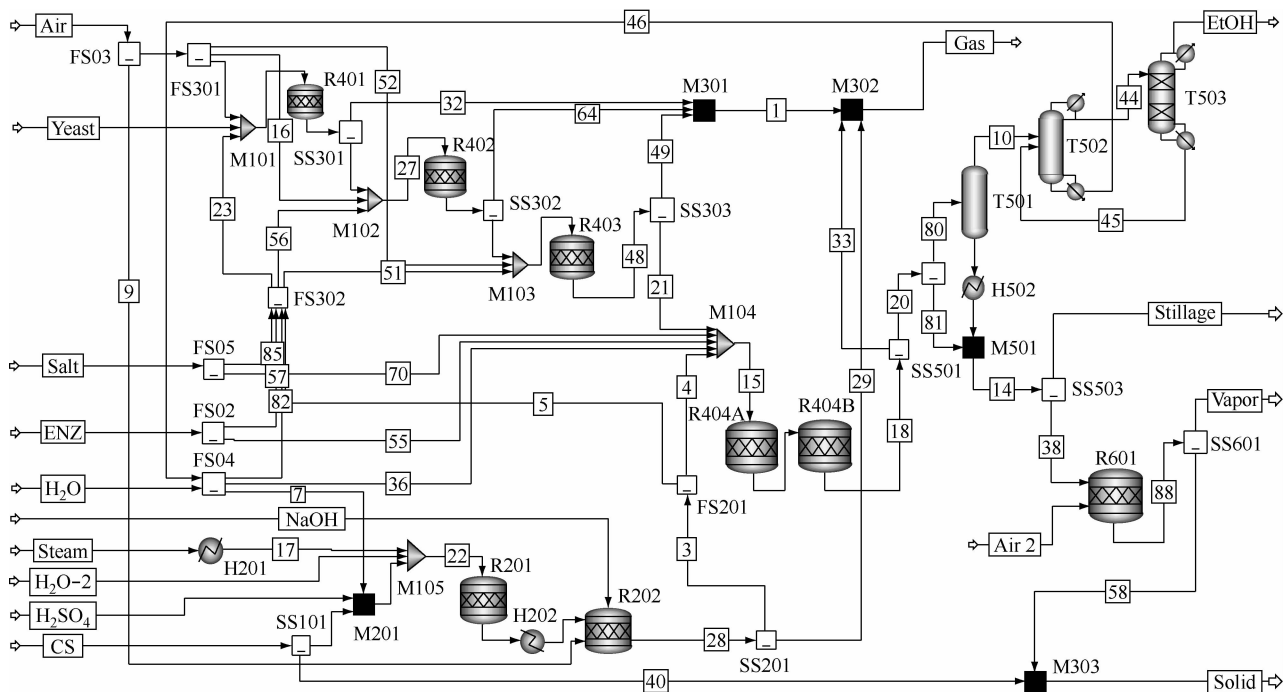


图1 Aspen plus 流程模拟模型

Fig. 1 Process simulation model of lignocellulose biorefinery based on Aspen plus

玉米秸秆进料流股 CS 经过前处理系统 SS101 实现原料尺寸的降低,除砂、除灰,脱除原料中的杂质。杂质流股 40 进入固体成型模块 M303 后与焚烧炉形成灰渣流股 58 混合后作为固废流股 Solid 排除。硫酸流股  $H_2SO_4$  经工艺水流股 7 稀释后,与前处理后的原料流股 6 混合进入预处理反应器 R201,高温蒸汽流股 17 用蒸汽枪打入 R201,在螺旋式搅拌下实现均匀混合。模块 M105 是虚拟的混合器,用于计算进入 R201 的组分组成。在 R201 中的物料  $190\text{ }^\circ\text{C}$  下反应 3 min 后减压并卸出物料,经换热器 H202 降温后进入生物脱毒反应器 R202。

预处理后物料在 R202 中接种树脂枝胞霉菌 *A. resiniae* ZN1,通入一定量空气流股 9,进行固体发酵的生物脱毒反应,脱除预处理过程形成的各类抑制物小分子。脱毒的预处理物料流股 3 分别进入同步糖化与发酵模块(SSF) R404A 和 R404B 进行纤维素的糖化、乙醇发酵以及种子培养系统。同步糖化与发酵模块的流出物料 18 进入后续粗馏塔 T501、精馏塔 T502、分子筛脱水塔 T503 进行乙醇提纯,获得纯度为 99.5% 的燃料乙醇产品流股 EtOH。

### 3 产业化规模生物炼制过程的物耗、能耗和工况分析

#### 3.1 过程对象

在建立的 Aspen plus 流程模拟模型上物耗、能

耗和操作状态进行了工况分析。过程基本参数包括:玉米秸秆原料物流 37.5 t/h,燃料乙醇产品物流 6.493 t/h,预处理过程固、液质量比为 1:1,同步糖化与发酵过程固体的质量分数为 30%,纤维素酶用量(相对于干物质原料)为 7 FPU/g,纤维素到葡萄糖的转化率为 85%,葡萄糖到乙醇的转化率为 90%,木糖到乙醇的转化率为 40%。

#### 3.2 过程水耗分析

木质纤维素生物炼制的新鲜水用量主要在预处理和同步糖化与发酵两个工序,废水排放主要出现在预处理、脱毒和发酵 3 个工序。目前工业示范项目所使用的主流预处理技术的废水排放量一般都是木质纤维素固体量的 6~10 倍;脱毒过程所使用的水洗、过碱化调节等手段不可避免地伴随着大量富含复杂抑制物组分的废水产生;发酵过程的废水排放则是发酵工业的常态,低浓度纤维素乙醇生产过程的废水排放更是粮食乙醇废水排放的数倍<sup>[13-15]</sup>。考虑到未来的纤维素乙醇工厂都是地处生物质资源丰富的农村地区,加之运输半径限制所导致的生产规模较小,废水处理系统完善程度差,废水排放所带来的环境问题必将更为严重和难以控制。因此,在研发阶段达成极限低量的废水排放指标,对未来纤维素乙醇产业的正常运作和可持续发展具有特别重要的意义。

本文的产业化规模生物炼制过程的详细水耗分析数据见表 3。每生产 1t 燃料乙醇产品输入水物

表3 每吨燃料乙醇生产过程的水平衡

Table 3 Water balance per ton of fuel ethanol product

Items		m/t
Water-in	Fresh water <sup>1)</sup>	3.696 3
	Fresh steam	1.771 1
	Water in CS	0.753 3
	Water in H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.002 9
	Water in NaOH	0.462 0
	Water in ENZ <sup>2)</sup>	0.232 6
	Water in salt	0.231 0
	Water in yeast	0.001 0
Total water-in		7.150 2
Water-out	Water in waste water	4.848 9
	Water in waste residue <sup>3)</sup>	2.078 1
	Water in EtOH	0.004 8
Total water-out		6.931 8
Water reacted (Water consumption)	R-404	0.183 1
	R-201	0.132 8
	R-401	5×10 <sup>-5</sup>
	R-402	0.000 5
	R-403	0.004 6
	R-202	0.102 6
Total water reacted		0.218 4

1) Water used in the pretreatment process and water used in the SSF process. These are two different streams shown in Fig. 1

2) ENZ represents the cellulase enzyme stream shown in Fig. 1

3) "Water in waste residue" refers to the waste water contained in the stream 38

流为 7.150 2 t, 输出水物流 6.931 8 t, 反应单元因反应失去水量 0.218 4 t。输入水量、输出水量、反应水量的总水平衡为零。从表 3 水耗分析数据可以看出, 本文所采用的干法生物炼制技术<sup>[9-12]</sup>, 预处理和生物脱毒工序基本没有废水排放, 同步糖化与发酵工序基本没有新鲜水添加, 每生产 1 t 燃料乙醇

所用新鲜水仅为 7.150 2 t (包括蒸汽冷凝水 1.770 2 t), 废水排量仅为 4.848 9 t (包括木质素残渣所含 2.078 1 t), 与最先进的用玉米原料生产燃料乙醇技术基本相当, 而与目前大多数的生物炼制技术相比, 用水量大幅度削减<sup>[4-6]</sup>。

### 3.3 过程能耗分析

木质纤维素生物转化的能耗直接表现在预处理过程的蒸汽消耗和低浓度乙醇的精馏能耗<sup>[9, 16-17]</sup>。预处理过程必须降低高温蒸汽的用量, 同时又必须提供足够的预处理强度, 以保证木质纤维素超分子结构的有效破坏, 使后续纤维素的酶水解得以有效实施。作为精馏进料的乙醇发酵液必须具有较高的乙醇浓度( $\varphi=8\% \sim 10\%$ ), 精馏能耗才有可能降低到工业装置运行可接受的水准<sup>[17]</sup>。达到较高乙醇浓度的先决条件是在起始的生物转化体系中加入尽可能多的木质纤维素原料和尽可能少的水, 但固体含量的提高会导致多相转化体系的黏度、抑制物含量、混合与传递能耗等急剧增加, 酶水解和乙醇发酵的效率又会受到严重抑制<sup>[18]</sup>。

纤维素乙醇的生产是一个能量转换过程, 即将玉米秸秆原料中低能量密度的固态纤维素组分转化成高能量密度的液态燃料乙醇。过程能耗的主要形式是蒸汽和电, 蒸汽用于预处理和精馏, 电耗主要用于原料粉碎和同步糖化与发酵的搅拌功耗。本文使用综合能耗的概念对过程能耗进行分析。综合能耗是过程消耗的不同形式的能量, 是经规定的单位和计算方法折算后的能量总和。根据国家综合能耗的计算通则(GB/T 2589—2008, DB21/1620—2008), 将过程蒸汽能耗和电能耗折算成标准煤用量后计算全流程能耗。详细的过程能耗分析数据见表 4。蒸汽和电耗总计耗能每吨燃料乙醇产品折合标准煤 1.183 4 t, 产生的蒸汽和燃料乙醇总计每吨燃料乙醇产品折合标准煤 2.565 2 t, 净能量产生为加工所用能耗的 1.16 倍。

表4 每吨燃料乙醇生产过程中的能耗分析

Table 4 Energy consumption and generation on the production process of per ton ethanol

Steam consumption					Electricity consumption			Total consumption in standard coal equivalent/t	
Reboiler heat duty/MJ	Heat duty (H201)/MJ	Total/MJ	Total energy carrier consumption/t	Total standard coal equivalent/t	SSF (R-404)/MJ	Energy carrier consumption/(kW·h)	Standard coal equivalent/t		
T-501	T-502								
15 045.4	4 334.1	5 018.1	24 397.5	6.483 5	0.833 8	10.24	2.844 4	0.349 6	1.183 4
Steam generations					Ethanol generation			Total generation in standard coal equivalent/t	
Total generation (R-601)/MJ	Total energy carrier generation/t	Total standard coal equivalent/t	Ethanol production (T-503)/t	Energy carrier consumption/t	Ethanol Standard coal equivalent/t				
32 005.6	8.505 3	1.093 8	1.000 0	1.000 0	1.471 4				2.565 2

## 4 结束语

利用流程模拟技术对木质纤维素生物炼制过程在 Aspen plus 平台上建立了全过程流程模拟模型。构建了木质纤维素生物炼制过程中涉及物质组分的全组分物性数据库,建立了应用于 Aspen plus 上的严格热力学意义上的流程模拟模型,并对年加工 300 000 t 玉米秸秆原料生产纤维素乙醇产业化装置进行了严格的计算机流程模拟,从节能减排角度对纤维素乙醇生产过程中的新鲜水用量、废水减排和蒸汽能耗等工程问题给出了积极的解决方案。该模型可以为面向大型工业规模的纤维素乙醇生产技术的过程设计、操作优化、以及技术经济评价提供基础的设计工具和操作优化方案。

本文所建的模型是一个较为初步的模型,随着产业化进程的逐步深入,仍需还进行大量的细节工作来完善和提高。首先,实际过程的诸多细节特别是木质纤维素前处理过程和后处理(分离)部分,仍需在实际过程确立之后对其进行逐一模块解析和构建,以及热模数据验证,确立符合实际体系的 Aspen plus 流程;其次,预处理、糖化、发酵等一系列过程需根据过程放大研究进展,在确立最佳的装置规模后,再对实现给定规模的产业化装置给出具体的流程设计;最后,利用获得的流程模拟结果进行过程的技术经济评价也是一个重要的内容。这些工作将在产业化工作开展的同时逐步完善。

## 参考文献:

- [1] Galbe M, Zacchi G. Simulation of ethanol production processes based on enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials using Aspen plus [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1992, **34-35**(1): 93-104.
- [2] Byers C. An Aspen simulation of fuel production by hydrolysis of woody biomass [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1988, **18**(1): 143-157.
- [3] Kou N N, Zhao F. Investigation of the feasibility and feedstock management strategies of a flexible biomass to ethanol plant via process simulation [R]. Florida, USA: Proceedings of The ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2009.
- [4] Aden A, Ruth M, Ibsen K, *et al.* Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover [R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2002, MP-425-20685.
- [5] Wooley R J, Putsche V. Development of an Aspen plus physical property database for biofuels components [R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 1996, NREL/MP-425-20685.
- [6] Humbird D, Davis R, Tao L, *et al.* Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol: Dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover [R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2011, NREL/TP-5100-47764.
- [7] Dutta A, Talmadge M, Hensley J, *et al.* Process design and economics for conversion of lignocellulosic biomass to ethanol: Thermochemical pathway by indirect gasification and mixed alcohol synthesis [R]. Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2011, NREL/TP-5100-51400.
- [8] 张怀庆, 乔庆安, 张建, 等. 纤维素乙醇微型工厂的 Aspen plus 流程模拟 [J]. *华东理工大学学报:自然科学版*, 2011, **37**(6): 697-705.
- [9] Zhang J, Chu D Q, Huang J, *et al.* Simultaneous saccharification and ethanol fermentation at high corn stover solids loading in a helical stirring bioreactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, **105**(4): 718-728.
- [10] Zhang J, Wang X S, Chu D Q, *et al.* Dry pretreatment of lignocellulose with extremely low steam and water usage for bioethanol production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(6): 4480-4488.
- [11] Zhang Jian, Zhu Zhinan, Wang Xiaofeng, *et al.* Biotoxification of toxins generated from lignocellulose pretreatment using a newly isolated fungus, *Amorphotheca resiniae* ZN1, and the consequent ethanol fermentation [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2010, **3**:26-41.
- [12] 张建, 楚德强, 于占春, 等. 低水用量约束下的高固体含量纤维乙醇生物加工技术策略 [J]. *生物工程学报*, 2010, **26**(7): 950-959.
- [13] Gerbens-Leenes P, Hoekstra A, Meer T V D. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply [J]. *Ecological Economics*, 2008, **68**(4): 1052-1060.
- [14] Himmel M, Ding S, Johnson D, *et al.* Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production [J]. *Science*, 2007, **315**(5813): 804-807.
- [15] Wyman C E, Dale B E, Elander R T, *et al.* Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(18): 1959-1966.
- [16] Galbe M, Zacchi G. Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production [J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2007, **108**: 41-65.
- [17] Jorgensen H, Vibe-Pedersen J, Larsen J, *et al.* Liquefaction of lignocellulose at high-solids concentration [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **96**(5): 862-870.
- [18] Olofsson K, Bertilsson M, Liden G. A short review on SSF—an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks [J]. *Biotechnol for Biofuels*, 2008, **1**: 7-21.