

文章编号:1006-3080(2011)06-0697-09

纤维素乙醇微型工厂的 Aspen plus 流程模拟

张怀庆¹, 乔庆安^{1,2}, 张 建¹, 张茂芬², 鲍 杰¹

(1. 华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237;

2. 中国石油吉林燃料乙醇有限责任公司, 吉林 132101)

摘要:在 Aspen plus 平台上对日产 1 kg 乙醇的纤维素乙醇微型工厂流程建立流程模拟模型, 并构建了完整的生物质组分物性数据库; 对微型工厂流程进行了基于微型工厂实验数据和严格热力学模型基础上的物料衡算和能耗计算, 并进行了水分回收分析和综合能耗折算。结果表明: 在纤维素乙醇微型工厂最大生产能力下, 用玉米秸秆生产 1 kg 纤维乙醇的水用量 2.595 7 kg, 蒸汽用量 3.605 4 kg, 废水量 8.061 6 kg, 均低于目前工艺水平下的玉米淀粉生产乙醇的水用量和废水量; 1 kg 乙醇消耗各种形式能量 36.515 2 MJ, 产出能量为 53.574 9 MJ, 能量产出大于能量投入; 1 kg 乙醇的综合能耗折合 1.826 9 kg 标准煤, 加工过程中的产出能量折合 1.828 0 kg 标准煤, 能量投入和能量产出基本平衡。

关键词:纤维素乙醇微型工厂; Aspen plus; 流程模拟; 水耗; 能耗

中图分类号: TQ018

文献标志码: A

Flowsheet Simulation of Cellulosic Ethanol Mini-plant on Aspen plus Platform

ZHANG Huai-qing¹, QIAO Qing-an^{1,2}, ZHANG Jian¹, ZHANG Mao-fen², BAO Jie¹

(1. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and

Technology, Shanghai 200237, China; 2. Jilin Fuel Alcohol Co. Ltd, Petro China

Corporation, Jilin 132101, China)

Abstract: The flowsheet simulation model of the cellulosic ethanol mini-plant with the capacity of 1 kg/d ethanol production from corn stover and the physical property database were developed on the Aspen plus platform. The mass balance and energy balance of the mini-plant process were calculated and the results show that, producing 1 kg cellulosic ethanol required 2.595 7 kg fresh water and 3.605 4 kg steam, 8.061 6 kg waste water under the maximum productivity of the cellulosic ethanol mini-plant, which was lower than the consumption of the corn based ethanol process; required energy input 36.515 2 MJ and generated 53.574 9 MJ, which means that the energy generation was greater than the energy consumption; the integrated energy consumption was 1.826 9 kg standard coal, while the energy generation during this process was 1.828 0 kg standard coal, which suggested that there was an energy balance between the output and the input.

收稿日期: 2011-05-23

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2011CB707406); 国家自然科学基金(20976051); 教育部博士点基金(20090074110013); 中央高校基本科研业务费专项资金(WF0913005); 上海市重点学科建设项目(B505); 科技部生物反应器工程国家重点实验室专项基金(2060204)

作者简介: 张怀庆(1984-), 男, 山东聊城人, 硕士生, 主要从事化工过程模拟方向研究。E-mail: belinoctober@gmail.com

通讯联系人: 鲍 杰, E-mail: jbao@ecust.edu.cn

Key words: cellulosic ethanol mini-plant; Aspen plus; flow-sheet simulation; water consumption; energy consumption

利用农作物秸秆、林业废弃物和能源作物等木质纤维素原料生产纤维素乙醇是目前生物能源领域重要的研究方向和产业发展趋势。木质纤维素生物转化生产纤维素乙醇的过程主要包括前处理、预处理、脱毒、同步糖化与发酵、乙醇分离纯化等工段,对这一过程进行流程模拟研究既可以实现对生产过程的数据分析、工艺设计和技术经济评价,也可以对不同生产工艺和工况进行比较和优化,是实现纤维素乙醇技术从实验室水平到工业化应用的必经步骤。

Aspen plus 流程模拟系统是应用最为广泛的大型过程的流程模拟软件,其完整的单元操作模块及完善的组分物性数据库可以实现对大多数加工工业的严格物料衡算和能量衡算^[1]。Galbe 和 Zacchi 利用 Aspen plus 对木质纤维素原料酶解生产乙醇工艺进行了过程模拟,通过循环过程废水以降低废水排放;同时,提出了通过循环发酵液来积累乙醇浓度,从而提高精馏进料中的乙醇浓度^[2]。Byers 利用 Aspen Plus 对木屑酸解生产丙酮/丁醇过程进行了流程模拟,分析确定了二步酸解过程中酸的回收速率对生产过程经济性的影响^[3]。Kou 等对多种生物质原料的热化学转化过程进行了研究,并评估了对该过程进行计算机模拟的可行性^[4]。美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)利用 Aspen plus 建立了木质纤维素原料生产燃料乙醇的过程设计和技术经济评价模型,分析纤维素乙醇生产过程中的平衡关系,并将其用于快速评价新技术的发展对过程设计和经济效益的影响^[5]。Aspen plus 流程模拟软件应用于木质纤维素转化过程的模拟,仍存在诸多不足之处:建立的流程模型组分物性数据库没有完全包含木质纤维素转化生产过程中涉及的所有组分;过程的收率、能耗、水耗和废水处理等指标没有实际过程或实验数据的对照;流程模型的能耗计算中没有对不同形式的能量消耗(如蒸汽、电能等)加以区分等。

本实验室利用农业废弃物——玉米秸秆为起始原料,建立了一个日产 1 kg 纤维素乙醇的纤维素乙醇微型工厂^[6]。本文以纤维素乙醇微型工厂中纤维素乙醇生产线为对象,在 Aspen plus 平台上建立了该生产过程的流程模拟数学模型;对纤维素乙醇加工过程中涉及的所有组分建立了严格热力学意义上的组分物性数据库;将纤维素乙醇微型工厂流程模

拟模型中最具代表性的精馏模块与 NREL 模型在相同操作条件下的运算数据进行了比较,验证了模型的有效性;通过建立的流程模型,分析了纤维素乙醇微型工厂生产 1 kg 乙醇的水用量、废水量、各工段能耗;针对纤维素乙醇加工过程中的能耗特点,利用国家综合能耗规范和地区发电煤耗标准,将纤维素乙醇微型工厂生产过程中各工段消耗的不同形式的能量折算成综合能耗进行比较。本文对纤维素乙醇产业的技术革新和经济评价具有重要的应用价值。

1 纤维素乙醇微型工厂生产流程及生产流程模型的建立

1.1 实验材料

模型中单元操作模块、操作参数均采用本实验室已经公开发表的数据^[7-9];微型工厂生产所用原料为 2007 年秋在吉林收获的玉米秸秆,粉碎至粒径为 5~10 mm,水洗除去沙土,烘干至恒重后密封保存;纤维素酶为杰能科 Accellerase 1000;生物脱毒所用菌株为本实验室筛选获得的煤油霉菌 *Amorphotheca resinae* ZN1;乙醇发酵所用菌株为本实验室诱变筛选得到的耐高温、耐抑制物的酿酒酵母菌 *Saccharomyces cerevisiae* DQ1;流程模拟软件为 Aspen plus release 11.1 (美国 AspenTech Inc.)。

1.2 纤维素乙醇微型工厂流程

纤维素乙醇微型工厂设在华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室内,目的是通过实际的微缩尺度工艺操作,为纤维乙醇工业示范装置的过程技术提供一个测试平台。纤维素乙醇微型工厂以玉米秸秆为原料,经过一套完整的生物炼制流程日产 1 kg 纤维素乙醇,同时利用乙醇发酵产生的 CO₂ 联产琥珀酸(日产 1 kg)。微型工厂生产流程(见图 1)主要分为 5 个工段:

原料储存工段(A100),目的是储存纤维素微型工厂全年生产所需要的玉米秸秆和经过预处理的玉米秸秆。

前处理工段(A200),目的是通过粉碎、清洗、压榨、烘干等工序,降低玉米秸秆的尺寸和去除秸秆中杂质,为预处理工段提供合格原料。

预处理工段(A300),目的是通过高温蒸汽和稀

酸的物理化学作用破坏木质纤维素结构,并以生物脱毒的方式降解预处理工段中产生的糠醛、羟甲基糠醛等发酵与酶解抑制产物,为糖化与发酵工段 A400 提供原料。

糖化与发酵工段(A400),目的是将脱毒后预处理原料进行同步糖化与发酵生产乙醇。分离精制工段(A500),目的是将发酵液中乙醇通过精馏塔进行分离纯化。

具体工艺参数包括:预处理反应器满载(干燥玉

米秸秆 0.8 kg),预浸固液质量比为 2 : 1,使用 $w = 2.5\%$ 的硫酸,在 190 °C 的条件下处理 3 min。在温度为 25 °C、湿度为 50%~60% 的条件下利用煤油霉菌 *Amorphotheca resinae* ZN1 进行生物脱毒 3~7 d。预酶解阶段在 50 °C 以补料的方式在 12 h 内加原料至固体质量分数达 30%,同步糖化与发酵在 37 °C 下持续 48 h;分离精制工段(A500)中精馏塔的塔板数为 20,将发酵液粗馏至乙醇纯度为 40%,再精馏分离至乙醇纯度为 92%~95%。

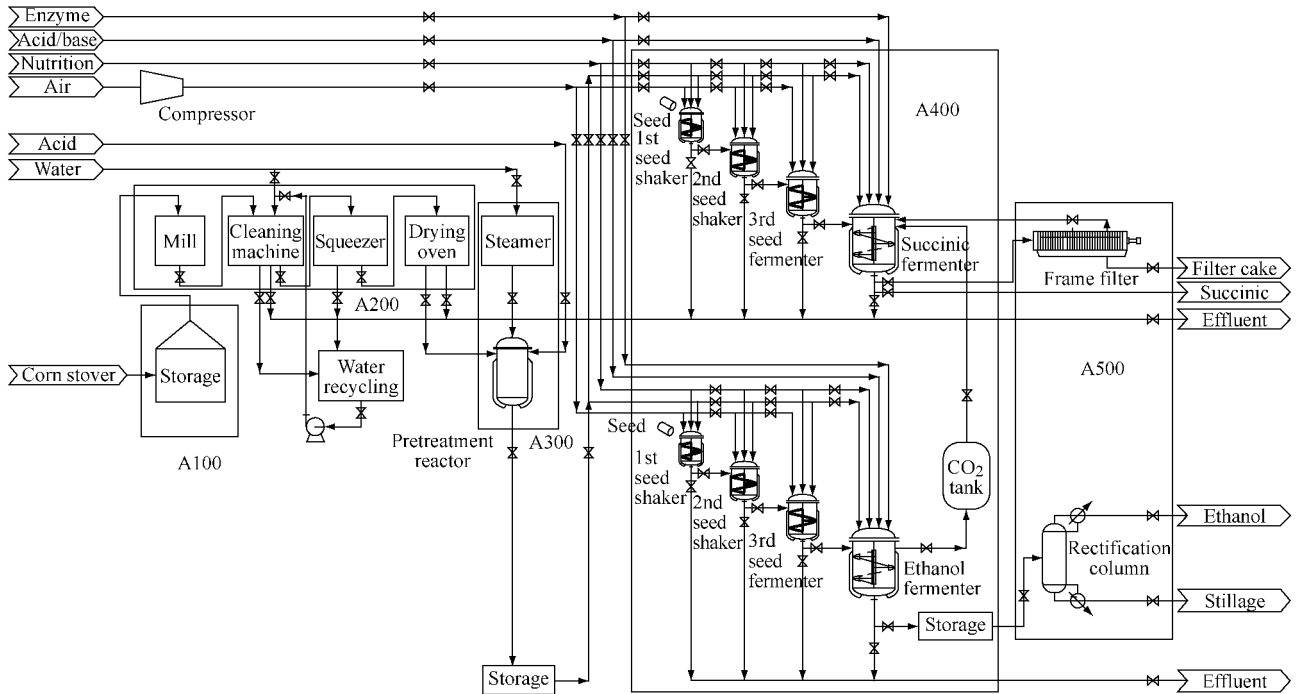


图 1 纤维素乙醇微型工厂生产流程图

Fig. 1 Flowchart of cellulosic ethanol mini-plant

1.3 Aspen plus 平台上的微型工厂流程模拟模型

纤维素乙醇微型工厂生产过程中的预处理、生物脱毒和同步糖化与发酵工序均为间歇生产,每完成一次生产需要 60 h。为了利用 Aspen plus 处理微型工厂的生产过程,将微型工厂的间歇生产过程物料和能量衡算的一次性数据折算为 60 h 内的连续过程小时流股数据,作为微型工厂 Aspen plus 模拟模型的流程基准。

根据纤维素乙醇生产过程特性,输入模型组分及生物质关键组物性数据和选择 NRTL 作为全局物性方法,将各个单元模块按纤维素乙醇生产工艺排列,根据纤维素乙醇微型工厂实际生产操作数据设置各单元模块参数,根据流程基准输入相应输入流股数据建立流程模型。流程模拟模型根据实际过程同样分成 5 个操作工段(见图 2,实际流程的原料储存工段 A100 未包括在模型中),各操作工段功

能描述如下:

前处理工段(A200):采用分离模块 SS101 表示简化的前处理工段。

预处理工段(A300):H201 为蒸汽发生器,R201 为预处理反应器,H202 为物料冷却水槽,R202 为生物脱毒反应器。SS201 为虚拟的气固分离设备,用于模拟生物脱毒过程中的气体挥发。

糖化与发酵工段(A400):R301 为糖化反应器,R401、R402 和 R403 为种子培养反应器,R404 为同步糖化与发酵反应器。流程模型中 SS301、SS302、SS303 为虚拟设备,用于模拟气液分离,H403 也为虚拟设备,用于模拟物料的自然冷却过程。

乙醇精馏工段(A500):T501 为粗馏塔,塔板数为 20。为了得到纯度为 99.5% 的燃料乙醇的能耗数据,在流程模型中增加了虚拟的精馏塔 T502 和分子筛吸附塔 SS504。

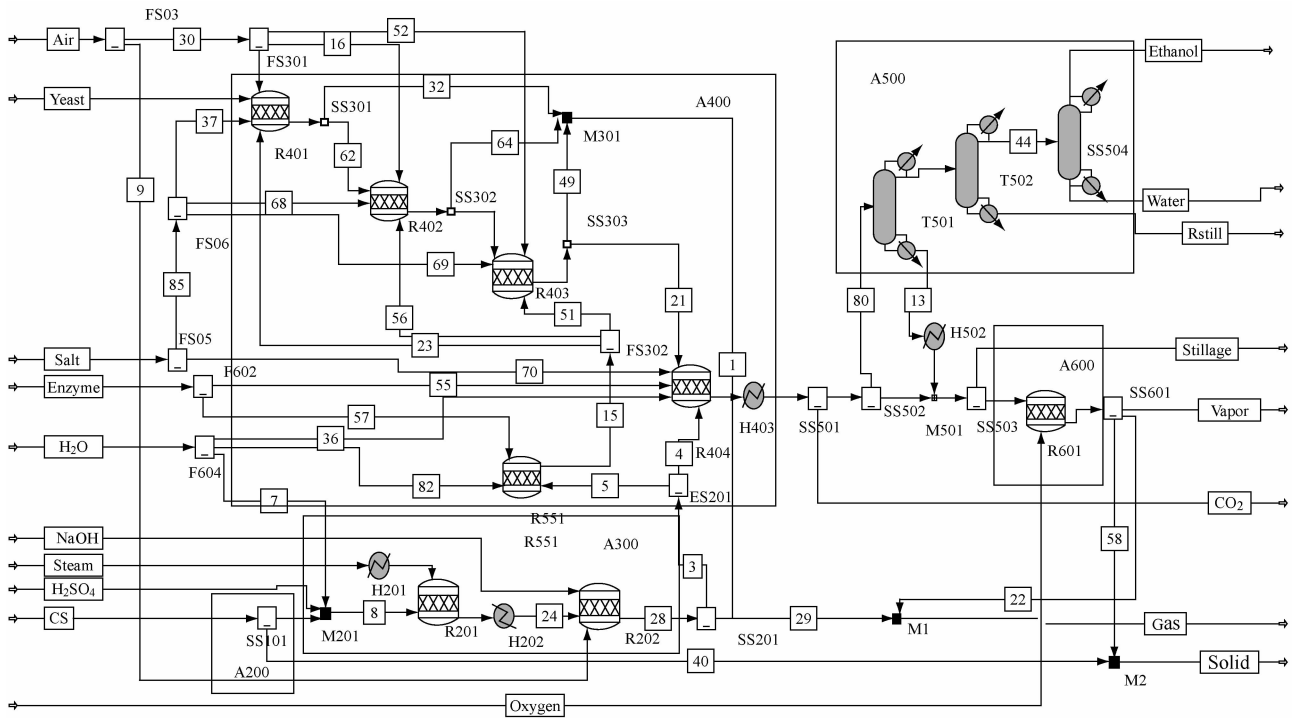


图 2 Aspen plus 平台上的纤维素乙醇微型工厂模型

Fig. 2 Simulation model of cellulosic ethanol mini-plant based on Aspen plus platform

燃烧工段(A600):此工段为虚拟流程,R601 为虚拟的蒸汽锅炉,用于木质素残渣燃烧热量的回收,作为纤维素乙醇生产过程中的能量产出。

1.4 微型工厂流程模拟模型单元操作模块的选择
 流程模拟模型单元操作模块的选择见表 1。选

择 Rstoic 反应模块作为预处理反应器、种子培养反应器、糖化以及同步糖化与发酵反应器的单元操作模块,根据微型工厂生产数据设定 Rstoic 反应模块中反应方程式和转化程度;选择 RadFrac 分离模块作为乙醇分离工段中粗馏和精馏的单元模拟模块。

表 1 单元操作模型选择

Table 1 Selection of unit operation model

Unit	Model ID	Model	Description
Sand/soil removal	SS101	Sep	Separator
Dilute-acid presoaking	M201	Mixer	Mixer
Steam generator	H201	Heater	Heat exchangers
Pretreatment reactor	R201	Rstoic	Toichiometric reactor
Biodetoxification reactor	R202	Rstoic	Stoichiometric reactor
Saccharification reactor	R301	Rstoic	Stoichiometric reactor
1st Seed shaker	R401	Rstoic	Stoichiometric reactor
2nd Seed shaker	R402	Rstoic	Stoichiometric reactor
3rd Seed fermentor	R403	Rstoic	Stoichiometric reactor
SSF reactor	R404	Rstoic	Stoichiometric reactor
Crude distillation tower	T501	Radfrac	Rigorous fractionation
Distillation tower	T502	Radfrac	Rigorous fractionation
Molecular sieve adsorption tower	SS504	Sep2	Separator
Solid-liquid separator	SS503	Sep	Separator
Burner	R601	Rstoic	Stoichiometric reactor

1.5 纤维素微型工厂流程模拟模型组分与关键组分物性数据库

流程模拟模型组分由玉米秸秆组分及纤维素乙醇加工过程中涉及的其他组分组成。其中玉米秸秆组分(质量分数)经实际分析为玉米秸秆干基 83.1%、水 12.6%、泥沙 4.3%。

通过查阅文献值以及使用 Aspen plus 内置的

物性参数估计功能,在模型中重新构建生物质组分的物性数据库,包括标量常数数据库、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,通过这些数据库为模型的物料、能耗计算提供物性数据,构建的生物质组分的物性数据库见表 2。

表 2 生物质组分的物性数据库

Table 2 Data base of physical properties

	分子量 (MW)	临界温度 (TC)/K	临界压力 (PC)/Pa	临界体积 (VC)/(10 ⁻³ cum · mol ⁻¹)	偏心因子 (OMEGA)	理想气体 生成热 (DHFORM)/ (J · mol ⁻¹)	理想气体 自由能 (DGFORM)/ (J · mol ⁻¹)	固体生成热 (DHSFRM)/ (J · mol ⁻¹)	固体自由能 (DGSFRM)/ (J · mol ⁻¹)	液体摩尔体积 (RKTZRA)/ (10 ⁻³ cum · mol ⁻¹)
Glucose	180.16	1 011.1	6 200 000	0.416 5	2.567 4	-1 256 903	-909.330			0.358 52
Xylose	150.132	890.42	6 577 700	0.342 5	2.304 2	-1 040 020 000				0.299 36
Cellulose	162.143 6							-976 362		
Xylan	132.117							-762 416		
Cellulase	22.839 8							-74.944		
Yeast	24.626 4							-130 500	-1 797 197	
Gypsum	172.168							-2 022 628		
Lignin	122.493							-1 592 659		

1.6 纤维素乙醇微型工厂生产过程中的水用量、废水量、能耗及综合能耗计算

水用量是指微型工厂生产过程中外加的新鲜水,包括预处理工段配制稀硫酸溶液用水和配制氢氧化钠溶液用水、同步糖化与发酵工段稀释用水,不包括玉米秸秆和其他原料夹带的水分。

废水量是指微型工厂生产过程中向外排出的废水。采用高预处理预浸比、高固体含量同步糖化与发酵的极低水用量策略,整个生产过程中仅在最终粗馏塔釜残液中出现废水(图 2 中流通股号为 STI-LAGE)。

能耗是指微型工厂各工段耗能的热量单位值(当量值),包括预处理工段的蒸汽能耗、同步糖化与发酵工段的搅拌能耗、乙醇分离工段的分离能耗、以及物料预热能耗。

综合能耗是指将微型工厂生产过程中消耗的不同形式的能量,按照国家标准和地方火力发电厂发电效率标准折算成以标准煤用量表示的综合能耗。微型工厂生产过程中各工段所投入的能量是以蒸汽和电的形式消耗的。相同数值下的蒸汽热能和电能的做功能力不同,不加以区别的能耗数据无法正确反映生产过程中能量消耗。为了定量衡量纤维素乙醇生产过程中消耗的蒸汽热能和电能的做功量,将蒸汽热能和电能根据国家 and 地方标准(GB/T

2589—2008, DB21/1620—2008)折算成以标准煤用量表示的综合能耗进行统一比较。表 3 为 GB/T 2589—2008 规定的各类不同能耗折算成标准煤用量的系数。不同时期和地域的火力发电厂的发电效率不同,表 3 中没有给出电力(等价值)的折合标准煤系数,表 4 采用地方标准——辽宁省供电煤耗指标基准值作为电力(等价值)的折合标准煤系数。

2 结果与讨论

2.1 纤维素乙醇微型工厂流程模拟模型验证

将微型工厂流程模拟模型中最具代表性的精馏模块与 NREL 模型^[6]精馏模块在相同的操作条件下的运算结果进行比较,验证本文建立模型的有效性。表 5 是微型工厂流程模拟模型和 NREL 模型的精馏计算结果。

分析表 5 可知,纤维素乙醇微型工厂模拟模型计算结果与 NREL 相近,表明本文建立的流程模拟模型与 NREL 模型具有较好的一致性。

2.2 纤维素乙醇微型工厂的纤维素乙醇流程模型物料平衡、水平衡和水回收

微型工厂最大生产能力下运转一次的物料平衡见表 6。微型工厂在最大生产能力下运转一次可处理 15.395 8 kg 玉米秸秆,生产出纤维素乙醇 2.043 2 kg。

表 3 能源折合标准煤参考系数(GB/T 2589—2008)^[10]

Table 3 Transformation coefficient for energy to standard coal (GB/T 2589—2008)

Energy sources	Average low heating value (B1)	Transformation coefficient for standard coal (B2)
Raw Coal	20.908 MJ/kg	0.714 3 kg/kg
Heating	—	0.034 12 kg/MJ
Power (Calorific value)	3.600 MJ/(kW·h)	0.122 9 kg/(kW·h)
Power (Equivalent value)	Calculate by the current year coal-fired power standard coal consumption	
Steam (Low pressure)	3 763 MJ/t	0.128 6 kg/kg

表 4 供电煤耗指标基准值(DB21/1620—2008)^[11]

Table 4 Power supply coal consumption index value(DB21/1620—2008)

Generator type	Coal consumption/ ($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	Coal consumption (desulfurization) (C_1)/($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
125 MW	359	366
200 MW	351	355
300 MW (Domestic)	337	339
300 MW (Import)	325	330

表 5 纤维素乙醇微型工厂流程模拟模型和 NREL 模型的精馏计算结果比较

Table 5 Comparisons of distillation operation between NREL model and the model in this study

	w					Density/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	Ethanol	Water	Acetate	CO ₂	Furfural	
NREL result	0.394 4	0.593 5	0.004 2	0	0.004 5	1.400 0
This study	0.397 1	0.589 9	0.003 8	0.000 1	0.008 9	1.453 1

纤维素乙醇微型工厂的水平衡见表 7。输入水分包括输入新鲜水(水用量)、输入物料含水、消耗蒸汽量(最终全部以冷凝水形式排出)。输入新鲜水即为纤维素乙醇微型工厂生产过程中水用量;物料含水是指各种输入物料自身含有的水分,如玉米秸秆含水、纤维素酶含水、营养盐母液含水等等;消耗蒸汽是指纤维素乙醇生产过程中消耗的蒸汽,这些蒸汽最终全部以冷凝水的形式排出。过程产水是指在纤维素乙醇生产过程产生和消耗的水分,包括燃烧室产生水和反应过程中生成水。燃烧室产生水是指

表 6 纤维素微型工厂的物料平衡表

Table 6 Material balance of the mini-plant operation

Input streams			Output streams		
Stream ID	Stream description	m/kg	Stream ID	Stream description	m/kg
CS	Corn stover	15.395 8	Ethanol	Ethanol	2.043 2
Enzyme	Enzyme	2.906 0	Stillage	Stillage from distillation	21.971 4
Steam	Steam (3 MPa)	7.366 5	Rstill	Distillate from the distillation	3.143 6
Water	Input water	14.090 2	Water	Water from the molecular sieve adsorption	0.142 8
Air	Air	0.813 1	Vapor	Steam from the burner	9.006 0
H ₂ SO ₄	98% H ₂ SO ₄	0.326 1	Solid	Solid residue	1.316 7
Oxygen	Oxygen	9.208 4	CO ₂	CO ₂	1.901 5
Yeast	Seeds	0.004 0	Gas	Waste gases	11.295 3
Salt	Nutrients	0.444 4			
NaOH	NaOH solution($w=20\%$)	1.330 0			
Total		51.884 6	Total		50.820 5

玉米秸秆残渣中碳水化合物燃烧时生成的水分。反应过程生成水是指各个工段生产过程中生成水。输出水分包括乙醇产品含水、精馏废液中水分、燃烧炉排出废蒸汽、精馏塔塔釜出料、分子筛脱附水分。无水乙醇含有 0.5% 的水分;燃烧室排出蒸汽是指送至燃烧炉燃烧的固体夹带水分蒸发而成的蒸汽和生物质残渣燃烧产生水;分子筛脱附水分是指分子筛吸附塔吸附精馏塔塔顶出料后解吸而脱除的水分。

为了降低微型工厂生产过程的水用量和废水量,本文将微型工厂生产过程输出水分根据水分品质回收利用。分子筛吸附塔脱附水(图 2 中流股 Water)和精馏塔塔釜出料(图 2 中流股 Rstill)作为同步糖化与发酵工段的稀释水分,粗馏塔精馏废液作为预处理工段配制稀硫酸溶液和氢氧化钠溶液的水分。微型工厂生产 1 kg 乙醇水用量、废水量和水回收后的水用量和废水量见表 8。

通过严格的物料衡算,未经水回收时纤维素微型工厂生产 1 kg 乙醇水用量为 6.896 3 kg、废水量为 12.362 1 kg。进行水回收后生产 1 kg 乙醇的水用量为 2.595 7 kg,废水量为 8.061 6 kg。经过水分回收,水用量和废水量分别减少了 62.3% 和 34.7%。玉米秸秆是以玉米为目标的农业生产过程中的废弃物,以玉米秸秆为原料生产纤维素乙醇过程中水用量可以看做是纤维素乙醇的水足迹(Water footprint),经计算纤维素微型工厂生产乙醇的水足迹是 0.087 6 m³/GJ,低于大多数化石燃料,远远低于其他新兴能源的水足迹^[12]。以玉米为原料生产 1 kg 乙醇的水用量大都为 3.8~18.9 kg 之间^[13]。因此,利用玉米秸秆生产乙醇不仅可以做到“不与人争粮,不与粮争地”,而且可以大大降低生产过程中的水用量,促进社会、经济和环境的可持续发展。

表 7 纤维素乙醇微型工厂生产过程水平衡

Table 7 Water balance of the cellulosic ethanol mini-plant

Input water	m/kg	Consumption	m/kg	Output	m/kg
Fresh water	14.090 2	Generation during the combustion	3.849 3	Ethanol product	0.010 2
Water in the feedstock	5.016 5	Consumption in the reaction	-0.496 8	Stillage	17.523 2
Steam condensation	7.366 5			Waste steam in the burner	9.006 0
				Water from the molecular sieve	0.142 8
				Stillage from the distillation tower	3.143 6
Total input	26.473 2	Total change	3.352 5	Total output	29.825 8

表 8 纤维素乙醇微型工厂生产 1 kg 乙醇水用量、废水量及水分回收

Table 8 Water usage, waste water and water recycle of the cellulosic ethanol mini-plant for 1 kg ethanol production

(kg · kg⁻¹)

	Water usage		Waste water generation
Dilute-sulfuric acid solution preparation(w_1)	2.171 3	Water from the molecular sieve adsorption(w_5)	0.069 9
Sodium hydroxide solution preparation(w_2)	0.520 8	Stillage from the distillation tower(w_6)	1.538 6
Dilution in the saccharification unit(w_3)	1.220 8		
Dilution in the SSF unit(w_4)	2.983 4	Stillage from the crude distillation(w_7)	10.753 6
Water usage(w_8)	6.896 3	Water usage after water recycling(w_{10})	2.595 7
Waste water(w_9)	12.362 1	Waste water after water recycling(w_{11})	8.061 6

$$w_8 = w_1 + w_2 + w_3 + w_4; w_9 = w_5 + w_6 + w_7; w_{10} = w_5 - w_6; w_{11} = w_9 - w_5 - w_6$$

2.3 纤维素乙醇微型工厂生产过程的能耗及能量输出

根据流程模拟模型结果与微型工厂生产数据,

微型工厂在最大生产能力下各工段能量消耗及能量产出见表 9。

表 9 纤维素微型工厂生产 1 kg 乙醇的能耗及能量输出

Table 9 Energy consumption and generation for 1 kg ethanol production in the cellulosic ethanol mini-plant

Unit ¹⁾	Energy consumption/ (MJ · kg ⁻¹)	Generation	Energy/ (MJ · kg ⁻¹)
Pre-handling (A200)	1.184 3	Heat from burner ²⁾	53.574 9
Pretreatment (A300)	10.215 1		
Fermentation (A400)	11.039 3		
Rectification (A500)	14.076 6		
Total	36.515 3	Total energy generation	53.574 9

1) 25 °C, 0.1 MPa; 2) 190 °C, 3.0 MPa

前处理(A200)能耗为玉米秸秆粉碎能耗,由玉米秸秆粉碎过程实际测得。预处理工段(A300)能耗为预处理过程消耗的蒸汽热能,根据预处理过程消耗蒸汽量并由流程模拟模型计算过程能耗。同步糖化与发酵工段(A400)能耗包括物料预热能耗和发酵过程中搅拌能耗,预热能耗为流程模拟模型计算结果、搅拌能耗为发酵过程实际测得。乙醇分离工段(A500)能耗包括粗馏塔和精馏塔塔釜再沸器热负荷及分子筛吸附塔操作能耗,精馏塔和粗馏塔塔釜再沸器热负荷为流程模拟模型计算结果,分子筛吸附塔操作能耗为文献值^[14];总能量消耗是指各工段能耗的数值加和。生产过程中能量输出为燃烧

室放热。燃烧室放热根据流程模拟模型计算而得。

综合能耗的折算:表 10 是通过国家综合能耗折算标准(表 3)和地方供电煤耗指标基准值(表 4)将各工段消耗的蒸汽和电能折算成的以标准煤用量表示的综合能耗 A_3 (见表 10)。将各工段消耗的蒸汽热能和电能 A_1 (见表 10)。以平均低位发热量 B_1 (见表 3)折算成消耗蒸汽及电能的实物消耗量 A_2 (见表 10)。根据表 3 将蒸汽热能折算成相应标准煤用量 B_2 (见表 3),根据表 4 将消耗的电能折算成相应标准煤用量 C_1 (见表 4),选择 300 MW 等级的国产机组供电煤耗(有脱硫指标)的基准值作为折算标准。

表 10 纤维素乙醇微型工厂综合能耗计算

Table 10 Integrated energy consumption of the cellulosic ethanol mini-plant for producing per kg of ethanol

Energy form	Process energy consumption (A_1)/(MJ · kg ⁻¹)	Energy carrier consumption (A_2)	Standard coal equivalent (A_3)/kg
Power	9.652 6	2.681 3 kW · h/kg	0.908 9
Steam	26.862 7	7.138 6 kg/kg	0.918 0
Total energy consumption	36.515 2		1.826 9
Total energy generation			1.828 0

$A_2 = A_1 / B_1$, $A_3 = A_2 \times B_2$, $B_2 = C_1 / 1\ 000$

根据纤维素乙醇微型工厂生产过程中的实际生产数据与流程模拟模型能耗计算结果,综合考察了微型工厂生产过程中各工段能耗,并根据国家和地方标准将生产过程中不同形式的能耗折算成综合能耗以便于比较。经过计算,纤维素乙醇微型工厂在最大生产能力下的总能耗为 36.515 2 MJ(25 °C, 0.1 MPa),生产过程中能量产出为 53.574 9 MJ(不含产物乙醇能量,190 °C, 3.0 MPa)。将各种能耗统一折算成标准煤用量后,纤维素乙醇微型工厂在最大生产能力下的总能耗相当于 1.826 9 kg 标准煤,生产过程中能量产出相当于 1.828 0 kg 标准煤。这说明纤维素乙醇微型工厂的运营能耗完全可

以通过木质纤维素残渣的燃烧热来提供,而没有额外的能量需求负担。更重要的是,从能量衡算的角度考虑,乙醇产品是净的能量输出,这为纤维素乙醇的产业化提供了能耗依据。

3 结 论

本文利用 Aspen plus 建立了纤维素乙醇微型工厂的纤维素乙醇生产流程模拟模型。通过与 NREL 模型中的精馏工段结果比对,表明本文模型与 NREL 模型具有较好的一致性。经纤维素乙醇微型工厂流程模拟模型严格物料和能耗计算,在纤

纤维素乙醇微型工厂的最大生产能力下,以玉米秸秆为原料生产 1 kg 纤维素乙醇的水用量为 2.595 7 kg,蒸汽用量为 3.605 4 kg,废水量为 8.061 6 kg,均低于目前利用玉米淀粉生产乙醇工艺的水用量和废水排量;在不包括原料和产品能量的情况下,生产 1 kg 乙醇消耗各种形式能量为 36.515 2 MJ,同时产出能量 53.574 9 MJ,能量产出大于能量投入;生产 1 kg 乙醇的能耗折合 1.826 9 kg 标准煤,产出能量折合 1.828 0 kg 标准煤,生产过程中能量产出可满足生产过程中能量需求;建立的流程模拟模型可为纤维素乙醇经济评价提供物料、能耗数据,亦可快速评价技术进步和新技术的开发对最终产品物耗、能耗和经济等参数的影响。流程模拟模型基于严格热力学意义上的物耗、水耗、能耗及综合能耗计算结果可作为纤维素乙醇产业化可行性的重要依据。

参考文献:

- [1] 谢扬,沈庆扬. Aspen plus 化工模拟系统在精馏过程中的应用[J]. 化工生产与技术, 1999, **6**(3):17-24.
- [2] 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.
- [3] Byers C H, Charles H. An Aspen simulation of fuel production by hydrolysis of woody biomass[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1988, **18**(1):143-157.
- [4] Kou Nanan, Zhao Fu. Investigation of the feasibility and feedstock management strategies of a flexible biomass to ethanol plant via process simulation[C]//ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Florid: Lake Buena Vista, 2009: 151-160.
- [5] 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]. USA: National Renewable Energy Laboratory, Golden CO. , 2002.
- [6] 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.
- [7] Zhang Jian, Wang Xiusheng, Chu Deqiang, *et al.* Dry pretreatment of lignocellulose with extremely low steam and water usage for bioethanol production[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(6):4480-4488.
- [8] Zhang Jian, Zhu Zhinan, Wang Xiaofeng, *et al.* Biotoxification of toxins generated from lignocellulose pretreatment using a newly isolated fungus *Amorphotheca resinae* ZN1 and the consequent ethanol fermentation[J]. Biotechnology for Biofuels, 2010, **3**:26-35.
- [9] Zhang Jian, Chu Deqiang, Huang Juan, *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] GB/T 2589-2008 综合能耗计算通则[S]. 北京: 标准出版社, 2008.
- [11] DB21/1620—2008 辽宁省地方标准火力发电厂供电煤耗限额及计算方法[S]. 北京: 标准出版社, 2008.
- [12] Gerbens-Leenes P W, Hoekstra A Y. 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, 2009, **68**(4):1052-1060.
- [13] Ahmetovic E, Martin M, Grossmann E. Optimization of energy and water consumption in corn-based ethanol plants [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, **49**(17):7972-7982.
- [14] 贾树彪, 李盛贤, 吴国峰. 新编酒精工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

欢迎订阅

《华东理工大学学报(自然科学版)》

地址:上海市梅陇路 130 号 436 信箱 邮编:200237

邮发代号:4-382