

综 述

## 燃料乙醇制造的“零能耗零污染”趋势

毛忠贵, 张建华

江南大学生物工程学院, 无锡 214122

**摘 要:** 酒精蒸馏废液有充足的非淀粉生物质可供沼气转化, 沼液营养丰富可作酵母发酵工艺用水。通过酒精高浓度发酵、沼气高效转化、沼气热电联产、差压蒸馏、环形过程工艺等产能、节能、无废技术的研发和集成, 将最终完成木薯原料燃料酒精制造向“零能耗、零污染”生产技术的转型。

**关键词:** 酒精发酵, 木薯, 沼气发酵, 零能耗, 零污染

## Trend of “Zero Energy Consumption and Wastewater” in Fuel Ethanol Production

Zhonggui Mao, and Jianhua Zhang

*Jiangnan University, College of Biotechnology, Wuxi 214122, China*

**Abstract:** The energy consumption in a Chinese ethanol manufacturer with cassava as the feedstock, has been reduced to a zero-closed level. If the R & D on technical integration of high ethanol concentration fermentation, methane fermentation technique, steam and electricity co-generation system, new distillation technology, and the wastewater reutilization, is carried out continuously, the proposed “zero energy consumption and wastewater” technique could be realized in fuel ethanol production process.

**Keywords:** alcohol fermentation, cassava, methane fermentation, zero energy consumption, zero wastewater

“非粮、无污染、低能耗”是我国燃料乙醇发展的先决条件, 它既是一个重要的技术发展方向, 也是下一轮燃料酒精产业顺利发展必须建立的技术平台。

在“政产学”多方努力下, 近年来我国酒精制造技术已取得较大的进展, 特别是木薯酒精的实际制造过程已接近“零能耗”。总结、提高、优化并集成先进制造工艺和过程技术, 集中力量合作攻克几个技术关键, 在国际上率先形成“无污染、零能耗”的非粮生物质能源制造产业化样板, 对推动我国生物质能源产业健康发展有重要意义。

### 1 木薯原料

木薯是目前我国主要的非粮酒精发酵原料, 也是世界上最大的能源作物之一。木薯是亚热带作物, 我国自产约 600 多万吨。东南亚年产 4000 多万吨, 是世界木薯主要产区之一, 因需求拉动, 近年来产量增幅较大。2005 年我国与东盟达成的 186 项“零关税”贸易协定中就有一项是木薯, 一定规模的来源是有保障的。

以木薯为原料生产酒精在我国已有几十年历史, 目前生产规模有 100 多万吨, 技术相对成熟, 成本也较玉米等粮食原料低, 因而在不消耗国内粮食

**Received:** January 4, 2008; **Accepted:** March 12, 2008

**Corresponding author:** Zhonggui Mao. E-mail: maozg@vip.163.com

和不挤占耕地的前提下保持一个合适的规模是适宜的。

## 2 几个重要的产能和节能技术

### 2.1 沼气发酵

木薯酒精蒸馏废液的 COD 高达 80000~100000 ppm(固液分离前), C/N 为 25~30, 处于沼气发酵 C/N 比的最佳范围内, 加上蒸馏废液本身温度较高(100°C 左右)因而容易实现沼气的高温发酵。十多年来木薯酒精废液的沼气发酵在工艺和工程技术上进步很大, 特别是 2 级串联的 UASB 厌氧发酵工艺。新建的 UASB 反应器单只容量一般都在 3000 m<sup>3</sup>, 最大的已达 5000 m<sup>3</sup>。木薯酒精蒸馏废液的沼气发酵技术已成为大规模工业沼气发酵的成功典范。国内一般产沼气水平为 260 Nm<sup>3</sup>/t 酒精(95%, V/V), 最好的已达 330 Nm<sup>3</sup>/t 酒精, 其主要差异在沼气发酵工艺的安排上, 即先固液分离后沼气发酵还是 2 级串联中间分离, 后者因生物质转化更为充分故沼气产量大<sup>[1,2]</sup>。

尽管沼气发酵技术进步很大, 但仍有很大潜力, 木薯酒精废液中还剩余 40%的固态生物质(未溶解的纤维和木质素类物质)尚未转化成沼气。研究提高沼气发酵技术, 再增加 10%的沼气量, 使之达到 360 Nm<sup>3</sup>/t 酒精是可以做到的, 理想的是所有非酒精发酵的生物质全部转化成沼气。

### 2.2 热电联产

酒精的生产制造既用电, 又用汽, 特别是酒精蒸馏用汽量大而稳定, 为热电联产装置的稳定运行创造了条件。发酵工业的工艺用汽压力一般在 0.4 MPa 即可, 而热电联产产汽锅炉额定压力多在 3.8 MPa 以上, 除去蒸汽输送管路压力损失后一般还有 Δ3.0 Mpa 以上的压差可推动汽轮机发电(如既产汽又发电的背压式发电)。

由于工艺用汽压力不高, 发酵企业采用 2.1 MPa 以下的低压锅炉较多, 但低压锅炉热效率低, 仅 80%多。热电联产为提高热电转换效率通常使用 3.8~5.9 MPa 的中高压锅炉, 热效率较普通锅炉提高 10 个百分点以上, 一般可达 92%~95%。因而背压发电和锅炉热效率的提高为企业带来双重利益, 对酒精生产企业而言其生产成本可降低 8%~10%, 因而热电联产技术在 10 万吨以上规模的企业推广应用

很快。

### 2.3 酒精差压蒸馏

差压蒸馏实质上是双效蒸馏技术。安徽宿县从法国引进第一套装置至今已有 20 年历史, 期间经历酒精工业不景气, 企业普遍规模小投资大因而实际推广缓慢。2000 年以后四个规模化的燃料酒精重点企业全部采用差压蒸馏技术, 国内其他年产 10 万吨以上非定点的酒精生产企业也在逐步使用中, 技术已比较成熟。实际运行吨酒精可节约蒸馏耗汽 35%, 相当于酒精生产全过程节约蒸汽 23%。

### 2.4 高浓度酒精发酵

我国玉米酒精发酵浓度一般在 12%, 较美国普遍在 15%以上相差 3 个百分点。而木薯原料因营养较玉米差, 发酵浓度更低, 仅 9%~10%。酒精高浓度发酵既能提高装备产能, 又能较大幅度降低能耗, 如酒精浓度从 12%提高到 15%, 则蒸馏蒸汽消耗降低 15%。因而高浓度酒精发酵是一个重要的技术方向<sup>[3-5]</sup>, 玉米酒精发酵浓度 15%, 木薯酒精发酵浓度 13%应是近期比较合理的目标。

## 3 酒精制造“零能耗”的实现

### 3.1 酒精制造过程的能量投入

国内酒精生产主要用薯类和玉米两大类原料。制造过程中能量投入的计量一般用吨酒精(95%, V/V)的蒸汽消耗和电能消耗表示。国内较好的水平为:

薯类酒精(发酵液酒精 10%, V/V): 汽耗 3.8 吨, 电耗 130 kWh(已包括环保工程运转用电)。

玉米酒精(发酵液酒精 12%, V/V): 汽耗 4.5 吨, 电耗 180 kWh。

玉米酒精能耗较大的原因是玉米脱胚和生产饲料 DDGS 要耗用较多的蒸汽和电力。

### 3.2 技术集成后的节能和产能

#### 3.2.1 蒸汽的消耗和产出

以木薯酒精为例:

发酵酒精度从 10%提高至 13%, 节约蒸汽 15%。

应用差压蒸馏技术, 蒸馏可节能 35%。因蒸馏用汽占酒精生产总用汽的 65%, 则总节汽为:

$$65\% \times 35\% = 23\%。$$

两项技术可节汽  $15\% + 23\% = 38\%$ , 则蒸汽消耗降为

$$3.8 \times (1-38\%) = 2.36 \text{ t/t(酒精)}$$

沼气产率计为  $360 \text{ Nm}^3/\text{t(酒精)}$ , 热值:  $5140 \times 4.187 \text{ kJ/Nm}^3$ , 热电联产中的燃烧产汽  $6.5 \text{ kg/Nm}^3$   
 则: 总产汽  $6.5 \times 10^{-3} \times 360 = 2.34 \text{ t/t(酒精)}$   
 即沼气燃烧产汽和生产消耗蒸汽基本平衡。

### 3.2.2 电力的消耗和产出

我国发酵产业界目前热电联产已比较普遍, 行业先进水平为: 在输出低压工艺蒸汽的同时每吨蒸汽可净产出电能  $90 \text{ kWh}$ , 折合成吨酒精(95%, V/V)废液生产沼气后热电联产发电:

$$90 \times 2.34 = 211 \text{ kWh/t(酒精)}$$

木薯酒精生产过程消耗电能  $130 \text{ kWh/t(酒精)}$  (60%消耗在原料的粉碎工序), 则电力富余:

$$211-130 = 81 \text{ kWh/t(酒精)}$$

即通过技术进步和技术集成, 以木薯原料生产燃料酒精, 可实现能量自给, 且每吨酒精(95%, V/V)可对外输送电能  $81 \text{ kWh}$ , 即可实现富裕的“零能耗制造”。

注: 以上计算发酵酒精浓度 13%、沼气产出  $360 \text{ Nm}^3/\text{t}$  酒精(95%, V/V)。蒸汽和电力的产出数据是企业内部的实际考核指标。

### 3.3 目前国内酒精企业能耗的最好水平

江苏花厅酒业在 10 万吨级木薯酒精生产线上, 已成功实现沼气代煤作主要能源, 在热电联产工程尚未投产前, 就已实现吨酒精耗原煤  $0.1 \text{ t}$  以下(实际耗原煤  $60\sim 80 \text{ kg}$ ), 与一般吨酒精需原煤  $0.5 \text{ t}$  指标相比, 大幅度节能 80%以上(此处“原煤”热值为:  $4.187 \times 5500 \text{ kJ/kg}$ )。该企业的酒精生产过程实际上已接近“零能耗”, 沼气热电联产工程上马后, 由于电力有富余而上当地电网, 算经济账即可实现零能耗, 体现在能耗成本为“零”上。

## 4 “零污染工艺”的研发

### 4.1 木薯酒精沼液回用环形工艺

生物质能源产业如规模过小则没有实际意义, 规模大则废水污染问题突显, 因而低成本的“零污染工艺”技术平台不建立, 燃料酒精等生物质能源产业在我国难以顺利发展。

产品制造型企业其污染可能有各种类型, 如废水、废气或废渣污染, 也有制造工艺型污染和工艺辅助型污染。对燃料酒精而言关键是“工艺型废水污染”, 需通过技术进步使其向“零污染工艺”转型。解决了工艺型废水污染则其它污染大幅度降低, 少量低 COD 废水的污染处理成本处于企业承受能力范围之内, 问题也就容易解决。

在总结前人成果和多年研究探索的基础上, 我们已完成了木薯酒精沼液回用闭路循环的框架研究, 形成如下图所示的酒精发酵环形工艺:

酵母酒精发酵相对粗放, 对发酵原料的要求不象氨基酸等那样严格, 因而可以用蒸馏废液作工艺配料用水。酒精蒸馏废液 pH  $3.8\sim 4.0$ , 但液化糖化的适宜 pH 分别为  $5.5$  和  $4.5$ , 因而用蒸馏废液作配料用水有一个 pH 匹配的问题; 另一个问题是蒸馏废液中的可溶性干固物含量高达  $6\%\sim 8\%$ , 废液回配循环中会逐渐累积, 因此目前企业用蒸馏废液循环回配率最高只有 30%。

蒸馏废液经沼气发酵后其沼液 pH 为中性, 可溶性干固物仅  $0.2\%$ , 容易实现全部回用作工艺配料用水的目标; 原本沼液后续耗氧处理中难降解的氨态 N 等小分子有机物成了酒精酵母的营养物, 醪液酵母密度增加了 30%以上, 更适宜高浓度酒精发

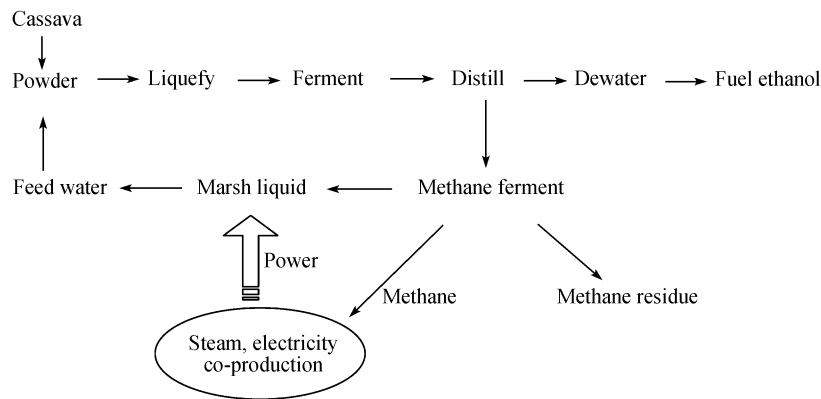


图 1 酒精发酵环形工艺

Fig. 1 Ethanol production circular process

醇;不再需要为废水达标排放而必须进行的大规模高成本的耗氧处理,节约了水资源,也降低了生产成本。

## 4.2 仍需研究的几个关键技术

### 4.2.1 高浓度酒精发酵技术

一般研究集中在耐高渗菌种和酵母营养物上,目标使酒精发酵稳定在 13%、底物对乙醇转化率达 91%,以及发酵时间控制在 60 h 之内。

### 4.2.2 生物质全利用技术

尚有相当量的生物质没有得到有效转化,适合开展发酵沼气转化、生物高分子材料或高效微生物堆肥等研究。

### 4.2.3 工程化技术开发等

工程化阶段可能出现的高浓物料的输送、蒸馏粗馏塔的雾沫夹带、沼气发酵的脱 S、环形工艺工程平衡等技术问题需要解决。

木薯酒精是我国生物质能源开发中一个很好的突破口,完全可以在企业层面呈现一个“零能耗零污染”的样板和技术平台。工业生物技术界如能集中一些力量,政产学研通力合作,将为我国生物质能源事业的健康发展作出重要贡献,也为其他非粮燃料酒精的制造技术和后续秸秆资源化转化技术的研发和工程化积累宝贵的经验。

## REFERENCES

- [1] Yuan ZH, Wu CZ, Ma LL. Fundamentals and Technology on Biomass Energy Development. Chemical Industry Press, 2005, 3: 67-148.  
袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术. 化学工业出版社, 2005, 3: 67-148.
- [2] Li QL, Cao J. Application research on the anaerobic digestion for comprehensive treatment of dried potato residue liquid of alcohol factory. *Energy Engineering*, 2001, (3): 24-26.  
李泉临, 曹军. 利用沼气技术综合治理酒精厂废液. 能源工程, 2001, (3): 24-26.
- [3] Reddy LVA, Reddy OVS. Rapid and enhanced production of ethanol in very high gravity sugar fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochemistry*, 2004, 41 (3): 726-729.
- [4] Li CL. Application of high concentration mash fermentation techniques to advance energy-saving and cleaning alcohol production. *Liquor-making Science and Technology*, 2005, 131(5): 107.  
李传林. 应用浓醪发酵技术, 推动酒精工业节能及清洁生产. 酿酒科技, 2005, 131(5): 107.
- [5] Najafpour G, Younesi H, Ismail KSK. Ethanol fermentation in an immobilized cell reactor using *Saccharomyces Cerevisiae*. *Bioresource Technology*, 2004, 41(3): 251-260.

## 科学出版社科学出版中心生命科学分社新书推介

### 生命科学实验设计指南

【美】D.J. 格拉斯 著 丛羽生 等 译

978-7-03-021341-9 ¥ 35.00 2008 年 5 月 30 日 出版

随着人类和其他物种基因组的破译,生物信息科学的发展,生命科学已成为 21 世纪最为活跃、发展最为迅速的先导性学科之一。国内各高校十分重视生命科学的发展,相继设立了本科生创新科研项目以及研究策略和实验设计方面的课程。研究生培养也以科学研究水平为标准。本书作者基于多年教学科研经验以及与著名专家学者交流的基础,对生物学研究策略和实验设计进行深入细致的解析。

本书可作为生命科学专业高年级本科生和研究生的教材和参考资料。



### 植物生物学与生态学实验

高玉葆 石福臣 等 编著

978-7-03-021336-5 ¥ 25.00 2008 年 5 月 12 日 出版

本书是在南开大学生物科学专业多年相关实验教学的基础上,结合国内高校植物生物学教学现状,并综合国内外近年来的实验教学成果编制而成。全书分为植物解剖、植物分类、植物生理和植物生态 4 个部分,共 50 个实验。在考虑全书系统性的同时,各部分实验内容本着相对独立、材料易得的原则,由浅入深、循序渐进。在实际实验教学中,使用单位可以根据教学安排,灵活选取其中的实验内容。

本书可作为高校生物科学专业本科生的实验指导用书,也可作为从事植物学、植物生理学和植物生态学的科学工作者及研究生提供参考。



欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书(免邮费)

邮购地址: 北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 科学出版中心 生命科学分社 邮编: 100717

联系人: 阮芯 联系电话: 010-64034622(带传真)

更多精彩图书请登陆网站 <http://www.lifescience.com.cn>