中国燃料乙醇工业的机遇与挑战

段 钢[1]， 张晓萍[1]， 张国红[2]
（1. 杜邦工业生物科技部（杰能科中国），上海 201203；2. 中国酒业协会酒精分会，北京 100831）

摘要：随着国家能源和粮食加工政策的改变，中国迎来生物燃料乙醇发展的重大机遇。在以后的几年里，会有许多新设施的建立，产量也会大幅度提高，但各种挑战随之而来，除了原料的供应问题外，建立新厂的工程设计、操作过程的水耗、产生的废水和能耗等等。中国的燃料乙醇生产水平总体而言还不够先进，作者介绍了世界燃料乙醇发展的新情况，呼吁在教育、工程设计和法规的批准等方面应有所改变，对未来燃料乙醇的发展进行了展望。

关键词：燃料乙醇；高浓发酵；工程设计
中图分类号：TS 262.2　**文章编号：**1673-1689(2019)05-0001-06　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.05.001

Challenges and Opportunities for China Fuel Ethanol Industry

DUAN Gang[1]， *ZHANG Xiaoping*[1]， *ZHANG Guohong*[2]
（1. Dupont Industrial Biosciences，Genencor China，Shanghai 201203，China；2. Alcohol Branch of National Brewing Association，Beijing 100831，China）

Abstract：With the recent changes of energy and food processing policies，China embraces the great opportunity of developing fuel ethanol. According to the national plan released by the office of Premier Minister，the production of fuel ethanol will be greatly increased in the next few years. Apart from the feedstock，challenges could be from new plants design，operation efficiency，water and waste water management，education. Chinese fuel industry is still far behind world level，mindsets need to be changed and improved. The author reviews the current status of advanced technologies，advocates the immediate actions needed to be taken on engineering design and education，and finally prospects for the near future developments.

Keywords：fuel ethanol，high gravity fermentation，engineering design

1 背 景

众所周知，燃料乙醇对于环境的改善、国家的粮食供求调节以及能源安全都有积极作用。乙醇由于其安全性，悠久的生产历史和逐年建立的供应链，很难找到另一个化合物可以代替[1]。

2017 年 9 月 13 日，国家发改委能源局、财政部等 15 个部委发布消息，联合印发《关于扩大生物燃

收稿日期：2018-10-30
作者简介：段 钢（1966—），男，博士，教授，亚太地区技术总监，主要从事工业酶应用与开发研究。E-mail：gang.duan@dupont.com
引用本文：段钢，张晓萍，张国红. 中国燃料乙醇工业的机遇与挑战[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(05)：01-06.

料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》,方案确定到2020年基本实现全国覆盖乙醇汽油[2]。在其后的几个月,中国东北地区,特别是黑龙江省,拟建设的30万吨规模的燃料乙醇厂不下于10个。2018年8月22日,国务院常务会议进一步明确,为进一步发展绿色能源并消化部分粮食品种过量库存,坚持控制总量,有限定点,公平准入,适度布局粮食燃料乙醇的生产。加快建设木薯燃料酒精项目,开展秸秆乙醇产业示范,到2025年纤维素酒精产业化,使先进生物液体燃料技术、装备和产业整体达到国际领先水平。

2 原 料

中国的燃料乙醇生产已有十多年历史,到2016年生产量约230万吨[3]。2016年曾发布《生物质能源的十三五规划》,计划2020年达到400万吨。2016年我国汽油消费量1.2亿吨,其中汽车保有量2.05亿量,汽油消耗1亿吨,如果按10%比例添加,就需要1 000万吨燃料乙醇。但由于国家政策的不确定性,主要是担心粮食的供应,特别是玉米。国家的玉米深加工政策从鼓励到限制,到近两年再次放开。每年国库收购的新粮及存粮需要耗费大量钱财来维护,然而长期存放后新粮变陈粮,由于陈粮在存储过程中会产生一定的霉变,因此不能用于食用和饲料加工,因此需要找到合适的方式来消化陈粮。表1中列出了国际粮农组织2017年最新统计数字,如果按13亿人口来计算,去掉1亿吨饲料,一亿吨玉米深加工产品淀粉糖、发酵类产品和燃料酒精,还有约3.5亿吨的米面,应该能够满足安全存量和其它深加工的需求。

表1 中国的主要谷物产量及世界排位

Table 1 Production of Major Grains from China and their rankings in the world

谷物	产量/亿吨	世界排位
玉米	2.159	2
大米	2.086	1
小麦	1.298	1

虽然国家每年进口一定量的粮食,但与国内粮食总产量相比,比例很小,2017年进口2 400万吨,占总共谷物产量56 430万吨的的4.25%。而且随着生活水平的提高,谷物在饮食中的摄入比例逐渐降低,乳品蛋白和肉类增加。饮食结构的改变也对陈粮的逐年增加也有一定影响,因此陈粮也越来越多用于生产燃料乙醇。

1 000万吨燃料乙醇,如果按玉米算,约需要3 000万吨玉米,如果其中有20%用陈米生产,20%用木薯来生产,情况会好很多。

目前木薯乙醇的原料主要靠进口,最近泰国的CARTEL最近联合东南亚的几个国家,来控制木薯干的价格,因此靠进口泰国和东南亚的木薯这条路会越来越艰难。表2是世界粮农组织FAO关于木薯的最新统计[4],非洲产量第一,但主要是食用。亚洲第二,产量九千万吨左右。表3是亚洲(除中国外)各国的木薯产量[4]。图1是泰国鲜木薯的加工流向,其中大部分用于生产木薯淀粉,约40%晒成薯片,而这些干薯片中约有40%左右出口到中国。中国在2013年对木薯的进口量大约在589万吨,2014,2015与上年相比进口量分别增加17%及7%左右,此后有所下降并保持平稳,2016及2017基本稳定在640~660万吨[5]。

表2 世界鲜木薯的产量(百万吨)

Table 2 World Production of Fresh Cassava Root(million tons)

	2013	2014	2015	2016	2017	比例/%
全球	263.177	276.766	276.995	278.754	277.957	100
非洲	144.18	154.9	152.833	155.398	155.962	56.11
亚洲	88.276	89.365	91.689	90.274	92.418	33.25
拉丁美洲	30.538	32.334	32.299	32.908	29.407	10.58
大洋洲	0.261	0.239	0.252	0.252	0.247	0.09

来源:Trade and Markets Division(EST). FAO

表 3 亚洲各国木薯产量(百万吨)

Table 3 Fresh Cassava Production in Asian Countries (million tons)

	2014	2015	2016	比例/%
亚洲	74.348	82.611	87.482	100
泰国	30.022	32.358	31.807	36.36
印尼	23.436	22.906	26.749	30.57
越南	10.210	10.664	10.921	12.48
老挝	1.630	1.514	1.527	1.75
柬埔寨	7.933	11.944	13.222	15.11
缅甸	0.524	0.485	0.509	0.58
菲律宾	2.540	2.682	2.682	3.07
马来西亚	0.052	0.057	0.063	0.7

来源:Trade and Markets Division(EST). FAO

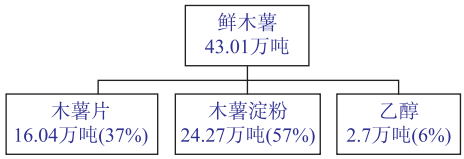


图 1 泰国木薯加工情况(泰国木薯协会)

Fig. 1 Production of Fresh Cassava Roots in Thailand (Data from Thailand Cassava Association)

图 2 是我国木薯产量,至 2016 年产量还未达到 500 万吨。由于鲜木薯中淀粉质量分数仅为 30%左右,因此需要 6 吨左右鲜木薯才能生产 1 吨乙醇。即使我国现有的产量全部转化成燃料乙醇,也不到 100 万吨。由于木薯种植比较容易,如果可以增加种植,加上进口薯片,木薯燃料乙醇还是有潜力的。

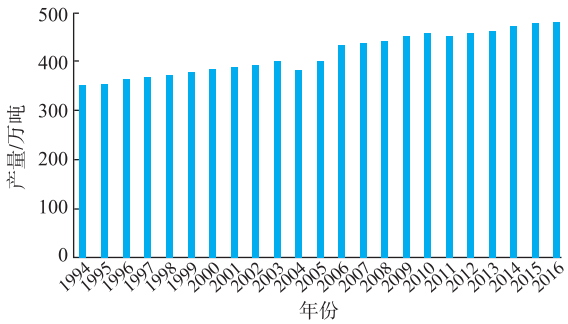


图 2 中国鲜木薯产量(吨)

Fig. 2 Fresh Cassava Production in China Over the Past Years

这里的讨论暂不考虑纤维素原料和纤维素乙醇。主要是由于纤维素乙醇得瓶颈不是技术而是经济性问题,如果按照现在的思路,只生产燃料乙醇,纤维素乙醇工厂的投资很可能是淀粉类乙醇的几倍。再加上原料的收集、运输、预处理和转化操作费用,在近期,几乎没有竞争性的可能性。

3 乙醇工厂的设计

虽然中国已有不少酒精厂,但并不适合大规模生产燃料乙醇,燃料乙醇的生产量通常都比较大,不用担心产品的口味,蒸馏相对简单,但要高酒度,同时最大程度减少废水的产生和能量的消耗[6],这势必要建设一些新工厂,将是非常好的提高我国乙醇行业整体水平的机会,因此对工程设计公司提出了很高的要求。比较美国,大部分的乙醇工厂是 ICM 设计的。ICM 有自己的中间厂,发展了很多新的专利技术,并应用于工厂设计中。ICM 不仅仅设计,而且参加一些工厂的运行,甚至为发展新技术与酒精生产伙伴合资。

表 4 为从 USPTO 美国专利索引中查到的 ICM 申请的专利(截止 2018,9,30)。

表 4 ICM 申请与获得的的专利

Table 4 Pateut applications and granted from ICM

专利号	专利名称
20170107452	Products produced from distillers corn oil
20140080183	Hybrid separation
20130121891	Selected solids separation
20120051980	Bio-oil recovery systems
20110283602	Bio-oil recovery systems and methods
20110265373	Rotary torrefaction reactor
20090311397	Process for edible protein extraction from corn germ
20090269817	Pretreatment of grain slurry with alpha-amylase and a hemicellulase blend prior to liquefaction
20080009048	Liquefaction of starch containing material
20040192896	Method for extracting gluten
9718006	Multi-zoned screening apparatus
9376504	Hybrid separation
9375731	Selected solids separation
9150790	Rotary torrefaction reactor
8986551	Suspended solids separation systems and methods
8192627	Bio-oil recovery methods
7572353	Ethanol distillation process
7520990	Anaerobic wastewater treatment system and method
7297236	Ethanol distillation process
7097762	Modular waste water treatment system

近年来另一个发展较快的工程公司是 Fluid Quip Process Technologies,该公司称每年有 17 亿加仑的乙醇生产采用了他们的技术（相比 ICM 的 88 亿还是小的多),与 ICM、POET 相比,它的优势在于分离获得高蛋白质含量的 DDGs。表 5 为该公司获得的美国专利名单。

这些工程公司不仅设计工厂、优化过程操作,研发新技术的能力也非常强大。从上述的专利和专利申请内容可以看出，包含的内容非常广泛的,有设备,有新的过程技术和新产品等等。而我们国内的工程公司在不少方面都相对落后，包括设备、新技术的发展，甚至是对新技术的学习等也弱得多，因此尽管我们燃料乙醇的投资并不比美国少,但在运行的效率、费用及对环境的影响等方面还是比较落后。中美燃料乙醇工厂的简单比较见表 6。

美国燃料乙醇工厂因为设计合理简单,运行过程中的染菌控制好,自动化水平高,需要的人数也少,比较少有事故,大部分乙醇厂接近满负荷运行。

表 5　Fluid Quip 公司申请的专利

Table 5　Patent applications from Fluid Quip Co.

专利号	专利名称
9932246	Pulse cavitation processor and method of using same
9777303	Systems and methods for producing a sugar stream
8813973	Apparatus and method for filtering a material from a liquid medium
8778433	Methods for producing a high protein corn meal from a whole stillage byproduct
8753505	Liquid treatment apparatus and method for using same
8714811	Multiple helical vortex baffle
8696192	Multiple helical vortex baffle
8012262	Process for steeping corn and steeping system therefore
6511005	Bowl centrifuge nozzle
6428591	Pressurized cyclone including agitator assembly
6216959	Nozzle for centrifuge rotors and method of removing same
5499720	Multiple hydrocyclone assembly
5388708	Multiple hydrocyclone assembly

表 6　中美燃料乙醇厂(年产 30 万吨规模)的简单投资指标比较

Table 6　Comparison of Investment(100mgpy plant) and Some Key Indexes of China and US

国家	投资金额	占地面积/m^2	人数/人	乙醇体积分数/%	水耗/(t/t)	备注
中国	>10 亿人民币	>10 000	300~600	13~15	6~10	大部分没有废水处理厂
美国	~1 亿美元	<10 000	30~50	17~19	2~3	

4 乙醇工厂的运行

美国的乙醇生产技术一直在进步,乙醇转化率越来越高,而重要的是:转化率的提高,并不是以其他消耗增加为代价,期间水、电和汽等大大下降。配料质量浓度从 25 g/dL 增加到 35 g/dL,乙醇体积分数从平均 12%提高到 18%。

另外关于运行，美国乙醇工厂有很多农民参股,每个工厂都有农民的孩子在里面工作,他们非常相信合作伙伴,如工程公司、设备公司、酶制剂酵母公司，很多时候这些公司给了他们极大的支持,使工厂平稳运行,一旦有问题发生,也能很快得到解决。值得指出的是:工厂管理层一定要综合看到运营的情况，不能只看局部指标，还有要追求技术进步。

5 发展趋势

关于新技术,不外乎是提高产率,还有就是提高其他以前称为副产品(by-product),现在更多的叫共产品(co-product)的价值。副产品变成共产品不是简单的名称变化,有些共产品可能是完全的新产品。酒精厂如果只生产 3 种产品,酒精、DDGs 和 CO_2,将来会很难生存。即使干磨酒精厂,也在逐渐向生物精炼厂(Biorefinery)发展,增加产品的品种,有利于增加产品的价值。

关于提高转化率的简单介绍，可以参考下面 ICM 的过程（图 3 和图 4)[7]，玉米酒精转化率提高 10%左右；关于副产品价值最大化可参考 Fluid-Quip 的新技术(图 5 和图 6)[8]。

ICM 为了发展这些新技术,2018 年初，和另一个叫在 NASDAQ 上市的公司 ANDERSONS 建立个

合资厂，生产能力为每年 7 亿加仑（约 21 万吨）乙醇。该工厂会用到它们的很多新技术，如：高级气化利用废木，减少了 70%的天然气消耗；SMT V2；FST Next GEN；Cellulosic Ethanol Technology（GEN1.5）等等。这个工厂规模虽然不是非常大，但水平应该非常高。生产的乙醇其中有约 1.5 万吨是从过程分离出来的玉米纤维来的。玉米乙醇的转化率会提高约惊人的 10%。

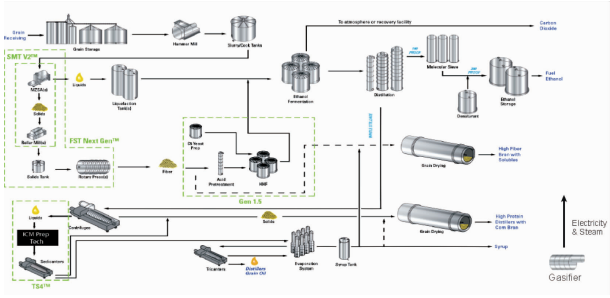


图 3　ICM 酒精工厂流程图

Fig. 3　Schematic Flow Diagram of ICM Ethanol Plant

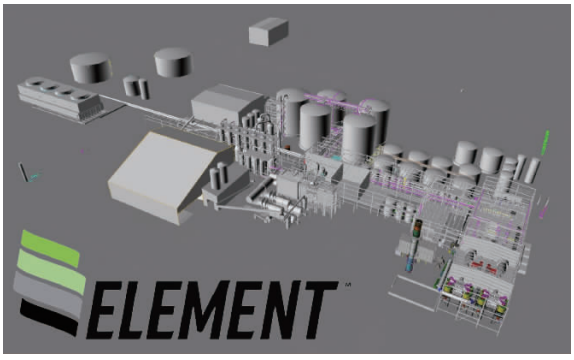


图 4　ICM 与 ANDERSON 合资厂 ELEMENT 模型

Fig. 4　Simulated Model of JV plant between ICM and Anderson

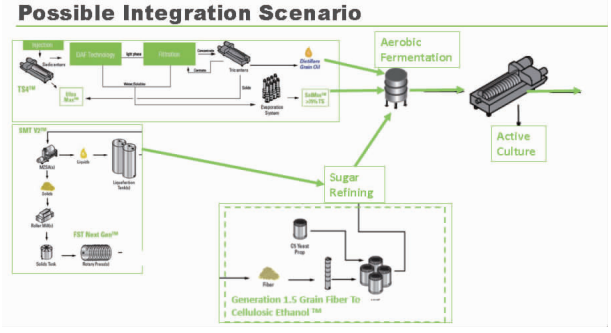


图 5　ELEMENT 工厂可能采用的技术流程

Fig. 5　Flow Diagram of Potential Technology to be Used by ELEMENT

图 6 中显示了蒸馏后的全醪液，经过分离后得到更纯的蛋白质（质量分数>50%），还有玉米油，更干净的纤维，和 DDGs，这个过程中主要是一些分离设备，特别是连续水洗离心机的使用。图 7 为这些产品的示意图。

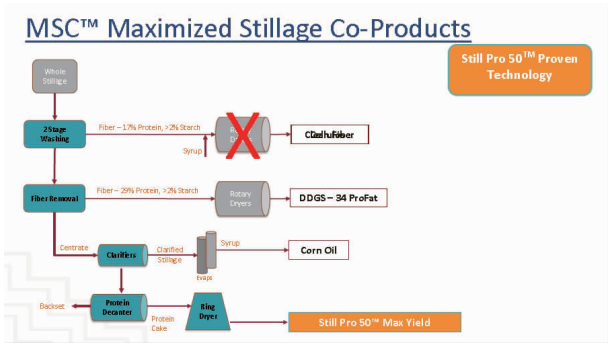


图 6　Fluid–Quip 的蒸馏醪液共产品价值最大化流程 MSC 示意

Fig. 6　Schematic Diagram of the Co –products from Fluid–Quip's MSC process



图 7　Fluid–Quip MSC 过程得到的产品

Fig. 7　Products and Their Mass Balance from Fuild – Quip MSC Processes

除了上述提到的工程和技术的进步，发展最快的是生物技术领域，如酶制剂和酵母。Ingledew 教授很早就在世界燃料乙醇大会 FEW 说过：多使用酶，用最好的酶[8]，尤其在浓醪发酵时，液化、糖化及其他酶的配合非常重要。虽然酶制剂性能已有长足进步，但如何与燃料乙醇实际生产工艺结合才是更重要的方向。此外，酵母的发展也非常快，转基因的酵母在几个方面有提高：糖化酶使用的减少（酵母本身产糖化酶）、甘油的减少、出酒率的增加，有很多综述可以参考[9]。

6 展　望

与国外的先进工艺相比，中国的燃料乙醇生产技术还有许多值得改进之处。这首先体现在大学课程设置没有跟上最新的发展，虽然我们的高校并不缺少乙醇发酵相关课题研究的导师和学生[10-11]，但相关课程的设计没有及时更新，需要增加一些最新

的研究方向及成果,例如工业酶制剂、酵母和工程技术等相关课程。希望通过合理的课程设置使学生能够获得系统的知识,以便在将来的实际工作中能够迅速进入角色。

其次,设计院需要具备快速学习消化能力,以在较短的时间内提高自身的技术能力,将国外的先进工艺设备国内的实际情况及发展方向结合,抓住国家支持燃料乙醇发展的大好机会,在新工厂的设计中合理引入新工艺,提高技术水平。

另外,值得注意的是真菌毒素检测技术的发展。真菌毒素是一个无法回避,且需尽早面对的问题。美国主要的乙醇生产商和很多大学及政府部门都在研究更加准确的真菌毒素检测方法,而国内研究相对较少,需尽早加大投入。

此外,国家有关部门需要对新酶制剂、基因工程酵母的审批制定明确的政策,建立清晰的监管,审批流程。我国的基因工程技术与国外相比,并不落后,制定清晰的政策将鼓励企业在酶制剂及酵母的研发上进行投入,缩短与国外相关技术的差距,提高新产品在燃料乙醇生产中的应用,提高行业水平,减少能源和水的消耗,提高国际竞争力。

目前阶段,我们的行业和研究机构,包括一些政策制定部门,需要更加脚踏实地,努力把第一代燃料乙醇生产好,提高效率,减少水的使用和废水的产生,使产品多样化,提高行业利润水平,改变低水平互相压价的疯狂状态。

未来的几年将是我国燃料乙醇工业发展的关键时期[12],通过高性能酶制剂、酵母,先进生产及后处理工艺,有望将能源和水的消耗降低 30%[13]。希望设计工程公司、生产商、原辅料供应商及有关服务团体,共同努力,工厂设计长足进步,工厂运行更加合理,企业效益平稳增长,提高以淀粉质为原料的一代燃料乙醇生产,对国家的能源安全、环境改善和农民的收入改善做出贡献。新的环境法对每个企业都是挑战,但也是机遇,然而如果不能降低水耗和废水废气的排放,燃料乙醇的发展对于社会的意义就会大打折扣。对于第二代燃料乙醇我们还有很多功课要做,必须研究如何做好材料的收集、处理和运输设计,设备开发,酶制剂和酵母性能提升,以及废水处理和降低成本等一系列工作。

参考文献:

[1] 岳国君. 我国生物燃料乙醇生产迎来快速发展局面[N]. 中国能源报,2018-08-24.
[2] 国务院. 关于扩大燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇的实施方案[EB/OL]. 2018-09-13.
[3] 张国红,王琦. 2018 年中国酒业协会酒精分会工作报告[C]. 北京:中国酒业协会酒精分会,2018.
[4] 世界粮农组织 FAO 网站[EB/OL].http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jspcode=CHN,2018-09-12.
[5] Sereethoranakul,S. Cassava ethanol gaining market share and price forecast[R]. Thai Cassava Trade Association,2018.
[6] 段钢. 2017 年中国酒业协会酒精分会年会年[C]. 吉林:中国酒业协会酒精分会,2017.
[7] HARTIG S. Innovation in Ethanol Production[C]. Omaha:FEW,2018.
[8] KWIK J. How to diver even greater value into your plant's coproduct program[C]. Omaha:FEW,2018.
[9] 段钢. 新型酒精工业用酶制剂技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
[10] INGLEDEW W M. The Alcohol Textbook:a Reference for the Beverage,Fuel and Industrial Alcohol Industries[M]. Nottingham:Nottingham University Press,2009.
[11] ZHAI Fangfang,ZHANG Jing,ZHANG Jianhua. Effect of organic acid on the alcohol femenation process coupling with biogas fementation[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2010(2):276-281.(in Chinese)
[12] 李北. 2018 年酿酒协会酒精分会年会[C]. 大连:酿酒协会酒精分会,2018.
[13] MUELLER S. Emerging Ethanol Production Technologies[C]. Argonne:CRC Press,2009.