

燃料酒精生产的研究进展

徐惠娟, 王世锋, 龙敏南

(厦门大学生命科学学院 生物能源中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 能源危机导致石油价格急剧攀升, 燃料酒精作为汽油的替代品日益受到关注. 本文介绍了国内外燃料酒精生产的研究进展, 包括生产原料、菌株选育、发酵技术、酒精脱水技术及酒精糟液的处理与利用等, 并对我国的燃料酒精发展提出了展望.

关键词: 燃料酒精; 菌株选育; 发酵技术; 脱水技术

中图分类号: TS 262 2 TQ 223 122

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2006)S-0037-06

化石能源是当今能源结构的主体. 随着经济的快速发展, 化石能源的消费迅速增加. 然而, 化石能源是一类非常宝贵的不可再生资源, 其储量有限. 为了实现社会和经济的可持续发展, 开发和利用生物能源已成为一种战略选择. 世界各国, 特别是欧美等发达国家, 纷纷开始制定生物质资源逐步替代石油资源的科技与产业发展规划. 美国政府组建了“生物质项目办公室”, 成立了专门的“生物质技术咨询委员会”; 欧盟委员会提出到 2020 年运输燃料的 20% 将用燃料乙醇等生物燃料替代; 日本制订了“阳光计划”; 印度制订了“绿色能源工程计划”等.

目前生物能源产品中, 在产业规模方面发展最快的是燃料酒精, 它是一种液体燃料, 是汽油的理想替代品. 早在 1975 年巴西就成功地开发了汽车用燃料酒精, 分为含水和不含水的燃料酒精两种, 前者可直接作为汽车的燃料, 后者则以 20% ~ 24% 的比例添加到汽油中变为混合燃料使用. 车用乙醇汽油既能为汽车提供同样的动力, 还可以减少汽车尾气对环境的污染. 新世纪伊始, 石油价格的攀升和全球环境保护的要求, 为燃料酒精产业带来了很好的发展机遇.

1 生产原料

目前国内外生产燃料酒精的原料主要有玉米、甘蔗、甜菜、甘薯等. 巴西是世界上年产燃料酒精最多的国家, 其燃料酒精工业的主要原料是甘蔗^[1]. 此外, 巴西还开发了以甘蔗渣为原料制酒精的新技术(迪丁尼快速水解法 DHR), DHR 技术可减少水解蔗渣的时间

而获得高的转化率, 它的技术性和经济性得到了认可. 只用压榨蔗汁发酵, 每吨甘蔗产酒精 70~80 L, 增加蔗渣水解每吨甘蔗多产酒精近 50%. 目前, 在巴西的 Usina Sao Luis 半机械化生产酒精可达 5 000 L/d 的规模^[2]. 美国的燃料酒精产量仅次于巴西, 其生产酒精的工厂 90% 以上以玉米为原料, 其生产水平是 0.37~0.41 L 乙醇/kg 玉米, 产率为 0.312 5(湿磨法)~0.337 5(干磨法)^[3]. 我国 80% 左右的酒精用淀粉质(玉米、小麦、高粱、甘薯、木薯等)原料生产, 约有 10% 的酒精以糖蜜为原料^[4]. 按国内的生产工艺和操作条件, 每生产 1 t 酒精需用粮薯原料 3.0~3.2 t.

使用糖质原料和淀粉质原料生产燃料酒精, 原料成本占燃料酒精生产成本的比例高达 50% 以上. 因此, 降低燃料酒精生产成本的一个选择是开发廉价的原料资源. 以农作物秸秆和林业生产废弃物为代表的木质纤维素类生物质资源越来越受到人们的关注^[5]. 木质纤维素类原料主要由纤维素、半纤维素和木质素组成, 结构非常复杂, 必须先经过水解糖化才能被微生物利用制取燃料酒精. 水解的方法有酸法和酶法, 酶法水解由于具有设备简单、反应条件温和、原料糖化得率高、副产物少以及不污染环境等优点, 得到了更广泛的应用. 然而, 木质素的存在阻碍了纤维素酶的作用, 因此在酶法水解前需要进行一定的预处理, 改变天然纤维素的结构, 降低它的结晶度, 脱去木质素, 以增加纤维素酶与纤维素的有效接触. 常用的预处理方法有超微粉碎、蒸汽爆破、高能辐射、微波和超声波处理等, 还可以采用一些化学试剂(氢氧化钠、液氨等)进行处理. 此外, 自然界中许多真菌(白腐菌、褐腐菌和软腐菌等)具有分解木质素的能力, 也可用于木质纤维素原料的预处理^[6,7].

2 菌株筛选及构建

产酒精的微生物主要包括酵母和细菌两大类. 菌

收稿日期: 2000-01-15

基金项目: 教育部重点科技项目, 福建省科技重点项目(2005J016),

厦门大学新世纪优秀人才支持计划(X07114)资助

作者简介: 徐惠娟(1971-), 女, 讲师.

hju@xmu.edu.cn

株选育的目标一是通过基因工程和代谢工程等现代生物技术手段, 构建发酵性能优良的菌株, 调控微生物代谢过程, 提高酒精对糖的收率, 以降低燃料酒精生产的原料消耗; 二是提高菌株的耐温性以提高发酵温度, 降低大型发酵装置夏季高温季节的冷却费用, 以及提高菌株的耐酒精性能以提高发酵终点发酵醪中的酒精浓度.

Kondo等通过分子生物学手段, 将带有葡萄糖糖化酶基因的表达质粒 pGA11 导入酵母菌宿主 YF207 中, 得到的菌株 YF207/pGA11可在超过 300 h的条件下连续高产酒精且浓度达 150 g/L^[8]. Kajiwara等人通过代谢工程育种, 使得 *Arabidopsis thaliana* FAD2基因和酿酒酵母 OLE1基因过度表达, 从而得到耐酒精度为 15% (体积分数) 同时还能高产不饱和脂肪酸的菌株^[9]. 刘建军等以絮凝性强的葡萄汁酵母和高产酒精酵母做亲本, 通过原生质体融合技术选育的高产酒精絮凝酵母 SY-103, 其酒精产率可达 17.5% ~ 18.5%, 耐酒精度可达 20% (体积分数) 以上^[10]. 庞小燕等通过单亲灭活原生质体融合技术, 构建了直接发酵淀粉产生酒精的酵母融合株 F-1、F-5, 其酒精产量分别可达 8.8% 和 11.5%^[11]. 钟桂芳等通过单倍体分离和诱变获得休哈塔假丝酵母和高温酿酒酵母的营养缺陷型突变株, 通过聚乙二醇和电诱导融合等方法, 获得了融合子 F-71, 其在 45℃ 发酵木糖所产酒精体积分数为 1.675%, 转化率为 68.8%^[12]. 刘建军等从黄酒酒醅等样品中分离筛选并以热冲击处理、紫外线和 Co60- γ 射线照射获得的 NHY4-36 其利用玉米淀粉产酒精量可达 17.5% (体积分数) 以上, 耐酒精度也可在 20% 以上^[13]. A Ifenore 等人通过“维生素饲养”技术 (即在菌体发酵过程中适时添加一定量的相关维生素) 选育的菌株, 其酒精产量可达 19% (体积分数), 即 147 g/L^[14]. 在选育利用戊糖和己糖产酒精菌株方面, 目前对 *Pachysolen tannophilus* 和 *Candida* sp 研究最多. Atiyeh 等筛选的酿酒酵母突变株 ATCC 36858 在蔗糖浓度高于 81 g/L 的培养基中产酒精能力相当于发酵蔗糖理论产量的 85%, 其在蔗糖含量为 216 g/L 的培养基中, 酒精产量为 2.23 g/(L·h)^[15]. 张继泉等通过同化碳、氮的手段筛选的 Z8 能够利用玉米秸秆水解液中的戊糖, 产酒精能力相当于发酵戊糖理论产量的 60%, 耐酒精能力 14% (体积分数), 在温度高达 42℃ 的条件下仍能正常发酵^[16]. 李素玉等根据木糖利用率结合固定化细胞发酵得到的 *Pachysolen tannophilus* ATCC 32728 和 *Candida shehatae* ATCC 34887, 前者的总糖 (5% 葡萄糖和 2% 木糖) 利用率达到了 85.08%, 其中葡萄糖的利用率为 99.21%, 木糖利用率为 80.38%, 而后的酒精产率达到理论值的

82.91%^[17]. Roca 等人通过细胞循环木糖发酵选育的 TM B3001, 其发酵木糖产酒精的能力可达 5.35 g/(L·h)^[18]. 耐高温菌株筛选方面, 沈睿从洋河酒厂处于顶火期的酒醅中分离出的 YH4 可在 47℃ 下正常发酵, 酒精产量也可达到 10% (体积分数) 以上^[19]. Kiransree 等从印度炎热地区土样中分离的酿酒酵母 VS3 变株, 其在含有 150 g/L 的蔗糖底物的培养基中, 30℃ 下酒精产量可达 74 g/L, 40℃ 下达 64 g/L^[20].

产酒精细菌中研究较多的是运动发酵单孢菌 (*Zymomonas mobilis*), 这是一种格兰氏阴性的厌氧细菌. 与酵母相比, 它具有葡萄糖利用率高、酒精产率高、生长和发酵的能耗低、耐酒精度高、能在较高糖浓度中生长发酵、酒精发酵率接近理论值及在连续发酵细胞再循环系统中不需控制氧浓度等优点. 它的缺点是只能利用葡萄糖、果糖和蔗糖等有限的糖源. 通过基因工程手段将相应的水解酶基因转移到 *Z. mobilis* 中, 使得它能够利用木糖、甘露糖、乳糖甚至淀粉、纤维素等多种碳源 (表 1). 或者将 *Z. mobilis* 产乙醇途径的关键酶基因丙酮酸脱羧酶编码基因 *pdc*、乙醇脱氢酶编码基因 *adhB* 转入能利用多种底物的微生物 (如 *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca*, *Enterobacter* 等) 中, 赋予并提高其产乙醇能力. 由此获得了有效的产乙醇工程菌 *E. coli* KO11 和 *Klebsiella oxytoca* P2, 后者还是报道的第一个能快速有效利用纤维二糖高产酒精的重组菌, 在利用 10% 葡萄糖和 10% 纤维二糖发酵产乙醇时, *Klebsiella oxytoca* P2 的乙醇得率达到理论得率的 96% 以上^[22].

在用纤维素类原料发酵酒精方面, 韩如等利用纤维素粘附厌氧滚管的方法得到了直接转化纤维素产乙醇的菌株 *Clostridium* sp. EVA4, 用 1% 纤维素滤纸培养 120 h 该菌株产乙醇浓度为 1123 mg/L, 纤维素降解率为 59%^[23]. 为了更有效地利用纤维素类原料, 需要筛选高产纤维素酶的野生型菌株并进行改造. 杨礼富等^[24] 和颜贤仔等^[25] 均筛选到具有较高 CMC 酶活的菌株; 本实验室的徐昶采用纤维素-刚果红平板分离法, 从霉变的玉米芯中筛选出的灰绿曲霉 XC9, 其 CMC 酶活高达 6812 U/g^[26]. 在菌株改造方面, 目前仍旧广泛地采用各种不同的诱变方法 (如 EMS、UV 等). 王丹敏等以芽胞杆菌 X-6 为出发菌株, 经甲基磺酸乙酯 (EMS) 和紫外线 (UV) 复合诱变, 选育万古霉素抗性突变株, 从中分离得到 EV23 菌株, 其碱性 CMC 酶活比出发菌株 X-6 提高 320%, 达 3.53 U/mL^[27]. 董志扬等通过 γ 射线照射和亚硝基胍交替处理, 诱变出一株纤维素酶高产菌株 T801, CMC 酶活可达 870 U/mL^[28]. Kotchoni 等通过 EMS 诱变得到的 *Bacillus pumilus* N, 每克干菌体可产 11.4 mg 纤维素酶^[29].

表 1 在 *Z. mobilis* 中表达的异源基因^[21]

Tah 1 Heterobgous genes expressed in *Z. mobilis*^[21]

底 物	编码基因	来 源	表达水平 (U /m g)
Starch	α -Amy lase	<i>Bacillus licheniform is</i>	70. 8
	Amyloglucosilase	<i>Aspergillus niger</i>	ND
Cellulose	Endo α - 1- 4- glucanase	<i>Erwinia chrysanthemi</i>	4. 2
	Endo α - 1- 4- glucanase	<i>Bacillus subtilis</i>	0. 025
	Endo α - 1- 4- glucanase	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	0. 35
	β -glucosilase	<i>Xanthomonas albilineans</i>	1. 6
Raffinose	α -galactosidase	<i>Escherichia coli</i>	2. 9
Lactose	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	0. 39
	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	1230
	Lact permease	<i>E. coli</i>	16 ^a
	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	125
	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	154
	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	50 ^b
	β -galactosilase	<i>E. coli</i>	45 ^a
	Xylose isomerase	<i>Xanthomonas campestris</i>	0. 645
Xylose	Xylobk inase	<i>X. campestris</i>	0. 145
	Xylose permease	<i>X. campestris</i>	1. 1 [*]
	Xylose isomerase	<i>E. coli</i>	0. 11
	Xylobk inase	<i>E. coli</i>	1. 5
	Transaldolase	<i>E. coli</i>	0. 88
	Transketolase	<i>E. coli</i>	0. 16
Mannose	Phosphomannose Isomerase	<i>E. coli</i>	3. 3

ND, Not determined^{*} U /mL

3 酒精发酵技术

发酵是燃料酒精生产的核心技术, 先进的发酵技术可以降低燃料酒精生产的物耗和能耗, 进而降低生产成本. 目前, 先进的发酵工艺, 酒精对糖的收率已经达到理论值的 90% ~ 92% .

根据操作方式来分, 酒精发酵可以是连续操作或间歇操作. 在巴西, 70% 以蔗糖为原料的酒精厂采用间歇发酵, 而约有 350个酒精厂采用连续发酵, 酵母均进行回收再用于发酵过程. 在北美, 有的玉米酒精发酵厂采用较老的间歇培养技术, 不回收利用酵母, 而有些工厂采用连续发酵, 实现了计算机控制, 并应用 CIP 技术, 降低了劳动成本. 我国酒精生产一般采用间歇发酵, 普遍最终酒精浓度可达 8% ~ 10%, 酵母不回用^[30].

甘蔗汁或糖蜜发酵制酒精, 由于省去了糖化过程, 技术相对简单. 以淀粉质原料或纤维素类原料生产燃料酒精, 工艺技术路线与以甘蔗等糖质原料不同. 其中, 应用较多的是先糖化后发酵 (Separate Hydrolysis and Fermentation, SHF) 模式和同步糖化发酵 (Simultaneous Saccharification and Fermentation, SSF) 模式. 当前淀粉原料发酵生产酒精普遍采用的是 SHF 模式.

Montesinos等^[31]以液化后的小麦面粉为原料, 比较了先糖化 6 h再进行 SSF和 SHF及直接 SSF 3种过程, 发现直接 SSF过程发酵周期最短. 刘振等^[32]研究了用木薯干为原料, 同步糖化发酵 (SSF)开发燃料乙醇的新工艺, 并与普通的先糖化后发酵 (SHF)生产模式进行了对比, 认为 SSF具有工艺简单、能耗低、发酵迅速、醪液酒精度高等众多优点, 值得工业推广. 对纤维素类原料发酵制酒精的研究也表明, SSF法能消除葡萄糖对纤维素酶的反馈抑制, 提高纤维素酶的水解效率. 由于纤维素酶催化反应的最适温度与酵母发酵的温度不一致, Wu等^[33]提出了利用非等温同时糖化发酵法 (Non isothermal Simultaneous Saccharification and Fermentation, NSSF)生产乙醇的工艺流程. 此外, 半纤维素水解产生的木糖对纤维素酶有一定的抑制作用, 可采用混合菌株发酵的方式加以消除, 即将能利用葡萄糖的菌株与能利用木糖的菌株 (假丝酵母、管囊酵母等)一起发酵.

为提高设备利用率, 增加工厂的生产能力并降低成本, 减少环境污染等, 近年来各国研究者日益重视高浓度酒精发酵技术 (浓醪发酵技术). Casey等人^[34]将高浓度发酵定义为含 ≥ 18 g可溶性固形物 /100 g发酵

液的发酵. 我国的章克昌^[35]、赵华^[36]、黄宇彤^[37]等人也进行了浓醪发酵技术的研究, 结果表明发酵最终酒精浓度可达 13% 以上. 高浓度发酵要求糖化醪含高浓度糖, 并且糖化醪的粘度要宜于处理和发酵. 而大部分含高浓度碳水化合物的谷物糖化醪的粘度很大, 因此高浓度发酵技术的应用, 很大程度上依赖于低粘度糖化醪的制备.

另外值得一提的是固定化细胞发酵技术. 将细胞固定在一定的载体 (如海藻酸钠、卡拉胶、多孔玻璃等) 上, 可以提高发酵器内的细胞浓度, 而且细胞可连续使用. 研究最多的是酵母和运动发酵单孢菌的固定化. 固定化酵母或细菌的方法, 可以使用较高的基质浓度并得到较高的酒精收率, 且能连续运行 1~2 个月^[38].

4 酒精脱水技术^[39, 40]

脱水技术是生产燃料酒精的关键技术之一. 由于乙醇与水存在着共沸点, 采用普通精馏法无法得到浓度达到 99% 以上的无水酒精. 一般说来, 将发酵液中的酒精制成无水酒精要占据整个燃料酒精生产过程中能耗的 50%~80%. 传统的脱水方法如较成熟的特殊精馏法 (恒沸精馏或萃取精馏), 即往乙醇-水混合物中加入第三组分, 以改变体系中乙醇和水的相对挥发度, 例如以苯、环己烷等作为恒沸剂, 乙二醇作为萃取剂等. 这些方法处理量大, 生产稳定, 运行周期长, 但能耗较高.

近年来, 渗透汽化法应用于酒精-水体系的分离, 取得了良好的效果. 这是一种膜分离方法, 利用膜对液体混合物中各组分溶解扩散性能的不同而实现分离. 渗透汽化分离膜一侧接触液体混合物, 另一侧通常抽真空, 使透过物汽化后冷凝收集, 或者采用惰性气体将透过物带走. 研究表明壳聚糖衍生物、聚烯丙基胺和聚离子络合物对浓乙醇溶液具有很高的脱水能力, 其分离因子很高, 并且能够维持较高的通量. 渗透汽化法具有一次分离度高、操作简单、无污染、低能耗的特点, 与精馏脱水相比节省投资 40%, 能耗降低 30%~90%. 但其处理能力和膜的使用寿命仍有待提高.

此外, 还可以利用吸附剂对混合物中不同组分的选择性吸附作用来制备无水酒精. 常用的吸附剂有分子筛、活性炭、生石灰、硅胶、氧化铝等. 其中分子筛具有高度的吸附选择性和极强的吸附能力, 热稳定性好, 机械性能优良, 吸水后形态变化小, 不发生膨胀, 可以再生、反复利用, 是一种极佳的吸附剂. 日本开发了纳米级孔径过滤膜分子筛, 用于含水酒精脱水, 可将酒精浓度提高到近 100%, 与传统蒸馏技术相比, 可降低酒

精脱水成本约 50%^[41]. 某些淀粉类作物如玉米、小麦等亦可作为吸附剂. 它们对水的吸附性很强, 对酒精的吸附力很弱, 具有吸附选择性好、能耗低、使用和再生温度低、价格便宜等优点. 目前, 美国 60% 的燃料乙醇生产是用这种方法脱水提纯的^[42].

5 酒精糟液的处理及利用^[5, 43, 44]

酒精糟液的处理是燃料酒精生产中另一个关键工序, 处理费用约占总投资的 1/3. 以木薯原料生产酒精为例, 每生产 1t 酒精需排出废醪 12~15 t. 所含营养物质主要为糖分、蛋白质、纤维素、残糖、短纤维、氮、磷、钾等, 还有大量胶质和菌丝体, pH 为 3.5~4.0 属于无毒有害高浓度的有机废水^[40]. 由于酒精生产排出的酒糟是一种酸度高、粘度大并含有大量悬浮物和有机物的废液, 其 COD 含量达 4×10^4 mg/L, BOD 含量在 3×10^4 mg/L 左右, 如直接排放不但造成严重的环境污染, 而且浪费了大量资源. 采用浓醪发酵、固态发酵技术可以减少酒精废醪的排出量, 但更为有效的是提高酒精糟液的治理与综合利用技术, 这样有利于降低生产成本, 减轻对环境的影响, 提高资源利用率.

目前酒精糟液的处理和利用主要分为以下几个方面: (1) 发酵制沼气. 以薯干、糖蜜等为原料的酒糟废液的治理工艺主要采用厌氧发酵法制取沼气, 沼气可作燃料, 还可用于发电. 经 2~10 d BOD 可去除 90%, 通过活性污泥槽或散水滤床装置进一步将 BOD 去除率提高到 98%~99%. (2) 生产饲料. 薯类原料的酒糟可用于生产菌丝蛋白饲料; 糖蜜酒糟液中含有糖类、有机酸等, 可生产饲料酵母; 玉米糟液固形物低、纤维较少, 固液易分离. 国外以玉米为原料的酒精工厂普遍采用全蒸发浓缩技术, 得到含水 10%、含蛋白质 27% 以上的固体颗粒饲料, 简称“DDGS”生产. (3) 生产酶制剂、氨基酸、维生素等. 酒糟废液中含有糖、淀粉、纤维等碳水化合物, 可作为辅助原料发酵生产其他产品, 如淀粉酶、糖化酶、赖氨酸及维生素 B₁₂ 等. (4) 其他应用. 糖蜜酒糟废液的处理是将废液浓缩后喷入燃烧炉中燃烧并回收热量, 实现能量的二次利用, 或者把浓缩后的酒糟液按一定比例掺入锅炉滤渣和糖汁滤泥中, 混和制成含氮、磷、钾多种元素的固体肥料. 蔗汁发酵酒精后的废液, 颜色比糖蜜为原料的浅, 灰分少很多, 残糖亦较低, 可直接用于灌溉农田.

6 我国燃料酒精发展展望

目前, 燃料酒精的生产和应用主要存在于盛产甘蔗的巴西和有着大量玉米资源的美国, 其发展受到国际石油、玉米和食糖价格波动的影响. 而且燃料酒精的生产成本仍比汽油高, 需要得到政府补贴和政策上的支持. 因此, 燃料酒精对汽油的竞争能力取决于酒精生

产水平的提高和生产成本的降低。

虽然酒精发酵在我国是一个传统产业,但发酵酒精作为燃料使用,作为生物能源产业,我国却远远落后于巴西、美国乃至欧洲国家。2002年,国家决定以先试点后推广的方式发展燃料酒精,并在国家发改委组织下,制定了《国家“十五”燃料乙醇发展和车用乙醇汽油推广使用专项规划》。随后批准在吉林、河南、安徽和黑龙江四省建设总规模为132万吨的燃料酒精生产装置,以粮食类淀粉质原料生产燃料酒精。可是我国现阶段粮食类淀粉质原料生产燃料酒精的生产成本仍旧很高,美国乙醇生产成本只有2770元/吨,而国内乙醇生产成本为3671元/吨(以玉米为原料)^[45],所以必须依靠国家的财政补贴,才能维持燃料酒精生产装置的运行。2004年,国家对吉林燃料乙醇有限责任公司、河南天冠集团、黑龙江华润金玉集团燃料酒精生产的实际补贴平均高达2200元/吨。

既然我国的燃料酒精产业才刚刚起步,应根据我国的实际情况,走出一条具有中国特色的发展之路。我国拥有多样性气候条件,北方盛产玉米,南方拥有甘蔗的生产条件,因此可以借鉴美国和巴西的经验,发展以玉米和甘蔗等为原料的燃料酒精产业。综合考虑单位土地面积上的生物量和酒精产量,以甘蔗为原料时,酒精的产量最高、成本最低。因此,利用甘蔗为原料生产燃料酒精应成为我国未来生物燃料酒精的重要发展方向之一。此外,开发廉价的原料资源也是未来的发展目标之一,这些资源包括以农作物秸秆为代表的木质纤维素原料,以及适宜于在荒漠地、盐碱地种植,耐旱耐盐,能量密度高的能源作物,如各种薯类和菊芋等。

针对我国现有酒精发酵行业及燃料酒精产业发展面临的问题,国内的科研工作者进行了不懈的努力,取得了不少研究进展,同时随着几套大型燃料酒精装置的陆续建成投产,这一新型生物能源产业开始积累了一些经验。但是,开发原创性高新技术,最大限度降低燃料酒精装置的建设投资,降低燃料酒精生产过程的物耗和能耗,进而降低燃料酒精生产的综合成本,减轻国家财政补贴的负担,推进这一产业的规模化发展,始终是一项艰巨的任务。

参考文献:

[1] Berg C, Licht F O. World fuel ethanol analysis and outlook [R]. Ministry of Economy Trade and Industry (METI) (Japan), 2003

[2] Oliverio J L, Hilst A G P. DHR-DED NIH idrolise Rapida (DEDNI Rapid Hydrolysis)-revolutionary process for producing alcohol from sugar cane bagasse [J]. International Sugar Journal, 2004, 106 (1263): 168-172

[3] Dien B S, Bothast R J, Nichols N N, et al. The U. S. corn ethanol industry: An overview of current technology and future prospects [J]. Int. Sugar Jnl., 2002, 104 (1241): 204

[4] 马赞华. 酒精高效清洁生产新工艺 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003

[5] 高寿清. 生物量制燃料酒精的发展和需要解决的问题 [J]. 食品与发酵工业, 1991 (1): 54-60

[6] 孙健, 陈砾, 王红林. 纤维素原料生产燃料酒精的技术现状 [J]. 可再生能源, 2003 (112): 5-9

[7] 王超, 章超桦. 酶解纤维素类物质生产燃料酒精的研究进展 [J]. 纤维素科学与技术, 2003, 11(4): 52-59

[8] Kondo A, Shigechi H, Abe M, et al. High level ethanol production from starch by a flocculent *Saccharomyces cerevisiae* strain displaying cell surface glucoamylase [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 58(3): 291-296

[9] Kajiwara S, Suga K, Sone H, et al. Improved ethanol tolerance of *Saccharomyces cerevisiae* strains by increases in fatty acid unsaturation via metabolic engineering [J]. Biotechnology Letters, 2000, 22(23): 1839-1843

[10] 刘建军, 赵祥颖, 姜鲁燕. 高产酒精絮凝酵母 SY-130 菌株的选育 [J]. 酿酒科技, 2003, 3: 34-36

[11] 庞小燕, 王吉瑛, 赵凤生. 构建直接发酵淀粉产生酒精的酵母融合菌株的研究 [J]. 生物工程学报, 2001, 17(2): 165-169

[12] 钟桂芳, 刘萍, 郭雪娜, 等. 酵母属间融合构建高温发酵木糖生产乙醇优良菌株 [J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(2): 38-42

[13] 刘建军, 姜鲁燕, 赵祥颖, 等. 高产酒精酵母菌种的选育 [J]. 酿酒, 2003, 30(1): 57-59

[14] Alfenore S, Molina-Jouve C, Guillaudet S, et al. Improving ethanol production and viability of *Saccharomyces cerevisiae* by a vitamin feeding strategy during fed-batch process [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 60(1-2): 67-72

[15] Atiyeh H, Duvnjak Z. Study of the production of fructose and ethanol from sucrose media by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 57(3): 407-411

[16] 张继泉, 孙玉英, 王瑞明, 等. 发酵戊糖产酒精酵母菌株的选育 [J]. 生物技术通讯, 2002, 13(4): 275-277

[17] 李素玉, 陈新芳, 田沈. 木质纤维素酒精发酵菌种的筛选 [J]. 太阳能学报, 2003, 4(2): 218-221

[18] Roca C, Olsson L. Increasing ethanol productivity during xylose fermentation by cell recycling of recombinant *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 60(5): 560-563

[19] 沈睿, 诸葛健. 固态发酵用耐高温酿酒酵母 YH4 的筛选及其特性研究 [J]. 食品与发酵工业, 1991, 4: 8-15

[20] Kiansree N, Sridhar M, Rao L V. Characterisation of the thermotolerant ethanol tolerant fermentative *Saccharomyces cerevisiae* for ethanol production [J]. Bioprocess and Biosys

- tem s Eng ineering 2000, 22(3): 243– 246
- [21] Gunasekaran P, Raj K C. Ethanol fermentation technology- *Zym onas m obilis* [J]. Current Science 1999, 77(1): 56 – 68
- [22] 孙金凤, 诸葛健, 王正祥. 重组肠道细菌作为产乙醇生物催化剂的研究进展 [J]. 工业微生物, 2004, 34(3): 44 – 48
- [23] 韩如, 陈美慈, 闵航. 嗜热厌氧细菌 *Clostridium* sp. EVA4 菌株直接转化纤维素产乙醇的研究 [J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(Sup): 170– 174
- [24] 杨礼富, 谢贵水, 王真辉, 等. 木质纤维素高产菌株的筛选和鉴定 [J]. 热带作物学报, 2001, 22(3): 70– 77
- [25] 颜贤仔, 周美凤, 王丽, 等. 深层发酵产纤维素酶菌株的分离选育 [J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(3): 435 – 438
- [26] 徐昶, 龙敏南, 邬小兵, 等. 高产纤维素酶菌株的筛选及产酶条件研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(1): 107– 111
- [27] 王丹敏, 宋桂经. 从万古霉素抗性突变体中筛选碱性纤维素酶高产菌株 [J]. 生物学杂志, 1999, 16(4): 15 – 16 40
- [28] 董志扬, 祝令香, 于巍, 等. 纤维素酶高产菌株的诱变选育及产酶条件研究 [J]. 核农学报, 2001, 15(1): 26 – 31
- [29] Kotchoni S O, Shonukan O O. Regulatory mutations affecting the synthesis of cellulase in *Bacillus pumilus* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2002, 18(5): 487– 491.
- [30] 吕欣, 毛忠贵. 集成化玉米燃料酒精生产 [J]. 粮食与油脂, 2002, (12): 27– 28
- [31] Montesinos T, Navarro J. Production of alcohol from raw wheat flour by amylglucosidase and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Enzyme Microb Technol, 2000, 27(6): 362 – 370
- [32] 刘振, 王金鹏, 张立峰, 等. 木薯干原料同步糖化发酵生产乙醇 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(3): 353– 356
- [33] Wu Z, Lee Y Y. Non isothermal simultaneous saccharification and fermentation for direct conversion of lignocellulosic biomass to ethanol [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology 1998, 70– 72 479– 492
- [34] Casey G P, Magnus C A, Ingledew W M. High gravity brewing: nutrient enhanced production of high concentrations of ethanol by brewing yeast [J]. Biotechnol Lett, 1983, 5: 429– 434
- [35] 章克昌. 一种浓醪发酵酒精的方法: 中国, CN 1158899A [P]. 1997
- [36] 赵华, 赵树欣, 才向东, 等. 玉米酒精浓醪发酵技术的研究 [J]. 酿酒科技, 1998, (5): 30– 40
- [37] 黄宇彤, 伍松陵, 杜连祥, 等. 玉米酒精超高浓度发酵工艺条件的优化 [J]. 食品工业科技, 2002, 23(8): 67 – 70
- [38] Kohn F B. Immobilized cells for solvent production [J]. Process Biochem, 1984, 19: 7– 13
- [39] 梁萌, 张建安, 刘德华. 无水酒精制备的研究进展 [J]. 酿酒, 2002, 29(5): 3– 6
- [40] 马书霞, 陈砺, 王红林. 发展新型能源 – 木薯燃料酒精 [J]. 可再生能源, 2005, (3): 73– 75
- [41] 保国裕. 依靠新技术提高用甘蔗生产燃料酒精的经济效益 [J]. 广西蔗糖, 2004, (4): 46– 48
- [42] 曹祖宁. 生物技术和玉米加工利用 [J]. 化工科技动态, 1994, (8): 16
- [43] 吴天祥, 丁重阳, 杨海龙, 等. 固态酒精发酵与酒精产业化发展的可行性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(12): 67– 70
- [44] 邹东辉, 梁敏, 邵红. 酒精糟液的综合利用 [J]. 酿酒, 2002, 29(3): 82– 83
- [45] 韩德奇, 李伟, 张冬捧, 等. 燃料乙醇的生产进展和应用探讨 [J]. 化工技术经济, 2002, 20(6): 9– 15

Research Progress in the Production of Fuel Ethanol

XU Huijuan, WANG Shifeng, LONG Minan

(Bioenergy Center, School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Energy crisis results in the soaring oil price, so more and more attention has been focused on fuel ethanol, which will be the substitute of gasoline. Research progress in fuel ethanol production around the world has been summarized in this paper, including the materials, strain breeding, fermentation technology, ethanol dehydration technology as well as the treatment and utilization of lees waste water. The future prospects of fuel ethanol production in China are also considered.

Key words fuel ethanol, strain breeding, fermentation technology, dehydration technology