

# 燃料乙醇生产技术路线分析及 产业发展建议

李振宇, 黄格省, 杨延翔, 李顶杰

(中国石油石油化工研究院, 北京 100195)

**摘要:**对化学合成乙醇路线(合成气催化制乙醇、乙酸加氢制乙醇工艺)和生物发酵制乙醇路线(粮食发酵、非粮原料发酵、合成气发酵工艺)及其技术特点进行了分析,重点阐述了纤维素乙醇生产工艺、核心技术及国内外开发现状,并对我国燃料乙醇产业发展提出了有关建议。

**关键词:**燃料乙醇;合成气;淀粉;纤维素;发酵;技术路线;建议

中图分类号:TQ516

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2011)08-0001-05

## Analysis and development proposal on fuel grade alcohol production technique process

LI Zhen-yu, HUANG Ge-sheng, YANG Yan-xiang, LI Ding-jie

(PetroChina Petrochemical Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Production of fuel ethanol by chemical methods (syngas routing and acetic acid hydrogenation) and bio-fermentation methods (grain fermentation, non-grain feedstock fermentation and syngas fermentation) and their corresponding technical characteristics are analyzed. The production process, core technology and current research statue of cellulose ethanol are highlighted. The related suggestions on the fuel ethanol industry development in China are put forward as well.

**Key words:** fuel ethanol; syngas; starch; cellulose; fermentation; technical routing; proposal

石油作为一种不可再生的能源和资源,其储量越来越少,能源供应和安全问题已成为世界许多国家需要面对的主要问题之一,开发石油替代燃料已是大势所趋。乙醇既是一种清洁能源,又是一种良好的汽油增氧剂和辛烷值调和组分,在汽油中加入一定比例的乙醇即乙醇汽油作车用燃料,能够有效降低汽车尾气中的CO含量,减少环境污染,同时部分替代石油资源,因此燃料乙醇已经成为21世纪车用燃料的重要替代产品,并在许多国家得到较快发展。美国大规模发展玉米乙醇,已成为世界燃料乙醇生产和消费量最多的国家。巴西甘蔗燃料乙醇使用量已经占到车用燃料使用总量的1/3,形成了独立的能源运行系统。最引人瞩目的目的是近几年纤维素乙醇技术开发已在许多国家迅速展开。2009年全球燃料乙醇总产量约为5 860万t,2010年达到6 800万t,预计到2015年全球生物燃料总产量将以每年12.9%的速度递增<sup>[1]</sup>。

为了满足近年来车用燃料消费量不断增长的需求,在保障国家粮食安全的前提下,我国提出了燃料乙醇产业不与粮争地、走原料多元化发展的路线。

目前燃料乙醇从原先消化利用玉米、陈化粮为主,逐步向以薯类、甜高粱、甘蔗等非粮作物为原料方向发展,木质纤维素乙醇技术也已成为业内研究的热点,我国在2010年已经成为继美国、巴西之后世界第三大燃料乙醇生产国,燃料乙醇产业进入了前所未有的快速发展时期。

### 1 燃料乙醇的使用性能及主要质量指标

燃料乙醇是指在发酵或化学合成生产乙醇过程中,蒸馏后得到体积分数95%左右的乙醇,然后进一步脱水使其水分体积分数小于0.8%,即可得到用作燃料的无水乙醇即燃料乙醇。为防止误食燃料乙醇,先加入体积分数5%的变性剂(一般为无铅汽油或无铅的烃类),再与汽油按一定比例混配后即可得到乙醇汽油,用于点燃式内燃机汽车的燃料。

乙醇燃料在使用中具有如下特点<sup>[2]</sup>:乙醇易与汽油以一定比例混溶形成混合燃料,辛烷值高达112.5,可提高汽油的抗爆性能;可以清洁汽车引擎,减少机油替换;用燃料乙醇替代甲基叔丁基醚(MTBE)、乙基叔丁基醚(ETBE),可避免对地下水

收稿日期:2011-05-15

作者简介:李振宇(1974-),男,博士,高级工程师,现从事炼油化工及生物化工战略信息研究工作,010-52777201;黄格省(1965-),男,学历,职称,研究方向,通讯联系人,010-52777206-8105,huanggesheng@petrochina.com.cn。

造成污染;燃料乙醇可作为基础增氧剂,改善燃烧性能,降低汽车尾气有害物质的生成,减少环境污染,美国、加拿大等国在汽油中添加 10% 乙醇的检测结果显示,CO 含量降低 20% ~ 50%,氮氧化物减少 0 ~ 15%,碳氢化合物减少 15% ~ 40%,CO<sub>2</sub> 排放与燃烧汽油基本无区别,且无 SO<sub>2</sub> 排放。当然乙醇燃料也存在不利的方面,例如热值低,燃油消耗略有增加,对有的汽车金属部件容易产生腐蚀,对一些汽车橡胶件容易产生溶胀,车用乙醇汽油在储运和销售过程中易吸水产生相分离。尽管存在这些问题,但使用燃料乙醇利大于弊,完全可以作为车用替代燃料推广应用。而更重要的是燃料乙醇可用生物质可再生原料生产,因此更应加快其发展。

我国在 2001 年发布实施了《变性燃料乙醇》、《车用乙醇汽油》2 项国家标准<sup>[3-4]</sup>。在《变性燃料乙醇》标准中,规定了燃料乙醇与变性剂的体积混合比应为 100:(2~5),与美国标准规定相同;标准规定水分体积分数不大于 0.8%;同时规定了甲醇、胶质、无机氯、酸度、酮的限量指标,以防止车用乙醇汽油在发动机燃烧过程中腐蚀金属部件及堵塞管路系统。在《车用乙醇汽油》标准中规定,车用乙醇汽油中只允许加入体积分数(10±0.5)%的变性燃料乙醇,水分含量不得大于 0.5%。燃料乙醇和乙醇汽油的国家标准政策是我国积极稳妥地推广乙醇汽油的合法依据,为促进燃料乙醇和乙醇汽油的研制开发和推广应用、拓展燃料乙醇市场奠定了基础。

目前美国乙醇汽油调合比例为 15% (体积分数)乙醇,巴西为 100% 乙醇、22% 乙醇 + 78% 汽油、60% 乙醇 + 33% 甲醇 + 7% 汽油 3 种。我国推广使用车用乙醇汽油,燃料乙醇的加入量初步确定从体积分数为 10% 起步,这是由于使用 10% 的乙醇汽油,现有车辆和加油装置不需任何改装,油耗、动力基本不受影响,汽车尾气的污染可大幅度降低。目前,在我国推广使用的车用乙醇汽油主要有 E10(90#)、E10(93#)、E10(95#)、E10(97#)。

## 2 燃料乙醇生产工艺路线分析

乙醇生产方法分为化学合成和生物发酵 2 种路线。化学合成路线主要有合成气催化合成、乙酸加氢合成工艺。生物发酵路线主要有粮食发酵、非粮原料发酵以及合成气发酵制乙醇工艺。

### 2.1 化学合成制乙醇

#### 2.1.1 合成气催化制乙醇工艺

合成气(CO + H<sub>2</sub>)来源于各种化石原料和生物质原料,如煤、石油、天然气、煤层气及各种生物质

等。用合成气催化制乙醇是近年来国内外正在开发的新技术,该路线合成乙醇成功与否的关键是催化剂开发。合成气制乙醇的催化剂主要有 2 类<sup>[5-6]</sup>:一类是催化合成以乙醇为主的 C<sub>2</sub><sup>+</sup> 混合物,如法国 IFP 开发的 Co-Cu-Cr-碱系催化剂;另一类是催化合成乙醇等 C<sub>2</sub> 含氧化合物的负载型铈基催化剂,如我国大连化物所开发的负载型铈基催化剂,其性能优于日本同类催化剂。虽然国内外开展了大量研究工作,但目前尚未取得实质性重大进展。

#### 2.1.2 乙酸加氢制乙醇工艺

乙酸加氢制乙醇技术由美国 Celanese 开发,并于 2009 年 10 月在美国申请了专利,采用气相反应(反应温度约 250℃)并在钴/钨催化剂作用下通过乙酸加氢生产乙醇<sup>[7]</sup>。该技术不仅提供了一种生产乙醇的新方法,同时还为扩大乙酸需求开辟了新途径,所用乙酸可以通过甲醇羰基化反应生产。Celanese 公司在 2010 年 11 月曾表示计划在中国建设 1 套 40 万 t/a 乙醇生产装置,以满足亚洲地区燃料乙醇快速增长的需求。

### 2.2 生物发酵制乙醇

20 世纪 70 年代以来,随着石油价格快速上涨,生物发酵法逐渐成为乙醇生产的主要方式。发酵法制乙醇是以淀粉质、糖质、木质纤维素或合成气等为原料,通过微生物代谢生成乙醇,该方法生产出的乙醇其杂质含量较低。

#### 2.2.1 淀粉发酵制乙醇工艺

利用淀粉类农作物生产乙醇主要采用谷类粮食原料和薯类等非粮原料,经过原料预处理、淀粉转变成糖、糖发酵转化为乙醇及乙醇蒸馏的工艺步骤。以玉米燃料乙醇为例,生产过程包括玉米预处理(粉碎)、脱胚(干胚芽用于制取玉米油)制浆、液化、糖化、发酵、乙醇蒸馏脱水及燃料乙醇的变性处理,副产品包括酒糟蛋白饲料、玉米粕、玉米油、CO<sub>2</sub>、沼气等<sup>[8]</sup>。早期的粮食乙醇生产工艺存在能耗高、反应速度慢、原料利用率低等缺陷,经过多年的技术改进,例如采用淀粉低温蒸煮、同步糖化发酵、节能蒸馏等新技术,使粮食燃料乙醇技术日臻完善、成熟,生产规模迅速扩大。

目前用于生产燃料乙醇的原料基本上都是粮食作物和糖料作物,如巴西的主要原料为甘蔗,美国 95% 的原料来自玉米,欧洲以小麦、甜菜为原料。我国燃料乙醇的原料主要是陈化粮、玉米、小麦、干薯及糖蜜等。这些原料的利用受到耕地和原料成本的限制,以玉米为例,全美国 12% 以上的玉米产量被用于生产燃料乙醇,对玉米的巨大消耗使美国玉米

价格在2年内上涨近1倍。

为应对石油资源的短缺,我国于2000年启动了以玉米为主要原料的燃料乙醇生产和试用工作,“十五”期间在黑龙江、吉林、河南、安徽确定了4家定点燃料乙醇生产企业,形成燃料乙醇生产能力102万t/a,其中玉米原料占总原料的80%左右,其余为薯干和陈化粮<sup>[9]</sup>。“十一五”期间,由于我国粮食供需矛盾突出,因此燃料乙醇企业由以玉米原料生产为主,转向以红薯、甜高粱、木薯、甘蔗等非粮食原料生产。根据各地资源分布的特点,我国开始逐步在山东、黑龙江、内蒙古和新疆等地建设以甜高粱为原料的燃料乙醇示范项目,在广西、海南等地发展以甘蔗和木薯为原料的燃料乙醇示范项目。黑龙江省开展了甜高粱乙醇试验项目,目前生产能力达到5000t/a;四川启动了15万t/a红薯燃料乙醇生产项目;河北省以红薯、甜高粱为原料的30万t/a燃料乙醇生产项目正在筹备。其中薯类原料的比例明显上升,已经占到60%~70%。

### 2.2.2 纤维素乙醇工艺

在传统的谷物原料生产乙醇的过程中,只有植物中的淀粉成分被用来生产乙醇燃料,但这些淀粉成分只占整个植物中很小的一部分,而剩下的大量的纤维性部分(种子壳和茎)并未被利用。因此,近年来的研究主要集中在纤维素乙醇技术开发上。与淀粉质生产乙醇工艺相比,由于用纤维素原料生产乙醇使植物所有部分都得到有效利用,植物原料来源广泛,可显著节省粮食用量,因此成为目前国内外燃料乙醇研究开发的热点。纤维质是自然界中最为丰富的生物质资源,采用农作物秸秆、玉米芯、林业加工废料、甘蔗渣及城市垃圾等含木质纤维素丰富的生物质废弃物生产燃料乙醇,是扩大燃料乙醇原料来源和降低生产成本的理想策略。

### 2.2.3 合成气发酵制乙醇

合成气发酵制乙醇也是目前受到关注并正在研发的新技术,其关键技术在于发酵工艺和提高合成气转化率及乙醇收率。美国可再生能源技术公司Coskata、英国英力士公司(INEOS)均对该技术进行了研究并取得一定进展<sup>[10-11]</sup>。Coskata采用纤维素生物质原料气化、合成气经细菌发酵产生乙醇和乙醇分离3个步骤,建有115t/a中试装置,1t干基纤维素原料可产300kg乙醇,公司计划2012年在美国宾夕法尼亚州建设15万~30万t/a工业化装置;INEOS公司称开发出合成气发酵制乙醇工艺,计划2013年在英国Seal Sands建成15万t/a乙醇装置并用发酵废气联产43MW电力,生产合成气的原料

采用城市垃圾填埋物(100万t/a)。与传统燃料相比,利用合成气发酵生产的燃料乙醇可降低CO<sub>2</sub>排放96%。合成气发酵制乙醇目前仍在试验阶段,实现工业化尚待时日,主要因为合成气的生物转化存在一些缺陷:厌氧微生物的生长和产物生成速率较低;厌氧发酵要维持长时间稳定操作较困难;发酵产物酸和醇有一定的抑制作用。为此,需要改进反应器和发酵工艺,同时采用优良的发醇菌株以提高发醇产率。

## 3 纤维素乙醇生产关键技术及开发进展

### 3.1 生产工艺

木质纤维素原料中一般含有20%~45%(质量分数,下同)的纤维素,20%~25%的半纤维素和其他成分如木质素。用木质纤维素生产乙醇一般需要经过以下5个步骤<sup>[12]</sup>:

①预处理:通过高温物理和化学过程的结合,对原料进行清洗和粉碎,把生物质原料中的纤维素、半纤维素、木质素和萃取物进行增溶和分离,以增加纤维素和半纤维素在后续转化过程中的灵敏性,在下一步水解过程中变为可发酵性糖。

②水解:使纤维素和半纤维素分离,分别转化为六碳糖和五碳糖(木质素不能进一步转化),该过程可以通过酸(硫酸、盐酸)水解进行,但对设备腐蚀性大、成本高、乙醇产量有限,因此使用生物酶促使纤维素和半纤维素进行水解成为目前研究重点。

③发酵:这一过程经发酵使糖(C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub>糖)转化为乙醇。影响乙醇发酵过程的最关键因素是生产乙醇的微生物菌株。目前工业上生产乙醇应用的菌株主要是酵母菌。在某些发酵设备中,结合酶运用和细菌发酵,可使糖化作用和纤维素、半纤维素的发酵作用同时进行,即随着糖的生产,微生物将其转化为乙醇。

④分离:此过程将固态残渣(主要是木质素和非水解性的纤维素)从含有乙醇的液态产出物中分离出来。

⑤将乙醇蒸馏和精馏到燃料级别。

上述工艺是最初的纤维素乙醇生产方法,又称分步水解与发酵工艺(SHF)。随着对纤维素乙醇工艺的不断改进,又出现了同步糖化发酵工艺(SSF)、同时糖化和共发酵工艺(SSCF)以及直接微生物转化工艺(DMC),使得纤维素乙醇生产工艺流程不断得以简化,降低了生产成本<sup>[13]</sup>。

### 3.2 纤维素乙醇的关键技术

纤维素乙醇的关键技术一是原料预处理技术,

二是低成本酶的生产技术。

原料预处理是纤维素乙醇工厂生产成本最高的步骤之一,为此必须使预处理工序的能耗、化学品消耗和设备投资减至最少。对木质纤维素的预处理方法主要包括物理法、化学法、物理化学法和生物法。物理方法包括机械粉碎、蒸汽爆碎、微波辐射和超声波预处理等;化学法一般采用酸、碱、次氯酸钠、臭氧等试剂进行预处理,其中以 NaOH 和稀酸预处理研究较多;物理化学法包括蒸汽爆破和氨纤维爆破法;生物法是用白腐菌产生的木质素分解酶类和氢键酶,目前来看这些预处理方法各有其优缺点。

纤维素酶的使用成本高一直是制约纤维素制乙醇的主要瓶颈和难点之一。近年来,许多研究人员提出采用现场生产方式来降低纤维素酶成本,即在乙醇工厂中建立纤维素酶车间,先以工厂中预处理后的一部分木质纤维素为原料进行有氧的产酶发酵,当酶活达到峰值或各酶组分处于最佳组合时,不经任何处理直接将含酶的粗发酵液与新的纤维素原料混合,进入水解产糖或同步糖化发酵的后续工艺。该工艺的优点在于生产出的粗酶液不需要分离、储藏和运输,而将粗酶液直接用于下游工艺,从而大幅度降低产酶成本。

### 3.3 纤维素乙醇技术开发进展

近年来,美国在纤维素乙醇的研究、生产和应用方面走在世界前列。目前美国已建和计划建设的纤维素乙醇工厂(含示范工厂)共 45 座,其中 2008—2009 年投产 7 座;2010 年投产 6 座,生产能力合计约 8 万 t/a;2011 年投产 10 座,生产能力合计 35 万 t/a<sup>[14]</sup>。美国已建示范装置和工业装置的纤维素乙醇生产技术有以下 4 种:

(1) Verenium 公司开发的硫酸/酶水解-发酵技术<sup>[15]</sup>。该技术首先把生物质原料(甘蔗渣和其他能源作物)用酸分解为半纤维素糖浆(木糖和其他五碳糖)和纤维渣(纤维素和木质素),二者分离以后糖浆用专用的酵母发酵为稀乙醇,纤维素用工业酶分解并发酵为稀乙醇,最后通过蒸馏得到燃料级纤维素乙醇。

(2) Arkenol 公司开发的硫酸水解-发酵技术<sup>[16]</sup>。该技术用浓硫酸作催化剂,把纤维素和半纤维素原料转化为葡萄糖和木糖(六碳糖和五碳糖),收率是用稀硫酸和酶水解的 1.5~3.0 倍,再把水解得到的六碳糖和五碳糖与酸和木质素及其他固体物分离,木质素和其他固体物用作锅炉燃料生产工艺用蒸汽和工厂用电,糖通过酵母连续发酵转化为乙醇。

(3) ZeaChem 公司开发的酸水解-发酵-酯化-加

氢技术<sup>[17]</sup>。该技术以废木材等为原料,通过酸水解得到葡萄糖和木糖溶液,然后用乙酸菌发酵把糖转化为乙酸,接着再酯化得到乙酸乙酯,其全部或部分加氢得到乙醇。氢气由酸水解得到的木质素气化生产。

(4) 杜邦 Danisco 纤维素乙醇公司开发的酶水解-发酵技术<sup>[18]</sup>。其以玉米秸秆、玉米芯和柳枝草为原料,经研磨后首先进行预处理得到纤维素、半纤维素和木质素,接着用酶进行水解得到葡萄糖和戊糖单体与木质素,再用酵母菌进行发酵得到发酵液,最后进行产品分离得到乙醇、联产品和残渣。

为使纤维素乙醇的生产成本能与玉米和甘蔗乙醇竞争,近几年来国内外许多研究单位和技术开发商都在寻求降低酶生产成本的生产技术。开发最成功的有 2 种酶<sup>[19]</sup>,一种是 Novozymes 公司开发的 Cellic Ctec2,分解玉米芯、秸秆和甘蔗渣为可发酵糖的能力是其前身的 2 倍,与现用的酶相比用量可减少 50%,可减少乙醇生产成本 50 美分/加仑(1 加仑 = 3.785 L),使纤维素乙醇的生产成本降低到 2 美元/加仑以上;另一种是 Genencor 公司开发的 Accellerase DUET,在其前身 Accellerase 1500 提高  $\beta$ -葡萄糖苷酶和纤维素活性的基础上,提高半纤维素的活性,用量可减少 3 倍,能得到更高的糖和纤维素乙醇收率。

我国对纤维素乙醇的研究目前也已取得阶段性成果<sup>[20]</sup>,安徽丰原集团、河南天冠集团、中科院过程所分别建成 3 000 t/a 示范生产厂并正在进行试验;2006 年中粮集团与 Novozymes 合作建设的 500 t/a 纤维素乙醇生产示范装置,以玉米秸秆为原料,在原料预处理、纤维素酶的培育等方面取得实质性进展并计划开展万吨级工艺包设计,呈现出良好的产业化前景;吉林燃料乙醇公司 3 000 t/a 玉米秸秆生产燃料乙醇示范项目也即将投运,另外不少研究机构和单位如南京工业大学、清华大学等也对纤维素乙醇技术进行立项研究,并取得一定进展。总体来讲,我国纤维素乙醇技术还有不少关键性的技术问题尚待研究解决。

## 4 建议

燃料乙醇开发和乙醇汽油的推广应用为应对石油资源短缺、解决未来车用替代燃料供应问题带来了生机。我国燃料乙醇产业方兴未艾,市场前景十分巨大,但目前无论是玉米乙醇、薯类乙醇还是纤维素乙醇,其生产成本均高于传统汽油燃料,非粮燃料乙醇技术尚不成熟,实现大规模石油基燃料替代还有很长的路要走。展望未来,笔者提出以下几点建议:

(1) 提高粮食乙醇生产效率。与美国等发达

国家相比,我国现有粮食燃料乙醇装置从原料预处理到工艺条件控制、再到中间产物循环利用以及最终产品形成的各个环节都存在一定的差距,需要借鉴国外先进技术和经验,在设备、工艺、管理等方面全面提升水平,在不扩大粮食原料消耗的条件下,进一步提高生产效率,降低生产成本,充分挖掘粮食燃料乙醇的利用潜力。

(2)因地制宜选择非粮燃料乙醇原料路线。“不与人争粮、不与粮争地”,坚持走多元化非粮原料生产燃料乙醇的路线,已成为我国燃料乙醇产业发展的基本原则和共识。甜高粱除籽粒用于生产燃料乙醇外,其富含糖分的茎秆也可用于生产燃料乙醇。木薯是世界公认具有很大发展潜力的乙醇生产原料,也是我国发展燃料乙醇的非粮作物原料之一。甘薯淀粉含量高、产量高、适应范围广,其生产乙醇的成本较玉米和小麦等低,是极具潜力的非粮乙醇原料来源。甜高粱、木薯、甘薯并举被认为是我国现阶段最有潜力的非粮乙醇作物。这几种非粮原料生产乙醇虽然处于发展初期,但在技术方面不会存在根本性障碍,关键是要实现规模化种植、提高产量,为燃料乙醇生产提供充足的原料保障;同时,应进一步加大非粮原料乙醇技术开发以及规模化燃料乙醇技术的示范和推广应用。

(3)加大纤维素乙醇技术研发。木质纤维素如稻草、秸秆、蔗渣、草和木屑等,成本低、来源广,以木质纤维素为原料生产燃料乙醇是未来燃料乙醇技术的重要发展方向。我国农村每年产生大量的农作物秸秆,为纤维素乙醇生产开辟了广阔的原料渠道。在秸秆产量相对集中的区域生产纤维素乙醇,秸秆的收集和运输成本较低,原料供给不成问题,而关键是纤维素乙醇生产技术的突破,尤其是在原料预处理、低成本发酵酶生产等方面仍存在很大的技术障碍,需要加强行业之间的统一组织和协调,集中优势研发力量开展集中攻关研究,以期早日取得突破。

(4)积极关注并推进化学合成制乙醇技术研究进展。在合成气催化合成乙醇以及醋酸加氢合成乙醇工艺研究方面,国外公司开展了大量的工作,今后只要在催化剂方面再进一步研发,可望取得更大的进展。我国拥有比较丰富的煤炭资源,通过煤气化生产合成气再制燃料乙醇符合中国国情,因此有关企业应加强与国外公司技术合作,加快化学法乙醇技术开发步伐。近年来我国甲醇(煤气化经合成气生产)产能已经严重过剩,有足够的甲醇通过低压羰基化工艺制乙酸,致使我国乙酸供应也已呈现过剩趋势,且其价格大大低于乙醇,这为采取乙酸加氢

生产燃料乙醇创造了原料优势,具备大规模工业发展条件;同时还应关注合成气催化合成乙醇工艺路线,积极推动产业化。相信随着人们对生物发酵、化学合成燃料乙醇技术的不断研究和突破,燃料乙醇必将在推动全球车用替代燃料发展的进程中发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 2010 Ethanol Industry Outlook [R]. Renewable Fuels Association, 2010.
- [2] 唐宏青. 现代煤化工新技术 [M]. 第1版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 186.
- [3] 国家质量技术监督总局. GB 18350—2001 变性燃料乙醇 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001-04-02.
- [4] 国家质量技术监督总局. GB 18351—2001 车用乙醇汽油 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001-04-02.
- [5] Subramani V, Gangwal S K. A review of recent literature to search for an efficient catalytic process for the conversion of syngas to ethanol [J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 814.
- [6] 王亚权. 铈基 CO 加氢制乙醇催化剂的 FTIR 研究 [J]. 燃料化学学报, 1998, 26(6): 53.
- [7] Victor J Johoston, Josefina T Chapman, Laiyuan Chen, et al. Ethanol production from acetic acid utilizing a cobalt catalyst; US, 7608744 [P]. 2009-10-27.
- [8] 黄治玲. 燃料乙醇的生产及应用 [J]. 化工科技, 2003, 11(4): 44.
- [9] 杨晔. 燃料乙醇行业良性发展之环保对策 [J]. 环境保护, 2010, (21): 53.
- [10] 孙晓轩. 合成气制备高级醇类进展 [J]. 甲醇生产与应用技术, 2010, (1): 27.
- [11] 钱伯章. 英力士在英国研究废物转化乙醇项目 [J]. 精细石油化工进展, 2010, 11(2): 16.
- [12] Energy technology perspectives: Scenarios & Strategies to 2050 [R]. IEA, 174-175.
- [13] Mohammad J, Taherzadeh K K. Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review [J]. Bioresources, 2007, 2(4): 707.
- [14] 王祖瑞. 纤维乙醇技术的发展 [J]. 中华纸业, 2010, 31(20): 92.
- [15] A cellulosic-ethanol demonstration plant enters Startup Phase [J]. Chemical Engineering, 2008, 115(5): 16.
- [16] High yields and lower cost are expected for this biomass to ethanol process [J]. Chemical Engineering, 2009, 116(12): 12.
- [17] Ethanol and other chemicals from biomass [J]. Chemical Engineering, 2008, 115(7): 13.
- [18] DuPont Danisco sees a future rich in cellulosic ethanol [J]. World-wide Refining Business Digest Weekly, 2010, (5): 23.
- [19] Cellulosic biofuels and the cost of producing bioethanol take a nose-dive [J]. Chemical Engineering, 2010, 117(3): 14-16.
- [20] 王仲颖, 赵勇强, 张正敏. 中国生物液体燃料发展战略与政策 [M]. 第1版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 90-91. ■