

DOI: 10.13376/j.cbls/2014072

文章编号: 1004-0374(2014)05-0489-08

木质纤维素资源生物精炼技术研究进展

赵建, 曲音波*

(山东大学微生物技术国家重点实验室, 济南 250100)

摘要: 开发利用可再生性的木质纤维素资源来生产液体燃料和大宗化学品, 对于解决人类发展面临的资源与环境危机具有重要的意义。然而, 作为其代表性工艺的纤维素乙醇生产却因为经济上无法过关而迟迟不能真正实现产业化。采用生物精炼技术, 充分利用木质纤维素材料中各种组分, 生产包括部分高值产品的多种产品, 是克服其转化技术产业化经济可行性问题的有效措施。综述了木质纤维素原料生物精炼技术的研究发展现状, 着重阐述了玉米芯的生物精炼技术产业化进展, 并对木质纤维素的生物精炼前景进行了展望。

关键词: 木质纤维素; 生物精炼; 研究进展

中图分类号: TQ352.78 **文献标志码:** A

Progress in biorefinery technology of lignocellulosic resources

ZHAO Jian, QU Yin-Bo*

(State Key Laboratory of Microbial Technology, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Development and utilization of renewable lignocellulosic resources to produce liquid fuels and bulk chemicals, for solving resource and environmental crisis faced by human development, is of great significance. However, as its representative process, cellulosic ethanol production can not realize industrialization because the economy has been not efficient enough yet. Using biorefinery technology, full use of the various components of lignocellulosic materials to produce various products, including some kinds of products with high-value, is an effective measure to overcome its economic feasibility obstacle of transforming the technology to industry. Research and development status of lignocellulosic feedstock biorefinery technology were overviewed, focusing on the progress of corncob biorefinery technology, and the prospect of lignocellulosic biorefinery industry was forecasted.

Key words: lignocellulosics; biorefinery; research progress

众所周知, 当前资源短缺、环境污染等问题已经严重制约了我国经济社会的可持续发展, 成为亟待解决的问题。利用来源丰富、可再生的生物质资源, 特别是非粮的木质纤维素资源, 生产人类社会所需要的液体燃料和大宗化学品, 以部分替代日益紧缺的不可再生的石油等一次性化石资源, 是解决上述问题的重要途径之一, 也是当前国内外研究的热点。木质纤维素原料具有复杂的化学组成, 而目前国内外众多研究机构和企业针对木质纤维素资源化利用的研究, 一般是仅考虑到其中一种组分的利用, 如目前众多关于纤维素乙醇的研究, 一般主要是考虑如何将原料中的纤维素部分高效地通过

生物转化生成乙醇, 且使其产量最大化, 但较少考虑到木质素等组分的利用。由于廉价目标产品的单一化, 导致原料和处理成本在总生产成本中所占比例过高, 纤维素乙醇生产成本居高不下, 难以实现大规模工业化生产。此外, 由于原料中的其他成分未能被充分利用, 在造成资源严重浪费的同时, 也给生产和环境带来了其他一些问题。而生物精炼概

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”项目)
(2011CB707401)

*通信作者: E-mail: quyinbo@sdu.edu.cn

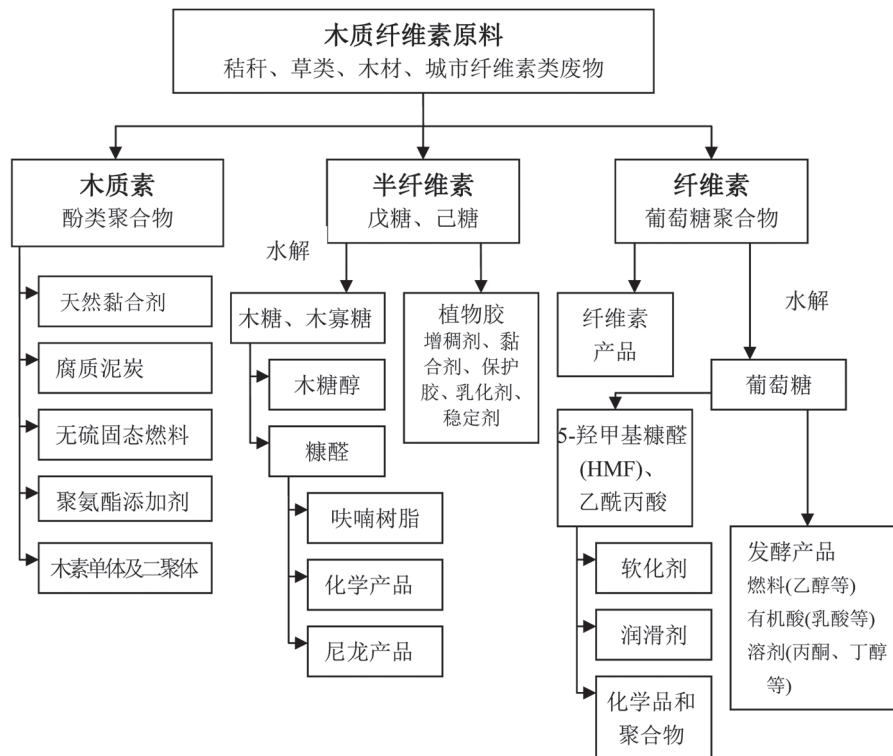
念的引进和实践,为解决上述问题提供了一个新的思路和途径。

1 木质纤维素“生物精炼”概述

“精炼(refinery)”的理念来自于现代石油化工产业。所谓“精炼”,是指通过分馏和催化转化等技术,把原油等复杂底物中不同的组分进行分离,进而把每一种组分分别转化成各种不同的产品,以最大限度地开拓产品的总价值。将该思想引入到生物质资源开发领域,就形成了一个新概念——“生物精炼(biorefinery)”。因为生物质中包含有多种多样的有机和无机化合物,因此生物精炼就是希望在以生物质为原料的加工工业中,打破传统生产方式中仅仅利用生物质中的某一种组分生产单一产品/类产品的观念,尽可能地充分考虑将原料中每一种主要组分都分别转化为不同的产品,实现原料全组分的高效充分利用和产品价值的最大化^[1]。图1为木质纤维素生物质生物精炼的示意图。Liu等^[2]对生物精炼进行过详细的综述。

通过对木质纤维素进行“生物精炼”,可以将木质纤维素的不同化学组分进行组分分离,进一步分别将不同组分转化成人社会发展所需要的食品、饲料、化学品、材料和燃料等,对缓解目前人

类社会面临的能源、资源、粮食、环境等危机,减少对石油基产品的依赖,促进人类社会的可持续发展具有重要现实意义,同时也为农业和化学工业提供了一个新的经济增长点。如木质纤维素原料中的纤维素组分,是由不同聚合度的葡萄糖链聚合而成的均一聚糖,可以通过纤维素酶水解的方式,将纤维素降解形成葡萄糖,进而可通过不同微生物发酵生成乙醇、丁醇、有机酸(如乳酸、丁二酸)、有机溶剂等液体燃料和化工产品;而半纤维素是由两种或两种以上单糖基组成的不均一聚糖,构成半纤维素线性聚糖主链的单糖主要有木糖、葡萄糖和甘露糖等,构成半纤维素短侧链的糖基有木糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、岩藻糖、鼠李糖和葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸等。半纤维素组成糖基的多样性,也寓意着半纤维素降解反应的复杂性和产品的多样性。可以将半纤维素通过不同半纤维素酶或稀酸水解后,将半纤维素分解成不同的单糖或寡糖组分,进而再进行分离纯化等步骤,生产不同功能的糖产品,如木糖、阿拉伯糖、低聚木糖等,木糖及其衍生物还可以进一步加工成木糖醇等各种功能食品,也可进一步加工生产糠醛和呋喃树脂等化工产品;而原料中的木质素是苯丙烷结构单元聚合而成的高分子聚合物,热值很高,是优质的固体燃料,



可以直接燃烧提供木质纤维素原料加工过程中所需要的热能(蒸汽和电力)。木质素也可被进一步用来生产高值的芳香族化合物,如香草醛、香草酸、阿魏酸、苯酚类物质等。通过对木质素的改性,木质素也可用来生产水泥减水剂、土壤改良剂等。高纯度的木质素可以用来作为聚氨酯泡沫塑料、橡胶等高分子材料的高比率添加剂,由此制成的生物塑料可以加工生产出具备类似木材和涤纶特性的产品。

通过对木质纤维素进行生物精炼,由于生产产品的多样化和高值化,在使生物质资源中不同组分都得到有效利用,减少资源浪费的同时,也使企业的经济效益和社会效益最佳化。例如企业可以在利用纤维素生产大量低值液体运输燃料,满足社会对能量产品需求的同时,利用半纤维素和木质素生产其他一些相对高值的化学产品,提高企业的经济效益,剩余的生物质废料(难以降解转化的组分)可以用于生产热、电来满足生产过程的能量需求和减少温室气体排放。

2 木质纤维素的组分分离是生物精炼的前提

木质纤维素原料具有复杂的化学组成,其中纤维素、半纤维素和木质素是主要的三大化学组分。它们分别以不同方式共同存在于细胞壁中,紧密地交织连接在一起。从空间结构上来看,在纤维素构架之间充满了半纤维素和木质素复合体。换言之,纤维素是被半纤维素和木质素复合体紧紧包裹着的。从化学组成上来看,纤维细胞壁中的纤维素、半纤维素和木质素等具有复杂的结构组成和性质,各组分相互之间存在着多种化学键的连接,如纤维素和半纤维素或木质素分子之间主要通过氢键连接,半纤维素和木质素之间除了氢键外,还存在醚键、酯键、糖苷键和缩醛键等化学键的结合。纤维素的葡萄糖分子链之间通过密集的氢键形成高度紧密排列的结晶区结构,难以被大分子的纤维素酶水解。因此,直接对木质纤维素原料进行生物转化的效率是非常低的。在转化过程中,各组分之间还相互影响,因此,必须首先对木质纤维素原料进行预处理,使不同组分分离开来,进而分别进行转化。木质纤维素实现生物精炼的关键问题之一就是如何高效、无污染地把天然植物纤维细胞壁中的各主要组分分离开来,这是木质纤维素原料进行生物精炼的前提基础。

木质纤维素的组分分离技术,也就是生物质原

料的预处理技术,是目前国内外研究的热点,也是生物质生物转化过程中的难点所在。到目前为止,预处理过程被认为是木质纤维素原料生物转化过程中的最关键步骤,也是成本最高昂的步骤之一。开发高效、低成本的预处理工艺对降低生物质生物转化的总成本至关重要。已经有大量的预处理技术被开发和报道,对其各自的预处理效果、预处理工艺条件、经济性评价等进行了分析^[3]。美国在这方面一直走在国际前列,如奥本大学(Auburn University)的氨水循环预处理技术、达特茅斯学院(Dartmouth College)的水和稀酸水解逆流和直流系统、密歇根大学(University of Michigan)的氨纤维裂解预处理技术、普渡大学(Purdue University)的可控制pH预处理技术,以及德克萨斯农工大学(Texas A&M University)的石灰预处理技术等。

Chempolis是芬兰一家专注于开发及提供以非木材和非粮食原料为基础的工艺技术及为工业综合利用提供生产解决方案的公司。他们开发的formico fib工艺的核心是用一种新型溶剂(关键物质是甲酸),将非木质材料进行有效和有选择的分离。新工艺的主要优势包括以下两方面。第一,低投资和运营成本。由于其独特的设计,最大限度地提高了与成本相关的营运效率,包括高的原材料利用率、能源自给、化学物质与水的再利用,以及生物化学品的合成生产等。此外,利用当地的廉价原料,最大限度地减少了原料运输费用。第二,最低限度的排放量。Formico fib工艺的最低限度排放量及环境上可持续的特点源于其环保的化学物质和产品,以及它们自身有效的回收和再利用。最低限度的水消耗量和全无氯、无二氧化硫,确保了对环境的最低限度排放量。此外,此工艺从生物质生成自身需要的能源,因此不会产生二氧化碳的净排放。

山东大学微生物技术国家重点实验室在木质纤维素的预处理和生物转化方面有较多的工作基础,先后在玉米秸秆、芦苇、玉米芯等原料的有机溶剂预处理、酸性预处理、高温热水预处理等方面作了大量的工作^[4-6]。例如,利用稀硫酸预处理,可以有效地将玉米秸秆和玉米芯原料中的半纤维素分离出来,通过分离纯化等步骤制备木糖等产品;酸性预处理后的废渣再采用碱性预处理或有机溶剂预处理,可抽提出其中的部分木质素组分,用于制备不同木素基产品或作为其他材料的添加剂;剩余的固体废渣中纤维素的含量很高,少部分可以作为微生物发酵培养基中的碳源发酵生产纤维素酶,其余部

分通过纤维素酶水解形成葡萄糖,并进一步发酵成燃料乙醇产品。

3 木质纤维素生物精炼技术发展概况

2012年,德国联邦教研部和联邦农业部组织来自科学界和经济界30多名不同技术领域的专家共同编制了《生物精炼路线图》^[7]。根据专家组的定义,生物精炼生产链条主要由四部分构成:(1)原料供应,即生物质原材料的制备供应;(2)一次炼制,即对生物质原材料进行成分分离,此阶段主要采用的是物理化学技术工艺;(3)二次炼制,即对经过一次加工后的中间产品进行转化处理,此阶段主要采用的是化学和生物技术工艺;(4)成品销售,生物精炼制成品进入销售市场。生物精炼作为整体系统包括4项核心要素:生物质原料、中间产品、工艺流程、最终产品。根据上述定义,发展生物精炼技术,需要考虑一个完整的生物质生产链,包括从生物质原料育种、种植、收获、预处理、生物质转化、产品生产等多个阶段的技术,这都将对木质纤维素生物精炼的最终成本产生影响。

在木质纤维素原料改良方面,基因工程技术已被广泛应用于提高植物总生物产量、降低或改变植物木质素的含量与成分、在植物体中大量表达纤维素降解酶等方面^[8-9]。利用植物基因工程技术调控光合作途径来提高植物对光能的捕获和利用效率,通过操纵植物营养代谢过程中的基因(如在黄杨中过量表达谷氨酸合成酶基因)、延迟或阻碍植物开花等手段和途径,有望提高植物总的生物质产量,在满足生物精炼产业大量原料需求的同时,降低原料成本。另一方面,通过基因工程改变木质素合成途径中不同基因的表达,可以降低木质纤维素原料中木质素的含量,提高纤维素含量。研究还发现,通过下调木质素合成途径中的某些基因(如柳枝稷的咖啡酸O-转甲基酶基因),可以降低S型/G型木素的比例,进而影响后续木质纤维素原料的预处理强度和纤维素酶解效率。只是在木质素合成途径的遗传调控方面,还需要做更多基础性的研究。此外,为减少对微生物发酵产生的纤维素酶的使用和依赖,科学家们也正试图利用基因工程技术在植物中表达生产纤维素酶。

将木质纤维素通过酶水解降解成可发酵糖类,是木质纤维素生物转化生产燃料和化学品过程中的另一个重要步骤。除了对木质纤维素原料进行预处理以改善酶水解的效率外,设法降低酶的生产和使用

成本也是目前的研究热点。降低酶的成本可以从降低单位酶的生产成本和提高酶的比活力以降低酶用量两个方面入手。具体方法包括:生产菌株的遗传改造和改良;发酵时采用廉价培养基并通过过程调控提高单位容积生产率;在满足应用需求时不对酶进行浓缩精制以便减少后处理过程,直接使用粗酶液进行酶解反应。山东大学在产酶技术方面有长期的研究基础,取得了一些重要进展^[10]。其他提高酶水解性能和降低成本的方法还包括:增加纤维素酶在水解过程中的稳定性;在水解过程中添加一些表面活性剂以减少酶用量;针对特定水解底物对酶系统进行优化;对纤维素酶进行复配来调整其酶系组成;纤维素酶的回收和循环再利用;改变纤维素酶的性质以更好地满足预处理后底物的需要,如在高温碱性预处理后,采用耐碱和耐热性的纤维素酶进行处理等。

因为木质纤维素材料中含有丰富的半纤维素,水解后产生大量的木糖、阿拉伯糖等戊糖,而传统发酵工业用微生物代谢戊糖转化成乙醇等产品的能力较弱,因此,通过基因工程、驯化等手段改造发酵微生物,使之具有直接利用戊糖、纤维二糖等非发酵性糖发酵生产乙醇等化学品的能力,对提高木质纤维素转化率、提高产品产率意义重大。此外,设法提高发酵微生物对预处理过程中产生的发酵抑制剂的忍耐性,使其对发酵环境具有更好的适应性(对高浓度产物的耐受性,如乳酸发酵菌株良好的嗜热耐酸性等),也是目前木质纤维素生物精炼中的研究热点。

山东大学在20世纪90年代与中国制浆造纸研究院合作,开展过纸浆-乙醇-饲料酵母联产的大量研究。首先,通过对麦草原料进行筛选等处理,以去除原料中的碎渣、草叶等不适于造纸的非纤维细胞等组分,处理后比较洁净的纤维原料采用亚铵法蒸煮制备纸浆。由于杂细胞的去除,有效地提高了纸浆的质量。其次,将原料在预筛过程中筛出的草渣,通过蒸汽破碎处理,将其中的半纤维素组分水解成易被利用的寡糖和单糖,再利用筛选出的高效利用半纤维素糖类的丝孢酵母,配合亚铵法制浆过程中产生的富含氮源和部分可溶性糖类的亚铵废液,将半纤维素糖类转化成高蛋白质含量的优质饲料酵母^[11-14]。制备的纸浆再经过筛选以去除纸浆中的细小纤维组分,可达到增加纸浆纤维长度、提高纸张强度的目的;而筛选出的细小纤维组分由于经过了蒸煮脱木素处理,非常容易被纤维素酶产生

菌利用,可小部分用于就地廉价生产纤维素酶粗酶液^[14];进而用生产的纤维素酶粗酶液将其余大部分细杂纤维,连同草渣蒸汽爆碎处理和水抽提后的纤维素残渣一起,通过同步糖化发酵技术生产燃料乙醇^[16-17]。亚铵法蒸煮废液除部分用于发酵用培养基的氮源生产饲料酵母和纤维素酶外,其余的废液可作为氮肥应用于农业生产,从而形成了一条以纸浆-乙醇-饲料酵母为主要产品的草类原料的生物精炼技术路线。该项研究成果在1997年曾被国家环保局从当年申报的390余项成果中选拔出来,作为26项推荐推广的环保科技成果转化项目之一。尽管这条技术路线有些复杂,至今仍未真正产业化,但从绿色化学的基本原则(可再生性原料、清洁生产工艺、原子经济性、保护生态等方面)来看,这一生物炼制思路仍具有很大的发展潜力。

玉米芯是一种富含半纤维素的农业废弃物,是当前我国生产木糖、木糖醇和糠醛等产品的主要原材料。目前我国用玉米芯生产功能糖(木糖、木糖醇、低聚木糖)和糠醛、糠醇等化学品的产业已初具规模,市场也得以快速增长。在山东、河南、河北、浙江、吉林等地已建起了多家功能糖和糠醛、糠醇厂,年产量近40万t,消耗玉米芯约300万t,产生约200万t的纤维素残渣。其中在“中国功能糖城”——山东省禹城市,就有多家大规模的玉米芯加工企业,年产木糖相关产品数万吨。由于上述生产企业仅仅利用了原料中的部分半纤维素组分,每7~10t原料才能生产1t产品,因此,在此过程中产生了大量固体废弃物——木糖渣。企业传统的处理方式是将这些废渣以低价卖给电厂,用于燃烧发电。但因其燃烧效果不佳,常被堆积如山。本课题

组的研究发现,由于去除了半纤维素组分,木糖渣中的纤维素含量可高达50%~60%,且由于经过了酸性预处理,相对玉米芯原料而言,木糖渣中的纤维素非常容易被纤维素酶水解生成葡萄糖,进而被发酵成乙醇。木糖渣中纤维素生成乙醇的转化率可以高达90%以上。由于原料中木糖已被用于生产高值产品,也就避开了木糖难以被酒精酵母转化为乙醇的难题。残余的木质素同样可以为企业生产过程中所需要的能量,或生产其他产品。技术经济分析显示,木糖相关产品-乙醇-木素联产工艺中的乙醇生产成本接近或低于粮食乙醇成本,具有良好的经济和社会效益^[18-20]。在此基础上,本课题组提出了以玉米芯为原料,“木糖相关产品-乙醇-木素”联产的生物精炼工艺,形成了一条上下衔接的产业链,实现了原料多组分利用、多技术集成、生产多种产品的新技术路线(图2)。

在木质纤维素生物转化生产燃料乙醇的生产过程中,纤维素酶的成本也是制约纤维素乙醇成本的一个重要因素。山东大学已开展纤维素酶生产技术研究30多年,纤维素酶制剂生产技术已经成功商业化。在此基础上,利用山东大学长期筛选、培育出的有自主知识产权的青霉工业菌株,就地使用木糖渣等工业废料作为主要成分,配制成廉价的工业培养基,现场生产出粗的纤维素酶发酵液,不经过任何分离提取过程,直接被送入木糖渣的酶解发酵工段。该工艺由于节省了商业酶制剂生产中的分离、浓缩等后续加工和运输等成本,大幅度地降低了纤维素乙醇生产的用酶成本,成功克服了常规纤维素乙醇生产工艺中商业纤维素酶成本过高的“瓶颈”问题。

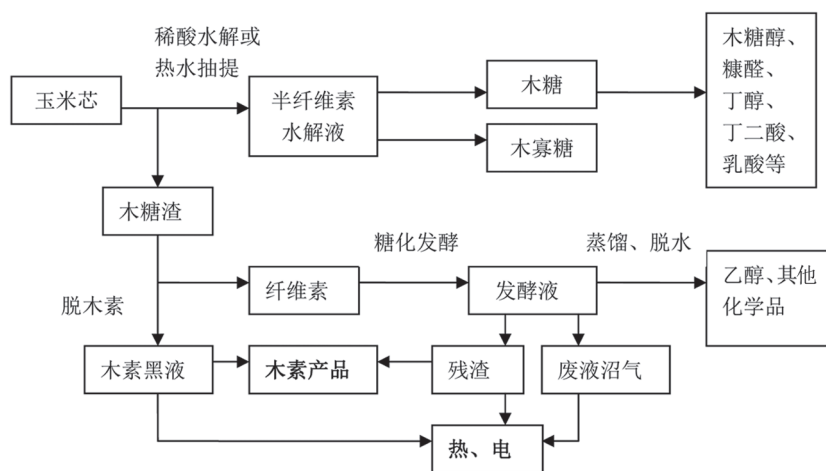


图2 玉米芯生物精炼技术过程示意图

利用上述技术,本课题组于2006年3月完成实验室小试,木糖渣发酵液乙醇浓度达8%,原料出酒精率达20%以上,纤维素转化率70%以上,发酵时间在64h以内。在此基础上,由山东龙力生物科技有限公司率先在国际上建成了用玉米芯年产3000t纤维素乙醇的中试装置和万吨级示范工厂,实现了工业规模试生产,纤维素乙醇生产成本已经可以达到粮食乙醇水平。最近,经国家发改委核准,建设了5万t/a纤维素乙醇装置,成为中国首家也是唯一一家获得国家批准的纤维素乙醇生产厂。这也是国际上最先通过生物精炼技术实现万吨级纤维素乙醇生产的装置之一,走在了国内外同行的前列。

4 木质纤维素生物精炼技术的发展展望

玉米芯生物炼制技术可以在全国推广应用。利用全国每年约4000万t玉米芯的50%,就可以年产400万t燃料乙醇和数百万吨木糖和木素相关产品,创造巨大产值,并增加农民收入和城镇就业。同时,在技术推广过程中,可以进一步完善相关技术,把原料扩大到其他纤维质材料(如各种其他秸秆和专门的能源作物)。多产品联产技术推广的难点在于不同产品的市场之间的平衡。只有努力扩大与市场巨大的液体燃料所联产产品的种类和用途(如丁醇、丁二酸、丁二醇、乳酸、油脂等),才能逐步形成能部分替代石化产业的生物质炼制巨型产业,通过发展循环经济,真正实现人类社会的可持续发展。

除了纤维素乙醇这一被广为所知的代表性生物基化学品以外,木质纤维素的生物精炼还可以生产具有较高附加值的专用化学品,如由五碳糖转化而来的丁醇、丁二醇,以及五碳糖和六碳糖制成的丁二酸(琥珀酸)。MBI国际公司琥珀酸的生产规模已达到了1000加仑,并找到了进一步降低成本的方法,以期开发出生产这种常用的化学中间体的有效方法。公司利用转基因产琥珀酸放线杆菌(*Actinobacillus succinogenes*)增加产量,减少副产品的生成,以便有效地通过纤维素工艺流程生产出这种化学中间体。

把玉米加工厂转为玉米全株生物精炼厂有巨大的发展潜力,其主要技术变化在于要增加加工木质纤维素材料的工艺技术。但迄今为止,哪种技术比较适用尚不明朗。一般的生物精炼模型是用稀酸预处理,再用过量石灰脱毒。此工艺产生大量石膏废

渣。最近美国NREL的中试工厂改进了此工艺过程。欧洲和加拿大开发的蒸汽爆碎技术也极具工业化应用潜力。该技术原来已经应用于生产纸浆,目前也被认为有可能应用于其他工业。美国农业部林产品实验室(FPL)的SPORL工艺是建立在传统的亚硫酸盐制浆工艺基础之上的。由于造纸厂在生产、设备、管理、运行、药品回收等方面都具有成熟的操作经验,虽然目前该工艺在纤维素乙醇生产等方面尚未有工业化规模的生产试验报道,但也有望具有很好的竞争优势。本课题组对芦苇热水预处理的研究结果表明,热水预处理由于处理过程中不添加酸等任何化学品,避免了设备的腐蚀,温和的预处理也避免了生成的单糖的进一步降解反应;与稀酸预处理相比,减少了对后续发酵过程有抑制作用的产物的形成,经过进一步优化,也可望成为一个较好的预处理工艺。

理论上讲,生物精炼技术是需要利用包括聚合物化学、生物工程、农业科学等在内的不同领域不同学科的知识,并在此基础上产生的一项新的交叉新技术。未来的生物精炼的形式可以多种多样,包括热化学平台和生物化学平台等,通常会生物转化技术和化学加工技术的组合。其技术发展的趋势包括开发更适合作为生物精炼原料的能源植物,改进木质纤维素分级分离和预处理方法,优化设计可再生原料转化的反应器,改进生物催化剂及催化工艺等。新型的生物精炼将会从可再生生物质中提炼出更多的产品,也可以利用更多的原材料,如工业过程中的废水、废物等都可能成为生物精炼的原料,并转化为新的产品。不同的生物精炼平台将产生不同的化学品,其中,琥珀酸、呋喃系列化合物、3-羟基丙酸、乙醛、甘油及衍生物、山梨糖醇、木糖醇、乙酰丙酸、生物碳氢化合物、乳酸、乙醇等被美国能源部评估为生物质炼制最有发展潜力的生物基化学品^[21]。

木质纤维素资源具有复杂的组成和结构,致使其全面转化利用也变得相当复杂。热化学平台和生化转化平台技术各有其独特的优势,也存在各自致命的弱点。如果能将两类技术有机地结合起来,或许可以克服各自的弱点,取得整体工艺的经济可行性。图3给出了两类技术整合的可能途径。

总体看,木质纤维素是地球上产量最丰富的可再生性资源,在人类社会可持续发展的进程中,特别是化学和能源工业的可持续发展中具有无可替代的重要作用。而生物精炼是木质纤维素资源能得

以全面和有效利用的关键技术,相关的生物转化研究具有重要而深远的意义。当然,生物炼制技术的采用会使整体工艺过程更加复杂,并且加大目前已经有些过大的资本投入,使其产业化的过程更加举步维艰。但我们相信,通过几代人的艰苦努力,最

终将实现生物质原料(淀粉、糖类、纤维素、木素等)全部利用,产品(燃料、大宗化学品、精细化学品、药品、饲料、塑料等)多元化,形成生物质精练巨型行业,部分替代不可再生的一次性矿产资源,实现以碳水化合物为基础的经济社会可持续发展。

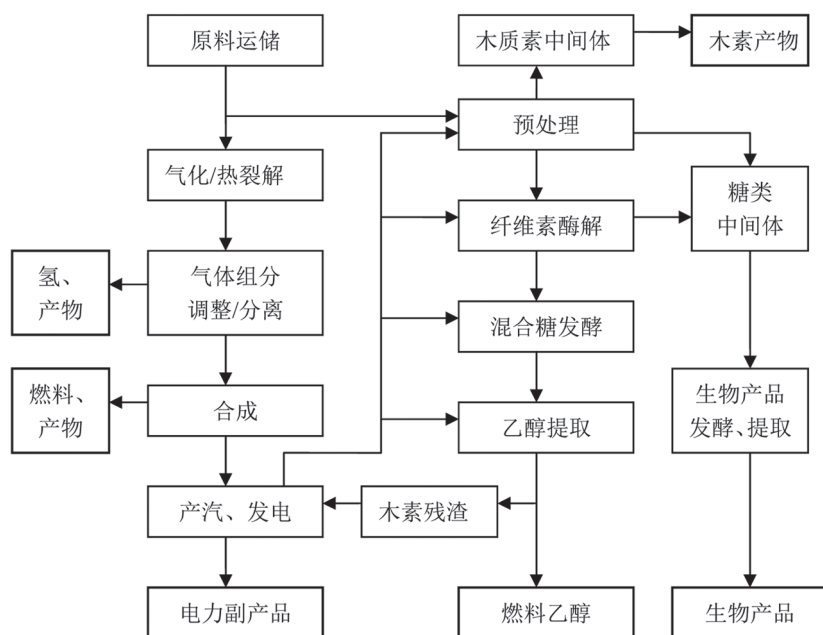


图3 热化学平台与生物化学平台的整合

[参 考 文 献]

- [1] Kamm B, Kamm M. Principles of biorefinery. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2004, 64: 137-45
- [2] Liu SJ, Abrahamson LP, Scott GM, et al. Biorefinery: Ensuring biomass as a sustainable renewable source of chemicals, materials, and energy. *Biomass Bioenerg*, 2012, 39: 1-4
- [3] 曲音波, 赵建, 陈冠军, 等. 木质纤维素降解酶与生物精炼[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011
- [4] 岳军, 姚兰, 赵建, 等. 木糖渣的有机溶剂预处理及酶解性能. *化工学报*, 2011, 62(11): 3256-62
- [5] Yao L, Yue J, Zhao J, et al. Application of acidic wastewater from monosodium glutamate process in pretreatment and cellulase production for bioconversion of corn stover – Feasibility evaluation. *Bioresour Technol*, 2010, 101(22): 8755-61
- [6] Lu J, Li XJ, Zhao J, et al. Enzymatic saccharification and ethanol fermentation of reed pretreated with liquid hotwater. *J Biomed Biotechnol*, 2012(2012): 276278
- [7] 王志强. 德国发布《生物精炼路线图》大力推进生物经济发展. *全球科技经济瞭望*, 2013, 28(2): 1-9
- [8] Menon V, Rao M. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Prog Energ Combust*, 2012, 38: 522-50
- [9] Fu C, Mielenz JR, Xiao X, et al. Genetic manipulation of lignin reduces recalcitrance and improves ethanol production from switchgrass. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(9): 3803-8
- [10] 曲音波. 木质纤维素降解酶系的基础和技术研究进展. *山东大学学报: 理学版*, 2011, 46(10): 160-70
- [11] Qu Y, Chen H, Gao P. SCP production from steam exploded hemicellulose autohydrolysate by *Trichosporon cutaneum*. *J Ferment Bioeng*, 1992, 73(5): 386-9
- [12] 陈洪章, 曲音波, 高培基. 纤维性废物蒸汽爆碎预处理和半纤维素水解物的水抽提. *林产化学与工业*, 1992, 12(3): 217-24
- [13] 陈洪章, 曲音波, 高培基, 等. 半纤维素蒸汽爆碎水解物生产菌体蛋白的菌种选育及发酵条件. *微生物学报*, 1993, 33(3): 236-8
- [14] 陈洪章, 曲音波, 高培基. 半纤维素蒸汽爆碎水解物连续发酵生产单细胞蛋白的研究. *食品与发酵工业*, 1993, (3): 7-12
- [15] Qu Y, Zhao X, Gao P, et al. Cellulase production from spent sulfite liquor and paper-mill waste fiber. *Appl Biochem Biotechnol*, 1991, 28-29: 363-8
- [16] Zhao X, Qu Y, Gao P. Acceleration of ethanol production from paper mill waste fiber by supplementation with β -glucosidase. *Enzyme Microb Technol*, 1993, 15(1): 62-5
- [17] 曲音波, 高培基. 造纸厂废物发酵生产纤维素酶、酒精和酵母综合工艺的研究进展. *食品与发酵工业*, 1993,

- (3): 62-8
- [18] Qu, Y, M Zhu, K Liu, et al. Studies on cellulosic ethanol production for sustainable supply of liquid fuel in China, *Biotechnol J*, 2006, 1(11): 1235-40
- [19] Fang X, Shen Y, Zhao J, et al. Status and prospect of lignocellulosic bioethanol production in China. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 4814-9
- [20] Liu K, Lin X, Yue J, et al. High concentration ethanol production from corncob residues by fed-batch strategy. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 4952-58
- [21] Bozell JJ, Petersen GR. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates – the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. *Green Chem*, 2010, 12: 539-54