

文章编号: 0254-0096(2007)01-0097-06

木质纤维素生物转化氢气技术及前景

宋佳秀, 任南琪, 邢德峰

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 根据国内外的研究现状, 综述了木质纤维素生物转化为 H_2 的技术原理及研究现状, 包括纤维素的生物糖化技术及微生物发酵法制取氢气技术, 并介绍了相关的微生物和相关成果, 对纤维素生物转化 H_2 存在的问题进行了探讨, 对前景进行了展望。

关键词: 木质纤维素; 纤维素酶; 厌氧发酵; 生物制氢

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A

0 引 言

生物制氢技术具有产生清洁能源和解决环境污染问题的双重功效而日益受到研究者的重视, 但是由于技术上的制约, 至今仍无法获得廉价的氢气。寻求效率高、成本低的制氢技术是科技人员急待解决的问题。木质纤维素是一个巨大的可通过微生物发酵作用将其转化为能源的可再生糖类资源, 降解各类纤维素以获得各种能源已经成为世界各国高度关注的问题^[1]。利用木质纤维素作为原材料最终获取氢气是一个大胆而有创新精神的设想, 它使获取廉价氢气和实现产业化成为可能。

目前, 木质纤维素转化为能源的主要的技术步骤涉及 3 个阶段, 第一阶段: 天然纤维素的预处理, 通常为非生物过程; 第二阶段: 纤维素原料转化为可发酵糖; 第三阶段: 可发酵糖经微生物发酵作用转化为清洁燃料(乙醇和 H_2) 和能源(木糖醇、乳酸、甘油等)。

1 纤维素的生物水解

1.1 纤维素的预处理

纤维素是植物细胞壁的主要成分, 为线性的 D-吡喃葡萄糖基借 $\beta-1,4$ 糖苷键连接的没有分支的缩合物^[2], 完全水解产物为葡萄糖。在植物纤维中, 纤维素分子以氢键构成平行的微晶束, 由于氢键数量很多, 因此微晶束相当牢固。同时, 天然的植物残

体中还含有植物残体中最难降解的木质素, 因此天然纤维素的结晶性和木质化这两大特征, 使人们将木质纤维素作为可再生原料直接转化为清洁燃料的期望受挫, 纤维素水解之前必须进行预处理。

预处理的目的是脱除木质素和半纤维素、降低纤维素的聚合度、提高后续酶水解速率、防止副产物阻碍后续水解和发酵过程。经过长期的实践应用, 木质纤维原料的预处理效果已经得到肯定。目前, 木质纤维原料针对水解的预处理技术很多, 包括: 物理法, 即通过机械粉碎或蒸汽爆破的方法破坏纤维素的晶体结构, 进而增加后续水解时和酶的接触面积; 物理—化学法, 就是将蒸汽爆破或机械粉碎和化学药剂处理相结合; 化学法, 主要为稀酸处理法和碱处理法。此外, 还有文献报道有臭氧法、有机溶剂法和氧化法等, 但这些方法因自身存在缺点很少被采用^[3]。物化法为目前常用的预处理法, 经蒸汽爆裂处理后酶法水解效率可达 90%, 氨纤维爆裂法效果也得到肯定, 但二者的投资稍高。徐忠^[4]等用粉碎结合氨处理大豆秸秆后, 使大豆秸秆纤维素含量提高 70.3%, 提高了大豆秸秆的酶解产糖能力。

1.2 纤维素酶及酶法糖化

纤维素的生物糖化的实质就是利用微生物或微生物产生的各种酶的作用下将纤维素分解为单糖和多聚糖的过程。由于纤维素有许多同质异晶体, 这种结构的复杂型可能诱导了纤维素酶的多样性。根据这些酶的水解功能, 纤维素酶被分为 3 大类^[5]:

收稿日期: 2005-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(30470054); 国家 973 重点基础研究发展计划项目(G2000026402)

内切型纤维素酶(系统名为 β -1,4-葡聚糖酶),是一组性质极为相似的一类酶的总称;外切型纤维素酶(系统名为 β -1,4-葡聚糖水解酶),也是一类酶的总称;纤维二糖酶(系统名为 β -葡萄糖苷酶)。

从20世纪50年代起,Reese、Wood^[6]等就相继提出了纤维素的酶解机制,其中协同降解机制目前得到学者的普遍认同。首先内切型纤维素酶将长链纤维素分子开裂,聚集结构解聚,为下一步水解提供纤维素末端;随后外切型纤维素酶作用于纤维素的分子末端,依次从纤维素分子中切下纤维二糖;最后由纤维二糖酶,这类酶将纤维二糖水解为葡萄糖。但是这种理论包括的许多机制还未被完全阐明,Yachihiko^[7]、Mcqueen 等人、高培基等人和 sinnott 等^[8]分别从生化的、分子生物学的和化学的角度对纤维素的酶解机制进行了卓有成效的探索。

1.3 纤维素酶的生产

能够产生纤维素酶的微生物在自然界中十分广泛,真菌、细菌、放线菌等在一定条件下均能产生纤维素酶。其中细菌和放线菌的纤维素酶产量很低,在工业上很少应用^[9]。而真菌产酶有很多优点:产酶效率高、结构合理,是胞外酶、便于分离和提取,甚至可直接应用,如黑曲霉(*Aspergillus niger*)、米根霉(*Rhizopus oryzae*)、米曲霉(*Aspergillus oryzae*)、绿色木霉(*Trichoderma viride*)、里氏木霉(*Trichoderma reesei*)、斜卧青霉等^[10]。从目前的研究进展看,只有木霉菌含有完全水解天然纤维素所必须的纤维素酶的3种组分,且产酶能力高,木霉属中的里氏木霉(*Trichoderma reesei*)受到了充分的重视,有较好的“抗代谢阻遏能力”,被认为是最具有工业应用价值的菌株。

目前纤维素酶生产的成本仍较高,降低纤维素酶生产的成本是目前纤维素最终转化为清洁能源并形成产业化的最关键的一步。

1.4 纤维素的酶催化水解

很多学者对纤维素酶水解条件和影响因素进行了大量研究,影响纤维素酶水解的因素主要有温度、pH值、底物种类、酶来源、水解时间等,而产物反馈抑制也是较难解决的问题,很多研究表明,纤维二糖的抑制作用最为明显^[11]。研究证明,纤维素酶水解的适宜时间为48~72h,适宜温度为40~55℃,适宜pH环境为4.5~5.5,在适宜的条件下一般可达到80%~95%的葡萄糖终产量。在纤维素酶水解过程中,糖的累积往往导致较强的产物抑制,可采用以下

几种方法克服^[12]:增加酶浓度、用外源 β -葡糖苷酶活性增补纤维素酶作用、用超过滤法移除水解液产生的糖、同时糖化和发酵底物,使生成的糖直接发酵进而降低浓度。在实验室研究和技术经济模型中,常用10~15FPU/g纤维素酶浓度^[12],因为它在适宜的时间、温度和pH环境内,能以较低酶成本获得高产的葡萄糖。

纤维素酶法水解得到的混合糖浆包括葡萄糖、少量多糖和寡糖,性质温和、无有毒物质,是微生物易利用的物质,适于作为微生物的发酵基质。

1.5 微生物直接将纤维素转化为单糖和多糖

这是种最近几年兴起但还不成熟的技术,其目标是利用纤维素分解菌直接利用纤维素底物使之转化为葡萄糖和多糖,并希冀直接利用所得糖化液进行发酵。目前的关键问题是提高纤维素降解菌的效能,已经有人试图利用基因工程来提高某些菌株的糖化能力。微生物直接转化法省去了纤维素酶的制备费用、缩短了反应时间、节省了投资,尽管其技术离产业化尚有距离,但已显示出了诱人的前景。

2 利用纤维素水解液发酵产氢技术

2.1 微生物发酵产氢技术

2.1.1 发酵产氢微生物

能够在代谢过程中产生分子氢的发酵细菌包括兼性厌氧菌和专性厌氧菌,主要有肠杆菌科(*Enterobacteriaceae*)、梭菌属(*Clostridium*)、巨型球菌属(*Megasphaera*)、韦荣氏球菌属(*Veillonella*)、互养球菌属(*Syntrophococcus*)、线形醋菌属(*Acetofilamentum*)、醋微球菌属(*Acetomicrobium*)、醋弧菌属(*Acetivibrio*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、闪烁杆菌属(*Fervidobacterium*)、瘤胃球菌属(*Ruminococcus*)、真杆菌属(*Eubacterium*)、粪球菌属(*Coprococcus*)等。这些细菌能够利用多种底物在氢酶^[13]或固氮酶^[14]的作用下将底物分解制取氢气^[15]。

2.1.2 发酵产氢机理

有机底物在厌氧发酵细菌的作用下经过水解,通过EMP、HMP、ED途径或Stickland反应后形成不同的发酵类型:乙醇发酵、丁酸发酵、丙酸发酵、乳酸发酵、混合酸发酵^[16,18]。在活性污泥发酵过程中,根据主要发酵末端产物的组成为以下几种发酵类型:丁酸型发酵、丙酸型发酵和混合酸发酵合乙醇型发酵等,其中丁酸型发酵和乙醇型发酵具有较强的

产氢能力^[16,19]。

在厌氧发酵反应中,发酵代谢通过多余电子(e^-)的平衡调节途径^[16]和 $NADH/NAD^+$ 平衡调节途径^[17],达到了内部平衡,既不产生净还原力,也不需要净还原力,只通过基质水平磷酸化产生 ATP,细菌在这种生长方式中接受的能量较少,因此转化单位基质的生长比率就低,而 H_2 的产生能够产生更多的氧化产物。在厌氧菌体内没有呼吸链传递体系,底物脱氢后产生的还原力 $[H]$ 直接交给内源性中间代谢产物,此过程中产生的 $NADH + H^+$ 或 $NADPH + H^+$ 通过厌氧脱氢酶脱去氢使其氧化再生,产生 H_2 。这一作用必须借助与丙酮酸或由丙酮酸产生的其他化合物的氧化还原机制完成。而不同种类的细菌因其生化反应体系的不同就会产生多种特征性的末端产物,从而形成不同的发酵类型。

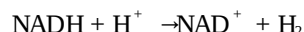
2.1.3 发酵产氢途径

2.1.3.1 多余电子(e^-)的平衡调节产氢

厌氧产氢细菌直接产生氢气的过程发生在丙酮酸脱羧作用中,丙酮酸经丙酮酸脱氢酶脱羧后,形成硫胺素焦磷酸——酶的复合物,同时将电子(e^-)转移给铁氧还原蛋白(Fd),还原的铁氧还原蛋白被铁氧还原蛋白氢化酶重新氧化,产生分子氢。

2.1.3.2 $NADH/NAD^+$ 平衡调节产氢

厌氧细菌在产酸发酵过程中产生的 $NADH + H^+$ 与不同的发酵类型相偶联,存在 $NADH + H^+$ 的再生和消耗,从而保证 $NADH/NAD^+$ 的平衡。当 $NADH + H^+$ 的消耗过程相对于再生过程较慢时,必然产生 $NADH + H^+$ 的积累,因此生物体必须采取其他调控机制,如 $NADH + H^+$ 的反馈抑制或阻遏作用,减少乙酸、丙酸、丙酮、丁酸、丁醇或乳酸的产率以减少 $NADH + H^+$ 的再生量,或通过增加甲酸、琥珀酸的产率以增加 $NADH + H^+$ 的消耗量。在厌氧氢化酶的作用下,剩余的 $NADH + H^+$ 可通过释放分子氢使 $NADH + H^+$ 再生,产氢分子式为:



2.1.4 发酵产氢研究现状

国内外对产氢发酵细菌和各种发酵基质的产氢都进行了大量的研究,有葡萄糖、蔗糖、淀粉、牛奶、短链脂肪酸、纤维素和有机废水等。研究结果表明:反应条件对菌体的产氢能力都有较大影响,表 1 列出国内外部分产氢能力较强的产氢菌株和混合菌的产氢能力。由表 1 可见,不同条件下产氢纯菌和混合菌产氢率不同,而不同的菌株对同一种底物的产氢能力也不同。通常认为,丁酸型发酵产氢能力较好,并为国外学者普遍采用^[20~22];一般纯菌产氢能力强,但混合菌(厌氧活性污泥)的协同作用使产氢能力更加稳定,比产氢率较高。

表 1 一些产氢微生物的产氢能力

Table 1 Microbial hydrogen production capability

	微生物	基质	运行条件	产氢率	文献
纯菌	Clostridium sp strain No. 2	葡萄糖	连续	1.61 ~ 2.36	26
	Enterobactor aerogenes	葡萄糖	连续	1.30 ~ 2.30	26
	Clostridium butyricum IFO13949	葡萄糖	连续	1.9 ~ 2.3	27
	Clostridiumbei jerincki AM21B	葡萄糖	连续	1.30 ~ 2.00	26
	Enterobactor aerogenes	糖蜜	间歇	1.58	28
	Enterobacter aerogenes E. 82005	糖蜜	连续	2.2 ~ 3.5	29
	厌氧污泥分离纯菌 No. 5	蔗糖	间歇	4.7	16
混合菌	Anaerobic microflora	糖蜜	连续	1.9 ~ 2.59molH ₂ /mol 己糖	30
		麦米壳	间歇	1.73 molH ₂ /mol 己糖	
	Anaerobic microflora	豆腐渣		2.54 molH ₂ /mol 己糖	31
		稻米壳		1.29 molH ₂ /mol 己糖	
	Anaerobic microflora	葡萄糖	连续	1.43	32
	Anaerobic microflora	葡萄糖	连续	2.1	33
	Mesophilic sewage sludge	葡萄糖	连续	1.7	34
	Mesophilic sewage sludge	蔗糖	间歇	1.85	30

注:产氢率采用 mol H_2 /mol 基质表示

任南琪等^[23]对碳水化合物(含糖废水)为底物以自絮凝的厌氧活性污泥为氢气生产者的发酵产氢进行了多年的研究,研制出了高效生物制氢反应器,发现了一种新的产氢发酵类型——乙醇型发酵,并在乙醇型发酵污泥中分离出了高效产氢新菌种 B49^[24],产氢能力居世界第 2,并于 1999 年完成中试。发酵气中氢气含量为 40%~49%,其余为 CO₂,经洗脱塔吸收后可获得 99.5% 的纯氢气,稳定产氢能力达到 5.7m³/(m³_{反应器}·d)^[25],具备了工业化生产的条件,目前已开始了生产性试验阶段。

2.2 纤维素转化为氢气的生物过程及工艺

综上所述,在生物转化纤维素为 H₂ 的过程中共涉及 3 种生物过程: 纤维素酶的生产; 纤维素酶对纤维素进行水解糖化,得到混合糖浆; 对纤维素水解产物进行发酵,得到目的产物 H₂。其工艺可根据这 3 种生物过程的发生顺序及形式分为 3 类: 先酶法水解后发酵工艺 (SSF): 在这个工艺中,纤维素酶生产、纤维素酶水解和水解产物的发酵分别在各自的反应器中顺序进行。该法的优点是纤维素产酶菌、纤维素水解和发酵细菌菌反应分别在各自适宜的温度、pH 值等环境条件下进行,反应完全且副产物少,但是占用反应器体积大、工艺复杂、必然增加设备的投资; 同步水解和发酵工艺 (SSCF): 在这个工艺中,纤维素酶首先生产,纤维素的酶水解和水解产物的发酵在一个反应器内同时进行,经酶水解得

到的糖可即时被发酵细菌利用产生发酵产物。该法的优点在于糖化产物即时被发酵菌利用,避免了糖化产物对纤维素酶的抑制作用、纤维素酶需要量少而糖化效率高、节省了反应器空间、减少了设备的投资。但是发酵产物容易对酶产生抑制作用,且酶的最适反应温度高于发酵反应,因此解决这一矛盾尚需更多的研究; 统一的产酶水解发酵工艺 (CBP): 在这个工艺中,纤维素酶生产、纤维素酶水解和水解产物的发酵的过程在同一反应器中同时进行,3 种生物过程同时发生。该法使反应设备和反应条件大为简化,尽管 CBP 工艺的理论和技术还远不成熟,但是 CBP 工艺理论上的可行性和经济上的合理性日益受到众多研究者的重视^[35]。SSF 和 SSCF 工艺与 CBP 工艺最根本的区别就是纤维素的产酶过程是否独立于发酵过程之外^[36]。

图 1 比较了 SSF、SSCF 工艺和 CBP 工艺的代谢和能量利用过程的特征。在 3 种工艺中最终都可由厌氧微生物进行发酵代谢产生我们所需的产物——H₂。在 SSF 和 SSCF 工艺中,纤维素酶的生产过程独立出来,一部分纤维素原料可用于产生纤维素酶 (F),剩余部分用于水解和发酵 ($1-F$)。许多对 SSF 和 SSCF 工艺的特性进行研究的结果都提出 F 值范围在 0.03~0.05 较适宜^[37~39],在这个范围内,产生的纤维素酶活符合典型值 10~15FPU/g 底物,可以满足后续的纤维素酶水解需要。确定适宜的 F

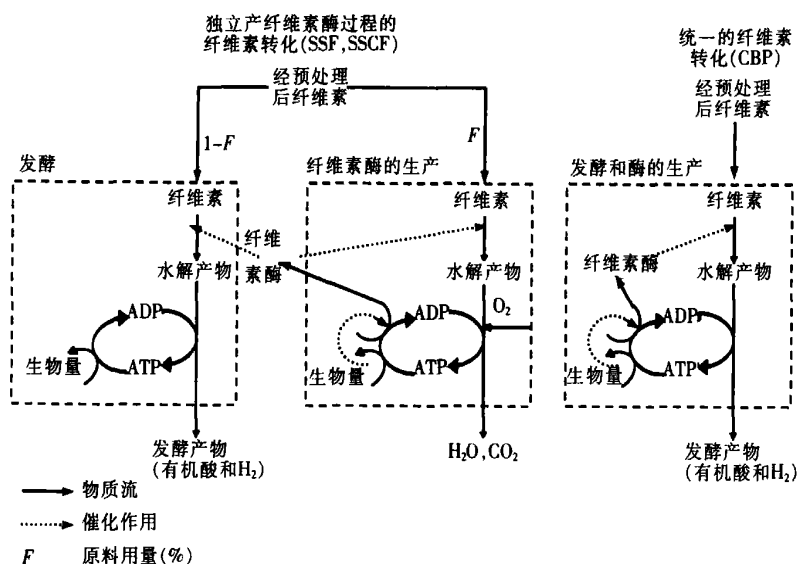


图 1 纤维素生物转化为 H₂ 代谢过程

Fig. 1 Metabolic process for microbial hydrogen production by cellulose

值可以减小纤维素水解的生物反应器的耗费,使反应过程更加经济。而 CBP 作为统一的生物过程同 SSF 和 SSCF 相比,具有更大的节省费用的空间。CBP 工艺将 3 种生物过程统一在一个反应器内进行,减少了纤维素酶生产过程的投资,而且 CBP 工艺在微生物能量利用方面更加完全。

2.3 木质纤维素生物转化氢气技术前景

由于能源危机和生态环境的恶化,清洁能源——氢气的利用已成为未来能源利用的发展趋势,利用廉价的原料进行氢气生产势在必行。从可持续发展来看,以木质纤维素类物质作为原材料进行产氢将会是制氢工业一个非常具有潜力的发展方向。

虽然人们对纤维素的水解糖化技术已经研究了不少的时间,但直到今天我们也并没有找到一种高效的酶或微生物来利用这巨大的天然可再生资源,获取纤维素水解液的成本仍然较高。很多研究人员致力于基因工程技术和生物信息学以期改进纤维素酶活性和微生物水解能力,且从自然界中筛选出了一些能够较好的降解纤维素的微生物,但是,在纤维素的生物降解方面我们还需进行大量的工作。

在利用发酵法制取氢气技术方面,氢气的产率仍需提高,虽然人们在混合菌群中分离出了很多产氢能力高的菌株,但在实际应用方面有待突破。

[参考文献]

- [1] Glazer A, Nikaido H. Microbial biotechnology-fundamentals of applied microbiology[M]. New York, New York and Basingstoke Copyright, 2002:12—19.
- [2] 聂剑初,吴国利,张翼伸,等.生物化学简明教程[M].北京:高等教育出版社,1988.
- [3] 朱跃钊,卢定强,万红贵,等.木质纤维素预处理技术研究进展[J].生物加工过程,2004,2(4):11—14.
- [4] 徐忠,汪群惠,姜兆华.氨预处理对大豆秸秆纤维素酶解产糖影响的研究[J].高效化学工程学报,2004,18(6):773—776.
- [5] Elena S, Lyman, Li Bin, et al. Purification and characterization of a cellulose-binding β -glucosidase from cellulose-degrading cultures of *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1995, 61(8): 2976—2980.
- [6] Wood T M, Macgregor S I. In bioconversion of cellulose substance into energy, chemicals and microbial protein[M]. India: Ghose Gall press, 1978:111—141.
- [7] 刘翔,何国庆.利用木质纤维素生产燃料乙醇的微生物代谢工程[J].粮油加工与食品机械,2003,(8):67—69.
- [8] 张平平,刘宪华.纤维素生物降解的研究现状与进展[J].天津农学院学报,2004,11(3):48—51.
- [9] 刘春芬,贺稚非,浦海燕,等.纤维素酶及应用现状[J].粮食与油脂,2004,(1):15—18.
- [10] Li X, Gao P. CMC-liquefying enzyme, a low responsible for fragmentation from *Streptomyces* sp. LX[J]. Journal of Applied Microbiology, 1997, 83(2):59—66.
- [11] Lee Y H, Fan L T. Kinetic studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: () Analysis of extended hydrolysis times[J]. Biotechnol Bioeng, 1983, 25: 939—966.
- [12] 余丽清.纤维素酶水解及转化为乙醇的研究进展[J].世界林业研究,2004,13(2):30—34.
- [13] 尤崇杓,姜涌明,宋鸿遇.生物固氮[M].北京:科学出版社,1987:56—64.
- [14] 朱章玉,俞吉安,林志新,等.光合细菌的研究及应用[M].上海:上海交大出版社,1991:23—34.
- [15] Cohen A, Van Gemert J M, Zoetemeijer R J, et al. Main characteristics and stoichiometric aspects of acidogenesis of soluble carbohydrate containing wastewater [J]. Processes Biochem, 1984, 19(3):228—234.
- [16] 任南琪,李建政,林明,等.产酸发酵产氢机理探讨[J].太阳能学报,2002,23(6):124—126.
- [17] 李冬敏,陈洪章,李佐虎.生物制氢技术研究进展[J].生物技术通报,2003,5(4):1—5.
- [18] 周德庆.微生物教程(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2002:112—119.
- [19] Das D, Vezirgilu T N. Hydrogen production by biological processes: A survey of literature[J]. Int J Hydrogen Energy, 2001, 26(4):13—28.
- [20] Zhu Ying, Wu Zetang, Yang Shangian. Butyric acid production from acid hydrolysate of corn fibre by *Clostridium tyrobutyricum* in a fibrous-bed bioreactor[J]. Process Biochemistry, 2002, 38:657—666.
- [21] Chang Joshua, Lee Kuoshing, Lin Pinjei. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27:1167—1174.
- [22] Borja R, Sánchez E, Rincón B, et al. Study and optimisation of the anaerobic acidogenic fermentation of two-phase olive pomace[J]. Process Biochemistry, 2005, 40:281—291.
- [23] 任南琪,王宝贞.有机废水发酵法生物制氢技术[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1994.
- [24] 林明.高效产氢新菌种的产氢机理及生态学研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学市政与环境工程学院,2002:29—40.
- [25] 李建政,任南琪,林明,等.有机废水发酵法生物制

- 氢中试研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 252—256.
- [26] Taguchi F, Mizukami N, Saitotadi T, et al. Hydrogen production from continuous fermentation of xylose during growth of clostridium sp. strain No. 2[J]. Canadian J Microbiology, 1995, 41 (6): 536—540.
- [27] Yokoi H, Maeda Y, Hirose J. H₂ production by immobilization cell of clostridium butyricum on porous glass beads[J]. Biotechnology Techniques, 1997, 11(16): 431—433.
- [28] Tanisho S, Kuromotto M. Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microflora in chemostat culture[J]. J Fermentation and Bioengineering, 1998, 82 (7): 194—197.
- [29] Tanisho S, Ishiwata Y. Continuous hydrogen production from molasses by fermentation using urethane foam as a support of flocks[J]. Int J Hydrogen Energy, 1995, 20 (7): 541—545.
- [30] Ueno Y, Otauka S, Morimoto M. Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microflora in chemostat culture[J]. J Ferment Bioeng, 1996, 82(9): 194—197.
- [31] Noike T, Mizuno O. Hydrogen fermentation of organic municipal wastes[J]. Wat Sci Tech, 2000, 42 (12): 155—162.
- [32] Osamu M, Hawkes D, Hawkes F R, et al. Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging[J]. Bioresource Technology, 2000, 73(3): 59—65.
- [33] Fang H H P, Liu H. Effect of pH on hydrogen production from glucose by amixed culture[J]. Bioresource Technology, 2002, 82(5): 86—95.
- [34] Lay J J. Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen[J]. Biotechnol Bioeng, 2000, 68(6): 269—278.
- [35] Lynd L R, Cushman J H, Nichols R J, et al. Fuel ethanol from cellulosic biomass[J]. Science, 1991, 251 (8): 1318—1323.
- [36] Lee R Lynd, Paul J Weimer, Willem H van Zyl. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2002, 66 (5): 545—547.
- [37] Dale B E. Biobased industrial products: priorities for research and commercialization[M]. Washington D C: National Research Council, National Academy Press, 1999: 56—67.
- [38] Wooley R, Ruth M, Gassner D, et al. Process design and costing of bioethanol technology: a tool for determining the status and direction of research and development[J]. Biotechnol Prog, 1999, 15 (3): 794—803.
- [39] Wright J D, Wyman C E, Gohmann K. Simultaneous saccharification and fermentation of lingo-cellulose: process evaluation[J]. Appl Biochem Biotechnol, 1988, 18 (6): 75—89.

PROSPECT FOR INVERTING CELLULOSE INTO HYDROGEN BY BIOLOGICAL TECHNOLOGY

Song Jiaxiu, Ren Nanqi, Xing Defeng

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Cellulose belongs to reproducible glucide resource that can be utilized as energy by microbiological fermentation. With the understanding of the configurations and components for cellulose and the further research of cellulose enzyme manufacture the cellulose could be inverted to mixed syrup cheaply. The results showed that the cellulose transfer into hydrogen is possible. From the relative research this paper was giving the relative technology and mechanism from cellulose to hydrogen including cellulose inverting technology and biological hydrogen production technology by fermentation. The promising development for this technology is also further prospected.

Keywords: cellulose; cellulose enzyme; anaerobic fermentation; biological hydrogen production

联系人 E-mail: sjxiu @163.com