纤维类物质生产乙醇的研究进展

聂恒，朱静，段旭，池雅琴，程晟，郭兴焱

摘要：介绍了燃料乙醇的意义、国内外的发展现状和趋势，重点综述了燃料乙醇工艺中的预处理技术和发酵工艺技术，对预处理的各种方法的优缺点进行了归纳，分析了木质纤维素的资源组成成分及结构对其有效转化乙醇的影响及解决办法，最后对纤维素燃料乙醇工业进行了展望。

近年来，随着石油资源日趋严重不足，能源供应短缺、燃料安全和环境污染压力紧随而至，迫使人类愈加关注自然和社会的可持续性发展，发展新型的可再生原料和能源已成为全球的共识。从20世纪70年代中期开始，世界各国开始尝试利用生物技术对可再生
资源进行燃料乙醇的生物转化，并以此作为石油能源的
替代物[1]。纤维素原料是地球上分布广泛且数量巨大的可再生资源，每年仅陆生植物就可产生纤维素约500亿t。

纤维素资源还是最主要的生物质资源，它占地球生物总量的60%～80%。我国的纤维素原料也很丰富，仅农作物秸秆、皮壳一项，每年产量就达7亿多t。其中玉米秸(35%)、小麦秸(21%)和稻草(19%)是我国的3大秸秆资源，林业副产品、城市垃圾和工业废物数量也很可观[2]。纤维素燃料乙醇还是一种清洁能源，据悉，纤维乙醇燃料燃

烧时排放的温室气体比汽油少90%。因此，纤维类物质生物转化乙醇的工艺技术不仅意义重大，而且不久将会实现工业化[3]。

1燃料乙醇的意义、发展现状和趋势

1.1燃料乙醇的意义

乙醇已不单是一种优良燃料，它已经成为一种优良的燃油品质改善剂被广泛使用，作为一种新型的，可再生清洁能源而越来越受到世人的重视[4, 5]。全世界积极推广使用燃料乙醇主要有以下三个重要意义：

一是可缓解石油紧缺矛盾。

二是非粮纤维物质代替粮食生产乙醇可有效解决世界粮食危机。目前粮食危机是世界三大问题之一。非粮纤维类物质既不与人争粮又来源丰富，品种多，再生时间短，是生产乙醇无可挑剔的可再生原材料。

三是有利于环境改善。燃料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，用以代替四乙基铅和甲基叔丁基醚(MT-BE)或乙基叔丁基醚(ETBE)，乙醇调入汽油对降低汽车尾气中的一氧化碳含量很有效，起到净化空气和保护环境的效果[6]。

1.2燃料乙醇的国内外发展现状

在燃料乙醇的生产研发方面，北美和巴西走在前列，而且在未来20年仍然保持着大规模燃料乙醇生产的竞争力 [7]。

据美国石油学会统计，美国2000年燃料乙醇的产量为500万t，其中92%的燃料乙醇混合到汽油中。2006年7月7日，美国能源部公布了一份新的清洁燃料发展路线图，提出今后将在植物纤维原料水解生产乙醇替代汽油方面下大力气[8]。

美国能源部还制定计划，希望通过对酵母菌的基因工程改造，在2015年左右纤维素燃料乙醇成本由每升28美分降到18美分，使其能大规模应用[9]。

巴西
是世界上
最大的乙醇生产国
和消费国，有着丰富的甘蔗资源，使
其乙醇生产成本很低，生产能力达1200万t/a[10]
。巴西不仅是乙醇生产的最大国，且生产工艺技术日渐成熟，是以燃料乙醇替代石油最成功的国家之一，现为世界上

唯一不供应纯汽油的国家。巴西农业部长罗伯托·罗德里格斯宣布，到2013年，巴西计划将乙醇燃料的年产量扩大到350亿L，其中约100亿L将用于出口[8]。

日本是石油进口第二大国，由于国内粮食生产不足，故对以纤维素为主的生物质废物为原料生产燃料乙醇的技术十分重视。日本每年约产1000万t废木屑，不少企业利用自行开发的技术或引进它国技术开展了以废木屑为原料的燃料乙醇的工业转化试验，日本政府也积极促进纤维素制乙醇技术的研发[11]。

在其它一些发达国家如欧盟、加拿大，发展中国家如泰国等，都已将燃料乙醇作为重点发展项目。

我国在“十一五”规划中也制定了发展燃料乙醇的规划。规划的方案分三步：第一步在吉林、河南等省以过剩玉米为原料生产燃料乙醇，并作为含氧添加剂在汽油中掺入10%，这一目标已初步实现；第二步在有条件的省区利用当地优势资源如早灿稻、甘薯和甘蔗等生产燃料乙醇；第三步就是利用植物桔杆、稻壳等纤维素生产燃料乙醇，并全面推广。

2001年，国家计委等5部委颁布了《陈化粮处理若干规定》，建立了第一批燃料乙醇企业：安徽丰原生化、黑龙江华润酒精、河南天冠集团和吉林燃料乙醇公司。2002年，我国开始试点生物燃料乙醇的开发。2004年2月，经国务院同意，国家发改委等8部门联合颁布了《车用乙醇汽油扩大试点方案》和《车用乙醇汽油扩大试点工作实施细则》，把推广使用车用乙醇汽油作为国家一项战略性举措。目前，我国生物燃料乙醇生产技术已经成熟，黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽5省及湖北、河北、山东、江苏部分地区已基本实现车用乙醇汽油替代普通无铅汽油。2006年6月26日，河南
天冠集团建成
投产了我国首条秸秆乙醇中
试生产线，标志着我国在生物质能源利用领域已跻身世
界行列[11]
。目前，在我国一些边际地区正在开发利用甜高粮秸秆生产燃料乙醇的项目，2009年在新疆由莎车县与浙江浩淇生物质新能源科技有限公司共同开发，将在5年内建成年产30万t的甜高粱秸秆制取无水燃料乙醇项目，莎车县4个乡镇将种植约1330hm^2
的甜高粱，总投资12.6亿元。2010年4月内蒙古巴彦淖尔市中兴能源有限公司年产10万t甜高粱茎秆燃料乙醇项目开工奠基剪彩，计划总投资13.5亿元，总占地面积100hm^2[12]。

1.3发展趋势

高效破坏植物
纤维结构，降低生产成本的预处
理技术的开发，仍然是目前燃料乙醇工艺研究的热点[13]
。通过基因工程途径构建生产纤维素酶的高效工程菌，通过分子演化和设计来提高酶的功能性，通过强化的低成本发酵来生产纤维素酶等相关研究成为纤维素酶的研究主流。高活性、高耐受性、高发酵水平以及同时转化五碳糖、六碳糖的高性能菌种的研究仍然是纤维素燃料乙醇的主要研究方向[14]。总之，未来燃料乙醇的发展方向是环保，安全及低成本。另外，随着技术的不断进步，麦秸、玉米秆、稻草等农业秸秆，林牧副产品以及城市生活垃圾等纤维类生物质资源经过生产加工，最终都可以变成能够替代石油的燃料乙醇，对缓解能源短缺、促进农村经济产业结构的调整，保护大气环境等均有重要的战略意义[15]。

2维素类物质生产乙醇的一般生产工艺、预处理技术和发酵工艺技术

2.1维素类物质生产乙醇的一般生产工艺

在过去的20年里，对木质纤维原料转化乙醇的方法开展了广泛研究，一般来说，转化分为两步：把纤维素水解为葡萄糖，即需要先完成纤维素物料的糖化过程；纤维素水解为单糖以后，再发酵生产乙醇。水解通常采用纤维素酶催化，发酵通过酵母菌或细菌实现。

微生物发酵生产乙醇的过程一般分为4个流程：预处理、酶解、发酵以及回收。

2.2预处理及相关技术

生物质的预处理主要包括对纤维素、半纤维素和木质素组分的粉碎、溶解、水解和分离。预处理的主要目的是降低

纤维素的相对分子质量，打开其密集的晶状结构，以利于进一步的分解和转化。预处理是生物转化的关键步骤，影响整个纤维素乙醇生产过程。因此，目前国内外研究者对预处理技术的研究甚多，其成果也很显著。如表1所示。

表1　生物质的预处理方法统计表

Table 1　Pretreatmental methods of biomass

预处理方法	分类	方法	优缺点		参考文献
			优点	缺点	
物理法	机械粉碎	球磨、碾磨、辊筒等将纤维素物质粉碎	无膨润性，体积小，提高基质浓度	能耗较高，处理效果较差	[16]
	热液分解	物料置于高压热水中	高产率的半纤维素转化的糖，较高的酶解效率	生成糠醛等微生物发酵的抑制物	[17]
	蒸汽爆碎	物料水热到 200 ℃左右，保持 0.5 ~ 15 min，后迅速减压，纤维素纤维结构发生机械断裂，内含水去蒸时产生巨大的爆破力、摩擦力与碰撞力，使纤维原料被破碎	半纤维素的水解和木质素的转化效果明显	设备要求较高，能耗较大，生成糠醛等微生物发酵的有害物质	[18]
	微波处理	1 mm ~ 100 cm 范围内（频率 300 MHz ~ 300 kMHz）的电磁波	时间短、操作简单、糖化效果明显	费用高，难工业化	[19]
	超声波处理	振动频率大于 20 kHz 的声波，以纵波的方式在弹性介质内传播，产生力学效应、空化效应和热效应	时间短、操作简单、糖化效果明显	费用高，难工业化	[20]
	高能辐射	高能射线如电子射线、γ 射线	降低纤维素聚合度和增加纤维素的活性	设备要求高，限于实验室	[21]
化学法	酸处理	浓酸 HCl 和 H_2SO_4 等浓酸溶液预处理木质纤维素 稀酸 H_2SO_4 等稀酸溶液预处理木质纤维素	比稀酸处理效果更好 纤维素水解较好，较常用，技术成熟	生成糠醛等微生物发酵的有害物质，设备要求高，废液回收成本高 废液造成环境污染	[22] [23]
	碱处理	氨水、$Ca(OH)_2$、NaOH、碱性过氧化氢等处理，OH— 削弱氢键和酯键，发生皂化反应	降低纤维素的结晶度	成本高，不易回收，废液造成环境污染大	[24]
	酸催化有机溶剂处理	有机溶剂甲醇、乙醇、丙酮、乙烯基乙二醇、三甘醇及四氢化糠基乙醇和有机酸（指草酸、乙酰水杨酸和水杨酸等）萃取木素	脱出木素，避免毒素，降低成本	环境污染严重	[25]
	氧化处理	氧气、臭氧、过氧化氢等强氧化剂将木质素氧化分解，同时溶出大部分的半纤维素	条件温和，操作简便	生产成本昂贵	[26]
物理化学结合法	氨冷冻气爆法	液态氨（压力 115 MPa，温度 50 ~ 80 ）℃处理一定时间，然后突然减压使原料爆破。	能耗低，氨可回收利用，有害物质少	设备要求高	[27]
	CO_2 汽爆法	高温高压下体原料和 CO_2 反应	增加木质纤维原料的水解率	爆破效果差，成本高	[28]
生物法	微生物降解木质素		操作简单，能耗低、无污染、条件温和	处理周期长，损失部分纤维素和半纤维素	[29]

2.3发酵及相关技术

目前发酵生产乙醇的方法主要有：异步糖化发酵法(Separate Hydrolysis and Fermentation，SHF)、同步糖化发酵法(Simultaneous Saccharifica-tion and Fermentation，SSF)、联合生物加工(Con-solidated Bioprocessing，CBP)、共固定化发酵法(Co-immobilization Fermentation，CIF)等。

异步糖化发酵法，即糖化、发酵二段发酵法，其最大的缺点是预处理过程中生成的纤维二糖和葡萄糖反馈抑制了纤维素酶的活性。

为了解除异步糖化发酵法引起的抑制效应，目前研究者将更多的目光和注意力转移到了同步糖化发酵法。其特点是纤维素酶对纤维素的水解和酵母发酵生成乙醇在同一容器内连续进行，这样酶水解的产物—葡萄糖由于酵母的发酵不断地被利用，很大程度上减少了产物对水解的抑制作用。同步糖化发酵法被认为是目前最有发展前景的方法[30]。

随着共固定化技术的不断发展，科研者也在不断尝试将共固定化技术应用于纤维乙醇的生产实践中，即固定化发酵，包括细胞与细胞、细胞与酶以及酶与酶共固定化3个方面。

细胞与细胞固定化

细胞与细胞固定化，即多菌种固定化体系，多种微生物在生长过程中相互依赖、相互促进，形成了丰富的酶系和多样化产物体系，它们交错作用形成大量的营养成分。

T.Lebeau等以一种复合琼脂为载体，将酿酒酵母和休哈塔假丝酵母共固定化，并以葡萄糖(35g/dm^3)和木糖(15g/dm^3)混合糖浆为原料进行连续发酵研究。在稀释率为0.02h^{-1}时，获得最佳发酵结果，即100%的葡萄糖被消耗，73%的木糖被消耗，酒精生产率为0.48g/g总糖[31]。

细胞与酶共固定化

单一固定化酶或固定化细胞有时很难实现对某一底物的作用，而共固定技术则可以发挥酶和细胞的协同作用。

BandaruVVR等以海藻酸钙为包埋材料，壳聚糖为吸附剂，将淀粉葡萄糖苷酶和运动发酵单胞菌MTCC92共固定化，以质量浓度为150g/L的西米淀粉为原料进行发酵，得到最大酒精质量浓度为55.3g/L[32]。

酶与酶共固定化

将具有协同作用的酶共同固定可以更有效地发挥各酶的作用。Giordano等先以二氧化硅为载体将葡糖淀粉酶固定，而后用果胶为载体将葡糖淀粉酶与酿酒酵母共固定，并以木薯淀粉液化液为原料进行同步水解发酵(SSF)。结果表明，初始总糖质量浓度为166.0g/L，酒精生产率为8.3g/L·h，底物的理论转化率为91%；在连续发酵过程中添加质量浓度为163.0g/L的总糖，在相同条件下，酒精生产率为5.9g/L·h，底物转化率为97%，酒精理论产率为81%[14]。

固定化细胞发酵的新动向是混合固定细胞发酵，如酵母与纤维二糖酶一起固定化，将纤维二糖转化成乙醇，此法引人注目，有希望成为纤维素生产乙醇的重要手段。

联合生物加工(CBP)指在一个反应器中联合了酶生产、水解、五碳糖发酵和六碳糖发酵4种生物转化过程，由于将生产纤维素酶的过程包括在整体工艺中，从而降低了底物和原料的消耗以及纤维素酶的成本，使工业规模的工艺生产成为可能。目前集酶生产、水解、五碳糖发酵和六碳糖发酵4种生物转化功能一体的生物菌种尚还在研发当中，主要集中在酿酒酵母的基因重组技术中[33]。

3木质纤维素的资源组成及结构对其乙醇转化的阻碍和解决办法

自然界中普遍存在的木质纤维素(lignocellu-losic materials)，主要由纤维素(cellulose)、半纤维素(hemicelluloses)和木质素(lignin)组成，这些物质是陆生植物细胞壁的主要组分。

纤维素是世界上最丰富的天然有机物，占植物界碳含量的50%以上，不溶于水及一般有机溶剂。如图1所示，纤维

素是由D-葡萄糖以β-1，4糖苷键组成的大分子多糖。纤维素成分虽然单一，但其结构是三者中最复杂的，多个分子平行紧密排列成丝状不溶性微小纤维，多条微小丝状纤维相互缠绕构成绳索状的紧密晶体结构—纤维素。资料显示，在一般纤维物质的结构模式中，纤维素纤维被镶嵌在一个木质多糖的矩阵中，就如图2所显示。

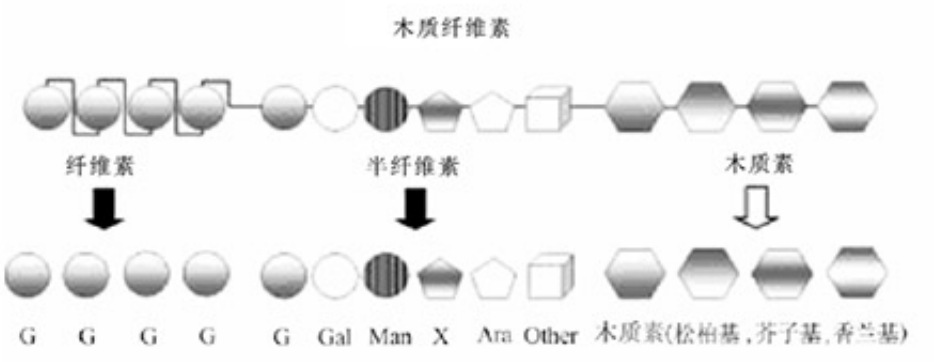

图1　木质纤维素成分及水解示意图[3,8]

Figure 1　Schematic diagram of lignocellulose composition and hydrolysis

[箭头代表水解(黑箭头代表生成单糖可以直接被发酵利用)，G 为葡萄糖，Gal 为半乳糖，Man 为甘露糖，X 为木糖，Ara 为阿拉伯糖，Other 为鼠李糖]

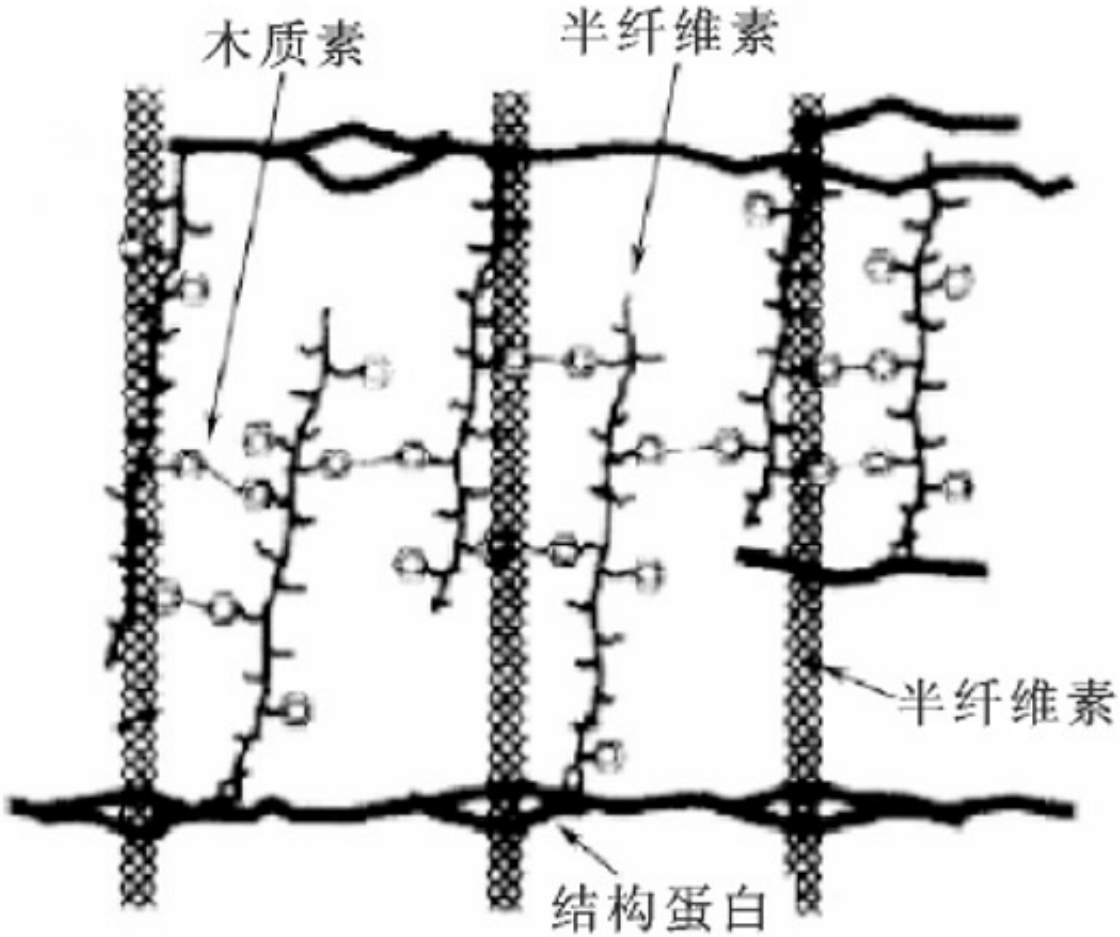

图 2　木质纤维素图[34]

Figure 2　Picture of lignocellulosic materials

纤维素从成分上看，毋庸置疑很容易被纤维素酶酶解，但复杂的晶体和受包围的矩阵结构将纤维素酶堵在门外。因此纤维素的复杂晶体结构成为木质纤维素酶解的一个阻碍，也是人类利用木质纤维素转化乙醇的难点之一。

解决办法：不同木质纤维素来源不同，纤维素成分和含量不同，据实选择或改进预处理技术和酶水解工艺。

图1所示，半纤维素是由几种不同类型的单糖构成的异质多聚体，这些糖是五碳糖和六碳糖，包括木糖、阿伯糖、甘露糖和半乳糖等。木聚糖是半纤维素的主要成分，占总量的50%，它结合在纤维素微纤维的表面，并且相互连接，这些纤维构成了坚硬的细胞相互连接的网络。木聚糖与纤维素的结构不同，大约80%的木聚糖主链含有侧链，阿拉伯糖和葡萄糖醛酸的单体侧链及包含阿拉伯糖、木糖及半乳糖残基的寡聚侧链分别键合于主链D-木糖残基的C-2和C-3位置上[35]，如图2所示。木聚糖分子虽然没有纤维素那样的晶体结构，但比起纤维素分子的结构多样和组分复杂性，其降解难度更大。

另外水解木聚糖分子的酶则主要由β-1，4木聚糖酶和β-木糖苷酶构成，并且所生成戊糖不宜被酵母发酵利用，需要木糖异构酶将木糖异构成木酮糖，再被酵母利用生成乙醇。

解决办法：不同木质纤维素来源不同，木聚糖成分和含量也不同，据实选择或改进预处理技术和酶水解工艺，更重

要的是注重不同酶的协同作用。

木质素是木质纤维素中含量相对较少的一种成分，是一种芳香族高分子化合物。由4种醇单体(对香豆醇、松柏醇、5-羟基松柏醇、芥子醇)形成的一种复杂酚类聚合物。因其组成不含还原糖，所以木质素不能转换成乙醇。但是，酶解过程中，木质素也可能被水解为某些芳香化合物，这些化合物被认为是处理纤维物质过程中产生的阻碍物[36]。

解决办法：原位脱毒技术，李丰田等就是利用酵母菌复合培养对稀酸水解液进行原位脱毒而发酵乙醇的。其次还可以改良预处理方法，木质素比纤维素和半纤维素溶解性差，一般不溶于酸和碱，因此可以选择溶解纤维素和半纤维素，而浸出木质素的溶剂作为预处理剂[37]。

木质纤维素的酶解产物的抑制效应在纤维乙醇生产中也是一个不容忽视的问题，如纤维素酶解时产生的纤维二糖会抑制内切和外切葡聚糖的催
化作用，葡萄糖的积累对于β-
葡萄糖苷酶有一定的抑制作用[38]，木糖的积累对酶解也有抑制效应[3]
。解决办法：既然是产物所产生的抑制效应，那最好的办法就是及时消耗掉产物，解除抑制效应，比如用同步糖酵解(SSF)发酵的话就可以及时消耗葡萄糖和纤维二糖[39]
；把能利用葡糖糖和木糖的菌株混合发酵，消除木糖的抑制作用[3]。

4对纤维乙醇工业的展望

随着石油资源的逐渐枯竭，世界原油价格在不断上涨，这给燃料乙醇的价格带来了一定的升值空间，同时也给燃料乙醇的发展带来了历史性的机遇。另外。随着人民生活质量的提高，对石油的需求也在进一步提高，以乙醇等替代能源为代表的能源供应多元化战略已成为国家能源政策的一个方向[40]。

因此，今后还要加强以下技术的研究：①以基因工程手段选育高产纤维素酶、木质素酶菌种，降低纤维素酶的生产成本；②进行固定化发酵技术的研究，解决目前存在的污染率高和成本高的问题；③进一步研究纤维素原料的预处理，酶水解及发酵生产的工业化技术，其原则是：经济、节能、环保。

总之，如何减少成本和提高纤维素生物质的乙醇的转化率将是后续的研究重点和发展的方向。

参考文献：

[1]Arthur J Ragauskas，Charlotte KWilliams，Brian H Davison，et al.The path forward for biofuels and bio-materials[J].Science，2006，311：484-489.

[2]武冬梅，李冀新，孙新纪.纤维素类物质发酵生产燃料乙醇的研究进展[J].酿酒科技，2007，154(4)：116-120.

[3]李盛贤，贾树彪，顾立文.利用纤维素原料生产燃料酒精的研究进展[J].酿酒，2005，32(2)：13-16.

[4]Von Sivers Margareta，Zacchi Guido Ethanol from lig-nocellulosics：a review of the economy 1996(2-3).

[5]Moreira Jose R.Goldemberg Jose Alcohol program 1999(04).

[6]Coilignon F，Poncelet G.Comparative Vapor Phase Synthesis of ETBE from Ethanol and Isobutene over Different Acid Zeolites [J].Journal of Catalysis，2001，202：68-77.

[7]Helena L，Chum Ralph P，Overend.Biomass and Re-newable Fuels[J].Fuel Processing Technology，2001.71：187-195.

[8]王素雅.世界燃料乙醇产业发展探析[J].安徽农业学报.2009，37 (20)：9658-9661.

[9]郭廷杰.美日利用纤维素生物质原料制燃料乙醇的技术开发[J].能源技术，2004，25(4)：61-63.

[10]白坤.美国燃料乙醇的生产[J].淀粉与淀粉糖，2001，1：10-13.

[11]孙智谋.世界各国木质纤维原料生物转化燃料乙醇的工业化进程[J].酿酒科技，2007，151(1)：91-97.

[12]张文彬.我国生物燃料乙醇产业的发展[J].中国糖料，2010，3：58-63.

[13]崔永强，林燕.木质纤维素为原料的燃料乙醇发酵技术研究进展[J].化工进展，2010，29(10)：1868-1875.

[14]Giordano RLC，T Joubert，Schmidell W.Continuous production of ethanol from starch using glucoamylase and yeast co-im-mobilized in Pectin Gel[J].Appl Biochem Biotechnol，2008，(147)：47-61.

[15]娄玥芸，张惠芳.秸秆生物质能源的应用现状与前景[J].化学与生物工程，2010，27(9)：73-76.

[16]王 敏，王 倩，吴荣荣.木质纤维素生产燃料乙醇预处理技术研究进展[J].衡水学院学报，2010，12(4)：106-109.

[17]Kadaml K，Wooley J R，Aden A，et al.Softwood forest thinnings as biomass source for ethanol production：a feasibility study for california[J].Biotechnol Prog，2000，16：947-957.

[18]Sassner P，Martensson C G，Galbe M，et al.Steam pretreatment of H2SO4 impregnated Salix for the pro-duction of bioethanol[J].Bioresouce technology，2008，99(1)：137-145.

[19]Ooshima H，Aso K，Harano Y.Microwave treatment of cellulosic materials for their enzymatic hydrolysis [J].Biotechnol Lett，1984，6(5)：289-294.

[20]何泽超.纤维素的酶水解及超声波对其加速作用的研究[D].成都：四川大学，2001.

[21]陈静萍，王克勤，彭伟正，等.60Co-γ射线处理稻草秸秆对其纤维质酶解效果的影响[J].激光生物学报，2008.17(1)：38-42.

[22]Orozco，A，M，Ahmad，et al.Dilute acid hydrolysis of cellulose and cellulosic bio－waste using a microwave reactor system[J].Process Safety and Environmental Protection，2007，85： 446-449.

[23]Curreln，Agellim，Pisu B，et al.Complete and effi-cient enzymic hydrolysis of pretreated wheat straw[J].Process Biochemistry，2002，37：937-941.

[24]Kim H T，Kim S J，Sunwoo C，et al.2003.Pretreat-ment of corn stover by aqueous ammonia[J].Biore-source Technology，90：39-47.

[25]马英辉，王联结.秸秆预处理的最新研究进展[J].纤维素科学与技术，2009，17(3)：71-78.

[26]Garcia－Cubero M T，Gonzalez－benito G，Indaco-echea I，et al.Effect f ozonolysis pretreatment on en-zymatic digestibility of wheat and rye straw[J].Bioresource Technology，2009，100(4)：608-1613.

[27]Lignin-modifying enzymes from selected white－rot Fungi： Production and role in lignin degradation[J].FEMS Micro Rev，1994，13：125-135.

[28]Dale，B E，Moreira M J.A freeze－explosion tech-nique for Increasing cellulose hydrolysis[J].Biotech-nol Bioeng Symp，1982，(12)：31-43.

[29]王丽，曾光明，黄丹莲，等.白腐菌处理铅污染废弃稻草的动态变化研究[J].环境科学研究，2006，19(6)：90-93.

[30]马晓建.以纤维素类物质为原料发酵生产燃料乙醇的研究进展[J].食品与发酵工程，2004，30(11)：77-81.

[31]薄涛，侯红萍.共固定化技术研究进展[J].2010，193(7)：77-79.

[32]Bandaru VVR，Somal an ka SR，Men du DR，et al.Optimization of fermentation conditions for the pro-duction of ethanol from sago starch by co-immobilized amyloglucosidase and cells of Zymomonas mobilis u-sing response surface methodology[J].Enzyme and Microbial Technology，2006，(38)：209-214.

[33]李猛，梁辉，王述彬.利用 CBP 发酵纤维素生产燃料乙醇的研究进展[J].河南化工，200，24(2)：15-16.

[34]任普鲜，蒋剑春，杨秀山，等.木质纤维素快速热解产物生产燃料乙醇研究进展[J].生物质化学工程，2009，45(3)：47-51.

[35]Saulnier L，Marot C，Chanliaud E，Thibault JF.Cell wall polysaccharide interactions in maize bran[J].Carbohydr Polymers，1995，26：279-287.

[36]张宇昊，王 颉.半纤维素发酵生产燃料乙醇的研究进展[J].酿酒科技，2004，125(5)：72-74.

[37]李丰田.酵母菌复合培养对木质纤维素稀酸水解液原位脱毒发酵乙醇[J].太阳能学报，2009，30(11)，1583-1587.

[38]许凤.木质纤维素原料生物转化燃料乙醇的研究进展[J].纤维素科学与技术，2004，12(1)：45-54.

[39]Danielle dSdS，Anna CC，Kelly CPR LCC，Nei P J.Ethanol Production from Sugarcane Bagasse by Zy-momonas mobilis Using Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) Process[J].2010，161：93-105.

[40]黄治玲.燃料乙醇产业的全球发展概况[J].化工管理，2002，(3)：34-35.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/100601.html