

综述

生物燃气技术及工程的发展现状

刘晓风, 袁月祥, 闫志英

中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

摘要: 生物燃气俗称沼气, 是微生物群体在厌氧条件下协同发酵可降解有机废弃物的产物, 传统能源供应的萎缩和增加可再生能源在能源消费中份额的需求使沼气的重要性越来越突出。经过不断研究与工程实践, 已经开发出了不同的发酵工艺处理生活垃圾和工农业生产废弃物等有机质生产生物燃气, 其中全混式中温发酵占主导地位, 欧洲的技术处于领先水平, 特别是德国的沼气发电、热电联产。结合作者多年沼气研究积累的经验, 综述了沼气技术的最新进展, 包括厌氧发酵菌群、消化反应器结构和发酵工艺, 沼气生产和应用等, 指出了今后发展的重点和方向。

关键词: 厌氧微生物菌群, 反应器结构和发酵工艺, 沼气生产和应用

Progress on biogas technology and engineering

Xiaofeng Liu, Yuexiang Yuan, and Zhiying Yan

Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

Abstract: Dwindling supplies of conventional energy sources and the demand to increase the share of renewable energy for sustainability have increased the significance of biogas, the product of synergistic fermentation of biodegradable organic wastes from municipal, agricultural and industrial activities by microbial populations under anaerobic conditions. With extensive research and engineering practice, many technologies and modes have been developed for biogas production and application. Currently, the most widely used mode is the complete-mixing mesophilic fermentation. Europe, especially Germany, is leading the world in the combined heat and power production (CHP) from biogas. In this paper, updated progress in biogas technologies is reviewed, with focuses on anaerobic microorganisms, bioreactor configurations and process development, biogas production and applications, in which perspectives of biogas as a clean and renewable energy are projected.

Keywords: anaerobic microorganisms, bioreactor configurations and process development, biogas production and applications

生物燃气俗称沼气, 是生物质能源的重要组成部分, 全球每年通过光合作用生成约 4 000 亿 t 有机物, 其中约 5% 在厌氧环境下被微生物分解。人们利用这一自然规律进行沼气发酵, 既可生产沼气用作燃料, 又可处理有机废物保护环境, 同时沼气发

酵后产生的沼液、沼渣又是优质的有机肥料。沼气燃烧后产生的 CO₂ 被植物通过光合作用再生成植物有机体, 又转变为沼气发酵原料, 因此沼气是一种发展很快的清洁可再生能源^[1], 沼气技术的发展与能源产业的建立对人类解决能源和环境问题具有重

Received: June 4, 2010; **Accepted:** July 5, 2010

Supported by: Key Projects in the National Science and Technology Pillar Program during the Eleventh Five-Year Plan Period (Nos. 2006BAJ04B02, 2006BAD07A02).

Corresponding author: Yuexiang Yuan. Tel: +86-28-85229904; E-mail: yuanyx@cib.ac.cn

“十一五”国家科技支撑计划 (Nos. 2006BAJ04B02, 2006BAD07A02) 资助。

要的意义。

对沼气研究始于 1899 年。1950 年, 美国学者亨格特 (R.E. Hungate) 提出了厌氧培养技术^[2], 发明了 Hungate 装置, 促进了厌氧微生物学研究的迅速发展^[3]。经过多年来对沼气微生物、沼气工艺、沼气工程等方面的全面研究, 取得了许多成果。目前, 沼气工程技术在全世界得到越来越广泛的应用。

1 沼气发酵的微生物学研究

研究表明, 沼气发酵系统中, 存在着种类繁多、关系复杂的微生物区系^[4]。沼气发酵过程实际上是这些微生物所进行的一系列生物化学的偶联反应, 可分为不产甲烷菌和产甲烷菌两大类群^[5]。

其中不产甲烷菌包括发酵细菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌。它们在功能生态位上起到承上启下的作用, 其作用产物都是产甲烷菌的基质, 如发酵性菌群产生的丙酸、丁酸和乙醇等均需通过产氢产乙酸菌转化为乙酸才能进一步被产甲烷菌利用, 是大分子有机物甲烷消化过程必不可少的重要环节。这几类菌中, 对产氢产酸菌的研究较多, 目前所报道的产氢产乙酸菌株很少, 近 10 年来的研究发现, 产氢产乙酸菌主要包括互营单胞菌属、互营杆菌属、梭菌属、暗杆菌属等。

第一株产甲烷菌由俄国微生物学家 Omelauskie BL 于 1916 年分离得到。产甲烷菌是一类能够将无机或有机化合物转化为甲烷和 CO₂ 的古菌, 它们生理上高度专化、极端严格厌氧。产甲烷菌是沼气发酵最后一个阶段 (产甲烷阶段) 中最主要的微生物, 能利用氢和 CO₂ 生成甲烷, 有些还能利用甲酸或甲醇、乙酸或甲胺产生甲烷和 CO₂。从 Schnellen 第一个从消化污泥中分离纯化得到甲酸甲烷杆菌 *Methanobacterium formicium* 和巴氏甲烷八叠球菌 *Methanosarcina barkeri* 以来, 目前已分离鉴定的产甲烷菌有 200 多种^[6], 根据系统发育的不同可分成 5 个目, 分别为甲烷杆菌目 (Methanobacteriales)、甲烷球菌目 (Methanococcales)、甲烷八叠球菌目 (Methanosarcinales)、甲烷微菌目 (Methanomicrobiales) 和甲烷超高温菌目 (Methanopyrales)。随着分子生物

学和基因工程等技术的不断进步, 对产甲烷菌的研究也不断深入。1996 年伊利诺伊大学完成了第一个产甲烷菌 *Methanococcus jannaschii* 的基因组测序^[7]。迄今为止已有 4 个目的 5 种产甲烷菌完成基因组测序。一般来说, 产甲烷菌基因组由一个环状染色体组成, 但也有一些产甲烷菌除了含一个环状染色体外, 还含有染色体外元件 (Extrachromosomal element, ECE)。

2 沼气发酵工艺系统

经过不断的研究与工程实践, 开发出了许多不同的沼气发酵工艺。根据不同分类依据, 可将沼气发酵工艺分成不同的类型。目前的沼气发酵工艺根据发酵温度、进料方式等不同分为如下几类, 主要类型如表 1 所示^[8-10]。

如今应用最为广泛的工艺是全混式发酵工艺 (CSTR)。该工艺的水解、酸化和产甲烷 3 个阶段在同一个反应器中进行, 具有过程简单、投资小、运行和管理方便的优点。欧洲沼气工程绝大多数采用全混式发酵工艺, 并且以高浓度发酵为主, TS 一般在 8% 以上, 最高达 15%。

根据有机垃圾物料浓度高低可分为湿式厌氧消化和干式厌氧消化。单相湿式连续工艺的典型代表为芬兰的 Wassa 工艺、德国的 EcoTec 工艺、佛罗里达州的 SOLCON 工艺和单相 BTA 工艺等。两相湿式连续工艺有荷兰的 Pacques 工艺、德国和加拿大的两相 BTA 工艺以及德国的 Biocomp 工艺等。与湿式工艺相比, 干式厌氧工艺具有以下明显的优势:

- 1) 可以适应各种来源的固体有机废弃物;
- 2) 运行费用低, 容积产气率高;
- 3) 需水量低或不需水, 残渣后续处理费用低;
- 4) 运行过程稳定, 无湿法工艺中的浮渣、沉淀等问题。干式厌氧消化技术已在世界多个国家垃圾处理中广泛应用, 具有非常大的发展空间。Dranco 工艺、Kompogas 工艺和 Valorga 工艺为典型的单相干式连续工艺, Biopercolat 工艺为典型的两相干式连续工艺^[11]。此外, 荷兰 Lelystad 的 Biocel 工艺是典型的单相干式间歇式工艺, 该处理厂每年能处理有机垃圾 3.5 万 t。

表 1 沼气发酵工艺类型

Table 1 Types of process of anaerobic digestion

Basis of classification	Process types	Main characteristics
Fermentation temperature	Ambient digestion	Fermentation temperature varying with air temperature, poor effects of gas production, instable production of biogas, and low conversion efficiency.
	Mesophilic digestion	Fermentation temperature of 28°C–38°C, available waste-heat utilization equipment of heating boiler or CHP, AD stabilized at a high level, high biogas production rate, balanced and stable biogas production, adopted by medium and large biogas projects at present.
	Thermophilic digestion	Fermentation temperature of 48°C–60°C, quick decomposition of organic matter, high biogas production rate, short retain time, applying to AD for high-temperature organic wastewater with waste heat to be utilized.
Feed mode	Batch digestion	Replacing with new materials after a batch of materials fermenting for a period of time, the whole digestion process of biogas production which can be observed, but failing to produce biogas in a balanced way.
	Semi-continuous digestion	Providing lots of raw materials at the initial stage of startup, beginning to feed a few when biogas production decreases and then making regular feeding and discharge, producing biogas in a balanced way, and great applicability.
	Continuous digestion	Continuous feeding based on the designed load or short feeding interval after AD operates normally, producing biogas in a balanced way, high operation efficiency, adopted by medium and large biogas projects.
Fermentation stage	Two-stage digestion	Stage of acid production and that of methane production for AD carried out in two reactors for the purpose of making better control and adjustment of environmental conditions, shortening digestion period and being favorable to optimization design, balanced and stable biogas production, and high content of methane.
	One-stage digestion	Stage of acid production and that of methane production for AD carried out in one reactor.
State of feed liquid of digestion	Wet digestion	Content of TS of less than 10%, flowing fluid existing indigestion material, and popular process of AD adopted by current biogas technology.
	Semi-dry digestion	Fermentation concentration between that of wet and dry digestion, i.e. 10%–20%.
	Dry digestion	Content of TS of over 20%, no flowing fluid existing indigestion material, slightly poor biogas conversion efficiency, difficult feeding and discharging, adopted in the region short in water resource but rich in raw materials.
Flow type of feed liquid	Complete-mixing digestion	Using the stirring equipment, feed liquid in a uniform state, high gas production rate and conversion efficiency, adopted by most medium and large biogas plants of treating poultry and livestock manure as well as sludge in sewage treatment plant.
	Plug-flow digestion	No vertical mixing of feed liquid, high concentration of feed liquid, adopted by most biogas plants with high-concentration digestion of treating poultry and livestock manure.

针对有机垃圾、秸秆等有机固废原料的特性，高效低耗的沼气干法发酵技术受到重视，尤其是干法沼气技术的工程化研究。美国、法国、荷兰、丹麦等国相继建立了采用沼气干法发酵工艺处理垃圾的试验工厂，对干法发酵沼气工程技术进行了深入的研发^[12]。20世纪90年代，德国大力投资于新型的批量式沼气干法发酵技术的研发，在90年代末，Bekon公司的车库型沼气干法发酵工艺和装备通过了中试，并于2002年生产出产业化装备，投入实际运行。目前，国外的工程化沼气干法发酵技术有车库型、气袋型、干湿联合型、渗滤液储存桶型和储罐型等多种技术类型^[13]。国内刘克鑫、马云瑞等开发了不同的干发酵池。中国科学院成都生物研究所在上世纪80年代末建立了有机垃圾厌氧干发酵中试工程^[14-15]。2002年，北京化工大学和农业部

规划设计研究院进行了秸秆中温发酵集中供气试验研究，采用卧式厌氧发酵装置，容积产气率为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ^[16]。

3 沼气工程技术的发展现状

沼气发酵工程包括户用和大中型沼气工程两类。户用沼气主要集中在亚洲，以中国水压式沼气池和印度浮罩式（哥巴士）沼气池为典型代表。发酵的主要原料为人畜粪便、污水等。中国户用沼气工程技术从20世纪90年代以来，在农业生产方面的应用呈现快速发展的局面，结合各地具体条件，建立了“三结合”、“四位一体”、和“五配套”等多种以沼气技术为纽带的生态农业应用模式^[17]。其核心是将种植、养殖、沼气发酵等有机结合，实现物质良性循环和能量梯级利用。如北方“四位一体”

能源生态模式为, 在农户庭院内建日光温室, 在温室的一端地下建沼气池, 沼气池上建猪舍和厕所, 温室内种植蔬菜或水果。该模式以太阳能为动力, 以沼气为纽带, 种植业和养殖业相结合, 形成生态良性循环, 实现综合效益最大化。模式结构如图 1 所示。

大中型沼气工程主要用于处理农业废物、工业废水、城市有机垃圾、污泥等生物质废弃物并回收能源。近年来, 以德国、丹麦为代表的沼气工程技术及其装备发展迅速, 形成了一些广泛应用的新型沼气工程工艺技术。

沼气工程的整体工艺主要包括原料预处理、沼气发酵、沼气净化回收利用和发酵残渣后处理 4 个

阶段。预处理主要是去除杂物和沙砾, 调配料液浓度和加温。沼气发酵阶段是沼气工程的核心, 需要根据各个工程的具体情况选择适合的反应器。后处理阶段根据实际情况, 对沼渣沼液进行综合处理。大中型沼气工程工艺流程如图 2 所示:

从 20 世纪 90 年代以来, 国际上对沼气技术的研究重点逐步从环境保护转向能源生产方面。通过政府补贴、市场调控等经济手段促进沼气产业良性发展。因此, 国外大中型沼气工程及配套设备、技术装备近年来发展迅速, 沼气工程已成为国际生物质能源研究开发的重点。德国、丹麦、奥地利等发达国家的沼气工程装备及其组装技术已经实现标准化、系列化、工业化水平。

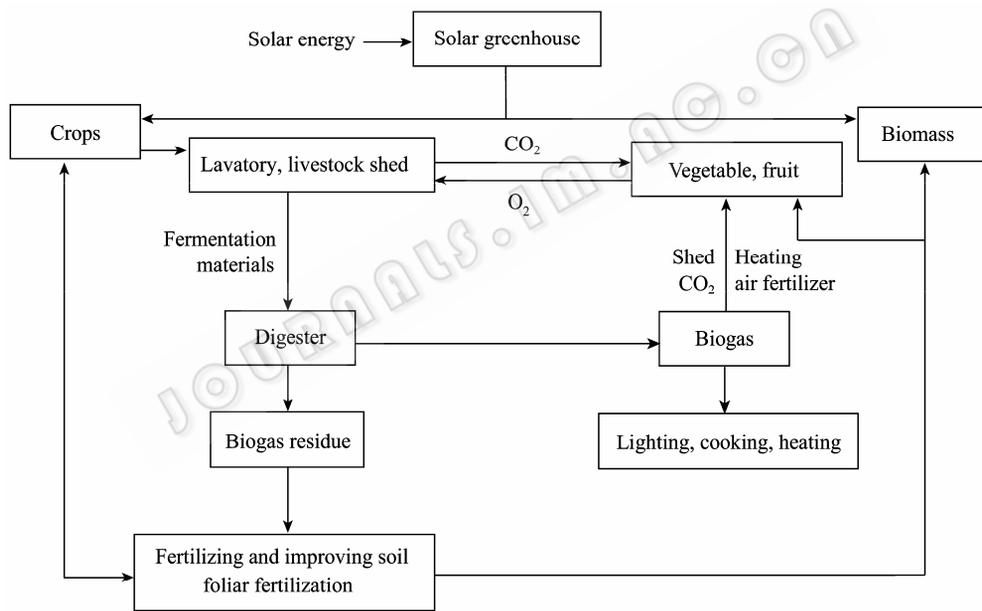


图 1 “四位一体”模式
Fig. 1 Mode of “Four in One”.

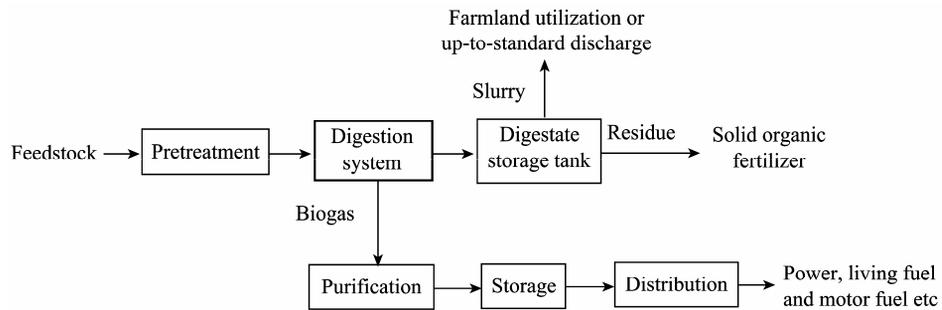


图 2 沼气工程通用基本工艺流程
Fig. 2 General process flowchart of biogas plant.

在可再生能源发展的激励政策和机制的有力刺激下,德国沼气工程数量从1990年的100座增加到了2007年的3 750座(处理农业废弃物沼气工程约2 700座)^[18]。大多采用发酵料液TS浓度为8%~10%的高浓度发酵(以CSTR居多)。部分采用TS浓度 $\geq 20\%$ 的中温干式厌氧消化工艺。98%实施热电联用,即使在冬季环境气温低至 -20°C ,沼气工程仍然良好运行,中温装置产气率 $1.5\sim 1.8\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,高温装置产气率 $2.0\sim 3.0\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,经济效益显著^[19]。

尽管中国农业废弃物沼气工程数量一直比德国多,但其规模及产生的效益远远不如德国。中国沼气工程的平均池容只有 283 m^3 /处,基本上是一些中小型沼气工程,池容在 100 m^3 以下的小型沼气工程大约占66%;池容为 $100\sim 1\,000\text{ m}^3$ 的中型沼气工程大约占25%;池容在 $1\,000\text{ m}^3$ 以上的大型沼气工程仅占9%左右。中国沼气工程沼气年产量只有德国的17.6%,沼气发电装机容量只有德国的1%,沼

气发电量只有德国的0.16%^[20]。我国沼气工程的发酵原料主要是畜禽粪便,猪粪最多,牛粪次之,鸡粪最少。目前还没有能源植物或能源植物与其他有机物混合发酵的沼气工程。

目前,欧洲、中国等主要以农场沼气工程为主,同时也有上百座城市有机垃圾厌氧处理沼气工程。德国、丹麦^[21]和澳大利亚等是最早开始农场沼气工程建设的国家。在各国政策的刺激下,农场主对沼气工程的兴趣日益高涨,以能源作物为原料的沼气工程日渐增多,农场沼气工程发展成为一种新兴的产业,带动了多个行业的发展。典型农场沼气工程工艺流程如图3所示。

农场沼气工程发酵原料主要包括各种畜禽粪便、以玉米为主的能源植物和各种有机废弃物。欧洲农场沼气工程以混合原料为主,原料浓度多为10%左右;而中国、印度等亚洲国家则多为单一禽畜粪便,原料浓度多为6%以下。

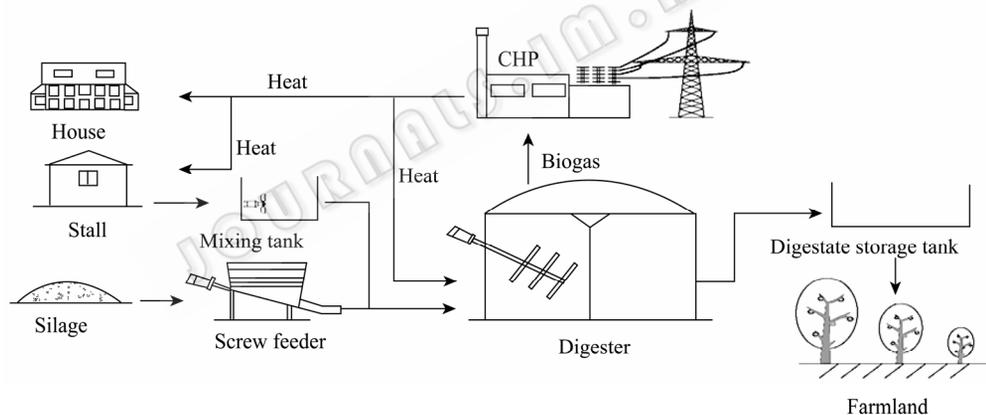


图3 农场沼气工程工艺流程图

Fig. 3 Process flowchart of farm biogas plant.

德国是农场沼气工程发展最好的国家。农场沼气工程发酵原料主要有能源植物、畜禽粪便和有机废弃物,以混合原料为主,大约有94%的农场沼气工程采用混合原料发酵。混合原料以禽畜粪便为主,比例约50%~80%;能源植物(以玉米、青草为主)及其收割残余物、有机副产品、农产品食品加工废弃物等作为最常用的发酵补充原料。

农场沼气工程一般采用CSTR、PFR或其组合工艺。中国农场沼气工程除采用上述工艺外,部分也采用USR。

欧洲农场沼气工程由于实现了热电联产,发酵

温度以中温为主,少数为高温发酵。德国约有90%采用中温($35^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$)发酵,9%采用高温发酵(55°C);奥地利约有90%以上采用中温发酵,3%采用高温发酵,另有3%采用一级高温、二级中温的组合发酵^[22]。中国农场沼气工程以常温发酵为主,但中温发酵沼气工程在近几年发展迅速。

欧洲农场沼气工程装备已达到了设计标准化、产品系列化、生产工业化,质量得到有效控制。工程装备的组装技术也达到模块化、规范化。容积 $2\,000\sim 5\,000\text{ m}^3$ 集中式农场沼气工程发酵装置多为钢结构圆柱形立式罐;容积 $200\sim 1\,500\text{ m}^3$ 农场沼气

工程发酵装置多为钢结构或钢筋混凝土结构圆柱型立式罐。卧式发酵罐(推流式工艺)主要用于小工程或高固体含量的原料, 因为在高固体条件下可以获得良好的混合, 往往推流式作为第一级, 完全混合式作为第二级。容积 500~3 000 m³ 立式发酵罐顶部常常装有双膜贮气柜, 即发酵、贮气一体化, 既节省了单独设立贮气装置的费用(比分体式降低 15% 左右)和占地面积, 又解决了在寒冷地区冬季贮气装置水封防冻的问题。

近年来, 采用厌氧消化工艺来处理有机生活垃圾的沼气工程逐渐增多。到 2005 年有 74 个工厂在欧洲运行; 2006 年有 124 个工程在运行或在建设, 垃圾处理量达到 400 万 t/年。厌氧消化 MSW 能够减

少有机垃圾的填埋量与焚烧量, 使其重新进入能量循环系统。MSW 厌氧消化处理流程包括 4 个阶段: 预处理、厌氧消化、沼气净化回收和消化残余物处理。典型工艺流程如图 4 所示: 垃圾首先进行适当预处理, 包括垃圾破碎及非消化性原料(玻璃、金属和碎石等)的分选等, 包括人工分选和机械分选两类, 分选效果的好坏对厌氧消化发酵效果和肥料质量影响很大。厌氧消化是整个垃圾沼气工程的核心, 根据原料的浓度、发酵温度、发酵阶段和进料方式分为不同的工艺。厌氧消化回收的沼气通过净化处理后可用于居民燃料、发电、车用燃料等多种用途。发酵残余物主要是作为肥料应用或填埋处理。每吨有机垃圾的沼气产量为 100~200 m³。

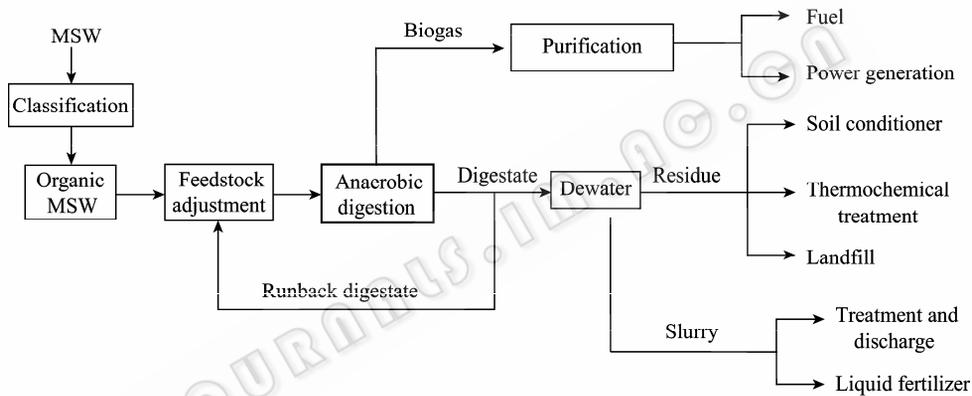


图 4 垃圾厌氧消化工艺流程图
Fig. 4 Typical process flowchart of organic MSW biogas plant.

近年来, 我国开展了与德国、美国、丹麦等多个国家的沼气工程技术研究合作, 通过关键技术与设备的引进消化, 对外国先进的沼气工程装备技术及产业化模式有了深入了解, 已开始在中国建设“热电肥”联产、CSTR 等沼气工程示范, 起到了一定的示范效应。如日沼气发电量 38 000 kW·h 的北京德清源农业科技股份有限公司鸡粪处理沼气发电工程。

4 沼气的利用

目前, 有机污水处理产生的沼气主要以热的形式由工厂内部使用; 农场、固体有机废弃物处理沼气工程主要以热电联产形式(CHP)利用, 电上网, 余热用于厌氧消化加温。将沼气提纯至甲烷含量 96% 以上, 既可用于汽车燃料, 又可接入管网替代天然气。瑞典、瑞士、法国、冰岛都已有多家供应公共

汽车、火车、轿车的沼气加气站^[23]。沼气燃料电池是最新出现的一种清洁、高效、低噪音的利用方式, 在整个欧洲进行了试验与示范。如慕尼黑的 HotModule 燃料电池示范项目, 该燃料电池的电效率高达 55%, 同时在与电网并网方面具有高度的灵活性。

5 发展的重点和方向

国内外在沼气技术和工程领域研究主要集中在以下几个方面:

- 1) 从微生物发酵代谢水平调控沼气生产潜力, 开发沼气发酵产品, 促进产业化发展, 如沼气发酵添加剂、产甲烷菌剂等, 扩大沼气发酵原料使用范围和产气效率。
- 2) 研究适合干发酵的配套装置和设备, 建立一

套完整的高效沼气干发酵成套技术。

3) 研究沼气提纯压缩和罐装技术与设备, 通过罐装气的车用或民用, 提升沼气的附加值和扩大沼气的使用范围。

4) 开展沼气燃料电池、沼气液化、沼气化工等高效利用技术研究, 为未来沼气产业的纵深发展奠定基础。

5) 完善秸秆为原料的沼气发酵技术。开展以秸秆为原料的沼气发酵技术攻关: 秸秆前处理技术、高效厌氧发酵微生物的筛选与培育、新型秸秆厌氧发酵工艺、秸秆厌氧发酵示范工程等。

6) 开展发酵残余物使用的深度研究, 确定不同的农田作物的用量和土地容纳量, 了解使用的安全性。

REFERENCES

- [1] Balat M. Global bio-fuel processing and production trends. *Energy Explor Exploit*, 2007, **25**: 195–218.
- [2] Hungate RE. A roll tube method for cultivation of strict anaerobes. *Methods Microbiol*, 1969, **3**: 117–132.
- [3] Garcia JL, Patel KC, Olivier BL. Phylogenetic and ecological diversity of methanogenic. *AmhAnaerobe*, 2000, **6**: 205–226.
- [4] Zhang QG, Ni SJ, Yang QF, *et al.* Biogas Technology and Utilization. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 30–31. 张全国, 倪慎军, 杨群发, 等. 沼气技术及其利用. 北京: 化工出版社, 2005: 30–31.
- [5] Yao XJ, Tian YS. Clean Transformation and Utilization Technology of Biomass. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35–38. 姚向君, 田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2005: 35–38.
- [6] Shan LW, Feng GY, Fan SH. The progress on methanogenesis. *J Microbiol*, 2003, **23**(6): 42–46. 单丽伟, 冯贵颖, 范三红. 产甲烷研究进展. 微生物学杂志, 2003, **23**(6): 42–46.
- [7] Bult CJ, White O, Olsen GJ, *et al.* Complete genome sequence of the methanogenic archaeon. *Methanococcus jannaschii*. *Science*, 1996, **273**: 1058–1073.
- [8] Bolzonella D, Innocenti L, Pavan P, *et al.* Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase. *Biores Technol*, 2003, **86**: 123–129.
- [9] Li D, Sun YM, Zhang Y, *et al.* Application and research advances on anaerobic digestion for municipal solid waste treatment. *Biomass Chem Eng*, 2008, **42**(4): 43–50. 李东, 孙永明, 张宇, 等. 城市生活垃圾厌氧消化处理技术的应用研究进展. 生物质化学工程, 2008, **42**(4): 43–50.
- [10] Sachs JV, Meyer U, Rys P, *et al.* New approach to control the methanogenic reactor of a two-phase anaerobic digestion system. *Water Res*, 2003, **37**: 973–982.
- [11] Pavan P, Battistotini P, Cecchi F, *et al.* Two-phase anaerobic digestion of source sorted OFMSW: performance and kinetic study. *Water Sci Technol*, 2000, **41**: 111–118.
- [12] Chugh S, Chynoweth DP, Clarke W, *et al.* Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach-bed process. *Biores Technol*, 1999, **69**: 103–115.
- [13] Brummeler ET. Full scale experience with the BIOCEL process. *Water Sci Technol*, 2000, **41**(3): 299–304.
- [14] Sun GC, Shao YJ, Lian LW, *et al.* The study of process on dry fermentation. *Acta Energiæ Sol Sin*, 1985, **6**(3): 221–235. 孙国朝, 邵延杰, 连莉文, 等. 干法厌氧发酵工艺条件的研究. 太阳能学报, 1985, **6**(3): 221–235.
- [15] Liu XF, Liao YZ, Liu KX. The study on the dry fermentation of OFMSW. *Acta Energiæ Sol Sin*, 1995, **16**(2): 170–173. 刘晓风, 廖银章, 刘克鑫. 城市有机垃圾干法厌氧发酵研究. 太阳能学报, 1995, **16**(2): 170–173.
- [16] Li X, Zhao LX, Han J, *et al.* The new directions in utilization of OFMSW-Dry fermentation. *China Biogas*, 2006, **24**(4): 23–27. 李想, 赵立欣, 韩捷, 等. 农业废弃物资源化利用新方向——干法厌氧发酵技术. 中国沼气, 2006, **24**(4): 23–27.
- [17] Xue QL, Wang HS, Liu YM, *et al.* Design and construction of ecological cattle production models linked by biogas production. *China Cattle Sci*, 2009, **35**(3): 77–81. 薛庆玲, 王惠生, 刘艳敏, 等. 以沼气为纽带的生态养牛模式的构建. 中国牛业科学, 2009, **35**(3): 77–81.
- [18] EurObserv'ER. Biogas Barometer, 2007, <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [19] Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany-status and recent developments. *Biodegradation*, 2009, **11**: 415–421.
- [20] Deng LW, Chen ZA, Gong JJ. Comparison of biogas plant between China and Germany. *Renewable Energy Res*, 2008, **26**(1): 110–114. 邓良伟, 陈子爱, 龚建军. 中德沼气工程比较. 可再生能源, 2008, **26**(1): 110–114.
- [21] Seadi TA, Rutz D, Prassl H, *et al.* Biogas Handbook. Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- [22] Demirbas MF, Balat M. Progress and recent trends in biogas processing. *Int J Green Energy*, 2009, **6**: 117–142.
- [23] Sternberg R. Hydropower: dimensions of social and environmental coexistence. *Renew Sustain Energy Rev*, 2008, **12**(6): 1588–1621.