

## 沼气发酵过程研究进展

成喜雨<sup>1,3</sup>, 庄国强<sup>2</sup>, 苏志国<sup>1,3</sup>, 刘春朝<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 综述了沼气发酵菌群、工艺控制和处理系统方面的研究进展, 指出对发酵机理缺乏了解是导致过程不稳和效率不高的主要原因, 提出将来的研究重点应通过元基因组手段解析菌群相互作用和代谢网络, 建立基于反应器操作、VFAs 代谢、活性菌群变化和功能基因表达的多尺度过程控制手段, 以及发展原料预处理、科学配伍和两相联产氢气甲烷等工艺来提高系统效率。

**关键词:** 沼气; 菌群; 元基因组; 过程控制; 反应器

**中图分类号:** S216.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2008)03-0607-09

### 1 前言

能源和环境双重危机使绿色可再生能源的开发研究成为各国工作的重点。据有关专家估计, 生物质能将成为未来可持续能源系统的重要组成部分, 到本世纪中叶, 采用新技术生产的生物气、燃料乙醇、生物柴油等新能源将占全球总能耗的 40% 以上<sup>[1]</sup>。

沼气是有机物通过厌氧发酵形成的一种可燃性气体, 主要成分是甲烷和二氧化碳, 可用于燃烧、发电等。德国每年可用沼气发电  $6 \times 10^{10}$  kW·h, 相当于全部产量的 11%<sup>[2]</sup>。瑞典沼气部分取代天然气作为车用燃气, 规模为车用燃气总量的 45% 左右, 已有超过 4000 辆沼气驱动的汽车, 并研制出首辆沼气驱动火车<sup>[3]</sup>。英国微生物厌氧发酵产生的沼气可以替代全国 25% 的煤气消耗量。我国的沼气应用起步于 20 世纪 50 年代, 2000 年开始, 农业部结合各地沼气发展经验, 推行生态家园富民计划, 北方“四位一体”、南方“猪沼果”、西北“五配套”等多种能源生态模式得到了大力推广<sup>[4,5]</sup>。到 2004 年底, 我国大中型沼气工程约 2000 个, 年产沼气  $5.5 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, 预计到 2010 年, 沼气目标产量达到约  $1.9 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>。沼气能源的推广应用离不开沼气技术的发展, 本工作着重就沼气发酵菌群、工艺和控制方面的研究进展进行综述, 以资参考。

### 2 沼气工程现状

我国的沼气应用起步于 20 世纪 50 年代, 1964 年, 河南南阳天冠集团建成了一座 2000 m<sup>3</sup> 的工业沼气池, 20 世纪 80 年代又增建了 2 个容积为 5000 m<sup>3</sup> 的厌氧接

触圆柱形发酵池, 利用酒精废糟年产沼气达  $2 \times 10^7$  m<sup>3</sup><sup>[7]</sup>。河南修武 2006 年兴建的酒糟废液发酵沼气示范工程省内最大, 包括 4 个 5000 m<sup>3</sup> 发酵罐, 2 个 1700 m<sup>3</sup> 升流式厌氧污泥床(Uplow Anaerobic Sludge Bed, UASB)二次发酵罐, 日产沼气高达 60000 m<sup>3</sup>, 年发电量达 36 MW·h<sup>[8]</sup>。工业沼气主要集中在酒精淀粉行业, 反应器规模较大, 从几千到几万立方米不等, 主要采用 UASB 工艺。相比之下, 农业沼气工程规模较小, 几百到几千立方米不等。1982 年农业部沼气科学研究所设计的成都凤凰山畜牧园艺场沼气工程是我国最早的农场大型沼气工程, 该工程隧道式装置总容积  $4 \times 300$  m<sup>3</sup>, 中温发酵, 日产沼气约 900 m<sup>3</sup>。目前在美国北方寒冷地区(纽约州、明尼苏达州)运行良好的 6 座奶牛场沼气工程中, 有 5 座采用推流式发酵工艺, 处理规模分别是 1000~2400 头牛的粪污<sup>[9]</sup>。全混合或推流式工艺主要用于规模在 5000 头以下的养殖场, 优点在于投资低、运行管理方便、沼气得率高, 但单元效率低, 配套所占土地资源多。因此对于日污水量达 50~1500 t 的 5000~100000 头规模的大型养殖场, 多采用效率更高的 UASB 工艺, 像济南佳宝乳业有限公司 2005 年建成的大型沼气发电工程, 采用 UASB 工艺, 反应器达 2000 m<sup>3</sup>, 单元效率较高, 管理方便, 出水浓度低, 但粪便固液分离后直接生产有机肥, 沼气获得量相对低<sup>[10]</sup>。

据统计, 目前废水沼气工程(包括工业有机废水、生活污水和养殖场粪水)占整个沼气工程的 90%, 主要采用 UASB 工艺(占 71%)。经过引进消化及中国环境科学研究院、清华大学、中国科学院生态环境研究中心、同济大学等科研单位的技术创新, UASB 废水处理工艺

收稿日期: 2007-07-02, 修回日期: 2008-02-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(编号: 2007CB714301); 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室基金资助项目

作者简介: 成喜雨(1980-), 男, 湖南省长沙市人, 博士研究生, 研究方向为固体有机废弃物厌氧发酵技术; 刘春朝, 通讯联系人, Tel: 010-82622280, E-mail: czliu@home.ipe.ac.cn

在国内得到了极大推广,像无锡第二制药厂柠檬酸废水处理 的 1320 m<sup>3</sup> UASB 反应器,效率达到 5.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),池容和效率都与国外 UASB 工程相当(表 1)<sup>[11]</sup>.

处理城市垃圾的固体废弃物沼气工程少得多,仅占整个沼气工程的 10%,主要分布在技术发达的法国、德国、丹麦等国家.根据固含率分为干式和湿式发酵两种(固含率 8% 以下为湿式发酵),各占 50%<sup>[12]</sup>.湿式发酵具有可处理湿垃圾、设施便宜、技术成熟等优点.德国 Bottrop 处理厂是典型的湿式发酵工艺,年处理量 3 万 t,

单个反应器容积达 5000 m<sup>3</sup>.湿式发酵存在浮渣与沉降、对冲击负荷敏感、耗水耗热等缺点.干式发酵的优点在于系统稳定、处理量大、占地小、节水等<sup>[12,13]</sup>.Dranco 工艺、Kompogas 工艺和 Valorga 工艺是 3 种主要的干式发酵工艺,过程分别采用浆液回流、机械搅拌和气体射流循环.几个典型的干式发酵工程年处理固体垃圾量 1~5 万 t,产气 100~200 m<sup>3</sup>/t,单个池容 1000 m<sup>3</sup>左右(表 1).其不足之处在于不能处理湿垃圾、搅拌输送难、反应器造价高等.

表 1 废水和固体废弃物处理沼气工程

Table 1 Biogas projects in the treatment of wastewater and solid wastes

Feedstock	Source	Process	Scale (m <sup>3</sup> )	Temp. (°C)	Biogas yield [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)]	Ref.
Wastewater	Wuxi No.2 Pharm. Factory: citric acid wastewater	UASB	1320	40~45	5.2	[11]
	Wisconsin Paper Factory: pulp and paper wastewater	UASB	2611	35	3.4	
	Canada Lake Utopia: paper mill wastewater	UASB	3000	30~44	5.7	
	Yantai Brewery: grains and juice of molasses alcohol	Anaerobic-contacting process	600×2	35	3.8~4.6	
Solid waste	Dranco technology, Belgium Organic Waste Systems Company	One-phase dry fermentation	808	50~58	3.2~6.4	[12, 13]
	Kompogas technology, Swiss Kompogas AG Company	One-phase dry fermentation		55	4.7~5.8	
	Valorga technology, France Steinmueller Valorga Sarl Company	One-phase dry fermentation		55	2.6	
	BTA technology, Danmark Helsingor BTA/Carl Bro Factory	Multi-phase wet fermentation		55	6.0	

国内的城市垃圾主要采用填埋方式.1998 年 10 月,杭州天子岭建成国内首家生活垃圾沼气发电厂,日产沼气大于 2 万 m<sup>3</sup>,年发电量达 1.529×10<sup>7</sup> kW·h<sup>[14]</sup>;1999 年 6 月广州大田山垃圾填埋场沼气发电厂投入运行,目前年发电量为 8.39×10<sup>6</sup> kW·h<sup>[15]</sup>.垃圾填埋占地广,产气效率低,不能循环处理.相比之下,反应器厌氧发酵处理垃圾效率高很多,设施便宜和运行管理相对简单的湿式发酵更适合在我国推广应用,同时还应加强国内的垃

圾分选系统,结合不同垃圾发酵特性和工程实践,对现有反应器工艺进行改进和创新.

### 3 沼气发酵过程调控

#### 3.1 发酵菌群

沼气发酵是涉及多菌群相互作用的非线性复杂系统(见图 1)<sup>[16]</sup>.纤维素、蛋白质和脂肪酸等复杂有机物首先在严格厌氧菌 *Bactericides* sp., *Clostridia* sp.及兼性厌

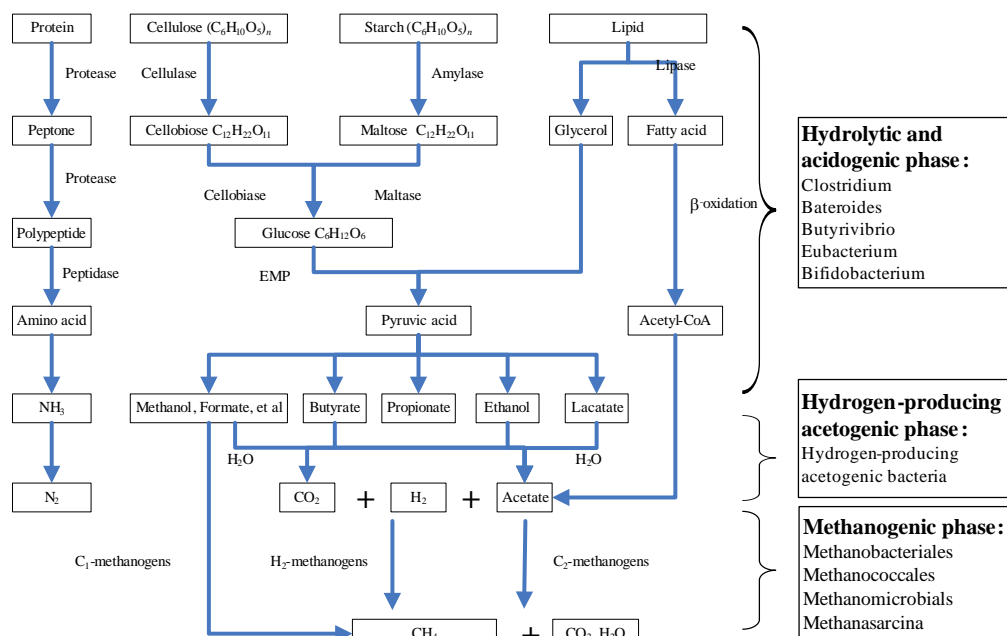


图 1 沼气发酵代谢网络<sup>[16]</sup>

Fig.1 Metabolic networks of biogas fermentation process<sup>[16]</sup>

氧菌 *Streptococci* sp. 等作用下降解成小分子, 产酸菌进而将小分子转化成挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids, VFAs), VFAs 被产氢产乙酸菌转化为乙酸和氢气, 最后, 氢气、二氧化碳和 VFAs 的混合物在以乙酸为底物的 *Methanosaeta* sp. 和 *Methanosarcina* sp. 及以氢和甲酸盐为底物的 *Methanobacterium formicium*, *Methanococcus jannaschii* 等甲烷菌作用下生成甲烷<sup>[16]</sup>.

不产甲烷菌和甲烷菌相互依赖, 又相互制约. 不产甲烷菌为甲烷菌创造适宜的氧化还原条件, 清除有毒物质, 甲烷菌对 VFAs 和氢气的利用为不产甲烷菌解除了反馈抑制. 甲烷的形成与菌群互营密切相关, 采用传统

纯培养方法很难准确反映群落结构和代谢关系, 而且其中绝大部分的微生物是不可培养的<sup>[17]</sup>. 元基因组学为研究沼气发酵复杂系统提供了新的有力手段<sup>[18]</sup>, 群落中的所有微生物基因组的总和称为元基因组, 不经分离培养, 直接提取其中的所有 DNA 建立元基因组文库, 通过 DNA 种类和数量分析, 解析微生物群落结构<sup>[17]</sup>.

表 2 比较了指纹图谱、核酸杂交、基因克隆文库等分子生物学方法的优缺点及其在沼气发酵系统菌群研究中的应用, 可总结为 3 个方面: (1) 菌群多样性研究和目标菌群如产甲烷菌的动态监测; (2) 新菌的发现; (3) 多菌的互营关系及代谢功能研究.

表 2 沼气发酵系统菌群分析的分子生物学方法比较

Table 2 Comparison of the molecular biology methods for microbial community analysis in biogas reactor

Method	Advantage (A) and limitation (L)	Sample throughput	Application	Ref.
DGGE <sup>1)</sup>	A: rRNA sequence information from excised DGGE bands L: Partial rRNA sequences, limited sensitivity, gel-to-gel variability	Medium	Diversity and the populations' relative abundance shift	[19, 20]
T-RFLP <sup>2)</sup>	A: High sensitivity; simulation with databases possible L: Incomplete restriction; multiple separate restriction digests	High	Methanogenic genera and their relative abundance information throughout digester operation	[21]
LH-PCR <sup>3)</sup>	A: High sensitivity; simple; robust L: Limited phylogenetic resolution	High	Simple, robust and cost-effective method of monitoring community shifts in anaerobic digestion	[22]
SSCP <sup>4)</sup>	A: High sensitivity; no restriction enzyme digestion L: More than one stable conformation; reannealing	High	Distinction of inactive bacteria from metabolically active bacteria by comparative analysis of rRNA and rDNA	[23]
ARISA <sup>5)</sup>	A: High sensitivity; no restriction enzyme digestion, simple L: Shorter amplicons are over-represented	High	Microbial diversity study in anaerobic digester	[24]
Dot blotting	A: No PCR bias; existence of several defined probes L: Requirement of several probes with different specificities; time demanding	Low	Exploration of the butyrate-degrading and methanogenic community metabolic activity	[30, 31]
Cloning & sequencing	A: Phylogenetic identification from sequencing; new primers or probes L: The cloning step is time demanding; not suitable for reactor monitoring	Low	Determination of the microbial community composition and design new probes for target groups	[25, 26]
FISH <sup>6)</sup>	A: High sensitivity; <i>in situ</i> hybridization L: Limited by the taxonomic specificity of the probes	High	Evaluation of the methanogenic group composition in anaerobic digesters by probe hybridization	[27, 28]
Q-PCR <sup>7)</sup>	A: Good sensitivity and reproducibility; simple and high-throughput method L: Requirement of probes with different specificities	High	Quantification of the methanogenic group in thermophilic bioreactor	[32]

Note: 1) Denaturing gradient gel electrophoresis; 2) Terminal restriction fragment length polymorphism; 3) Length-heterogeneity PCR; 4) Single-strand conformation polymorphism; 5) Automated ribosomal intergenic spacer analysis; 6) Fluorescence *in situ* hybridization; 7) Quantitative real-time PCR.

在产甲烷菌群多样性研究中, 变性梯度凝胶电泳(DGGE)最为常见. 众多研究者对厌氧反应器中群落多样性和种群相对丰度变化进行了研究<sup>[19,20]</sup>, DGGE 的缺点在于灵敏度不高, 一个条带可能由不同种群序列组成, 因此会低估微生物种群多样性. 与之相比, 末端限制性片段长度多样性(T-RFLP)、单链构象多态性分析(SSCP)、长度异种 PCR(LH-PCR)等指纹图谱方法具有更高的灵敏度, 成功地应用于反应器启动、运行和负荷冲击条件过程中产甲烷菌群丰度的动态监测<sup>[21-23]</sup>. 系统中代谢活性很低的菌和代谢活性高的菌的 DNA 在 PCR 过程中会得到相同的扩增, 因此有时菌群信息与实际运行结果并不一致, SSCP 可以解决这个问题. SSCP 的 rDNA 图谱比 rRNA 图谱更多的峰数表明反应器中很多菌虽然代谢活性不高, 但仍然存在<sup>[23]</sup>. 通过 T-RFLP 和 SSCP 等指纹图谱分析, 可以获得产甲烷菌群的多样性信息, 在反应器运行中, 对耗乙酸和耗氢产甲烷菌相

对丰度变化的监测, 通过群落中优势菌变化对产气过程进行预测和控制, 但定性信息不足<sup>[20-24]</sup>.

结合克隆文库分析, 能确定微生物的种类和多样性, 同时可能发现新菌. 通过克隆和测序, 建立元基因组文库, 可以获取大量微生物多态性信息, 发现系统中已知菌群的分布和丰度, 结果显示大部分种类是未培养菌, 其中一些可能代表新菌<sup>[25]</sup>. 对一个污水处理厂污泥的基因文库研究表明, 群落中除了 *Chloroflexi* sp., *Methanobacteria* sp. 等已知菌外, 有大量未培养的可能属于新门的群体, 如 TM6, WSA2(新产甲烷菌), EM3 等<sup>[26]</sup>. 基因克隆文库分析费时费力, 因此如果主要目的是检测反应器中群体变化, 它不如定量实时 PCR(Q-PCR)或指纹图谱技术简单, 但通过基因克隆文库分析, 不仅能确定菌群的多样性, 还能得到目标群体的系统发生和相关序列信息, 设计新探针, 用于荧光原位杂交(FISH)和 Q-PCR 分析<sup>[27]</sup>.

FISH、斑点杂交(Dot blotting)、同位素探测技术(SIP)等极大地推动了产甲烷反应器中的互营关系及代谢功能研究. 通过特别的 FISH 探针, 结合微量自动照相分析(MAR), 发现 *Chloroflexi* sp., *Smithella* sp., *Syntrophomonas* sp.和 *Methanosaeta* sp.分别是氧化葡萄糖、丙酸、丁酸和乙酸的主要菌<sup>[27]</sup>. Ariesyady 等<sup>[28]</sup>采用 FISH-MAR 对丙酸氧化菌和耗氢产甲烷菌的互营关系进行了研究, 当互营的丙酸盐氧化菌和耗氢产甲烷菌同时存在时可以突破丙酸盐降解的热力学限制, 使反应得以进行. 稻田产甲烷样品的 SIP 分析表明, *Smithella* sp.和 *Pelotomaculum* sp.参与产甲烷条件下丙酸盐互营氧化, 而产甲烷菌则通过与细菌的互营推动了这一过程<sup>[29]</sup>. Hansen 等<sup>[30]</sup>采用斑点杂交技术对中温污泥进行了研究, 结果表明 *Syntrophomonas* sp.可能与丁酸氧化有关, 而 *Methanosarcina* sp.是主要的耗乙酸产甲烷菌群, 高丰度的 *Methanomicrobiales* sp.也体现了乙酸氧化菌和耗氢产甲烷菌在乙酸利用过程中的协作关系. McMahon 等<sup>[31]</sup>通过斑点杂交研究了菌群动力学与反应器运行稳定性的关系, 结果表明运行良好的反应器中对乙酸亲和的 *M. concilii* 水平很高, 不稳定运行反应器中由于氢积累导致耗氢甲烷菌水平提高, 高丙酸盐浓度也对应高的丙酸盐氧化菌浓度.

与传统的 PCR 或杂交技术如斑点杂交相比, Q-PCR 更敏感, 重现性更好. Yu 等<sup>[32]</sup>设计了 4 个不同的探针, 对耗乙酸、耗氢产甲烷菌进行了实时监测, 结果表明, 水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT)和乙酸浓度是连续运行期间菌群变化的主要因素. Hori 等<sup>[33]</sup>使用 Q-PCR 的研究结果表明, 启动前期 *Methanoculleus* sp. 是产甲烷控制菌群, 随后的 30~44 d, *Methanothermobacter* sp.丰度稳步提高, 44~48 d 期间主要产甲烷菌丰度伴随产气水平同步下降, 进入乙酸降解周期中, 耗乙酸产甲烷菌丰度相应也大幅增加, FISH 的同步分析也证实了 Q-PCR 分析结果.

指纹图谱技术可以分析菌群结构, 核酸杂交或 FISH 可以测定菌群中特定菌的丰度及分布, 克隆基因文库可以在基因水平确定群落结构, 各种方法的综合运用可以更加全面地提供群落组成和变化方面的信息, 为发酵过程调控所用.

### 3.2 发酵过程控制

#### 3.2.1 控制参数

温度和 pH 是调控发酵菌群、强化产气的重要手段. 果蔬废物产甲烷研究表明, 与 20 和 35 °C 相比, 55 °C 下产气量提高 144% 和 41%, 但过高的温度(60 °C)将抑制产甲烷菌活性, 不利于产气<sup>[34]</sup>. 研究者<sup>[35]</sup>也尝试培养低

温产甲烷菌群, 以使常温条件或寒冷地区产沼气成为可能. 丙酸不利于产气, 控制 pH 则可以避免丙酸产生<sup>[36]</sup>.

混合方式可分为物理强化和工艺强化, 搅拌和气循环是常见的物理强化手段, 同时, 工艺调节也能加强传质, 如污泥回流、出水循环和沥出液循环等. 在动物废物厌氧消化过程中, 气循环、搅拌和污泥回流都能在高负荷下加强传质, 促进沼气生产<sup>[37]</sup>, 污泥回流一方面能促进循环, 一方面又能使反应器内活性生物量维持在较高水平, 因而比搅拌和气循环效果更好. 沥出液循环常用于处理固体垃圾的渗滤床反应器中, 而出水循环更多在废水处理的 UASB 中用于加强传质<sup>[11]</sup>.

接种物是影响产气的重要因素, 高温污泥能强化纤维原料的水解过程, 加强后续产气. 反刍动物瘤胃液也增强了纤维素降解产气过程的效率<sup>[38]</sup>, 这与其引入了较强的纤维分解菌有关. 固体废弃物特别是纤维类固体废弃物的厌氧处理是当今的热点和难点, 其限速步骤在于纤维的水解, 解决办法之一就是筛选和驯化有利于强化纤维分解的高温厌氧菌群.

预处理是强化纤维类原料沼气发酵过程的另一重要手段, 可分为物理、化学和生物预处理 3 种. 物理处理主要是利用机械、热等方法改变纤维结构. Zhang 等<sup>[39]</sup>研究表明, 研磨和切碎均能促进秸秆的产气速率和产气潜能的发挥. 汽爆也是一种高效的预处理方法, 能增强可溶性组分, 提高纤维的可及性, 从而强化秸秆原料的产气过程<sup>[40]</sup>. 化学预处理使用较为普遍, Luo 等<sup>[41]</sup>的研究表明, 30 d 的氢氧化钠预处理能降低秸秆纤维素和半纤维素组分, 沼气产率提高达 75%. Cheng 等<sup>[42]</sup>提出用微波强化酸/碱预处理过程, 5~30 min 的预处理就能大幅提高药渣发酵过程中沼气产率, 预处理过程无需高压条件. 潘亚洁等<sup>[43]</sup>提出利用白腐菌进行生物预处理, 制备容易被厌氧细菌发酵的降解液, 提高产气效率.

不同原料的营养成分如 C/N 比存在较大差异, 联合消化可以在消化物料间建立起一种良性互补, 提高产气率. 在市政固体垃圾发酵中, 粪便的加入使有机物降解率提高到 69%~74%, 产气量达 180~220 m<sup>3</sup>/t<sup>[44]</sup>. 通常秸秆 C/N 比为(40~75):1, 禽畜粪便含氮量高, 而最适合厌氧消化的 C/N 比大约为 30:1, 因此粪便与秸秆、垃圾等废弃物联合消化往往能取得较好效果. 我国秸秆产量巨大, 通过秸秆、粪便和生活垃圾配伍, 能提高沼气发酵效率, 缓解当前农村沼气发酵原料不足的问题.

#### 3.2.2 工艺过程

基于沼气发酵的产酸产甲烷代谢过程和反应器级数, 可将发酵工艺分为单相工艺和两相工艺. 单相工艺中, 水解、产酸和产甲烷在一个反应器中完成, 具有工

艺简单、操作容易、投资相对较低、工程技术相对成熟等诸多优点,从而在生物燃气发酵过程中得到了极为广泛的应用,据统计,现有工艺中90%左右为单相工艺.单相工艺的最大缺点就是工艺必须兼顾不同菌群,从而导致过程效率较低,同时产酸菌代谢较快,容易引起酸积累,系统的抗冲击性能较差.两相运行为弥补单相工艺的不足提供了思路,成为发展的新方向.

两相工艺适于各种易降解废水和固体有机废弃物、有毒废水等的处理.果蔬废物、粪便、高浓度有机废水等快速分解引起的酸积累问题,有毒物质对产甲烷菌的毒害问题都在两相工艺中得到了不同程度的解决<sup>[45,46]</sup>.在产酸反应器中,产甲烷菌处于休眠或半休眠状态,产甲烷反应器则通过长的停留时间培养产甲烷优势菌群,从而分开强化产酸和产甲烷过程,提高效率和稳定性<sup>[45]</sup>.两相工艺可以在两相中设置不同的温度,高温下强化水解过程,灭活致病菌,中温稳定产气<sup>[46]</sup>.厌氧分级系统(Anaerobic Phased Solids Digester System, APSDS)是一种新型两相固体废弃物处理系统,有机废弃物在第一相水解产酸,然后在第二相产甲烷反应器中转化为甲烷,水解和产甲烷反应器可以自由组合,在一个系统上进行批次/半连续/连续操作<sup>[39]</sup>,并于2006年建立了一个200 m<sup>3</sup>的中试工程,日处理垃圾8 t,产气600 m<sup>3</sup>.值得注意的是,第一相中产酸产氢、第二相产甲烷的新两相工艺可以同时获得氢气和甲烷<sup>[47]</sup>.两相工艺的过程控制缺乏工程处理经验,分步过程也使基建、工程和运行难度增高,投资较大<sup>[48]</sup>,目前90%以上的沼气工程都采用工程技术成熟、投资低的单相工艺<sup>[12]</sup>.但两相工艺在效率和稳定性上具有优势,两相联产氢气甲烷新工艺也体现了很好的应用前景.

### 3.2.3 反应器

废水处理中广泛应用的UASB、厌氧滤器(Anaerobic Filter, AF)等反应器技术成熟,新型的折流板式和厌氧序批式反应器具有微生物容量高、抗冲击能力强、占地小等特点<sup>[49]</sup>,在废水处理中也逐渐得到应用.固体有机废弃物搅拌传质困难,缺乏适合其物料特性的反应器.

传质是固体物料发酵需要解决的关键问题.考虑到固体物料发酵周期较长,同时搅拌困难, Bouallagui

等<sup>[34]</sup>提出一种管状反应器,主体为一横卧管,复杂基质在内设的类似螺旋桨的搅拌装置搅动下逐步从一端流向另一端,产气后残余固体由管尾排出.与此类似的是另一种暗河式处理系统,该系统置于地下,类似于水渠的系统与地面有一定倾角,物料在重力作用下从一端缓慢流向另一端,在此过程中完成产气<sup>[50]</sup>.上述系统的优点在于能耗低,同时物料能在缓慢的流动过程中依次完成水解、产酸和产甲烷过程.

固定化反应器可以培养产甲烷优势菌群,提高过程效率,多用于固体废弃物两相处理的产甲烷反应器中.最常用的载体是聚酯泡沫、木炭等,最近的结果<sup>[51]</sup>表明农作物废弃物、普通尼龙网也是良好的微生物廉价载体.固定化可以降低氧对产甲烷菌的抑制效果,提高系统稳定性<sup>[52]</sup>.固定化反应器的另一个应用就是低固体废物如粪便的处理,粘土、砖块都可以成为生物膜载体材料,产气效率能提高50%左右<sup>[53]</sup>.

### 3.2.4 过程控制

在传统大中型燃气工程中,普遍只有pH、温度、负荷和停留时间的简单控制,而农村沼气池则基本无控制,表现在运行结果上就是产气不稳、容易酸败等.过程控制是系统稳定运行的前提,下面主要从在线检测设备和控制模型两方面对现有研究展开论述.

#### (1) 在线检测设备和传感器

与发酵过程相关的重要参数包括物化和生理参数,传统物化参数pH、温度和氧化还原电位(Oxidation Reduction Potential, ORP)已有成熟的在线测量设备,而对产气过程有重要影响的物化参数如VFAs和生理参数如生物量都无法在线测量.表3列出了一些处于实验室测试阶段的在线设备. Liu等<sup>[54]</sup>开发出了一种BOD传感器,通过在线监测进水生化需氧量(Biochemical Oxygen Demand, BOD),以调整有机负荷,达到稳定运行的目的.VFAs是甲烷代谢途径中的关键中间产物, Heiko等<sup>[55]</sup>设计了一个基于滴定计的VFAs在线测量系统,突出特点是设备简单、成本低,不足之处是检测的只是总挥发酸.红外光谱虽能针对丙酸、乙酸等进行测量<sup>[56]</sup>,但其准确性和灵敏度欠佳.带自动取样器的气相色谱和反应器的连接实现了VFAs的在线精确测量<sup>[57]</sup>,旋转取样器的设计有效解决了取样器膜堵塞问题<sup>[58]</sup>.

表3 厌氧系统在线测量系统

Table 3 Automated monitoring systems in anaerobic digestion

Monitoring system	Target	Advantages and disadvantages	Ref.
DO sensor	BOD	Complicate equipment	[54]
Titrimetric system	Total VFA	Only determining total VFAs	[55]
Gas chromatography	Acetate, propionate, butyrate, etc.	Determination of VFAs composition with high accuracy, complicate and expensive system	[57]
Near-infrared spectroscopy	Methanogen density	Normal accuracy and costly equipment	[56]
Soft-sensing	Alkalinity	Common accuracy without the need of costly equipment	[59]

另外,软测量(Soft-sensing)技术为过程测量提供了一种新思路,基于目标变量与其他容易测量的辅助变量的关联性,间接地通过辅助变量的测量获取目标变量值<sup>[59]</sup>。如上在线测量系统的研究目前尚处于实验室阶段,基于滴定计和色谱的 VFAs 和 BOD 测定对过程控制具有重要意义,降低成本、提高稳定性是关键。

## (2) 过程模拟与控制

过程控制的困难在于厌氧发酵涉及多菌相互作用,代谢网络复杂,因此很难从获得的一些参数来准确预测发酵结果,对过程进行反馈控制。因此控制方法的建立就显得至关重要,模型是控制方法的核心,分为结构模型和功能模型。厌氧结构模型的研究源于 Monod 方程。1968年,Andrews 提出产甲烷为整个消化过程的限速步骤,用传质方程把气相和液相联系在一起。McCarty 和 Mosey 分别引入了微生物衰亡系数  $K_d$  和氢分压抑制因素,之后 Costello 引入了产物抑制、竞争性与非竞争性抑制、pH 抑制等,建立了一个较为完善的动力学方程。

国际水质协会推出的 ADM 1 模型是厌氧动力学模型发展的里程碑,通过对厌氧发酵过程组分的代谢网络和传质动力学过程的详细分析,能对过程进行较为完整的描述,较好地模拟和预测不同工艺下的运行效果,该模型甚至能对不同 VFAs 组分进行预测,比如丙酸的积累<sup>[60,61]</sup>,为实现精确的过程控制提供了前提。然而,复杂的过程和众多的参数也为实际应用带来了极大的困难<sup>[62]</sup>。借鉴 ADM 1 模型,Copp 等<sup>[63]</sup>将厌氧产气过程简化为产酸、产氢产乙酸和产甲烷 3 个阶段,结果表明,简化的 Mantis AD 模型能精确预测固体颗粒浓度和产气量,且具备比 ADM 1 更快的模拟速度。一些更为简单的模型已建立,如 AM 2 和 AMH 1 模型,AM 2 模型目标是总 VFAs 和甲烷产率的调控,AMH 1 将反应过程简化为一个,目标是对可溶性 COD 和甲烷产率进行模拟,适于废水处理中控制 COD 浓度以免系统过载。目前的研究局限于实验室的模拟预测。

结构模型参数众多,建模困难,对环境变化敏感,目前尚难以直接应用于控制。与之相比,功能模型的建立无需变量之间的结构关系,而是通过非线性的思维方式和系统分析控制方法来实现对真实状态的模拟和控制,具有一定优势。其中以神经网络和模糊控制研究最为广泛。Cuwy 等<sup>[64]</sup>利用流化床反应器中获得的数据对神经网络进行驯化,成功地用于不同稳态水平和流化床系统的碱度识别和分类。神经网络也成功用于产气率和组分的模拟预测、剩余污泥处理的启动和中毒后的恢复过程控制<sup>[65]</sup>。最近,Bestamin 等<sup>[66]</sup>采用神经网络模型对一个工业规模沼气工程进行了产气模拟,体现了神经网络

的应用潜力。模糊逻辑在状态预测和冲击控制方面也得到了众多应用,该控制系统以气体组分和产率、pH 等为输入参数,通过模糊逻辑对反应器实行反馈控制,系统体现了良好的抗冲击能力<sup>[67,68]</sup>。模糊神经网络很好地弥补了模糊逻辑在自学习和自适应能力上的不足,在高有机负荷和水力负荷冲击下,成功地对实验室规模的流化床、厌氧滤器等的 VFAs、甲烷产率进行了模拟预测<sup>[69]</sup>。

结构模型因其复杂性,现阶段仅限于实验室规模反应器运行的模拟预测,但可以让我们对发酵过程有更清晰的了解。神经网络和模糊逻辑等成功地应用于反应器在负荷冲击下的过程自动控制,并在工程规模反应器上进行了应用研究。

## 4 展望

沼气是一种绿色能源,由于最先是在沼泽中发现的,所以称为沼气。以沼气池的发酵形式,沼气作为家用能源在农村范围内得到了大规模推广应用。能源、环境和资源需求对传统沼气提出了更高的要求,其用途将包括大规模集中供气、燃气发电、燃气汽车、火车和转化化工产品等。从这个意义上讲,将来的沼气将成为以各种生物质为原料、通过大型自动化的现代工业发酵过程生产的、可以用于部分取代石油和天然气的一种能源产品——生物燃气。

大力发展沼气工程是推动沼气向新能源角色生物燃气发展的重要方向,主要体现在:(1)可缓解未来农村能源和电力问题。我国农村的能源和电力需求逐年增加,沼气的推广一定程度上能满足增加的生活用能需求,同时,在现有沼气设施的基础上,发展利用农村秸秆废弃物、粪便和生活垃圾的中小规模沼气工程,一方面可以进行集中供气,另一方面可以和沼气发电系统耦合(如燃料电池发电系统<sup>[70]</sup>),提供电力;(2)可满足城市和工业发展对电力增加的需求。农村城市化的进程和工业发展使能源需求加大,城市垃圾和各种工业废弃物使环境不断恶化。我国农村秸秆每年产量达 7 亿 t,产气按 200 m<sup>3</sup>/t 算,单这一项产气潜力就达 1400 亿 m<sup>3</sup>/a;我国主要城市的生活垃圾产甲烷潜力达 180 亿 m<sup>3</sup>,合沼气约 300 亿 m<sup>3</sup><sup>[70]</sup>,发展沼气能源前景广阔。当然也存在很多问题,如对沼气发酵过程了解不透彻、缺乏有效的过程控制策略、发酵效率有待进一步提高、固体废物处理中高效的反应器和发酵工艺缺乏等,解决这些问题可以从以下方面着手:

### (1) 沼气发酵多菌相互作用研究

沼气发酵是一个多菌复杂系统,有效的过程控制需

要对系统有更加深入的了解, 研究的核心问题是不同细菌、不同菌群之间的代谢迁移机制和互营关系, 如丙酸、丁酸氧化菌和甲烷菌的互营, 厨房废物降解过程中长链脂肪酸降解菌和甲烷菌之间的协作. FISH-MAR, SIP, Q-PCR 及元基因组文库等现代分子生物学技术为研究这一问题提供了可能, 通过高通量技术监控 mRNA 和 rDNA 的表达, 构建多菌复杂代谢网络.

#### (2) 菌群监测和过程控制

分子生物学的发展架起了微生物学与工程学之间的桥梁, 通过分子技术如 FISH 和 Q-PCR 等获得的菌群, 特别是产甲烷菌群的定量数据, 将服务于模型验证和发酵过程优化. 最终, 与传统上采用挥发性固体表征活性生物量相比, 通过分子手段获得的目标菌群的丰度和变化的相关信息将能更准确反映反应器系统的真实情况, 更有利于过程控制.

#### (3) 过程可控的高效沼气发酵

基于多尺度信息的过程调控包括反应器工程水平的混合传递、微观上产酸菌群、产甲烷菌群的种群和丰度的动态变化、细胞水平上甲烷产生途径的中心产物 VFAs 的代谢以及分子水平上 mRNA 和 rDNA 影响的蛋白和酶的表达. 应用 VFAs 的 GC 在线检测设备、元基因组研究中的高通量技术、在线计算机控制与数据处理技术, 将菌群在反应器中的各种表型数据与代谢调控有关的基因结构研究相关联, 发展基于多尺度信息的过程控制方法. 用物理化学或生物预处理技术破坏纤维结构, 强化固体纤维废物的可消化性能, 提高产气率<sup>[42,71-73]</sup>; 根据地方原料特色, 进行科学配伍, 如城市垃圾与剩余污泥、农村秸秆和养殖场粪便等, 开展联合消化, 推动固体废物的无害化处理, 缓解农村沼气发酵原料不足的问题.

#### (4) 沼气工程

对于中小规模沼气工程, 可以采用全混合或推流式反应器, 投资小, 沼气得率高, 气循环和回流技术是强化传质的研究重点; 对于大规模沼气工程, 可以结合固液分离, 采用效率更高、处理量大的 UASB 和 EGSB 工艺, 并耦合残渣堆肥或燃烧气化发电的复合技术<sup>[8]</sup>, 当然, 其推广应用还有待上述发酵菌群、控制和反应器工艺方面的突破.

#### 参考文献:

[1] 刘伟伟, 谢建. 生物质能开发利用现状及展望 [J]. 中国建设动态: 阳光能源, 2004, (4): 59-62.  
 [2] 刘继芬. 德国农村再生能源—沼气开发利用的经验和启示 [J]. 中国资源综合利用, 2004, (11): 14-20.  
 [3] 张兰英. 世界首列“沼气火车”启程 [J]. 太阳能, 2005, (6): 62.  
 [4] 毛羽, 张无敌. 以沼气为纽带的生态农业模式效益分析 [J]. 中国沼气, 2005, 23(3): 36-39.

[5] 常介田, 雷清泉, 姬长新. 北方“四位一体”农村能源模式及效益 [J]. 三农论坛, 2005, (1): 11-12.  
 [6] 张国宝. 可再生能源中长期发展规划草案 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2005. 3-4.  
 [7] 吴瑞阁. 河南天冠集团的沼气污泥肥料产业规划 [J]. 中国沼气, 2004, 22(4): 44-45.  
 [8] 许光文, 纪文峰, 万印华, 等. 轻工业纤维素生物质过程残渣能源化技术 [J]. 化学进展, 2007, 19(2): 1164-1176.  
 [9] Smith A. Amhaeal Diversity of a Themlophilic Methanogenic Pilot Scale Digester Treating Poultry Farm Waste [A]. Proceedings of 10th World Congress AD [C]. 2004. 1574-1577.  
 [10] 胡启春, 宋立. 奶牛养殖场粪污处理沼气工程技术与模式 [J]. 中国沼气, 2005, 23(4): 22-25.  
 [11] 王凯军, 左剑恶, 甘海南, 等. UASB 工艺的理论及工程实践 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 150-185.  
 [12] 余昆朋. 城市生活垃圾厌氧消化技术进展 [J]. 环境卫生工程, 2003, 11(1): 16-20.  
 [13] Lissens G. Solid Waste Digestions: Process Performance and Practice for Municipal Solid Waste Digestion [J]. Water Sci. Technol., 2001, 44(8): 91-102.  
 [14] 王大逊. 一个垃圾的高科技产业—杭州天子岭垃圾填埋气体发电厂 [J]. 中国城市环境卫生, 1999, (2): 28-29.  
 [15] 黄晓文, 吴三达. 填埋气体的综合利用 [J]. 环境卫生工程, 2006, 14(1): 9-11.  
 [16] 周大石. 甲烷细菌与沼气发酵 [J]. 生物学通报, 1994, 29(4): 1-3.  
 [17] 李武, 赵勇, 王玉炯. 元基因组文库分析技术研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2070-2076.  
 [18] 王凤超, 刘巍峰, 刘春朝, 等. 环境微生物非培养依赖的基因组学研究及应用 [J]. 中国生物工程杂志, 2006, 26(9): 76-83  
 [19] Liu W T, Chan C O, Fang H H. Microbial Community Dynamics during Start-up of Acidogenic Anaerobic Reactors [J]. Water Res., 2002, 36(13): 3203-3210.  
 [20] Miura Y, Hiraiwa M N, Ito T, et al. Bacterial Community Structures on MBRs Treating Municipal Wastewater: Relationship between Community Stability and Reactor Performance [J]. Water Res., 2007, 41(3): 627-637.  
 [21] Scully C, Collins G, O'Flaherty V. Assessment of Anaerobic Wastewater Treatment Failure Using Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism Analysis [J]. J. Appl. Microbiol., 2005, 99(6): 1463-1471.  
 [22] Mills D K, Entry J A, Voss J D, et al. An Assessment of the Hypervariable Domains of the 16S rRNA Genes for Their Value in Determining Microbial Community Diversity: The Paradox of Traditional Ecological Indices [J]. FEMS Microbiol. Ecol., 2006, 57(3): 496-503.  
 [23] Delbe C, Moletta R, Godon J J. Monitoring of Activity Dynamics of an Anaerobic Digester Bacterial Community Using 16S RNA Polymerase Chain Reaction-single-strand Conformation Polymorphism Analysis [J]. Environ. Microbiol., 2000, 2(5): 506-515.  
 [24] Fisher M M, Triplett E. Automated Approach for Ribosomal Intergenic Spacer Analysis of Microbial Diversity and Its Application to Freshwater Bacterial Communities [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1999, 65(10): 4630-4636.  
 [25] Chouari R, Le Paslier D, Dauga C, et al. Novel Major Bacterial Candidate Division within a Municipal Anaerobic Sludge Digester [J]. Appl. Environ. Microbiol., 2005, 71(4): 2145-2153.  
 [26] Sekiguchi Y. Yet-to-be Cultured Microorganisms Relevant to

- Methane Fermentation Processes [J]. *Microb. Environ.*, 2006, 21(1): 1–15.
- [27] Ariesyady H D, Ito T, Okabe S. Functional Bacterial and Archaeal Community Structures of Major Trophic Groups in a Full-scale Anaerobic Sludge Digester [J]. *Water Res.*, 2007, 41(7): 1554–1568.
- [28] Ariesyady H D, Ito T, Yoshiguchi K, et al. Phylogenetic and Functional Diversity of Propionate-oxidizing Bacteria in an Anaerobic Digester Sludge [J]. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2007, 75(4): 673–683.
- [29] Wagner M, Nielsen P H, Loy A, et al. Linking Microbial Community Structure with Function: Fluorescence *in situ* Hybridization-microautoradiography and Isotope Arrays [J]. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 2006, 17: 83–91.
- [30] Hansen K H, Ahring B K, Raskin L. Quantification of Syntrophic Fatty Acid-oxidizing Bacteria in a Mesophilic Biogas Reactor by Oligonucleotide Probe Hybridization [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, 65(11): 4767–4774.
- [31] McMahon K D, Zheng D, Stams A J M, et al. Microbial Population Dynamics during Start-up and Overload Conditions of Anaerobic Digesters Treating Municipal Solid Waste and Sewage Sludge [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 2004, 87(7): 823–834.
- [32] Yu Y, Lee C, Kim J, et al. Group-specific Primer and Probe Sets to Detect Methanogenic Communities Using Quantitative Real-time Polymerase Chain Reaction [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 2005, 89(6): 670–679.
- [33] Hori T, Haruta S, Ueno Y, et al. Dynamic Transition of a Methanogenic Population in Response to the Concentration of Volatile Fatty Acids in a Thermophilic Anaerobic Digester [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2006, 72(2): 1623–1630.
- [34] Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, et al. Effect of Temperature on the Performance of an Anaerobic Tubular Reactor Treating Fruit and Vegetable Waste [J]. *Process Biochem.*, 2004, 39(12): 2143–2148.
- [35] Connaughton S, Collins G, O'Flaherty V. Development of Microbial Community Structure and Activity in a High-rate Anaerobic Bioreactor at 18 °C [J]. *Water Res.*, 2006, 40(5): 1009–1017.
- [36] Stephen R H, Frederick G P. Recent Development in Hydrogen Management during Anaerobic Biological Wastewater Treatment [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 1986, 28(3): 585–602.
- [37] Karim K, Hoffmann R, Klasson T, et al. Anaerobic Digestion of Animal Waste: Waste Strength versus Impact of Mixing [J]. *Bioresour. Technol.*, 2005, 96(16): 1771–1781.
- [38] Lopes W S, Leite V D, Prasad S. Influence of Inoculum on Performance of Anaerobic Reactors for Treating Municipal Solid Waste [J]. *Bioresour. Technol.*, 2004, 94(3): 261–266.
- [39] Zhang R H, Zhang Z Q. Biogasification of Rice Straw with an Anaerobic-phased Solids Digester System [J]. *Bioresour. Technol.*, 1999, 68(3): 235–245.
- [40] Chen H Z, Wang H, Zhang A J, et al. Biogasification of Steam-exploded Wheat Straw by a Two-phased Digestion System [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(2): 116–120.
- [41] Luo Q M, Li X J. Anaerobic Biogasification of NaOH-treated Corn Stalk [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(2): 111–115.
- [42] Cheng X Y, Wang F, Zhang B, et al. Microwave-assisted Acid Pretreatment for Enhancement of Biogas Production from Dregs of the Decoction Waste [A]. *The 12th YABEC Symposium [C]*. 2006. 258.
- [43] 潘亚杰, 张雷, 郭军, 等. 农作物秸秆生物降解的研究 [J]. *可再生能源*, 2005, (3): 33–35.
- [44] Hartmann H, Ahring B K. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Influence of Co-digestion with Manure [J]. *Water Res.*, 2005, 39(8): 1543–1552.
- [45] Gabriele S. One and Two-stage Digestion of Solid Organic Waste [J]. *Water Res.*, 1999, 33(3): 854–860.
- [46] Castrillon L, Vazquez I, Maranon E, et al. Anaerobic Thermophilic Treatment of Cattle Manure in UASB Reactors [J]. *Waste Manage. Res.*, 2002, 20(4): 350–356.
- [47] Liu D W, Liu D P, Zeng R J, et al. Hydrogen and Methane Production from Household Solid Waste in the Two-stage Fermentation Process [J]. *Water Res.*, 2006, 40(11): 2230–2236.
- [48] De B L. Anaerobic Digestion of Solid Waste: State-the-art [J]. *Water Sci. Technol.*, 2000, 41(3): 283–290.
- [49] Masse D I, Masse L. Treatment of Slaughterhouse Wastewater in Anaerobic Sequencing Batch Reactors [J]. *Can. Agric. Eng.*, 2000, 42(3): 131–137.
- [50] 冷成保, 肖波, 杨家宽, 等. 暗河式生活垃圾干发酵处理研究 [J]. *环境工程*, 2001, 19(4): 45–47.
- [51] Ramasamy E V, Abbasi S A. Energy Recovery from Dairy Waste-waters: Impacts of Biofilm Support Systems on Anaerobic CST Reactors [J]. *Appl. Energy*, 2000, 65(1/4): 91–98.
- [52] Lalov I G, Krysteva M A, Phelouzat J L. Improvement of Biogas Production from Vinasse via Covalently Immobilized Methanogens [J]. *Bioresour. Technol.*, 2001, 79(1): 83–85.
- [53] Raju K, Ramaligaiah H. Methane Production from Orange Processing Waste [J]. *Indian J. Environ. Health*, 1997, 39(1): 20–22.
- [54] Liu J, Olsson G, Mattiasson B. Control of an Anaerobic Reactor towards Maximum Biogas Production [J]. *Water Sci. Technol.*, 2004, 50(11): 189–198.
- [55] Heiko F, Jurgen V S, Ulrich M. On-line of Volatile Fatty Acids for the Process Control of Anaerobic Digestion Plants [J]. *Water Res.*, 2002, 36(1): 212–218.
- [56] Zhang Y S, Zhang Z Y, Sugiura N, et al. Monitoring of Methanogen Density Using Near-infrared Spectroscopy [J]. *Biomass Bioenergy*, 2002, 22: 489–495.
- [57] Diamantis V, Melidis P, Aivasidis A. Continuous Determination of Volatile Products in Anaerobic Fermenters by On-line Capillary Gas Chromatography [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2006, 573: 189–194.
- [58] Peter F P, Irini A, Birgitte K A. A New VFA Sensor Technique for Anaerobic Reactor Systems [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 2003, 82(1): 54–61.
- [59] Feitkenhauer H, Ulrich M. Software Sensors Based on Titrimetric Techniques for the Monitoring and Control of Aerobic and Anaerobic Bioreactors [J]. *Biochem. Eng. J.*, 2004, 17: 147–151.
- [60] Batstone D J, Keller J, Angelidaki S V, et al. The IWA Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM 1) [J]. *Water Sci. Technol.*, 2002, 45(10): 65–73.
- [61] Bernard O. For a Bioprocess: Theory and Example of the Anaerobic Digestion Process [J]. *Water Sci. Technol.*, 2006, 53(1): 85–92.
- [62] Johnson B R, Shang Y. Applications and Limitations of ADM 1 in Municipal Wastewater Solids Treatment [J]. *Water Sci. Technol.*, 2006, 54(4): 77–82.
- [63] Copp J B, Bella E, Snowling S, et al. Anaerobic Digestion: A New Model for Plant-wide Wastewater Treatment Process Modeling [J]. *Water Sci. Technol.*, 2005, 52(10): 1–11.
- [64] Guwy A J, Hawkes F R, Wilcox S J, et al. Neural Network and



- On-off Control of Bicarbonate Alkalinity in a Fluidised-bed Anaerobic Digester [J]. *Water Res.*, 1997, 31(8): 2019–2025.
- [65] Holubar P, Zani L, Hager M, et al. Start-up and Recovery of a Biogas-reactor Using a Hierarchical Neural Network-based Control Tool [J]. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2003, 78(8): 847–854.
- [66] Bestamin O, Ahmet D, Sinan B M. Neural Network Prediction Model for the Methane Fraction in Biogas from Field-scale Landfill Bioreactors [J]. *Environmental Modelling Software*, 2006, 25: 1–8.
- [67] Muller A, Marsili-Libelli S, Aivasidis A, et al. Fuzzy Control of Disturbances in a Wastewater Treatment Process [J]. *Water Res.*, 1997, 31(12): 3157–3167.
- [68] Murnleitner E, Becker T M, Delgado A. State Detection and Control of Overloads in the Anaerobic Wastewater Treatment Using Fuzzy Logic [J]. *Water Res.*, 2002, 36(1): 201–211.
- [69] Tay J H, Zhang X Y. A Fast Predicting Neural Fuzzy Model for High-rate Anaerobic Wastewater Treatment Systems [J]. *Water Res.*, 2000, 34(11): 2849–2860.
- [70] 朱庆山. 固体氧化物燃料电池高效利用生物质气前景分析 [J]. *过程工程学报*, 2007, 7(2): 419–423.
- [71] 刘春朝, 成喜雨, 王锋. 一种使用有机废弃物制备沼气的装置及其制备方法 [P]. 中国专利: 200710099990.9, 2007–06–01.
- [72] Cheng X Y, Liu C Z. Enhanced Biogas Production from Herb Extract Solid Waste by Microwave-assisted Alkali Pretreatment [A]. *The International Conference on Biorefinery* [C]. 2007. 93–94.
- [73] 刘春朝, 成喜雨, 王锋. 一种使用生物预处理秸秆发酵制备氢气的方法 [P]. 中国专利: 200710178181.7, 2007–11–27.

## Recent Research Progress in Biogas Fermentation Process

CHENG Xi-yu<sup>1,3</sup>, ZHUANG Guo-qiang<sup>2</sup>, SU Zhi-guo<sup>1,3</sup>, LIU Chun-zhao<sup>1,3</sup>

(1. State Key Lab. Biochem. Eng., Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Research Center of Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This review summarized recent research progress in the field of biogas fermentation process including microbial community regulation, process optimization and control, as well as fermentation system designing, and then pointed out that the process instability and low productivity of biogas fermentation is due to lack of enough understanding on the mechanism of anaerobic digestion process. The tendency of research and development in biogas engineering in the near future was also put forward in the following areas for enhancing biogas productivity: metagenomics of microbial community and metabolic network, multi-scale process control, pretreatment and compatibility of waste materials, and co-production of both hydrogen and methane.

**Key words:** biogas; microbial community; metagenomics; process control; bioreactor