

# 秸秆发酵电厂建设可行性研究

李建锋<sup>1</sup>, 郝继红<sup>1</sup>, 吕俊复<sup>2</sup>, 冀慧敏<sup>1</sup>, 杨迪<sup>1</sup>

(1. 中国电力企业联合会科技服务中心, 北京 100038;

2. 清华大学热科学和动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**针对我国秸秆资源的特点,提出了采用大型沼气池利用秸秆为原料高温发酵生产沼气,然后通过内燃机组、余热锅炉以及汽轮机组等设备的联合动力循环、沼气代替液化气满足村镇居民的生活用气、沼渣生产有机肥的秸秆综合利用技术路线,该系统采用成熟技术的组合,所有设备均可国产化。介绍了该系统的工艺路线,并分析了其技术可行性与项目经济性。分析结果表明,发电余热完全可以维持沼气池内 50~55℃ 的温度,能够实现高温发酵;以消耗秸秆 9 万 t/a(折合含水量 15%,原始热值 13.5 MJ/kg)的发酵电厂为例,能够日产热值为 21 MJ/m<sup>3</sup> 的沼气 72 000 m<sup>3</sup>,发电量 5 × 10<sup>7</sup> kWh/a,生产有机肥 4.4 万 t/a;项目投资回收期大约 5 年。

**关键词:** 秸秆;发酵;沼气;发电;有机肥;联合动力循环

**中图分类号:** TM619;TQ920.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2009)04-0063-05

## Feasibility study on the construction of a power plant using fuels from straw stalk fermentation power plant

LI Jian-feng<sup>1</sup>, HAO Ji-hong<sup>1</sup>, LU Jun-fu<sup>2</sup>, JI Hui-min<sup>1</sup>, YANG Di<sup>1</sup>

(1. Scientific and Technical Service Center, China Electricity Council, Beijing 100038, China; 2. Key laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of straw resources in China, a new way of straw stalks generating electricity and making organic fertilizer is proposed. Biogas is produced in the large-scale biogas digester by fermentation in high temperature, then producing electricity using the biogas by gas-steam combined cycle through engine units, exhaust-heat boiler, turbo-set, etc. In the system, the techniques have come to maturity and the equipments can be produced in the country. Further more, the biogas can be supplied to residents to replace liquid gas and the dregs can be supplied to the farmer to replace chemical fertilizer. The feasibility of the technology and the benefit of the system is analyzed. The result of analysis shows that the exhaust-heat of the system could definitely maintain in 50~55℃ (temperature) in the biogas digester to ensure the high-temperature fermentation. The power plant uses up to approximately 90 000 t/a of straw stalks (converted to 15% of water content, 13.5 MJ/kg of original heat value), it can produce 72 000 m<sup>3</sup> of biogas that equals 21 MJ/m<sup>3</sup> of heat value every day, 5 × 10<sup>7</sup> kWh of power generated and 4.4 × 10<sup>4</sup> tons of organic fertilizer every year. The payback period of the system is approximately 5 years.

**Key words:** straw stalk; fermentation; biogas; power generation; organic fertilizer; gas-steam combined cycle

我国的生物质资源以农林废弃物为主。据统计,中国农作物秸秆资源总量 6 亿 t 以上。每年的林业生物质总产量 8 亿~10 亿 t,其中可作为能源利用的林业生物质产量为 3 亿 t 以上,折合标准煤约 2 亿 t<sup>[1]</sup>。

由于生物质资源本身的特性,如密度低,给生物质的收集、运输与储存带来了很大的困难,根据不同地区的运价水平,一般生物质运输距离超过 50 km,其经济竞争力将大幅下降,即使已经采用了压缩成型技术。

目前作为发电能源来利用生物质资源主要为农作物秸秆,其主要利用方式为生物质纯燃发电和掺烧发电等。生物质纯燃发电一般是利用锅炉设备采用直接燃烧的方式将生物质能转化为电能,目前我

国已有 300 万 kW 的生物质能发电装机容量,其中纯烧秸秆发电占 120 万 kW,而正在报批的纯烧秸秆发电项目还有 80 多个。

作为纯烧秸秆的电厂,考虑到秸秆的收集、储存以及运输等因素,装机容量不可能太大,又由于纯烧秸秆所带来的秸秆处理、锅炉防腐等因素,所以导致了这种发电方式投资巨大,约每千瓦 1 万元,而且运行效率低,供电标煤耗高达 520 g/kWh 以上,因此运行费用较高。对于纯烧秸秆发电的重大疑问是燃料供应的安全性。在纯烧秸秆的锅炉中,一般对秸秆的种类有一定的限制。而秸秆资源是由农业生产决定的。由于市场需求的变化,农产品的种植种类并非一定不变。因此建成的纯烧秸秆发电厂,不仅受限于秸秆生长的季节性,还受制于农产品市场的

变化。秸秆混烧方式尽管能够在一定程度上克服上述不足,但是因为缺乏国家有利的政策支持,也存在运行费用较高的缺点。而且秸秆作为燃料,即使其燃烧掉形成的灰全部回用至农田,但其中的 N、P 等营养元素也基本会损失殆尽。而每年因为秸秆燃烧所浪费的有效养分是相当多的,据统计,仅黑龙江省每年焚烧的秸秆中氮元素折算化肥价值约为 5.8 亿元<sup>[2]</sup>。从长远来看,是不利于生态环境的。

为了解决利用生物质能开发利用与生态环境之间的矛盾,改善秸秆种类对其利用的限制,采用大型沼气池高温发酵生产沼气,然后通过内燃机组、余热锅炉以及汽轮机组等设备的联合动力循环发电、同时提供沼气满足村镇居民的生活用气代替液化气,以及采用沼渣生产有机肥的生物质利用技术路线来利用生物质能可能是一个更为合理的生物质能利用途径。在该技术中,对生物质种类和水分含量没有严格要求,在一定程度上可以缓解生物质供应的季节性,同时解决了在农村同样存在的生活垃圾的问题。

采用沼气发电在垃圾、粪便处理上已经有大量成功的案例。经过多年的发展,我国大型沼气池技术已经成熟,并已经得到了迅速的推广<sup>[3]</sup>。但到目前为止,我国大型沼气池基本都用于养殖场或者工业生产废弃物的处理,并多采用中温发酵方式,产气速度不是很高,而采用沼气池直接利用秸秆的发电方式还未见报道。

### 1 秸秆发酵电厂系统

笔者设计的生物质利用技术路线系统见图 1。

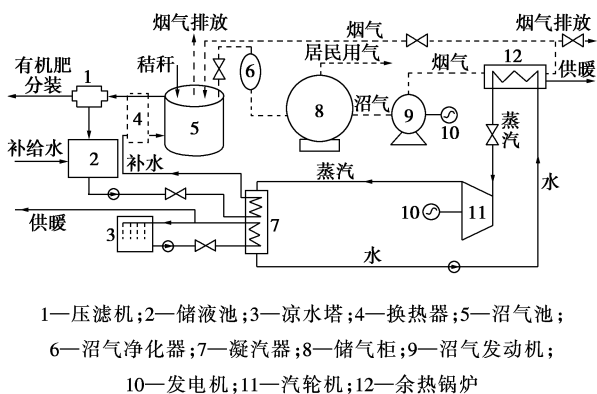


图 1 秸秆发酵电厂系统工艺图

在该系统中,生物质经过简单粉碎以及预处理后进入沼气池进行高温发酵,发酵产生的沼气采用联合循环的方式进行发电:即首先利用沼气发动机去发电,然后沼气的发电余热在余热锅炉中

产生蒸汽,再去推动汽轮机组发电,这样具有整体效率较高的优势;发电后的余热可以加热沼气池,如果系统建在比较集中的居民区附近,发电余热在保证沼气池保温的情况下,多余部分可以用于冬天供热,夏天可以采用吸收式制冷机组进行供冷;电厂多余沼气也可以向居民提供生活用气,以替代液化石油气,改善农村的生活条件。在冬季极端温度天气下,可以采用热夹层的方式让烟气流过沼气池的外壁面以起到保温加热的作用,热夹层示意图见图 2;但在平时排放的烟气甚至可以部分的引至附近的蔬菜大棚,提高蔬菜产量。

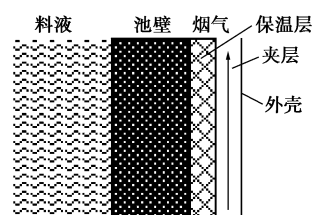


图 2 热夹层示意图

采用沼气池发酵的方式利用农村的秸秆资源,一个很大好处是能够获得大量沼渣,而这些沼渣经过简单处理后就是很好的有机肥。这些机肥料直接提供给农民,对于当地发展有机农业有很大的作用。在此技术路线中,就有效元素的循环利用来说,具有更大的优势。

图 3 给出了氮元素在农业生产过程中的流通环节。除了生物自身固氮以外,目前田地中氮元素的补充主要来源于 2 个方面:化肥以及雷阵雨过程中的降水,当然秸秆还田也是一个来源,但若是秸秆直接还田,那么秸秆中所蕴含的能量将无法得到利用。氮元素进入田地以后,一部分被粮食带走;一部分随着水土流失而浪费;还有一部分则储藏在作物的秸秆里面。在该系统中,生物质中的氮在发酵利用过程中损失很小,主要残留在沼渣中,沼渣作为有机肥返回至土壤,这对于增加土壤肥力、改善土壤活性、缓解土壤板结作用很大。可以认为等效于秸秆还田的效果。全国农作物秸秆中所蕴藏的氮元素总量高达 4.939 Mt<sup>[4]</sup>。而这些秸秆一旦被直接燃烧以后,其中的氮元素将变成 N<sub>2</sub> 或是 NO<sub>x</sub>,不仅无法得到有效利用,而且还有可能污染环境。

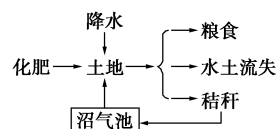


图 3 氮元素的流向示意图

## 2 系统参数与可行性分析

### 2.1 系统参数选择

因为秸秆的分散性,所以该系统的总装机功率不宜太大。而因为要提高整个系统的发电效率,所以需要采用联合循环发电方式。为了兼顾装机容量与联合循环,因此需要采用较小功率的汽轮机组,这首先需要根据目前国内的现有技术状况确定小型汽轮机功率。根据调查,国内较为成熟可靠的2种型号凝汽式汽轮机组参数见表1,大型沼气发动机参数见表2。汽轮机组与内燃机的参数一旦确定之后,可以根据汽轮机组的参数来确定沼气发动机的台数,见表3,表3中余热锅炉排气温度取150℃。

表1 国产小型汽轮机参数

项目	参数	
功率/kW	880	750
入口蒸汽温度/℃	382	340
入口蒸汽压力/MPa	4.60	1.27
蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	4.7	4.5
排气温度/℃	56	56
价格/万元	560	140

表2 某型国产沼气内燃机参数

项目	参数
机组型号	1000GF-NK
发电功率/kW	1000
转速/r·min <sup>-1</sup>	1500
发电效率/%	35
排气温度/℃	≤650
耗气量(甲烷含量60%)/m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup>	600
烟气排量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	5000
大修期/h	25000
平均有效压力/MPa	1.2

表3 沼气发动机台数确定

项目	参数	
汽轮机功率/kW	880	750
蒸汽入口焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	3159.82	3131.2
余热锅炉入口水焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	234.08	
生产蒸汽所需热功率/kW	3819.72	3621.40
单台发动机所提供热功率/kW	867.78	
沼气发动机台数/台	4.4(5)	4.2(5)

由表3中可知,如果采用联合动力循环方式,每台汽轮机最少需要配套5台沼气的内燃发动机。又根据表2,5台发动机需要沼气72000 m<sup>3</sup>/d。在高温发酵条件下,每立方米池容积可以产生约3.8 m<sup>3</sup>/d沼气<sup>[5]</sup>,据此可以计算出沼气池总容积为18947 m<sup>3</sup>。但为了保证在实际的工程应用中能够产生足够多的沼气的量,在设计过程中保险系数应该放大,在该系统中如果保险系数取为3,那么沼气池容积需要56842 m<sup>3</sup>。如果希望扩大规模,那么按照同样的方式可以先扩大汽轮机的功率,然后按照模块化的方式再扩大其余部分。

由于沼气发酵池保险系数较大,取为3,那么除了满足发电用沼气外,还有可能向居民提供生活用燃料气,满足大量的附近居民生活需要。若沼气池出现问题而使得沼气产量不足,则在做饭期间压缩发电量,保证民用。

### 2.2 沼气池能量平衡

据统计,目前的农村沼气用户在2650万口以上<sup>[3]</sup>,但多集中在我国的南方地区。在北方,户用沼气池所存在的主要问题是发酵速度慢、效率低,以至于建造成本相对较高,效益较小。导致户用沼气池发酵速度低的一个最主要原因是池温太低。

实验表明,发酵温度对于发酵速度与效率影响很大,因此如果能够保持沼气池高温发酵,那么发酵速度与发酵效率就会大大提高<sup>[5-8]</sup>。由于秸秆在发酵的时候所产生的热量是非常有限的,不足以加热整个沼气池,因此保持池内温度就需要有外部加热。沼气池的散热方式主要有3种:一是池体表面直接向周围环境散热;二是沼气池出料时会携带热量;三是沼气所带走的热量,沼气池热平衡示意图见图4。

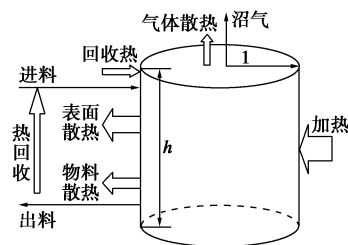


图4 沼气池热平衡示意图

事实上,考虑到建设占地与系统维护,56842 m<sup>3</sup>的总发酵容积,分成6个沼气池较为合理,每个沼气池的容积约为9500 m<sup>3</sup>。

以农业发达、生物质资源丰富的山东南部为例来计算沼气池的热平衡,当地年平均气温在

13.9℃,夏天最高温度 37℃,冬季最低气温为 -15℃。

### 2.2.1 池体表面散热

如图 4 所示,采用圆柱形池子,体积为  $V$  的圆柱体表面积  $S$  的最小值可以采用下面的方式计算:

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi rh, \text{ 而 } V = \pi r^2 h$$

$$\text{所以 } S = 2\pi r^2 + 2V/r$$

以表面积最小为约束条件可以求出

$$r = (V/2\pi)^{1/3}$$

然后可以计算出柱体表面积最小值为

$$S = 3(2\pi)^{1/3} V^{2/3}$$

6 个池子的最小总面积为  $S = 14896.2 \text{ m}^2$

如果不采用热夹层的方式,而是利用保温材料对池体进行保温,那么假定水泥混凝土池壁厚度为 0.30 m,外铺设保温材料的厚度为 0.05 m,同时取保温材料的导热系数为  $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,取混凝土板的导热系数为  $0.79 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ <sup>[9]</sup>。根据当地的气温一般在 -15 ~ 37℃,因此可假定保温材料两面的温差为  $55 - (-15 \sim 37) = 18 \sim 70^\circ\text{C}$ ,所以池表面最大散热量为

$$Q_1 = 15721.2 \times (18 \sim 70)/(1 + 0.3/0.79) \\ = 194.3 \sim 755.7 \text{ kW}$$

### 2.2.2 进出料液散热

如果以小麦秸秆为例,并进行充分发酵,那么每吨小麦秸秆(干)的产气量约为  $432 \text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。如果采用连续发酵的方式,每天需要的干秸秆量为  $72\ 000/432 = 166.7 \text{ t}$ ,如果仅按照 80% 的发酵效率来计算,则每天需要秸秆量为 208.4 t,折合  $2.41 \text{ kg/s}$ 。如果进料质量分数为 10%,那么进料质量流量为  $24.1 \text{ kg/s}$ 。由于沼气产量为  $3\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,约合  $1 \text{ kg/s}$ (沼气密度为  $1.22 \text{ kg/m}^3$ <sup>[5]</sup>),为了维持池内物料平衡,出料的质量流量为  $23.1 \text{ kg/s}$ 。在实际运行过程中,为了回收出料中所携带的热量,就需要增加进出料液的流动性,因此需要将秸秆进行粉碎。如果假定换热器的端差为  $10^\circ\text{C}$ ,流进与流出的料液比热取与水相同,根据能量守恒,可以计算出进池料液将被加热到约  $42.5^\circ\text{C}$ ,因此还需要的加热功率为  $Q_2 = 12.5 \times 4.18 \times 24.1 = 1\ 259.2 \text{ kW}$ 。

### 2.2.3 气体散热

由于沼气的质量流量仅为  $1 \text{ kg/s}$ ,如果沼气的比热取与空气相同的值( $1.0045 \text{ kJ/kg}$ ),并且不考虑水分蒸发所携带能量,可以计算沼气所携带热量  $Q_3 = 15 \sim 70 \text{ kW}$ 。综上所述,沼气池的散热总量为  $1\ 468.5 \sim 2\ 084.9 \text{ kW}$ 。

### 2.2.4 系统潜在加热量

如果忽略掉发酵过程所产生的热量,系统的有效热来源主要来自 3 个方面:一是汽轮机的排热  $2\ 871.4 \text{ kW}(56^\circ\text{C})$ ;二是 5 台发动机的高温排热功率  $7\ 256.9 \text{ kW}(55^\circ\text{C})$ ;三是余热锅炉排出来的废气如果温度降低到  $55^\circ\text{C}$ (可采用气-水混合式换热器),可以产生的余热为  $5 \times 1.7 \times 95 \times 1.0045 = 811.13 \text{ kW}$ (没有计算水蒸气的相变潜热)。所以系统总的加热功率可以达到  $10\ 939.47 \text{ kW}$ ,远大于沼气池的散热。

因此,分析表明,沼气池内的温度保持是没有问题的,池内可以全年维持  $50 \sim 55^\circ\text{C}$  的高温。多余的热量可以在冬季用于附近居民生活采暖,清洁的废烟气可以直供附近的蔬菜大棚。

### 2.3 池内停留时间

在该系统中,可以使用各种新鲜的农业废弃物或禽畜粪便,而对水分、形态没有任何要求,这是相对于直燃发电利用必须干燥的一个突出优势。但是不同生物质种类的发醇产生沼气的停留时间不同。对于西瓜皮、蔬菜下脚料等自身含水较高的生物质原料,时间较短即可发醇完全。但是,这些原料的供应总量不会占到很大比例,而大量的生物质可能是农作物秸秆。成熟庄稼形成的秸秆的发醇时间要求较长。为了保证发醇充分,秸秆在沼气池内需停留时间超过 50 天以上<sup>[8]</sup>。而如果仍按照 80% 的发醇效率计算,即使 50 天不出料,一共消耗秸秆为  $12\ 050 \text{ t}$ ,50 天所产生沼气的质量为  $4\ 392 \text{ t}$ ,池中最多还有  $7\ 658 \text{ t}$  干物质(因为发醇过程还要产生一部分水分),而  $57\ 000 \text{ m}^3$  的容水质量约为 5.7 万 t,此时池中干物质浓度仅相当于 13.4%,因此发醇停留时间足够,也能保证发醇的充分进行。

## 3 经济性分析

### 3.1 投资费用

根据调研,结合国内沼气池的建设成本以及内燃机的价格, $5\ 880 \text{ kW}/5\ 750 \text{ kW}$  的沼气发电装机容量、日产热值为  $21\ 520 \text{ kJ/m}^3$ <sup>[5]</sup> 的燃料气  $72\ 000 \text{ m}^3$ 、年联产有机肥 5 万 t 的规模,建设需要投资 1.2 亿 ~ 1.3 亿元(未考虑居民沼气管道等外部投资)。

### 3.2 运行费用

电厂原料主要是各种农业废弃物,农村生活垃圾对水分和热值没有严格的要求。考虑到规模收集利用,应该以中农作物的秸秆为主。秸秆的收集可以采用图 5 的方式<sup>[1]</sup>。

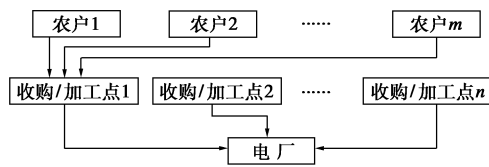


图5 农作物秸秆收集网络示意图

首先计算秸秆成本,距离电厂较远的地方可以将秸秆粉碎后直接送到电厂,秸秆的粉碎成本大约在20元/t;但如果距离较远,可以采用秸秆颗粒成型的方式来解决运输与储存问题,秸秆颗粒成型成本见表4。

表4 秸秆颗粒成本 元/t

项目	原材料	加工成本			运费	利润	合计
		人工	电费	其他			
数量	120~160	30	55	15	20	20	260~300

如果按照80%的发酵效率计算,电厂年消耗秸秆(折合含水量15%、原始热值13.5 MJ/kg)89 477.5 t。如果生物质的进厂成本都按照300元/t计算,每年的秸秆成本为2 684.3万元;对于农业种植业比较发达的山东地区,仅秸秆一项的平均产量可以高达329.67 t/km<sup>2</sup>[1],周围15 km范围内的秸秆产量为232 911.86 t,因而电厂所耗农作物秸秆不足当地资源的40%,若辅助以其他农业废弃物,则发酵原料完全可以得到保障,而且也不会对当地秸秆的价格产生太大的影响。

为了提高发酵速度和发酵效率,在发酵前对秸秆进行预处理是有必要的<sup>[10-12]</sup>,根据电厂秸秆的消耗量计算,每年的预处理剂费用大概在600万元。

由于本系统中采用的是成熟技术的组合,其可靠性较高,维护技术含量和成本相对低一些。参考相近机组的实践,该规模的每年维护费用应为300万元,在技术经济分析中按每年500万元考虑。

最后计算人工成本,如果电厂按照100人的规模,人均工资1 500元/月计算,人工成本每年估计为200万元;再加上其他办公费用150万元,那么年总成本为4 134.3万元。

### 3.3 年收益

在收益计算过程中暂不考虑向当地居民供气的收益,而仅仅计算发电收益、有机肥收益以及潜在的CDM项目收益。

生物发酵联产电厂的发电装机总容量为5 880 kW或5 750 kW,由于内燃发电机组可以采取5用1备的方式,并考虑到发酵过程的连续性,那么年发电

量约为5 151.58/5 037.00万kWh,考虑到自身10%左右的用电率,所以上网电量为4 635.79/4 533.30万kWh;由于生物发酵电厂为纯生物质能电厂,因此完全可以享受到国家电价0.25元/kWh的政策补贴,山东南部地区的常规火电机组上网电价为0.358元/kWh,所以生物发酵电厂上网电价为0.608元/kWh,因此年电费收入为2 818.56/2 756.25万元。

如果不考虑发酵过程中的失水量,该电厂可以年产沼渣44 465.76 t(干基),以秸秆耗氧发酵产物中含有有机质60%为参考<sup>[13]</sup>,所有沼渣均可作为优质有机肥,按照当地其他有机肥出厂价格1 000元/t的均值计算,可以产生效益4 446.6万元<sup>[14]</sup>。

由于生物发酵电厂本身并不产生CO<sub>2</sub>排放,因此可以将此做成CDM项目。按照山东电网CO<sub>2</sub>减排折算系数为1.03045 t/kWh,因此年减排量为47 769.5/46 713.4 t,目前CO<sub>2</sub>价格最少为10欧元/t,因此年最小收益为477.7/467.1万元;由此可以算出,电厂每年总收益为7 742.86/7 669.95万元,而净利润为3 608.56/3 535.65万元。

## 4 结语

根据以上分析与计算,可以得出如下结论:

(1)由于该系统融合了沼气池高温发酵、联合动力循环、热电联产以及有机肥生产等技术,因此是一种全新的秸秆资源综合利用方式。

(2)大型沼气池的设计建造、大型内燃发电机组、余热发电等均为成熟技术/设备,因此建造一个生物发酵电厂在技术上是可行的,项目的整体技术风险较小。

(3)建造1个生物发酵电厂,扣除税费,5年左右的时间就可以收回投资,因此,在经济上是相当合算的。

(4)生物发酵电厂可以带动秸秆收集、加工、运输等相关产业的发展,为当地农民提供较多的就业机会,增加当地农民收入数千万元,有力地促进了当地新农村的建设步伐。

(5)21 MJ/m<sup>3</sup>热值的沼气如果替代液化石油气或者煤炭提供给当地居民,能够有力地改善农民的生活条件和农村大气环境。

(6)由于生物发酵电厂能够消耗当地大量的秸秆,必定会大大减轻当地农民的秸秆露天焚烧量,这对改善当地环境非常有利。

(下转第69页)

气温度和湿度等。由于这些影响因素相互之间强烈耦合,且四塔系统塔与塔之间相互偶联,仅仅通过数值模拟的手段得到合理的、最优的参数配置是非常困难的<sup>[5-7]</sup>。因此,对于微型变压吸附制氧过程,采用实验方法确定和优化一些系统配置参数是非常必要的。

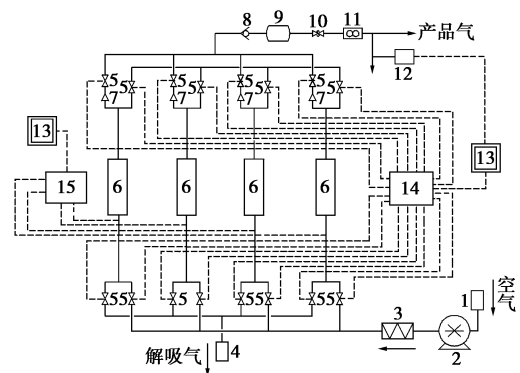
虽然包括均压及产品气升压步骤的多塔 PSA 循环系统在工业上得到广泛的应用,但是却很少有公开详细的工艺过程的数据,大部分公开的实验数据都是仅限于 1~2 塔的系统<sup>[8]</sup>。本文中拟对实验室建立的微型四塔变压吸附制氧设备的制氧效果进行实验研究,采用 N51 型沸石分子筛作为实验用吸附剂,探讨了进气量、产品气量、分子筛量及吸附塔高径比等工艺参数对微型四塔变压吸附制氧系统氧气产品纯度和回收率的影响,并对采集的压力曲线进行了分析。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

如图 1 所示,建立了 1 套微型的四塔变压吸附制氧实验装置。

该实验装置通过 PLC 控制器控制电磁阀的开启,可实现无均压及产品端均压 2 种流程。空气经过滤器净化,经压缩机升压后进入冷却器冷却,再由控制阀进入装有沸石分子筛的 4 个吸附塔进行吸附



1—过滤器;2—空气压缩机;3—冷却器;4—消音器;5—电磁阀;  
6—吸附塔;7—节流阀;8—单向阀;9—储气罐;10—限压阀;  
11—流量计;12—测氧仪;13—上位计算机;14—PLC 控制器;  
15—压力变送器

图 1 四塔变压吸附制氧实验装置

分离。分离后的产品气一部分进入储气罐,经流量计流出,一部分对另 1 个吸附塔进行反吹清洗,而氮气及其他组分在解吸时经消音器排入大气。氧气的流量通过流量计调节,氧气的体积分数用 ZO-101T 型氧化锆氧量分析仪测量,测量精度为  $\pm 2\%$ 。各个塔内的压力变化通过压力信号采集器采集,通过与上位计算机连接,可以得到压力变化的数值信号。PLC 控制器控制电磁阀的切换时间,该控制器通过 RS-232 适配器与上位计算机连接,可以通过上位计算机改变吸附塔的切换时间。

(上接第 67 页)

(7)生物发酵电厂能够为当地农民提供大量的有机肥料,可以减轻当地化肥用量,改善当地土壤活力,为当地发展绿色农业提供了一定的基础。

(8)这种生物发酵电厂如果建成,将成为国内首家。因此它的成功必会对大规模开发利用我国的生物质能,加快我国分布式能源建设,缓解我国电力供应安全与环境保护的双重压力将起到重要的作用。

### 参考文献

- [1] 李建锋,郝继红,吕俊复,等.循环流化床锅炉掺烧生物质前景研究.电站系统工程[J].2007,23(6):37-39.
- [2] 张荣成,李秀金.作物秸秆能源转化技术研究进展[J].现代化工,2005(6):14-17.
- [3] 寇建平,赵立欣,田宜水,等.中国农村可再生能源发展现状与趋势[C]//中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集.北京:中国农业出版社,2008.
- [4] 高祥照,马文奇,马常宝,等.中国作物秸秆资源利用现状分析[J].华中农业大学学报,2002,21(3):242-247.
- [5] 袁振宏,吴创之,马隆龙,等.生物质能利用原理与技术[M].北

京:化学工业出版社,2005.

- [6] 李连华,马隆龙,袁振宏,等.农作物秸秆的厌氧消化试验研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):335-338.
- [7] 高志坚,李秀金,杨懂艳,等.玉米秸中温与常温厌氧生物气化的比较研究[J].农业工程学报,2003,19(5):214-217.
- [8] 楚莉莉,杨改河,张翠丽,等.不同温度条件下农作物秸秆产气效率研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):190-193,199.
- [9] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998.
- [10] 康佳丽,李秀金,朱保宁,等.NaOH 固态化学预处理对麦秸沼气发酵效率的影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1973-1976.
- [11] Yang Dongyan, Li Xiujin, Gao Zhijian, et al. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: A preliminary comparison study[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 209-213.
- [12] Luo Qingming, Li Xiujin, Zhu Baoning, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2):111-115.
- [13] 茹菁宇,尹雯,王家强,等.农田秸秆高温耗氧堆肥试验研究[J].可再生能源,2007,5(2):37-40.
- [14] 中华人民共和国农业部.NY525—2002 有机肥料[S].北京:中国标准出版社,2002-08-27. ■