

# 探讨利用热声热泵技术强化稳定 沼气产量的工艺

邓富康<sup>1,2</sup>, 李康春<sup>1,2</sup>, 张姗姗<sup>1</sup>, 唐弓斌<sup>1</sup>, 陈一帆<sup>1</sup>, 肖锋<sup>1</sup>, 黄福川<sup>1,2\*</sup>

(1. 广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004;

2. 广西石化资源加工与过程强化重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:**探讨了一种基于热声效应原理设计而成的热声热泵系统。在此基础上,将获得的热量用于沼气循环加热系统对沼气池物料进行加热,强化稳定沼气产量。

**关键词:**沼气生产;保温技术;热声效应;高温热泵

**中图分类号:**TG307;S216.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)07-0158-03

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.07.039

## The process of strengthening the biogas production based on thermoacoustic heat pump technology

DENG Fu-kang<sup>1,2</sup>, LI Kang-chun<sup>1,2</sup>, ZHANG Shan-shan<sup>1</sup>, TANG Gong-bin<sup>1</sup>,  
CHEN Yi-fan<sup>1</sup>, XIAO Feng<sup>1</sup>, HUANG Fu-chuan<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Guangxi Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Nanning 530004, China)

**Abstract:** A thermoacoustic heat pump system based on thermoacoustic effect is designed in this study. The resultant heat is further used in biogas circulation heating system to heat the digester feed solution and strengthen the stability of the biogas production.

**Key words:** biogas production; warming technology; thermoacoustic effect; high-temperature heat pump

能源是世界各国的战略资源。不可再生的化石能源将被人类消耗殆尽。因此,近年来,全球能源安全和气候变化问题日益尖锐,国内煤、电、油、气紧张局面反复出现,生态环保形势日趋严峻,以新能源和新技术为标志的新一轮能源技术革命将逐渐显现。

生物沼气的原料来源丰富、价廉,燃烧热效率高、成本低、环保、低碳、可再生、抗爆性能好,是一种优质的可再生生物质能源。目前,国内大中型沼气工程日益增多,其中,中温厌氧发酵已日渐成为沼气规模化生产的趋势。温度控制是影响沼气厌氧发酵产气率的关键因素之一。若沼气池正常发酵温度变化超过 3℃,沼气产量将受到极大影响。因此,采用加热保温措施维持沼气池在最适宜发酵温度,中温发酵的最适宜温度为 35~40℃,从而维持沼气池的稳定运行,保持其恒定、高效的产气量。

目前,国内外大中型沼气工程应用较广泛的加热方式主要有燃料锅炉加热、太阳能加热、沼气发电

余热加热等。

受热声发动机的启发,本文中提出一种基于热声效应原理,设计、制造、安装热声热泵系统对沼气发酵系统进行保温、加热,强化稳定沼气产量的生产实验方法。

## 1 热声热泵系统原理

### 1.1 热声效应

热声效应就是热与声之间相互转换的现象<sup>[1]</sup>。声学理论解释该效应是由于热作用使得处于声场中的固体介质与可压缩振荡的流体之间相互作用并形成一种时均能量的现象。热声效应可以分为 2 类:一是用热驱动的声振荡,二是声驱动热量传输。

热声发动机即指通过热声效应的热产生交变机械动力的装置,实现热-机转化的装置,其产生的声波是直接驱动源。热声发动机按其声场类型分为驻波热声发动机和行波热声发动机。驻波是指压力相位与速度相位相差 90°。理论上,驻波热声发动机

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家星火计划项目(2015GA790003)

作者简介:邓富康(1991-),男,硕士生;黄福川(1963-),男,博士,教授,主要从事生物质能源方面的研究,通讯联系人,0771-3233718, huang-fuchuan@gxu.edu.cn.

只能依靠不可逆的传热过程来实现热声功的转换,因而对其效率是有所限制的。而行波发动机中压力与速度相位一致,其换热过程是可逆的。因此,从基础理论而言,行波热声发动机的效率是可以达到卡诺循环的效率。利用热声效应能制造功率足够大且高效率的热力机械,被称为热声热机、热声制冷机和热声热泵等。由于取暖的方式多样、简单价廉,导致对热声热泵的需求并不迫切,发展明显地滞后于热声制冷机。相比传统的热机,热声热泵最突出的优势是其能够高效利用低焓能源,如工业废热、太阳能及低热值的气体燃料及有机肥腐熟过程中产生的热能等;此外热声热泵无运动部件不需要润滑系统来实现密封、消除磨损等功能,系统稳定性高,使用寿命也得到延长。

Tijani 等<sup>[2]</sup>利用废热能源与热声热泵、热声热机耦合,采用热空气来模拟燃气燃烧器的烟道气体,当热空气温度为 620℃ 时,产生约 300 W 声功率,卡诺性能为 41%; Mumith 等<sup>[3]</sup>利用热声设备结合 DeltaEC 模拟软件进行了余热回收性能模拟实验,结果表明,即使在 150℃ 相对较低的温度下也能提供 1 029.10 W 的输出声功率,并且热机的效率达到 5.42%。

## 1.2 热声热泵

热泵是一种利用高位能使热量从低位热源流向高位热源的装置,把不能被直接利用的低焓热源变成可以利用的高焓热源,从而达到节约高位能的目的。热泵在我国亚热带和热带地区较广泛使用,主要原因是北方冬天环境温度过低,而常规空气源热泵在环境温度低于 0℃ 时会出现压比过高、效率低等问题。

利用热声逆效应,可以实现通过交变机械声波将热从低温输送到高温的泵热过程,与热声发动机作用相反。驱动热声热泵的装置主要有电声器件、直线振荡电机以及热声发动机,不同驱动装置的使用场合及效率均有不同,各有优势。当将低温端的温度固定在环境温度,可做到高效制热。Zhao 等<sup>[4]</sup>研究者设计了一个由 3 个线性压力波发生器以及三热泵在一个封闭的循环热声热泵系统,理论模拟在变化废热温度(40~70℃)和不同热端温度(120~150℃)条件下,计算结果表明,这种新的热泵系统相对卡诺效率高 50%~60%;Zhao 等<sup>[5]</sup>设计了一种直线压缩机驱动的行波热声热泵,结果显示,在 20℃ 环境温度和 50℃ 加热温度时,最大制热性能系数为 2.1 和加热能力为 260 W。

## 2 系统过程工艺设计

### 2.1 系统工作原理

热声热泵加热沼气池系统由热声驱动器、热声热泵、沼气循环加热系统和控制系统组成。其工作原理为:通过集合太阳能热量和沼气为燃料辅助对热声驱动器加热,使其达到热声振荡的基本要求。当热声驱动器的工作介质产生热声振荡时,输出压力声波,热声热泵在一定温度范围内获得所需的热量,再将获得的热量用于沼气循环加热系统对沼气池料液进行加热,从而在不同季节条件下保证了沼气池料液温度的稳定,提高沼气池的产气率。

### 2.2 过程系统的组成

热声热泵强化稳定沼气产量系统的主要结构如图 1 所示。

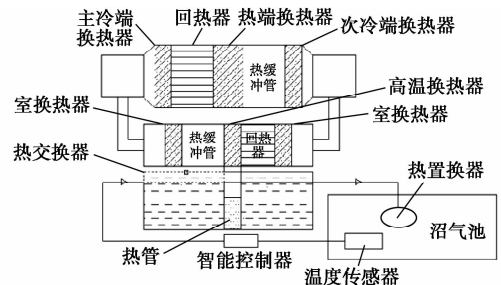


图1 热声热泵强化稳定沼气产量系统

#### 2.2.1 热声驱动器

热声驱动器为双作用行波热声发动机,由回热器、热端换热器、缓冲管、主冷端换热器、次冷端换热器、加热器等组成。

驱动器工作时,以太阳能为例,首先将太阳能集热器收集的太阳能对热声发动机高温端热管换热器加热。设计中,留有可利用有机肥腐熟过程中产生的低焓能量作为预留备份选择。当太阳能不足时,将沼气通过燃烧器燃烧(喷射器或烧嘴),产生的高温对高温端换热器辅助加热。热量传递给热声发动机的板叠的热端,使板叠热端的温度保持在 550℃ 左右。而板叠冷端则通过水冷冷却器带走热量,温度维持在 80℃ 左右。这样,当热声板叠两端的温度梯度达到一定的值时,就可满足热声振荡产生的条件,使热声谐振管内的的工作介质(本设计采用的是 He)产生热声振荡,并输出声波能量。

设计条件:工作气体选择氦气,工作压力不小于 2 MPa,系统频率为 25 Hz。

本过程工艺设计中采用太阳能作为热声发动机的驱动热源。太阳能能流密度低,为了达到发动机

的驱动温度,须采用聚光型太阳能集热器,将太阳能聚集在较小的集热面上,获得较高的能量。当日照不足时,可以使用其他方式作为辅助驱动热声发动机。具体的实现方法:先用收集的太阳能把加热器加热到一定温度,然后用本设计获取极为方便的沼气对热声发动机燃烧加热,使热声发动机启动。起振后,可以关闭辅助的沼气燃烧器,切换到太阳能加热,利用滞后环效应维持热声发动机工作。即使在阴天也可以通过单独燃烧低焓沼气来维持系统运行,这样充分利用了低焓能源,节约了资源。

### 2.2.2 热声热泵系统

热声热泵和热声制冷机的原理相同,都是从低温热源吸热,并向高温热源释放能量。本设计中的热泵为双作用的行波热声热泵。它由 1 个回热器、2 个室温换热器和 1 个高温换热器组成。从热声驱动器中获得的声波能量,如图 1 所示,自左向右输入行波热泵,通过热声转换的作用,低温换热器吸收环境下的热量,在高温换热器放出,实现从低温区向高温区泵热的作用。行波热泵两端分别接在热声驱动器中主冷水器和次冷水器两侧。

设计条件:平均压力 5 MPa,频率 25 Hz,环境温度度为 5℃ (278 K)。

### 2.2.3 加热系统和控制系统

该系统主要由热水箱、换热器、温度传感器、循环管路等组成。通过热泵产生大量热能加热循环水,热水通过管路输送到换热器中,换热器将热水的热能传递到沼气池中的发酵料液中,提高和稳定沼气池的温度。控制系统的目的是通过传感器和智能控制器的作用,控制热水的流量,使得池内温度保持在 35℃ 左右。

## 3 系统热平衡计算

对于沼气池的温度,由能量守恒定律可知,沼气池损失的能量和获得的能量应相等,才能保证沼气池的温度维持恒定。

### 3.1 沼气池能量损失

沼气池每天损失的能量主要是每天新增投料损失的能量  $Q_1$ ,沼气池散热损失  $Q_2$ ,管道的散热  $Q_3$  及其他能量损失  $Q_4$ 。每天沼气池总的热损失为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$Q_1$  为厌氧沼气池投料损失的能量:

$$Q_1 = Cm(T_D - T_S)$$

式中, $C$  为料液的比热容; $m$  为每天进入沼气池的新鲜料液量; $T_D$  为沼气池内料液温度; $T_S$  为新鲜料液

的温度。

$Q_2$  为沼气池散热损失的能量:

$$Q_2 = 2A \sqrt{\lambda \rho \pi C_p \theta} (t_2 - t_1)$$

式中, $A$  为沼气池散热面积; $\lambda$  为土壤导热系数; $\rho$  为土壤密度; $C_p$  为土壤比热; $\theta$  为传热时间; $t_2$  为沼气池内温度; $t_1$  为沼气池附近土壤平均温度。

$Q_3$  为管道的散热量:

$$Q_3 = 24 \times \{ (T_i - T_A) / [1 / (2\pi L_i \lambda) \cdot \ln(r_o / r_i) + 1 / (2\pi r_o \alpha)] + (T_o - T_A) / [1 / (2\pi L_o \lambda) \cdot \ln(r_o / r_i) + 1 / (2\pi r_o \alpha)] \}$$

式中, $T_i$  为进水管温度; $T_o$  为出水管温度; $T_A$  为环境温度; $r_i$  和  $r_o$  分别为保温层内半径和外半径; $L_i$ 、 $L_o$  分别为进出水管道长度; $\lambda$  为管道保温层的导热系数。

### 3.2 热声发动机获得的声波能量

热端换热器从太阳能热源获得的能量为  $Q_h$ ,冷端换热器向低温热源排出的能量为  $Q_c$ ,根据热力学第一定律,热声发动机的能量为  $W = Q_h - Q_c$ 。按照热声发动机的热效率为 30% 计算得, $W = 30\% Q_h$ 。

### 3.3 沼气池获取的热量

强化稳定沼气产量所需能量:

$$Q_0 = W\eta (\eta \text{ 为换热效率})$$

由能量守恒定律可知, $Q_0 > Q$  时,加热系统能够完成对沼气池料液的每天加热任务,保证沼气工程在冬季的正常运行。

## 4 系统效益分析及评价

利用热声热泵技术稳定沼气系统的产气率,由于现阶段的热声发动机的效率不高,其在实验室中,试验所产生的经济效益不是十分明显。但它是一个综合节能技术系统,可充分利用太阳能和其他低焓能源,符合国家节能、减排、环保政策;同时,热声热泵使用寿命长,一次投资,长期受益;无污染、无废弃物排放,减少空气污染,节能环保意义重大。

总之,在实际应用中,与传统沼气池加热方式相比,还没充分显现明显的技术竞争优势。其主要问题是还存在着一些实际工程技术中未彻底解决的问题。

(1) 热声效率与输出功率密度仍然较低,热声热机效率只达到 20% ~ 30% 的水平甚至更低。高效的耦合结构、优化设计回热器(或板叠)、换热器以及谐振管的结构是提高其效率的出路。

(2) 目前太阳能驱动的热声热机工程技术还未完全成熟,有待于高效太阳能驱动热声热机技术

续表

项目	2012年6月 工业减压渣油	焦化重 循环油
胶质(R)	17.48	16.80
沥青质(Asp)	21.77	11.60
$I_c = (\text{Sat.} + \text{Asp.}) / (\text{Ar.} + \text{R})$	1.031	—
馏程分析/°C		
IBP	—	257.1
10%	—	381.0
30%	—	418.8
50%	—	454.0

由表1可以看出,塔河原油工业减压渣油的闪点和延度偏低。软化点、延度等沥青指标与沥青的胶体结构有关<sup>[6]</sup>。从胶体不稳定指数<sup>[7]</sup>  $I_c$ 来看,减压渣油的  $I_c$  值较大,其胶溶能力变差,沥青性质也会相应恶化。同时,减压渣油的沥青质含量较高、闪点较低,已不适宜作为高等级道路沥青的基础原料。

从组成上看,塔河焦化重循环油沥青质组分含量低,不会增加塔河渣油本已很高的沥青质,而且具有一定的芳烃和胶质含量,作为生产塔河沥青的调和软组分应具备一定的潜在可能性。从馏程上看,塔河焦化蜡油 400°C 以上体积收率 80% 左右,420°C 以上体积收率 10% 左右,高沸点重质馏分含量多,可供利用部分大约 70% 以下。另外,沥青的闪点与

基础原料的初馏点和 5% 点温度有关。虽然焦化重循环油馏程范围较宽,初馏点和 5% 点温度均较低,但含量较少。大部分馏分集中在 380°C 以上,经过减压蒸馏后,其渣油的初馏点和 5% 点温度将会有大幅的提升,不会对高等级道路沥青产品的闪点性质造成影响。对其进行实沸点蒸馏后各段渣油的性质如表 2 所示。

表2 焦化重循环油实沸点蒸馏渣油性质

渣油馏程 范围/°C	轻收/ %	针入度/ 0.1 mm	PI	软化点/ °C	闪点/ °C
>440	46.05	30	0.857	60.7	266
>435	43.56	40	0.821	56.6	266
>430	41.05	58	0.525	51.4	252

从表2可以看出,焦化重循环油减压蒸馏后各段渣油的 PI 值均较低,闪点较工业渣油提高约 30°C。适宜作为生产高等级道路沥青的基础配比原料。

## 1.2 调和沥青

按照 A 级沥青生产工艺,以 2012 年 6 月塔河工业渣油为原料,加入馏程 >430°C 的塔河原油焦化重循环油作为针入度调整油,分别调制的 70<sup>#</sup> 和 90<sup>#</sup> 2 种牌号沥青,各种调和原料在 140 ~ 150°C 下搅拌 30 min。各物料按比例调和沥青性质与沥青标准见表 3。

将得到的热量用于沼气循环加热系统,使沼气池发酵温度减少随环境气温的变化而变化。

热声发动机驱动热泵产生热量,用于强化稳定沼气产量的技术,具有可行性和巨大的潜力。

## 参考文献

- [1] 金滔,陈国邦,应哲强. 热声理论的研究及其发展[J]. 低温与超导,1999,27(3):48-56.
- [2] Tijani M E H, Spoelstra S. A hot air driven thermoacoustic-stirling engine[J]. Applied Thermal Engineering,2013,61(2):866-870.
- [3] Mumith J A, Makatsoris C, Karayiannis T G. Design of a thermoacoustic heat engine for low temperature waste heat recovery in food manufacturing:A thermoacoustic device for heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering,2014,65(1):588-596.
- [4] Zhao Yang, Yang Zhuo, Luo Ercang, et al. Travelling-wave thermoacoustic high-temperature heat pump for industrial waste heat recovery[J]. Energy,2014,77(1):397-402.
- [5] Zhao Yang, Chen Yanyan, Yu Guoyao, et al. Experimental investigation on a linear-compressor driven travelling-wave thermoacoustic heat pump[J]. Energy Procedia,2015,75:1844-1849. ■

(上接第160页)

获得进一步研究及取得技术上的突破,备份预留其他低焓热源的替代工程经验有待改善。

(3) 热声热机的应用领域目前相对还比较小,基础性的研究有待进一步深化,特别是工程实施经验的积累,相信随着其综合性能的提高,热声热机将会得到更加广泛地应用。

(4) 沼气发电余热利用加热方式作为热声发动机的驱动热源,实现沼气工程的热-电-声联产和分布式热-电-冷声的综合应用研究具有一定现实意义。

## 5 结论

热声发动机是利用热声效应,可实现热能到声功的转换,以压力波动的形式产出机械功。把热声发动机用于沼气厌氧发酵工艺加热中,突破了目前国内外只能将其应用在制冷、发电领域的限制;将热声发动机声能作为热泵的动力源,实现了热声制热,