

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-209-11

# 太阳能驱动沼气重整的 分布式供能系统热力性能研究

王异林<sup>1</sup> 苏博生<sup>1,2,3,4</sup> 方芳<sup>1</sup> 李晖<sup>1,2</sup> 张晓东<sup>1,2</sup> 何宏舟<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院 厦门 361021;

2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室 厦门 361021;

3. 福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心 厦门 361021;

4. 福建省海洋可再生能源装备高校重点实验室 厦门 361021)

**【摘要】** 沼气直燃利用存在因焓损失严重而造成其利用效率低的问题。太阳能热利用存在效率低、储热难、供热不稳定的问题。为了提高分布式供能系统中能源利用的转换效率以及沼气和太阳能的利用水平,提出了一种太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统,所聚集的高温太阳能用于重整反应的发生,在大幅提升燃料总热值的同时,还将大量太阳能的热能品位提升至合成气的化学能品位。模拟表明:设计工况下,相同的能量输入,该系统发电量比沼气冷热电联供系统和太阳能碟式斯特林发电系统多4.59%,碟式太阳能净发电效率可达32%。

**【关键词】** 化学回热; 沼气重整; 光热利用; 分布式联供

中图分类号 O414.1 文献标识码 A

## Study on Thermal Performance of Distributed Energy Supply System for Biogas Reforming Driven by Solar Energy

Wang Yilin<sup>1</sup> Su Bosheng<sup>1,2,3,4</sup> Fang Fang<sup>1</sup> Li Hui<sup>1,2</sup> Zhang Xiaodong<sup>1,2</sup> He Hongzhou<sup>1,2,3,4</sup>

(1.School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021;

2.Fujian Provincial Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen, 361021;

3.Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian Province, Xiamen, 361021;

4.Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Renewable Energy Equipment, Xiamen, 361021)

**【Abstract】** The utilization of direct combustion of biogas has the problem of low utilization efficiency due to the serious exergic loss. The utilization of solar heat has the problems of low efficiency, difficult heat storage and unstable heating. In order to improve the conversion efficiency of energy utilization and the utilization level of biogas and solar energy in distributed power supply system, this paper proposes a solar-powered methane reforming of the distributed power system, gathered by the high temperature solar energy used in the reforming reaction, the surge of the gross calorific value of fuel at the same time, will also be a large number of solar thermal energy grade up to the grade of the chemical energy of syngas. The simulation shows that under the design conditions, the power generation of the system is 4.59% more than that of biogas cogeneration system and solar disk Stirling

基金项目: 国家自然科学基金(52006089); 福建省自然科学基金(2020J05142); 福建省自然科学基金(2020J01694)

作者简介: 王异林(2002.10-), 男, 在读本科生, E-mail: yilinwang2022@126.com

通讯作者: 方芳(1977.12-), 女, 硕士, 讲师, E-mail: ansi@imu.edu.cn

收稿日期: 2021-08-06

power generation system under the same energy input, and the net power generation efficiency of solar disk can reach 32%.

**【Keywords】** chemical regeneration; biogas reforming; concentrated solar power; distributed energy supply

## 0 前言

鉴于化石能源短缺危机的威胁以及全球污染和气候变化的问题,能源行业正在经历巨大变化,通过增加化石能源消耗来满足能源需求的概念不可持续,利用可再生能源成为全球经济脱碳的主要策略,基于可再生能源的分布式能源系统被认为是一种有效的解决方案<sup>[1-3]</sup>。基于可再生能源的分布式能源系统不同于传统分布式能源系统的是,利用原本作为辅助燃料的可再生能源,替代化石能源作为主要燃料,摆脱了对化石能源的依赖,对环境更加友好。

在可再生能源中,生物质是最有前途的能源之一,因为其他可再生能源在正常运行模式下存在不能产生足够的热量(风力、光伏、水力),在当地受到太多限制(地热),不稳定(太阳能热)等问题<sup>[4]</sup>。沼气是由生物质厌氧发酵产生的一种可再生燃料,典型的沼气含有55%~75%的甲烷成分,除此之外还包含二氧化碳、饱和水蒸气、硫化氢等其他气体以及部分粉尘<sup>[5,6]</sup>,经过脱硫净化等工序后可作为基于可再生能源分布式能源系统的一种稳定燃料。我国生物质资源丰富,每年各种生物质可能资源化利用量高达 $3.26 \times 10^8 \text{ tce}$ <sup>[7]</sup>,同时生物质发酵技术也在不断进步,二者为我国沼气的生产提供了有利条件,沼气年产量从2015年的158亿立方米迅速发展发展到2020年的440亿立方米<sup>[8]</sup>,由此可见,沼气分布式能源系统在我国有很大的发展潜力。

沼气分布式冷热电联产系统,将沼气作为发电装置的燃料,发电装置的排气余热用于制冷和沼气池的保温。虽然沼气冷热电联产系统在一定程度上提高了沼气的利用率,但全年仍需大量化石燃料为沼气池的保温供热。太阳能是取之不尽用之不竭的清洁可再生能源,因此,利用太阳能为沼气池的保温提供热量具有节约化石燃料的巨大潜力。M R Darwesh<sup>[9]</sup>进行了太阳能作为沼气消化装置热源的实验研究,结果表明,当使用37℃、40℃和45℃三种设定温度时,太阳能对沼气生产(为牛粪溶液加热)的贡献率分别为75.21%、60%和53.58%。此外,将卧式和立式沼气池内的设定温度从37℃提高到45℃,其日平均沼气产量分别可以提高

87.12%和59.45%,目前的研究表明,太阳能已降低了61.28%的能耗。由此可见,将太阳能等清洁能源与沼气分布式能源互补利用具有减少化石燃料燃烧、改善环境等诸多潜力。

目前,生物质能与太阳能、风能等清洁可再生能源的互补利用备受关注。Bahram Ghorbani<sup>[10]</sup>设计并提出了一种基于沼气的混合工厂,用于同时生产生物甲烷、生物甲醇、生活热水和制冷。拟建的混合动力装置由沼气提质装置、生物甲醇合成装置、碱性电解装置、抛物面槽式太阳能集热装置、有机朗肯循环和氨水吸收制冷循环六个单元组成,这些操作单元集成在一起交换燃料和能量。生物甲烷在提质单元中产生,沼气提质单元也为生物甲醇合成提供所需的二氧化碳。此外,生物甲醇合成所需的氢气由碱性电解装置提供。抛物面槽式太阳能集热器系统提供驱动有机朗肯循环所需的热能,从而为所有运行单元提供所需的动力。拟建的工厂可生产128.4kgmole/h的生物甲醇(纯度为99.99%)和193.4kgmole/h的生物甲烷(纯度为99.65%)作为主要产品,以及2783kW的制冷量和241930kgmole/h的生活热水作为副产品。Ting Wu<sup>[11]</sup>提出了一种沼气-太阳能-风能互补的并网发电系统,以实现不同能源之间的转换,协同满足多种负荷需求。在此系统内,冷热电联产系统和电锅炉产生的热量可为厌氧消化产生沼气提供合适的温度,从而提高其效率。与天然气-风能-太阳能综合能源系统相比,拟议的综合能源系统可提供具有成本竞争力的解决方案,有更高的互补性。Lizhi Zhang等<sup>[12]</sup>进行了太阳能、生物质能的冷热电联供系统的集成优化设计,该系统由以沼气为燃料的内燃机和光伏板驱动,并以中国济南的一个小型农场为例,验证了所提出的RES-CCHP系统结构的可行性,其结果表明,优化设计的系统具有节能、减本和环境友好的优势,一次节能率、年总成本节约率和碳减排率分别为20.94%、11.73%和40.79%。虽然上述系统有很好的节能减本效果和环境效益,但沼气直接燃烧过程中化学能损失严重,这并不利于继续推进我国沼气高值化利用,且沼气和太阳能的互补利用依然局限于沼气和太阳能的单独利用

层面。因此仍需探索一种沼气与太阳能深度互补的高效利用技术。

针对上述问题, 本文提出一种太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统, 将沼气在直接燃烧前通过太阳能进行热化学升级, 实现沼气与太阳能之间的能质互补, 且对合成气与内燃机排气以“温度对口、梯级利用”为原则进行合理有效利用, 来实现沼气化学能与物理能的综合梯级利用。

本文第一节对所提出的新系统以及参比系统进行描述; 第二节建立数学模型以及选取系统评价准则; 第三节对系统进行仿真模拟, 并在设计点工况下对新系统和参比系统进行性能对比分析; 第四节分析关键参数对系统性能的影响; 最后, 在第五节对文章进行总结。

## 1 系统描述

### 1.1 新系统的概念设计

图 1 为太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统, 基于以下两个概念:

(1) 太阳能供热促进沼气热化学升级, 合理利用沼气的化学能, 提升太阳能的能量品位。

(2) 对合成气、内燃机缸套水和排出烟气的余热进行有效回收利用, 合理利用沼气的物理能。

表 1 所选内燃机相关参数

Table 1 Parameters of selected internal combustion engines

康达-GE 颜巴赫燃气发电机组												
发电机 组型号	电功率 kW	电效率 %	机械功率 kW	机械效率 %	总效率 %	频率 Hz	转速 rpm	燃气 类型	缸 数	缸径 mm	冲程 mm	NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup> ·N
J420GS	1413	42.1	1405	41.8	83.9	50	1500	生物 沼气	20	145	185	500

图 2 为太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统流程图, 系统运行时的具体流程为: 由汽化器产生的水蒸气和脱硫净化后的沼气在混合器里按比例混合, 混合后的气体通入预热器预热后, 通入重整反应器内发生重整反应, 由碟式太阳能集热器聚集的太阳能为其提供反应所需热量。生成的高温合成气先作为预热器的热源, 为沼气与水蒸气的混合气体的预热提供热量, 之后再作为省煤器的热源, 为水的一次加热提供热量。经过省煤器的合成气与空气一起通入内燃机进行燃烧做功。内燃机向外界供电, 发电余热分为两部分, 一部分储存在烟气中,

如图 1 所示, 新系统通过太阳能集热器为沼气和水蒸气的重整反应提供热量, 生成主要成分为 CO、H<sub>2</sub> 的燃料总热值更高的合成气。合成气通入内燃机燃烧发电, 内燃机的烟气余热一部分用于制冷, 一部分用于与合成气的余热一起产生水蒸气。制冷机排出的烟气余热用于和缸套水余热一起向外界供热。

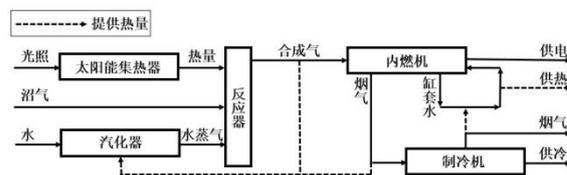


图 1 太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统思路图

Fig.1 Diagram of distributed energy supply system for solar powered biogas reforming

### 1.2 新系统描述

新系统由混合器、预热器、碟式太阳能集热器、重整反应器、省煤器、汽化器、储气罐、内燃机、制冷机、加热器和供热器组成。本系统制冷系统采用中温单效溴化锂吸收式制冷系统, 单效吸收式制冷机热源出口温度为 170℃<sup>[13]</sup>, COP 为 1.2<sup>[13]</sup>。内燃机选取颜巴赫 4 系列内燃机, 其参数<sup>[14]</sup>如表 1 所示。

一部分储存在内燃机的缸套水中。烟气余热先作为汽化器的热源, 对省煤器排出的水进行二次加热, 使之由液相变为稳定的气相。再在作为单效溴化锂吸收式制冷机的热源进行制冷, 制冷机排出的烟气再作为加热器的热源对缸套水进行加热, 最后排出系统。被加热后的缸套水通过供热器向外界供热。在整个流程中, 合成气的余热通过加热混合气和水进行梯级利用; 烟气余热通过加热水、制冷和加热缸套水进行梯级利用; 水到水蒸气通过合成气对其一次加热、烟气对其二次加热实现。

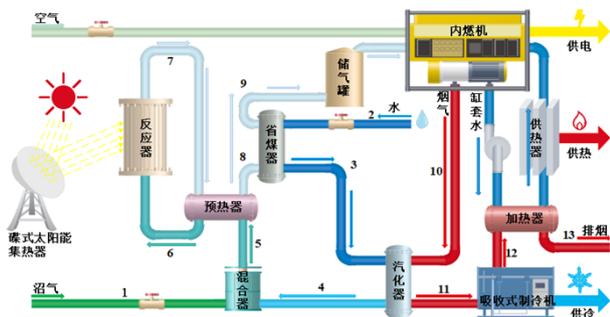


图 2 太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统流程图

Fig.2 Flow chart of distributed power supply system for solar powered biogas reforming

### 1.3 参比系统描述

#### 1.3.1 参比系统—沼气驱动内燃机的冷热电联供系统

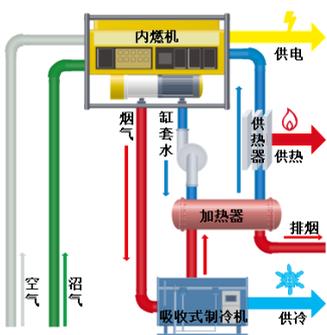


图 3 沼气驱动内燃机的冷热电联供系统流程图

Fig.3 Flow chart of the cooling, heating and power supply system of the internal combustion engine driven by methane

如图 3 所示，在沼气驱动内燃机的冷热电联供系统中，脱硫净化后的沼气和空气一起通入内燃机燃烧做功，内燃机向外界供电，发电机余热储存在烟气和缸套水中。内燃机排烟先作为单效溴化锂吸收式制冷机的热源进行制冷，之后再作为加热器的热源加热缸套水，然后排出系统。缸套水在供热器里放热降温，为外界供热，再进入内燃机循环。

新系统与沼气驱动内燃机的冷热电联供系统相比，具有以下两个特点：

(1) 新系统将沼气在燃烧前进行热化学升级，合理利用沼气化学能，并对合成气的余热进行有效利用。

(2) 沼气驱动内燃机的冷热电联供系统，内燃机排烟温度与单效溴化锂制冷机制冷所需热源温度相差较大，出现温度断层，对烟气余热利用不

合理。新系统则利用断层温度生产水蒸气，对烟气余热的利用更加合理有效。

#### 1.3.2 参比系统—太阳能碟式斯特林发电系统

碟式斯特林太阳能热发电系统的基本工作原理是，利用系统从高温热源吸收的热量，膨胀做功，向低温热源放热并收缩，再次从热源吸收热量，循环上述过程，最终产生源源不断的热能，在每次循环过程中，工质吸收的热能转化为机械能，而工质做功过程中通过活塞的往复运动又带动发电机进一步将机械能转化为电能<sup>[15]</sup>。在该系统流程中，太阳能经过碟式太阳能集热器转化为热能，输送给斯特林发动机；斯特林发动机将热能转化为机械能输送给发电机；发电机将机械能转化为电能输送到外界。

新系统与太阳能碟式斯特林发电系统相比的特点：太阳能碟式斯特林发电系统利用太阳能直接发电，而新系统利用太阳能间接发电，太阳能先通过为重整反应提供热量转化为合成气的化学能，再通过内燃机发电，太阳能转化为化学能的过程中，实现了太阳能能量品位的提升。

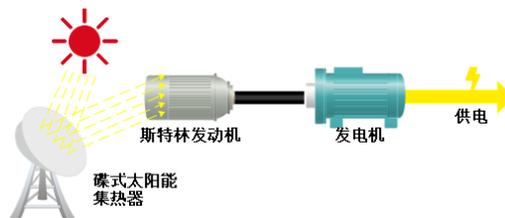


图 4 太阳能碟式斯特林发电系统流程图

Fig.4 Flow chart of solar disk Stirling power generation system

## 2 数学模型建立及评价准则

### 2.1 系统数学模型建立

本系统采用 Aspen Plus<sup>[16]</sup>软件对系统模型进行仿真模拟，利用软件模块对预热器、反应器、省煤器和加热器等装置在额定条件下进行模拟。化学反应过程通过 RGIBBS 反应器模块进行模拟<sup>[17]</sup>，基于严格的化学平衡，并采用 RK-SOAVE 方程的物性方法。为简化模拟过程，忽略工质在系统设备和管路中的压降，且假设所有工质在系统中无泄漏且在管路系统与外界没有热量交换<sup>[18]</sup>。表 2 归纳了系统模拟过程中相关参数的选取情况。其中，对于内燃机，通过冷却系统带走的热量品位较低，输

出缸套水温度约为 80℃~100℃, 内燃机排气温度一般为 400℃~600℃<sup>[19]</sup>, 根据何晓红<sup>[20]</sup>整理的内燃机排气温度随额定功率以及气缸数的分布情况与不同厂家燃气内燃机冷却水出口温度随额定功率的分布情况, 内燃机排烟温度可定为 500℃, 冷却水出口温度可定为 90℃。重整反应合理有效的反应温度大约在 550℃~900℃<sup>[18]</sup>, 重整反应温度可定为 750℃。碟式斯特林发电系统的额定(峰值)发电效率为 20%~32%<sup>[21-23]</sup>, 本文选取其发电效率中值, 为 26%。太阳能通过碟式集热器集热为重整反应提供热量, 重整反应的温度设为 750℃, 根据苏博士<sup>[18]</sup>建立及验证后的碟式太阳能集热器数学模型以及总结出的特性规律, 当反应温度为 750℃时碟式太阳能集热器的集热效率可定为 0.805。

表 2 系统整体模拟参数选取

Table 2 Selection of overall simulation parameters of the system

模块	项目	参数
空气	O <sub>2</sub> 含量	21% <sup>[24]</sup>
	N <sub>2</sub> 含量	79% <sup>[24]</sup>
沼气	CH <sub>4</sub> 含量	60% <sup>[25]</sup>
	CO <sub>2</sub> 含量	40% <sup>[25]</sup>
	过量空气系数	1.2 <sup>[13]</sup>
内燃机	缸套水可用热量	输入燃料热值的 17% <sup>[26]</sup>
	排烟温度	500℃
	冷却水出口温度	90℃
系统排烟	温度	90℃ <sup>[25,27]</sup>
	反应温度	750℃
重整反应器	反应压力	1.01bar
	水碳比	1
气气	最小换热温差	20℃ <sup>[28]</sup>
	气液	最小换热温差
汽化器	出口蒸汽温度	180℃
碟式斯特林发电系统	发电效率	26%

## 2.2 系统评价准则

### 2.2.1 能量利用率

本系统通过太阳能在沼气直接燃烧前对其进行热化学升级, 避免了沼气直接燃烧造成的巨大热损失, 且本系统根据内燃机所排烟气与重整反应生成的高温合成气的温度, 和系统运行及生产冷、热、电热源温度要求, 实现了能量合理有效的梯级利用。

根据热力学第一定律, 不考虑热、电两种产品在品位上的差别, 只是单纯利用数量关系计算, 定义系统能量利用率  $\eta_q$  为:

$$\eta_q = \frac{Q_e + Q_c + Q_h}{Q_{b,in} + Q_{rad,in} + Q_{c,in}} \quad (1)$$

其中,  $Q$  表示能量, kW; 下标“e”表示发电; “c”表示制冷; “h”表示供热; “b,in”表示输入的沼气; “rad,in”表示入射到碟式太阳能集热器上的总太阳能,  $Q_{rad,in} = (Q_{sol,in}/\eta_{sol})$ ,  $Q_{sol,in}$  表示输入到系统中的太阳能,  $\eta_{sol}$  为碟式太阳能集热器的集热效率; “c,in”表示单效溴化锂吸收式制冷机从外界环境吸收的热量。

### 2.2.2 太阳能净发电效率

为了说明新系统中太阳能热贡献的相对发电性能, 定义太阳能对电能的净效率<sup>[29,30]</sup>,  $\eta_{sol}$  为:

$$\eta_{sol} = \frac{W_{new} - W_{ref,CCHP}}{Q_{rad,in}} \quad (2)$$

其中,  $W_{new}$  为新系统发电量;  $W_{ref,CCHP}$  为参比系统—沼气驱动内燃机的冷热电联供系统的发电量;  $Q_{rad,in}$  为入射到碟式太阳能集热器上的总太阳能。

### 2.2.3 焓效率

由于本系统有多种不同形式能量的输入和输出, 所以定义等效系统焓效率来评价新系统的性能, 定义系统焓效率<sup>[24]</sup> $\eta_{ex}$  为:

$$\eta_{ex} = \frac{E_c + E_h + W}{E_f + E_{sol}} \quad (3)$$

其中,  $E$  表示焓;  $E_c = Q_c (T_a/T_c - 1)$ ,  $T_a$  表示环境温度,  $T_c$  表示吸收式制冷机的蒸发温度, 通常为 5℃;  $E_h = Q_h (1 - T_a/T_h)$ ,  $T_h$  表示供热温度;  $W$  表示系统发电量;  $E_f$  为沼气的焓值, 甲烷的焓值近似 1.04LHV (甲烷的低位热值), 所以可以认为系统中沼气 (甲烷占比 60%, 二氧化碳占比 40%) 的焓值也近似 1.04LHV (沼气的低位热值);  $E_{sol}$  表示太阳热焓, 用碟式太阳能集热器集热温度  $T_{sol}$  与环境温度  $T_a$  之间最大可用功来计算, 在  $T_{sol}$  温度下的太阳热焓  $E_{sol} = Q_{sol} (1 - T_a/T_{sol})$ 。

### 2.2.4 化石能源节约率

由于本系统输入端和输出端有多种不同形式的能量, 因此, 可以通过保证新系统和参比系统输

入的沼气与太阳能的量一致,对比输出端的差异来体现新系统的性能优势。而输出端有冷、热、电三种能量形式,可以将这三种能量形式折算成一种能量形式,便于新系统与参比系统比较。通过将分布式供能系统与现有分产系统比较,可得到分布式供能系统的节能率,节能率越高表示系统性能越好。在本文中,分别将新系统和参比系统中的输出端折算为用分产系统生产时所消耗的能量  $Q_{pes}$ , 如式所示<sup>[31]</sup>:

$$Q_{pes,new} = \frac{Q_{e,new}}{\eta_e} + \frac{Q_{c,new}}{COP_e} + \frac{Q_{h,new}}{\eta_h} \quad (4)$$

$$Q_{pes,ref} = \frac{Q_{e,ref}}{\eta_e} + \frac{Q_{c,ref}}{COP_e} + \frac{Q_{h,ref}}{\eta_h} \quad (5)$$

其中,  $Q_e$  表示系统发电量;  $Q_c$  表示系统制冷量;  $Q_h$  表示系统供热量。下标 “new” 表示新系统,

“ref” 表示参比系统。根据国标 “GB / T33757.1-2017”, 产电的分产系统为燃煤电站,  $\eta_e$  为燃煤电站发电效率, 取 0.35; 供热的分产系统为天然气锅炉,  $\eta_h$  为锅炉的供热效率, 取 0.8<sup>[18]</sup>。制冷的分产系统为电制冷机,  $COP_e$  为电制冷机平均性能系数, 取 5.0<sup>[32]</sup>。新系统与参比系统的  $Q_{pes}$  差别越大, 表示新系统节约化石燃料的能力越大, 定义化石燃料节约率  $\eta_{ffes}$  为:

$$\eta_{ffes} = \frac{Q_{pes,new} - Q_{pes,ref}}{Q_{pes,ref}} \quad (6)$$

### 3 系统仿真模拟

#### 3.1 设计点工况模拟

表 3 给出了在表 2 给出的参数设定下各关键点状态参数。

表 3 设计点关键流股状态参数表

Table 3 Key flow strand state parameters at design points

流股	温度 ℃	压力 bar	流量 kg/s	摩尔分率						
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	25.0	1.01	0.141	0.40	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	25.0	1.01	0.093	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	99.9	1.01	0.093	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	180.0	1.01	0.093	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	98.7	1.01	0.234	0.20	0.30	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
6	730.8	1.01	0.234	0.20	0.30	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
7	750.0	1.01	0.234	0.09	0.00	0.16	0.22	0.52	0.00	0.00
8	207.0	1.01	0.234	0.09	0.00	0.16	0.22	0.52	0.00	0.00
9	142.6	1.01	0.234	0.09	0.00	0.16	0.22	0.52	0.00	0.00
10	500.0	1.01	1.256	0.11	0.00	0.25	0.00	0.00	0.61	0.03
11	349.6	1.01	1.256	0.11	0.00	0.25	0.00	0.00	0.61	0.03
12	170.0	1.01	1.256	0.11	0.00	0.25	0.00	0.00	0.61	0.03
13	90.0	1.01	1.256	0.11	0.00	0.25	0.00	0.00	0.61	0.03
AIR	25.0	1.01	1.022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.21

表 3 中的各关键点与图 2 太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统的具体流程图上的关键点一一对应。如图 5 所示, 内燃机所排烟气温度为 500℃ (对应流股 10), 烟气余热首先用于对水进行二次加热, 在汽化器内释放 238.2kW 的热量使水汽化为稳定的水蒸气, 此时, 烟气温度降为 349.6℃ (对应流股 11); 之后烟气余热作为单效溴化锂吸

收式制冷机的热源, 在单效溴化锂制冷机中释放 271.9kW 的热量用于制冷, 此时, 烟气温度降为 170℃ (对应流股 12); 然后烟气余热作为加热器的热源, 在加热器中释放 117.3kW 的热量用于加热缸套水, 此时, 烟气温度降为 90℃ (对应流股 13); 最后, 烟气用于其他 (本研究不涉及) 或者直接排向外界。太阳能为重整反应提供反应热, 反

应过程吸收 716kW 的热量, 反应后生成的主要成分为 CO 和 H<sub>2</sub> 的合成气, 温度为 750℃ (对应流股 7), 合成气的余热先作为预热器的热源预热水蒸气和沼气的混合气, 在预热器内释放 298.4kW 的热量, 使混合气的温度升高到 730.8℃ (对应流股 6), 此时合成气温度降为 207℃ (对应流股 8); 然后合成气余热作为省煤器的热源, 在省煤器中释放 33.4kW 的热量对水进行一次加热, 水的温度升为

99.9℃ (对应流股 3), 合成气温度降为 142.6℃ (对应流股 9); 最后, 合成气通入内燃机燃烧做功。水转化为稳定的水蒸气一共经过两次加热, 第一次是在省煤器中吸收合成气余热, 温度升为 99.9℃ (对应流股 3); 第二次加热 2 是在汽化器中吸收内燃机排烟的余热, 温度升为 180℃ (对应流股 4)。

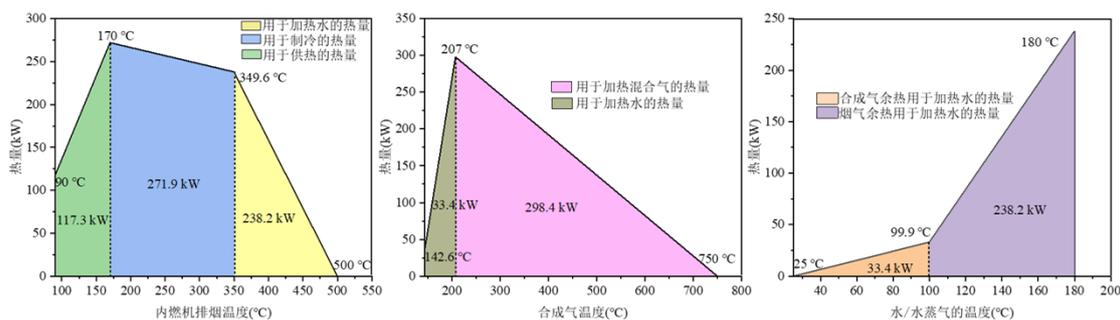


图 5 内燃机、合成气、水的温度变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of temperature change of internal combustion engine, syngas and water

### 3.2 新系统与参比系统性能对比分析

表 4 为新系统和参比系统在设计点工况下的性能参数对比。在新系统和参比系统中, 假设两个系统沼气输入量为每日 10000 立方米, 两系统输入沼气的能量相同, 均为 2490.53kW; 新系统水碳比为 1; 输入的太阳热能相同, 均为 715.77kW。此外, 在模拟计算中, 单效溴化锂吸收式制冷机的性能系数 COP 为 1.2, 由于制冷机中的吸收器和冷凝器都与外界环境存在热交换, 根据制冷机的能量守恒, 可以计算出在新系统中环境向吸收式制冷机输入能量 65.28kW, 在参比系统中环境向吸收式制冷机输入能量 93.32kW。

在新系统中, 沼气总热值 (2490.53kW) 通过热化学互补提升至合成气总热值 (3139.48kW), 在沼气进行热化学升级的过程中燃料总热值提升了 648.86kW, 相当于输入系统的 715.77kW 的太阳热能中, 648.86kW (90.70%) 通过沼气重整反应转化为合成气的化学能。在生产电能方面, 新系统生产的电能为 1321.72kW, 而参比系统生产的电能为 1279.74kW, 其中, 沼气驱动内燃机的冷热电联供系统生产 1048.56kW, 太阳能碟式斯特林发电系统生产 231.18kW, 相比之下新系统多生产 41.98kW (3.28%)。在生产冷能方面, 新系统生产 326.40kW, 参比系统生产 466.58kW, 虽然在新系

统中内燃机排出的烟气可用余热多余参比系统, 但新系统的烟气余热先用于水的汽化, 再进行制冷, 使得烟气余热中可用于制冷的热量减少, 导致新系统的产冷量小于参比系统。在生产热能方面, 新系统生产的热能为 650.89kW, 参比系统生产的热能为 513.64kW。因为新系统通过太阳能对沼气进行热化学升级, 太阳能先转化为合成气的化学能, 当合成气在内燃机中燃烧做功时, 太阳能转移到内燃机的排烟和缸套水中, 且被烟气加热后缸套水作为供热的热源, 因此使得新系统产热量相较于参比系统增加了 137.25kW (26.72%)。在能量利用率方面, 新系统为 66.73%, 相较于参比系统 65.07% 提升了 1.66 个百分点, 说明新系统沼气和太阳能利用更加充分。在烟效率方面, 新系统为 44.87%, 相较于参比系统 43.81% 提升了 1.06 个百分点, 说明新系统沼气和太阳能利用更加有效。在太阳能净发电效率方面, 由于太阳能在沼气热化学升级过程中转变为合成气的化学能, 提升了太阳能的能量品位, 所以新系统太阳能净发电效率 30.72% 相较于太阳能碟式斯特林发电系统额定发电效率中值 26% 提高了 4.72 个百分点。在化石燃料节约率方面, 若利用分产系统分别生产等量的电、冷、热, 新系统可以替代 4655.24kW 的化石燃料, 参比系统可以替代 4391.77kW 的化石燃料, 最终, 新系统较参

比系统节省化石燃料 263.47kW，化石燃料节约率为 5.99%。

表 4 设计点新系统与参比系统的性能参数表

Table 4 Performance parameters of the new system and the reference system at design point

参数	新系统	参比系统	
		沼气三联供	碟式斯特林发电
沼气输入量 (Nm <sup>3</sup> /day)	10000	10000	0
沼气低位热值 (kW)	2490.63		2490.63
太阳能入射量 (kW)	889.15	0	889.15
发电量 (kW)	1321.72	1048.56	231.18
			1279.74
制冷量 (kW)	326.40	466.58	0
供热量 (kW)	650.89	513.64	0
能量利用率 (%)	66.73		65.07
太阳能净发电效率 (%)	30.72		26.00
棚效率 (%)	44.87		43.81
化石燃料节约率 (%)		5.99	

#### 4 系统性能分析

在新系统中，重整器里的水碳比与重整反应温度是两个对系统性能影响较大的参数。因此，以水碳比和重整反应温度为自变量对系统进行性能分析及特性规律研究。在根据以下分析总结设定系统水碳比和重整反应温度时，可依据基于水碳比的沼气重整过程积碳特性分析图<sup>[18]</sup>，避免实际水碳比落入积碳区。

##### 4.1 能量利用率

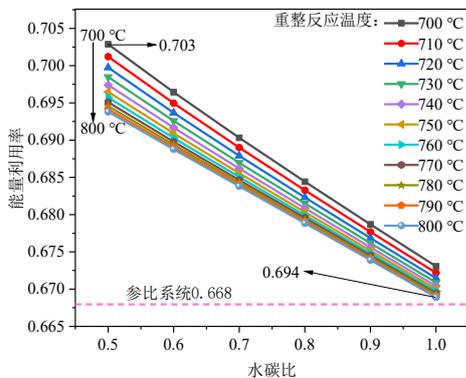


图 6 系统能量利用率随水碳比及重整反应温度的变化图  
Fig.6 The energy utilization rate of the system changes with the ratio of water to carbon and reforming reaction temperature

图 6 为系统能量利用率随水碳比及重整反应温度的变化图，从图中可得：（1）系统水碳比越

小，系统能量利用率越高，同时，系统能量利用率还随着重整反应温度的降低而升高。因此，可以通过适当调小系统水碳比以及降低重整反应温度来实现系统能量利用率的一定提升。（2）新系统能量利用率的范围是 69.4%~70.3%，相较于参比系统（66.8%）可以提升 2.6~3.5 个百分点，因此，新系统能量利用更为充分。

##### 4.2 太阳能净发电效率

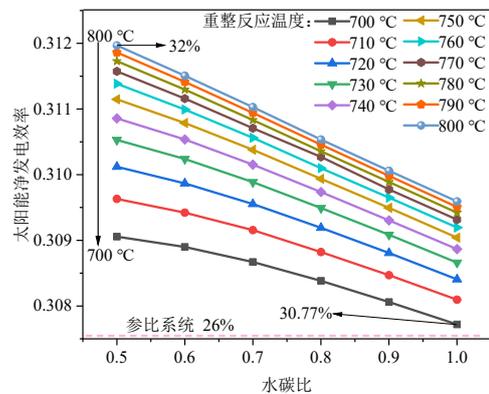


图 7 太阳能净发电效率随水碳比及重整反应温度的变化图  
Fig.7 Changes of solar net power generation efficiency with water/carbon ratio and reforming reaction temperature

图 7 为太阳能净发电效率随水碳比及重整反应温度的变化图。从图中可得：（1）系统水碳比越小，碟式太阳能净发电效率越大，同时，碟式太

太阳能净发电效率还随重整反应温度(碟式太阳能集热器集热温度)的升高而升高。因此,可以通过适当调小系统水碳比以及提高重整反应温度来实现碟式太阳能净发电效率的一定提升。(2)新系统碟式太阳能净发电效率的范围是 30.77%~32%,相较于参比系统(26%,碟式斯特林发电系统的额定峰值发电效率中值)可以提升 4.77~6 个百分点。且新系统碟式太阳能净发电效率的值均处于碟式斯特林发电系统的额定峰值发电效率范围(20%~32%)的高水平值,因此,新系统在提升太阳能净发电效率方面具有很好的优势。

### 4.3 焓效率

图 8 为系统焓效率随水碳比及重整反应温度的变化图。从图中可得:(1)系统水碳比越小,焓效率越大,同时,系统焓效率还随着重整反应温度的升高而增大。因此,可以通过适当调小系统水碳比以及升高重整反应温度来实现系统焓效率的一定提升。(2)新系统焓效率的范围是 44.79%~45.34%,相较于参比系统(43.81%)可以提升 0.98~1.53 个百分点,说明新系统可以有效提升系统可用能的利用效率。

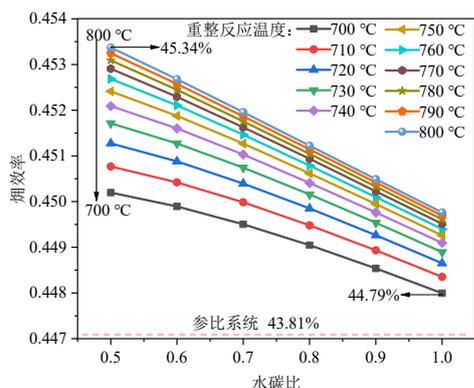


图 8 系统焓效率随水碳比及重整反应温度的变化图

Fig.8 Changes of system exergy efficiency with water-carbon ratio and reforming reaction temperature

### 4.4 化石燃料节约率

图 9 为系统化石燃料节约率随水碳比及重整反应温度的变化图。从图中可得:(1)系统水碳比越低,可达到的化石燃料节约率越高,在水碳比一定的情况下,化石燃料节约率随重整反应的升高而增大。因此,可通过适当调节系统水碳比和重整反应温度来实现化石燃料节约率的一定提升。(2)从 700 °C 到 800 °C,化石燃料节约率曲线间的间距

越来越小,所以对于某一固定水碳比,选择合适的重整温度可使化石燃料节约率达到最优值。(3)随着水碳比的降低,最佳化石燃料节约率对应的重整反应温度逐渐增大。

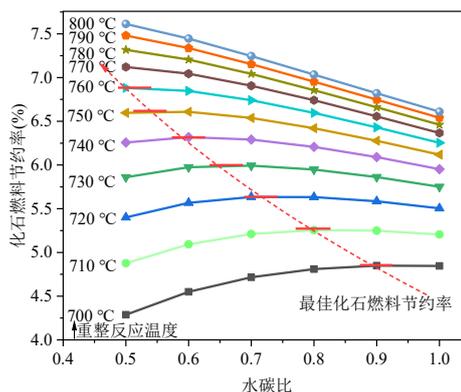


图 9 系统化石燃料节约率随水碳比及重整反应温度的变化图

Fig.9 Changes of fossil fuel saving rate with water/carbon ratio and reforming reaction temperature

## 5 结论

本文提出了一种太阳能驱动沼气重整的分布式供能系统,首先对系统进行数学建模,并运用软件 Aspen Plus 进行仿真模拟,将所提出的新系统与沼气驱动内燃机的冷热电联供系统以及太阳能碟式斯特林发电系统进行热力性能对比,并对其差异性进行分析,得出如下结论:

(1)通过太阳能驱动沼气重整,使之转化为燃料总热值更高的合成气,进而提升系统的产电量。在设计点工况下,新系统产电增加率可达 1.19%~4.59%。且通过对合成气余热以及内燃机排烟余热的合理有效利用,系统能量利用率可提升 2.6~3.5 个百分点。

(2)通过太阳能驱动沼气重整,使太阳能的热能品位在重整反应过程中提升至合成气的化学能品位,进而提升碟式太阳能的净发电效率,可达 30.77%~32%。同时,新系统的焓效率提升了 0.98~1.53 个百分点。

(3)通过沼气与太阳能的有效热化学互补,提升了分布式供能系统中能源利用的转换效率,并节约了短缺的化石能源。新系统化石燃料节约率可达 4.29%~7.61%。

## 参考文献:

- [1] I Abdin, Y F Li, E Zio. Risk assessment of power transmission network failures in a uniform pricing electricity market environment[J]. *Energy*, 2017,138: 1042-1055.
- [2] N Meng, T Li, J Wang, et al. Synergetic cascade-evaporation mechanism of a novel building distributed energy supply system with cogeneration and temperature and humidity independent control characteristics[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,209.
- [3] H Li, S Zhong, Y Wang, et al. New understanding on information's role in the matching of supply and demand of distributed energy system[J]. *Energy*, 2020,206.
- [4] M Wegener, A Malmquist, A Isalgué, et al. Biomass-fired combined cooling, heating and power for small scale applications—A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,96:392-410.
- [5] VP Rathod, J Shete, PV Bhale. Experimental investigation on biogas reforming to hydrogen rich syngas production using solar energy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016,41:132-138.
- [6] 谢泓丘. 基于西门子 S7-1500PLC 沼气净化控制系统的设计与实现[D]. 四川:西南科技大学,2019.
- [7] S Si, M Linwei, K Geng, et al. Development Strategy of Biomass Economy in China[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2021,23.
- [8] 汪玲.ZQN 公司大中型沼气项目商业模式研究[D]. 山东:青岛科技大学,2020.
- [9] MR Darwesh, MS Ghoname. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units[J]. *Energy Reports*, 2021,7:1657-1671.
- [10] B Ghorbani, M Mehrpooya, F Karimian Bahnamiri. An integrated structure of bio-methane/bio-methanol cogeneration composed of biogas upgrading process and alkaline electrolysis unit coupled with parabolic trough solar collectors system[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020,46.
- [11] T Wu, S Bu, X Wei, et al. Multitasking multi-objective operation optimization of integrated energy system considering biogas-solar-wind renewables[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021,229.
- [12] L Zhang, F Li, B Sun, et al. Integrated Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Coupled with Solar and Biomass Energy[J]. *Energies*, 2019,12.
- [13] M Di Somma, B Yan, N Bianco, et al. Operation optimization of a distributed energy system considering energy costs and exergy efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015,103:739-751.
- [14] earnest0me[EB/OL]. 百度文库. 2015-10-21, <https://wenku.baidu.com/view/9f725346a58da0116c1749ff.html>.
- [15] 赵小平. 碟式斯特林太阳能小型直流发电系统的研究[J]. *电子测试*, 2021,7:106-108.
- [16] Aspen Plus. Aspen technology, version 8.2[EB/OL]. <http://www.aspentech.com/>.
- [17] 李建伟,陈冲,张三莉. 基于 Aspen Plus 的甲烷三重整热力学模拟[J]. *石油与天然气化工*, 2015,44(6):55-59.
- [18] 苏博生. 沼气与太阳能热化学互补机理及系统集成研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
- [19] X HE, R CAI. Typical off-design analytical performances of internal combustion engine cogeneration[J]. *中国高等学校学术文摘·能源与动力工程*, 2009,3(2):184-192.
- [20] 何晓红. 内燃机热电联产系统的变工况特性研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2008.
- [21] I Purohit, P Purohit. Technical and economic potential of concentrating solar thermal power generation in India[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017,78:648-667.
- [22] L S Mendoza Castellanos, G E Carrillo Caballero, V R Melian Cobas, et al. Mathematical modeling of the geometrical sizing and thermal performance of a Dish/Stirling system for power generation[J]. *Renewable Energy*, 2017,107:23-35.
- [23] Weinstein LA, Loomis J, Bhatia B, et al. Concentrating Solar Power[J]. *Chemical Reviews*, 2015,115(23): 12797-12838.
- [24] N Zhang, Z Wang, N Lior, et al. Advancement of distributed energy methods by a novel high efficiency solar-assisted combined cooling, heating and power system[J]. *Applied Energy*, 2018,219:179-186.
- [25] Z Wang, W Han, N Zhang. Analysis of inlet air

- throttling operation method for gas turbine in performance of CCHP system under different operation strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,171:298-306.
- [26] J Wang, T Mao, J Sui, et al. Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas[J]. *Energy*, 2015,93:801-815.
- [27] Z Wang, W Han, N Zhang, et al. Assessment of off-design performance of a combined cooling, heating and power system using exergoeconomic analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,171:188-195.
- [28] 罗尘丁,赵福强,周杰,等. 高温气冷堆氦气/氨水联合循环热力性能分析[J].*核动力工程*,2014,35(1):165-169.
- [29] N Zhang, N Lior, C Luo. Use of Low/Mid-Temperature Solar Heat for Thermochemical Upgrading of Energy, Part II: A Novel Zero-Emissions Design (ZE-SOLRGT) of the Solar Chemically-Recuperated Gas-Turbine Power Generation System (SOLRGT) guided by its Exergy Analysis[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012,134.
- [30] J H H Hui, S Jun, J Jun. Mechanism of upgrading low-grade solar thermal energy and experimental validation[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008,130(2):21014-1-21014-8-0.
- [31] 徐聪,刘泰秀,隋军,等. 多能源热互补分布式能源系统的节能率评价方法[J]. *电力系统自动化*,2018,(4):151-157.
- [32] 陈卉,刘颖,赵龙生. 楼宇型天然气分布式能源系统的典型案例分析[J].*南方能源建设*,2021,(1):25-30.

(上接第 208 页)

- [2] Zhiqiang Kang, Xinying Peng, Xiaocong Cheng, et al. Analysis of Condensation and Thermal Comfort of Two Kinds of Compound Radiant Cooling Air Conditioning Systems Based on Displacement Ventilation[J]. *Procedia Engineering*, 2017,205:1529-1534.
- [3] Moon Keun Kim, Jiying Liu, Shi-Jie Cao. Energy analysis of a hybrid radiant cooling system under hot and humid climates: A case study at Shanghai in China[J]. *Building and Environment*, 2018,137:208-214.
- [4] 袁玉洁,隋学敏,侯博. 辐射供冷空调防结露机理及相关技术分析[J].*建筑热能通风空调*,2016,35(4):51-55.
- [5] YL Yin, RZ Wang, XQ Zhai, et al. Experimental investigation on the heat transfer performance and water condensation phenomenon of radiant cooling panels[J]. *Building and Environment*, 2014,71:15-23.
- [6] 张秋艳,李永安,刘学来. 绿色建筑视野下辐射冷量计算方法[J].*低温建筑技术*,2012,34(9):122-123.
- [7] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012:119-120.