

# 生物质气化系统的焓值分析

张晓燕<sup>1,2</sup>, 杨晴<sup>1,2\*</sup>, 李佳硕<sup>1,2</sup>, 魏智宇<sup>1,2</sup>, 杨海平<sup>1</sup>, 陈汉平<sup>1</sup> (1. 华中科技大学能源与动力工程学院煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院新能源科学与工程系, 湖北武汉 430074)

**摘要** 基于生态热力学的最新进展, 首次采用焓值理论方法研究生物质气化系统。以江苏盐城某 20 MW 生物质气化燃气-蒸汽联合循环发电工程为研究案例, 采用焓值分析理论对其生态环境效益进行综合评价, 并计算了系统的焓值评价指标, 与风力发电系统、太阳能热力发电系统、玉米酒精生产系统和沼气综合利用系统这几个典型的可再生能源转化利用系统进行对比分析。结果表明, 生物质气化系统的焓值总输入为  $1.04E+15$  Jc/a, 焓值转换率为  $2.64$  Jc/J。人力劳务是生物质气化系统焓值投入的主要部分, 占总焓值投入的 86.04%。生物质气化系统与其他可再生能源系统类似, 都主要依赖于外购的资源, 但对可再生资源的利用较高, 具有较好的发展持续性和生态环境效益。

**关键词** 生物质气化; 焓值分析; 生态环境效益; 可持续发展

**中图分类号** S216 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)17-0184-06

## Exergy Analysis of A Biomass Gasification System

ZHANG Xiao-yan<sup>1,2</sup>, YANG Qing<sup>1,2\*</sup>, LI Jia-shuo<sup>1,2</sup> et al (1. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074; 2. Department of New Energy Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074)

**Abstract** Based on the latest progress of ecological thermodynamics, the exergy theory was firstly used to study biomass gasification system. With a 20 MW biomass gasification gas - steam combined cycle power generation project in Yancheng City, Jiangsu Province as study case, the ecological environment benefits was comprehensively analyzed. The exergy-based indicators of the biomass gasification system was calculated and compared with other renewable exergy conversion systems including wind power generation system, solar thermal power generation system, corn-ethanol production system and biogas system. The results showed that the total exergy inputs of the biomass gasification system is calculated to be  $1.04E+15$  Jc/a, and exergy conversion rate is  $2.64$  Jc/J. Labor inputs are the main contributor to total exergy inputs, taking up 86.04%. Similar to other renewable exergy conversion systems, biomass gasification system is mainly supported by exergy purchased from outside. But it has advantages in sustainable development and eco-environmental benefits.

**Key words** Biomass gasification; Exergy analysis; Eco-environmental benefits; Sustainable development

我国作为一个农业大国, 生物质资源丰富, 大力发展清洁、高效的生物质能转化技术对于我国应对气候变化和实现低碳化能源发展道路具有重要意义<sup>[1]</sup>。作为一种重要的生物质能热转化利用方式, 生物质气化是在气化剂存在的条件下, 将组成生物质的碳氢化合物转化为可燃气体的过程<sup>[2-4]</sup>, 生成的可燃气体既可进一步加工合成一些基础的化工原料, 还可以直接作为燃料进行燃烧或发电<sup>[5-7]</sup>。

生物质能虽然是可再生能源, 但现阶段其在转化利用的过程中会不可避免地消耗化石能源, 给环境和生态带来一定的影响。国内外很多学者对生物质能利用技术的全生命周期环境影响进行分析研究, 多集中在能源消耗强度和温室气体排放核算这两方面<sup>[8-15]</sup>。在系统生态学研究方面, 能值理论和方法将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为统一标准的太阳能值, 可以从复合系统角度对给定能源系统的环境负担、可持续性、生态友好性等方面进行定量分析和评价<sup>[16-17]</sup>。杨晴<sup>[18]</sup>、韩菲等<sup>[19]</sup>与罗玉和等<sup>[20-21]</sup>对燃料乙醇生产系统、生物质热解多联产系统以及生物质气化发电系统进行能值分析, 并计算了其能值评价指标; 李欣等<sup>[22]</sup>对 2 种秸秆能源利用方式进行了能值分析和对比评价。然而能值理论基于热力学第一定律, 无法从根本上

消除重复计算的问题<sup>[23]</sup>, 而且在能值转化率的计算、反映经济社会发展需求等方面也受到一些学者的质疑<sup>[24-27]</sup>。

焓值分析是基于热力学第二定律的系统分析方法, 其在能值分析的理论框架上进行了提升, 从源头克服了能值分析重复计算的问题, 由北京大学陈国谦教授首次提出<sup>[23]</sup>, 并应用到我国农业生态经济系统的评估<sup>[28]</sup>、国民经济的生态要素核算<sup>[29]</sup>、水质的测定<sup>[30]</sup>及湿地的生态评估<sup>[31]</sup>等方面。此外, 姜味茗<sup>[32]</sup>采用焓值理论研究城市系统演化机理, 对我国典型城市资源消耗进行了历史核算和预测; 季曦<sup>[25]</sup>以北京为案例, 将基于焓值理论的网络核算、系统生态模拟和调控应用于实际的城市生态系统分析和生态系统的管理。在对具体的生态系统的分析研究中, 杨晴<sup>[18]</sup>在其博士论文中尝试将焓值分析引入到具体的能源系统研究中去, 以分析具体能源系统生态代价和负担; Wu 等<sup>[33]</sup>和 Ling Shao 等<sup>[27]</sup>采用体现宇宙焓分析的方法, 分别对我国的一个沼气系统和人工湿地污水处理系统进行了可再生性评估。但目前对生物质气化系统的焓值方面的分析研究尚少见。

为了从系统生态学角度客观评估生物质气化系统的综合生态环境效益, 笔者以江苏盐城的某 20 MW 生物质气化燃气-蒸汽联合循环发电工程为研究案例, 采用焓值分析理论对生物质气化系统进行分析研究。

## 1 研究案例与方法

**1.1 生物质气化系统概况** 该试验所研究的 20 MW 生物质气化燃气-蒸汽联合循环发电工程位于江苏省盐城市所属的建湖县境内, 该地区生物质资源丰富, 有大量农林废弃

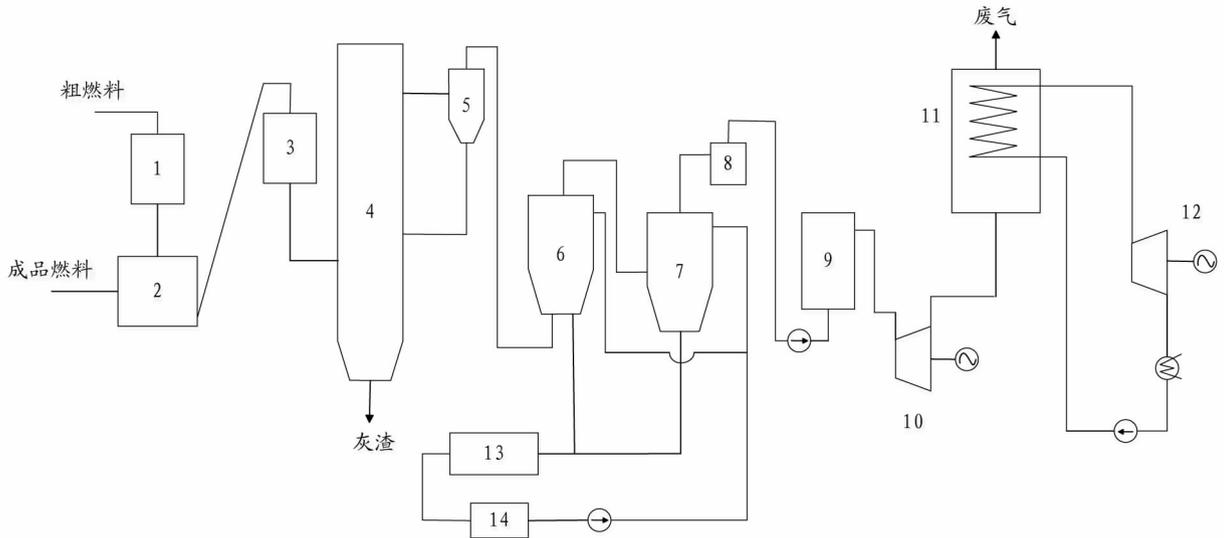
**基金项目** 国家自然科学基金项目(51576087, 51376076)。

**作者简介** 张晓燕(1992—), 女, 山东邹城人, 硕士研究生, 研究方向: 生物质热化学转化系统的生态热力学。\* 通讯作者, 副教授, 博士, 从事可再生能源系统评价与优化研究。

**收稿日期** 2017-03-17

物,稻壳、稻草及混合材料可作为该项目的生物质原料。该项目采用生物质气化发电技术,总装机规模为 20 MW,包括 36 台 500 kW 燃气内燃机组,4 台 500 kW 螺杆膨胀发电机组,4 台 4 MW 流化床气化炉以及 4 台 9.5 t/h 饱和汽余热锅炉。总投资 1.84 亿元,施工期 1.5 a,运行寿命 20 a。如图 1 所示,在生物质气化发电系统中,首先将生物质粗燃料通过秸秆粉碎机破碎,与成品燃料一起进入卸料坑,然后经过螺旋给料机和输送机进入炉前料仓。随后生物质原料在流化床气化炉中进行气化反应,生成的气化气进入旋风分离器,气体中携带的颗粒经旋风分离器分离后由分离器下部料腿

将固体颗粒返回流化床,重新进行气化反应。燃气则由分离器上部出口进入后部的两级喷淋塔和两级文氏塔等净化装置,进行除尘、除灰等净化过程,然后通过电捕焦器进一步除去焦油后进入气柜储存。在一定的输气压力下,燃气被输送到内燃机做功,排放的尾气经余热锅炉进行余热回收,生成的饱和蒸汽通过管路进入螺杆膨胀机做功。项目年利用生物质超过 18 万 t,可增加农民收入近 1 800 万元;年发电量约  $12 \times 10^7$  kW·h,具有较好的经济效益。由于可以利用气化发电系统的余热蒸汽,综合效益更加显著,同时还可减轻秸秆焚烧对环境的污染。



注:1. 秸秆破碎机;2. 卸料坑;3. 高炉料仓;4. 循环流化床气化炉;5. 旋风分离器;6. 喷淋塔;7. 文氏塔;8. 电捕焦器;9. 储气柜;10. 内燃机;11. 余热锅炉;12. 螺杆动力膨胀机;13. 离心机;14. 沉淀降解

Note: 1. Straw crusher; 2. Discharging pit; 3. Blast furnace bin; 4. Circulating fluidized bed gasifier; 5. Cyclone separator; 6. Spray tower; 7. Venturi; 8. Electric coke collector; 9. Gas holder; 10. Internal-combustion engine; 11. Waste heat boiler; 12. Screw expansion machine; 13. Centrifuge; 14. Precipitation degradation

图 1 生物质气化系统生产流程

Fig. 1 The production process of biomass gasification system

**1.2 研究方法** 焓(Exergy, Ex)这一术语由 Rant 在 1956 年首次提出,是指系统在与周围环境达到平衡过程中所能做的最大功<sup>[34]</sup>,定义如下:

$$Ex = T_0 (S_{eq}^{tot} - S^{tot})$$

式中,  $T_0$  指的是环境的热力学温度;  $S_{eq}^{tot}$  是系统在热平衡下的熵;  $S^{tot}$  是系统的熵。它体现了热力学第二定律的核心概念,是能量“质”和“量”2 个属性的统一<sup>[18]</sup>。基于焓的分析方法起初用于热力学系统,随后被拓展到热经济学系统。Szargut<sup>[35-37]</sup> 提出累积焓 (Cumulative Exergy Consumption, CExC) 的概念,主要用于衡量工业过程中产品制造所消耗的不可再生自然资源。Sciubba<sup>[38-39]</sup> 通过将劳动力、资本和环境成本等考虑在内,对累积焓概念进行了拓展,提出了拓展焓 (Extended Exergy) 的概念。在自然生态系统领域, Jørgensen 等<sup>[40-42]</sup> 提出生态焓的概念,作为生态系统健康和可持续发展的表征因子,因焓具有“资源”“缓冲能力”和“环境影响”三位一体的角色,在资源核算、生态模拟和污染物环境影响评估方面受到很多学者的重视。

通过对能值方法和累积焓理论的综合, Chen<sup>[23]</sup> 提出了多尺度的基于体现宇宙焓概念的焓值理论,认为地球生态系统赖以生存的动力是宇宙焓 (Cosmic Exergy), 而不是狭隘的太阳能值,焓值是形成某项产品或服务直接和间接投入的宇宙焓总量。宇宙焓可以定义为作为辐射热机的地球系统在以太阳光辐射为高温热源和以宇宙微波背景辐射为低温热源之间达到平衡过程所能达到的最大的功<sup>[23]</sup>。由于过程的不可逆性,焓总是被消耗的,非能量一样永远守恒。而社会的所有真实活动都是不可逆的,因此焓是维持社会-经济-生态复杂系统所消耗的真正资源,不同于能值,它具有可加性,而且不会被重复计算<sup>[33]</sup>。

基于生态热力学的最新进展——焓值理论,笔者对生物质气化系统的焓值分析,主要分为以下几个步骤:

(1) 确定生物质气化系统的系统边界,根据焓路语言绘制系统示意图,焓路语言由 Chen 等<sup>[23,32,43-45]</sup> 在 Odum 的能路语言的基础上发展而来。生物质气化系统的焓值流动图如图 2 所示。

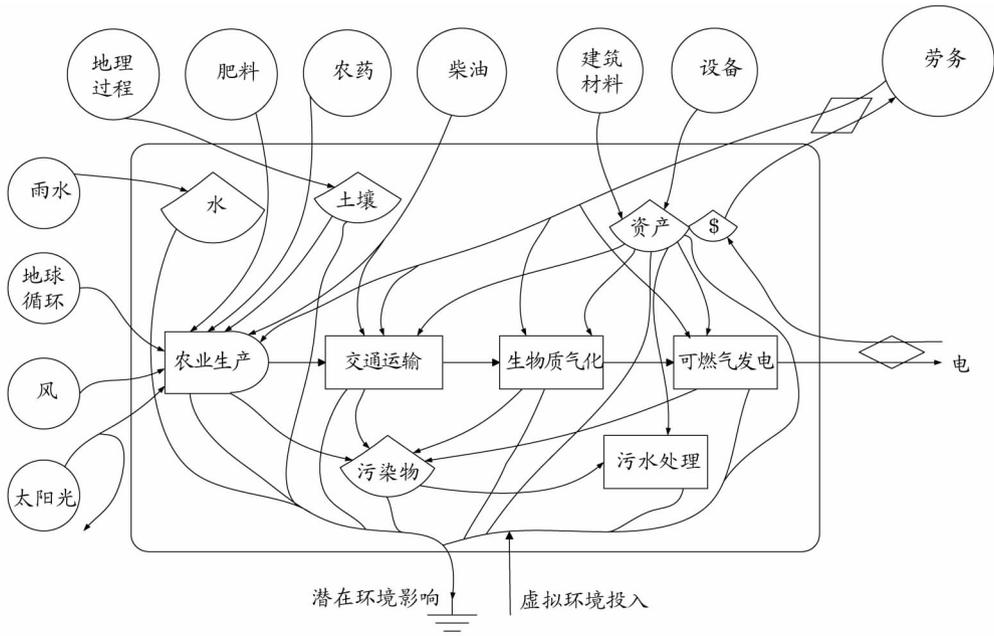


图2 生物质气化系统的焓值流动情况

Fig.2 Exergy flow diagram of biomass gasification system

(2)根据生物质气化系统的特性,将相同类别的焓值输入归类,使生物质气化系统的焓值系统图简化为图3。其中,  $I_{res}$  代表本地可利用的免费资源,由免费可再生资源  $I_{res_r}$  和不可再生资源  $I_{res_u}$  组成; $I_{eco}$  表示系统从外界购入的商品和服务,也分为可再生部分  $I_{eco_r}$  与不可再生部分  $I_{eco_u}$ ;  $EI$  代表系统对环境输出的环境影响; $I_{env}$  代表虚拟的环境投入; $Y$  代表系统产出的成品电力。

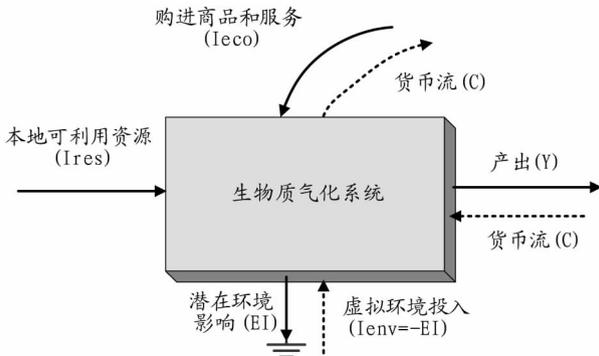


图3 生物质气化焓值系统简图

Fig.3 Biomass gasification exergy system diagram

(3)最后计算出生物质气化系统的焓值综合评价指标,各指标的定义及解释如下:①焓值总消耗( $U$ )。②净焓值产量比( $I_{eco}/Y$ )。净焓值产量比是衡量资源使用方式或经济生产方式是否具备经济性的指标。比值小于1,则说明系统生产过程中产生的焓值大于经济购买的焓值(外购化石燃料和其他商品劳务等),即系统生产具有一定的经济效益。但该指标只能描述系统的经济效益,系统的生产效率还要结合其他指标,考虑其他方面的焓值消耗。③焓值投资比( $(I_{res_u} + I_{eco_u}) / (I_{res_r} + I_{eco_r})$ )。一个经济系统要具备竞争力,必须有合理的资源利用结构。焓值投资比是指免费、低品质的可再生

资源和购买的高品质资源之比,它必须是合理的配比。如果一个可再生能源转换系统主要依赖不可再生资源,焓值投资比则高,其经济模式稳定性和可持续性都较差,还会对本地的环境造成严重的负荷。④焓值来源结构。免费资源焓值使用量比: $I_{res}/U$ ;免费可再生焓值使用量比: $I_{res_r}/U$ ;购入焓值使用量比: $I_{eco}/U$ ;购入可再生焓值使用量比: $I_{eco_r}/U$ 。本地免费资源焓值使用量比和本地可再生焓值使用量比表明自然可再生资源对本地经济的贡献程度;购入焓值使用量比、购入可再生资源使用量比以及购入劳务焓值使用量比表示系统的焓值自给情况或者说是对外来资源的依赖程度。如果过分依赖外来资源,那么发展的稳定性在很大程度上取决于市场的情况,能源市场的动荡就可能对该可再生能源系统的发展产生很大的影响。⑤焓值交易。焓值交易是以输出与输入的焓值之比( $Y/I_{eco}$ )来衡量,该比值可以表征资源交易的公平程度。像农业初级产品、燃料和矿物等产品的货币价格只代表了人类种植和开采它们所付出的劳动,并未考虑自然界的投入,因而不能以货币来衡量交易的公平性。⑥自然环境承载力。自然环境承载力主要由环境影响焓值比和环境影响与可再生资源焓值比2个比值来表征。环境影响与总焓值消耗之比可以说明资源焓值的有效使用度,其比值越大说明该系统资源使用有效性越差;环境影响与可再生资源焓值的比值则说明资源消耗结构与环境影响的关系,其值越大,说明可再生资源使用比重越低,则该系统产生量有相对严重的环境影响。

2 结果与分析

该研究基于焓值分析方法,对生物质气化系统进行焓值核算,评价生物质气化系统的综合生态环境效益。根据生物质气化系统的焓值流动图,对生物质气化系统的生命周期消耗清单(表1)进行综合衡量,进而计算焓值指标,通过一系列

指标全面分析生物质气化系统的生态特征,反应系统的焓值 生态特性。

表 1 生物质气化系统的焓值核算清单

Table 1 Exergy analysis of biomass gasification system

资源分类 Resource classification	类型 Types	具体资源 Specific resource	原始数据 Original data	单位 Unit	焓值转换率 Conversion rate Jc/unit	焓值 Exergy Jc/a	小计 Subtotal Jc/a
可再生资源 Renewable resource	—	太阳光辐射	2.35E + 15	J/a	3.46E - 03 <sup>[32]</sup>	8.14E + 12	1.25E + 13
		风(动能)	5.20E + 13	J/a	3.12E - 02 <sup>[32]</sup>	1.62E + 12	
不可再生资源 Unrenewable resource	—	雨水(化学能)	4.42E + 12	J/a	6.08E - 01 <sup>[32]</sup>	2.69E + 12	2.29E + 13
		地热	7.05E + 11	J/a	7.82E - 03 <sup>[32]</sup>	5.51E + 09	
购买的资源 Purchased resource	—	土壤损失	6.48E + 07	J/a	3.53E + 05 <sup>[32]</sup>	2.29E + 13	1.00E + 15
	农业种植	氮肥	2.45E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.41E + 11 <sup>[45]</sup>	3.45E + 12	
		磷肥	1.21E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.41E + 11 <sup>[45]</sup>	1.70E + 12	
		钾肥	4.42E + 00	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.41E + 11 <sup>[45]</sup>	6.23E + 11	
		农药	4.84E + 00	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	6.64E + 10 <sup>[45]</sup>	3.21E + 11	
		农业机械	3.81E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.19E + 10 <sup>[45]</sup>	1.60E + 12	
	建筑工程	柴油	8.42E - 03	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.14E + 11 <sup>[45]</sup>	9.60E + 08	
		水泥	7.61E - 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	9.47E + 10 <sup>[45]</sup>	7.20E + 10	
		钢材	9.76E - 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	8.19E + 10 <sup>[45]</sup>	7.99E + 10	
	工业设备	砖	1.48E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.00E + 11 <sup>[45]</sup>	1.48E + 12	
		秸秆破碎机、螺旋给料机	3.12E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.19E + 10 <sup>[45]</sup>	1.31E + 12	
		气化炉、两级喷淋塔、两级文氏塔、电捕焦器、罗茨风机、旋风分离器、湿式储气柜	9.09E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.40E + 10 <sup>[45]</sup>	4.00E + 12	
		内燃机、发电机	1.65E + 02	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.16E + 10 <sup>[45]</sup>	6.85E + 12	
		余热锅炉、螺旋动力膨胀机	5.63E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.14E + 10 <sup>[45]</sup>	2.33E + 12	
		卧式螺旋卸料沉降离心机、曝气设备	4.42E + 01	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	4.40E + 10 <sup>[45]</sup>	1.94E + 12	
交通运输	柴油	9.71E - 02	1 × 10 <sup>4</sup> 元/a	1.14E + 11 <sup>[45]</sup>	1.11E + 10		
运行维护	水		t/a	8.65E + 07 <sup>[29]</sup>	8.36E + 13		
	人力与劳务			美元/a	3.09E + 09 <sup>[32]</sup>	8.92E + 14	

表 1 列出了生物质气化系统的焓值清单。整个生物质气化系统的焓值总输入为 1.04E + 15 Jc/a, 气化电厂的厂用电率为 9%, 则系统产生的电力为 3.93E + 14 J/a, 计算可得生物质气化系统的焓值转换率为 2.64 Jc/J。由于系统消耗的电力可由自身提供而非外界购入, 因此生物质气化系统的电力消耗不予考虑。生物质气化系统的各焓值流占总焓值投入的百分比如图 4 所示, 可以看出, 系统在运行维护过程中投入的人力与劳务是生物质气化系统焓值投入的主要部分, 占总焓值投入的 86.04%。这主要是由于生物质气化技术还不够成熟, 气化发电效率比较低, 工厂自动化水平不高, 需要投入大量的人力。因此, 生物质气化系统应充分吸收煤气化相关的成熟技术, 鼓励关于生物质气化技术的科学研究, 推进生物质气化技术的改进与优化, 提高自动化水平, 这不仅可以减少工厂人力与劳务的投入, 同时还可以有效减少运行维护过程中的水耗, 进一步降低生物质气化系统的焓值投入。

根据表 2 中的数据计算可得:  $I_{res_i} = 1.25E + 13 \text{ Jc/a}$ ,  $I_{res_u} = 2.29E + 13 \text{ Jc/a}$ ,  $I_{eco_i} = 9.75E + 14 \text{ Jc/a}$ ,  $I_{eco_u} = 2.58E + 13 \text{ Jc/a}$ ,  $EI = 3.02E + 13 \text{ Jc/a}$ ,  $Y = 3.93E + 14 \text{ J/a}$ 。

表 2 列出了生物质气化系统的主要焓值评价指标的计算结果, 并且与其他能源转化利用系统的焓值评价指标做了

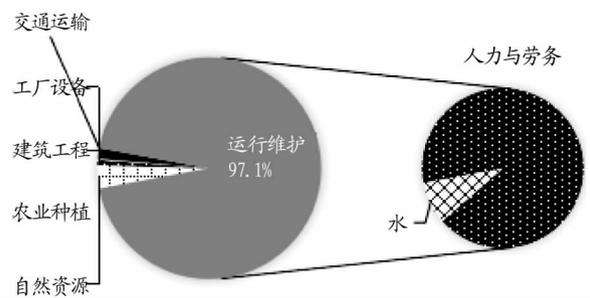


图 4 各焓值流占总焓值投入的百分比

Fig. 4 Fractions of exergy inputs for biomass gasification system

简单对比, 由于数据的可得性, 该研究只取了风力发电系统、太阳能热力发电系统、玉米酒精生产系统和沼气综合利用系统这 4 个可再生能源转化利用系统。

其中, 净焓值产量比是衡量资源使用方式或经济生产方式是否具备经济性的指标, 生物质气化系统的净焓值产量比大于 1, 说明该系统生产过程中经济购买的焓值大于自身产出的焓值, 其经济效益还有待提高。焓值投资比表示投入系统的不可再生资源与可再生资源之比, 体现了系统的资源利用结构的合理性。生物质气化系统的焓值投资比不到 0.05, 说明该系统消耗的不可再生资源远低于可再生资源, 而风力

表 2 生物质气化系统的焓值评价指标

Table 2 Exergy evaluation indices for biomass gasification system

系统 System	焓值总消耗 Total consumption of exergy Jc/a	净焓值产 量比 Yield ratio of net exergy Jc/a	焓值投资比 Input ratio of exergy Jc/a	焓值来源结构 Sources of exergy				自然环境承载力 Natural environment carrying capacity			
				免费资源 焓值使用 量比 Exergy usage ratio of free resources %	免费可再 生焓值使 用量比 Free renewable exergy usage ratio %	购入焓值 使用量比 Purchased exergy usage ratio %	购入可再 生资源焓 值使用 量比 Purchased renewable exergy usage ratio %	焓值交易 (输出输入 焓值比) Transaction of exergy Jc/a	环境影响 焓值比 Environmental impact exergy ratio Jc/a	环境影响与 可再生资源 焓值比 Environmental impact and renewable exergy ratio Jc/a	
生物质气化系统 (该研究) Biomass gasification system	1.04E + 15	2.55E + 00	4.93E - 02	3.41	1.20	96.59	94.10	3.93E - 01	2.91E - 02	8.54E - 01	
风力发电系统 <sup>[18]</sup> Wind power genera- tion system	4.00E + 16	8.49E + 00	7.28E + 00	0.01	0.00	99.99	33.29	1.18E - 01	9.71E - 03	8.04E - 02	
太阳能热力发电系 统 <sup>[18]</sup> Solar thermal power generation system	2.15E + 16	9.21E + 01	6.68E + 00	0.43	0.25	99.57	33.97	1.09E - 02	2.05E - 03	1.57E - 02	
玉米酒精生产系 统 <sup>[18]</sup> Corn-ethanol production system	3.36E + 13	7.16E + 02	9.34E + 01	1.00	1.00	99.00	21.00	1.40E - 03	2.78E - 03	2.62E - 01	
沼气综合利用系 统 <sup>[18]</sup> Biogas com- prehensive utiliza- tion system	3.24E + 13	1.33E + 02	2.46E + 02	21.59	0.36	78.41	0.05	7.51E - 03	2.98E - 03	7.35E - 01	
计算公式 Calculation formula	$U = Ires_u + Ires_r + Ieco_u$	$Ieco/Y$	$(Ires_u + Ieco_u) / (Ires_r + Ieco_r)$	$Ires/U$	$Ires_r/U$	$Ieco/U$	$Ieco_r/U$	$Y/Ieco$	$EI/U$	$EI/Ires$	

发电系统、太阳能热力发电系统、玉米酒精生产系统和沼气综合利用系统的焓值投资比均大于 1,对于不可再生资源的依赖更强。因此,相对这几个可再生资源转化利用系统,生物质气化系统具有较好的发展可持续性。在焓值来源结构方面,除了沼气利用系统,几个可再生系统的购入焓值使用量比都非常大,说明它们的运行主要依赖于外来资源,而系统的焓值自给能力不足,发展的稳定性很大程度上会受到外界能源市场的影响。这主要与系统在原料生产、场地建设、运行维护过程中投入的大量物质和劳动力有关。而沼气系统的自然资源投入相对较多,因此其免费资源焓值使用量比高于其他几个系统。自然环境承载力主要由 2 个比值来表征,环境影响焓值比可说明资源焓值的有效使用度,比值越大说明系统的资源使用有效性越差;而环境影响与可再生资源焓值比可说明资源消耗结构与环境影响的关系,值越大说明可再生资源的使用比重越低,对环境的影响越大。对于生物质气化系统、风力发电系统、太阳能热力发电系统、玉米酒精生产系统和沼气综合利用系统,环境影响焓值比和环境影响与可再生资源焓值比这 2 个比值都较低,说明系统对环境造成的影响较小,具有较好的生态环境效益。

综合来看,生物质气化系统对外界资源的依赖较大,自身的焓值自给能力不足,但对于可再生资源焓值的利用较高,具有较好的发展可持续性和环境友好性。随着国家对可再生资源发展的重视与鼓励,加上生物质转化利用在技术改

革、工艺创新、生产效率上的逐步改进,生物质气化系统的生态环境效益将越来越好。

### 3 结论

该研究以江苏盐城的 20 MW 生物质气化燃气-蒸汽联合循环发电工程为研究对象,采用焓值分析方法对生物质气化系统的综合生态经济效益进行评价。生物质气化系统将生物质原料转化为可燃的合成气,进而用于发电或其他用途。系统年产出电力  $3.93E + 14$  J,焓值转化率为 2.64 Jc/J。人力劳务投入是系统焓值投入的主要部分,占到了总焓值投入的 86.04%。改进生物质气化技术,降低人力的消耗是系统优化的关键。通过计算焓值评价指标,并且与风力发电系统、太阳能热力发电系统、玉米酒精生产系统和沼气综合利用系统这几个典型的可再生资源转化利用系统对比发现,生物质气化系统与其他可再生资源系统类似,都主要依赖于外购的资源,但对可再生资源的利用较高,具有较好的发展可持续性和生态环境效益。

### 参考文献

- [1] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[Z]. 2016.
- [2] 马隆龙. 生物质气化技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 郭华, 祝涛, 王吉平. 生物质气化技术的研究进展[J]. 广州化工, 2014(18): 35-37.
- [4] 陈冠益, 高文学, 颜蓓蓓, 等. 生物质气化技术研究现状与发展[J]. 煤气与热力, 2006, 26(7): 20-26.
- [5] RUIZ J A, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers[J]. Renewable

- & sustainable energy reviews,2013,18(2):174-183.
- [6] LIN Y,TANAKA S. Ethanol fermentation from biomass resources: Current state and prospects[J]. Applied microbiology and biotechnology,2006,69(6):627-642.
- [7] KWANT K W. Status of Biomass Gasification in countries participating in the IEA and GasNet activity August 2004[R]. 2004.
- [8] CARDONE M,MAZZONCINI M,MENINI S, et al. Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: Agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization[J]. Biomass & bioenergy,2003,25(6):623-636.
- [9] ACHTEN W M J,ALMEIDA J,FOBELETS V, et al. Life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel as transportation fuel in rural India[J]. Applied energy,2010,87(12):3652-3660.
- [10] CHEN H,CHEN G Q. Energy cost of rapeseed-based biodiesel as alternative energy in China[J]. Renewable energy,2011,36(5):1374-1378.
- [11] FLECK B,HUOT M. Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use[J]. Renewable energy,2009,34(12):2688-2696.
- [12] YANG H P,YANG Q,HAN F, et al. Comprehensive evaluation of biomass energy technologies in China[J]. Journal of technology innovations in renewable Energy,2014,3(3):85-93.
- [13] YANG Q,CHEN G Q. Nonrenewable energy cost of corn-ethanol in China[J]. Energy policy,2012,41(1):340-347.
- [14] YANG Q,HAN F,CHEN Y Q, et al. Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China[J]. Renewable & sustainable energy reviews,2016,53:1580-1590.
- [15] 陈德民,柳锋,杨晴,等. 生物质直燃系统的能耗分析和温室气体排放[J]. 太阳能学报,2016,37(3):553-558.
- [16] ODUM H T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making[J]. Child development,1996,42(4):1187-1201.
- [17] 付晓,吴钢,刘阳. 生态学研究中的焓分析与能值分析理论[J]. 生态学报,2004,24(11):2621-2626.
- [18] 杨晴. 可再生能源的系统生态热力学核算[D]. 北京:北京大学,2011.
- [19] 韩菲,柳锋,杨晴,等. 生物质热解多联产系统的能值分析[J]. 太阳能学报,2015,36(12):3060-3065.
- [20] 罗玉和,丁力行. 生物质直燃发电 CDM 项目可持续性的能值评价[J]. 农业工程学报,2009,25(12):224-227.
- [21] 罗玉和,楼波,丁力行. 清洁发展机制下生物质气化发电的能值分析[J]. 太阳能学报,2010,31(9):1124-1128.
- [22] 李欣,娄世玲,杨麒,等. 基于生命周期能值分析的秸秆能源化利用方式的对比评价[J]. 环境工程学报,2016,10(8):4607-4614.
- [23] CHEN G Q. Exergy consumption of the earth[J]. Ecological modelling,2005,184(2/3/4):363-380.
- [24] 黄素逸. 能源监测与评价[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [25] 季曦. 生态经济的热力学焓值理论及其在城市系统模拟和调控中的应用[D]. 北京:北京大学,2008.
- [26] 魏胜文,陈先江,张岩,等. 能值方法与存在问题分析[J]. 草业学报,2011,20(2):270-277.
- [27] SHAO L,CHEN G Q. Exergy based renewability assessment: Case study to ecological wastewater treatment[J]. Ecological indicators,2015,58:392-401.
- [28] CHEN G Q,JIANG M M,YANG Z F, et al. Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture[J]. Ecological modelling,2009,220(3):397-410.
- [29] 周江波. 国民经济的体现生态要素核算[D]. 北京:北京大学,2008.
- [30] HUANG L Q,CHEN G Q,ZHANG Y, et al. Exergy as a unified measure of water quality[J]. Communications in nonlinear science & numerical simulation,2007,12(5):663-672.
- [31] CHEN Z M,CHEN B,CHEN G Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing[J]. Ecological modelling,2011,222(2):322-329.
- [32] 姜味茗. 城市系统演化的生态热力学焓值分析[D]. 北京:北京大学,2007.
- [33] WU X F,CHEN G Q,WU X D, et al. Renewability and sustainability of biogas system: Cosmic exergy based assessment for a case in China[J]. Renewable & sustainable energy reviews,2015,51:1509-1524.
- [34] WALL G. EXERGY-A USEFUL CONCEPT WITHIN RESOURCE ACCOUNTING[R]. Göteborg, Sweden: Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg,1977.
- [35] SZARGUT J. Application of exergy for the calculation of ecological cost[J]. Bulletin of the polish academy of sciences, technical sciences,1986,34(7):475-480.
- [36] SZARGUT J. Analysis of cumulative exergy consumption[J]. International journal of energy research,1987,11(4):541-547.
- [37] SZARGUT J. Minimization of the consumption of natural resources[J]. Bulletin of the polish academy of sciences, technical sciences,1978,26(6):41-46.
- [38] SCIUBBA E. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling[J]. Energy,2003,28(13):1315-1334.
- [39] SCIUBBA E,BASTIANONI S,TIEZZI E. Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy[J]. Journal of environmental management,2008,86(2):372-382.
- [40] JØRGENSEN S E. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health[J]. Ecosystem health,1995,1(3):150-160.
- [41] JØRGENSEN S E. Evolution and exergy[J]. Ecological modelling,2007,203(3/4):490-494.
- [42] JØRGENSEN S E. Description of aquatic ecosystem's development by eco-exergy and exergy destruction[J]. Ecological modelling,2007,204(1/2):22-28.
- [43] CHEN G Q. Scarcity of exergy and ecological evaluation based on embodied exergy[J]. Communications in nonlinear science & numerical simulation,2006,11(4):531-552.
- [44] 陈彬. 生态焓理论及其在黄河流域生态模拟中的应用[D]. 北京:北京大学,2004.
- [45] CHEN G Q,CHEN Z M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: A 135-sector inventory and input-output embodiment[J]. Communications in nonlinear science & numerical simulation,2010,15(11):3647-3732.

(上接第 162 页)

## 参考文献

- [1] 罗碧瑜,陈映强,贺汉清,等. 梅州近 50 年气候变化特征及未来变化趋势[J]. 气象科技,2008,36(3):289-292.
- [2] 林学椿,于淑秋. 近四十年我国气候趋势[J]. 气象,1990,16(10):16-21.
- [3] 任国玉,初子莹,周雅清,等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):701-716.
- [4] 任福民,翟盘茂. 1951~1990 年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学,1998,22(2):217-227.
- [5] MANDELBROT B B,WALLIS J R. Some long-run properties of geophysical records[J]. Water resources research,1969,5(2):321-340.
- [6] MANDELBROT B B,WALLIS J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence[J]. Water resources research,1969,5(5):967-988.
- [7] 陈正洪. 武汉、宜昌 20 世纪平均气温突变的诊断分析[J]. 长江流域资源与环境,2000,9(1):56-62.