

太阳助秸秆沼气的生命周期能耗及碳排放分析

苏 醒¹, 李 航¹, 张 旭¹, 宋 波²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 对徐州某太阳能辅助加热的秸秆沼气系统进行了深入调研和测试, 采用生命周期评价方法分析了涵盖基础设施建设、系统运行维护、秸秆运输、沼气使用以及沼液沼渣利用等各个阶段的化石能源消耗及碳排放清单。结果表明太阳能沼气系统生命周期化石能源消耗为 $0.173 \text{ MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$, 碳排放为 $0.121 \text{ kgCO}_2 \text{ eq} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (二氧化碳当量)。与天然气比较, 秸秆沼气的单位热值化石能源消耗仅为天然气的 15.6%, 单位热值碳排放比天然气系统多 55.0%。与秸秆直接露天燃烧相比, 秸秆沼气系统的单位秸秆质量生命周期碳排放比秸秆直接露天燃烧低 59.7%。

关键词: 生命周期评价; 清单分析; 秸秆沼气; 太阳能
中图分类号: TK6 **文献标志码:** A

Life Cycle Fossil Energy Consumption and Carbon Emissions of a Solar-assisted Straw Biogas System

SU Xing¹, LI Hang¹, ZHANG Xu¹, SONG Bo²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China)

Abstract: A life cycle inventory analysis model for all life stages of solar-assisted straw biogas system is developed, including raw materials acquisition, construction, straw transportation, operation and maintenance, biogas using and eventually waste management. Based on on-site investigation and measurement of a solar-assisted straw biogas project, the life cycle fossil energy consumption and carbon emissions are calculated. The results show that the fossil energy consumption of the solar assisted biogas system is $0.173 \text{ MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$, and the carbon emission is $0.121 \text{ kgCO}_2 \text{ eq} \cdot \text{MJ}^{-1}$. When compared to natural gas, the fossil energy consumption of straw biogas is only 15.6% of the natural gas, the carbon emissions is 55% higher than that of the natural gas. The life cycle carbon emissions of solar assisted biogas system is 59.7% lower than

straw burning.

Key words: life cycle assessment; inventory analysis; straw biogas; solar energy

近年来,农村秸秆处理成为一个中国面临的一个非常严峻的问题,“十一五”、“十二五”期间,国家相关部门陆续出台了一系列政策法规,从政策、资金等角度支持秸秆资源化利用,但是仍然无法杜绝秸秆的分散燃烧现象。秸秆是一种重要的生物质能源,其利用方式也有多种,但是各种利用方式的效果及综合环境影响还没有完整系统的评定。秸秆沼气在我国大部分地区的冬季难以正常产气,主要是没有解决沼气池增温保温这一关键问题。关于辅助增温的沼气系统研究较多,石惠娴^[1]、Feng^[2]、Curry^[3]、裴晓梅等^[4]分别对地源热泵式沼气池加温系统、户用太阳能热水增温沼气系统、空气源热泵增温沼气系统、太阳能地源热泵复合式增温沼气系统等进行了性能测试和研究,这些研究更多关注于沼气系统产气环节本身,对同时考虑上下游环节的综合评价研究较少。这些增温措施可以提高沼气池的产气率,但是可能会额外增加基础设施建设与运行维护阶段的能源资源消耗和环境排放。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为一种产品环境特征分析和环境决策支持工具,可以对秸秆不同利用方式在整个生命周期内的能源资源消耗和环境影响进行综合评价,对于秸秆资源化利用方式的筛选和工艺优化有重要的支撑作用。

本文以徐州某简易太阳能辅助秸秆沼气系统工程为研究对象,结合现场调研的上游阶段直接资源消耗数据和运行维护阶段的实际产气等测试数据,利用生命周期评价软件分析不同阶段的能源消耗和碳排放,以为秸秆沼气利用方式选择和优化提供

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2015BAL02B03)

第一作者: 苏 醒(1982—),男,工学博士,副教授,主要研究方向为建筑及能源系统生命周期评价及有效性。

Email: suxing@tongji.edu.cn

参考.

1 清单模型

1.1 研究对象及边界

研究对象为徐州市马庄 300 m³ 太阳能辅助秸秆沼气系统,供气范围为周围 100 户村民.此系统的太阳能辅助秸秆沼气技术是将利用聚乙烯薄膜搭建简易太阳能日光温室,与秸秆沼气结合起来,与常规秸秆制沼气相比,太阳能辅助秸秆沼气可以提高冬季沼气池产气率并缓解供气不平稳问题.按照 LCA 标准化流程,本系统生命周期包括基础设施建设阶段、系统运行维护阶段和综合利用阶段三大阶段.本

研究主要考察秸秆生物质能利用过程的能耗和碳排放,秸秆上游的农作物种植阶段不在本文研究边界中.其中沼气工程建设阶段又包括原材料生产、运输和现场施工等过程,系统运行维护阶段包括秸秆粪便收集、运输、秸秆粉碎、秸秆预处理、基础设施维护等过程,综合利用阶段的产出为沼气、沼渣和沼液,其中沼气为主要产出目标,用于周围农户炊事等,沼液和沼渣作为副产物,可以用于果树肥料,以上每个过程以及相关上游阶段可能又都包含能源、水、资源等消耗和环境排放.整个沼气系统生命周期评价边界如图 1 所示.为便于同类研究比较或其他常规能源系统比较,生命周期评价的功能单位为 1MJ.

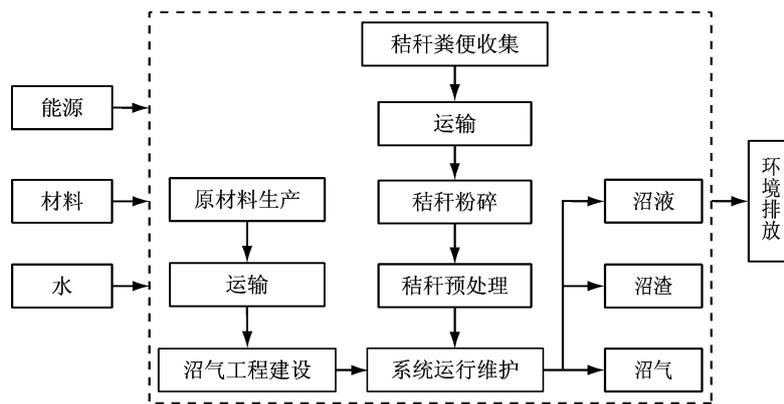


图 1 太阳能辅助沼气系统生命周期研究边界

Fig. 1 System boundary of solar assisted biogas project life cycle

1.2 分析参数

生命周期清单分析的输出参数很多,包括一次能源消耗和数十种污染物排放,输入参数对不同输出参数的影响程度可能不同,本文选生命周期取化石能源消耗和碳排放作为清单分析的输出参数,碳排放主要由 CO₂、CH₄、N₂O 组成,其中 CH₄ 和 N₂O 的 CO₂ 当量系数分别为 25 和 298^[5].

1.3 数据来源及假设

生命周期清单分析需要收集两大类数据,一类是与具体研究对象密切相关的参数,包括每个直接过程的材料消耗以及这些过程涉及到的能耗类型、能耗大小、运输方式、运输距离、施工过程能耗等数据,这类数据大部分是结合实地调研与计量的数据整理得到.另一类数据包括上游阶段的材料生产、能源生产、运输等过程中的能耗及排放相关数据.这类数据种类繁多,很难针对具体的案例去追溯调查其所用能源在上游阶段的相关数据,一般都采用国家层面上的平均数据进行替代,本文中这类数据来自于最近几年相关行业统计年鉴^[6-8].

整个沼气工程占地面积约 800 m²,考虑土地占用引起的当量能耗和碳排放.沼气工程土建部分包括场地平整、秸秆库房、太阳能温室、酸化池、发酵罐、储气罐、沼液池、劳动力投入等,土建部分直接材料消耗数据根据工程现场调研得到.

机械设备包括粉碎机、进料泵、脱水装置和脱硫装置等,设备投入按照设备材料和重量计算,粉碎机 11 kg,进料泵 55 kg,脱硫塔 60 kg,汽水分离器 18 kg,材料均为不锈钢.最终得到的材料消耗清单如表 1 所示,这些材料都属于常规建筑材料,材料上游运输距离按照 30 km 计算.

系统运行阶段需要考虑秸秆和粪便的使用量以及收集过程的运输阶段,秸秆平均运输距离为 20 km,粪便为就近收集,只有人力投入,不考虑运输过程.系统维护现场秸秆粉碎、预处理、制沼等过程的能源、资源和水的使用量通过现场计量及记录得到,表 2 为 2013 年系统运行阶段现场调研及测试结果.运行现场为 3 人轮班制,人力投入的能耗和碳排放按文献^[9]的方法进行折算.整个沼气系统设计寿命

为 20 年,在系统运行阶段,除了固定能源、资源投入以外,用于简易太阳能温室的聚乙烯薄膜在使用过程中易损坏,每年更换一次。

表 1 太阳能辅助秸秆沼气工程材料消耗

Tab. 1 Materials consumption of solar assisted

| biogas project | |
|----------------------------|----------|
| 材料种类 | 数值 |
| Q235 钢板质量/t | 23.28 |
| 63 mm×63 mm×6 mm 角钢质量/kg | 2 517.24 |
| 不锈钢质量/kg | 144 |
| C20 钢筋混凝土体积/m ³ | 17.2 |
| 水泥砂浆质量/kg | 6 120 |
| 6 mm 钢板质量/t | 5 |
| 水泥质量/t | 1.57 |
| 石沙质量/kg | 21 625 |
| 10# 钢筋质量/t | 0.24 |
| 钢管质量/t | 0.6 |
| 聚乙烯薄膜质量/kg | 40 |
| 铁丝质量/kg | 80 |
| 棉纤维质量/kg | 52 |
| 不锈钢质量/t | 144 |

表 2 系统运行阶段相关年数据

Tab. 2 Related annual data of operational stage

| 种类 | 数值 |
|--------------------|-------|
| 秸秆运输距离/km | 20 |
| 秸秆消耗质量/t | 120 |
| 造肥粪便消耗质量/t | 60 |
| 脱硫剂消耗质量/t | 0.8 |
| 电耗量/kWh | 6 800 |
| 水耗量/m ³ | 480 |
| 碳酸氢氨消耗质量/t | 1.2 |

综合利用阶段,系统主要产出为沼气、沼液和沼渣,根据现场计量数据,每年沼气产气量为 31 100 m³,沼液 580 t,沼渣 70 t,其中沼气为主要产物,用于农户炊事活动,沼液沼渣为副产物,可以替代常规化肥的使用,在生命周期评价过程中作为额外收益来考虑,根据等效肥料量来进行换算,对应的清单分析结果为减少的能源消耗和碳排放。沼气为主要能源产出,需要计算其使用过程中的污染物排放,沼气成分经检测,甲烷含量为 52.0%,二氧化碳含量 42.99%,其他成分占 1.01%,低热值为 18.7 MJ·m⁻³,高热值为 20.7 MJ·m⁻³,在进行功能单位比较时,热值按照低热值和高热值的平均数进行计算。

2 分析结果

生命周期清单分析包含直接过程以及每一个过程的上游阶段,计算过程复杂,需要进行循环迭代计算,一般都需要专门的软件。本研究使用了荷兰 Leiden 大学环境科学中心开发的 SimaPro 软件,上

游阶段数据库来自本研究团队十多年的积累。将调研数据及查阅的相关文献数据代到 SimaPro 软件里进行计算,得到各个阶段的生命周期能耗及碳排放清单,如表 3 所示。

太阳能辅助秸秆沼气系统生命周期化石能源总消耗为 2 115 GJ,主要来自沼气系统建设阶段和系统运行维护及秸秆运输阶段,分别占 25.2%、55.1%和 19.7%,通过沼液沼渣再利用阶段替代化肥可减少化石能源消耗 1 158 GJ。生命周期碳排放总量为 1 483 tCO₂eq,主要来源于沼气使用阶段,占 82.0%,沼液沼渣再利用可减少碳排放 88.2 t。沼气热值按照平均热值计算,20 年里共产沼气 622 000 m³,总热值 12 253 GJ,因此可计算出本太阳能沼气系统生命周期化石能源消耗为 0.173 MJ·MJ⁻¹,碳排放为 0.121 kgCO₂eq·MJ⁻¹。

表 3 太阳能沼气系统生命周期清单分析结果

Tab. 3 Life cycle inventory of solar assisted

| biogas system | | |
|---------------|-----------|---------------------------|
| 过程 | 化石能源消耗/GJ | 碳排放/(tCO ₂ eq) |
| 基础建设 | 823.55 | 88.92 |
| 系统运行维护 | 1 803.73 | 217.78 |
| 秸秆运输 | 645.38 | 48.22 |
| 沼气使用 | 0 | 1 215.97 |
| 沼液沼渣(化肥替代) | -1 157.64 | -88.15 |
| 合计 | 2 115.02 | 1 482.74 |

3 结果讨论

本文以某中型集中太阳能辅助秸秆沼气工程为例,利用生命周期清单分析方法量化了化石能源消耗和碳排放。可以看出系统工程建设阶段能耗和碳排放不可忽略,因此,通过太阳能辅助的方法提高产气率,可以相应降低单位沼气热值的能耗和碳排放。为了合理评价系统的节能减排效益,分别与管道天然气系统和秸秆直接燃烧比较,在比较时,为了保证结果的可信度,选择对等的研究边界。

利用 Simapro 软件对中国的管道输送天然气系统进行生命周期清单分析,生命周期化石能源消耗为 1.10 MJ·MJ⁻¹,碳排放为 0.078 kgCO₂eq·MJ⁻¹。从图 2 可以看出,与管道天然气比较,本秸秆沼气系统的单位热值化石能源消耗仅为管道天然气的 15.6%,秸秆沼气系统的化石能源消耗主要来源于基础建设阶段原材料生产和运输阶段、系统运行维护阶段常规能源消耗以及秸秆运输阶段柴油的消耗,但产生的沼气可以极大地替代对化石能源的消耗。秸秆沼气系统的碳排放主要来自于沼气使用阶

段,但是单位热值的碳排放比管道天然气系统多 55.0%,主要原因是管道天然气中 CH_4 的比例远高于比秸秆沼气,而本文研究对象中沼气里的 CO_2 成分占 43%,秸秆沼气的热值仅为管道天然气的 47.3%,因此以单位热值作为两种能源比较的功能单位时,秸秆沼气的温室气体减排潜力不如管道天然气系统.如能在秸秆沼气系统设计时找到发酵过程中减少 CO_2 比例的方法,可能会进一步提高秸秆沼气系统的减排效益.

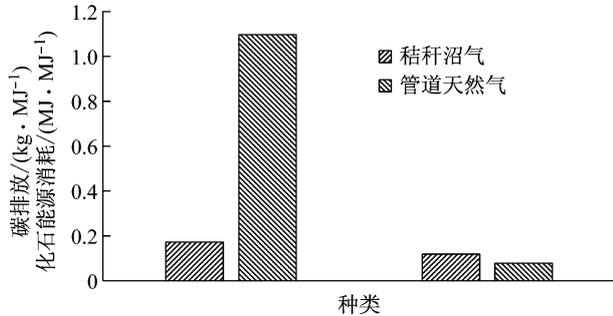


图 2 本系统与管道天然气的比较

Fig. 2 Comparison between this research and natural gas in China

事实上,从更广义角度考量秸秆沼气的温室气体减排潜力,秸秆如果不用来发酵制备沼气,按照中国的现有国情,这些秸秆可能会用于炊事燃烧或采用露天燃烧的方式处理掉.因此有必要将秸秆沼气的碳排放与秸秆露天燃烧进行比较.炊事燃烧或露天燃烧相比,碳排放强度大致相同,参照文献[10-12]给出的秸秆直接燃烧污染物排放系数,可以计算出本系统等量秸秆直接燃烧的碳排放结果.从图 3 可以看出,按照单位秸秆质量进行比较,沼气系统生命周期碳排放比秸秆直接燃烧低 59.7%,而且,秸秆沼气系统还可以极大地减少颗粒物及其他污染物排放.

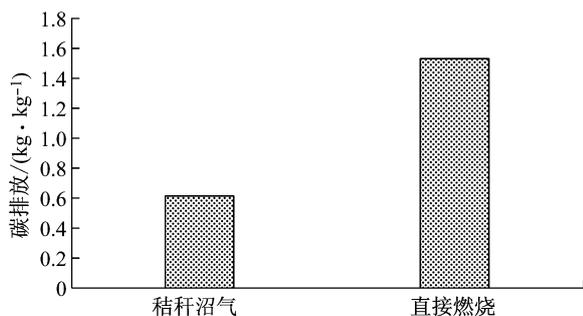


图 3 本系统与秸秆直接燃烧的比较

Fig. 3 Comparison between this research and straw burning in China

4 结论

对某太阳能辅助秸秆沼气系统建立了涵盖基础设施建设、秸秆运输、系统运行维护、沼气使用及废弃物回收利用的生命周期清单分析模型,结合现场调研和实测数据分析了系统的生命周期化石能源消耗和碳排放,主要得到以下结论:

(1) 秸秆沼气作为一种替代燃料,其生命周期化石能源消耗为 $0.173 \text{ MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$,比管道天然气低 84.4%,生命周期碳排放为 $0.121 \text{ kgCO}_2\text{eq} \cdot \text{MJ}^{-1}$,比管道天然气多 55.0%.

(2) 考虑沼液沼渣作为副产物可以替代常规化肥,可以减少化石能源消耗 $0.094 \text{ MJ} \cdot \text{MJ}^{-1}$,但是对减少碳排放的贡献并不太大.

(3) 与秸秆直接燃烧相比,秸秆沼气系统的单位秸秆质量生命周期碳排放比秸秆直接燃烧低 59.7%.

参考文献:

- [1] 石惠娴,王韬,朱洪光,等. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. 农业工程学报, 2010,26(2): 268.
SHI Huixian, WANG Tao, ZHU Hongguang, et al. Heating system of biogas digester by ground source heat pump [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(2): 268.
- [2] FENG Rong, LI Jinping, DONG Ti, et al. Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system [J]. Applied Thermal Engineering, 2016(96): 519.
- [3] CURRY N, PILLAY P. Integrating solar energy into an urban small-scale anaerobic digester for improved performance [J]. Renewable Energy, 2015(83): 280.
- [4] 裴晓梅,张迪,石惠娴,等. 太阳能-地源热泵沼气池加热系统集成热面积优化[J]. 农业机械学报, 2011,42(1): 122.
PEI Xiaomei, ZHANG Di, SHI Huixian, et al. Collector area optimization of integrated solar and ground source heat pump system for heating biogas digester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (1): 122.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[R]. Tokyo: IPCC, 2000.
- [6] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业年鉴 2014[M]. 北京:中国建筑材料工业年鉴社, 2015.
China Building Material Council. Yearbook of China building material industry 2014 [M]. Beijing: China Building Materials industry Press, 2015.
- [7] 中国电力年鉴编委会. 2014 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
China electric power yearbook Editorial Committee. China

- electric power yearbook 2014 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [8] 中国能源年鉴编委会. 中国能源统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- China Energy Statistical Yearbook Editorial Committee. China energy statistical yearbook 2014 [M]. Beijing: China Statistical Press, 2015.
- [9] BENEDETTO R, DARYNA P B. An input-output based framework to evaluate human labour in life cycle assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(6): 795.
- [10] 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧 PM_{2.5} 排放因子的研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 29.
- ZHU Bin, ZHU Xianlei, ZHANG Yuanxun, *et al.* Emission factor of PM_{2.5} from crop straw burning [J]. Research of Environmental Science, 2005, 18(2): 29.
- [11] LI Xinghua, WANG Shuxiao, DUAN Lei, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17): 6052.
- [12] ANDREAE M O, MERLET P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(4): 4955.

~~~~~

(上接第 1203 页)

- [16] 曾令杰. 公共建筑风系统突发污染一维反问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- ZENG Lingjie. Research on one-dimensional inverse problem of sudden contamination through ventilation system in public buildings[D]. Shanghai: Tongji university, 2016.
- [17] GAO Jun, ZENG Lingjie, WU Li, *et al.* Solution for sudden contamination transport through air duct system: under a puff release[J]. Building and Environment, 2016, 100: 19.
- [18] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint sensitivity analysis of contaminant concentrations in water distribution systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137: 31.
- [19] PREIS A, Ostfeld A. Contamination source identification in water Systems: a hybrid model trees-linear programming scheme [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 263.
- [20] KOWALSKI W J. Immune building systems technology[M]. New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2003.
- [21] 董深, 吕谋, 盛泽斌, 等. 基于遗传算法的供水管网反问题漏失定位[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 106.
- DONG Shen, LÜ Mou, SHENG Zebin, *et al.* Inverse transient leakage location of water supply network based on genetic algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 106.
- [22] PRASAD T D, PARK N S. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(1): 73.