

# 基于医疗废物和沼气的零碳排放制氢系统研究

周专<sup>1</sup>, 边家瑜<sup>2</sup>, 荆世博<sup>2</sup>, 余金<sup>2</sup>, 赵欣悦<sup>3</sup>, 陈衡<sup>3\*</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆乌鲁木齐 830000;  
2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830000; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 为了实现清洁高效的资源利用, 提出了一种利用医疗废物和沼气的零碳排放制氢系统, 该系统由等离子体汽化、固体氧化物燃料电池、蒸汽轮机循环和自热重整组成。混合系统被设计为一个能够生产氢气、热量和电力的多联产系统, 以自身维持整个计划生产氢气所需的能源消耗。对制氢系统的热力学和技术经济性进行了研究, 结果表明, 以医疗废物和沼气为原料的制氢工艺的能量效率和烟效率分别达到 63.20% 和 59.15%, 高于其他工艺; 此外, 该系统可以在 3.25 a 内收回初始成本, 预计净现值将在 25 a 内达到 80 752.48 万元。

**关键词:** 医疗垃圾; 沼气; 制氢; 系统耦合; 参数分析

**中图分类号:** TK91

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)05-0233-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.05.041

## Research on zero carbon dioxide emission hydrogen production system based on medical wastes and biogas

ZHOU Zhuan<sup>1</sup>, BIAN Jia-yu<sup>2</sup>, JING Shi-bo<sup>2</sup>, YU Jin<sup>2</sup>, ZHAO Xin-yue<sup>3</sup>, CHEN Heng<sup>3\*</sup>

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To achieve clean and efficient in-situ utilization of resources, a novel hydrogen production system from medical wastes and biogas with zero carbon dioxide emission is proposed, which is composed of plasma gasification, solid oxide fuel cell, steam turbine cycle, and autothermal reforming. The hybrid system is designed as a poly generation system capable of producing hydrogen, heat, and electricity to self-sustain the energy consumption required to produce hydrogen for the entire plan. The thermodynamic and techno-economic of the hydrogen production system is investigated. Results show that the energy efficiency and exergy efficiency of the medical wastes/biogas hydrogen production process reach 63.20% and 59.15%, respectively, higher than those of other processes. In addition, the system can recover its initial cost in 3.31 years, and deliver a net present value of RMB 807.5248 million within 25 years.

**Key words:** medical wastes; biogas; hydrogen production; system coupling; parameter analysis

2019 冠状病毒病具有高度传染性, 截至 2021 年 2 月 26 日, 累计确诊病例已接近 1 亿例, 死亡 2 501 229 例。冠状病毒是全球最致命的传染病之一, 其预防、控制和治疗已成为全球公共卫生的重点<sup>[1]</sup>。当对医疗用品的巨大需求出现时, 医疗废物的巨大产生是不可避免的。由于医疗废物处理的复杂性, 许多现有技术无法达到预期效果。越来越多的国家重视医疗废物的妥善处理。另一方面, 动物粪便的处理也引起了广泛关注。在中国, 随着畜牧业的显著发展, 人们的生活水平不断提高, 然而畜禽养殖的突然增加使动物粪便的处理成为一个重大问题<sup>[2]</sup>。

医疗废物通常含有一些有毒和传染性成分, 等离子体汽化被认为是处理医疗废物的有效方法, 因为其具有汽化速度快、资源利用率高和减少污染物排放等优点<sup>[3]</sup>。另一方面, 厌氧发酵是一种公认的

处理动物粪便的方法。它可以利用厌氧微生物将有机物转化为沼气和有机肥料, 有效控制有机废物对环境的相关影响。除了垃圾处理, 对传统能源日益增长的需求促使社会探索其他替代能源以实现可持续性也引起了广泛关注。氢气因高能量含量和清洁度而被认为是取代化石燃料的替代燃料, 在电力、能源、化学品和运输部门有潜在应用<sup>[4]</sup>。从环境、社会和经济角度来看, 废物制氢路线是一个很有前途的候选战略。

Kuo 等<sup>[5]</sup>通过微藻生物质原料开发了一种有效可行的混合系统, 通过能量、烟和环境分析对其进行评估, 以探索碳捕获等离子体辅助制氢过程的机理。Bhattacharya 等<sup>[6]</sup>对专门用于氢气生产的生物质汽化系统进行了烟分析。Di Marcoberatino 等<sup>[7]</sup>研究了膜重整反应器技术在沼气生产绿色氢气方面的潜

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国网新疆电力有限公司科技项目 (SGXJ0000FCJS2310225)

作者简介: 周专 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划与系统分析, 1319124529@qq.com; 陈衡 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化及评价、多类型储能协同以及电网提质增效, 通讯联系人, heng@ncepu.edu.cn。

力。这项前瞻性研究旨在开发一种混合方案,通过协同利用医疗废物和动物粪便来实现废物转化为氢气。根据医疗废物和动物粪便的具体性质,本设计分别采用等离子体汽化和厌氧发酵的方法进行处理。目前的工作可能为废物管理的发展提供有价值的见解,并推动废物制氢的发展。

(1)混合动力系统被设计为一个能够协同利用医疗废物和动物粪便产生氢气、热量和电力的多联

产系统,实现废弃物转化和能源管理。

(2)采用能量效率、焓效率、净现值、动态回收期等指标对混合系统进行全面性能分析。

### 1 系统描述

详细介绍了由等离子体汽化、燃料电池、沼气重整和汽轮机循环组成的制氢系统的系统结构,如图 1 所示。整个系统分为 3 个主要模块,第一部分是利

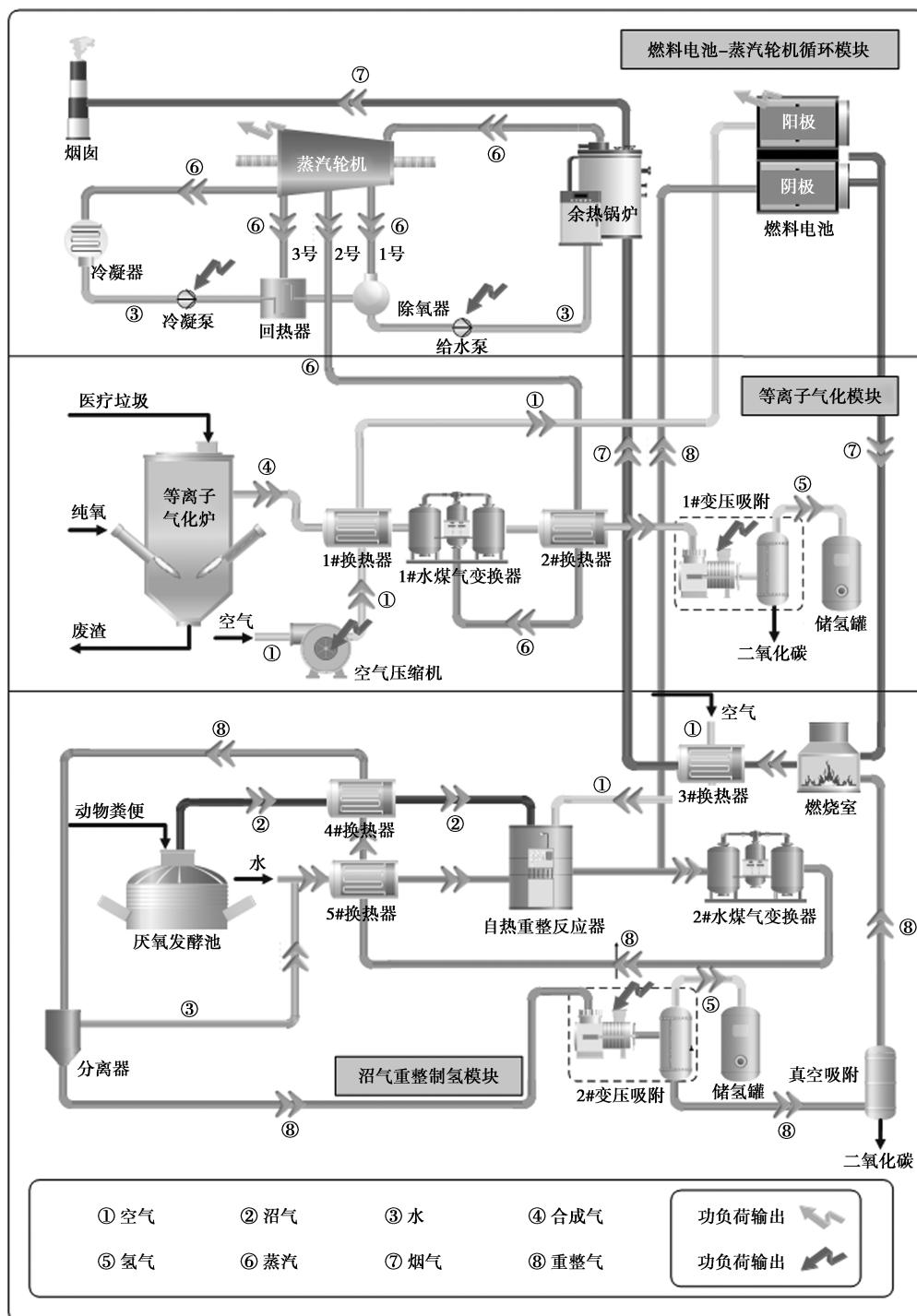


图 1 基于医疗废物和沼气的零碳排放制氢系统示意图

用医疗废物的等离子体辅助加氢装置,第二部分是基于动物粪便厌氧消化产生沼气的制氢系统,第三部分是燃料电池-蒸汽轮机循环子系统,其中产生的电力正是氢气生产的分离、压缩和储存步骤所需的电力。

## 2 系统模拟

### 2.1 等离子汽化

首先医疗垃圾通入汽化炉在纯氧汽化剂的作用下发生等离子汽化,有机成分转化为合成气,无机成分完全熔化。由于医疗废物的有机成分主要由碳、氢和氧元素组成,等离子体汽化过程产生的优质合成气是制氢的优质原料。同时,医疗废物的无机成分在等离子体汽化的超高温条件下完全熔化,然后冷却固化成致密的玻璃化炉渣,可以作为建筑材料出售。本研究中所研究的医疗废物<sup>[8]</sup>,低位发热量为 15.72 MJ/kg。表 1 列出了医疗垃圾等离子体反应过程的详细操作参数。

表 1 等离子体汽化炉参数

项目	数值	项目	数值
医疗垃圾进料量/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.80	等离子炬	
氧气		热效率/%	86.00
进口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.29	耗功/MW	1.53
温度/℃	25.00	供氧耗功/MW	0.27
合成气		等离子体汽化效率/%	73.51
出口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	1.07		
温度/℃	851.00		

从汽化炉获得的合成气被输送到等离子体辅助氢气生产装置的第二部分,用于氢气生产、分离和纯化。合成气与过热蒸汽混合依次进入高温和低温水煤气变换反应器生成富氢气体。水煤气反应所需的过热蒸汽来自汽轮机循环子系统,节省了热损失,并在 2 个子系统之间形成了有效的耦合。低温水煤气变换反应器中排出的富氢气体通过分离器初步去除杂质 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub> 和 HCN。随后采用三级变压吸附装置进行进一步分离,得到高纯度氢气产品。富氢气体中的 CO<sub>2</sub> 在 11 MPa 的压力下被捕获和封存,实现了系统无碳排放的目标,最后制氢系统获得的产物详细结果如表 2 所示。

表 2 制氢系统获得的产物的详细结果

项目	数值	项目	数值
氢气		储存二氧化碳	
温度/℃	35.00	温度/℃	30.00
压力/MPa	3.03	压力/MPa	11.00
流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.09	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	1.11

### 2.2 沼气重整制氢

完整的沼气自热重整模拟模型在 Aspen Plus 中开发如图 2 所示,自热重整工艺通过调节进口原料气的比例,实现蒸汽重整与部分氧化工艺的有效结合,达到能量平衡的目的。3 种反应物流(沼气、空气和水)在进入反应器之前通过不同的热交换器加热以达到反应顺利进行的。

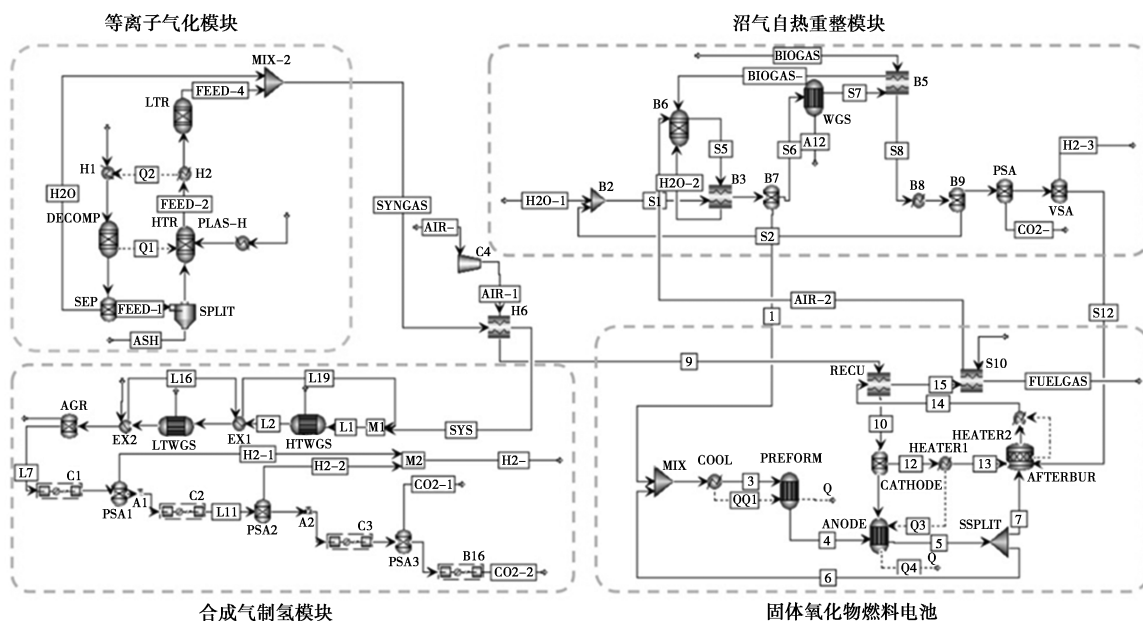


图 2 基于 Aspen Plus 的混合动力系统仿真模型

在本研究中基于热量平衡需求,反应器温度设定为 767℃,压力设定为 0.1 MPa,汽碳比设定为 2。在催化剂的作用下,原料在反应器中发生反应转化成合成气。随后,合成气分离成 2 股,第一股进入水煤气变换反应器进行反应使得氢含量最大化。从上述过程中获得的富氢气体干燥冷却后进入两级变压吸附/真空吸附设备捕集 CO<sub>2</sub>。氢气在变压吸附设备中被收集,纯度高达 99.99%。随后,其余气体被送往真空吸附设备以捕获 CO<sub>2</sub>。另一股被送往燃料电池与燃料电池阴极侧的余热空气发生电化学反应产生额外的电量。表 3 总结了沼气重整制氢子系统的详细操作条件和结果。

表 3 沼气自热重整制氢工艺参数

项目	数值
沼气/给水/空气	
进口温度/℃	25.00/25.00/25.00
进口压力/MPa	0.10/0.10/0.10
进口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	1.94/0.80/3.51
所制备的氢气	
出口温度/℃	58.00
出口压力/MPa	0.10
出口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.16
制氢率/%	0.86

此外,该过程沼气重整反应所利用的沼气来自于动物粪便的厌氧消化<sup>[9]</sup>。厌氧消化产生沼气的过程可以概括为:将从养牛场获得的初步处理过的动物粪便与水混合以 67.72 kg/s 的流速通过厌氧消化器,在 55℃ 的适宜温度下发生厌氧反应后连续产生沼气。

### 2.3 燃料电池

燃料电池-蒸汽轮机循环子系统是整个系统的主要发电设备。作为一种新的发电技术,固体氧化物燃料电池通过氢气和氧气之间的化学反应将化学能直接转化为电能。此外,系统的废热和未完全电化学反应的废气可以与燃气轮机或蒸汽轮机形成复合循环系统用于发电。SOFC 的详细操作条件和结果总结在表 4 中。

表 4 固体氧化物燃料电池参数

项目	数值
电压/V	0.72
电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	59.39

空气压缩机	
空气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	7.22
空气进口/出口温度/℃	25.00/164.00
空气进口/出口压力/MPa	0.10/0.30
压缩耗功/MW	0.61
电功输出/MW	3.72
燃料电池发电效率/%	49.16

### 2.4 蒸汽轮机循环

燃料电池排放的废气在燃烧室中充分燃烧产生高温烟气,随后被通入余热锅炉。余热锅炉从烟气中吸收热量产生高温蒸汽,这些蒸汽被送入汽轮机以产生 1.45 MW 的电力,烟气最后从烟囱排放到大气中。基于 EBSILON 的汽轮机循环仿真模型如图 3 所示。

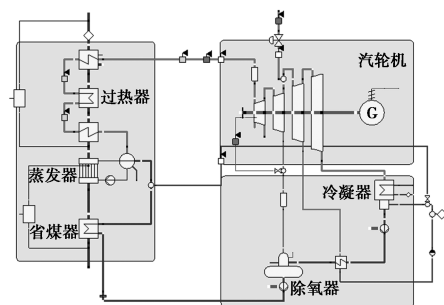


图 3 基于 EBSILON 的汽轮机循环仿真模型

## 3 系统分析方法

### 3.1 基本假设

为了确定所提出的系统的性能并评估新方案的优势,做出以下几个基本假设。

- (1) 系统处于稳定状态。
- (2) 空气的摩尔组成由 21% 的 O<sub>2</sub> 和 79% 的 N<sub>2</sub> 组成。
- (3) 环境温度和压力分别为 298.15 K 和 101.325 kPa。
- (4) 没有考虑周围环境的影响。
- (5) 化学反应是完全的,因此不考虑副作用和电极反应。

### 3.2 能量分析指标

对于集成系统,等离子体汽化将医疗废物转化为高质量的合成气。由于等离子体汽化效率是评价等离子体汽化器性能的关键指标,因此引入等离子体汽化效率( $\eta_{PGE}$ )来衡量等离子体汽化器的性能。

$$\eta_{\text{PGE}} = (m_{\text{syn}} \times LHV_{\text{syn}}) /$$

$$[m_{\text{MW}} \times LHV_{\text{MW}} + (P_{\text{tor}} + P_{\text{ASU}}) / (\eta_{\text{tor}} + \eta_e)] \quad (1)$$

式中,  $m_{\text{syn}}$  和  $m_{\text{MW}}$  为合成气流速和医疗废物进料速率, kg/s;  $LHV_{\text{syn}}$  和  $LHV_{\text{MW}}$  为合成气和医疗废物的低热值, kJ/kg; 并且  $P_{\text{tor}}$  和  $P_{\text{ASU}}$  为等离子体炬和空气分离器的电力消耗, kW;  $\eta_{\text{tor}}$  为等离子体炬效率, 选择为 86.00%<sup>[10]</sup>;  $\eta_e$  为电气效率, 假定为 39.00%<sup>[11]</sup>。

燃料电池-蒸汽轮机循环可提供混合系统的辅助功耗所需的电量。

$$P_{\text{aux}} = P_{\text{tor}} + P_{\text{ASU}} + P_{\text{AC}} + P_{\text{CM}} \quad (2)$$

$$P_{\text{SOFC}} + P_{\text{ST}} = P_{\text{aux}} \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{aux}}$  为辅助设备消耗的总功率, kW;  $P_{\text{tor}}$  为等离子体炬的耗电量, kW;  $P_{\text{ASU}}$  为空气分离器的耗电量, kW;  $P_{\text{AC}}$  为空气鼓风机消耗的功率, kW;  $P_{\text{CM}}$  为压缩机消耗的功率, kW;  $P_{\text{SOFC}}$  为燃料电池产生的净功率, kW;  $P_{\text{ST}}$  为蒸汽轮机循环产生的净功率, kW。

对于该创新系统的总能量效率, 定义如下:

$$\eta_{\text{En}, \text{H}_2} (\%) = [(m_{\text{H}_2} \times LHV_{\text{H}_2}) /$$

$$(m_{\text{MW}} \times LHV_{\text{MW}} + m_{\text{biogas}} \times LHV_{\text{biogas}})] \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $m_{\text{H}_2}$ 、 $m_{\text{MW}}$  和  $m_{\text{biogas}}$  分别为氢气、医疗垃圾和沼气的质量流量, kg/s;  $LHV_{\text{H}_2}$ 、 $LHV_{\text{MW}}$  和  $LHV_{\text{biogas}}$  分别为合成气、医疗废物和沼气的低热值, kJ/kg。

### 3.3 焓分析指标

焓是热力学第一定律和第二定律的结合, 以确定部件或系统的功潜力。使用焓分析可以准确分析整个系统过程中焓损失的原因、位置和程度, 对系统的进一步优化起着至关重要的作用。

医疗垃圾作为固态燃料所携带的焓可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$EX_{\text{MW}} = m_{\text{MW}} \times LHV_{\text{MW}} \times [1.0064 + 0.1519 \times (\omega_{\text{H}}/\omega_{\text{C}}) + 0.0616 \times (\omega_{\text{O}}/\omega_{\text{C}}) + 0.0429 \times (\omega_{\text{N}}/\omega_{\text{C}})] \quad (5)$$

式中,  $\omega_{\text{H}}$ 、 $\omega_{\text{C}}$ 、 $\omega_{\text{O}}$  和  $\omega_{\text{N}}$  分别为燃料中氢元素、碳元素、氧元素和氮元素含量。

沼气作为气体燃料所携带的焓  $EX_{\text{biogas}}$  可以表示为:

$$EX_{\text{biogas}} = m_{\text{biogas}} \times \sum \{n_i \times [ex_{i,\text{ph}} + ex_{i,\text{ch}} + RT_0 \times \ln(n_i / \sum n_i)]\} \quad (6)$$

式中,  $ex_{i,\text{ph}}$  和  $ex_{i,\text{ch}}$  分别为流股的物理焓和化学焓, kW。

该耦合系统的焓效率可以定义为:

$$\eta_{\text{ex}, \text{w}} = P_{\text{w}} / EX_{\text{w}} \quad (7)$$

式中,  $EX_{\text{w}}$  为医疗废物和沼气的总焓输入, kW;  $P_{\text{w}}$  是  $\text{H}_2$  的总焓输出, kW。

### 3.4 经济性分析指标

为探究系统的经济效益和应用前景, 本文中采用动态投资回收周期 (DPP) 和净现值 (NPV) 来评价系统的经济性。理论上来说, 项目的 DPP 越短, NPV 越高, 经济性表现越佳<sup>[13]</sup>。

$$\sum_{y=1}^{\text{DPP}} (C_i - C_o) / (1 + r_{\text{dis}})^y = 0 \quad (8)$$

$$\text{NPV} = \sum_{y=1}^n (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) / (1 + r_{\text{dis}})^y \quad (9)$$

式中,  $k$  为项目的生命周期, a;  $y$  表示项目生命周期的第  $y$  年;  $C_{\text{in}}$  和  $C_{\text{out}}$  分别为在第  $y$  年的现金流入值和流出值, 元;  $r_{\text{dis}}$  为项目折旧率。

## 4 结果与分析

### 4.1 能量分析

本研究的主要目标是提高医疗废物和动物粪便的利用率, 以进一步提高制氢率。在本文中对新系统进行了热力学和经济分析, 以验证该方案的可行性和优越性。系统集成后, 保持 0.8 kg/s 的医疗废物进料速率、0.29 kg/s 的纯氧进料速率和 1.94 kg/s 的沼气进料速率保持不变, 混合系统的总产氢速率为 0.25 kg/s, 由 2 部分组成, 等离子汽化模块的产氢速率为 0.09 kg/s, 沼气重整模块的产氢速率为 0.16 kg/s。燃料电池-蒸汽轮机循环部分的发电量总共为 4.71 MW, 其中燃料电池为 3.26 MW, 蒸汽轮机为 1.45 MW, 能够满足辅助设备的耗功。混合系统的总效率达到 63.20%。

### 4.2 焓分析

基于热力学第二定律的焓分析是详细分析焓破坏原因和位置的良好工具。表 5 总结了系统的焓分析结果, 系统的总焓损失为 20.30 MW, 总焓效率计算为 59.15%。在各个子系统中, 沼气重整制氢子系统造成的焓破坏最为广泛, 约为 8.52 MW, 自热重整器在各组件中具有最大的不可逆性。同时, 由于燃料电池-蒸汽轮机循环混合子系统中化学能的变化, 焓破坏高达 5.29 MW。从焓破坏的角度来看, 燃料电池-蒸汽轮机循环子系统已成为整个系统中第二重要的组成部分。

### 4.3 经济性分析

为了评估该提案的经济可行性, 从经济角度对该系统进行了全面评估。假设项目年运行时间为 7 200 h, 建设周期为 2 a, 运营周期 23 a。该创新设计的总成本由 2 部分组成, 资本投资成本和维护运营成本。采用函数估算法和成本放缩法估算出整个系统的设备采购成本为 16 176.09 万元, 维护和运

营成本估计为每年总资本成本的 10%，折现率假设为 10%。处理医疗废物和动物废物的价格分别为 3 000、66.86 元/t，废渣的售卖价格为 354.74 元/t。来自医疗废物和动物废物处理的年收入分别为 6 220.80 万元和 2 174.93 万元，炉渣销售的年收入为 13.91 万元。此外氢气售卖每年带来 13 618.94 万元的收入。通过计算得知该系统可以在 3.25 a 内收回初始成本，新方案的净现值预计在 25 a 的使用寿命内达到 80 752.48 万元。它证实了该提案的经济可行性，并在短期内提供可观的货币回报。

## 5 结论

本研究设计了一种利用医疗废物和沼气的零碳制氢系统，实现了生产清洁能源氢气的目标，并且将氢气作为能源储存媒介的技术。该创新系统有效处理大量废物制取氢气并且实现零碳排放。基于仿真系统模型，对混合系统进行了热力学和经济性评价，得出的主要结论如下。

(1) 该方案解决了医疗废物和动物废物分离处理带来的能量损失和散热问题，各子系统紧密耦合，新概念的总效率达到 63.20%。从热力学角度表明，新概念是相当可行和有效的。

(2) 该系统的焓损失为 20.30 MW，总焓效率为 59.15%。根据对各子系统的详细分析，沼气自热重整引起的焓损失的最大组成部分约为 8.52 MW。焓分析的结果有助于进一步优化新系统的设计。

(3) 从经济分析中可以看出，该系统可以在 3.25 a 收回初始成本，新方案的净现值预计在 25 a 的使用寿命内达到 807 524.84 元。证实了该方案的经济可行性，并在短期内提供了可观的收益回报。

## 参考文献

- [1] 杨俊杰,唐晴,赵振希.新冠肺炎疫情下 Y 省民航机场医疗废物处置现状与分析[J].中国卫生法制,2023,31(2):83-87.
- [2] 庄向婷,强敏敏,叶超.集约化养猪场粪污堆肥对菜地土壤污染的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):462-467.
- [3] 竹涛,薛泽宇,王若男,等.热等离子体处理前后垃圾飞灰中重金属浸出浓度的变化及二噁英分布特性的差异[J].环境工程学报,2021,15(6):2072-2079.
- [4] 陈逸文,赵晋斌,李军舟,等.电力低碳转型背景下氢储能挑战与展望[J].发电技术,2023,44(3):296-304.
- [5] Kuo P, Illathukandy B, Wu W, *et al.* Energy, exergy, and environmental analyses of renewable hydrogen production through plasma gasification of microalgal biomass[J]. Energy, 2021, 223:120025.
- [6] Bhattacharya A, Das A, Datta A. Exergy based performance analysis of hydrogen production from rice straw using oxygen blown gasification[J]. Energy, 2014, 69:525-533.
- [7] Di Marcoberardino G, Foresti S, Binotti M, *et al.* Potentiality of a biogas membrane reformer for decentralized hydrogen production[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 129:131-141.
- [8] Gutiérrez Ortiz F J, Serrera A, Galera S, *et al.* Methanol synthesis from syngas obtained by supercritical water reforming of glycerol[J]. Fuel, 2013, 105:739-751.
- [9] Curry N, Pillay P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment[J]. Renew Energ, 2012, 41:200-209.
- [10] Huang H, Tang L. Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology[J]. Energ Convers Manage, 2007, 48:1331-1337.
- [11] Sansaniwal S K, Sharma V, Mathur J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:1576-1601.
- [12] Pan P, Zhang M, Peng W, *et al.* Thermodynamic evaluation and sensitivity analysis of a novel compressed air energy storage system incorporated with a coal-fired power plant[J]. Entropy, 2020, 22(11):1316.
- [13] Peng W, Chen H, Liu J, *et al.* Techno-economic assessment of a conceptual waste-to-energy CHP system combining plasma gasification, SOFC, gas turbine and supercritical CO<sub>2</sub> cycle[J]. Energ Convers Manage, 2021, 245:114622. ■
- [14] 饶何隆,马国光.天然气乙烷回收关键参数分析研究[J].北京化工大学学报:自然科学版,2022,49(1):35-43.
- [15] 朱倩谊,易驰,杨雨林,等.高含二氧化碳凝析气乙烷回收工艺改进[J].天然气化工:C1 化学与化工,2021,46(3):107-113,127.
- [16] 王志国.天然气深冷分离装置的焓分析及用能改进建议[J].化学工程,2006,(2):71-74.
- [17] Kelly S, Tsarsaronis G, Morosuk T. Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts[J]. Energy, 2009, 34(3):384-391.
- [18] Roberts M J, Repasky J M. Method and apparatus for producing products from natural gas including helium and liquefied natural gas: US07437889B2[P]. 2007-01-08.
- [19] Vatani A, Mehrpooya M, Palizdar A. Energy and exergy analyses of five conventional liquefied natural gas processes[J]. Int J Energy Res, 2014, 38(14):1843-1863.
- [20] 杨雨林,陈小榆,何杰,等.乙烷回收改进流程用能分析[J].石油与天然气化工,2019,48(4):61-68.
- [21] 丁玲.TLM 气田天然气深度凝液回收工艺技术研究[D].成都:西南石油大学,2016.
- [22] 蒋洪,高鹏,胡成星,等.富气乙烷回收流程制冷工艺的分析比选[J].现代化工,2021,41(10):215-220. ■

(上接第 232 页)