

基于医疗垃圾汽化和燃料电池的新型发电系统性能分析

周 专¹, 张 锋¹, 陈伟伟², 边家瑜², 吕佳阳³, 陈 衡^{3*}

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3. 热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要:为了提高系统的能量利用效率,提出了一种由医疗垃圾汽化(MSG)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、超临界二氧化碳循环(S-CO₂)和有机朗肯循环(ORC)组成的新型电力系统方案。医疗垃圾汽化产生的合成气与甲烷混合后进入SOFC子系统,为SOFC系统提供能量;经过SOFC系统后排放的尾气依然具有很高的温度,经过后燃室的充分燃烧,释放剩余未反应物质的化学能,进一步提高排烟温度;之后利用S-CO₂和ORC组合成的底循环系统对系统余热进行充分利用,以提高系统的整体性能。充分考虑系统热力学方面的关键参数以及系统的经济效益。结果表明,耦合的系统可以实现36.72 MW的电力输出,能量效率为66.34%,烟效率为64.07%。SOFC的烟损最大,占总烟损的21.64%。只需4.15年就能收回耦合系统的建设投资,在20年的使用寿命中获得1772.38万美元的净现值。

关键词:汽化炉;燃料电池;S-CO₂循环;ORC循环;多系统耦合

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)09-0208-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.09.042

Thermodynamic and economic analysis on a new power generation system based on medical wastes gasification and fuel cell

ZHOU Zhuan¹, ZHANG Feng¹, CHEN Wei-wei², BIAN Jia-yu², LV Jia-yang³, CHEN Heng^{3*}

(1.State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2.Economic and Technical Research

Institute of Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 3.Beijing Key Laboratory of Emission

Surveillance and Control for Thermal Power Generation, North China Electric Power University,

Beijing 102206, China)

Abstract:In order to improve the energy utilization efficiency of the system, a novel power system scheme is proposed, which consists of medical wastes gasification (MWG), solid oxide fuel cell (SOFC), supercritical carbon dioxide cycle (S-CO₂), and organic Rankine cycle (ORC). The syngas generated from the gasification of medical wastes is mixed with methane, and enters together the subsystem of SOFC to provide energy for the SOFC system. After passing the SOFC system, the exhaust gas still has a high temperature and is fully combusted in the afterburning chamber, releasing the chemical energy in the remaining unreacted substances and further increasing the temperature of exhaust gas. Then, the bottom circulation system composed of S-CO₂ and ORC is employed to fully utilize the residual heat of the system, in order to improve the overall performance of the system. The key parameters in terms of system thermodynamics, as well as the economics of the system, are fully considered. The results show that the proposed system can achieve a power output of 36.72 MW with an energy efficiency of 66.34% and a heat-power efficiency of 64.07%. SOFC contributes the largest heat and power loss, accounting for 21.64% of the total heat and power loss. The construction investment of the coupled system can be returned in only 4.15 years, and a NPV of 17.723 8 million US \$ is obtained over the 20-year service life.

Key words: gasifier; solid oxide fuel cell; S-CO₂ cycle; ORC cycle; multi-system coupling

随着社会的发展,如空气污染、气候变化、粮食和能源短缺等诸多问题,将变得越来越严重,其中能源短缺最为紧迫。因此,构建以可再生能源为主体的绿色、低碳、清洁的能源体系已成为未来世界大部分国家的选择^[1]。根据国际能源署的数据,预计2030年能源需求将增长50%^[2]。为了应对这些挑战,人们开始重视可再生资源的回收和再利用^[3]。

生物质废弃物是一种高效、清洁、低成本的能源,可以帮助缓解化石能源的短缺和环境污染问题^[4]。由于新冠肺炎的全球流行,医疗设施产生的医疗废物量不断增加,大量的医疗废物会对公众健康产生各种严重影响,处理医疗废物的常用方法包括气体灭菌、化学灭菌、微波处理、热灭活和辐照。然而,传统的处理方法并没有充分利用医疗废物中的能量,

收稿日期:2022-11-01;修回日期:2023-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52276006)

作者简介:周专(1987-),男,硕士,高级工程师,主要从事清电网规划与系统分析,1319124529@qq.com;陈衡(1981-),男,博士,副教授,研究方向为多能互补系统集成能源系统技术经济性、电力大数据分析 & 智能优化,通讯联系人, heng@ncepu.edu.cn。

最终造成了大量的资源浪费^[5]。

国内外学者对医疗垃圾汽化开展了大量研究。刘汉桥等^[6]考察了医疗垃圾焚烧灰电弧炉熔渣用作水泥参合料的可行性,减少了医疗垃圾焚化带来的环境问题。Erdogan 等^[7]重点研究了医疗垃圾的不同当量比和进料速率对合成气生产的影响。彭维珂等^[8]探索了基于医疗垃圾等离子汽化的燃料电池-燃气轮机热电联产系统,并对创新系统的常规方案和零碳方案进行了热力学和经济学分析,结果表明该系统具有较好的热力学性能以及经济性。

基于以上背景,本文中提出一种由医疗垃圾汽化(MSG)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、超临界二氧化碳循环(S-CO₂)和有机朗肯循环(ORC)组成的新型电力系统方案。医疗垃圾汽化产生的合成气与甲烷混合后进入 SOFC 子系统,为 SOFC 系统提供能量。SOFC 系统排放的尾气中含有一部分未完全反应的物质,经过后燃室的充分燃烧,释放剩余未反应物质的化学能,进一步提高排烟温度,之后利用 S-CO₂ 和 ORC 组合成的底循环系统对系统余热进行充分利用,以提高系统的整体性能。

1 系统描述

医疗垃圾汽化(MSG)技术是利用热化学反应将原料中的有机成分转化为小分子的 CO、H₂ 及烃类等清洁能源的技术。汽化产气热值一般较高,经增压处理后即可用作工业燃气,又可用作民用燃气,亦可进一步合成液体燃料。将热解汽化技术应用于医疗垃圾的处理,既能实现医疗垃圾的减量处理,又能实现资源化利用。SOFC 的工作原理是利用阳极表面吸附持续通入的燃料气体(H₂、CO、CH₄等),并通过阳极的多孔结构扩散到阳极与电解质的界面。同时,在阴极一侧的多孔结构吸附持续通入的氧化剂(空气),使得 O₂ 得到电子成为 O²⁻,在化学势的作用下 O²⁻ 进入电解质作用的固体阳离子导体,由于浓度梯度引起扩散,最终到达固体电解质与阳极的界面,与燃料气体发生反应,失去的电子通过外电路回到阴极,形成电流。S-CO₂ & ORC 是以 CO₂ 和低沸点有机物为工质,从余热流中吸收热量,生成具有一定压力和温度的蒸汽,蒸汽进入透平机通过机械膨胀做功。

图 1 显示了耦合系统的原理图。该系统由 4 个子系统组成,即 MSG 子系统、SOFC 子系统、S-CO₂ 子系统和 ORC 子系统。医疗垃圾汽化得到的合成气和 CH₄ 混合作为原料,为 SOFC 提供能量。为了

提高能源效率,来自 SOFC 的高温废气经过后燃室的充分燃烧后,释放残余化学能,进一步提高排气温度,来为 S-CO₂ 和 ORC 联合系统提供能量,最后剩余的能量为进入 SOFC 的空气提供预热。

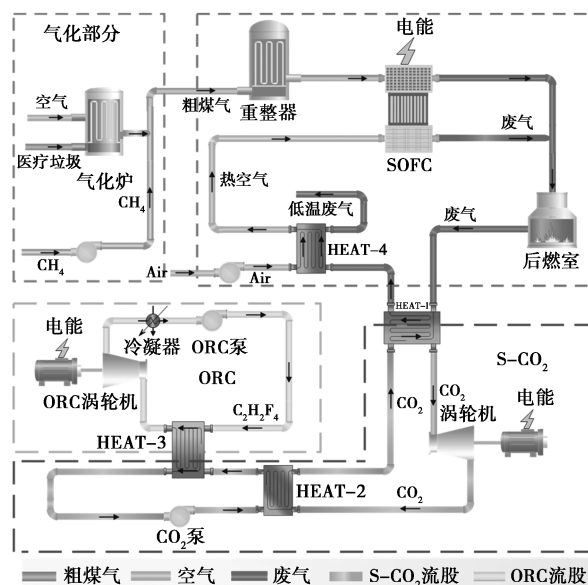


图 1 概念性的医疗垃圾转化为能源的混合系统示意图

2 系统分析方法

2.1 系统建模

采用 Aspen Plus V11 作为仿真软件。为了保证结果的准确性,根据以往的研究结果,本研究对不同子系统的模拟采用了不同的状态方程。在 MSG 和 SOFC 子系统中使用 Peng-Robinson 状态方程,在 S-CO₂ 和 ORC 部分使用 REFPROP 状态方程来修正系统。新集成系统的仿真模型如图 2 所示,包含 4 个部分,即医疗垃圾汽化子系统、SOFC 子系统、S-CO₂ 子系统和 ORC 子系统。

医疗垃圾在反应器中被裂解(汽化),产物是元素单体和焦油(成分是苯)。之后,一部分碳、焦炭和灰分在分离器中分离,其余的裂解产物进行空气氧化,最后进行水气反应,得到汽化合成气。

进入 SOFC 的合成气与来自阳极的反应产物(主要成分 H₂O 和 CO₂)以及未完全反应的合成气(H₂ 和 CO)混合,并通过喷射器送入重整器。使用 Aspen Plus 的 Design-spec 功能计算出所需的 S/C 比率值,然后使用 Fsplitter 模块(SPLIT)将循环气体(流股 6)与阳极废气(流股 5)分离。另一个 Design-spec 用于计算所需的进口新鲜燃料压力 P_{fresh} ,以驱动阳极气体的循环。计算通常是基于假定的喷油器

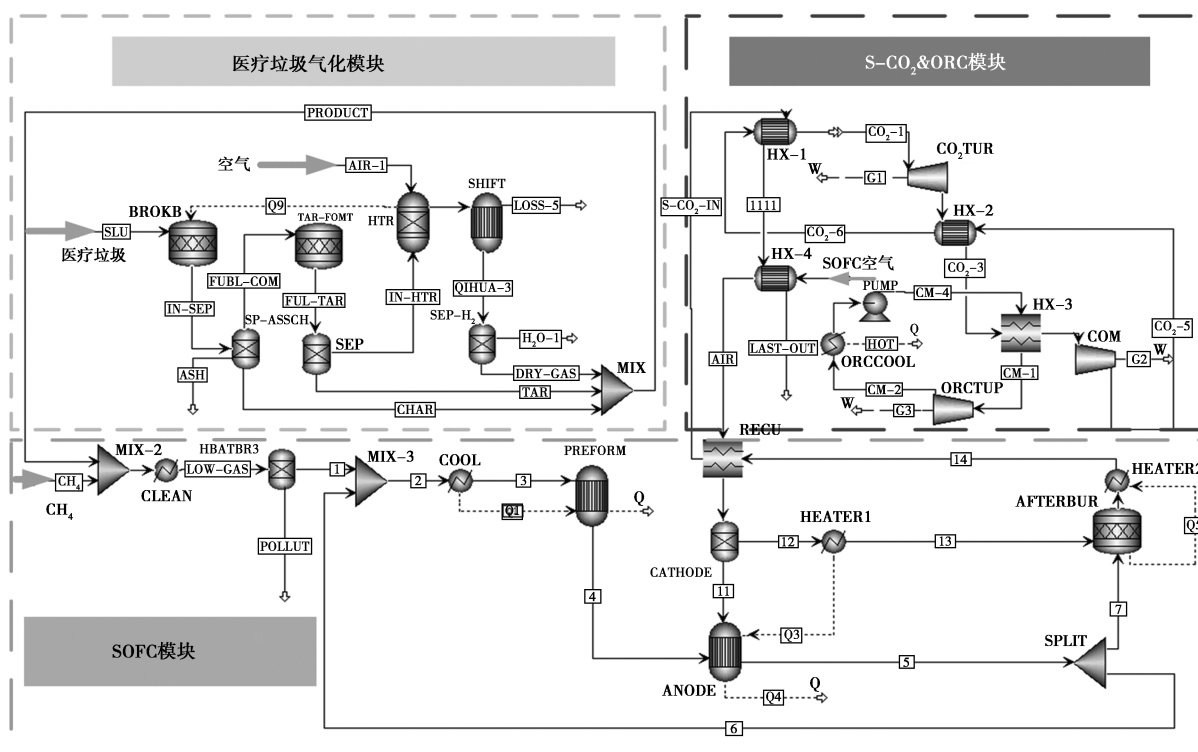


图 2 耦合系统的仿真模型

新鲜燃料压力比 $P_{fresh} = P_{cell}$ 。

S-CO₂ & ORC 子系统是系统余热利用的重要组成部分。来自 SOFC 的废气在后燃室中充分燃烧,形成高温烟气,然后通过一个热交换器(HE-1)为 S-CO₂ 和 ORC 系统提供能量,驱动发电机发电,废气通过冷凝器后进入 ORC 系统的泵(Pump)被提供压力,然后完成循环。

通过仔细研究上述论文和其他现有研究,基于热力学第一和第二定律建立了耦合系统的动态模型,并进行参数分析,考察了主要设计参数变化对系统的影响,分析了能量转换效率、烟效率和系统经济性。

2.2 能量分析

在医疗垃圾汽化系统中,评价汽化性能的最终指标是冷煤气效率(CGE)。公式(1)的计算表明,CGE 可以从合成气中的能量与原料的比例来计算^[9]。

$$CGE = (m_{syngas} \times LHV_{syngas}) / (m_{fuel} \times LHV_{fuel}) \quad (1)$$

式中, m_{syngas} 为合成气的质量流量; m_{fuel} 为原料的质量流量; LHV_{syngas} 为合成气的低热值; LHV_{fuel} 为原料的低热值。

SOFC 输出的电力是直流电,通常在 SOFC 中安装一个直流-交流发射器,将直流电转换为交流电,以便连接电网。

$$P_{SOFC} = I \times V_{SOFC} \times \eta_{DC/AC} \quad (2)$$

进入系统的一部分能量将转化为燃气轮机和电池堆的动力,另一部分将作为热损失和辅助设备损失。电池堆的发电效率计算如下:

$$\eta_{SOFC} = P_{SOFC} / (m_{fuel} \times LHV_{fuel}) \quad (3)$$

式中, m_{fuel} 为输入燃料的流量, kg/s; LHV_{fuel} 为燃料的低位发热量, kJ/kg^[10]。

S-CO₂ 和 ORC 底层循环的净效率(η_{bottom})表述如下:

$$\eta_{bottom} = (P_{S-CO_2} + P_{ORC}) / (Q_{He} + P_{CM} + P_{OM}) \quad (4)$$

式中, P_{S-CO_2} 和 P_{ORC} 为 S-CO₂ 和 ORC 涡轮机的输出功率, MW; Q_{He} 为 S-CO₂ 子系统和 SOFC 系统排气换热的吸收热量, MW; P_{CM} 和 P_{OM} 分别为 S-CO₂ 压缩机和 ORC 压缩机的压缩机功率消耗, kW。

2.3 烟分析

为了进一步了解能量的转化,所以引入了烟的概念。假设稳定状态为 0.1 MPa 和 25℃,忽略动能和势能,只考虑物理和化学烟如式(5)所示^[11]。

$$Ex_{total} = Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (5)$$

式中, Ex_{ph} 为物理烟; Ex_{ch} 为化学烟。

$$Ex_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (6)$$

$$Ex_{ch} = \sum_i n_i \times ex_i^{ch} \quad (7)$$

式中, T_0 为 298.15 K 的参考温度; H 和 S 为给定条件下混合物的焓和熵; H_0 和 S_0 为参考状态(298.15 K

和 0.101 3 MPa) 下的焓和熵; n_i 为组分 i 的摩尔流量; ex_i^{ch} 为组分 i 的标准化学焓。

$$Ex^{\text{fuel}} = \beta_{\text{biomass}} \times m \times LHV \quad (8)$$

式中, LHV 为燃料的低热值; β 为乘法系数, 医疗垃圾的公式可以表示为^[11]:

$$\beta_{\text{sludge}} = 1.006 4 + 0.151 9(z_{\text{H}}/z_{\text{C}}) + 0.061 6(z_{\text{O}}/z_{\text{C}}) + 0.042 9(z_{\text{N}}/z_{\text{C}}) \quad (9)$$

式中, z_{C} 、 z_{H} 、 z_{O} 和 z_{N} 为燃料的元素质量分数。

混合动力系统的焓效率定义为:

$$n_{\text{ex}} = Ex_{\text{power}} / \sum_i Ex_i^{\text{fuel}} \quad (10)$$

焓平衡是指耗能和焓损之间的平衡:

$$\sum Ex_{\text{in}} + W = \sum Ex_{\text{out}} + \sum Ex_{\text{loss}} \quad (11)$$

式中, $\sum Ex_{\text{in}}$ 为输入焓; $\sum Ex_{\text{out}}$ 为输出焓; $\sum Ex_{\text{loss}}$ 为每个内部系统的焓损; W 为外部功。

2.4 经济评价标准

动态投资回收期 (DPP, a) 是考虑到项目投资的时间价值后, 项目回收所需的时间, 表示如下^[12]:

$$\sum_{y=1}^{\text{DPP}} (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) / (1 + i_{\text{dis}})^y = 0 \quad (12)$$

式中, y 为项目周期内的年号; C_{in} 和 C_{out} 为 y 年的现金流入和现金流出, 美元; i_{dis} 为贴现率。

净现值 (NPV, 美元) 用于表示项目生命周期内的累积净利润, 计算方法如下^[13]:

$$\text{NPV} = \sum_{y=1}^{b_{\text{con}}+b_{\text{eco}}} (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) / (1 + i_{\text{dis}})^y \quad (13)$$

式中, b_{con} 为建设期, a ; b_{eco} 为经济期, a_0 。

3 结果和讨论

3.1 耦合系统的参数

以杭州市某典型医疗垃圾作为耦合系统的燃料, 主要包括碳水化合物和灰分, 作为混合系统的医疗垃圾汽化子系统的原料, 所用原料的工业分析和元素分析结果见表 1。

表 1 医疗垃圾的工业分析和元素分析

项目		比率/%
工业分析	M	7.04
	V	882.37
	Fe	8.70
	Ash	1.89
元素分析	C	44.61
	H	6.56
	O	39.63
	N	0.20
	S	0.07
	净热值	

所选用的医疗垃圾的含水率为 7.04%, 低热值为 15.57 MJ/kg。以 1 kg/s 的医疗垃圾为原料, 在汽化剂 (空气) 为 1.229 kg/s 的情况下, 该系统最终可生产 1.27 kg/s 的合成气。汽化器产生的合成气含有 6.4% 的 H_2 、6.1% 的 CO 和 9.3% 的 CH_4 。净热值达到 9.94 MJ/kg, 可实现的冷煤气效率为 83.2%。

医疗垃圾汽化产生的合成气与甲烷混合后一起经过重整反应后进入燃料电池的阳极, 增加了 SOFC 的 H_2 含量, 进入阳极的混合气体温度为 400°C。耦合系统燃料电池的基本参数设置见表 2。

表 2 SOFC 系统中的基本工作条件以及一些关键参数的设置

项目	数值
燃料进口成分/%	H_2 23.10, CO 62.10, CH_4 1.19, C_6H_6 0.51, N_2 13.07
SOFC 运行温度/°C	910
SOFC 运行压力/MPa	0.108
输出能量 (DC)	98.06
反应面积/ m^2	0.96 (1500 cells)
SOFC 排气温度 (流股 13 和流股 5)/°C	910
输入空气温度 (流股 9)/°C	630
输入燃料温度 (流股 1)/°C	704
后燃室效率/%	100
DC/AC 转化效率/%	92
总体燃料利用率/%	85
喷射器新鲜燃料压力比	3
SOFC 内部的压力下降	0
SOFC 热损失/%	2

燃料电池废气中含有少量的可燃物, 在后燃烧室中燃烧后, 废气温度被提高到 751°C。之后, 与 S-CO_2 & ORC 子系统发生热交换, 122 MW 的能量进入子系统。

3.2 能量分析

为了更直观地显示能量流, 使用 E-Sankey 软件绘制了系统能流图, 如图 3 所示。在复合系统中, 医疗垃圾和 CH_4 共同为系统提供 60.95 MW 的能量。医疗垃圾 (15.57 MW) 进入汽化炉, 被处理成合成气 (13.79 MW), 排放污染物 (0.4 MW), 汽化效率为 88.57%。之后, 与 CH_4 (45.38 MW) 混合被送入 SOFC 的阳极, 热交换产生的高温空气 (23.64 MW) 被送入阴极, 最终 SOFC 产生 33.78 MW 的电力。 S-CO_2 & ORC 系统分别产生 4.61/2.05 MW 的电力。热交换后剩余的能量 24.50 MW 为进入燃料电池的

空气加热。该系统的整体热电效率为 66.34%。

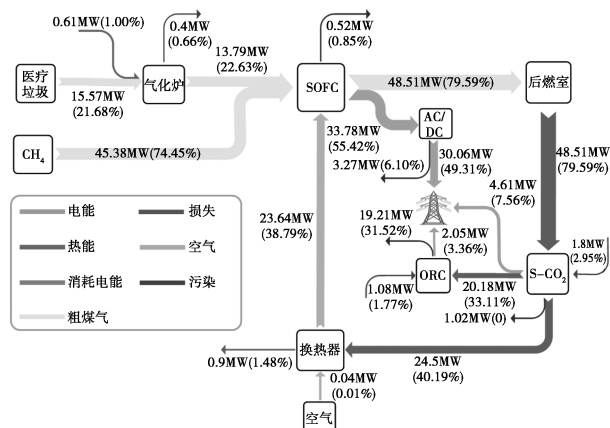


图 3 耦合系统的能流图

3.3 焓分析

焓被定义为热系统质量的可用能量,用来确定给定能量中可能在给定状态下做有用功的那一部分。因此,如图 4 所示,所提出的方案是根据分析出来的焓进行分析的。

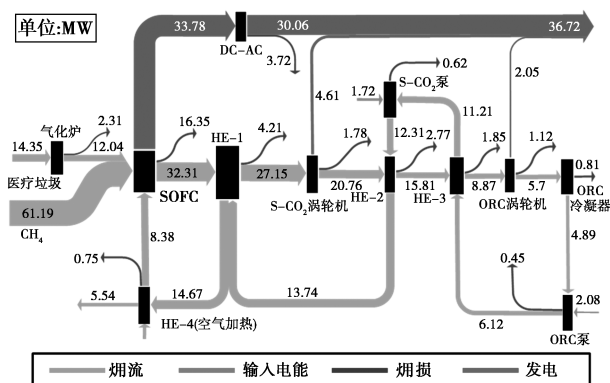


图 4 耦合系统的焓流图

医疗垃圾(18.99%)和 CH₄(81.01%)的能量之和被认为是总的能量输入(100%)。图 4 中的数据可以看出,该系统输入医疗垃圾和 CH₄ 的化学能为 75.54 MW。该混合系统的总体焓效率为 64.07%。

3.4 经济分析

如表 3 所示,该系统的总投资为 1 165.56 万美元,预计系统可生产 257 040 MWh 的电力,每年带来 550.0 万美元的收入。计算结果显示,该系统每年需要的设备维护费用为 116.56 万美元,每年的运输费用为 23.49 万美元,每年的净现金流可以达到 2 573.07 万美元。在系统寿命为 20 a,投资成本可在 4.15 a 内收回,最终 NPV 可达到 1 772.38 万美元。上述计算结果表明,这个概念系统具有良好的经济可行性。

表 3 系统各组成部分的投资成本

项目	费用(k \$)
气化单元	7109.02
SOFC 单元	
反应单元	1132.70
辅助系统	113.27
外壳	15.10
DC-AC	2349.67
S-CO ₂	
换热器-1	29.98
换热器-2	0.06
汽轮机	162.07
压缩机	62.50
ORC	
换热器-3	0.16
泵	1.20
汽轮机	572.52
凝汽器	3.00
换热器-4(空气预热)	104.38
合计	11655.63

4 结论

(1) 医疗垃圾和甲烷总共为系统提供了 60.95 MW 的能量,混合系统可产生 36.72 MW 的净电量,净发电效率为 66.34%。

(2) 该新系统的焓效率能达到 64.07%。总焓损为 27.14 MW,占总能量的 35.93%。其中,SOFC 的焓损最大,占了 21.64%。

(3) 经济分析表明,该新型系统的投资较低,为 1 165.56 万美元,在 20 a 的寿命期内,净现值为 1 772.38 万美元,具有较高的经济效益。同时,新方案的动态回收期只有 4.15 a(包括 2 a 的建设周期)。因此,新的设计在经济方面也是非常合适的。

参考文献

- [1] 唐云霓, 闫如雪, 周艳玲. 碳中和愿景下能源政策的结构表征与优化路径[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2023, 63(1): 1-14.
- [2] Ortiz-Sanchez M, Cardona Alzate C A. Analysis of the routes for biomass processing towards sustainable development in the conceptual design step: Strategy based on the compendium of bioprocesses portfolio[J]. Bioresource Technology, 2022, 350: 126852.
- [3] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [4] 魏一鸣, 韩融, 余碧莹, 等. 全球能源系统转型趋势与低碳——PCC 第六次评估报告的证据[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2022, 24(4): 0163-26.
- [5] 严建华, 祝红梅, 蒋旭光, 等. 医疗废物焚烧中 Cd/Cu/Pb/Zn 的分布研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, (10): 1812-1816.
- [6] 刘汉桥, 魏国侠, 张曙光, 等. 医疗垃圾焚烧灰电弧炉熔渣的水化特性[J]. 天津大学学报, 2010, 43(4): 339-343.

(下转第 216 页)

年 9 月 8 日进行了 3 次反吹扫。

2021 年 4 月至今,装置先后对 R-101 进行了 4

次反吹扫操作,每次反吹扫操作前后 R-101 的主要工艺条件变化如表 2 所示。

表 2 R-101 反吹扫前后主要工艺条件

项目	第一次 反吹前	第一次 反吹后	第二次 反吹前	第二次 反吹后	第三次 反吹前	第三次 反吹后	第四次 反吹前	第四次 反吹后
R-101 第一床层压降/MPa	0.080	0.130	0.088	0.107	0.084	0.103	0.429	0.103
R-101 第二床层压降/MPa	0.315	0.045	0.319	0.057	0.277	0.061	0.048	0.070
R-101 第三床层压降/MPa	0.093	0.072	0.072	0.070	0.073	0.071	0.070	0.070
R-101 床层总压降/MPa	0.488	0.247	0.479	0.234	0.434	0.235	0.547	0.243
R-101 顶气相外排量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	850	2800	2500	2800	1050	1550	650	1600
R-101 床层平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	360.5	338.5	350	355.5	368.5	370	389	389
与上次反吹扫间隔时间/d	—		172		142		193	

从 R-101 4 次反吹扫的情况分析,每次反吹扫均可使反应器床层总压降下降 0.2 MPa 以上,其中反吹扫氢气流量越大、反吹扫时间越长且在增加扰动的情况下反吹扫效果越好。在同等工况下,每次反吹扫后装置可以继续正常运行 4 个月以上,且随着操作经验的积累,预计装置继续运行时间可以达到 7 个月以上,有效延长了装置运行周期。

4 结论

(1) 采用连续液相加氢技术的柴油加氢装置在反应器压降升高后可以采用反应器反向吹扫的新技术方案。该方案可有效降低反应器压降,解决了连续液相加氢反应器压降升高导致装置无法正常运行或必须更换催化剂的技术难题。在催化剂活性许可的情况下,采用该技术方案可使连续液相加氢装置运行周期延长 2 年以上,使用效果良好,值得其他同类装置参考。

(2) 理论上只要催化剂具备足够的加氢脱硫活性,液相加氢装置可以反复、多次进行反应器反向吹扫操作,每次反向吹扫可维持装置继续运行 4 个月以上。但是反应器反向吹扫操作过程应谨慎地进行,需严格控制相关操作参数,避免出现反应器内构件脱落、催化剂性能受损失等异常情况。

(3) 上流式反应器原则上都可以采用反向吹扫技术,可在其他装置上推广使用;建议相关研究、设计部门持续改进上流式反应器的设计并扩大应用范围,从而有效解决固定床反应器压降升高后不得不停工撤头或更换催化剂的固有难题。

(4) 在连续液相柴油加氢反应器压降升高后,反应循环泵的运行将受到极大的限制,甚至无法投用。根据该装置实际经验,反应循环泵停运后,新鲜进料在反应期内的停留时间降低 60%,在反应器入口温度下降 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,仍然可以保持相同的脱硫深度,装置在高负荷运行时仍可保证产品质量合格,但是将会加速催化剂的失活。

(5) 如果条件允许,建议尽量不要安排焦化汽油、焦化柴油、催化汽油、催化柴油等二次油进液相柴油加氢装置加工,从而能够更充分发挥液相加氢的技术优势。

参考文献

- [1] 李农,李海峰,赵新全,等.液相加氢技术的应用现状[J].化工管理,2021,(6):66-67.
- [2] 李桂军,黄宝才.连续液相柴油加氢装置长周期运行和效果分析[J].炼油技术与工程,2016,46(2):31-35.
- [3] 韩昊,张继昌,火玉龙.140 万吨/年柴油加氢反应器压降增大的原因分析及对策[J].化学工程与装备,2021,(2):22-23. ■
- [4] green power ships[J].Thermal Science and Engineering Progress, 2022,32:101342.
- [5] Campanari S.Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module[J].Journal of Power Sources, 2001,92:26-34.
- [6] Hou Q,Zhao H,Yang X.Economic performance study of the integrated MR-SOFC-CCHP system[J].Energy (Oxford), 2019,166:236-245.
- [7] Erdogan A A, Yilmazoglu M Z. Plasma gasification of the medical waste [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 29108-29125.
- [8] 彭维珂,李童宇,武浩然,等.基于医疗垃圾等离子气化的零碳高效热电联产系统性能分析[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3135-3151.
- [9] Di Fraia, Massarotti N, Uddin M R, et al. Conversion of Sewage Sludge to combined heat and power: Modeling and optimization[J]. Smart Energy, 2022, 5: 100061.
- [10] Wang Z, Chen H, Xia R, et al. Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for
- [11] Shi T, Liu Y, Yang A, et al. Developing a novel gasification-based sludge-to-methanol utilization process and exergy-economic-environmental (3E) analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 260: 115600. ■

(上接第 212 页)