

DOI: 10.19666/j.rlfed.202302029

燃煤热电联产机组耦合固体废物等离子体 气化发电系统热经济分析

周 专¹, 王新刚¹, 边家瑜², 于志勇², 刘 骏³, 陈 衡³

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830063;

3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 提出了一种将固体废物等离子体气化、燃气轮机、吸收式热泵和燃煤热电联产机组结合的新型垃圾混合发电系统。该系统中, 医疗废物被送入等离子体气化炉并转化为合成气, 经过必要的处理后被输送到燃气轮机子系统; 合成气和烟气余热一部分作为吸收式热泵高温热源用于供热, 其余则直接用于加热燃煤热电机组的给水。以典型燃煤热电联产机组为参考, 从热力学和经济学角度分析了该混合发电系统的经济效益, 结果表明: 一旦供热量和来自燃煤的净电功率保持不变, 医疗废物产生的净电功率为 7.47 MW, 而垃圾发电净效率达到 47.96%; 仅 5.23 年就能收回该混合发电系统初始投资, 在其 25 年的使用寿命中可实现 50 362.94 万元的收益。

[关 键 词] 垃圾发电; 燃煤机组; 热电联产; 等离子气化; 性能评估

[引用本文格式] 周专, 王新刚, 边家瑜, 等. 燃煤热电联产机组耦合固体废物等离子体气化发电系统热经济分析[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 13-25. ZHOU Zhuan, WANG Xingang, BIAN Jiayu, et al. Thermo-economic evaluation of a solid waste plasma gasification power system integrated with a combined heat and power plant[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 13-25.

Thermo-economic evaluation of a solid waste plasma gasification power system integrated with a combined heat and power plant

ZHOU Zhuan¹, WANG Xingang¹, BIAN Jiayu², YU Zhiyong², LIU Jun³, CHEN Heng³

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd., Urumqi 830011, China;

2. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830063, China;

3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A novel hybrid design that combines solid waste plasma gasification, gas turbine, absorption heat pump, and coal-fired combined heat and power plant has been proposed. In the integrated scheme, medical waste is sent to the plasma gasifier and converted to syngas, which is conveyed into the gas turbine system after the necessary treatment. In terms of waste heat utilization of syngas and flue gas, some are used by the absorption heat pump for heating, and the rest are used to heat the feedwater of the coal-fired combined heat and power plant directly. Based on a typical coal-fired combined heat and power plant, the benefits of this system are examined in terms of both thermodynamics and economics. Once the heat supply and the net electricity from coal remain the same, the net power generated by the waste in the hybrid design is 7.47 MW, while the net waste-to-energy efficiency reaches 47.96%. In just 5.23 years, the initial investment in the proposed system is recouped, and in its 25-year lifetime, the system achieves a net present value of 50 362.94 thousand CNY.

Key words: waste-to-energy; coal-fired power plant; power and heat cogeneration; plasma gasification; performance assessment

收稿日期: 2023-02-12

基金项目: 国网新疆电力有限公司科技项目 (SGXJ0000FCJS2200543); 国家自然科学基金面上项目 (52276006)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. (SGXJ0000FCJS2200543); General Program of National Natural Science Foundation of China (52276006)

第一作者简介: 周专 (1999), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划与系统分析, 1319124529@qq.com.

通信作者简介: 陈衡 (1989), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多能互补集成与运行优化, heng@ncepu.edu.cn.

随着我国经济迅速发展,不可避免地产生了大量的固体废物,“垃圾围城”成为我国面临的重大环境问题^[1-2]。

源头减少、再利用、废物转化为能源和填埋是被广泛接受的废物管理方法。废物转化能源设施可以处理废物,缓解对化石燃料的依赖问题以及二氧化碳排放造成的环境问题。因此,在我国废物管理中起着至关重要的作用。常见的废物转化为能源的方法有热转化、生物转化和化学转化。其中,热转化以焚烧和气化为主。通过焚烧这种最常用的垃圾发电形式^[3-4],垃圾的质量和体积可分别减少 70% 和 90%^[5]。然而,焚烧会形成含有有毒化合物的底物和飞灰,废物中的重金属无法得到妥善处理,并转移到残渣中。此外,传统垃圾焚烧发电厂的垃圾发电效率不令人满意,通常为 14%~28%^[6]。

考虑到安全处理和高效转化,垃圾气化被认为是一种可持续和高效的废物处理方法。气化是将碳基燃料转化为清洁合成气的热化学途径之一,合成气的主要成分包括二氧化碳、氢气、水蒸气和碳氢化合物。与焚烧相比,垃圾气化获得的合成气用途多样,并具有热量和质量改善的特点。垃圾气化满足了能源需求,并显著减少了二噁英、氮氧化物、硫氧化物和重金属等污染物的形成,这对保护环境至关重要。在过去 10 年中,等离子体气化的重要性逐渐被认识到^[7],等离子体气化可在约 4 000 °C 下产生超高温等离子体气体,通过等离子体蒸发废物^[8]。有机化合物在接近无氧的高温下转化为无焦油合成气,分解成其组成元素;无机化合物被熔化并转化为致密的惰性玻璃化炉渣^[9]。与传统方法相比,等离子体气化独特的超高温是无害化危险废物的关键。一方面,等离子体气化的超高温反应区可以直接使危险废物无害化;另一方面,等离子体气化利用外部热源重组材料的电子结构,将固体废物中的有害成分转化为无害物质和离子。而来自等离子体气化和净化后的高质量清洁合成气可作为燃料直接送入燃气轮机循环。

近年来,大量研究探索了采用吸收式热泵(absorption heat pump, AHP)的优点。Garimella^[10]模拟了一种特殊的 AHP 系统,该系统可以从废气中回收废热,同时产生冷水和热水。该氨基吸收式热泵在 7 °C 下回收 2.26 MW 废热后,可产生 3.57 MW 的热量和 1.28 MW 的冷量。Sun 等人^[11]提出了一种利用喷射加热器和 AHP 回收热发电机组中汽轮机排气

废热的新方案。研究表明,在恒定循环水流量下,排汽流量减少了 41.4%,而供热能力增加了 66.7%。Bakhtiari 等人^[12]使用 AHP 回收硫酸盐制浆过程中的废热,为热用户生产热水。结果表明,当蒸汽价格为 63 美元/(MW·h)时,使用简单回收期 and 净现值的回收期分别为 2.7 年和 1.7 年。如上所述,使用 AHP 回收废热经济性较好。

另外,经济、安全的燃煤电厂也可以与其他热力系统结合,如垃圾发电(waste-to-energy, WTE)。二者结合后废物的能源效率将远高于没有单独系统。改进 WTE 工艺有改进蒸汽参数、减少废气热损失以及与其他热力系统耦合 3 种主要方法。在系统集成基础上,已经有很多关于 WTE 的研究。王一坤等^[13]采用 3 中不同的方式将垃圾焚烧发电站与燃煤电站相结合,认为直接耦合方式适用于重金属等含量低的固体废物。Galeno 等人^[14]设计了一个混合模型,该模型包含等离子体气化装置和固体氧燃料电池堆。结果表明,该系统 1 000 g 垃圾衍生燃料产生 4.2 MW 的净功率,电效率约为 33%,比基于垃圾衍生燃料焚烧的传统技术(20%)效率更高。Minutillo 等人^[15]分析了最佳等离子体气化系统与燃气轮机联合循环集成,并评估了由此产生的集成等离子体联合循环的性能,与基于垃圾焚烧的传统技术相比,其系统效率(31%)非常高。目前,关于通过 AHP 将基于等离子体气化的 WTE 装置与大型燃煤热电联产装置相结合的研究很少,这可能有助于提高净废物发电效率。

本文设计了一种独特的废热利用系统,在系统开始时,与其他基于气化的 WTE 系统一样,等离子体气化炉将危险废物转化为合成气,然后将其完全燃烧用于发电。为了实现能量的级联利用并提高 WTE 的效率,本文选择了 1 个高参数的燃煤热电机来进一步开发和利用系统余热。该方法采用 AHP 作为连接中介,使得 WTE 系统与高参数燃煤热电机更紧密地结合,以实现废物间接发电。为了连接 WTE 系统和燃煤热电机,根据温度差异,初始 WTE 系统具有适当温度的部分与燃煤热电联产工厂直接耦合;采用适用于 AHP 的烟气余热替代燃煤热电机的部分排汽供热,实现低品位余热的高参数利用。

1 系统描述

图 1 为与等离子体气化、燃气轮机、AHP 和燃煤

热机组相结合的拟建垃圾混合发电系统的结构。作为垃圾发电的第一部分，本文选取医疗废物作为原料，使用等离子气化炉将医疗废物高效地转化为清洁和高质量的合成气。气化炉底部电弧等离子炬在阴极和阳极之间形成能量丰富的高温反应区，等离子体气体被电离并扩散，高温等离子体羽流达到 5 000 °C^[15]。废物中的有机物质随后被完全分解成高质量的合成气，可用于其他子系统以创造效益。同时，通过无机物质的熔化和转化形成的无害玻璃化炉渣可以用作建筑材料。为了最大化合成气和净废物的热值以提高能效，可将从空气中分离的纯氧作为

气化剂引入空气分离器（空分器）单元。温度高于 845 °C 的高温合成气逐渐冷却至清洁系统所需的 200 °C，以确保完全去除可能对后续子系统有害的酸性气体等，然后将其冷却并送至燃气轮机子系统。

在燃气轮机循环中，压缩机向燃烧室加压足够的空气，以确保压缩合成气充分燃烧，然后产生的烟气驱动燃气轮机。

燃气轮机废气仍有大量热量，因此使用了一系列设备来充分利用。高温烟气用作 AHP 的高温热源和加热燃煤热电厂的锅炉给水。最终冷却至 50 °C 的废气从燃煤热电厂的烟囱泵入大气。

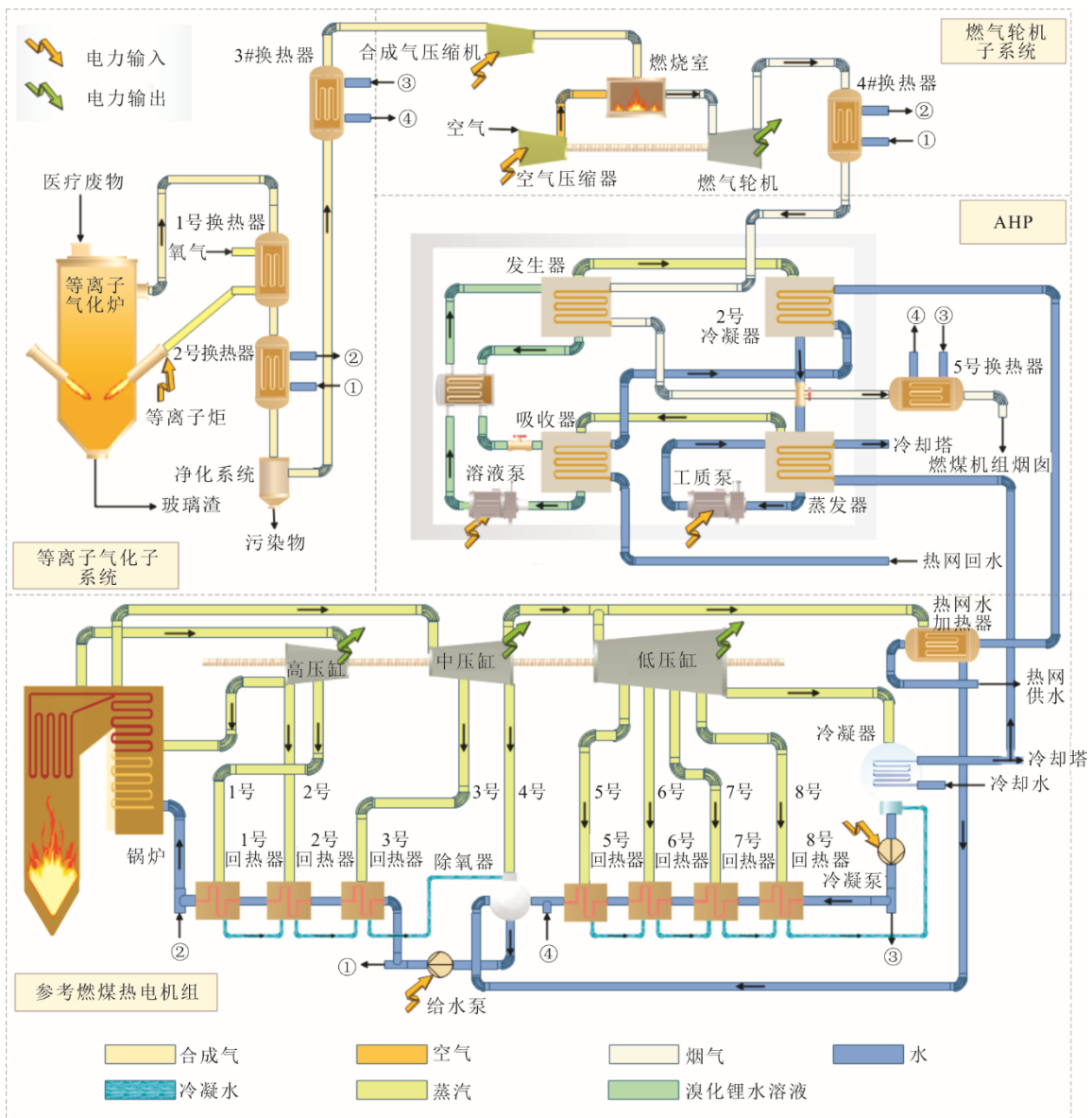


图 1 与热电联产机组集成的基于等离子体气化的垃圾混合发电系统结构

Fig.1 Diagram of the plasma gasification-based waste-to-energy system integrated with a combined heat and power plant

由图 1 可见, 本文选择了使用溴化锂溶液作为工作介质的第一类吸收式热泵, 也称为“增热型”热泵^[16]。AHP 的驱动热源来自烟气, 而低温热源是冷凝器的冷却水。来自热力用户的回水首先通过 AHP 系统加热, 然后继续在热网水加热器中吸收热量, 而不仅仅是在单个燃煤发电机组中的热网水加热器。引入 AHP 子系统可使更多的高参数蒸汽返回到汽轮机中进行工作, 以提高所提出系统的性能。

本文有 2 种耦合燃煤发电机组和垃圾发电机组的方式, 均具有相同的原理, 即允许更多的高参数蒸汽返回气缸工作。第 1 种方法是利用垃圾气化产生的合成气以及燃气轮机出口烟气来加热燃煤发电机组的给水, 以减少蒸汽的抽取, 即部分给水被送入 2 号和 4 号换热器以吸收热量, 然后返回锅炉入口与主流混合, 同样部分给水从冷凝泵出口进入 3 号和 5 号换热器吸收热量, 然后返回除氧器与主流混合; 第 2 种方法利用 AHP 对热用户回水进行加热, 在保持供热恒定的前提下, 减少了中压缸的供热量。本文提出的垃圾混合发电系统不仅可以实现危险废物的无害化处理, 而且可以充分利用废物

的能量, 实现能源梯级利用的效率, 大大提高了废物的发电效率。

2 系统分析方法

2.1 热力系统建模

垃圾混合发电系统仿真模型如图 2 所示。EBSILON Professional 和 ASPEN PLUS V11 软件被用于模拟电力系统。ASPEN PLUS 软件可以通过一系列复杂的计算来模拟所建立的过程模型^[17], 且在模拟等离子体气化方面做了大量工作^[15,18], 因此本文使用 ASPEN PLUS 软件建立等离子气化炉的模型。EBSILON Professional 软件可以准确地获得发电厂在各种运行条件下的运行潜力, 因此本文使用 EBSILON Professional 内置库中的模型开发燃煤电厂、燃气轮机和 AHP 的仿真模型。

分析过程基本假设为: 1) 给煤速率和煤炭产生的净功率被视为恒定; 2) 燃煤发电机组消耗的辅助电力视为固定; 3) 空气的体积分数组成为 21% 的 O_2 和 79% 的 N_2 ; 4) 环境温度和压力为 298.15 K 和 101.325 kPa; 5) 系统处于稳态且未考虑周围环境的影响。

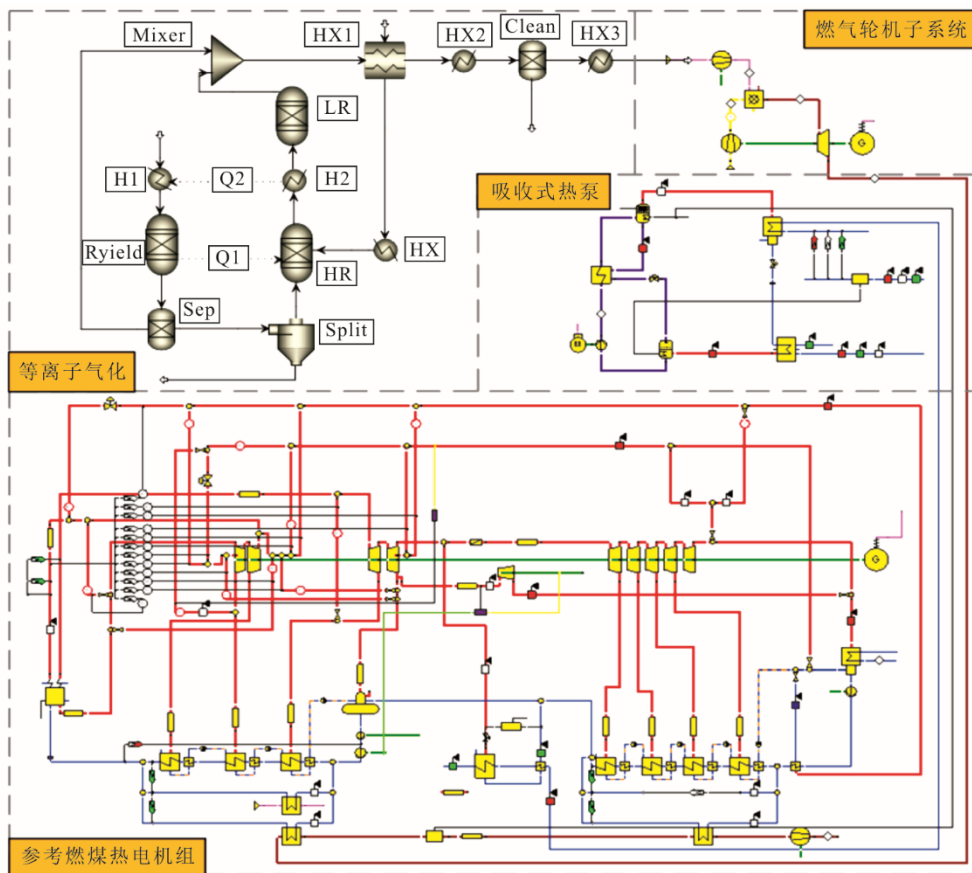


图 2 垃圾混合发电系统仿真模型

Fig.2 Simulation models of the waste-to-energy power system

2.2 模型验证

通过将计算结果与设计数据进行比较,验证了废物气化段的模型,结果见表1。由表1可以看出,计算结果与设计值非常接近,这证明了仿真模型的有效性和可靠性。

表1 等离子气化炉模型验证

Tab.1 Model validation based on the reference plasma gasifier

项目	设计值 ^[15]	模拟值
H ₂	28.65	28.60
CO	37.37	37.39
CH ₄		0.02
CO ₂	1.41	1.39
合成气组分 (体积分数)/%		
N ₂	17.12	17.11
H ₂ O	14.91	14.95
HCl	0.31	0.31
H ₂ S	0.22	0.22
COS	0.01	0.01
总和	100.00	100.00
合成气出口温度/℃	1 250.0	1 244.5
合成气高位热值/(MJ·kg ⁻¹)	9.20	9.12
合成气低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	10.13	10.14

2.3 能量评价指标

经由等离子炬和空分器帮助气化器运行,等离子气化可将固体废物转化为有用的合成气。本文引入了等离子体气化效率 η_{PGE} 以更好地评估气化炉性能:

$$\eta_{\text{PGE}} = \frac{m_{\text{syn}} \times Q_{\text{L,syn}}}{m_{\text{w}} \times Q_{\text{L,w}} + \frac{P_{\text{tor}} + P_{\text{ASU}}}{\eta_{\text{tor}} + \eta_{\text{e}}}} \quad (1)$$

式中: m_{syn} 和 m_{w} 分别为合成气流量以及固体废物的给料速率,kg/s; $Q_{\text{L,syn}}$ 和 $Q_{\text{L,w}}$ 分别为合成气和固体废物的低位发热量,kJ/kg; P_{tor} 和 P_{ASU} 分别为等离子炬和空分器消耗的电功率,kW; η_{tor} 和 η_{e} 分别为等离子炬的效率和参考发电效率, η_{tor} 取86.00%^[15], η_{e} 取39.00%^[19]。

混合系统所有的厂用电 P_{aux} (kW)由下式确定:

$$P_{\text{aux}} = P_{\text{tor}} + P_{\text{ASU}} + P_{\text{syn}} + P_{\text{air}} + P_{\text{coal,aux}} \quad (2)$$

式中: P_{syn} 和 P_{air} 分别为合成气压缩机和空气压缩机所消耗的电功率,kW; $P_{\text{coal,aux}}$ 为燃煤热电机组消耗的厂用电,kW。

本文垃圾混合发电系统总净电功率 P_{tot} (kW)由下式确定:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{GT}} + P_{\text{ST}} - P_{\text{aux}} \quad (3)$$

式中: P_{GT} 和 P_{ST} 分别为燃气轮机和蒸汽轮机的发电功率,kW。

对于AHP,需要计算1个重要的性能系数(coefficient of performance, COP)^[20],这是AHP系统的供热能力与热输入的比率,计算公式如下:

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{abs}} + Q_{\text{cond}}}{Q_{\text{gen}}} = \frac{Q_{\text{gen}} + Q_{\text{eva}}}{Q_{\text{gen}}} = 1 + \frac{Q_{\text{eva}}}{Q_{\text{gen}}} \quad (4)$$

式中: Q_{abs} 和 Q_{cond} 为吸收器和冷凝器释放的热量,kJ; Q_{gen} 为输入到发生器当中驱动热源的热量,kJ; Q_{eva} 为低温热源输入到蒸发器中的热量,kJ。

热电联产系统耦合后,燃煤发电量被视为恒定,因此由余热引起的新增发电功率被纳入医疗垃圾发电侧。医疗垃圾的净电功率 P_{w} (kW)可由下式确定:

$$P_{\text{w}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{coal}} \quad (5)$$

式中: P_{coal} 为参考燃煤热电机组的净电功率,kW。

此外,垃圾混合发电系统的垃圾发电效率 η_{WTE} ,有效电效率(effective electric efficiency) $\eta_{\text{ef,w}}$ 和总效率 $\eta_{\text{en,w}}$ 由下式确定:

$$\eta_{\text{WTE}} = \frac{P_{\text{w}}}{m_{\text{w}} \times Q_{\text{L,w}}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ef,w}} = \frac{P_{\text{tot}}}{m_{\text{w}} \times Q_{\text{L,w}} + m_{\text{coal}} \times Q_{\text{L,coal}} - \frac{Q_{\text{tot}}}{\alpha}} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{en,w}} = \frac{P_{\text{tot}} + Q_{\text{tot}}}{m_{\text{w}} \times Q_{\text{L,w}} + m_{\text{coal}} \times Q_{\text{L,coal}}} \quad (8)$$

同时,参考燃煤热电机组侧的有效电效率 η_{ef} 和系统总效率 η_{en} 由下式确定^[21]:

$$\eta_{\text{ef}} = \frac{P_{\text{tot}}}{m_{\text{coal}} \times Q_{\text{L,coal}} - \frac{Q_{\text{tot}}}{\alpha}} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{en}} = \frac{P_{\text{tot}} + Q_{\text{tot}}}{m_{\text{coal}} \times Q_{\text{L,coal}}} \quad (10)$$

式中: m_{coal} 为燃煤的给料速率,kg/s; $Q_{\text{L,coal}}$ 为燃煤的低位热值,kJ/kg; Q_{tot} 为拟议系统的净热输出,kW; α 为传统燃煤锅炉的效率,本文取83.00%^[21]。

2.4 焓评价指标

焓是系统通过与环境达到平衡所能做的最大功。焓分析可以准确地找到能量破坏的位置和程度,这有助于优化目标系统。因此,需要对与参考燃煤热电机组耦合的拟建混合系统进行焓分析。

固体燃料具有复杂的组分,其焓值 EX_{sf} (kW)可由下式确定:

$$\text{EX}_{\text{sf}} = m_{\text{sf}} \times Q_{\text{L,sf}} \times (1.0064 + 0.1519 \times \frac{\omega_{\text{H}}}{\omega_{\text{C}}} + 0.0616 \times \frac{\omega_{\text{O}}}{\omega_{\text{C}}} + 0.0429 \times \frac{\omega_{\text{N}}}{\omega_{\text{C}}}) \quad (11)$$

式中: m_{sf} 为燃煤或者固体废物的给料速率,kg/s; $Q_{\text{L,sf}}$ 为固体燃料的低位热值,kJ/kg; ω_{H} 、 ω_{O} 、 ω_{N} 、 ω_{C} 分别为固体燃料中氢元素、氧元素、氮元素和碳元素质量分数。

混合流股的焓 E_{ms} (kW)由下式确定:

$$E_{ms} = E_{ms,ph} + E_{ms,ch} \quad (12)$$

式中： $E_{ms,ph}$ 和 $E_{ms,ch}$ 分别为混合流股的物理焓和化学焓，kW。

垃圾混合发电系统各部件或子系统的焓平衡由下式确定：

$$\Sigma EX_{in} + \Sigma W_{in} = \Sigma EX_{out} + \Sigma W_{out} + \Sigma EX_{des} \quad (13)$$

式中： EX_{in} 和 EX_{out} 分别指模块的输入焓和输出焓，kW； W_{in} 和 W_{out} 分别指模块的电功率输入和电功率输出，kW； EX_{des} 指焓损，kW。

垃圾发电系统焓效率 $\eta_{ex,w}$ 和垃圾混合发电系统总焓效率 $\eta_{ex,tot}$ 由下式确定：

$$\eta_{ex,w} = \frac{P_w}{EX_w} \quad (14)$$

$$\eta_{ex,tot} = \frac{P_{tot} + P_h}{EX_w + EX_{coal}} \quad (15)$$

式中： EX_w 和 EX_{coal} 分别指垃圾混合发电系统中固体废物和燃煤系统的总输入焓，kW； P_h 指热电联产系统供热的输出焓，kW。

2.5 经济性评价指标

为了检验垃圾混合发电系统的最终成本效益表现，将动态回收期DPP（年）和净现值NPV（万元）作为WTE项目的经济指标^[22]。

考虑到货币的时间价值，DPP为收回全部投资的必要期限，DPP变短项目将更加经济可行。

$$\sum_{y=1}^{DPP} \frac{(C_{in} - C_{out})}{(1 + r_{dis})^y} = 0 \quad (16)$$

式中： y 为项目生命周期中的年份； C_{in} 和 C_{out} 分别为在 y 年的现金流入和流出，万元； r_{dis} 为折现率。

净现值是整个项目寿命期间净现金流的累积现值，净现值越大，表明项目的盈利能力和可行性越好。

$$NPV = \sum_{y=1}^n \frac{(C_{in} - C_{out})}{(1 + r_{dis})^y} \quad (17)$$

式中： n 为项目生命周期，年。

3 模拟结果与讨论

3.1 系统参数

3.1.1 参考燃煤热电机组参数

本文以中国某典型630 MW燃煤热电机组为参考机组，抽汽供热条件为150 t/h（图1）。燃煤锅炉中产生的大量主蒸汽和再热蒸汽，依次通过高压缸、中压缸和低压缸；同时，来自中压缸的150 t/h排汽被送至热网水加热器，用于加热供热网络的回水，以实现热电联产；低压缸的废气在冷凝器中冷凝，由8个回热器依次预热，最后进入锅炉形成循环。发电厂使用贫煤（芙蓉煤）作为燃料，表2—表4为参考电厂基本参数。该燃煤电厂的有效电效率和系统总效率分别达到43.43%和47.19%。

表2 该燃煤热电机组THA工况下基本参数

Tab.2 Basic operating parameters of coal-fired CHP plant under THA operating conditions

项目	数值
给煤量/(kg·s ⁻¹)	69.28
燃煤低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	20 910
主蒸汽	温度/℃ 538.00
	压力/MPa 16.70
	流量/(kg·s ⁻¹) 520.73
再热蒸汽	温度/℃ 538.00
	压力/MPa 3.33
	流量/(kg·s ⁻¹) 436.51
乏汽	温度/℃ 28.96
	压力/MPa 4.00
	流量/(kg·s ⁻¹) 289.09
供热抽汽	温度/℃ 326.72
	压力/MPa 0.77
	流量/(kg·s ⁻¹) 41.67
热网回水/供水温度/℃	55.00/95.00
给水流量/(kg·s ⁻¹)	682.59
发电量/MW	599.23
供电量/MW	569.27
供热量/MW	114.36
有效电效率/%	43.43
电厂总效率/%	47.19

表3 参考燃煤热电机组回热系统参数

Tab.3 Parameters of the heat regeneration system of the reference coal-fired CHP plant

项目	RH1	RH2	RH3	DEA	RH5	RH6	RH7	RH8
抽汽	温度/℃ 386.57	319.15	443.32	329.49	226.81	137.09	83.25	58.95
	压力/MPa 6.12	3.70	1.67	0.77	0.31	0.13	0.05	0.02
	流量/(kg·s ⁻¹) 39.43	42.51	23.29	26.87	16.92	13.05	13.55	13.82
排水	温度/℃ 249.59	207.69	175.77		107.28	85.23	60.66	28.96
	流量/(kg·s ⁻¹) 39.43	81.93	105.22		16.92	29.97	43.52	57.34
给水	进口温度/℃ 243.99	202.09	170.17	125.61	101.68	79.16	55.06	29.64
	出口温度/℃ 276.56	243.99	202.09	170.17	130.10	101.68	79.16	55.06
	出口流量/(kg·s ⁻¹) 520.73	520.73	520.73	520.73	346.97	346.97	346.97	346.97

表 4 加热器在 THA 工况下的换热端温差 单位: °C
Tab.4 The heat transfer end difference of the heater under THA condition

项目	RH1	RH2	RH3	RH5	RH6	RH7	RH8
上端温差	-1.7	0	0	2.8	2.8	2.8	2.8
疏水端温差	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6

3.1.2 等离子气化子系统

采用 ASPEN PLUS 软件构建完整的等离子气化炉模拟模型 (图 2), 包括 1 个化学计量反应器模块 Ryield 和 2 个吉布斯反应器模块 RGibbs。固体废物作为非常规成分, 其基本元素产量由 Fortran 内置计算器块确定^[23]。气化过程还涉及热交换器 (分别命名为 H1 和 H2)、分离模块 (Sep) 和混合器 (Mixer)。

随着新型冠状病毒肺炎的爆发, 全球医疗废物每天增加 280 t^[24]。鉴于感染的可能性和危险^[25], 本文选择医用呼吸器作为等离子气化炉的原料。表 5 为等离子气化炉医疗废物参数。由表 5 可见, 医用呼吸器低位热值达到 15.57 MJ/kg^[26]。

表 5 等离子气化炉医疗废物参数
Tab.5 Properties of the medical waste used by the plasma gasifier in the conceptual hybrid system

项目	数值	
工业分析 w/%	M _{ar}	7.04
	F _{ar}	8.70
	V _{ar}	82.37
	A _{ar}	1.89
元素分析 w/%	C _{ar}	44.61
	H _{ar}	6.56
	O _{ar}	39.63
	N _{ar}	0.20
	S _{ar}	0.07
低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	15.57	

模拟所得气化炉参数及清洁合成气参数分别

见表 6 和表 7。在 1 kg/s 的固定医疗废物质量流率下, 来自等离子气化子系统的 1.34 kg/s 的清洁合成气, 由体积分数 40.85% CO、37.69% H₂ 和 0.87% CH₄ 组成, 低位热值较低 (11.51 MJ/kg)。值得注意的是, 空分器和等离子炬需要耗电 1.93 MW, 但可实现 75.38% 的等离子气化效率。

表 6 等离子气化炉在垃圾混合发电系统中的参数
Tab.6 Parameters of the plasma gasifier in the proposed hybrid system

项目	数值	
医疗废物给料速率/(kg·s ⁻¹)	1.00	
进口氧气	流量/(kg·s ⁻¹)	0.36
	温度/°C	25.00
出口合成气	流量/(kg·s ⁻¹)	1.34
	温度/°C	850.00
等离子炬	效率/% ^[18]	86.00
	电耗/MW	1.59
空分器电耗/MW	0.34	
等离子气化效率/%	75.38	

表 7 干净合成气参数
Tab.7 Properties of the syngas after cleaning

项目	数值	
温度/°C	50.00	
流量/(kg·s ⁻¹)	1.34	
体积分数/%	CO	40.85
	H ₂	37.69
	CH ₄	0.87
	CO ₂	9.62
	N ₂	0.10
	H ₂ O	10.89
低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	11.51	

合成气冷却器的参数见表 8。当烟气通过换热器时, 由于气体侧压力损失微不足道, 因此忽略不计^[27-28]。但考虑冷流体侧的压降时不能忽略, 因为原始系统中入口和出口流体的位置不同。

表 8 余热回收子系统参数
Tab.8 Parameters of the waste heat recovery subsystem

项目	1 号换热器	2 号换热器	3 号换热器	4 号换热器	5 号换热器	
热流体	介质	合成气	合成气	合成气	烟气	
	进/出口温度/°C	850.00/739.26	739.26/200.00	200.00/50.00	638.14/350.00	149.00/50.00
	进/出口压力/MPa	0.10/0.10	0.10/0.10	0.10/0.10	0.10/0.10	0.10/0.10
	流量/(kg·s ⁻¹)	1.34	1.34	1.34	15.13	15.13
冷却流体	介质	O ₂	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
	进/出口温度/°C	25.00/800.00	170.17/276.56	29.64/130.10	170.17/276.56	29.64/130.10
	进/出口压力/MPa	0.10/0.10	19.63/19.60	0.77/0.73	19.63/19.60	0.77/0.73
	流量/(kg·s ⁻¹)	0.36	2.71	0.80	10.38	3.75
换热量/kW	286.51	1 308.58	336.91	5 021.45	1 583.20	

3.1.3 燃气轮机子系统

冷却和净化的合成气用于燃气轮机子系统,其基本操作参数汇总见表 9。50 °C 的清洁合成气首先通过合成气压缩机以 15.6 的压力比压缩,以达到工作压力。完全燃烧后,烟气从燃烧室送至燃气轮机工作,总功率输出为 5.65 MW。工作后燃气轮机废气的温度为 638.14 °C,这意味着仍有大量余热可以利用。因此,烟气被送 4 号、5 号换热器和用于废热利用的 AHP。热交换器参数见表 8。

表 9 燃气轮机子系统参数
Tab.9 Parameters of the gas turbine subsystem

项目	数值	
空气压缩机	空气进/出口温度/°C	25.00/414.75
	空气进/出口压力/MPa	0.10/1.58
	空气流量/(kg·s ⁻¹)	13.79
	等熵效率/% ^[29]	88.00
合成气压缩机	合成气进/出口温度/°C	50.00/474.35
	合成气进/出口压力/MPa	0.10/1.58
	合成气流量/(kg·s ⁻¹)	1.34
	等熵效率/% ^[29]	80.00
燃烧室	空气进口温度/°C	414.75
	合成气进口温度/°C	474.35
	烟气出口温度/°C	1250.11
	烟气流量/(kg·s ⁻¹)	15.13
燃气轮机	烟气进/出口温度/°C	1 250.11/638.14
	烟气进/出口压力/MPa	1.50/0.10
	烟气流量/(kg·s ⁻¹)	15.13
	等熵效率/% ^[29]	87.00
发电功率/MW	5.65	

3.1.4 吸收式热泵子系统

本文采用第一类 AHP 以烟气作为高温热源,燃煤发电机组的冷却水作为低温热源,将给水从 55.00 °C 升高至 57.01 °C,具体参数见表 10。

3.2 能量分析

垃圾混合发电系统与参考燃煤发电机组性能对比见表 11。在燃煤固定进料速率下,垃圾混合发电系统的总额外功率输出为 16.04 MW。由于等离子炬和其他辅助设备功耗较大,垃圾混合发电系统辅助功率增加了 8.57 MW,净发电量从参考燃煤发电机组的 569.27 MW 增加到垃圾混合发电系统的 576.74 MW,增加了 7.47 MW,这是医疗废物产生的净发电量。垃圾混合发电系统的总效率略有提升,而医疗废物的净效率可达到 47.96%,远高于通常为 14%~28% 传统的垃圾焚烧电站,实现了医疗废物的有效利用。

表 10 AHP 子系统参数
Tab.10 Parameters of the AHP subsystem

项目	数值	
烟气	进口/出口温度/°C	350.00/149.00
	流量/(kg·s ⁻¹)	15.13
冷却水	进口/出口温度/°C	23.98/22.00
	流量/(kg·s ⁻¹)	295.78
热网供水	进口/出口温度/°C	55.00/57.01
	流量/(kg·s ⁻¹)	682.59
性能系数	1.74	

表 11 垃圾混合发电系统与参考燃煤发电机组性能对比
Tab.11 Energy performance of the proposed hybrid system and reference coal-fired CHP plant

项目	参考机组	垃圾混合发电系统	差值
给煤量/(kg·s ⁻¹)	69.28	69.28	0
医疗垃圾给料速率/(kg·s ⁻¹)		1.00	
燃煤机组发电功率/MW	599.23	603.97	+4.74
燃气轮机子系统发电功率/MW		11.29	
总发电功率/MW	599.23	615.27	+16.04
总厂用电/MW	29.96	38.53	+8.57
燃煤机组净电功率/MW	569.27	569.27	0
医疗垃圾净电功率/MW		7.47	
总净电功率/MW	569.27	576.74	+7.47
供热量/MW	114.36	114.36	0
垃圾发电净效率/%		47.96	
有效电效率/%	43.43	43.48	+0.05
系统总效率/%	47.19	47.20	+0.01
给煤量/(kg·s ⁻¹)	69.28	69.28	0

为了提高垃圾混合发电系统废物的能源转化率,对单个燃煤发电厂和垃圾混合发电系统中的能量流进行了研究,结果如图 3 和图 4 所示。

通过等离子气化、燃气轮机和 AHP 的组合,垃圾混合发电系统中的能量流与单个燃煤发电机组的能量流截然不同,其煤炭投入均保持 100%。在垃圾混合发电系统中,15.57 MW 的医疗废物现有能量与 1.93 MW 的辅助功率(等离子炬和空分器消耗)一起进入气化炉。气化炉产生含有 17.51 MW 能量的粗合成气,然后在进入燃气轮机系统之前,该合成气经历一系列能量利用过程。在燃烧室中,合成气完全燃烧并完全转化为高温烟气,从而驱动燃气轮机发电。除去等离子气化炉、合成气压缩机和空气压缩机的耗电,燃气轮机系统产生 2.73 MW 的净功率输出。烟气和合成气携带大量能量,其中 0.29 MW 用于加热气化剂,8.25 MW 用于加热燃煤电厂给水,4.08 MW 用于作为高温热源的 AHP。通过耦合,燃煤发电厂的蒸汽轮机可产生 4.74 MW 的额外净功率输出,这被认为是由医疗废物产生

的。最后，垃圾混合发电系统的燃气轮机、蒸汽轮机总净功率输出为 576.74 MW。

近年来，许多学者设计了不同的 WTE 系统来

提高其性能（表 12）。由表 12 可见，本文垃圾混合发电系统结合上述系统的优点，在相对较低的废物进料速率下，实现了较高的净废物发电效率。

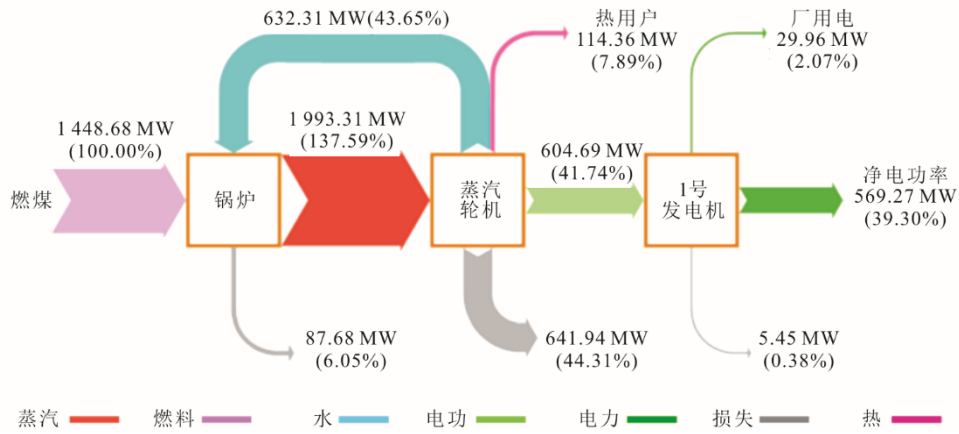


图 3 参考燃煤热电机组能量流图
Fig.3 Energy flow diagram of the reference coal-fired CHP

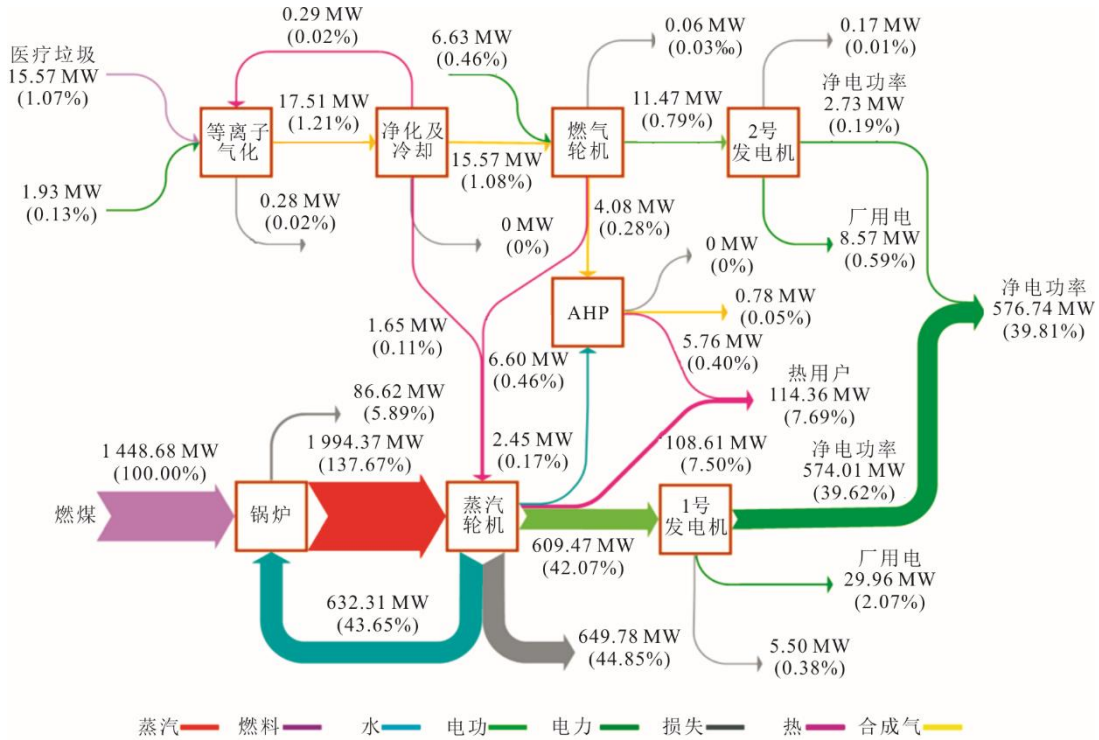


图 4 垃圾混合发电系统能量流图
Fig.4 Energy flow diagram of the hybrid system

表 12 不同 WTE 系统性能对比
Tab.12 Performance comparison of various WTE systems

垃圾发电系统	垃圾给料速率/(kg·s ⁻¹)	净垃圾发电效率/%	文献
垃圾焚烧联合循环电站	10.53	33.80	[30]
垃圾气化联合循环电站		33.00	[31]
等离子气化整合燃料电池	1.00	40.10	[32]
等离子气化联合循环电站	5.45	31.00	[15]
本文垃圾混合发电系统	1.00	47.96	

3.3 焓分析

垃圾混合发电系统与燃煤热电厂的性能对比见表 13。

表 13 垃圾混合发电系统和参考燃煤热电厂焓分析结果
Tab.13 Exergy analysis results of the proposed hybrid system and reference coal-fired CHP plant

项目	参考机组		垃圾混合发电系统		
	焓/MW	比率/%	焓/MW	比率/%	
燃煤输入焓	1 469.79	100.00	1 469.79	100.00	
医疗垃圾输入焓	0	0	16.87	1.15	
总输入焓	1 469.79	100.00	1 486.67	101.15	
电力输出焓	569.27	38.73	576.74	39.24	
医疗垃圾输出焓			7.47	0.51	
供热输出焓	16.29	1.11	16.29	1.11	
总输出焓	585.56	39.84	593.03	40.35	
燃煤热电厂	锅炉	741.61	50.46	741.03	50.42
	汽轮机	59.32	4.04	59.90	4.08
	回热系统	18.28	1.24	18.07	1.23
	冷凝器	8.28	0.56	8.39	0.57
	1号发电机	5.45	0.37	5.50	0.37
电机组	厂用电	29.96	2.04	29.96	2.04
	热网水加热器	21.32	1.45	19.98	1.36
	总和	884.23	60.16	882.83	60.06
	等离离子化子系统				
气化炉			2.79	0.19	
1号换热器			0.06	0	
2号换热器			0.24	0.02	
3号换热器			0.03	0	
净化系统			0.02	0	
总和			3.14	0.02	
燃气轮机子系统	空气压缩机		0.30	0.02	
	合成气压缩机		0.10	0.01	
	燃烧室		4.36	0.30	
	燃气轮机		0.71	0.05	
	4号换热器		1.08	0.07	
	5号换热器		0.06	0	
2号发电机		0.17	0.01		
总和			6.77	0.46	
吸收式热泵			0.90	0.06	
燃煤焓损失	884.23	60.16	882.83	60.06	
医疗垃圾焓损失			10.81	0.73	
总焓损失	884.23	60.16	893.64	60.80	
医疗垃圾发电焓效率/%			44.26		
系统总焓效率/%	39.84		40.35		

由表 13 可见, 2 种方案下燃煤的焓输入保持 100%, 垃圾混合发电系统医疗废物产生的额外焓输入为 16.87 MW (1.15%)。垃圾混合发电系统蒸汽轮机被抽出的蒸汽更少, 从而减少了煤电部分的焓损失。此外, 等离子体气离子化系统、燃气轮机子系统和 AHP 子系统的额外焓损失为 10.81 MW (0.73%)。由于增加了医疗废物转化过程, 总焓损失增加了

9.41 MW, 但产生的总焓输出增加了 7.47 MW, 医疗废物发电的焓效率为 44.26%, 系统总焓效率提高了 0.51%。

图 5 显示了垃圾混合发电系统医疗废物转化为能源部分各设备的焓分析。燃烧室和气化炉合计占总焓破坏率的 66.15%, 换热器作为第 3 大焓破坏贡献者, 占比高达 13.53%。其原因可能来自烟气侧, 同时也受到入口和出口流体之间温差过大的影响。

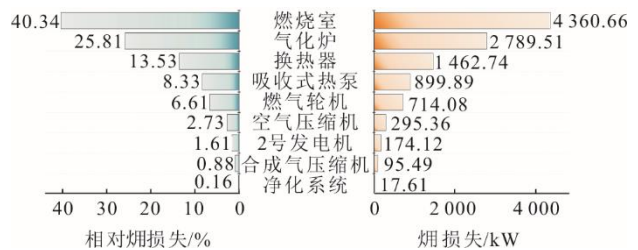


图 5 垃圾混合发电系统焓分析
Fig.5 Exergy destruction ratio of the waste-to-energy power system

3.4 经济性分析

为了评估垃圾混合发电系统的经济可行性, 做了基本假设, 具体见表 14。创新设计的总成本由资本投资成本和运营维护成本 2 部分组成。就废物转化能源项目的盈利能力而言, 垃圾混合发电系统的最大收入来自废物处理和电力销售, 本文根据政府规定, 这 2 种收入来源的价格分别选择为 3 170.16 元/t 和 650 元/(MW·h)。此外, WTE 项目的运输成本为 63.38 元/t。气化炉产生的炉渣可以作为建筑材料出售。

表 14 经济性评估的基本假设

Tab.14 Basic assumptions and information for the economic evaluation

项目	数值
垃圾混合发电系统年运行小时数/h ^[33]	7 200
垃圾混合发电系统 建设周期/a	2
项目生命周期 ^[34] 运营周期/a	23
医疗垃圾处理费/(元·t ⁻¹) ^[35]	3 170.16
垃圾运输费用/(元·t ⁻¹) ^[35]	63.38
玻璃渣售价/(元·t ⁻¹) ^[36]	374.00
上网电价/(元·(kW·h) ⁻¹) ^[37]	0.65
运营费用占设备总投资比 ^[35] /%	10
折旧率占设备总投资比 ^[38] /%	10
人民币对美元汇率 (人民币/美元)	6.80

表 15 总结了设备采购成本的估算方法, 包括函数估算法和比例放缩法。表 16 详细列出了每个设备的采购费用, 根据上述假设计算结果见表 17。

表 15 垃圾混合发电系统中设备采购成本估算方法
Tab.15 Investment cost estimation methods of components in the proposed system

方法	设备	函数公式	文献		
函数估算法	发电机/美元	$60 \times (P_{nom})^{0.95}$	[35]		
	气体压缩机/美元	$91\,562 \times \left(\frac{W_{CM}}{455}\right)^{0.67}$	[39]		
	换热器/美元	$5\,000 \times \frac{Q_{HE}}{LMTD_{HE}}$	[40]		
	燃烧室/美元	$\frac{46.08 \times m_{oxidant}}{0.995 - \frac{P_{out}}{P_{in}}} \times e^{\left(\frac{-18}{1000} T_{out} - 26.4\right) \times 1}$	[41]		
	燃气轮机/美元	$1\,318.5 \times W_{GT} - 98.328 \times \ln W_{GT}$	[42]		
	气化炉/美元	$2.9 \times 10^6 \times (3.6 \times m_w)^{0.7}$	[35]		
方法	设备	参考价格/千美元	参考规模	缩放因子	来源
比例缩放法	等离子炬	1 500.00	5.75 MW	0.91	[43]
	空分器	45 700.00	76.68 t/h	0.50	[44]
	净化系统	33 650.00	4 232.7 kmol/h	0.65	[44]
	吸收式热泵	1 338.33	17.43 MW	0.89	[45]

表 16 垃圾混合发电系统设备投资金额 单位：万元
Tab.16 Investment costs of the components in the proposed WTE system.

项目	成本	
气化炉	4 834.13	
等离子炬	317.09	
空分器	4 055.73	
等离子气 化子系 统	1 号换热器	3.95
	2 号换热器	28.21
	3 号换热器	28.78
	净化系统	3 737.41
燃气轮机 子系 统	空气压缩机	341.33
	合成气压缩机	106.68
	燃烧室	36.20
	燃气轮机	10 282.25
	4 号换热器	65.59
	5 号换热器	273.69
	2 号发电机	124.65
AHP	339.44	
总和	24 575.13	

表 17 垃圾混合发电系统经济性分析结果
Tab.17 Economic analysis results of the proposed WTE system

项目	数值
医疗垃圾年处理量/t	25 920.00
年发电量/(MW·h)	53 768.61
玻璃渣年产量/t	489.89
垃圾处理年收入/万元	8 217.05
售电年收入/万元	3 494.96
玻璃渣售卖年收入/万元	18.32
年运营费用/万元	2 457.51
年运输费用/万元	164.27
动态回收期/a	5.23
净现值/万元	50 362.94

由表 17 可见，废物处理收入贡献的利润最多，约占年度总收入的 70.05%。预计年发电量为 53 768.61 MW·h，每年盈利 3 494.96 万元。此外，炉渣销售的年收入为 18.32 万元。考虑到年运营成本 2 457.51 万元和年运输成本 164.27 万元，年净现金流入可达到 9 108.55 万元。当折现率假设为 10%时，该系统可以在 5.23 年内收回初始成本，新方案的净现值预计在其 25 年寿命内达到 50 362.94 万元，可见该垃圾混合发电系统经济可行，且短期内回报可观。

4 结 论

本文提出了一种结合了医疗废物等离子气化、燃气轮机、吸收式热泵和燃煤发电机组的垃圾混合发电系统。借助于模拟仿真的分析结果，对该系统进行了能量分析、烟分析和经济性分析，并确定了推荐方案的效益。分析结果表明，WTE 流程得到了改进，大幅提升了固废资源化利用的综合性能，具有良好的经济效益和推广价值。

1) 垃圾混合发电系统中医疗废物可产生 7.47 MW 的净功率，医疗废物发电效率为 47.96%，远高于传统废物发电厂。

2) 从热力学第二定律的角度来看，医疗废物发电的烟效率可能达到 44.26%。燃烧室的不可逆性在废物发电部分中最大。

3) 垃圾混合发电集成了等离子气化系统、燃气轮机系统和吸收式热泵系统，成本需增加

24 575.13 万元。在拟建 WTE 项目的商业期内, 净年收入可达 9 108.55 万元, 运营成本为 2 457.51 万元。因此, WTE 项目的动态投资回收期仅为 5.23 年, 预计在 25 年的寿命内, 其净现值为 50 362.94 万元。

4) 本文引入了 1 台燃煤热电联产机组, 在供暖季通过 AHP 有效利用了燃气轮机排烟余热并节省了热电机组的部分供热抽汽。然而, 非供暖季 AHP 面临着停运的可能, 这也意味着系统在此时无法达到设计工况下的垃圾发电效率, 从而影响系统的经济效益。该垃圾混合发电系统在变工况条件下的各项参数及动态特性有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 4.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018: 4.
- [2] 杨名, 顾一帆, 吴玉锋, 等. 面向固废资源化的能源-环境-经济综合绩效评价研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(17): 17103-17110.
YANG Ming, GU Yifan, WU Yufeng. Research progress of energy-environment-economy comprehensive performance assessment for solid waste recycling[J]. Materials Reports, 2021, 35(17): 17103-17110.
- [3] 王利军. 垃圾焚烧发电系统优化及综合利用技术[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 377-381.
WANG Lijun. Optimization and comprehensive utilization technology of waste incineration power generation system[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 377-381.
- [4] 周昭志. 垃圾热解气化过程中氯的转化与控制特性及生命周期可持续性评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1.
ZHOU Zhaozhi. Study on chlorine migration and control during waste pyrolysis and gasification and life cycle sustainability assessment methodology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1.
- [5] SILVA R V, DE Brito J, LYNN C J, et al. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: a review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 23-35.
- [6] SINGH K, HACHEM Vermette C. Influence of mixed-use neighborhood developments on the performance of waste-to-energy CHP plant[J]. Energy, 2019, 189: 116172.
- [7] 孙成伟, 沈洁, 任雪梅, 等. 等离子气化技术用于固体废物处理的研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 72-85.
SUN Chengwei, SHEN Jie, REN Xuemei, et al. Research progress of plasma gasification technology for solid waste treatment[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(9): 72-85.
- [8] LEMMENS B, ELSLANDER H, VANDERREYDT I, et al. Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams[J]. Waste Management, 2007, 27(11): 1562-1569.
- [9] ZHANG Q, DOR L, ZHANG L, et al. Performance analysis of municipal solid waste gasification with steam in a plasma gasification melting reactor[J]. Applied Energy, 2012, 98: 219-229.
- [10] GARIMELLA S S. Low-grade waste heat recovery for simultaneous chilled and hot water generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 42: 191-198.
- [11] SUN F, FU L. A new waste heat district heating system with combined heat and power (CHP) based on ejector heat exchangers and absorption heat pumps[J]. Energy, 2014, 69: 516-524.
- [12] BAKHTIARI B, FRADETTE L, LEGROS R, et al. Opportunities for the integration of absorption heat pumps in the pulp and paper process[J]. Energy, 2010, 35: 4600-4606.
- [13] 王一坤, 贾兆鹏, 魏星, 等. 燃煤电站耦合生活垃圾发电技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 83-92.
WANG Yikun, JIA Zhaopeng, WEI Xing, et al. Study on power generation technology of coal-fired power station coupled with domestic waste[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 83-92.
- [14] GALENO G, MINUTILLO M, PERNA A. From waste to electricity through integrated plasma gasification/fuel cell (IPGFC) system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36: 1692-1701.
- [15] MINUTILLO M, PERNA A, BONA D D. Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 2837-2842.
- [16] 赵虎. 吸收式热泵回收电厂循环水余热的技术经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 10.
ZHAO Hu. Technical economy research of using absorption heat pump to recover the waste heat of power plant circulating water[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 10.
- [17] 蔡杰. 基于 ASPEN Plus 的村镇垃圾热解气化燃烧模拟与试验[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 21-23.
CAI Jie. Simulation and test of pyrolysis, gasification and combustion of rural waste based on Aspen Plus [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 21-23.
- [18] JANAJREH I, RAZA S S, VALMUNDSSON A S. Plasma gasification process: modeling, simulation and comparison with conventional air gasification[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 801-809.
- [19] KUO P C, ILLATHUKANDY B, WU W, et al. Plasma gasification performances of various raw and torrefied biomass materials using different gasifying agents[J]. Bioresource Technology, 2020, 314: 123740.
- [20] 蒋奎振. 利用热泵回收电厂余热综合研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 5.
JIANG Kuizhen. Comprehensive research on the utilization of heat pump to recover the waste heat of power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 5.
- [21] United States Environmental Protection Agency (EPA). Methods for calculating CHP efficiency[EB/OL]. 2021. <https://www.epa.gov/chp/methods-calculating-chp-efficiency>.
- [22] AHMAD A A, ZAWAWI N A, KASIM F H, et al. Assessing the gasification performance of biomass: a review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1333-1347.
- [23] 张潇元. CO₂ 零排放的 SOFC 复合动力系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 19.
ZHANG Xiaoyuan. Research on zero CO₂ emission SOFC hybrid power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 19.

- [24] YOU S, SONNE C, OK Y S. COVID-19's unsustainable waste management[J]. *Science*, 2020, 368: 1438.
- [25] 张胜田, 李梅, 李群, 等. 国内外医疗废物管理与处置现状分析及对策建议[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(12): 1505-1513.
ZHANG Shengtian, LI Mei, LI Qun, et al. Analysis of the disposal of medical waste management at home and abroad and suggestions on countermeasures[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(12): 1505-1513.
- [26] ERDOGAN A A, YILMAZOGLU M Z. Plasma gasification of the medical waste[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46: 29108-29125.
- [27] MAESTRE C D, BARROS J G, GONZALEZ Q A, et al. Thermoeconomic analysis of improved exhaust waste heat recovery system for natural gas engine based on Vortex Tube heat booster and supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101355.
- [28] ZHANG F, LIAO G, E J, et al. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a novel CO₂ based combined cooling, heating and power system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 222: 113251.
- [29] NIU M, XIE J, LIANG S, et al. Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46: 22356-22367.
- [30] POMA C, VERDA V, CONSONNI S. Design and performance evaluation of a waste-to-energy plant integrated with a combined cycle[J]. *Energy*, 2010, 35: 786-793.
- [31] PERNA A, MINUTILLO M, JANNELLI E. Hydrogen from intermittent renewable energy sources as gasification medium in integrated waste gasification combined cycle power plants: a performance comparison[J]. *Energy*, 2016, 94: 457-465.
- [32] PERNA A, MINUTILLO M, LUBRANO L A, et al. Combining plasma gasification and solid oxide cell technologies in advanced power plants for waste to energy and electric energy storage applications[J]. *Waste Management*, 2017, 73: 424-438.
- [33] 曾祥耙. 垃圾焚烧发电项目成本分析[J]. *环境卫生工程*, 2014, 22(3): 57-60.
ZENG Xiangba. Cost analysis of waste incineration-power generation projects[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2014, 22(3): 57-60.
- [34] ZHAO X, JIANG G, LI A, et al. Economic analysis of waste-to-energy industry in China[J]. *Waste Management*, 2016, 48: 604-618.
- [35] BELLOMARE F, ROKNI M. Integration of a municipal solid waste gasification plant with solid oxide fuel cell and gas turbine[J]. *Renewable Energy*, 2013, 55: 490-500.
- [36] 麦伟仪. 城市生活垃圾等离子体气化发电项目经济性分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2017: 38-39.
MAI Weiyi. Economic analysis of synthesis gas electricity generation of plasma gasification for municipal solid waste treatment[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017: 38-39.
- [37] 张美妍, 彭维珂, 陈衡, 等. 燃煤发电与垃圾发电耦合系统的性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(23): 8067-8078.
ZHANG Meiyuan, PENG Weike, CHEN Heng, et al. Performance analysis of new waste-to-energy plant incorporated with coal-fired power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23): 8067-8078.
- [38] AL K K, BIÇER Y, BOULFRAD S, et al. Techno-economic and environmental assessment of integrating SOFC with a conventional steam and power system in a natural gas processing plant[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(56): 29604-29617.
- [39] HABIBOLLAHZADE A, GHOLAMIAN E, BEHZADI A. Multi-objective optimization and comparative performance analysis of hybrid biomass-based solid oxide fuel cell/solid oxide electrolyzer cell/gas turbine using different gasification agents[J]. *Applied Energy*, 2019, 233-234: 985-1002.
- [40] MARCHIONNI M, BIANCHI G, TASSOU S A. Techno-economic assessment of Joule-Brayton cycle architectures for heat to power conversion from high-grade heat sources using CO₂ in the supercritical state[J]. *Energy*, 2018, 148: 1140-1152.
- [41] ROY D, SAMANTA S, GHOSH S. Performance assessment of a biomass-fuelled distributed hybrid energy system integrating molten carbonate fuel cell, externally fired gas turbine and supercritical carbon dioxide cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112740.
- [42] KUMAR P, SINGH O. Thermoeconomic analysis of SOFC-GT-VARS-ORC combined power and cooling system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(50): 27575-27586.
- [43] 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 CO₂ cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114622.
- [44] QIN Z, TANG Y, ZHANG Z, et al. Techno-economic-environmental analysis of coal-based methanol and power poly-generation system integrated with biomass co-gasification and solar based hydrogen addition[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020: 113646.
- [45] WU Z, WANG Y, YOU S, et al. Thermo-economic analysis of composite district heating substation with absorption heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166: 114659.

(责任编辑 杨嘉蕾)