

工业技术

与生物质电站和燃料电池耦合的医疗固废等离子汽化负碳排放发电系统的设计研究

卢 荻, 陈 衡*, 刘一帆, 潘佩媛, 徐 钢, 刘 彤
(华北电力大学, 北京 102206)

摘要:为了高效环保地处理和利用医疗废物,基于生物质电站,将医疗废物的等离子体汽化、燃料电池发电和碳捕集与封存耦合,实现了低碳排放。医疗废物经等离子体汽化后生成合成气,被清洁后首先应用于燃料电池,并在补燃后带动燃气轮机发电。高温烟气用于加热并过热生物质电站的部分给水。碳捕集单元由高温烟气和生物质发电机组的抽汽加热,同时回收了加压后二氧化碳的热能。基于 2.00 kg/s 的等离子体汽化炉和 34 MW 的生物质发电站,对所提的设计进行了热力学和经济分析,以考察项目的性能。结果表明,医疗废物发电的能源和烟效率可以达到 9.62% 和 33.58%;同时,每年可以固定和封存 10.86 万 t 的二氧化碳;项目的投资只需 5.06 a 即可收回,净现值为 72 566.21 万元。

关键词:医疗固废;等离子汽化;生物质电站;燃料电池;系统集成

中图分类号:TK267

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)10-0222-08

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.10.040

Novel medical wastes gasification power generation system integrated with fuel cell, biomass power plant and CCS

LU Di, CHEN Heng*, LIU Yi-fan, PAN Pei-yuan, XU Gang, LIU Tong

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to treat and utilize medical wastes efficiently and environmentally friendly, low carbon dioxide emission is achieved by integrating plasma gasification of medical wastes, fuel cell power generation, and carbon capture and storage based on a biomass power plant. Medical wastes are gasified by plasma to generate syngas that is cleaned and then applied in fuel cell, which drives the gas turbine after supplemental combustion. High-temperature flue gas is utilized to heat and superheat part of the feed water of the biomass power plant. The carbon capture unit is heated by flue gas and extracted steam from the biomass power plant while recovering the thermal energy from the pressurized CO₂. To examine the project's performance, a thermodynamic and economic analysis is performed on the proposed design based on a 2.00 kg·s⁻¹ plasma gasifier and a 34 MW biomass power plant. The results show that the energy and exergy efficiencies of the medical wastes power generation project can reach 9.62% and 33.58%, respectively. Meanwhile, 108 560 tons of CO₂ can be captured and stored annually. The DPP of the project is only 5.06 years with an NPV of RMB725.66 million.

Key words: medical wastes; plasma gasification; biomass power plant; fuel cell; system integration

随着日益增长的能源需求,人们越来越关注可再生能源,以减少对化石燃料的依赖,并降低温室气体排放。我国生物质发电的总装机容量,截至 2020 年底已达约 29 500 MW,成为了能源供应的重要部分^[1]。另一方面,由于新冠病毒在全球的流行,医疗机构所产生的医疗废物也越来越多。如在湖北省,产生的传染性医疗废物的总量在新冠疫情爆发期间从 40 t/d 增加到 240 t/d^[2]。医疗废物会对公共卫生产生各种严重影响。废物中具有潜在传染性的有害微生物可能会感染许多人群;未适当控制渗

漏的填埋处理可能污染大气环境和地下水等^[3]。常用的医疗废物的处理方法包括压力蒸汽灭菌、化学消毒、无线电波或微波处理、热解焚烧和等离子处理等^[4]。但传统的处理方法没有充分利用医疗废物中的能量,造成了大量的浪费。

为环境友好地处理及利用医疗废物,已有很多人进行了大量的工作。Zhao 等^[5-6]评估了多种医疗废物处理方案,并得出结论:等离子化处理医疗废物的能量回收效率最低,而与城市固体废物联合焚烧时能量回收效率更高。Erdogan 等^[7]着重研究了医

收稿日期:2022-11-28;修回日期:2023-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52106008);国家自然科学基金创新研究群体项目(51821004)

作者简介:卢荻(1997-),男,硕士生;陈衡(1989-),男,博士,副教授,研究方向为多能互补集成、热力系统优化、垃圾资源化利用,通讯联系人, heng@ncepu.edu.cn。

医疗废物的不同当量比和进料率对合成气生产的影响。陈扬等^[8]分析了近年来中国推进的医疗垃圾无害化管理及处置政策,建议推进医疗废物的资源化能源化利用,提升医疗废物的处理能力。车瑞杰等^[9]比较了各国处置医疗废物的技术,认为高温焚烧技术的固体废物处置设施经改造后可以处理流行病爆发期间的医疗废物。陈扬等^[10]总结了国外使用非焚烧手段对医疗废物处理的方式和趋势,并给出技术在中国应用的建议。

显然,通过与其他系统或循环相结合,可以显著提高发电的效率^[11]。然而,关于医疗废物等离子汽化发电与固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)、碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)和生物质发电厂的集成研究还很少。在以前的工作中^[12-13],已经广泛探讨了医疗废物等离子体汽化和火力发电厂的耦合,并制定了几种解决方案,通过结合燃烧过程的高温烟气和发电机组的高温蒸汽,对系统进行了有效集成。

本文中旨在开发一种耦合设计,以高效利用医疗废物等离子汽化产品。基于燃气轮机的汽化发电过程与燃料电池发电过程、二氧化碳捕集封存和生物质发电厂的给水预热过热过程有机结合。等离子汽化炉产生的合成气在净化后送入燃料电池,并与空气反应产生直流电,并转换为交流电。燃料电池出口未完全反应的气体其中一部分返回入口,另一部分在混合后送入燃烧室补燃,生成高温高压烟气驱动燃气轮机发电。燃气轮机的出口烟气对生物质发电机组的一部分给水预热和过热。烟气也用于向碳捕集单元供热。烟气被回收热能后,送入碳捕集装置固定二氧化碳,最终排入到大气中。固定二氧化碳在加压后储存,其中的热量用于对碳捕集装置加热。碳捕集装置所需的其余热量由生物质机组的抽汽提供。系统经过耦合后,医疗废物所含能量经过燃料电池、燃气轮机和蒸汽轮机被逐步利用并转化为电能,同时被安全环保地处理。由于医疗废物和生物质具有零碳排放的特性,加入碳捕集单元可以使耦合设计的碳排放特性为负。以一个 34 MW 的生物质发电站为参考案例,从热力学和经济角度对这个概念配置进行了评估。通过能量分析和焓分析讨论了效率提高的内在机制,并为改善医疗废物的处理和利用提供研究参考。

1 案例机组介绍

本文中提出了一种耦合设计,以应对新冠疫情

造成的巨大医疗废物处理压力和日益显著的低碳排放需求。耦合系统将基于等离子体汽化的发电过程与 SOFC、生物质发电和碳捕集过程高度集成。医疗废物依次通过这些单元进行利用,医疗废物在被高效利用的同时,也实现了无害化和负碳排放。

该生物质发电站基于朗肯循环运行,由生物质锅炉、汽轮机、凝汽器和发电机组成。表 1 显示了其基本参数。在设计工况下,该电站可产生 34 MW 的发电量。电厂回热系统为二高三低一除氧,如图 1 所示。回热系统的参数由表 2 所示。抽汽的温度在 89.6~381.9℃之间,可用于加热碳捕集装置。

表 1 案例生物质发电机组的主要参数

项目	数值	项目	数值
主蒸汽流量/(kg·s ⁻¹)	35.83	乏汽压力/kPa	4.90
主蒸汽压力/MPa	9.40	乏汽温度/℃	32.5
主蒸汽温度/℃	535.0	发电量/MW	34.00
乏汽流量/(kg·s ⁻¹)	25.37		

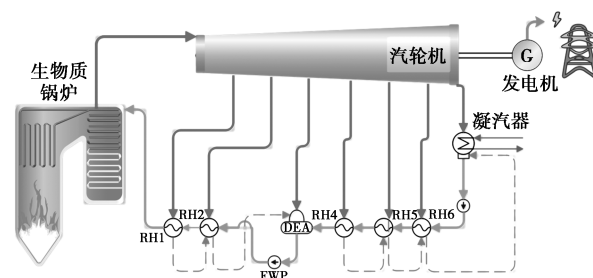


图 1 案例生物质发电机组流程示意图

表 2 案例生物质发电机组回热系统参数

项目	高压加热器		除氧器	低压加热器		
	RH1	RH2	DEA	RH4	RH5	RH6
抽汽						
温度/℃	381.9	307.6	282.8	189.2	125.9	89.6
压力/MPa	2.63	1.36	1.07	0.42	0.20	0.07
流量/(kg·s ⁻¹)	2.20	1.35	0.93	1.41	1.61	2.56
疏水						
温度/℃	192.4	158.0	—	118.8	88.5	32.5
流量/(kg·s ⁻¹)	2.20	3.95	—	1.41	3.02	5.58
给水						
进口温度/℃	189.4	158.0	140.6	115.8	85.5	32.6
出口温度/℃	222.0	189.4	158.0	140.6	115.8	85.5
换热量/MW	35.8	35.8	35.8	31.0	31.0	31.0

为了评估所提系统的可行性,以中国北方一生物质发电机组作为参照的案例电厂。电厂的设计参

数如表 2。耦合系统是在该生物质发电厂的基础上建立的。

2 耦合发电系统的提出

为应对新冠疫情造成的巨大医疗废物处理压力和日益显著的低碳排放需求,提出了一种耦合系统,如图 2 所示。

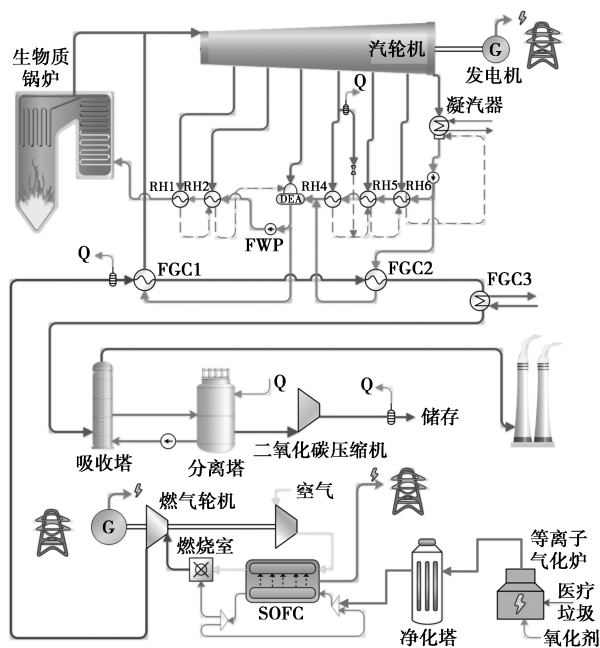


图 2 所提耦合的系统流程示意图

将基于等离子体汽化的发电过程与 SOFC、生物质发电和碳捕集过程高度集成。医疗废物依次通过这些单元进行利用,医疗废物在被高效利用的同时,也实现了无害化和负碳排放。

方案中集成了一个碳捕集单元。碳捕集装置被生物质发电厂的抽汽和燃气轮机的烟气驱动,同时回收了压缩后二氧化碳的热量。生物质发电厂是耦合系统的基础,为各单元提供不同温度的给水流。热量从合成气和燃气轮机烟气中转移到给水中,减少了抽汽量。这部分蒸汽可在汽轮机后续级中膨胀,最终发出更多的电力。碳捕集装置利用了低品位的热能,减少了脱碳装置对系统效率的影响。

医疗废物中的能量通过 SOFC、燃气轮机和蒸汽郎肯循环得到充分的利用。基于医疗废物等离子体汽化的协同发电过程,系统产生了额外的发电量。

3 系统分析方法

3.1 系统模拟

耦合系统是在 Aspen Plus 和 EBSILON Profes-

sional 平台上模拟的。该耦合系统被划分为几个部分。生物质等离子汽化、SOFC 和碳捕集单元由 Aspen Plus 进行建模。Aspen Plus 可以根据可靠的热力学数据、实际操作条件和严格的设备模型来预测反应过程和结果。Ebsilon Professional 是建模燃气轮机和生物质电站及热回收装置时广泛使用的软件,可以准确模拟热力学循环过程。

合成气的参数是在 Aspen Plus 等离子体汽化模型和燃料电池模型模拟得到的。反应的结果被输入到 EBSILON Professional 的燃气轮机模型中。EBSILON Professional 抽取的热量是根据 Aspen Plus 在碳捕集单元的计算结果设定的。

3.2 能量分析

对该项目进行了评估,以明确各系统耦合的收益。对模型的理想化假设如下:①原有生物质发电站的生物质进料质量和发电量保持不变,发电效率恒定;②生物质发电站蒸汽参数维持不变;③系统处于稳态;④对环境的热损失可以忽略。

因此,可以单独考虑医疗废物发电的效率,而无需对生物质发电过程进行分析。

考虑到所提系统的全部输入和输出,选择医疗废物发电能量效率($\eta_{E_{\text{医}}}$)来表示系统的性能:

$$\eta_{E_{\text{医}}} = P_{\text{医}} / (m_{\text{医}} \times \text{LHV}_{\text{医}}) \quad (1)$$

式中, $P_{\text{医}}$ 为医疗废物发电的功率, MW; $m_{\text{医}}$ 为医疗废物进料率, kg/s; $\text{LHV}_{\text{医}}$ 为医疗废物的低位热值。

由于生物质发电在系统耦合前后可视为恒定不变,耦合系统中额外发电的部分即为医疗废物的净输出。因此,可使用公式(2)计算系统耦合后医疗废物发电的功率。

$$P_{\text{医}} = P_{\text{总}} - P_{\text{生}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{总}}$ 为总发电功率, MW; $P_{\text{生}}$ 为生物质发电功率, MW。

案例生物质发电站的能流图见图 3。锅炉能量的净输入量为 90.13 MW,而净输出功率为 34.32 MW。

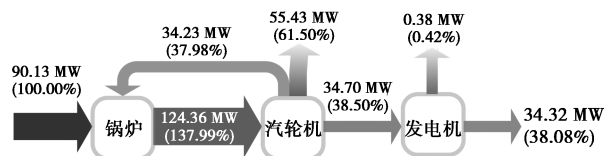


图 3 案例生物质发电机组能流图

3.3 焓分析

为了综合评估性能,还使用焓分析对系统进行了检查。焓指当一个系统可逆地改变到参考环境的状态时,所能对外做出最大的功^[8]。焓分析是一种

从热力学第二定律角度进行分析的方法,比较各个过程中的做功能力损失并区分出效率较低的设备^[12]。

燃料焓值可以通过公式(3)计算^[13]。

$$Ex_{\text{燃料}} = m_{\text{燃料}} \times \text{LHV}_{\text{燃料}} \times (1.0064 + 0.1519 \times \omega_{\text{氢}}/\omega_{\text{碳}} + 0.0616 \times \omega_{\text{氧}}/\omega_{\text{碳}} + 0.0429 \times \omega_{\text{氮}}/\omega_{\text{碳}}) \quad (3)$$

式中, $Ex_{\text{燃料}}$ 为焓, kW; $m_{\text{燃料}}$ 为质量流量, kg/s; $\text{LHV}_{\text{燃料}}$ 为低热值, kJ/kg; $\omega_{\text{氢}}$ 、 $\omega_{\text{碳}}$ 、 $\omega_{\text{氧}}$ 、 $\omega_{\text{氮}}$ 分别为氢、碳、氧和氮的质量分数。

生物质发电焓效率($\eta_{Ex_{\text{生}}}$)、医疗废物发电焓效率($\eta_{Ex_{\text{医}}}$)和总发电焓效率(η_{Ex})由公式(3)~(5)计算。

$$\eta_{Ex_{\text{生}}} = P_{\text{生}}/Ex_{\text{生}} \quad (4)$$

$$\eta_{Ex_{\text{医}}} = P_{\text{医}}/Ex_{\text{医}} \quad (5)$$

$$\eta_{Ex} = P_{\text{总}}/(Ex_{\text{生}} + Ex_{\text{医}}) \quad (6)$$

式中, $Ex_{\text{生}}$ 和 $Ex_{\text{医}}$ 分别为生物质和医疗废物的焓输入, MW。

3.4 经济性分析

在估计一项投资在财务上是否可行时,需要对其进行经济分析。由于原有的生物质发电站被假定在耦合后参数保持不变。因此,本项目的财务平衡需要关注医疗废物汽化发电过程。动态投资回收期(dynamic payback period, DPP)和净现值(net present value, NPV)是衡量项目经济性的重要指标。DPP是指考虑到现金的时间价值后,从投资开始起,到累计折现现金流量等于0时所需的时间,其定义如下:

$$\sum_{y=1}^{\text{DPP}} [(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})/(1+r)^y] = 0 \quad (7)$$

式中, y 为项目运行年数; r 为折现率。

净现值是所提项目生命周期内净现金流的累积,可以用公式(8)计算。项目如果 DPP 较短且 NPV 较高,盈利能力较强。

$$\text{NPV} = \sum_{y=1}^{b_{\text{建设}}+b_{\text{经济}}} [(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})/(1+r)^y] \quad (8)$$

式中, $b_{\text{建设}}$ 为建设周期, a ; $b_{\text{经济}}$ 为经济周期, a 。

年收入(C_{in})可由公式(9)计算:

$$C_{\text{in}} = P_{\text{医}} \times N \times c + 3.6 \times m_{\text{医}} \times N \times c_{\text{补}} \quad (9)$$

式中, N 为年运行时间, h; c 为上网电价, 元/kWh; $c_{\text{补}}$ 为医疗废物处理补贴, 元/t。在建设周期,项目的年运行时间(N)为零;因此,年现金流入(C_{in})为零。

每年的支出(C_{out})可以用公式(10)表示:

$$C_{\text{out}} = C_{\text{运维}} + C_{\text{利息}} + C_{\text{排放}} + C_{\text{运输}} \quad (10)$$

式中, $C_{\text{运维}}$ 为运维成本, 元; $C_{\text{利息}}$ 为利息, 元, 可由公

式(11)计算; $C_{\text{排放}}$ 和 $C_{\text{运输}}$ 为每年的二氧化碳排放和医疗废物运输成本, 元。

$C_{\text{利息}}$ 可表述为:

$$C_{\text{利息}} = (C_{\text{总}} \times k \times i) / [1 - (1+i)^{-z}] \quad (11)$$

式中, z 为贷款年限; k 为贷款率; $C_{\text{总}}$ 为总投资成本, 元; i 为利率。

$$C_{\text{排放}} = m_{\text{CO}_2} \times N \times 3.6 \times C_{\text{CO}_2} \quad (12)$$

式中, m_{CO_2} 为单位时间捕集的二氧化碳, kg/s; C_{CO_2} 为二氧化碳排放成本, 元/t。

$$C_{\text{运输}} = m_{\text{医}} \times N \times 3.6 \times C_{\text{医}} \quad (13)$$

式中, $m_{\text{医}}$ 为医疗废物进料率, kg/s; $C_{\text{医}}$ 为单位医疗废物运输成本, 元/t。

4 分析与讨论

4.1 耦合系统参数

设计中引入了一个等离子汽化炉来处理医疗废物,可以无害化且清洁地处理危险废物。该项目使用新冠疫情带来的巨量医疗废物排放作为原料。根据文献[14]的数据,表3显示了医疗废物的元素分析和工业分析结果。医疗废物的含碳量较高且含水量较低,该燃料的低位热值为29140 kJ/kg。

表3 医疗废物成分分析

项目	数值	项目	数值
工业分析/%		元素分析/%	
水分	0.29	C	63.62
固定碳	18.89	H	9.68
挥发分	78.52	O	22.29
灰分	2.30	N	0.71
		S	0.21
		Cl	0.90
		低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	29140

原料被基于等离子炬的等离子汽化炉处理,汽化时基本的参数和产品如表4所示^[15]。

表4 医疗废物汽化基本参数

项目	数值
医疗废物进料量/(kg·s ⁻¹)	2.00
水进料量/(kg·s ⁻¹)	1.60
等离子炬效率/%	86.00
等离子炬负荷/kW	23323.64
合成气参数	
温度/℃	350.0
质量流量/(kg·s ⁻¹)	3.54
低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	20300.14
排渣量/(kg·s ⁻¹)	0.04

出于对燃气轮机和燃料电池的安全运行考虑,在合成气为氧化剂预热后,脱除杂质,随后进入燃料电池中与空气反应,产生直流电并被转化成交流电。燃料电池单元的主要参数如表 5 所示^[16]。

表 5 燃料电池基本参数

项目	数值
运行压力/MPa	2.00
空气流量/(kg·s ⁻¹)	35.28
阴极进出口温度/°C	820.0/975.0
阳极进出口温度/°C	868.0/975.0
电池功率/kW	33898.6
燃料利用效率/%	85.0
直流电转化效率/%	92

阴阳极出口的未完全反应的气体一部分送回入口再次反应,其余则送入燃烧室补燃,以驱动燃气轮机。燃气轮机带动二氧化碳压缩机、空气压缩机和发电机。主要参数在表 6 中所示。

表 6 燃气轮机参数

项目	参数
外界环境	20.0°C/0.1 MPa
进口空气	497.6°C/2.00 MPa
烟气参数	575.1°C/0.1 MPa
增压比	20.0
发电量	13839.88 kW

热回收装置捕捉燃气轮机烟气中可利用的热能。1~3 号加热器(flue gas cooler, FGC)用于冷却烟气。烟气中的热量首先用于加热和过热生物质电站给水,温度从 575.1°C 降至 220.3°C。然后,烟气加热碳捕集单元,并进入 FGC2 加热电厂给水。当烟气离开 FGC3 时,温度下降到 40.0°C。最后,烟气被转移到碳捕集装置以去除和固定二氧化碳,并排入大气。

系统在耦合后,生物质电厂的抽汽分为 2 股,一股在回热器中加热给水,另外一股抽汽加热碳捕集单元。在考虑了碳捕集装置运行的影响后,该电厂在运行工况下可额外发出 23.09 MW 的电量。

二氧化碳作为温室气体的重要组成部分,其排放对全球变暖有着重要的影响。为了实现中国 2030 年和 2060 年的碳达峰及碳中和的目标,当务之急是在源头上捕获和封存二氧化碳。乙醇胺(monoethanolamine, MEA)溶液是常用于吸收二氧化

碳的吸收剂。根据文献[17]的案例,使用 ASPEN[®]对碳捕集过程进行了模拟。CCS 单元的基本参数由表 7 所示。经回收热量后,烟气进入碳捕集装置去除二氧化碳并最终排入大气。固定的二氧化碳在压缩后被储存起来。CCS 单元的热负荷由模型模拟计算,由烟气、抽汽和压缩后的二氧化碳分别提供 2 600、11 400、1 500 kW。在设计的工作条件下,MEA 溶液的质量分数为 35.0%,CO₂ 脱除率可以达到 89.9%,每去除 1 kg 的二氧化碳需要热量 3 651 kJ。

表 7 CCS 单元的基本参数

项目	参数
烟气进口温度/°C	40.0
MEA 浓度/%	35.0
MEA 溶液质量流量/(kg·s ⁻¹)	44.48
吸收塔压力/MPa	0.10~0.20
CO ₂ 固定率/%	89.9
热负荷/kW	15223.28
MEA 逃逸量/(kg·s ⁻¹)	0.02

4.2 能量分析结果

表 8 显示了所提耦合系统的能量分析结果。系统中,生物质进料率不变,而医疗废物进料量为 2.00 kg/s。在 CCS 单元运行的情况下,净输出功率增加了 23.09 MW。燃气轮机组、SOFC 组和生物质发电厂总功率的增加共同造就了系统的性能提升。当生物质发电站的发电效率保持不变时,该项目医疗废物发电的效率可达到 39.62%。显然,耦合系统具有良好的发电性能。

表 8 所提出的耦合系统和案例生物质电厂对比

项目	案例电厂	耦合系统	差别
医疗废物进料率/(kg·s ⁻¹)	—	2.00	—
生物质电站发电量/MW	34.32	41.39	+7.07
燃气轮机发电量/MW	—	13.81	—
SOFC 发电量/MW	—	31.19	—
CCS 热负荷/MW	—	15.14	—
等离子炬负荷/MW	—	27.12	—
医疗废物发电效率/%	—	39.62	—
净发电/MW	34.32	57.41	+23.09

对所提出系统中的能量流进行详细的比较探索,以研究在碳捕集单元运行时,由于新单元加入而导致效率提高的内在机理。

如图 4 所示,在系统耦合后,总能量流增加。生物质锅炉提供的能量保持不变(90.13 MW),并被设定为基准值(100%)。耦合系统中医疗废物引入了 58.28 MW(64.66%)的能量。医疗废物在等离子汽化器中被处理为合成气,等离子体炬消耗了 27.12 MW(30.10%)的电,而产品中获得了 81.60 MW 的能量。烟气中的 21.44 MW 热能通过给水流进入到生物质发电站中。SOFC 和燃气轮机分别发出 31.18、13.80 MW 的电,而蒸汽轮机的发电量增加 7.07 MW。由于碳捕集单元需要热能来再生 MEA 溶液,而二氧化碳需要在压缩状态下储存,因此可以回收利用二氧化碳压缩后产生的热量。从汽轮机抽汽、烟气和压缩二氧化碳中分别吸收了 11.40、2.60、1.50 MW 的热量用以再生 MEA 溶液。综上所述,当原生物质发电站的性能不变时,该项目在耦合后的净输出为 23.09 MW,这是医疗废物等离子体汽化引入而造成的。

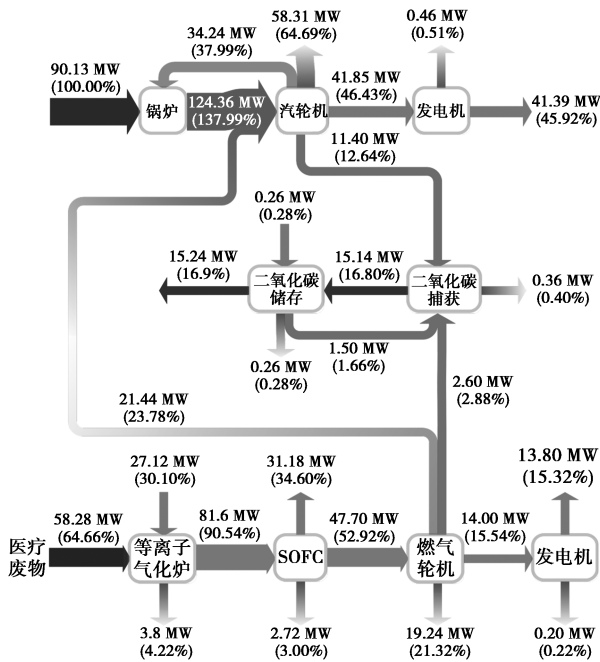


图 4 耦合系统的能流图

4.3 焓分析结果

为了综合评估性能,同时使用焓分析方法对系统进行了检查。参考的环境参数被设定为 101.325 kPa 和 293.15 K。

如表 9 所示,对项目的详细焓流和焓损进行了分析,并对各个单元的性能进行了评估。与原来的发电站相比,生物质进料保持不变,所以生物质输入的焓流保持不变。当系统耦合时,全部收益都可以归于医疗废物。因此,将医疗废物的焓设为基准值

(100%)。等离子汽化需要通过等离子炬输入额外 27.12 MW(44.52%)的能量。由于抽汽量减少,更多的蒸汽在蒸汽轮机后续级中工作,生物质发电站的总焓损略有增加。当该系统碳捕集单元在运行时,燃气轮机驱动二氧化碳压缩机,减少了该机组的焓损失。同时,汽轮机中的一部分抽汽加热碳捕集单元,减少了医疗废物流入生物质电站的那一部

表 9 医疗废物发电的焓性能

项目	数值	百分率/%
输入焓值/MW		
医疗废物	60.92	100.00
等离子炬	27.12	44.52
输出焓值/MW		
发电机	4.44	7.29
SOFC	31.19	51.20
燃气轮机发电机/MW	11.96	19.63
焓值损失/MW		
生物质电厂部分		
汽轮机及凝汽器	0.52	0.85
发电机	0.04	0.66
合计	0.56	1.51
等离子汽化单元		
等离子炬	3.80	6.23
汽化炉	11.13	18.26
合计	14.93	24.49
SOFC 单元		
空气鼓风	1.18	1.94
燃料电池	7.04	11.56
合计	8.22	13.50
燃气轮机机组		
燃气轮机	8.19	13.43
燃气轮机发电机	0.20	0.33
烟气	0.43	0.72
合计	8.82	14.48
热回收装置/MW	1.68	2.76
碳捕集单元/MW		
抽汽损失	3.42	5.61
烟气加热损失	0.96	1.58
二氧化碳压缩损失	1.84	3.02
合计	6.22	10.21
总输入焓值/MW	88.04	144.52
总损失焓值/MW	40.43	66.43
净输出焓值/MW	20.46	33.58

分焓值的损失。在此工况下,生物质电厂内、等离子汽化单元、SOFC 单元、燃气轮机机组、热回收装置和碳捕集单元的焓损分别为 0.56 (1.51%)、14.93 (24.49%)、8.22 (13.50%)、8.82 (14.48%)、1.68 (2.76%)、6.22 (10.21%) MW。在不影响原有生物质电站焓效率的情况下,医疗废物发电的焓效率可达 33.58%。

4.4 经济性分析

该项目与经济评估有关的基本参数由相关文献确定,如表 10 所示^[18-27]。该项目建设期为 2 a,经济期为 18 a,而系统每年运行 7 200 h。根据文献,每年运维成本设为总投资成本的 4%。二氧化碳排放成本为 0.07 元/kg,医疗废物运输成本为 0.06 元/kg。当地医疗废物发电价格为 750 元/MWh,而医疗废物处理的补贴约为 3 200 元/t。

表 10 经济性分析基本假设

项目	数值
建设周期/a	2
经济周期/a	18
补贴电价/(元·MWh ⁻¹)	750
医疗废物处理补贴/(元·t ⁻¹)	3200
折现率/%	10
CO ₂ 储存费用/(元·kg ⁻¹)	0.07
医疗废物运输成本/(元·kg ⁻¹)	0.06
年运行时间/h	7200
年封存 CO ₂ /kg	119672.00

原有的生物质发电站在本项目中保持不变。新加入设备均与医疗废物汽化发电项目有关,设备成本由文献中的经验公式法或规模因子法得到各设备所需投资进行估算。项目总投资为 84 241.41 万元,其中碳捕集单元、热回收单元、燃气轮机、SOFC 单元和等离子体汽化炉单元的价格分别为 22 731.25 (26.83%)、919.85 (1.09%)、1 147.57 (1.35%)、50 500.26 (59.61%)、9 409.68 (11.10%) 万元。

如表 11 所示,该项目需 84 241.4 万元总投资,年供电量可达到 147.30 GWh。项目投资的 70% 通过 15 a 的贷款融资,年利率为 6.15%^[28]。考虑到每年运维、二氧化碳排放以及医疗废物运输费用后,年净收入 28 318.69 万元。项目的 DPP 为 5.06 a, NPV 可达到 72 566.21 万元。由此可见,项目具有良好的经济可行性,投资的回报可观。

表 11 所提系统的经济性分析结果

项目	数值
总投资/万元	84241.4
运维成本/万元	3367.18
年上网电量/GWh	147.30
年净收入/万元	27816.98
年二氧化碳封存费用/万元	618.46
年医疗废物运输成本/万元	329.85
项目寿命/a	
建设周期	2
经济周期	18
借贷比例/%	70.0
贷款年限/a	15
贷款利率/%	6.15
DPP/a	5.06
NPV/万元	72566.21

4.5 讨论

作为一种有效处理医疗废物的手段,等离子汽化技术投资成本较高,耗能过大,阻碍了技术的普及。本文中对基于生物质发电的新型医疗废物等离子体汽化发电过程进行了热经济分析,该系统将医疗废物发电过程与 SOFC 和碳捕集有机结合,对医疗废物清洁高效地利用。从碳排放的角度分析,系统可以有效地脱除二氧化碳,每年可固定封存 10.86 万 t 二氧化碳,而每捕获 1 kg 二氧化碳只需要 3 651 kJ 的热量。从热力学的角度分析,医疗垃圾发电效率可达 39.62%,焓效率可达 33.58%。可以看出,这个项目可以高效地利用医疗废物中的能量,并将医疗废物无害化。

另一方面,从经济性的角度考虑,医疗废物处理的补贴降低了系统的成本,同时与 SOFC 和 CCS 的耦合充分利用了系统的各个品位的热能,提升了系统发电的效率,减少了等离子汽化对机组效益的影响,年净收入可达 28 318.69 万元。由经济性分析的成本估算公式可知,系统单位投资随规模的提升而降低,可考虑在生物质电站规模所允许的限制范围内,增加医疗废物处理规模,以达到更高的医疗废物处理能力和经济效益。

5 结论

提出了一种基于燃料电池、生物质电站与 CCS 耦合的新型医疗废物等离子汽化发电系统,并从热

力学第一、第二定律,经济性和碳排放的角度对其进行了分析,得到如下结论。

(1)在不影响原有生物质电站出力时,耦合系统每年可处理医疗废物 5.18 万 t,同时固定 90% 的二氧化碳,年封存二氧化碳可达 10.86 万 t。

(2)对耦合系统进行的能量分析和焓分析的结果显示,相较于原有系统,医疗废物等离子汽化的引入可使系统的净发电增加多达 20.46 MW,医疗废物发电的能效率可达 39.62%。耦合系统的医疗废物部分的焓损失为 40.43 MW,医疗废物发电的焓效率可达 33.58%。

(3)对系统进行的经济性分析显示出,在贷款 70% 的条件下,耦合系统的动态投资回收期为 5.06 a,净现值可达 72 566.2 万元,具有可观的经济收益。

参考文献

- [1] 单明.生物质能开发利用现状及挑战[J].可持续发展经济导刊,2022,(4):48-49.
- [2] Lemma H, Asefa L, Gameda T, et al. Infectious medical waste management during the covid-19 pandemic in public hospitals of west guji zone, southern ethiopia[J]. Clinical Epidemiology and Global Health, 2022, 15: 101037.
- [3] 陈凌,张吉.汶川地震后救灾工作中医疗废物对环境的影响及建议措施[J].农业环境与发展,2008,(4):41-42.
- [4] 黄正文,张斌,艾南山,等.八种医疗废物处理方法比较分析[J].中国消毒学杂志,2008,(3):313-315.
- [5] Zhao H, Liu H, Wei G, et al. Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the covid-19 pandemic in China[J]. Waste Management, 2021, 126: 388-399.
- [6] Zhao H, Wang L, Liu F, et al. Energy, environment and economy assessment of medical waste disposal technologies in China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 796: 148964.
- [7] Erdogan A A, Yilmazoglu M Z. Plasma gasification of the medical waste [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (57): 29108-29125.
- [8] 陈扬,冯钦忠,刘俐媛,等.新时期医疗废物处置技术体系的变革及发展[J].环境工程学报,2021,15(2):383-388.
- [9] 车瑞杰,李继宁,张胜田,等.国内外医疗废物处理主要技术应用及发展[J].当代化工研究,2022,(6):54-56.
- [10] 陈扬,王开宇,刘富强.医疗废物非焚烧处理技术应用及发展趋势探讨[J].环境保护,2005,(7):57-58.
- [11] Parraga J, Khalilpour K R, Vassallo A. Polygeneration with biomass-integrated gasification combined cycle process: Review and prospective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 92: 219-234.
- [12] Chen H, Li J, Li T, et al. Performance assessment of a novel medical-waste-to-energy design based on plasma gasification and integrated with a municipal solid waste incineration plant[J]. Energy, 2022, 245: 123156.
- [13] Pan P, Peng W, Li J, et al. Design and evaluation of a conceptual waste-to-energy approach integrating plasma waste gasification with coal-fired power generation[J]. Energy, 2022, 238: 121947.
- [14] Vilardi G, Verdone N. Exergy analysis of municipal solid waste incineration processes; the use of O₂-enriched air and the oxy-combustion process[J]. Energy, 2022, 239: 122147.
- [15] 信泽寅男.能源工程中(焓)的浅释[M].北京:化学工业出版社,1987.
- [16] Gerasimov G, Khaskhachikh V, Kornilieva V, et al. Study of pyrolysis of components and mixture of medical waste[J]. Chemical Engineering Transactions, 2019, 76: 1423-1428.
- [17] Xu J, Sun E, Li M, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant[J]. Energy, 2018, 157: 227-246.
- [18] Zhao H, Jiang T, Hou H. Performance analysis of the SOFC-CCHP system based on H₂O/Li-Br absorption refrigeration cycle fueled by coke oven gas[J]. Energy, 2015, 91: 983-993.
- [19] Jana K, De S. Biomass integrated gasification combined cogeneration with or without CO₂ capture—A comparative thermodynamic study [J]. Renewable Energy, 2014, 72: 243-252.
- [20] Gerdes K, Grol E, Keairns D, et al. Integrated gasification fuel cell performance and cost assessment [J]. National Energy Technology Laboratory, Us Department of Energy, 2009, 7: 1-26.
- [21] 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.
- [22] Al-Khori K, Bicer 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.
- [23] Bellotti D, Sorce A, Rivarolo M, et al. Techno-economic analysis for the integration of a power to fuel system with a ccs coal power plant [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 33: 262-272.
- [24] Ud Din Z, Zainal Z A. Biomass integrated gasification-SOFC systems: technology overview [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1356-1376.
- [25] Pettinau A, Ferrara F, Amorino C. Combustion vs. Gasification for a demonstration ccs (carbon capture and storage) project in Italy: A techno-economic analysis [J]. Energy, 2013, 50: 160-169.
- [26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法[J].可再生能源,2006,(2):2.
- [27] 邱丽霞,郝艳红.一种耦合燃气轮机的富氧燃烧系统技术经济性分析[J].机械工程学报,2016,52(18):153-158.
- [28] 张从光.分布式生光耦合供热系统构建与综合评价研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2020. ■