

DOI: 10.19666/j.rlfed.20220615

厌氧发酵与焚烧耦合的固体废物发电系统 综合性能分析

李云飞, 陈衡, 徐钢, 陈宏刚

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

[摘要] 提出了一种高效的厌氧发酵与焚烧耦合的固体废物(固废)发电综合系统, 采用固废厌氧发酵产生沼气, 沼气进入沼气燃烧器燃烧产生高温烟气, 烟气通过机组中的加热器和空气预热器对汽水系统和一、二次风进行加热; 在保证进入锅炉中固废焚烧产生的热量不变的情况下, 增加了进入汽轮机中做功的能量, 从而提高了整体机组的发电效率; 同时根据热力学第一定律和热力学第二定律分析机组发电效率和焓效率提升的原因。结果表明: 与案例机组相比, 所提出加入沼气燃烧高温烟气系统可增加 8.69 MW 净发电量; 此外, 新系统的发电效率提升了 3.56 个百分点, 发电焓效率提升了 9.74 个百分点。经济性分析表明: 所提出的耦合系统增设了厌氧发酵沼气燃烧系统, 动态回收周期为 3.78 年, 经济优势明显。

[关键词] 厌氧发酵; 焚烧; 固废发电; 系统耦合; 性能分析

[引用本文格式] 李云飞, 陈衡, 徐钢, 等. 厌氧发酵与焚烧耦合的固体废物发电系统综合性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 56-65. LI Yunfei, CHEN Heng, XU Gang, et al. Comprehensive performance analysis of solid waste power generation system coupled with anaerobic fermentation and incineration[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 56-65.

Comprehensive performance analysis of solid waste power generation system coupled with anaerobic fermentation and incineration

LI Yunfei, CHEN Heng, XU Gang, CHEN Honggang

(Beijing Key Laboratory of Emission Surveillance and Control for Thermal Power Generation, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An efficient integrated power generation system of solid waste coupled with anaerobic fermentation and incineration is proposed. Solid waste anaerobic fermentation is adopted to generate biogas, which enters the biogas burner to burn and generates high-temperature flue gas, and the flue gas heats the steam-water system and the primary and secondary air through the heater and air preheater in the unit. Under the condition that the heat generated by solid waste incineration in the boiler is not changed, the energy entering the steam turbine to do work is increased, thus the power generation efficiency of the whole unit increases. At the same time, according to the first law of thermodynamics and the second law of thermodynamics, the reasons for power generation efficiency and exergy efficiency improvement are analyzed. The results show that, compared with the case unit, the proposed high-temperature flue gas system with biogas combustion can increase the net power generation by 8.69 MW. In addition, the power generation efficiency and power generation exergy efficiency of the new system has increased by 3.56 percentage points and 9.74 percentage points, respectively. Economic analysis shows that the proposed coupling system is equipped with an anaerobic fermentation biogas combustion system, and the dynamic recovery period is 3.78 years, which has obvious economic advantages.

Key words: anaerobic fermentation; incineration; solid waste power generation; system coupling; performance analysis

“双碳”愿景下, 可再生能源发电成为节能减排的重要推手。固体废物(固废)发电对于解决固

废减量化、资源化高效清洁利用具有突出作用, 其作为可再生能源发电的重要组成部分正逐步推进。

收稿日期: 2022-06-23 网络首发日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51821004)

Supported by: Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51821004)

第一作者简介: 李云飞(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多能互补系统集成技术, leeyf@ncepu.edu.cn.

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、热力系统优化、垃圾资源化利用等, heng@ncepu.edu.cn.

我国传统的固废无害化处理手段为焚烧、堆肥、填埋。随着城市社会的发展,一方面我国东部城市用地趋于紧张,另一方面人们的生态环保意识和工业化水平有所提高:因此我国对固废处理手段选择也逐渐具有偏向性。

对于填埋处理,其处理成本最低、技术要求最低且在我国固废处理中占据较大比例,但是逸散到空气中的填埋气体很难收集利用,其中含有的甲烷气体不仅会加剧温室效应,而且不利于城市固废资源的回收利用^[1-2]。

厌氧发酵处理手段起源于以小型厌氧发酵为主的农村地区。厌氧发酵产生的气体可用于采暖和燃料的供应,剩余发酵后渣滓可用作农作物肥料^[3]。厌氧发酵获得的沼气,作为一种可以代替天然气的可再生能源,被视为多种物质的混合物。沼气中包含氢气、氧气、二氧化碳、硫、水等。本文采用的沼气净化装置净化前的沼气低位热值为 15.56 MJ/kg,净化后的低位热值为 32.44 MJ/kg,净化装置出口沼气热值因甲烷气体成分比例增大而增大。

厌氧发酵回收固废是一种绿色可持续的回收处理手段,然而城市固废中含水量较高并且热值较低;同时固废中又蕴含生物质能,尤其餐饮固废、畜禽粪便、农村秸秆、食品加工废弃物含有大量的 N、P 等元素的有机质^[3-4]。因此,有学者提出可以利用耦合厌氧发酵与焚烧固废耦合的方法来解决此问题。研究表明,采用焚烧发电和厌氧发酵沼气发电耦合处理国内城市固废可达到 3.64×10^8 kW·h 的发电量,有潜力替代目前的填埋处理手段^[4]。

然而,厌氧发酵与焚烧耦合的固废发电技术存在很多因素的制约。燃烧固废使得电站效率提升仍是一个重要的研究课题。其中,固废焚烧发电机组的腐蚀问题是固废能量高效利用的主要阻碍。Dal 等人^[5]将焚烧室内的普通耐火砖替换为可克服高温腐蚀的高温相变材料。Bogale 等人^[6]利用烟气腐蚀性沿炉排长度的变化,设置单独的过热器利用低腐蚀性部分的高温烟气。已有研究提出了耦合固废焚烧与燃煤的发电系统^[7-9],从解决固废焚烧发电机组容量小、蒸汽循环不完善的问题入手^[10-12],显著提升了固废发电机组效率。

本文旨在讨论如何以方便快捷和灵活的方式将沼气燃烧器的烟气热量与焚烧固废的热量结合起来。当前研究的重要性和独创性在于:1)提出了一种简单灵活的方案,通过厌氧发酵从固废中产生

沼气,沼气燃烧产生高温烟气系统与焚烧固废的电站系统耦合;2)对本文中提出的沼气燃烧器高温烟气利用系统进行热力学分析,并揭示了性能提高的内在原因;3)对本文提出的沼气燃烧器高温烟气利用系统进行经济性分析,证明其相较于案例方案存在的显著经济效益。

本文以日处理城市生活固废 500 t 的固废焚烧线作为基础,研究了耦合系统的热力性能,并通过能量分析和烟分析发现提高效率的内在机理,并用经济分析直观展示其效益。本文研究可为提高固废焚烧电站发电效率方面提供具有参考价值的方案和可靠的技术指导。

1 案例机组介绍

为说明本文提出的厌氧发酵与焚烧耦合的新型固废发电系统的可行性,以中国北方某已投运的固废焚烧发电机组为案例,该发电机组每天可处理城市生活固废 500 t,图 1 为该固废焚烧发电机组系统示意。

由图 1 可见,案例机组设单条焚烧线,配置焚烧炉排设干燥炉排、燃烧炉排和燃尽炉排 3 部分。焚烧炉侧墙蒸发屏及后墙分别设辅助燃烧器和点火燃烧器,进料固废在热值过低、水分过高、灰分过多时,投入辅助燃烧器从而强化固废的焚烧及燃尽以控制有害气体的排放。固废焚烧炉可燃用未经分拣的固废,但投入的进料需保证较为稳定的水平。设计的入炉焚烧固废的元素分析、工业分析及低位发热量见表 1。

为保证焚烧余热炉内的高温环境,并为固废充分燃烧放热且燃尽提供足够的空气量,设置蒸汽-空气预热器,分一次风蒸汽-空气预热器和二次风蒸汽-空气预热器。其内部结构为螺旋翅片管受热面,管内蒸汽垂直接触放热,管外空气横向冲刷。一次风和二次风均分 2 级预热,热源均为锅炉汽包饱和蒸汽和汽轮机第一非调整抽汽,分别加热一、二次风风温至 220、166 °C。

由图 1 可见,汽轮机设有 3 级非调整抽汽。其中 1 级抽汽供给蒸汽-空气预热器,2 级抽汽供给除氧器,3 级抽汽供给低压回热加热器;厂内部分用汽,如有机固废湿解系统、采暖系统等也采用汽轮机抽汽。案例固废焚烧发电机组锅炉效率约 81%,净发电效率不到 20%。设计工况案例固废焚烧发电机组的主要参数见表 2。

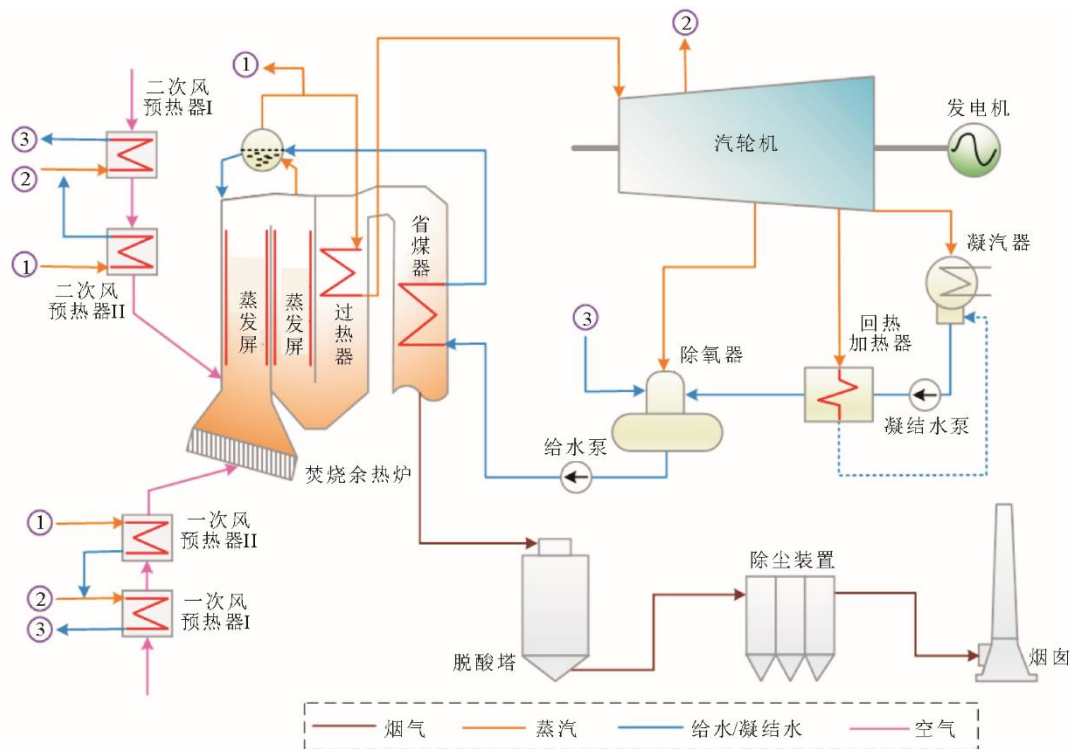


图 1 案例固废焚烧发电机组示意

Fig.1 Schematic diagram of the solid waste incineration generator set in case

表 1 案例机组入炉固废成分及热值

Tab.1 The composition and calorific value of solid waste in furnace of the case unit

								$w_{ar}/\%$	
C	H	O	N	S	Cl	水分	灰分	低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	
21.97	1.91	12.78	0.50	0.20	0.30	41.75	20.89	6 700	

表 2 案例固废焚烧发电机组的主要参数

Tab.2 Main parameters of solid waste incineration generator set in case

项目	数值
固废焚烧量/(kg·s ⁻¹)	9.26
给水参数	5.88 MPa/130.08 °C/21.16 kg/s
主蒸汽参数	3.83 MPa/390.01 °C/20.00 kg/s
抽汽参数 (二级)	0.83 MPa/244.28 °C/1.30 kg/s
抽汽参数 (三级)	0.06 MPa/85.50 °C/1.33 kg/s
乏汽参数	5.50 kPa/34.62 °C/14.59 kg/s
发电量/MW	14.58
供电量/MW	12.39
固废发电效率/%	19.97

2 新型耦合发电系统的提出

本文提出的厌氧发酵与焚烧耦合的固废发电系统示意如图 2 所示。

系统中,沼气含有的碳氢燃料在燃烧室内燃烧,

产生的高温烟气在 I 号加热器中加热蒸发大量焚烧余热锅炉入口给水后,依次流入 II、III 号加热器中;固废焚烧余热锅炉出口蒸汽在 II 号加热器过热。为提高整体系统的发电效率,将除氧器中的疏水流入 III 号加热器进行加热,加热后的蒸汽注入汽包中。III 号加热器出口烟气依次流入 IV、V 号加热器;IV 号加热器使进入焚烧余热锅炉的一次风风温提高;V 号加热器用来加热疏水。净化后的沼气燃烧产生的烟气经余热回收至 90 °C^[13-14];流经 V 号加热器中的烟气最终汇集至固废焚烧发电机组的烟气排放管路,经处理后排空。

汽轮机乏汽温度约为 35 °C,一般在环境温度以上,作为发酵进料保温的热源。在冬季等低温环境条件下,利用乏汽预先对沼气发酵罐中的料液进行加热,可提高整体系统的能效,因此可以显著降低整体系统的投资成本和运营成本。

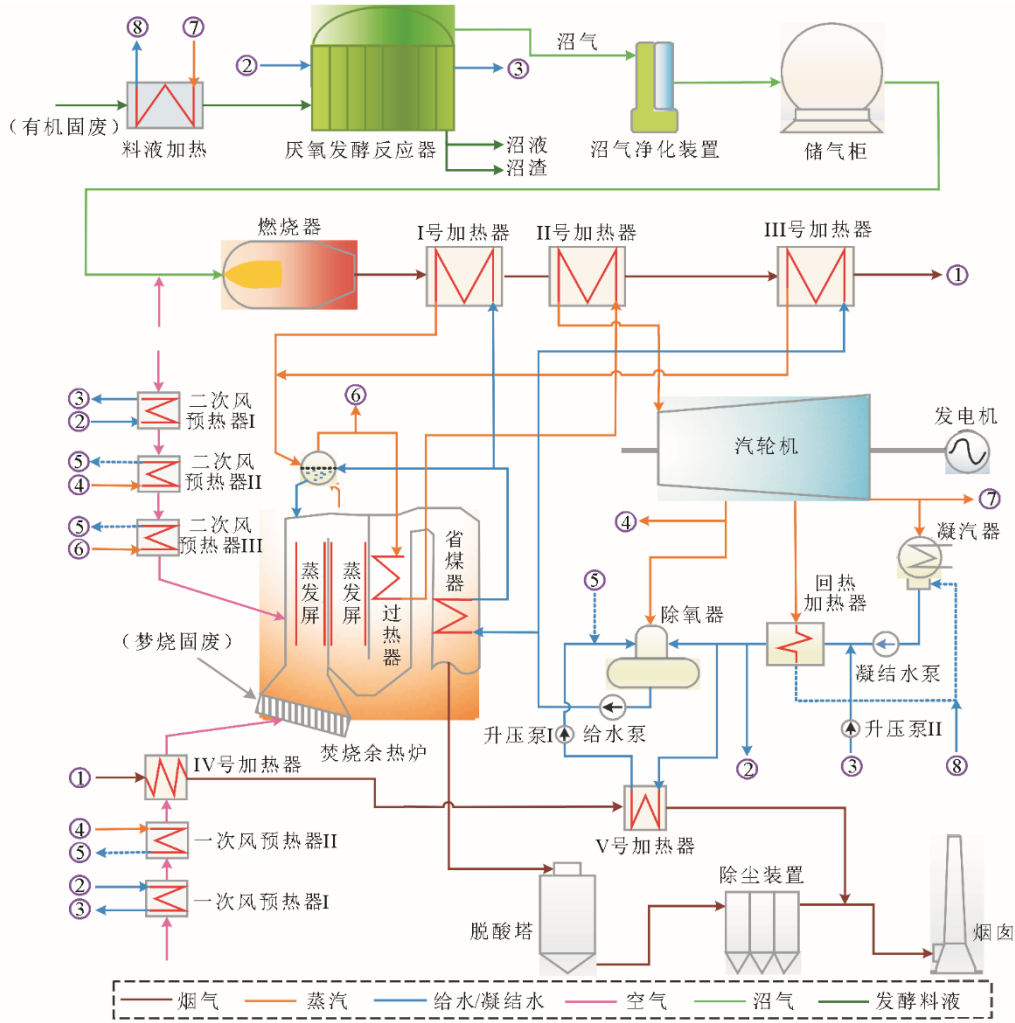


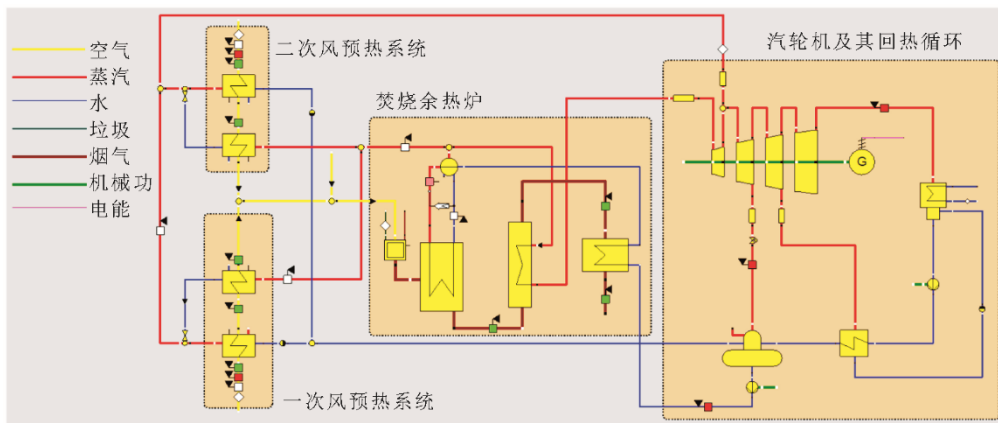
图 2 新型厌氧发酵与焚烧耦合的固废发电系统示意
 Fig.2 Schematic diagram of the new type of solid waste power generation system coupled with anaerobic fermentation and incineration

3 耦合系统分析方法

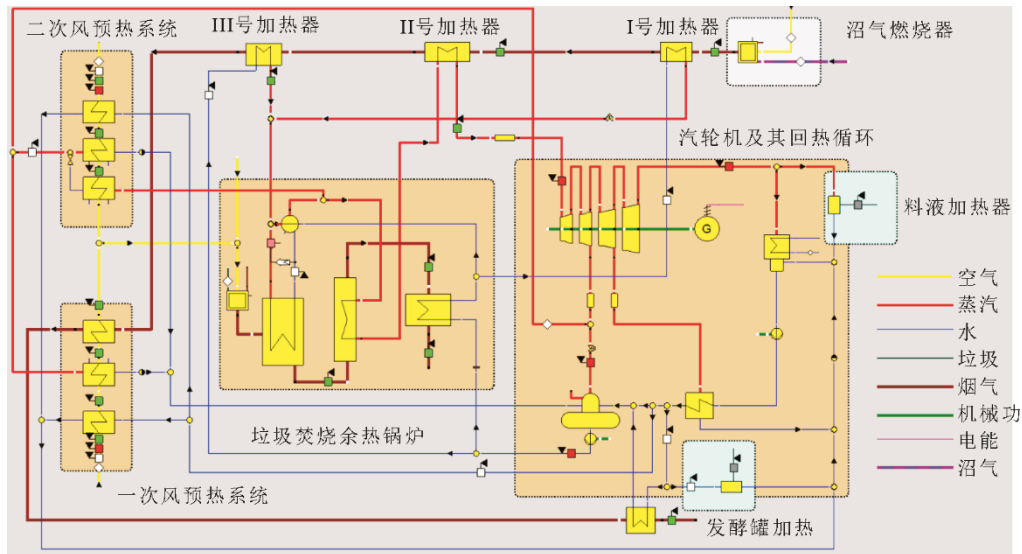
3.1 系统建模

在 EBSILON professional 软件中对案例机组和耦合发电系统设计的电站热力循环进行建模仿真。

通过对搭建的案例机组及其他文献的模型进行有效性验证，得到的误差在 5% 以下。因此，可接受基于模型得到的系统模拟参数，认为系统是稳态运行的^[11]。其中，固废和沼气绝热燃烧过程中的过量空气系数分别为 1.20 和 1.25。



a) 案例机组



b) 厌氧发酵与焚烧耦合发电系统

图3 案例机组及厌氧发酵与焚烧耦合发电系统模型

Fig.3 The models of the case unit and the anaerobic fermentation and incineration coupled power generation system

3.2 能量分析

固废焚烧发电机组发电效率为系统输出的能量（对外供电量）与输入的能量（固废总能量）的比值。对于厌氧发酵与焚烧耦合的多元固废协同发电系统，固废厌氧发酵后沼渣、沼液携带能量排出，不参与发电过程，不计入系统发电能量输入。因此系统总发电效率（ η_{ex} ）计算公式为：

$$\eta_{ex} = \frac{P_e}{m_s \times V_{LHV,s} + m_g \times V_{LHV,g}} \quad (1)$$

式中： P_e 为系统的净发电量，kW； m_s 、 m_g 分别为入炉固废、沼气的质量流量，kg/s； $V_{LHV,s}$ 、 $V_{LHV,g}$ 分别为入炉固废、沼气的低位发热量，kJ/kg。

固废焚烧发电效率不变，因此对于案例固废焚烧发电机组，耦合发电系统增加的净发电量来自沼气。评价沼气的发电效率（ η_g ）计算公式为：

$$\eta_g = \frac{P_g}{m_g \times V_{LHV,g}} \quad (2)$$

式中： P_g 表示沼气的净发电量，kW。

3.3 焓分析

焓分析可确定能量转化不可逆性的来源和大小，定位系统节能优化部位，是评估、分析和优化能量利用过程的有效工具，常作为能量评价的补充。系统能量转化环节常伴随能量的损耗，根据公式(3)的系统焓平衡公式可对其进行分析计算。

$$E_{EX,in} + W_{in} = E_{EX,out} + W_{out} + E_{EX,loss} \quad (3)$$

式中： $E_{EX,in}$ 、 $E_{EX,out}$ 分别为进出口系统的总焓，kW； W_{in} 、 W_{out} 分别为输入、输出系统的总功，kW； $E_{EX,loss}$

为系统的焓损失，kW。

相比能量分析，焓评价方法衡量系统焓利用程度的指标采用系统焓效率（ η_{er} ）和沼气发电焓效率（ η_{gr} ），其计算公式分别为：

$$\eta_{er} = \frac{P_e}{E_{EX,s} + E_{EX,g}} \quad (4)$$

$$\eta_{gr} = \frac{P_g}{E_{EX,g}} \quad (5)$$

式中： P_e 为系统的净发电量，kW； $E_{EX,s}$ 、 $E_{EX,g}$ 分别为输入系统内的固废和沼气的总焓，kW。

3.4 经济性分析

经济适用性评价指标有厌氧发酵的投资成本和运行维护成本。其中投资成本作为项目初期投资带来的资金投入，决定了项目的资金规模和本金流动的方式规划；运行维护费用包括设备运维、劳动力成本、固废和沼渣沼液的运输、耗电、个人所得税。未来预期的经济利润和收益常用项目回收的净现值、动态回收周期衡量。

大规模的发电系统建造投资较大，短期内产生的盈利不足以抵消资本的投入，但过长的资本回收周期有时也不为投资方接受，因此可采用动态投资回收期（DPP）和净现值（NPV）2个指标。DPP和NPV这2个指标在考虑时间因素的同时，量化投建项目的预期收益，分别表示项目收支相抵所需年限以及项目寿命周期内累计可获得的经济收入，计算公式见式(6)、式(7)。DPP越短、NPV越高，项目投资价值越高。

$$\sum_{y=1}^{DPP} \frac{C_{in} - C_{out}}{(1+i)^y} = 0 \quad (6)$$

$$NPV = \sum_{y=1}^k \frac{(C_{in} - C_{out})}{(1+i)^y} \quad (7)$$

式中： C_{in} 、 C_{out} 分别为项目的年现金流入、流出额，万元； i 为折旧率； y 为项目已投运的年限，年； k 为项目的折寿周期，年。

4 结果与讨论

4.1 耦合系统的主要参数

厌氧发酵与焚烧耦合的发电系统中，厌氧发酵沼气在燃烧器中进行燃烧放热，烟气余热经 I—V 加

热器回收利用，分别加热省煤器出口给水、过热器出口蒸汽、省煤器入口给水、进入锅炉入口的一、二次风和凝结水（图 2）。

耦合系统 I—V 号加热器的沼气烟气能量分布如图 4 所示。由图 4 可知：燃烧器出口烟气分别流经 I—V 号加热器进行放热；烟气温度由沼气燃烧器出口温度 1 654.66 °C 分别降至 1 180.00、477.46、423.50、175.06 °C，最终降为 90.00 °C 进入烟气处理系统中；烟气的能量利用分别为 8.46、10.73、9.34、2.72、1.03 MW。表 3 为案例机组和耦合方案 2 种方案余热锅炉受热面工质参数。

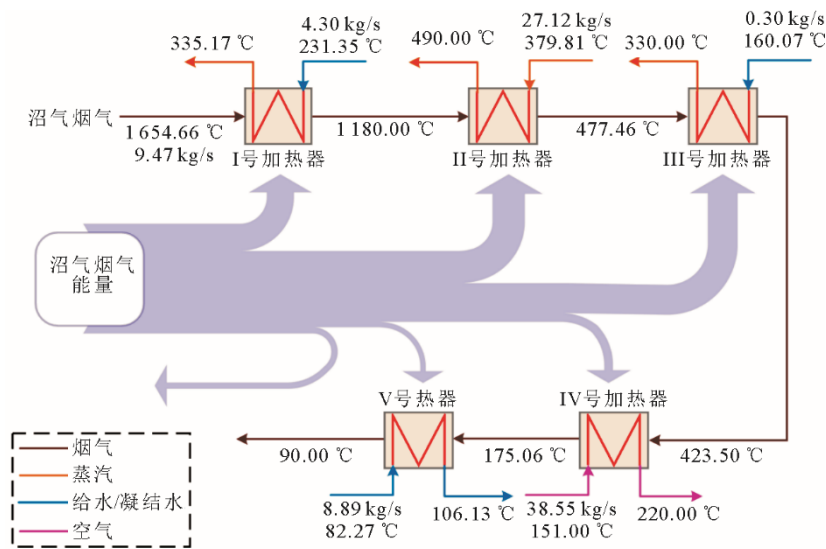


图 4 耦合系统 I—V 号加热器的沼气烟气能量分布

Fig.4 Energy distribution of biogas flue gas in heaters I—V of the coupled system

表 3 案例机组、耦合方案余热锅炉主要受热面工质参数

Tab.3 Working medium parameters of main heating surface of waste heat boiler in the case unit and the coupling unit

项目	案例机组	耦合方案
烟气流量/(kg·s ⁻¹)	36.71	36.71
给水质量流量/(kg·s ⁻¹)	21.15	22.75
进口给水压力/MPa	4.85	11.52
蒸发器		
进/出口烟气温度/°C	1 330.18/580.00	1 330.18/582.00
对数平均换热温差/°C	622.88	554.40
换热量/MW	38.31	38.22
蒸汽质量流量/(kg·s ⁻¹)	20.00	27.12
进口蒸汽压力/MPa	4.85	11.52
过热器		
进/出口烟气温度/°C	580.00/399.23	582.00/385.00
对数平均换热温差/°C	157.62	119.71
换热量/MW	8.38	9.12
给水质量流量/(kg·s ⁻¹)	21.15	27.05
进口给水压力/MPa	5.88	12.22
省煤器		
进/出口烟气温度/°C	399.23/190.00	385.00/190.00
对数平均换热温差/°C	105.76	75.64
换热量/MW	9.18	8.54

沼气烟气加热蒸发部分给水, 替代空气预热加热源, 在相同的固废燃烧放热量下, 最终耦合方案的锅炉蒸发量增加了 7.12 kg/s。耦合发电系统中蒸汽参数提升, 相应给水压力、汽包压力也升高, 使得给水的温度、汽包出口饱和蒸汽温度提高; 为避免过热器超温, 蒸汽在过热受热面的温升减小。固废焚烧锅炉烟气依次流经的蒸发器、过热器、省煤器, 与烟气的换热量被重新分配, 导致进出口工质的温度发生变化(表 3)。

烟气的热量用于固废焚烧机组的空气预热, 节省了案例机组用于空气预热的蒸汽热源, 耦合方案中的一、二次风预热装置均设为 3 级, 最大程度上增加了炉膛内的一、二次风风温和干燥程度; 一次风中的空气预热由凝结水、汽轮机中的部分排汽和 IV 号加热器中的燃烧烟气承担, 二次风中的空气预热由凝结水、汽轮机中的部分排汽和汽包中的部分蒸汽承担^[15-16]。具体案例机组和耦合机组的热流体、空气参数见表 4。

表 4 案例机组和耦合机组空气预热系统参数
Tab.4 Parameters of air preheating system of the case unit and the coupling unit

项目	案例机组				耦合系统						
	一次风预热器		二次风预热器		一次风预热器			二次风预热器			
	I 级	II 级	I 级	II 级	I 级	II 级	IV 号加热器	I 级	II 级	III 级	
热流体	流量/(kg·s ⁻¹)	3.36	0.99	0.58	0.17	6.81	1.82	9.47	1.18	0.53	0.24
	压力/MPa	1.37	4.85	1.37	4.85	0.59	1.01	0.10	0.59	1.01	11.52
	进口温度/°C	194.03	262.05	194.03	262.05	82.27	283.89	423.89	82.27	180.48	321.55
	出口温度/°C	147.33	185.76	147.08	185.48	55.10	130.00	175.06	55.31	130.35	166.77
空气	流量/(kg·s ⁻¹)	38.55	38.55	6.36	6.36	38.55	38.55	38.55	6.36	6.36	6.36
	进口温度/°C	20.00	170.00	20.00	170.00	20.00	40.00	151.00	20.00	40.00	151.00
	出口温度/°C	170.00	220.00	170.00	220.00	40.00	151.00	220.00	40.00	151.00	220.00
换热量/MW	5.85	1.98	1.01	0.34	0.78	4.33	2.72	0.13	0.74	0.47	

4.2 能量分析

案例机组及厌氧发酵与焚烧耦合的固废发电机组方案参数见表 5。

表 5 案例及新方案机组参数
Tab.5 Parameters of the case unit and new scheme unit

项目	案例机组	新方案	
主蒸汽参数	压力/MPa	3.83	9.40
	温度/°C	390.01	540.00
	流量/(kg·s ⁻¹)	20.00	28.38
再热蒸汽参数	压力/MPa		2.83
	温度/°C		540.00
	流量/(kg·s ⁻¹)		28.38
回热抽汽参数 (进除氧器)	压力/kPa	0.83	1.07
	温度/°C	244.28	426.36
	流量/(kg·s ⁻¹)	1.30	3.11
回热抽汽参数 (回热加热器)	压力/kPa	0.06	0.07
	温度/°C	85.50	147.75
	流量/(kg·s ⁻¹)	1.33	11.51
系统净发电量/MW	12.39	21.09	
系统净发电效率/%	19.95	23.51	

提出的厌氧发酵与焚烧耦合的固废发电系统, 提升了固废焚烧发电机组的蒸汽动力循环的蒸汽参数, 引入了蒸汽的再热, 在凝汽器工作压力不变的情况下, 最终带来系统发电效率的提高。相较于

案例中铺设的 2 个空气预热器, 厌氧发酵耦合焚烧机组中铺设 3 个空气预热器, 系统发电效率的提升效果更加明显。由表 5 可见, 相对案例机组, 耦合发电系统的净发电效率从 19.95% 提高至 23.51%, 提高了 3.56 个百分点, 沼气发电效率为 31.53%。显然本文提出的耦合系统中增设沼气燃烧高温烟气可以显著提升机组发电效率。

为进一步阐述本文方案的能效机理, 对案例方案和本文的耦合方案的能量流动进行分析。图 5 为案例机组和厌氧发酵与焚烧固废耦合的新型发电系统能量流动图。

由图 5 可知: 2 种方案中焚烧固废输入锅炉中的能量 (62.10 MW) 保持恒定并认为是 100%, 2 种系统中的锅炉能量损失 (15.34 MW) 相同; 耦合系统中的燃烧器向加热器中输入 27.52 MW 热量, 其中有 11.03 MW 热量以蒸汽的形式输入锅炉中, 有 9.55 MW 热量以蒸汽和高温水输入汽轮机。案例系统中, 当 62.10 MW 能量输入锅炉中, 通过高温蒸汽形式送入汽轮机时, 仅产生 14.90 MW 汽轮机发电量; 而在耦合方案中, 73.13 MW 能量输入锅炉, 通过过热蒸汽送入汽轮机的同时辅助沼气燃烧产生高温烟气输入汽轮机中的能量, 汽轮机发电量高达 23.59 MW,

耦合机组相比案例机组净发电量提高了 8.69 MW，这也是沼气燃烧产生高温烟气利用所增加的净发电量。可见，本文提出的新系统通过提高蒸汽参数

提升了系统发电效率，沼气燃烧器排放的高温烟气；若不受材料超温限制，可考虑将蒸汽加热至更高参数以达到更高的发电效率。

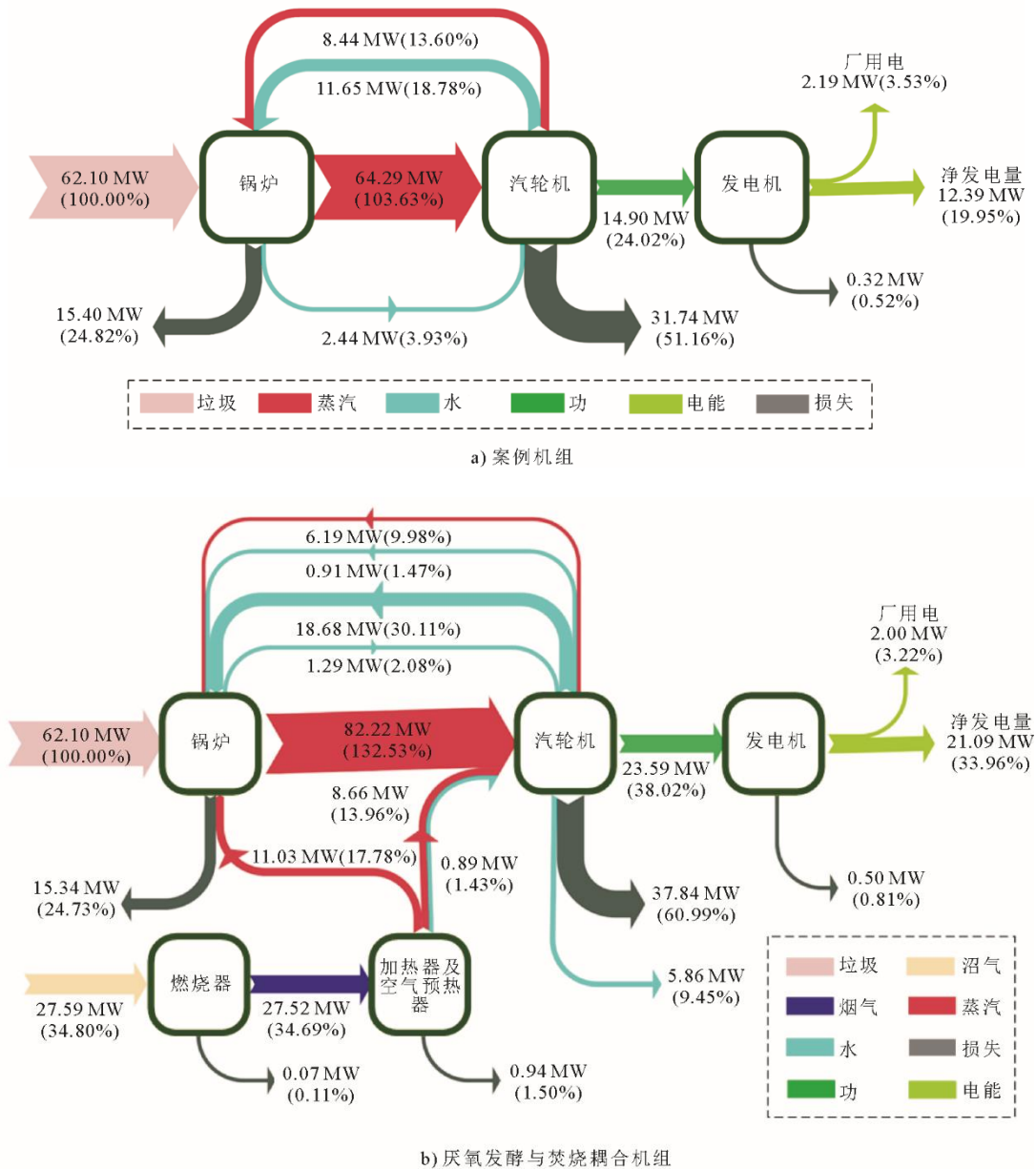


图 5 案例机组及耦合机组发电系统能流图
Fig.5 Energy flow diagram of generating system of the case unit and the coupling unit

4.3 焓分析

案例系统中焚烧固废输入的焓为 65.54 MW(计 100.00%)，耦合系统中沼气输入的焓为 22.20 MW (33.88%)；案例机组与耦合系统的供电量分别为 12.39 MW (19.97%)，21.09 MW (33.96%)。除供电量外，系统的焓损失的分布与大小见表 6。

与案例机组相比，耦合系统引入的沼气烟气加热器梯级利用能量，一方面提高了动力循环做功工

质的质量流量和参数；另一方面，优化了锅炉主要受热面的换热条件。由表 6 可见，与案例机组相比，固废焚烧发电过程中，在蒸汽动力循环中焓损失占比最大的锅炉焓损失降低，汽轮机及回热系统、发电机焓损失有所增加。案例机组与耦合发电系统的总焓损失分别为 53.14、62.60 MW，总焓效率分别为 18.91%、28.65%。新系统总焓效率提高了 9.74 百分点，整个系统的能量转化得到了优化。

表 6 案例机组及耦合机组损失分布与大小 单位: MW
Tab.6 Exergy loss distribution of the case unit and the coupling unit

项目部件	案例机组	耦合机组
锅炉	46.80	34.59
空气预热器	1.21	1.72
汽轮机	3.02	5.18
回热系统	1.60	6.32
厂用电	0.26	3.23
发电机	0.25	0.48
加热器		5.97
沼气罐保温		5.11

4.4 经济性分析

为了分析提出的耦合系统的经济性,以案例机组作为参考,参考表 7 中所示的经济性评价的基本假设^[17],分析耦合系统的成本在其整个寿命期的经济性表现。其中新型厌氧发酵与焚烧耦合电站的规模为日处理城市固废 500 t。

表 7 经济性分析基本假设
Tab.7 Basic assumptions of economic analysis

项目	数值
寿命期/a	25
建设周期/a	2
年运行时间/h	7 200
年容量因子	0.7
运行成本/万元	10%总投资
贴现率/%	12
沼气发电上网电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.65

与案例的固废焚烧发电机组相比,新系统除厌氧发酵工程部分外,额外需增加沼气燃烧器、加热器等设备;此外,新系统中如汽轮机、锅炉受热面等的扩容投资也会发生变化。2 个系统的设备投资对比情况见表 8。

简单核算与案例固废焚烧发电系统经济性表现的边界条件假设可知:每年运行成本估计为总资本成本的 10%,预计系统年运行 7 200 h,除去设备启停、非满负荷运行(只有当原料足够满足要求时,机组满负荷运行),固废焚烧电站的年容量因子约为 0.8^[17]。参考发达国家大型沼气发电项目的年容量因子 0.6^[18],取设备有效利用的容量与总容量的比值年均 0.7;参考沼气发电上网电价约 0.65 元/(kW·h),且对于有机废料处理将获得的固废处理费,取 70 元/t^[18-19];参考我国对于可再生能源发电上网电价的补贴为 0.75 元/(kW·h)^[19];可得项目的动态回收周期为 3.78 年;在 25 年的寿命周期内,预计新型发电的耦合方案的净现值可达到 61 593.64 万元。

表 8 案例机组耦合发电系统的投资对比 单位: 万元
Tab.8 Investment comparison of the coupled power generation system in case unit

部件	案例机组	耦合机组	投资差额
原料收储运系统		1 044.00	1 044.00
湿式厌氧发酵系统		1 404.56	1 404.56
脱硫系统		320.00	320.00
沼气燃烧器		51.50	51.50
I 号加热器		11.58	11.58
II 号加热器		53.99	53.99
III 号加热器		6.85	6.85
IV 号加热器		58.00	58.00
V 号加热器		73.40	73.40
过热器	82.05	105.10	23.05
蒸发器	70.27	75.76	5.49
省煤器	94.39	122.66	28.27
一次风预热器	162.25	89.77	-72.48
二次风预热器	27.92	35.70	7.78
除氧器	32.44	38.70	6.26
回热加热器	2.73	2.92	0.19
凝汽器	81.87	110.71	28.84
给水泵	82.40	168.15	85.75
凝结水泵	7.36	37.25	29.89
汽轮机	3 505.74	4 839.80	1 334.06
发电机	186.23	345.17	158.94
烟囱	56.99	220.77	163.78
合计	4 392.64	9 216.34	4 823.70

4.5 环保分析

本文提出的厌氧发酵与焚烧固废耦合系统是环境友好型的系统,一方面减少传统方式处理固废方式存在的大量占用土地和甲烷等气体产生温室效应的问题,使得固废的利用更加清洁;另一方面显著提高机组的净发电量,使得固废的利用更加高效。沼液排放中需要更好地控制排放物的 pH 值,沼液的再循环有利于 pH 值稳定。最理想 pH 值范围是 6.8~7.2,更有利于城市固废的厌氧消化。沼气在高温燃烧条件下产生的氮氧化物可以通过固体吸附法、液体吸收法、催化还原法等 3 种常用的处理方法进行处置^[19]。

5 结 论

本文提出一种厌氧发酵与焚烧固废耦合系统,该系统基于高温烟气与焚烧固废电厂耦合。在耦合系统中,利用厌氧发酵产生的沼气燃烧形成高温烟气加热机组中的加热器和汽水系统。以某已投运的固废焚烧发电机组为案例,从能量、焓、经济性和环境分析等角度进行分析,得出以下结论。

1) 本文耦合系统汽轮机发电量达到 23.59 MW,

与案例机组相比耦合系统净发电量增加了 8.69 MW, 净发电效率增加 3.56 个百分点, 沼气发电效率为 31.53%。

2) 本文耦合系统中, 锅炉烟损失降低, 汽轮机及回热系统、发电机烟损失有所增加; 相比案例机组, 耦合发电系统的总烟效率提高了 9.74 个百分点, 整个系统的能量转化得到了优化。

3) 以耦合电站日处理 500 t 固废的规模限定下进行经济性分析, 结果表明, 新系统的动态回收周期为 3.78 年, 净现值至少为 61 593.64 万元。

[参考文献]

- [1] ZHANG J, QIN Q, LI G, et al. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112-138.
- [2] KUMAR A, SAMADDER S R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 407-422.
- [3] OSTREM K M, MILLRATH K, THEMELIS N J, et al. Combining anaerobic digestion and waste-to-energy[C]//*Proceedings of the Annual North American Waste to Energy Conference (ANWTEC12)*, Savannah, US, 2004: 265-271.
- [4] JIN C, SUN S, YANG D, et al. Anaerobic digestion: an alternative resource treatment option for food waste in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146-157.
- [5] DAL MAGRO F, XU H, NARDIN G, et al. Application of high temperature phase change materials for improved efficiency in waste-to-energy plants[J]. *Waste Management*, 2018, 73: 322-331.
- [6] BOGALE W, VIGANÒ F. A preliminary comparative performance evaluation of highly efficient waste-to-energy plants[J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 1315-1324.
- [7] MENDECKA B, LOMBARDI L, GADYSZ P, et al. Exergo-ecological assessment of waste to energy plants supported by solar energy[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 773-783.
- [8] 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(2): 786-793.
- [9] CONSONNI S, SILVA P. Off-design performance of integrated waste-to-energy, combined cycle plants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(4): 712-721.
- [10] CHEN H, ZHANG M, WU Y, et al. Design and performance evaluation of a new waste incineration power system integrated with a supercritical CO₂ power cycle and a coal-fired power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 210: 112-115.
- [11] CHEN H, ZHANG M, XUE K, et al. An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant[J]. *Energy*, 2020, 194: 116893.
- [12] LOMBARDI L, CARNEVALE E, CORTI A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste[J]. *Waste Management*, 2015, 37: 26-44.
- [13] 李东雄, 徐鸿恩, 牛拥军, 等. 300 MW 节能型循环流化床锅炉 SO₃ 生成和排放试验研究[J]. *动力工程学报*, 2020, 40(6): 447-453.
- LI Dongxiong, XU Hongen, NIU Yongjun, et al. Experimental study on SO₃ generation and emission of a 300 MW energy saving CFB boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(6): 447-453.
- [14] 赵巍, 汪琦, 刘海啸, 等. 并流与逆流竖炉垃圾焚烧工艺计算及对比分析[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(7): 562-568.
- ZHAO Wei, WANG Qi, LIU Haixiao, et al. Technical calculation and analysis of MSW incineration with co-current and counter-current shaft furnace[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(7): 562-568.
- [15] IBRAHIM T K, MOHAMMED M K, AWAD O I, et al. A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 835-850.
- [16] LAMIDI R O, JIANG L, WANG Y D, et al. Techno-economic analysis of a biogas driven poly-generation system for postharvest loss reduction in a sub-saharan rural community[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 591-604.
- [17] ZHAO X, JIANG G, LI A, et al. Economic analysis of waste-to-energy industry in China[J]. *Waste Management*, 2016, 48: 604-618.
- [18] KOZŁOWSKI K, PIETRZYKOWSKI M, CZEKAŁA W, et al. Energetic and economic analysis of biogas plant with using the dairy industry waste[J]. *Energy*, 2019, 183: 1023-1031.
- [19] 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.

(责任编辑 刘永强)