DOI: 10.19666/j.rlfd.202605053

与垃圾焚烧电厂耦合的卡诺电池系统性能分析

郑金泽[1]，陈衡，刘战，刘飞，潘佩媛，贾茹
（华北电力大学能源动力与机械工程学院，北京 102206）

［摘　　要］【目的】为提高卡诺电池系统的能量利用率，增强垃圾焚烧电厂的经济性，提出一种耦合垃圾焚烧电厂的卡诺电池储能系统。【方法】首先，提出系统的集成方案与设备配置；其次，利用 Ebsilon Professional 软件建立耦合系统的热力学仿真模型并验证其合理性；最后，从技术可行性、能量流动、㶲效率及经济性等多维度综合评价该耦合系统的性能。【结果】耦合系统净发电量 15.435 MW、净发电效率 33.18%，较案例机组提升 12.69 百分点。卡诺电池侧能量往返效率为 118.9%，全系统总㶲效率为 31.63%，较原案例机组提升 12.23 百分点。动态回收期 7.39 年，在运行周期内，净现值可达 29 092 万元。【结论】该耦合系统显著提升了机组的发电效率和能量利用水平，同时项目回本周期合理、经济效益可观，具备优异的技术可行性。

［关　键　词］卡诺电池；垃圾焚烧电厂；熔盐储热；系统集成；性能分析

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.　作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Performance analysis for Carnot battery system coupled with a waste incineration power plant

Zheng Jinze[1], Chen Heng, Liu Zhan, Liu Fei, Pan Peiyuan, Jia Ru
(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electricity Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] In order to raise the energy utilization efficiency of Carnot battery systems and improve the economic performance of waste incineration power plants, a Carnot battery energy storage system coupled with waste incineration power units is proposed. [Methods] First, the system integration scheme and equipment configuration are formulated. Second, a thermodynamic simulation model of the coupled system is established on Ebsilon Professional, and the rationality of each subsystem is verified. Finally, the overall performance of the coupled system is comprehensively evaluated from multiple dimensions, including energy analysis, energy flow, exergy efficiency, economic performance, sensitivity analysis and technical feasibility. [Results] Energy analysis shows that the coupled system yields a net power output of 15.435 MW and a net power generation efficiency of 33.18%, an increase of 12.69 percentage points compared with the reference unit. The net power generation from the Carnot battery subsystem is 7.135 MW with a round-trip energy efficiency of 118.9%. The prominent efficiency improvement mainly results from the significant enhancement of main steam and reheat steam parameters as well as waste heat recovery from the condenser, which effectively boosts power output and system energy utilization efficiency. Exergy analysis reveals that the overall exergy efficiency of the entire system reaches 31.63%, growing by 12.23 percentage points against the original unit. Such improvement is attributed to reduced extraction loss of the steam turbine and full recovery of waste heat from the condenser. Economic analysis indicates that the dynamic payback period of the coupled system is 7.39 years, and the project net present value (NPV) hits 290.92 million CNY over a 25-year service life. This result verifies the sound economic viability of the coupled system, and

收 稿 日 期：2026-05-16　修 回 日 期：2026-06-23　接 受 日 期：2026-06-25　网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然基金面上项目（52276006）
Supported by: General Program of National Natural Science Foundation of China (52276006)
第一作者简介：郑金泽（2003），男，主要研究方向为能源系统集成优化，18213060596@163.com。
通信作者简介：陈衡（1989），男，博士，副教授，主要研究方向为多类型源储协同，heng@ncepu.edu.cn。

considerable economic returns can be expected in the short term. Sensitivity analysis demonstrates that when the curtailed grid electricity supplied to the Carnot battery is less than 6 MW, the total power output and economic benefits of the coupled system rise almost linearly with the increasing input power. Further growth in input power slows the rising rates of power generation and NPV gradually. The maximum NPV of 292.87 million CNY is achieved at an input power of 6.553 MW. [Conclusions] In conclusion, the proposed coupled system remarkably improves the power generation efficiency and energy utilization of the waste incineration generating unit. With a reasonable payback period and attractive economic profits, the system boasts outstanding technical feasibility.
Key words: Carnot battery; waste incineration power plant; molten salt thermal storage; system integration; performance analysis

随着全球能源结构向低碳化和可持续发展转型，可再生能源逐渐成为电力系统的重要组成部分，但其波动性、间歇性等特点严重挑战电网运行的可靠性和稳定性[1]。在此背景下，挖掘和提升传统电源与新型储能技术的灵活调节潜力成为保障电网安全稳定运行、促进可再生能源消纳的关键[2]。

垃圾焚烧电厂近年来在国家政策引导下快速发展，其在发电方面有着减量化、无害化、资源化的特点，具有较大潜力[3]。然而，传统垃圾焚烧发电厂的发电效率通常只有14%~28%之间，远低于大型燃煤机组，其中的主要制约因素为：机组容量小、主蒸汽参数低、汽轮机效率[4]。

卡诺电池（Carnot battery），又称热泵储电技术，由电转热，储热，热转电3部分组成[5]，其核心方法是在电力过剩时，将电能转换为高温热能储存；在电力短缺时，利用储存的热能驱动热机（如有机朗肯循环）发电回馈电网[6]。该系统具有储能容量大、周期长、选址灵活、环境友好等潜在优势，为平抑可再生能源波动、提供电网惯性支持，提供新颖的技术路径[7]。然而，受限于涡轮机械和热储材料，卡诺电池的循环最高温度受限，导致循环效率下降[8]，而采用热耦合的方式将外部热源与卡诺电池结合可以有效提升其效率[9]。

近年来，在热力系统中集成卡诺电池的方式已备受关注，尤其是集成卡诺电池的燃煤电站已被广泛研究[10]。于博旭等[11]以600 MW燃煤机组为例，研究与卡诺电池耦合的不同储/释能方案的系统效率、调峰容量和调峰深度；韩瑞等[12]研究了火电厂改造的卡诺电池储能系统在不同运行参数下的效率以及新型系统对比电加热系统的效率提升；邵明轩等[13]，就集成卡诺电池的燃煤电站在不同构型下的调峰性能进行研究。Tian 等[14]创新性的利用$CaO/Ca(OH)_2$作为热储存材料。利用水合反应将热量释放到再热蒸汽，从而替代部分再热能。Li 等[15]基于 Matlab-Ebsilon 闭环控制策略，有效提高变工况情况下的能量利用效率。

综上，针对卡诺电池技术与燃煤电厂灵活改造的研究已取得一定进展，但对于耦合垃圾焚烧电厂的卡诺电池系统的集成系统架构和运行策略，尚缺乏系统性的研究。特别是该系统的㶲效率分析、经济性潜力以及对原有运行参数的影响机制等问题，还需要深入探索。

基于此，本文旨在构建一种卡诺电池与垃圾焚烧电厂的联合运行系统，深入研究其系统运行性能。首先，提出系统的集成方案与设备配置；其次，建立系统的热力学仿真模型；最后，从技术可行性、能量流动、㶲效率及经济性等多维度，综合评价该耦合系统的性能，以期为提升卡诺电池利用的灵活性提供理论参考与技术方案。

1 耦合系统介绍

为提高卡诺电池系统的能量利用率以及增强垃圾焚烧电厂的调峰能力和经济性，提出一种耦合垃圾焚烧电厂的卡诺电池储能系统，如图1所示。该系统主要由卡诺电池（包括热泵子系统和储热子系统）以及垃圾焚烧电厂（包括垃圾焚烧子系统、汽轮机子系统、抽气回热子系统和空气预热子系统）构成。详细介绍如下：

在热泵子系统中，电能在热泵循环中用于压缩气体，压缩后的高温高压气体送入冷凝器中加热来自冷储罐的低温熔盐，出口的中温气体经回热器与蒸发器出口的低温工质换热后再送入膨胀机进一步冷却、做功，变为低温低压气体，随后送入蒸发器中被回收了凝汽器废热的冷水加热后送入回热器进一步升温，最后送入压缩机以次循环往复。经过以上步骤，来自新能源发电厂的弃风、弃光以及凝汽器中的废热，通过压缩机、冷凝器、回热器、膨胀机以及蒸发器构成的热泵循环，高效转为循环工质中的热能。

在储热子系统中，采用太阳盐作为储热介质，

该熔盐具备储热密度高、热稳定温度区间宽、物化性质稳定、环境友好等优势，是大规模中高温储热与传热系统的核心工质，广泛应用于光热发电、工业余热储能等领域。冷储罐中的低温熔盐送入冷凝器中加热为高温熔盐后送入储热罐中储存，以实现规模化储电。在释热工况下，热储罐将高温熔盐泵出并送往二号过热器中加热锅炉一号过热器出口的高温水蒸汽，使之达到主蒸汽参数；出口处的熔盐送入再热器中进一步加热高压缸出口的再热蒸汽，使之达到再热蒸汽参数，出口处的低温熔盐则送回冷储罐中等待下一次循环。经过以上过程，循环工质中的热能转化成了储热介质中的热能，并在释热工况下转化为再热蒸汽中的热能。

在空气预热子系统中，一次风由三级加热器预热，采用垃圾焚烧锅炉蒸发器出口的饱和水蒸气以及汽轮机抽气为热源。二次风由单级加热器预热，采用汽轮机抽气为热源。一、二次风加热器的疏水均回水至除氧器出口。

在垃圾焚烧发电子系统中，生活垃圾送入锅炉中充分燃烧，产生的高温烟气依次经过蒸发器、一号过热器、省煤器，加热锅炉给水或水蒸气。省煤器出口的低温烟气在经过洗涤和除尘处理后送入烟囱中排出。一号过热器出口的高温水蒸气送入汽轮机中冲击高压缸的转子叶片，以推动轴承旋转。出口处的低温水蒸气在凝汽器中冷凝放热成为液态水，与汽轮机抽气换热后，作为给水送入锅炉完成循环。经过以上步骤，生活垃圾以及高温熔盐中的热能转化为发电机中的电能。

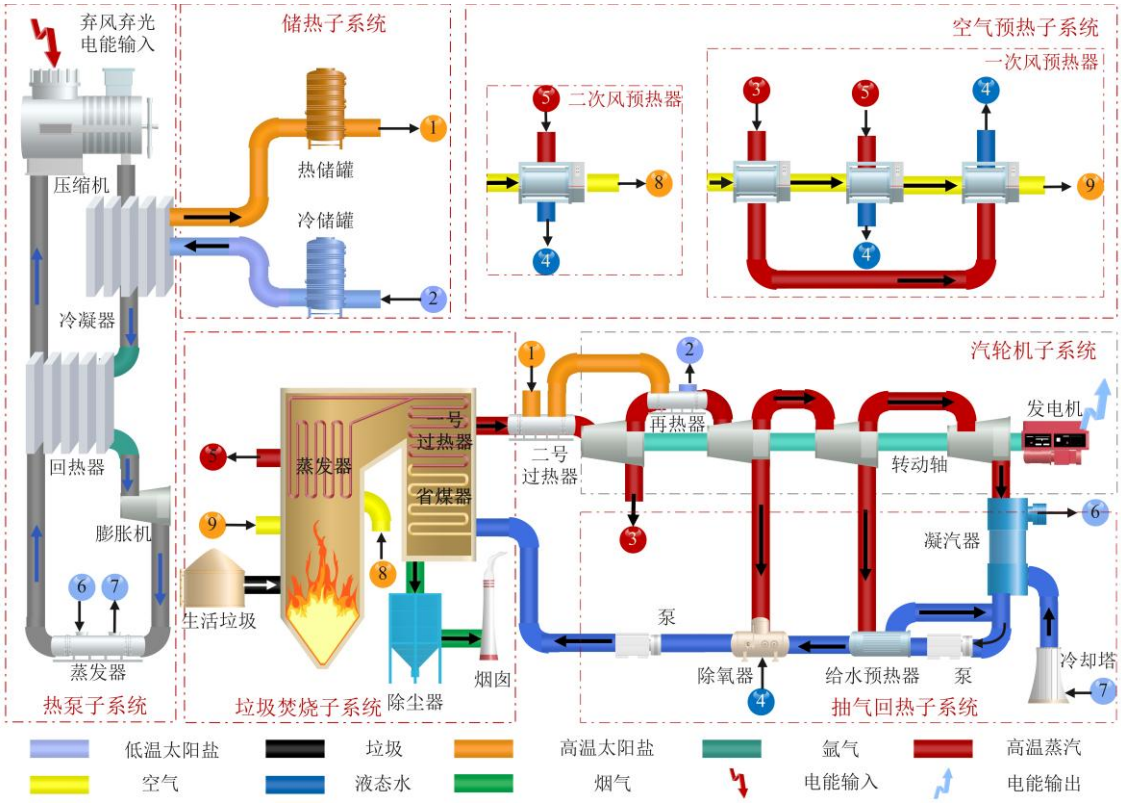


图 1 与垃圾焚烧电厂耦合的卡诺电池系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the Carnot battery system coupled with a waste incineration plant

2 系统建模与分析方法

2.1 仿真模型构建与验证

2.1.1 仿真模型构建

Ebsilon Professional 被广泛应用于电力系统的设计、评估和优化[16]。通过 Ebsilon Professional 平台搭建卡诺电池模型（包括热泵子系统、储热子系统）和垃圾焚烧电厂模型（包括垃圾焚烧子系统、汽轮机子系统、抽气回热子系统、空气预热子系统），仿真模型图如图 2 所示。

在整个仿真过程中，提出几点假设：

1）所有过程均能达到稳定状态。

2）压缩过程和膨胀过程绝热。

3）耦合系统垃圾焚烧量和锅炉燃烧效率不变。

4）基准温度为 15 ℃，基准压力为 101.3 kPa。

2.1.2 模型验证

对于垃圾焚烧电厂，研究对象为某垃圾日处理量为 500 吨的典型垃圾焚烧发电机组。将模拟值与参考文献[4]中案例机组的设计参数进行对比，结果（表 1）发现，模拟结果与设定值高度一致。

热泵子系统循环工质采用氩气，储热介质采用太阳盐（60%$NaNO_3$-40%KNO_3），热源介质采用甲醇，采用无回热模型与文献[17]进行对比验证，结果见表 2。结果表明该热泵模型具有较高准确性。

对于储热子系统，储热介质采用 HITEC（2018）与参考文献[18]进行对比验证，结果见表 3。结果与设定值具有高度一致性。

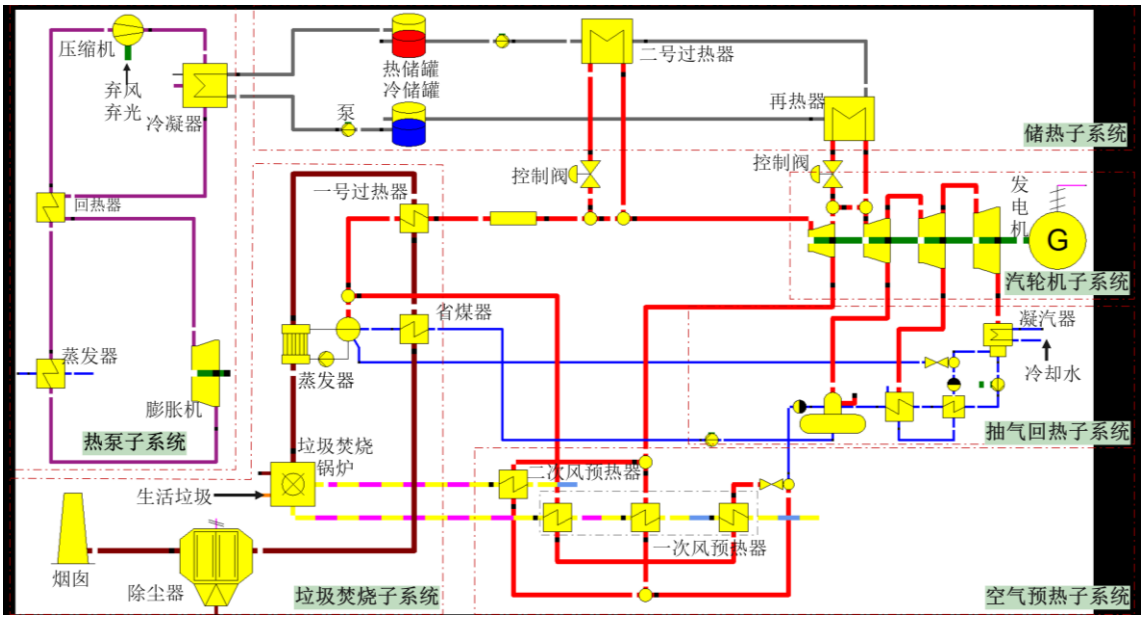


图 2 与垃圾焚烧电厂耦合的卡诺电池系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of the Carnot battery system coupled with a waste incineration plant

表 1 垃圾焚烧电厂验证结果

Tab.1 Validation results for the waste incineration plant

参数		文献值	模拟值	误差/%
垃圾焚烧量/(kg·s^{-1})		5.79	5.79	—
过热器	出口蒸汽流量/(kg·s^{-1})	13.5	13.5	—
	出口蒸汽压力/MPa	4.10	4.10	—
	出口蒸汽温度/℃	400	400	—
省煤器	进口给水流量/(kg·s^{-1})	14.19	14.19	—
	进口给水压力/MPa	5.20	5.20	—
	进口给水温度/℃	130.7	129.90	0.69
锅炉出口烟气温度/℃		190	189.73	0.14
总发电量/MW		9.77	9.76	0.10
净发电量/MW		8.3	8.29	0.12
净发电效率/%		20.49	20.46	0.14

表 2 热泵子系统验证结果

Tab.2 Validation results for the heat pumps subsystem

项目	文献值	模拟值	相对误差/%
热源入口温度/℃	270.85	270.85	—
热源出口温度/℃	584.35	583.82	0.09
冷源入口温度/℃	26.85	26.85	—
冷源出口温度/℃	8.55	8.65	1.16
压缩机入口温度/℃	21.05	21.05	—
压缩机出口温度/℃	589.05	588.82	0.03
压缩机入口压力/MPa	0.1	0.1	—
压缩机出口压力/MPa	1.24	1.24	—
膨胀机入口温度/℃	287.65	287.40	0.08
膨胀机出口温度/℃	-31.25	-30.92	1.06

表 3 储热子系统验证结果

Tab.3 Validation results for thermal energy storage subsystem

参数	文献值	模拟值	误差/%
熔盐流量/(kg·s^{-1})	11.33	11.17	0.35
熔盐进口压力/MPa	2	2	—
熔盐出口压力/MPa	2	1.99	0.5
熔盐进口温度/℃	530	530	—
熔盐出口温度/℃	380	380	—
给水流量/(kg·s^{-1})	1.58	1.60	1.25
给水入口压力/MPa	18.75	18.75	—
给水出口压力/MPa	18.74	18.74	—
给水进口温度/℃	357.70	367.00	0.08
给水出口温度/℃	525.00	525.00	—

2.2 能量分析方法

由于卡诺电池仅回收焚烧机组尾部余热，不改变垃圾焚烧量、锅炉运行参数，垃圾的基准发电量基本不受耦合改造影响，参照文献[4, 13]中同类型情况所使用的方法，假设垃圾焚烧系统发电量不变，认为耦合系统新增的发电量属于卡诺电池系统。耦合系统卡诺电池侧净发电量 $P_{o,c}$ 表示为：

$$P_{o,c} = P_o - P_w \tag{1}$$

式中：P_o 为耦合系统净发电量，kW；P_w 为原垃圾

焚烧电厂净发电量，kW。

耦合系统的净发电效率 η_{sys} 为：

$$\eta_{sys}=\frac{P_o}{Ps+m_{\mathrm{w}}\times\mathrm{LHV}}\times100\% \tag{2}$$

式中：P_s 为系统总输入电能，kW；m_w 为垃圾流量，kg/s；LHV 为垃圾低位发热量，kJ/kg。

储能系统往返效率 RTE 表示为系统总输出能量与总输入能量之比即：

$$\mathrm{RTE}=\frac{E_{\mathrm{out}}}{E_{\mathrm{in}}}\times100\%=\frac{P_{o,c}}{P_s}\times100\% \tag{3}$$

式中：$P_{o,c}$ 为卡诺电池侧净发电量，kW；P_s 为系统总输入电能，kW。

2.3 烟分析方法

烟是指当系统达到与环境平衡的状态时，系统可做有用功的最大能力，烟分析可以确定系统中能量损失的位置、大小和来源，为优化系统提供方向[19]。

燃料烟（EX，kW）可使用以下公式估算[20]：

$$EX=m\times\mathrm{LHV}\times\left(\begin{array}{l}1.0064+0.1519\times\dfrac{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}+\\ 0.0616\times\dfrac{\mathrm{O}}{\mathrm{C}}+0.0429\times\dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\end{array}\right) \tag{4}$$

式中：m 为燃料流量，kg/s；LHV 为垃圾低位发热量，kJ/kg。H、C、O、N 分别为燃料中的氢、碳、氧、氮含量。

空气、水、蒸汽和熔盐的烟可以表示为：

$$EX=m\times\left[h-h_0-T_0\times(s-s_0)\right] \tag{5}$$

式中：m 为流体的流量，kg/s；h、h_0 分别代表流体在当前和在环境状态下的比焓，kJ/kg；T_0 为环境温度，K；s 和 s_0 分别代表当前和在环境状态下的比熵，kJ/(kg·K)。

系统内各部件的烟平衡可以使用下式计算：

$$EX_{\mathrm{in}}+W_{\mathrm{in}}=EX_{\mathrm{out}}+W_{\mathrm{out}}+EX_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

式中：EX_{in} 为输入烟，kW；W_{in} 为输入功，kW；EX_{out} 为输出烟，kW；W_{out} 为输出功，kW；EX_s 为烟损，kW。

耦合系统或原系统的烟效率 η_{EX} 可以表示为：

$$\eta_{\mathrm{ex}}=\frac{P_e}{EX} \tag{7}$$

式中：P_e 为系统净发电量，kW；EX 为系统总输入烟，kW。

2.4 经济性分析方法

2.4.1 成本分析

热泵子系统由压缩机、膨胀机、3 个换热器构成，采用设备模块成本法来计算，此方法是指设备的经济成本可以由基础条件下的设备成本乘以此设备对应的修正系数来计算得到，具体公式如下：

$$C_{BM}=C_P^0F_{BM} \tag{8}$$

式中：C_{BM} 为部件成本，元；C_p^0 为基础条件下的设备成本，元；F_{BM} 为一系数，以常数或经验公式给出，计算公式如下:

$$F_{BM}=B_1+B_2F_MF_P \tag{9}$$

式中：B_1、B_2 为换热器的常数参数，F_M 为材料因子参数，这三个参数都在表 4 中给出。F_P 为操作压力因子可以根据以下公式得到[21]：

$$\log F_P=C_1+C_2\log_{10}(p)+C_3\left[\log_{10}(10p)\right]^2 \tag{10}$$

式中：C_1、C_2、C_3 为常数在表 3 中给出，p 为工作压力，MPa。

对于换热器来说，成本的影响因素较为复杂，主要受换热器压力、温度以及换热面积影响，换热器的 C_p^0 计算公式如下：

$$\log C_P^0=K_1+K_2\log_{10}(A)+K_3\left[\log_{10}(A)\right]^2 \tag{11}$$

式中：K_1、K_2、K_3 为常数在表 3 中给出。A 为传热面积，m^2。

对于膨胀机，其 F_{BM}=6.1，C_p^0 计算公式如下：

$$\log C_P^0=K_1+K_2\log_{10}(W)+K_3\left[\log_{10}(W)\right]^2 \tag{12}$$

式中：K_1、K_2、K_3 为常数在表 4 中给出。W 为膨胀机功率，kW。

表 4 公式相关经验系数[22]

Tab.4 Empirical coefficients related to the formula

参数	换热器	膨胀机
K1	4.324 7	2.247 6
K2	-0.303	1.496 5
K3	0.163 4	-0.161 8
C1	0.038 81	-
C2	-0.112 72	-
C3	0.081 83	-
B1	1.63	-
B2	1.66	-
FM	1.0	-

对于压缩机，成本计算公式为：

$$C_{COMP}=2.5\exp\left(7.58+0.8\left[\ln(0.735P)\right]\right) \tag{13}$$

式中：P 为压缩机功率，kW。

储热子系统由热储罐、冷储罐、两个熔盐泵以及熔盐换热器组成。整个过程忽略电网链接费用，

改造电厂的投资费用如下表 5 所示，表中 DC 代表直接成本，单位为元。垃圾焚烧电厂成本根据参考文献[23]得到，原系统选取的垃圾焚烧发电系统投资成本为 362 451 元/吨。

表 5 改造电厂投资费用[24]
Tab.5 Investment cost for power plant retrofit

投资成本	单位	数值
储热系统	美元/(kW·h)	23
熔盐换热器	美元/kW	90
总附加费用	%DC	30
运维成本	%DC	3
充电成本	美元/(MW·h)	20
人民币对美元汇率	元/美元	7

2.4.2 经济性指标

动态回收周期与净现值常被用作评价系统经济性的指标，动态回收期是指考虑到资金的时间价值计算得出的收回所有投资成本所需的时间，而净现值是指项目在整个生命周期内现金流入与流出的差值。动态回收周期（DPP，年）与净现值（NPV，元）可以表示为[25]：

$$\sum_{y=1}^{DPP}\frac{C_{\text{in}}-C_{\text{out}}}{(1+i_{\text{dis}})^{y}}=0 \tag{14}$$

$$NPV=\sum_{y=1}^{n}\frac{(C_{\text{in}}-C_{\text{out}})}{(1+i_{\text{dis}})^{y}} \tag{15}$$

式中：C_{in} 为现金流入，元；C_{out} 为现金流出，元；i 为贴现率，取 8%；n 为项目的生命周期，年；y 为机组生命周期中的年份。

3 结果与分析

3.1 耦合系统参数

选取生活垃圾作为垃圾焚烧锅炉的原料，其成分和低位热值如表 6 所示。垃圾的进料流量为 5.79 kg/s，一次风和二次风分别以 20.51 、8.38 kg/s 的质量流量进入锅炉与垃圾发生一系列化学反应，生成 33.488 kg/s 的高温烟气。产生的高温烟气焓值为 1 315.07 kJ/kg，随后依次送入蒸发器、过热器、省煤器加热低温锅炉给水。垃圾焚烧子系统的详细参数如表 7 所示。

表 6 垃圾成分表
Tab.6 Waste composition table

参数		数值
工业分析 w/%	灰分	41.75
	水分	20.59
元素分析 w/%	碳	21.97
	氢	1.91
	氧	12.78
	氮	0.50
	硫	0.20
	氯	0.30
低位热值/(kJ·kg^{-1})		7 000

表 7 垃圾焚烧子系统参数
Tab.7 Parameters of the waste incineration subsystem

	项目	数值
锅炉	垃圾进料流量/(kg·s^{-1})	5.79
	出口烟气流量/(kg·s^{-1})	33.48
	出口烟气温度/℃	1 079.31
蒸发器	进口烟气温度/℃	1 079.31
	出口烟气温度/℃	557.49
	进口给水温度/℃	269.76
	出口蒸汽温度/℃	272.76
过热器	进口烟气温度/℃	557.49
	出口烟气温度/℃	422.82
	进口蒸汽温度/℃	272.76
	出口蒸汽温度/℃	400.00
省煤器	进口烟气温度/℃	422.82
	出口烟气温度/℃	189.72
	进口给水温度/℃	129.89
	出口给水温度/℃	269.76

为保证垃圾焚烧锅炉正常燃烧，需对进入炉膛的空气进行预热。一次风由三级预热器加热，温度从 15 ℃提高到 220 ℃。二次风由单级预热器加热，温度从 15 ℃提高到 166 ℃。详细参数如表 8 所示。

表 8 空气预热子系统参数
Tab.8 Parameters of the air preheating subsystem

		参数	数值
一次风预热器		空气质量流量/(kg·s^{-1})	20.51
	一级	进/出口空气温度/℃	15.00/31.00
		进/出口热流体温度/℃	222.80/100.48
		热流体质量流量/(kg·s^{-1})	0.62
	二级	进/出口空气温度/℃	31.00/166.00
		进/出口热流体温度/℃	287.30/222.80
		热流体质量流量/(kg·s^{-1})	1.08
	三级	进/出口空气温度/℃	166.00/220.00
		进/出口热流体温度/℃	272.77/222.80
		热流体质量流量/(kg·s^{-1})	0.62
二次风预热器		空气质量流量/(kg·s^{-1})	8.38
	一级	进/出口空气温度/℃	15.00/166.00
		进/出口热流体温度/℃	287.30/96.46
		热流体质量流量/(kg·s^{-1})	0.49

热泵子系统选取氩气作为循环工质，氩气在蒸发器吸收热量，经压缩机升压升温后，在冷凝器向高温环境释放热量，实现低位热能向高位热能的高效转移。详细参数如表 9 所示。

表 9 热泵子系统参数
Tab.9 Parameters of the heat pumps subsystem

参数		数值
氩气流量/kg·s^{-1}		44.00
压缩机	氩气入/出口温度/℃	300.00/651.39
	氩气入/出口压力/MPa	4.00/12.01
冷凝器	氩气入/出口温度/℃	651.39/331.75
	冷流体入/出口温度/℃	312.40/560.00

回热器	氩气入/出口温度/℃ 冷流体入/出口温度/℃	331.75/59.69 13.30/300.00
膨胀机	氩气入/出口温度/℃ 氩气入/出口压力/MPa	59.69/-48.34 12.00/4.01
蒸发器	氩气入/出口温度/℃ 冷流体入/出口温度/℃	-48.34/13.30 29.48/28.87

储热子系统采用太阳盐作为储热介质。在储热工况下吸收热泵子系统提供的热能并加以储存；在释热工况下通过熔盐换热器提升主蒸汽和再热蒸汽参数来提高发电量。详细参数如表 10 所示。

表 10 储热子系统参数

Tab.10 Parameters of the thermal energy storage subsystem

参数		数值
太阳盐质量流量/(kg·s^{-1})		20.00
二号过热器	入/出口太阳盐温度/℃ 入/出口蒸汽温度/℃	560.42/431.22 398.25/521.90
再热器	入/出口太阳盐温度/℃ 入/出口蒸汽温度/℃	431.22/312.02 287.30/426.92

3.2 能量分析

对耦合系统进行能量分析，结果见表 11。在该耦合系统中，系统净发电量达 15.435 MW，净发电效率达 33.18%。本系统储能系统能量往返效率达 118.9%是因为回收了凝汽器废弃低品位余热，该部分废热由于是无偿抽取的低温环境热量，不计入电网输入能耗、不参与分母统计，但在发电环节转化为电能计入输出发电量，从而使往返效率大于 100%。

表 11 耦合系统能量分析结果

Tab.11 Energy analysis result for the coupled system

项目	耦合系统
投入电量/MW	6.001
系统总发电量/MW	16.949
系统总厂用电量/MW	1.514
系统净发电量/MW	15.435
系统净发电效率/%	33.18
卡诺电池侧净发电量/MW	7.135
储能系统往返效率/%	118.90

耦合系统的能量分布图如图 3 所示。系统中主要的能量损失包含：凝汽器热损失（20.439 MW）、锅炉热损失（9.1 MW）、全厂用电量损失（1.514 MW）以及发电能量损失（0.171 MW）。耦合系统的主要节能机理是回收了凝汽器中的废热，并通过热泵将低品位的热能转为高品位的热能进行利用。

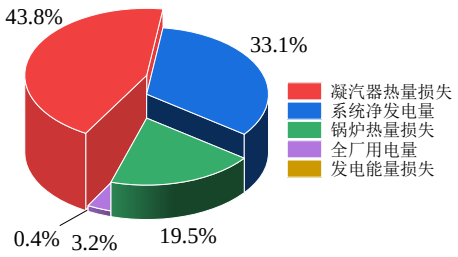


图 3 耦合系统能量分布图

Fig.3 Energy distribution diagram of the coupled system

为揭示耦合系统的节能机理，绘制了耦合系统的能量流动过程，如图 4 所示。在耦合系统中，以垃圾和电能的总输入能量 46.51 MW 为基准参考（即 100%），研究各个部分的能量效率。

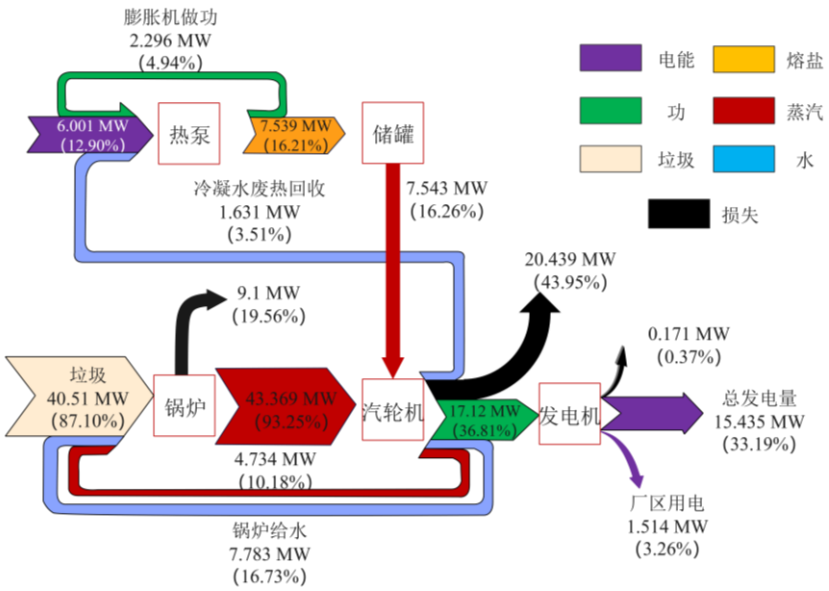


图 4 耦合系统能量流动图

Fig.4 Energy flow diagram of the coupled system

垃圾焚烧系统中，锅炉将送入的垃圾（40.51 MW）与被汽轮机抽气加热的预热空气（4.734 MW）

燃烧，产生的高温烟气用于加热锅炉给水（7.783 MW），最终向汽轮机提供 43.369 MW 的过热水蒸气。在汽轮机中，将获得的热能转化为 17.12 MW 的机械能并送入发电机中转为 15.435 MW 的电能。卡诺电池系统中，热泵将送入的电能（6.001 MW）连同回收的冷却水废热（1.631 MW）和膨胀机做功量（2.296 MW）以热能（7.539 MW）的形式传递给储热介质进行储存。在释热工况下，储热介质在熔盐换热器中加热主蒸汽和再热蒸汽（7.543 MW）。

3.3 烟分析

为探讨耦合系统的节能原理进行了烟分析，具体的烟输入以及烟损失如表 12 所示，同时还将耦合系统的烟值分布做成了饼状图如图 5 所示。新设计的耦合系统烟损失为 33.356 MW，全系统烟效率为 31.63%，与案例垃圾焚烧电厂 19.4%的烟效率相比，整体烟效率大幅提高。其中垃圾焚烧子系统的烟损失占 56.4%，这是由于燃烧过程不可逆、燃烧前后的温度差异以及高温烟气与低温锅炉给水之间的显著温度差，致使能量品级大幅下降。汽轮机的烟损失占比 5.7%，主要是抽气和膨胀过程不可逆导致的损失。热泵子系统损失占比 3.4%，这主要是由于循环工质间的换热温差和压缩、膨胀过程中的不可逆损失导致。空气预热子系统、储热子系统烟损失分别占比 1.7%、1.1%，都是由换热温差造成的。

表 12 耦合系统烟分析结果

Tab.12 Exergy analysis results of the coupled system

参数		耦合系统/MW
电能输入烟		6.001
垃圾输入烟		42.79
总输入烟		48.791
卡诺电池侧发电输出烟		7.135
垃圾侧发电输出烟		8.3
总发电输出烟		15.435
热泵子系统	热泵换热器	1.008
	压缩机	0.321
	膨胀机	0.322
储热子系统	熔盐换热器	0.557
垃圾焚烧子系统	锅炉	27.522
空气预热子系统	空气预热器	0.838
汽轮机子系统	汽轮机	0.304
	发电机	0.171
	凝汽器	0.76
	回热系统	0.039
	厂用电	1.514
系统总烟损失		33.356
系统总烟效率/%		31.634

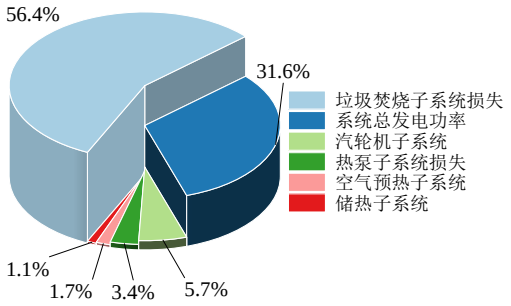


图 5 耦合系统烟分布图

Fig.5 Exergy distribution diagram of the coupled system

3.4 经济性分析

为确定耦合系统的经济可行性，对其进行经济性分析。基本参数如表 13 所示。

表 13 经济性分析基础参数

Tab.13 Basic parameters for economic analysis

参数		数值
耦合系统年运行时间/h		7 200
卡诺电池充/放电时间/h		12
系统使用寿命	建设周期/a	2
	运行周期/a	23
垃圾处理费[4]/(元·t^{-1})		60
充电成本/(元·(kW·h)$^{-1}$)		0.14
上网电价[4]/(元·(kW·h)$^{-1}$)		0.65
运维成本		总投资 3%
贴现率/%		8

根据 2.4 节提出的方法对垃圾焚烧系统及耦合后系统中新增部件进行计算，并将系统各组成部分的投资成本及总成本的计算结果汇总于表 14。

表 14 各组成部分的投资成本

Tab.14 Investment costs of the components

项目	投资成本/万元
压缩机	854.57
热泵换热器	72.4
膨胀机	236.14
存储系统	224.42
熔盐换热器（包含二号过热器和再热器）	150.57
垃圾焚烧电厂	18 122
总附加成本	461.43
总成本	20 121

经济性分析结果如表 15 所示，耦合系统的年收入主要分为售电年收入和垃圾处理补贴，分别占收入的 86.25%和 13.75%。在运行期内，年运行费为 603 万元，净年收入 5 535 万元。考虑到折现现金流仅需 7.39 年即可收回投资成本。项目运行 25 年后，净现值达到 29 092 万元。结果表明，耦合系统具有较强的经济性。

表 15 经济性分析结果
Tab.15 Economic analysis results

项目	数值
售电年收入/万元	5 551
垃圾处理补贴/万元	900
充电成本/万元	313
运维成本/万元	603
净年收入/万元	5 535
动态回收周期/a	7.39
净现值/万元	29 092

3.5 敏感性分析

由于风光的波动性，耦合系统的电能输入并不是恒定的。随着电能输入的变化，耦合系统的发电量并非线性变化，且随着投入电量的增加，充电、运行以及投资成本均增加。因此有必要对系统发电量和经济性进行敏感性分析。设定电能输入量在 1.5~9 MW 之间波动，得到系统发电量和净现值随影响因素变化情况如图 6 所示。当投入电量小于 6 MW 时耦合系统总发电量和经济性基本呈线性变化，但当投入电量继续增加时，耦合系统发电量和净现值增幅逐渐放缓。当投入电量为 6.553 MW 时净现值达到最大值 29 287 万元。

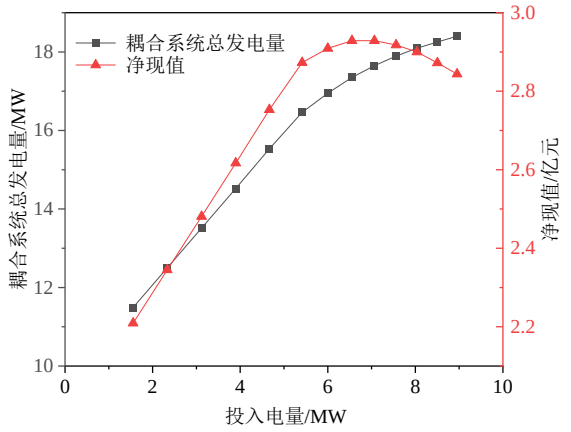


图 6 系统发电量和经济性随投入电量变化情况
Fig.6 Variations of system power generation and economic performance with influencing factors

4 结论

为提高卡诺电池系统的经济性与垃圾焚烧电厂的能量利用效率，本文提出一类与垃圾焚烧电厂耦合的卡诺电池储能系统，利用 Ebsilon Professional 从热力学和经济学角度对耦合系统进行分析，结果如下：

1）耦合系统净发电功率达到 15.435 MW，净发电效率达 33.18%，较案例机组增加 12.69%。主要原因是主蒸汽和再热蒸汽的参数有较大幅度的提高，且回收了凝汽器中的废热，从而有效提高发电功率和能量利用效率。

2）㶲分析表明，耦合系统㶲损失为 33.356 MW，全系统㶲效率为 31.634%，与案例垃圾焚烧电厂 19.4%的㶲效率相比，整体㶲效率大幅提高。主要原因是汽轮机抽气损失减少以及对凝汽器废热的充分利用。

3）经济性分析表明，系统的动态回收周期为 7.39 年，预计在 25 年项目周期内净现值为 29 092 万元，证明耦合系统的经济可行性，预计短期内可获得可观的经济回报。

4）敏感性分析表明，当投入电量小于 6 MW 时耦合系统总发电量和经济性基本呈线性变化。当投入电量继续增加时，耦合系统发电量和净现值增幅逐渐放缓。当投入电量为 6.553 MW 时净现值达到最大值 29 287 万元。

［参 考 文 献］

［1］ Lykas P, Bellos E, Tzivanidis C. Comprehensive review and performance assessment of Carnot battery storage systems with multiple energy outputs[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 348(Part B): 120702.

［2］ Fergani Z, Morosuk T. Multi-objective exergy-based optimization of a Carnot battery under different charging/discharging durations[J]. Energy, 2025, 338: 138964.

［3］ 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3534.
Sun H J, Liu Y, Peng C H, et al. Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3534.

［4］ 张美妍. 垃圾焚烧与燃煤发电的过程匹配及系统集成[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
Zhang M Y. Process matching and system integration of waste incineration and coal-fired power generation[D]. Beijing: North China Electricity Power University(Beijing), 2021.

［5］ Zhao Y H, Chen H, Zhang Y X, et al. A novel waste heat power generation system based on the integration of Carnot battery and waste heat recovery in a cement plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280(Part 1): 128159.

［6］ Qiao H N, Yang B, Yu X H. Automatic screening of working fluid pairs for Rankine-based Carnot battery using an efficient cross-scale model[J]. Renewable Energy, 2026, 256(Part H): 124602.

［7］ Zhu C J, Sun Y, Zheng G D, et al. Discharging via the low-pressure section of the thermal power plant: a new integrated Carnot battery concept and the performance evaluation[J]. Energy, 2025, 331: 137079.

［8］ Guan J, Han W, Liu Q B, et al. Proposal and analysis of an energy storage system integrated hydrogen energy storage and Carnot battery[J]. Energy Conversion and

Management, 2025, 332: 119734.
[9] Frate G F, Ferrari L, Desideri U. Multi-criteria investigation of a pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration and sensible heat storage[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208: 112530.
[10] 成汭珅, 范长哲, 鲁晓宇, 等. 熔盐蒸发器换热特性研究[J]. 热力发电, 2026, 55(4): 12.
Cheng R S, Fan C Z, Lu X Y, et al. Study on heat transfer characteristics of molten salt-steam heat exchanger[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(4): 12.
[11] 于博旭, 韩瑞, 刘倩, 等. 耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1461.
Yu B X, Han R, Liu Q, et al. Thermodynamic performance of a flexible retrofit Carnot battery energy storage system in a coupled thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1461.
[12] 韩瑞, 廖志荣, 于博旭, 等. 面向火电厂改造的熔盐卡诺电池储能系统仿真研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3605.
Han R, Liao Z R, Yu B X, et al. Simulation study of a molten-salt Carnot battery energy storage system for retrofitting a thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3605.
[13] 邵明轩, 闫学文, 闫宇, 等. 集成卡诺电池储能的燃煤电站调峰性能分析与构型优化[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(13): 5446.
Shao M X, Yan X W, Yan Y, et al. Peak shaving performance analysis and configuration optimization of a coal-fired power plant integrated with Carnot battery energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(13): 5446.
[14] Tian R, Xiao X, Wei M S, et al. Performance analysis of a Carnot battery system coupled $Ca(OH)_2/CaO$ thermochemical heat storage and coal-fired power plant[J]. Renewable Energy, 2026, 256(Part A): 123922.
[15] Li B H, Qian W, Du X Z. Study on the retrofit of coupled Carnot battery in retired coal-fired power units for grid energy storage transformation[J]. Applied Energy, 2025, 401(Part C): 126796.
[16] Promes E J O, Woudstra T, Schoenmakers L, et al. Thermodynamic evaluation and experimental validation of 253MW integrated coal gasification combined cycle power plant in Buggenum, Netherlands[J]. Applied Energy, 2015, 155: 181.
[17] Salomone-González D, González-Ayala J, Medina A, et al. Pumped heat energy storage with liquid media: thermodynamic assessment by a Brayton-like model[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113540.
[18] 丁煊涛, 范庆伟. 梯级火储集成系统设计及其调频基础研究[J]. 热力发电, 2026, 55(2): 108.
Ding X T, Fan Q W. Design of a cascaded thermal-storage-integrated system and fundamental research on its frequency-regulation performance[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 108.
[19] 曹竞文, 陈衡, 武浩然, 等. 固废等离子气化与模块化核反应堆耦合的电氢联产系统[J]. 动力工程学报, 2025, 45(11): 1966.
Cao J W, Chen H, Wu H R, et al. Electricity-hydrogen Co-production system based on coupling of solid waste plasma gasification and modular nuclear reactor[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(11): 1966.
[20] 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.
Zhou Z, Wang X G, Bian J Y, 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.
[21] 殷子彦. 一种基于熔盐/储冷介质的热泵热机式储能系统物理设计[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2019.
Yin Z Y. Physical design of a pumped thermal electricity system based on molten salt/cold storage medium[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
[22] Zhang C, Liu C, Wang S K, et al. Thermo-economic comparison of subcritical organic Rankine cycle based on different heat exchanger configurations[J]. Energy, 2017, 123: 728.
[23] Zhao X G, Jiang G W, Li A, et al. Economic analysis of waste-to-energy industry in China[J]. Waste Management, 2016, 48: 604.
[24] 韩瑞. 面向火电厂改造的熔盐卡诺电池储能系统仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
Han R. Simulation study of molten salt Carnot battery energy storage system for thermal power plant retrofit[D]. Beijing: North China Electricity Power University(Beijing), 2024.
[25] 郑鸿旭, 陈衡, 周明源, 等. 固废等离子气化与小型模块化核电集成系统的性能分析[J]. 动力工程学报, 2026, 46(1): 157.
Zheng H X, Chen H, Zhou M Y, et al. Performance analysis of integrated system of solid waste plasma gasification and small modular nuclear power[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2026, 46(1): 157.

（责任编辑 李囡）