

基于燃煤电厂烟气余热利用场景下的卡诺电池系统性能分析

吴志斌^{1*}, 邵轩¹, 郑普²

¹上海理工大学环境与建筑学院, 上海

²上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年5月4日; 录用日期: 2023年7月4日; 发布日期: 2023年7月12日

摘要

储能技术对实现余热利用、推进能源可持续发展具有重要意义。本文基于燃煤发电场景, 建立了由高温热泵和Kalina循环组成的卡诺电池系统模型, 分析了系统压力对卡诺电池放电阶段性能的影响及热源温度对卡诺电池充电阶段性能和循环效率的影响。结果表明, 闪蒸压力增大, 热机效率越高, 越利于提高总系统性能, 而透平出口压力越大, 热机效率则越小。随着烟气热源温度升高, 热泵COP逐渐增加, 且在储热温度恒定下, 系统循环效率亦随热源温度升高而升高。本研究不仅拓宽了卡诺电池的使用场景, 也为烟气余热利用场景下的储能技术研究提供性能数据参考。

关键词

卡诺电池, 循环效率, 余热利用

Performance Analysis of Carnot Battery System Based on Waste Heat Utilization Generated of Flue Gas Generated by Coal-Fired Power Plant

Zhibin Wu^{1*}, Xuan Shao¹, Pu Zheng²

¹School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 4th, 2023; accepted: Jul. 4th, 2023; published: Jul. 12th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 吴志斌, 邵轩, 郑普. 基于燃煤电厂烟气余热利用场景下的卡诺电池系统性能分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(4): 3481-3490. DOI: 10.12677/mos.2023.124319

Abstract

Energy storage technology is of great significance for waste heat utilization and promoting sustainable energy development. Based on the coal-fired power generation scenario, this paper establishes a Carnot battery system model composed of a high-temperature heat pump and Kalina cycle, and analyzes the influence of system pressure on the performance of the Carnot battery discharge stage and the influence of heat source temperature on the roundtrip efficiency and performance of charging stage. The results show that when the flash pressure increases, the efficiency of the heat engine increases with it; the greater the turbine outlet pressure, the smaller the efficiency of the heat engine. As the temperature of heat source of the flue gas increases, the COP gradually increases, and under the constant heat storage temperature, the roundtrip efficiency also goes up with the increase of the heat source temperature. This study not only broadens the use scenario of Carnot batteries, but also provides performance data reference for the research of energy storage technology under the flue gas waste heat utilization scenario.

Keywords

Carnot Battery, Roundtrip Efficiency, Waste Heat Utilization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着碳中和目标的推进,实现传统燃煤发电的余热利用对能源可持续发展具有重要意义。燃煤发电过程中产生的烟气排放温度可达 $80^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$,这些高温烟气经过烟囱被直接排至空气中,造成了能量浪费[1][2]。如何回收利用烟气余热一直是储能领域的研究重点,开发合适的储能系统是有效解决余热利用问题的重要途径之一。已应用于发电系统的储能技术主要包括抽水储能、压缩空气储能、蓄电池储能等,这些储能技术由于地理条件限制、储能时间短等问题,无法实现规模化的应用,而卡诺电池循环使用寿命长、地理限制少等优势使其在储能技术中更具有竞争力[3]。目前基于燃煤发电场景下的卡诺电池技术研究甚少,因此有必要对此展开研究。

卡诺电池是一种能实现“电-热-电”过程的系统,其结构主要包括热机、储热系统和热泵。由于每个组件的种类选择多样,系统设计时需要根据具体场景对卡诺电池灵活配置。Liang [4]等人总结了卡诺电池每个配置组件的种类与性能,包括压缩机、膨胀机、换热器和储热介质等,为系统配置选择和配置性能研究提供思路。不同组合下的卡诺电池展现出的系统性能也不同,Weitzer [5]等人基于低温热源场景模拟研究了含闪蒸循环作的卡诺电池系统,储存介质为加压热水,发现储存温度为 75°C 时,系统循环效率仅为17.3%。Lee [6]等人在500 MW的发电场景下设计一个含有空气源热泵和蒸汽轮机的卡诺电池系统,规定系统夜间储电10 h,日间放电10小时,得到的循环效率约为37%。唐迪[7]等人针对玻璃窑炉在工作过程中烟气余热高的问题,提出利用卡诺电池储存余热,并对其在玻璃窑炉中的余热利用进行了定性分析。这些研究都表明了卡诺电池在发电场景应用的可行性,然而在以余热利用为目的的场景中,尚未存在对卡诺电池系统性能的定量分析。

基于燃煤电厂对烟气余热的利用需求,本文利用 AspenPlus 软件建立了一个卡诺电池系统模型。探

讨论了闪蒸压力、透平出口压力对卡诺电池放电阶段性能的影响，分析了卡诺电池及热泵子系统在不同热源温度条件下的性能表现，以探究卡诺电池在余热利用场景下的适用性，拓宽卡诺电池的使用场景，为烟气余热利用场景下的储能技术研究提供性能数据的参考。

2. 系统描述

2.1. 系统假设

为了简化卡诺电池系统的热力学计算，本文对系统作出以下假设[8]：1) 忽略循环工质在管道内流动时的水头损失；2) 蒸发和冷凝过程均为等压过程；3) 不考虑储热损失。

本文对系统一些重要参数进行设定，如表 1 所示。

Table 1. Table of system initial parameter

表 1. 系统初始参数

参数	数值
烟气热源温度/°C	80~100
闪蒸器出口初始压力/bar	25
Kalina 循环工质流量/kg·h ⁻¹	550
氨水工质浓度/-	0.83
透平出口初始压力/bar	6
压缩机压比/-	3
换热器换热效率/-	96%
泵效率/-	75%
压缩机效率/-	75%
透平效率/-	80%
冷却水温度/°C	10

2.2. 系统建模

基于 Aspen plus 建立卡诺电池系统模型，总系统结构如图 1 所示，具体包括热泵子系统、Kalina 循

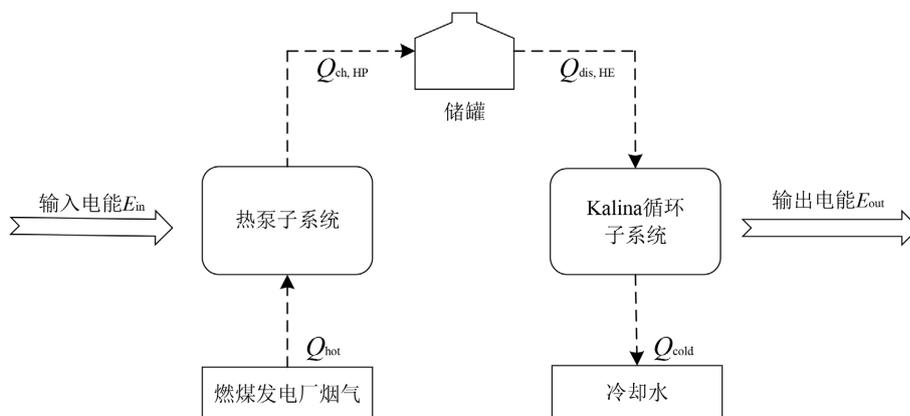


Figure 1. Carnot battery system based on coal-fired power generation scenario

图 1. 基于燃煤发电场景的卡诺电池系统

环子系统、储热系统(高温区、低温区)三个部分。充电阶段, 热泵子系统在少量电能驱动下, 将烟气余热转化为品位更高的热量, 并储存于储罐介质中。放电阶段, Kalina 循环吸收储罐介质中的热量, 将热能转化为机械能, 供给下游发电。

2.2.1. 热泵循环子系统

热泵是一种利用热能或电能提升能量品位的装置, 本文热泵子系统为压缩式热泵, 且根据文献[9]选择 R1233zd(E)作为热泵工质。热泵子系统结构如图 2 所示, 具体包括蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀。充电时, 热泵工质在蒸发器中与烟气换热后进入压缩机, 工质在电能的驱动下被压缩成高温高压气体。气相热泵工质在冷凝器中与加压水换热变为液相, 最后在减压阀中释压, 完成充电循环。

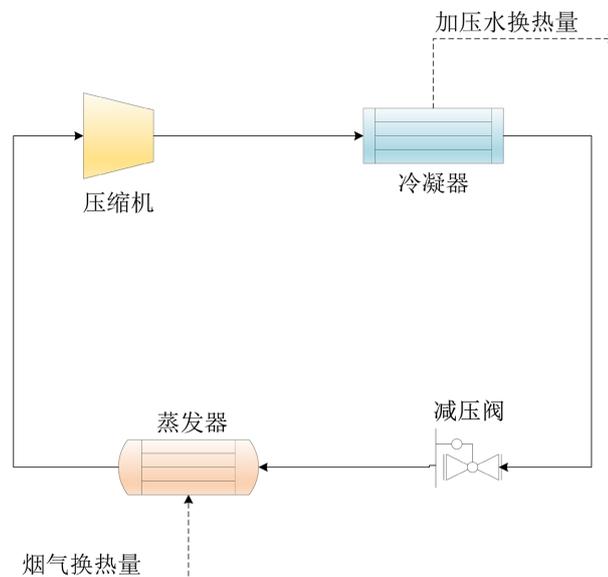


Figure 2. Process flow of heat pump system
图 2. 热泵循环系统的工艺流程图

为了便于计算和分析, 对热泵规定了下列数学模型:

1) 热泵蒸发器模型

$$Q_1 = c_a m_a (t_{a,in} - t_{a,out}) \xi = m (h_{e,out} - h_{e,in}) \quad (1)$$

式中: Q_1 为热泵蒸发器交换热流, kJ/h; c_a 为烟气比热容, 本文取 1.003 kJ/(kg·°C); m_a 和 m 分别为烟气和工质的质量流量, kg/h; $t_{a,in}$ 和 $t_{a,out}$ 分别为烟气在蒸发器中的进口温度和出口温度, °C; $h_{e,out}$ 和 $h_{e,in}$ 分别为工质在蒸发器中的进口比焓和出口比焓, kJ/kg; ξ 为换热器换热效率。

2) 热泵冷凝器模型

$$Q_2 = c_w m_w (t_{w,out} - t_{w,in}) \xi = m (h_{con,in} - h_{con,out}) \quad (2)$$

式中: Q_2 为热泵冷凝器交换热流, kJ/h; c_w 为加压水比热容; m_w 为加压水的质量流量, kg/h; $t_{w,out}$ 和 $t_{w,in}$ 分别为加压水在冷凝器中的进口温度和出口温度, °C; $h_{con,in}$ 和 $h_{con,out}$ 分别为工质在冷凝器中的进口比焓和出口比焓, kJ/kg。

3) 压缩机模型

$$\eta_c = \frac{h_{com,0} - h_{com,in}}{h_{com,out} - h_{com,in}} \quad (3)$$

$$W_c = \frac{m(h_{\text{com,out}} - h_{\text{com,in}})}{\eta_c} \quad (4)$$

式中: η_c 为压缩机效率; W_c 为压缩机耗电功率, kW; $h_{\text{com},0}$ 为热泵压缩机在理想状态下的出口比焓, kJ/kg; $h_{\text{com,in}}$ 和 $h_{\text{com,out}}$ 分别为工质在压缩机中的进口比焓和出口比焓, kJ/kg。

4) 节流阀模型

节流前后工质的焓值不变, 则有:

$$h_{v,\text{in}} = h_{v,\text{out}} \quad (5)$$

式中: $h_{v,\text{in}}$ 和 $h_{v,\text{out}}$ 分别为热泵工质在减压阀处的进口比焓和出口比焓, kJ/kg。

2.2.2. Kalina 循环子系统

Kalina 循环是一种以氨水为工质的热机系统, 其结构如图 3 所示, 系统包括蒸发器、闪蒸分离器、透平、冷凝器、泵、混合器。放电时, 氨水工质在蒸发器中吸收来自储热介质的热量, 挥发性更强的氨会比水先汽化。随着剩余液体的氨浓度降低, 饱和温度升高, 工质处于气液混合态。工质进入气液分离器被分离为富氨蒸汽和贫氨溶液, 处于高温高压下的富氨蒸汽在透平中膨胀做功, 热能转化为机械能。做功后的富氨蒸汽压力降低, 在冷凝器中被海水冷却为富氨溶液。经泵加压后, 富氨溶液和分离器出口处的贫氨溶液在混合器内混合, 工质温度和压力达到初始状态, 完成 Kalina 循环。

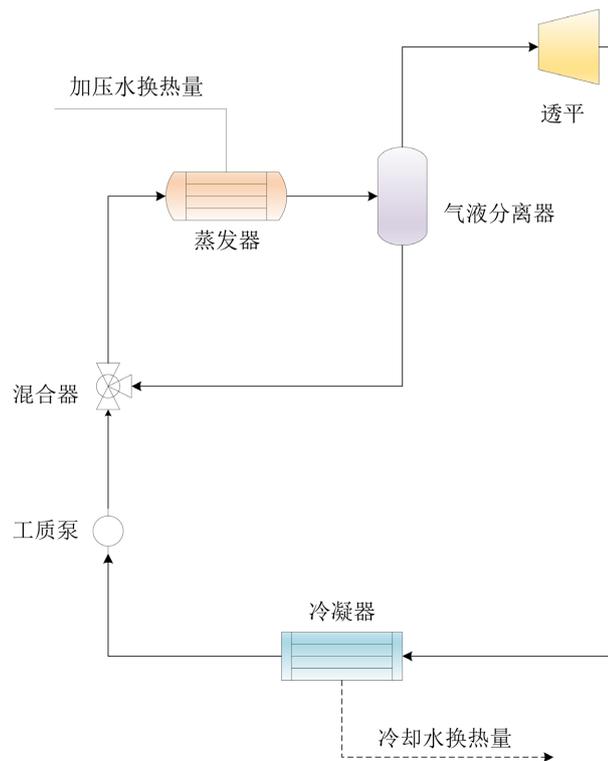


Figure 3. Process flow of Kalina cycle system

图 3. Kalina 循环系统的工艺流程图

为了便于计算分析, 本文根据文献[10]对 Kalina 循环系统规定如下数学模型:

1) Kalina 循环蒸发器模型

$$Q_3 = m_k (h_{k,\text{out}} - h_{k,\text{in}}) \xi \quad (6)$$

式中： Q_3 为Kalina循环蒸发器的交换热量，kJ/h； m_k 为氨水工质的质量流量，kg/h； $h_{k,in}$ 和 $h_{k,out}$ 分别为工质在蒸发器中的进口比焓和出口比焓，kJ/kg。

2) Kalina 循环冷凝器模型

$$Q_4 = m_s (h_{s,out} - h_{s,in}) \xi \tag{7}$$

式中： Q_4 为Kalina循环冷凝器中的交换热量，kJ/h； m_s 为海水的质量流量，kg/h； $h_{k,in}$ 和 $h_{k,out}$ 分别为工质在蒸发器中的进口比焓和出口比焓，kJ/kg。

3) 透平模型

$$W_t = \frac{m_{k,a} (h_{t,in} - h_{t,out})}{\eta_t} \tag{8}$$

式中： W_t 为透平的输出功率，kW； $m_{k,a}$ 为透平进口处富氨蒸汽的量流量，kg/h； $h_{k,in}$ 和 $h_{k,out}$ 分别为富氨蒸汽在透平中的进口比焓和出口比焓，kJ/kg； η_t 为透平效率。

4) 泵模型

$$W_p = \frac{m_{k,a} (h_{p,out} - h_{p,in})}{\eta_p} \tag{9}$$

式中： W_p 为工质泵的输入电功率，kW； $h_{p,out}$ 和 $h_{p,in}$ 分别为富氨蒸汽在工质泵中的出口比焓和进口比焓，kJ/kg； η_p 为泵效率。

2.2.3. 储热系统

储能系统是卡诺电池的重要组成部分，根据储热方式可分为显热储存、潜热储存、热化学储存。潜热储存是利用相变焓，显热储存是利用了储热材料的热容来储存能量，热化学储存是。

本文高温区的储热介质为加压水，低温区的储存介质为环境中的空气(充电过程中的热源)和冷却水(放电过程中的冷却流体)。图4为系统高温区的结构模型，系统包括两个换热器(热泵冷凝器和Kalina蒸发器)、储罐、阀门。充电时，右侧的阀门关闭，左侧阀门开启，加压水在左侧换热器与热泵工质换热，并被送至储罐中储存；放电时，右侧阀门开启，左侧阀门关闭，右侧的换热器中，储罐中的加压水与Kalina循环系统的氨水工质换热。

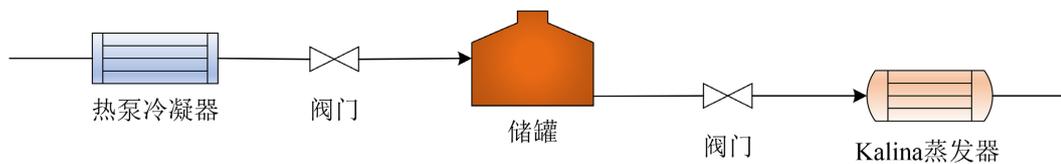


Figure 4. Process flow of heat storage
图4. 储热单元模型

3. 性能评价指标

3.1. 热泵系统性能参数

COP_{hp} 为热泵性能参数，即制热量与压缩机耗电功率的比值。 COP_{hp} 可用于评估卡诺电池充电过程的效率。计算公式如下：

$$COP_{hp} = \frac{Q_{st}}{E_{hp}} = \frac{Q_3}{W_c} \tag{10}$$

式中： E_{hp} 为压缩机的输入电能， Q_{st} 为储存热量。

3.2. 热机效率

热机效率 η_{kc} 是衡量 Kalina 循环子系统性能的重要参数，可用于评估卡诺电池放电过程的性能，其定义为净功率与吸热量的比值，计算公式如下：

$$\eta_{kc} = \frac{E_{kc}}{Q_{st}} = \frac{W_t - W_p}{Q_3} \quad (11)$$

3.3. 循环效率

循环效率 η_{PTP} 是卡诺电池最重要的热力学性能之一，它是指系统在一个循环周期内，放电量 E_{kc} 与充电量 E_{hp} 之间的比值，计算公式如下：

$$\eta_{PTP} = \frac{E_{kc}}{E_{hp}} \quad (12)$$

据式(2.2.2)和式(2.2.3)，循环效率 η_{PTP} 可以进一步表示为：

$$\eta_{PTP} = \frac{E_{kc}}{E_{hp}} = \frac{\eta_{kc} \cdot Q_{st}}{Q_{st} / COP_{hp}} = COP_{hp} \cdot \eta_{kc} \quad (13)$$

系统循环效率与每个子系统的性能有着直接关系。由于热量损失、压力损失、机械损失和电气损失是膨胀机、压缩机和泵中不可避免的存在，系统循环效率很难达到理论上的最大效率。利用废热集成，在一定程度上能补偿这些热损失，从而改善系统性能。

4. 分析与讨论

4.1. 压力对 Kalina 循环子系统性能的影响

影响 Kalina 循环性能的因素很多，比如温度、压力、工质浓度等。由于本文研究场景中的冷却水温度恒定且储热温度变化幅度较小，因此本节只讨论压力对系统的影响，具体包括蒸发压力和透平进口压力。

4.1.1. 闪蒸压力

改变闪蒸器进口压力，计算系统性能参数变化，得到图 5 所示的结果。可以发现，随着闪蒸器进口

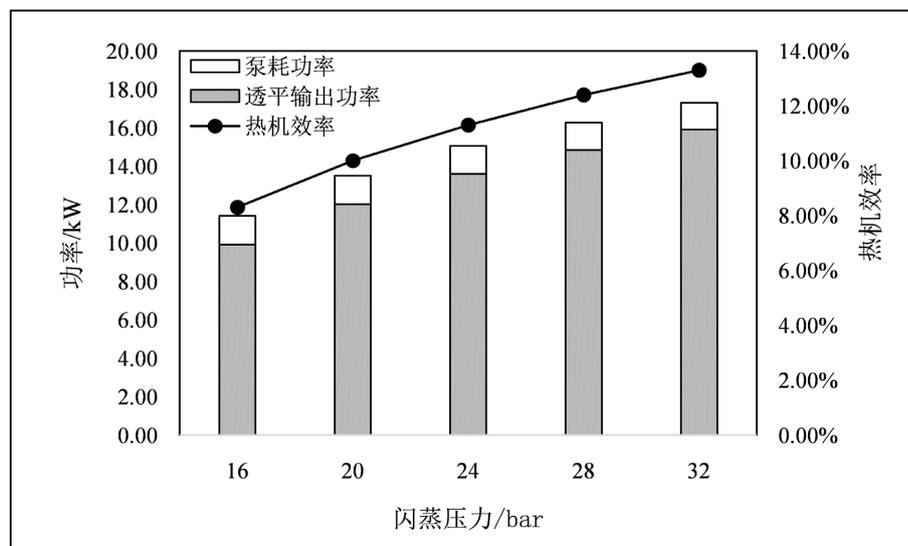


Figure 5. Diagram of Kalina cycle performance parameters changing with flash pressure
图 5. 闪蒸器压力对 Kalina 循环性能参数的影响

压力升高, 泵耗功率无明显变化, 透平输出功率和热机效率显著升高。当闪蒸压力从 16 bar 升至 32 bar 时, 热机效率从 8.3% 升至 13.3%, 提高了 5%。这是由于闪蒸器内部压力升高时, 氨水工质饱和蒸汽压变高, 逸散出的富氨蒸汽就越多, 透平做功能力变强, 热机效率增大。因此, 提高闪蒸器压力, 有利于改善 Kalina 循环系统性能, 进而提高卡诺电池的循环效率, 本文的闪蒸压力设置为 32 bar。

4.1.2. 透平出口压力

透平出口压力会直接影响输出功率的大小, 由于场景中冷却水温度(10°C)的限制, Kalina 循环系统的透平出口压力设计值最低只能为 6 bar 左右。若透平出口压力低于 6 bar, 富氨蒸汽露点会降低, 在冷凝器中无法被冷却水完全液化, 从而影响泵的工作性能, 甚至发生汽蚀。本文透平出口压力初始值设定为 6 bar, 提高透平出口压力, 计算 Kalina 循环系统性能, 得到图 6 所示的结果。

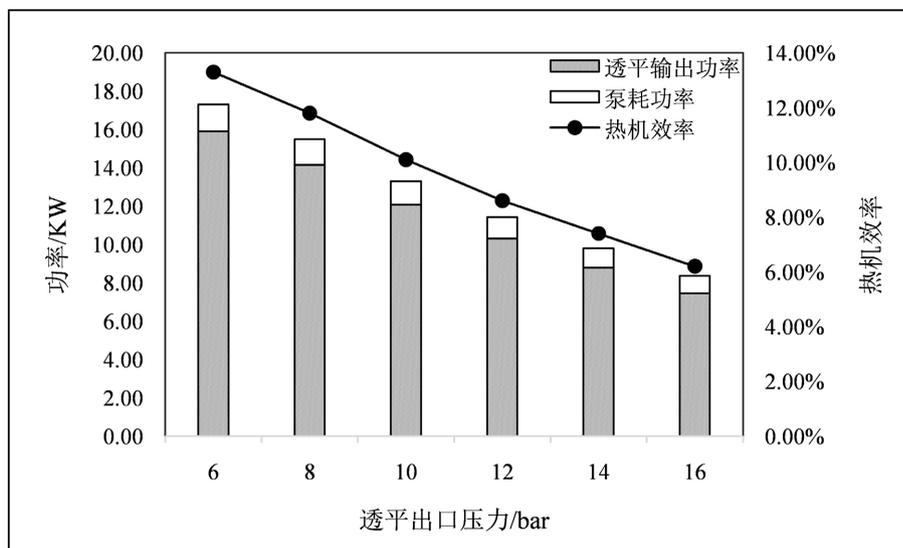


Figure 6. Diagram of Kalina cycle performance parameters changing with turbine outlet pressure

图 6. 透平出口压力对 Kalina 循环性能参数的影响

可以发现, 随着透平出口压力增大, 透平输出功率和泵耗功率逐渐减小, 热机效率降低。当透平出口压力从 8 bar 升高到 16 bar 时, 热机效率从 13.3% 降至 6.2%, 降低了 7.1%。这是由于透平出口压力升高, 透平进口处的压差变小, 富氨蒸汽膨胀做功的能力降低。其经过冷凝器后变为富氨溶液, 在泵中所需提升的压差变小, 泵耗功率略微降低。以上分析表明, 提高透平出口压力, Kalina 循环子系统的热机效率降低, 不利于改善系统循环效率。

4.2. 热源温度对系统性能的影响

本文案例的热源为烟气余热, 现存燃煤发电厂对烟气处理的技术不统一, 大部分发电厂的烟气出口温度处在一个范围, 本节将对不同烟气温度下的卡诺电池总系统和热泵子系统性能逐一讨论。

4.2.1. 热源温度对热泵性能的影响

由表 1 可知, 烟气热源温度设定范围为[80, 100], 计算该热源温度范围下的热泵性能, 得到图 7 所示的结果。可以发现, 随着热源温度升高, 压缩机功耗和热泵 COP 会随之增大。当烟气热源温度从 80°C 升高到 100°C 时, COP 从 4.53 升至 4.87, 提高了 0.34。为了适应烟气温度上升的变化, 需要提高热泵系统的内部压力, 热泵工质的沸点升高且与烟气换热时的吸热量增大。压缩机功耗随着热源温度升高而升

高，但较之系统吸热量的增加，输入电功的增加幅度较缓慢，根据式(10)可知，热泵 COP 升高。此外，从卡诺电池充电过程来看，高温区的储热温度基本不变，低温热源(烟气温度)不断升高，热泵的工作温度区间变窄，温升变小，所以 COP 升高。根据以上分析可以得出，烟气温度越高，热泵子循环系统的 COP 越大，越有利于提高卡诺电池系统的循环效率。

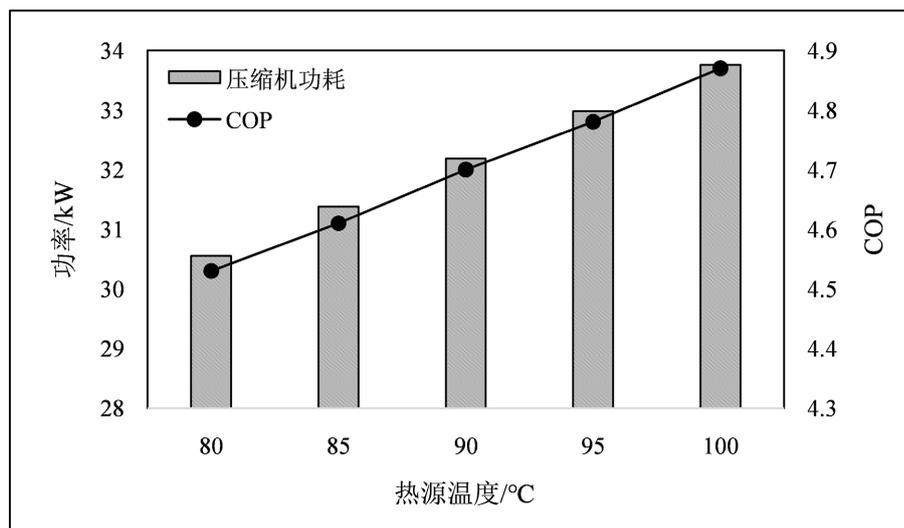


Figure 7. Diagram of heatpump performance parameters changing with heat source temperature
图 7. 热源温度对热泵循环性能参数的影响

4.2.2. 热源温度对循环效率的影响

基于前述的 Kalina 影响因素分析和热源对热泵性能参数的影响结果，本节计算了卡诺电池循环效率在不同热源温度下的变化情况，结果如图 8 所示。可以发现，当热源温度从 80℃ 升至 100℃ 时，卡诺电池的循环效率从 60.0% 升到了 64.6%，提高了 4.6%。随着热源温度升高，循环效率亦随之升高。

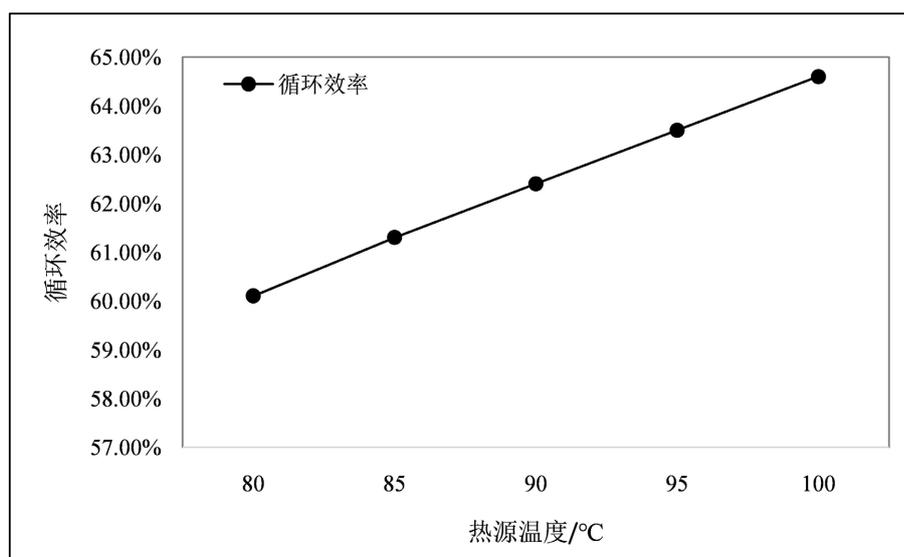


Figure 8. Diagram of roundtrip efficiency of Carnot battery changing with heat source temperature
图 8. 热源温度对系统整体循环效率的影响

本设计场景中, 通过调节加压水的换热流量来稳定储热温度, 进而减少热源温度变化对热机效率的影响。因此在改变热源温度时, 系统循环效率与热泵 COP 的变化趋势一致。综上所述, 烟气余热温度提高有利于改善卡诺电池系统性能。

5. 结论

本文基于燃煤发电厂烟气余热温度条件, 利用 Aspenplus 软件设计了一个卡诺电池系统, 以实现烟气的余热利用, 探究了闪蒸压力和透平出口压力对 Kalina 循环热机效率的影响以及热源温度对热泵子系统和总系统性能的影响, 结果表明:

1) 闪蒸器的内部压力越高, Kalina 子系统热机效率越高, 越有利于提高卡诺电池系统性能, 当闪蒸压力为 32 bar 时, 存在最高热机效率 13.3%。透平进口压力越低, 热机效率越低, 因此透平出口压力即取初始值 6 bar。

2) 随着热源温度越高, 热泵为适应烟气温度需要提高系统内部的压力, 工质沸点随着压力的增大而升高, 卡诺电池在充电阶段应从烟气吸收更多的余热。与此同时, 压缩机的功耗也随着热源温度升高而增加, 但较之吸热量其增幅较缓, 因此热泵 COP 升高。当热源温度为 100℃时, 热泵 COP 取得最大值 4.87。

3) 循环效率随热源温度的升高而升高, 其值为热机效率和热泵 COP 的乘积。这两个参数分别反映了卡诺电池放电和充电阶段的效率。在本设计场景中, 通过调节加压水的换热流量稳定了储热温度, 从而能忽略热源温度对热机效率的影响。因此改变热源温度时, 系统循环效率与热泵 COP 呈现相同的变化趋势, 且在烟气温度为 100℃时取得最大值 64.6%。

参考文献

- [1] 李永毅, 徐钢, 薛小军, 郑清清, 许诚, 杨勇平. 带原煤预干燥的电站高效烟气余热利用系统热力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3498-3505.
- [2] 蒋军成, 胡政. 燃煤电站中锅炉燃烧烟气余热节能分析[J]. 能源与环保, 2023, 45(2): 173-179.
- [3] Dumont, O., Frate, G.F., Pillai, A., Lecompte, S., De paepe, M. and Lemort, V. (2020) Carnot Battery Technology: A State-of-the-Art Review. *Journal of Energy Storage*, **32**, Article ID: 101756. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101756>
- [4] Liang, T., Vecchi, A., Knobloch, K., Sciacovelli, A., Engelbrecht, K., Li, Y., et al. (2022) Key Components for Carnot Battery: Technology Review, Technical Barriers and Selection Criteria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **163**, Article ID: 112478. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112478>
- [5] Weitzer M, Müller D, Steger D, Charalampidis A, Karellas S, Karl J. (2022) Organic Flash Cycles in Rankine-Based Carnot Batteries with Large Storage Temperature Spreads. *Energy Conversion and Management*, **255**, Article ID: 115323. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115323>
- [6] Lee, K.J., Seo, S.H., Cho, J., Oh, S.D., Choi, S.O. and Kwak, H.Y. (2022) Exergy and Thermo-economic Analyses of a Carnot Battery System Comprising an Air Heat Pump and Steam Turbine. *Energies*, **15**, Article No. 8672. <https://doi.org/10.3390/en15228672>
- [7] 唐迪, 韩晓, 钱学君, 成惠峰. 卡诺电池在玻璃窑炉低品位余热利用中的展望[J]. 建材世界, 2023, 44(1): 27-29.
- [8] Frate, G.F., Ferrari, L. and Desideri, U. (2022) Techno-Economic Comparison of Brayton Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) Systems Based on Solid and Liquid Sensible Heat Storage. *Energies*, **15**, Article No. 9595. <https://doi.org/10.3390/en15249595>
- [9] 董益秀, 王如竹. 高温热泵的循环、工质研究及应用展望[J]. 化工学报, 2023, 74(1): 133-144.
- [10] 杨凯杰, 绳晓玲. 改进 Kalina 循环模型的建立及性能分析[J]. 能源研究与管理, 2022, 14(3): 77-83.