doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2026. 059

集成余热回收的储冷型卡诺电池系统热力学性能

冯军胜[1]，滕茹冰[1]，何雨琪[1]，赵 亮[2]，董 辉[2]，李明明[3]
（1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院，合肥 230601；2. 东北大学 冶金学院，沈阳 110819；
3. 沈阳东大三建工业炉制造有限公司，沈阳 110102）

摘 要：通过构建集成余热回收的储冷型卡诺电池（CB）系统热力学模型，研究了不同蒸汽压缩制冷（VCR）循环工质下系统热力学参数对往返效率（η_{rt}）、总㶲损（E_{tot}）和㶲效率（η_{ex}）的影响，并开展系统热力学性能的敏感性分析.结果表明：对于给定的 VCR 工质，随着 VCR 冷凝温度（$T_{con,VCR}$）和有机朗肯循环（ORC）冷凝温度（$T_{con,ORC}$）的升高，系统 η_{rt}和 η_{ex}逐渐减小，而 E_{tot}逐渐增大；VCR 过冷度（$T_{sc,VCR}$）和 ORC 蒸发温度（$T_{eva,ORC}$）越高，系统 η_{rt}和 η_{ex}越大，而 E_{tot}越小；$T_{con,VCR}$每升高 1 K，系统 η_{rt}和 η_{ex}分别平均减小 3.55 和0.54个百分点，而 $T_{eva,ORC}$每升高 1 K，系统 η_{rt}和 η_{ex}分别平均增加 0.9%和 0.16%；在相同的系统热力学参数条件下，以 R600 作为 VCR 工质的系统热力学性能最好；$T_{con,VCR}$对系统 η_{rt}和 η_{ex}的敏感度最高，而 $T_{eva,ORC}$对系统 E_{tot}的敏感度最高，$T_{sc,VCR}$对系统热力学性能的敏感度最小；对于储冷型 CB 系统，提高系统 η_{rt}和 η_{ex}应优先考虑降低 $T_{con,VCR}$，此时系统 E_{tot}的下降幅度也较大.上述研究结果可为储冷型卡诺电池系统设计和运行提供理论支撑.

关键词：余热回收；卡诺电池；储冷；热力学性能；敏感性分析
中图分类号：TK 115 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-6620(2026)05-0476-09

Thermodynamic performance of cold storage Carnot battery system integrated with waste heat recovery

Feng Junsheng[1], Teng Rubing[1], He Yuqi[1], Zhao Liang[2], Dong Hui[2], Li Mingming[3]
(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. Shenyang Dongda Sanjian Industrial Furnace Manufacturing Co., Ltd., Shenyang 110102, China)

Abstract: The thermodynamic model of a cold storage Carnot battery (CB) system integrated with waste heat recovery was constructed in the current study, and the effects of system thermodynamic parameters on the round-trip efficiency(η_{rt}), total exergy loss (E_{tot}) and exergy efficiency (η_{ex}) under different cycle working fluids of vapor compression refrigeration (VCR) were studied. Furthermore, the sensitivity analysis of system thermodynamic performance was carried out. The results indicate that for a given VCR working fluid, as the VCR condensation temperature($T_{con,VCR}$) and organic Rankine cycle(ORC) condensation temperature($T_{con,ORC}$) rise, the system η_{rt} and η_{ex} gradually reduce, while the system E_{tot} gradually increases. The higher the VCR sub-cooling degree($T_{sc,VCR}$) and ORC evaporation temperature($T_{eva,ORC}$) are, the larger the system η_{rt} and η_{ex} are, while the smaller the system E_{tot} is. For every 1 K rise in $T_{con,VCR}$, the system η_{rt} and η_{ex} reduce by an average of 3.55 and 0.54 percentage points, respectively, while for every 1 K rise in $T_{eva,ORC}$, the η_{rt} and η_{ex} rise by an average of 0.9% and 0.16%, respectively. Under the same system thermodynamic parameters, R600 as the VCR working fluid has the best system thermodynamic performance. $T_{con,VCR}$ has the highest sensitivity for system η_{rt} and η_{ex}, while the system E_{tot} is the most sensitive to $T_{eva,ORC}$, and $T_{sc,VCR}$ has the smallest sensitivity for system thermodynamic performance. For the cold storage CB system, the improvement of system η_{rt} and η_{ex} should preferentially consider reducing $T_{con,VCR}$, and at this time, the reduction extent in system E_{tot} is also relatively larger. The above research results can provide theoretical support for the design and operation of cold storage CB system.

Key words: waste heat recovery; Carnot battery; cold storage; thermodynamic performance; sensitivity analysis

收稿日期：2026-03-21.
基金项目：安徽省高校自然科学研究基金资助项目（2022AH050262）；安徽省自然科学基金资助项目（1908085QE203）；中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202307）.
作者简介：冯军胜（1988—），男，博士，副教授，E-mail：fjsheng076@163.com.
通讯作者：董辉（1969—），男，博士，教授，E-mail：Dongh@mail.neu.edu.cn.

引文格式：冯军胜，滕茹冰，何雨琪，等. 集成余热回收的储冷型卡诺电池系统热力学性能［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：476-484.（Feng Junsheng, Teng Rubing, He Yuqi, et al. Thermodynamic performance of cold storage Carnot battery system integrated with waste heat recovery［J］. Journal of Materials and Metallurgy, 2026, 25（5）: 476-484.）

提高能源利用效率和高效回收低温余热资源是工业领域实现节能减排的关键[1].根据国家能源消费统计数据可知,在工业领域一次能源利用中,高达 42%的能量以余热形式散失,其中仅有34%的余热资源被回收利用[2].作为我国高耗能工业,钢铁生产中存在大量余热资源,通过余热资源回收可实现企业 7%~8%的降碳潜力,其中烧结余热回收贡献率约占 15%[3].当前钢铁行业的综合余热利用率普遍在 30%~50%[4],这意味着超过 50%的余热资源,尤其是低温余热未能得到高效回收利用,形成大量能源损耗.因此,在钢铁企业各个生产工序过程中,进一步提高低温余热利用率对实现钢铁工业“双碳”目标意义重大.

除了工业领域高效回收利用低温余热资源外,可再生能源开发和利用也已成为全球应对能源短缺和环境污染的有效解决方案[5].在此背景下,以光伏和风力发电为主的可再生能源发电技术得到了广泛应用.然而,光伏和风力等可再生能源发电均具有内在不稳定性和间歇性,这对确保大规模风电并网与电力安全供应有着很大的挑战性[6].因此,要提高可再生能源发电并网的稳定性,就必须部署相应的储能系统[7].在此背景下,卡诺电池(CB)系统作为一种新型大规模、长效储能技术,在可再生能源发电中展现出独特的优势;其凭借不受地理位置限制、运行寿命长、储能密度高和维护成本低等优点,能够有效解决可再生能源发电消纳和存储问题,同时还能提高电力系统的灵活性和稳定性[8].根据热机循环构型的不同,CB 系统主要包含朗肯循环和布雷顿循环 2 种类型.其中,基于有机朗肯循环(ORC)的 CB 系统能够在较低温度(<200 ℃)下运行,该系统安全性与操作性能优异,还能高效回收低温余热,从而进一步提升整体能源利用效率[9-10].

采用 CB 系统回收利用低温余热在 2014 年首次被提出[11],随后,国内外学者针对不同热源和结构形式的 CB 系统进行了大量研究.其中,赵永亮等[12]以储热介质、有无回热为变量设计 6 类 CB 系统构型,对比各方案热经济性能并完成热力学参数优化.Frate 等[13]探究蓄热、热源温度对 CB 系统储能效率的影响,系统往返效率最高可达 107%.林小杰等[14]提出高低温相变材料耦合的新型蒸汽 CB 系统,揭示系统热泵系数、循环效率、储电损失及㶲效率的演化规律.卢沛等[15]构建全时段余热耦合 CB 系统,实现低品位余热全天候高效利用,并分析其热经济特性.张宇等[16]面向数据中心搭建冷电联供型 CB 系统,评估浸没式自然冷却方案的能效与经济性.Bellos 等[17]提出太阳能辅助 CB 系统,分析热力参数对系统性能的作用规律,最优往返效率为 68.48%.于博旭等[18]将熔盐储热 CB 系统应用于火电厂改造,剖析不同储释能工况下耦合机组的运行效率与调峰能力.黄正杰等[19]建立填充床相变蓄热式 CB 系统动态模型,明确换热流体与工质流量对系统性能的影响机制.

综上,目前基于 ORC 的 CB 系统研究大部分以储热型为主,即采用热泵系统将低温余热提质后储存并作为 ORC 系统热源,而涉及储冷型 CB 系统研究较少,尤其是涉及钢铁企业低温余热回收的储冷型 CB 系统性能分析还鲜有文献报道.基于 ORC 的储冷型 CB 系统是由蒸汽压缩制冷(VCR)系统和 ORC 系统耦合而成,此时低温余热作为 ORC 热源,通过 VCR 系统获得的较低温度储冷介质作为 ORC 冷源.与储热型 CB 系统相比,储冷型 CB 系统能有效提高 ORC 系统循环温差,进而提升系统热效率.基于此,本文中针对集成钢铁企业低温余热回收的储冷型 CB 系统,构建系统热力循环过程计算模型,研究不同 VCR 工质下系统热力学参数对往返效率、总㶲损和㶲效率的影响,并开展系统热力学性能的敏感性分析,以期为储冷型 CB 系统的参数优化提供理论指导,同时也为可再生能源发电和钢铁企业低温余热高效回收利用开辟新的技术路径.

1　系统描述

图 1 显示了储冷型 CB 系统原理图,主要由 VCR 系统、储冷系统和 ORC 系统组成.VCR 系统包括冷凝器、压缩机、蒸发器和节流阀.在充电过程中,VCR 工质先在冷凝器内冷却放热;随后,进入节流阀中节流降温变成低压湿蒸汽;然后,进入蒸发器内从储冷介质吸热蒸发,被冷却的储冷介质进入储冷系统;最后,VCR 工质在压缩机中被压缩成过热蒸汽,重新返回冷凝器内与冷却水进行热交换.在 VCR 系统中,可再生能源电能通过压缩机耗功转变为循环工质内能储存在储冷介质中.储冷系统由 2 个闭路循环的储液罐组成,储冷介质在 VCR 蒸发器内被 VCR 工质冷却后储存在冷罐中作为 ORC 系统冷源,随后进入 ORC 冷凝器中吸收 ORC 工质释放的热量,被加热后的储冷介质储存在热罐内作为 VCR 系统热源,最后重新返回 VCR 蒸发器循环使用.ORC 系统包括蒸发器、工质泵、冷凝器和膨胀机.在放电过程中,ORC 工质在蒸发器内从热源(低温余热)吸收热量,随

后进入膨胀机对外做功;做功后,工质进入冷凝器内向储冷介质释放热量;最后,在工质泵作用下,被冷却的ORC工质重新返回蒸发器内吸热蒸发.在ORC系统中,通过蒸发器和冷凝器换热将储冷介质冷能和低温烟气余热转变为循环工质内能,而后进入膨胀机做功输出电能.

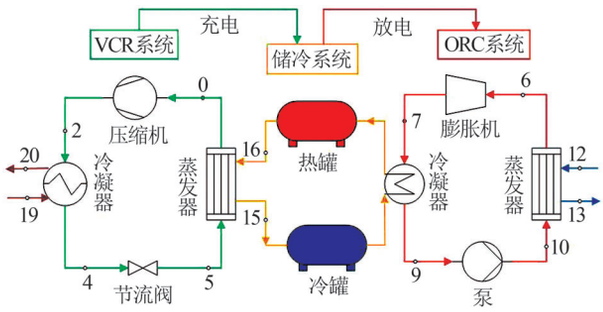


图1 储冷型CB系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cold storage CB system

图2展示了储冷型CB的温熵(*T*-*S*)图.在图2(a)中,VCR工质在冷凝器内与冷却水换热后变成过冷水(点2→4),冷却水吸热后温度升高(点19→20),而后VCR工质经节流降温变成低压湿蒸汽(点4→5).在蒸发器内,储冷介质放热后温度降低(点16→15),而VCR工质从储冷介质吸热蒸发变成过热蒸汽(点5→0),随后在压缩机内被压缩成高温过热蒸汽(点0→2).最后,VCR工质重新返回冷凝器内,冷却放热完成整个VCR循环.

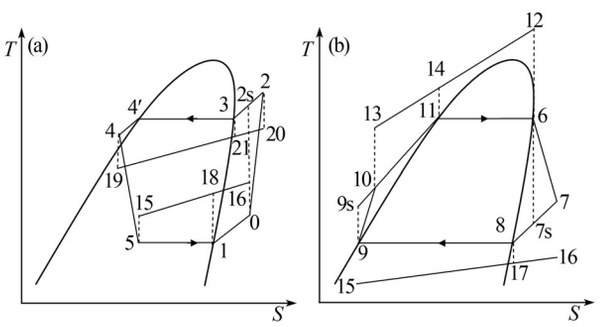


图2 储冷型CB系统温熵图

Fig. 2 Temperature-entropy diagrams of cold storage CB system

(a)—VCR;(b)—ORC.

在图2(b)中,热源(低温余热)在蒸发器内将热量传递给ORC工质(点12→13),而ORC工质吸热蒸发变成饱和蒸汽(点10→6),随后进入膨胀机内对外做功(点6→7),做功后的ORC工质在冷凝器内与储冷介质进行热交换,被冷却为饱和液体(点7→9).最后,ORC工质在工质泵内被压缩成高压液体(点9→10),重新返回到蒸发器内,吸热蒸发完成整个ORC循环.

2 系统模型建立

在构建储冷型CB系统数学模型时,本文依据工程热力学相关理论对系统运行给出如下假设[20-21]:①系统各组成设备均在稳态条件下运行,忽略能量损失与压降影响;②外部环境参数视为恒定边界条件,系统可持续获取品质稳定的低温烟气余热及冷却介质;③膨胀机、压缩机及工质泵的等熵效率在计算过程中设为定值,均取0.85;④基于液态水具有优异的稳定性,选用其作为储冷介质,并在模型构建中忽略储冷环节的散热损失.

2.1 热力学模型

VCR蒸发器和冷凝器内换热量:

$$Q_{\mathrm{eva,VCR}}=m_{\mathrm{cs}}(h_{16}-h_{15})=m_{\mathrm{VCR}}(h_0-h_5) \quad (1)$$

$$Q_{\mathrm{con,VCR}}=m_{\mathrm{VCR}}(h_2-h_4)=m_{\mathrm{w}}(h_{20}-h_{19}) \quad (2)$$

式中:m_{cs}为储冷水流量,kg/s;m_{VCR}为VCR工质流量,kg/s;h_i为图2中状态点i处工质的比焓,kJ/kg;m_{w}为冷却水流量,kg/s.

压缩机耗功量:

$$W_{\mathrm{com}}=m_{\mathrm{VCR}}(h_2-h_0)=m_{\mathrm{VCR}}(h_{2\mathrm{s}}-h_0)/\eta_{\mathrm{com}} \quad (3)$$

式中:η_{com}为压缩机等熵效率.

在VCR系统中,系统性能系数($\mathrm{COP_{VCR}}$)代表蒸发器内工质吸热量与压缩机耗功的比值[22],其具体表达式为

$$\mathrm{COP_{VCR}}=\frac{Q_{\mathrm{eva,VCR}}}{W_{\mathrm{com}}} \quad (4)$$

ORC蒸发器换热量:

$$Q_{\mathrm{eva,ORC}}=m_{\mathrm{hs}}(h_{12}-h_{13})=m_{\mathrm{ORC}}(h_6-h_{10}) \quad (5)$$

式中:m_{hs}为热源流量,kg/s;m_{ORC}为ORC工质流量,kg/s.

膨胀机输出功量:

$$W_{\mathrm{exp}}=m_{\mathrm{ORC}}(h_6-h_7)=m_{\mathrm{ORC}}(h_6-h_{7\mathrm{s}})\eta_{\mathrm{exp}} \quad (6)$$

式中:η_{exp}为膨胀机等熵效率.

工质泵耗功量:

$$W_{\mathrm{p}}=m_{\mathrm{ORC}}(h_{10}-h_9)=m_{\mathrm{ORC}}(h_{9\mathrm{s}}-h_9)/\eta_{\mathrm{p}} \quad (7)$$

式中:η_{p}为工质泵等熵效率.

ORC冷凝器换热量:

$$Q_{\mathrm{con,ORC}}=m_{\mathrm{ORC}}(h_7-h_9)=m_{\mathrm{cs}}(h_{16}-h_{15}) \quad (8)$$

ORC系统净输出功:

$$W_{\mathrm{net}}=W_{\mathrm{exp}}-W_{\mathrm{p}} \quad (9)$$

在ORC系统中,系统热效率(η_{ORC})代表系统净输出功与蒸发器内工质吸热量的比值,其具体表达式为

$$\eta_{\mathrm{ORC}}=\frac{W_{\mathrm{net}}}{Q_{\mathrm{eva,ORC}}}\times 100\% \tag{10}$$

储冷型 CB 系统往返效率(η_{rt})代表 ORC 系统净输出功与 VCR 系统压缩机耗功的比值[22]，在不考虑储冷系统能量损失前提下，其具体表达式为

$$\eta_{\mathrm{rt}}=\frac{W_{\mathrm{net}}}{W_{\mathrm{com}}}\times 100\%=\frac{\mathrm{COP}_{\mathrm{VCR}}\cdot\eta_{\mathrm{ORC}}}{1-\eta_{\mathrm{ORC}}}\times 100\% \tag{11}$$

热源流体的净输入㶲：

$$E_{\mathrm{hs}}=m_{\mathrm{hs}}c_{\mathrm{hs}}\left(T_{12}-T_{13}-T_{\mathrm{e}}\ln\frac{T_{12}}{T_{13}}\right) \tag{12}$$

式中：c_{hs}为热源比热容，kJ/(kg·K)；T_{12}和T_{13}分别为热源进口和出口温度，K；T_{e}为环境温度，K.

根据热力学第二定律可知，储冷型 CB 系统总㶲损(E_{tot})为系统输入㶲与输出㶲的差值，其具体表达式为

$$E_{\mathrm{tot}}=E_{\mathrm{hs}}+W_{\mathrm{com}}-W_{\mathrm{net}} \tag{13}$$

储冷型 CB 系统㶲效率(η_{ex})：

$$\eta_{\mathrm{ex}}=\frac{W_{\mathrm{net}}}{W_{\mathrm{com}}+E_{\mathrm{hs}}}\times 100\%=\left(1-\frac{E_{\mathrm{tot}}}{W_{\mathrm{com}}+E_{\mathrm{hs}}}\right)\times 100\% \tag{14}$$

2.2　系统工质筛选

对于储冷型 CB 系统，选择循环工质时，先要考虑其与常见热源、冷源和储冷介质温度区间的适配性，确保工质能在该温度范围内有效完成吸热与放热过程. 基于此，本文中选取 R1243zf、R600a、R600、R290 和 R1234yf 作为 VCR 循环工质，主要考虑其适中的沸点和较好的热力学性能[23]. 在 ORC 循环中，选择 R1234ze(Z) 作为候选工质，主要考虑其在低温热源利用场景中具有良好的热力学适应性，并表现出较好的循环性能[24]. 同时，从环境影响角度考量，所筛选 VCR 和 ORC 循环工质的臭氧消耗潜能值(ODP)均为 0，全球变暖潜能值(GWP)也较低，契合当前节能减排与环保政策要求. 表 1 中列出了本文所选工质的主要热物性参数.

表 1　工质的物性参数

Table 1　Physical properties of working fluids

有机工质参数	R1243zf	R600a	R600	R290	R1234yf	R1234ze(Z)
工质类型	干	干	干	干	干	干
摩尔质量/(g·mol^{-1})	96.05	58.12	58.12	44.1	114	114.04
沸点/℃	−25.42	−11.74	−0.49	−42.11	−29.45	9.75
临界温度/℃	103.78	134.7	152	96.7	94.7	150.12
临界压力/MPa	3.52	3.64	3.796	4.25	3.382	3.53
臭氧消耗潜能值	0	0	0	0	0	0
全球变暖潜能值	4	20	20	3.3	4	6

2.3　模型验证

为验证所建立储冷型 CB 系统热力学模型的准确性与可靠性，将模拟计算结果与文献[25]中的指标数据进行对比，结果如表 2 所列.

表 2　模型验证结果

Table 2　Results of model validation

性能指标	文献[25]	模拟结果	误差/%
$\mathrm{COP}_{\mathrm{VCR}}$	5.06	5.09	0.6
η_{ORC}/%	8.02	8.07	0.62
η_{rt}/%	48.67	49.32	1.34
η_{ex}/%	20.59	21.13	2.62

由表 2 可知，系统计算结果与文献指标数据吻合度较好，最大误差仅为 2.62%，有效验证了本研究提出储冷型 CB 系统热力学模型的准确性.

3　结果与讨论

本文选取烧结工序低温冷却烟气作为储冷型 CB 系统热源，主要是因为其不存在露点腐蚀问题，可以深度回收利用[26]. 在数值求解过程中，对于所建立的系统计算模型采用热力学计算软件耦合 Refprop 物性数据库进行求解，重点研究 VCR 冷凝温度($T_{\mathrm{con,VCR}}$)、VCR 过冷度($T_{\mathrm{sc,VCR}}$)、ORC 蒸发温度($T_{\mathrm{eva,ORC}}$)和 ORC 冷凝温度($T_{\mathrm{con,ORC}}$)对系统往返效率(η_{rt})、总㶲损(E_{tot})和㶲效率(η_{ex})的影响，并开展不同热力学参数下系统热力学性能的敏感性分析. 储冷型 CB 系统初始运行参数见表 3.

表3 系统计算初始参数

Table 3 System initial calculation parameters

参数	符号	数值
热源进口温度/K	T_{12}	398
热源流量/(kg·s^{-1})	m_{hs}	100
冷罐温度/K	T_{15}	278
热罐温度/K	T_{16}	288
VCR蒸发器端点温差/K	ΔT_{0-16}	10
VCR蒸发温度/K	$T_{eva,VCR}$	273
VCR冷凝器节点温差/K	ΔT_{21-3}	5
ORC蒸发器节点温差/K	ΔT_{11-14}	5
环境温度/ K	T_e	293

3.1 VCR冷凝温度的影响

图3示出了当$T_{sc,VCR}$、$T_{eva,ORC}$、$T_{con,ORC}$分别为277、368、288 K时，不同VCR工质下系统η_{rt}随$T_{con,VCR}$的变化.由图3可知，对于给定的VCR工质，$T_{con,VCR}$越高，系统η_{rt}越小.这可以解释为，$T_{con,VCR}$的升高会造成VCR冷凝器出口工质焓值(h_4)和压缩机耗功量(W_{com})的增大，VCR蒸发器换热量($Q_{eva,VCR}$)会随之变小.根据式(4)可知，VCR系统COP_{VCR}也逐渐减小.此时，由于ORC系统热效率(η_{ORC})保持不变，故而系统η_{rt}逐渐变小.另外，对于给定的$T_{con,VCR}$，工质R600的η_{rt}最大，其次是R600a，最小的是R1234yf；当$T_{con,VCR}$为303 K时，工质R600的系统η_{rt}高达124.73%.随着$T_{con,VCR}$的升高，5种VCR工质对应的系统η_{rt}下降幅度基本一致.$T_{con,VCR}$每升高1 K，系统η_{rt}平均减小3.55个百分点.

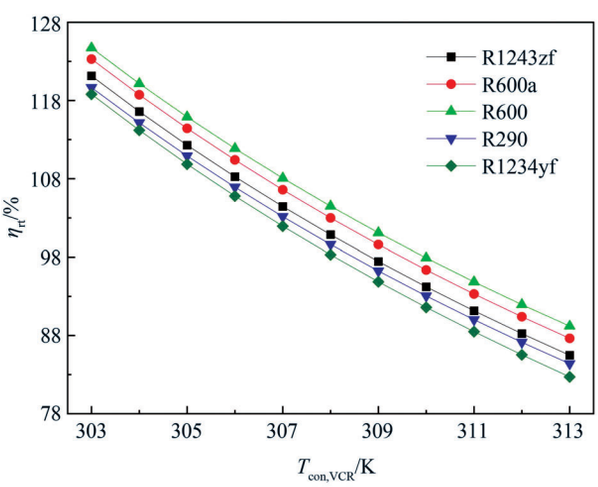


图3 系统η_{rt}随$T_{con,VCR}$的变化

Fig. 3 Change of system η_{rt} with $T_{con,VCR}$

图4示出了系统E_{tot}和η_{ex}随$T_{con,VCR}$的变化.由图4可知，当VCR工质一定时，随着$T_{con,VCR}$的升高，系统E_{tot}逐渐变大，而η_{ex}逐渐变小.这可以解释为，$T_{con,VCR}$的升高会造成W_{com}增大，此时热源净输入㶲(E_{hs})和ORC系统净输出功(W_{net})保持不变，故而系统E_{tot}随之变大.此外，由于系统E_{tot}的增幅要大于W_{com}的增幅，根据式(14)可得出，系统η_{ex}逐渐减小.另外，当$T_{con,VCR}$一定时，工质R600的系统E_{tot}最小，系统η_{ex}最大.$T_{con,VCR}$每升高1 K，工质R600的E_{tot}平均增加20.8 kW，而η_{ex}平均减小0.54个百分点.

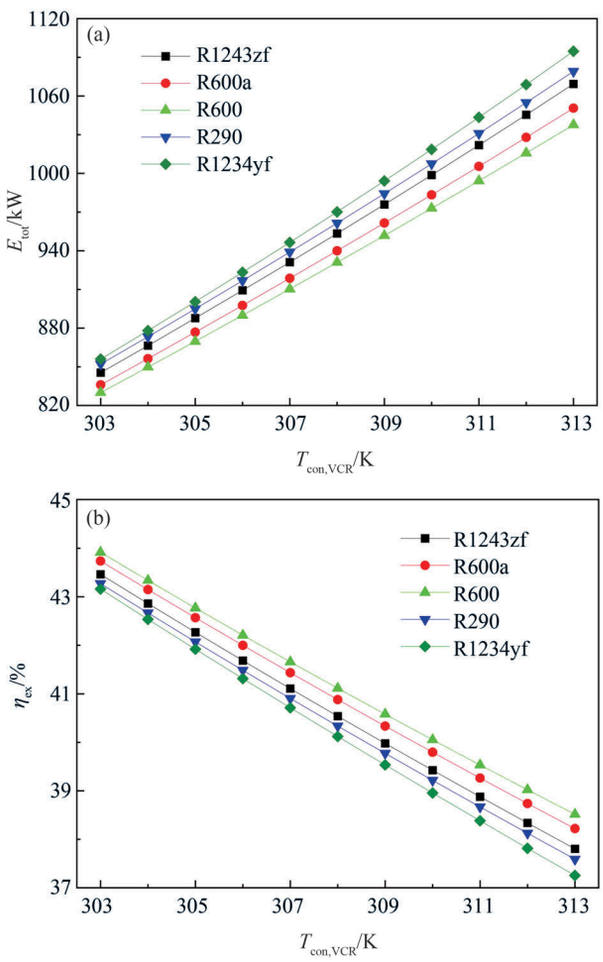


图4 系统E_{tot}和η_{ex}随$T_{con,VCR}$的变化

Fig. 4 Changes of system E_{tot} and η_{ex} with $T_{con,VCR}$

3.2 VCR过冷度的影响

图5示出了当$T_{con,VCR}$、$T_{eva,ORC}$、$T_{con,ORC}$分别为308、368、288 K时，不同VCR工质下系统η_{rt}随$T_{sc,VCR}$的变化.由图5可知，对于给定的VCR工质，系统η_{rt}随$T_{sc,VCR}$的升高而增大.这可以解释为，$T_{con,VCR}$的升高会造成VCR冷凝器内h_4变小，

VCR 蒸发器内单位工质焓增(h_0-h_5)、单位工质流量的 $Q_{eva,VCR}$ 会随之变大.此时,VCR 压缩机内的单位工质焓增(h_2-h_0)、单位工质流量的 W_{com} 保持不变,根据式(4)可知,COP_{VCR} 会逐渐增大.由于 $T_{sc,VCR}$ 的变化对 η_{ORC} 没有影响,故而系统 η_{rt} 逐渐变大.另外,当 $T_{sc,VCR}$ 一定时,系统 η_{rt} 从大到小的工质排序为 R600, R600a, R1243zf, R290 和 R1234yf.以 R290 为例,$T_{sc,VCR}$ 每升高 1 K,系统 η_{rt} 平均增加0.91个百分点.

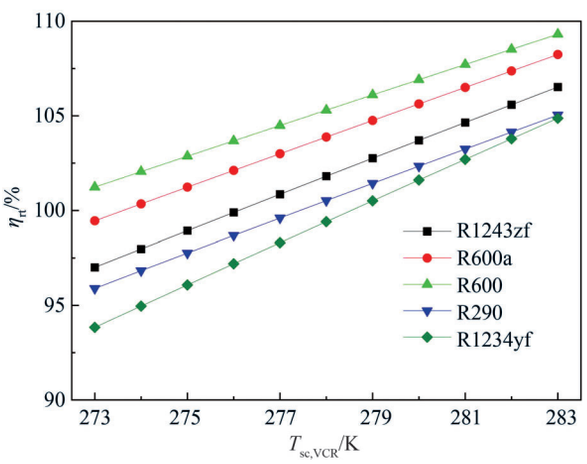
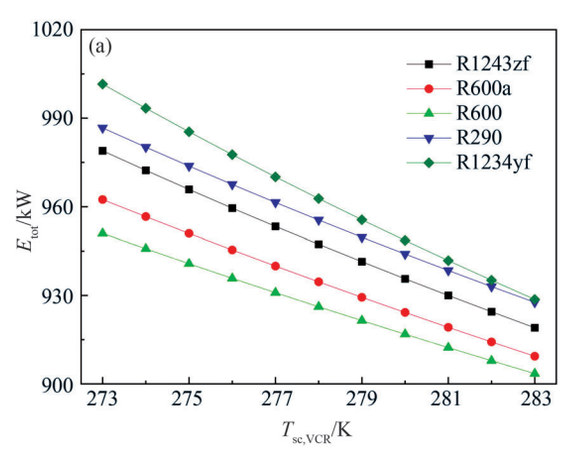


图 5　系统 η_{rt} 随 $T_{sc,VCR}$ 的变化

Fig. 5　Change of system η_{rt} with $T_{sc,VCR}$

图 6 示出了系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{sc,VCR}$ 的变化.由图 6 可知,当 VCR 工质一定时,$T_{sc,VCR}$ 越高,系统 E_{tot} 越小,而 η_{ex} 越大.这可以解释为,由于 VCR 蒸发器内储冷介质放热量不变,$T_{sc,VCR}$ 的升高会造成 VCR 工质流量(m_{VCR})变小,进而使系统 W_{com} 变小.$T_{sc,VCR}$ 的变化对 E_{hs} 和 W_{net} 没有影响,根据式(13)可知,系统 E_{tot} 会随之变小.与此同时,由于系统 E_{tot} 的减幅大于 W_{com} 的减幅,最终推动系统 η_{ex} 逐渐变大.



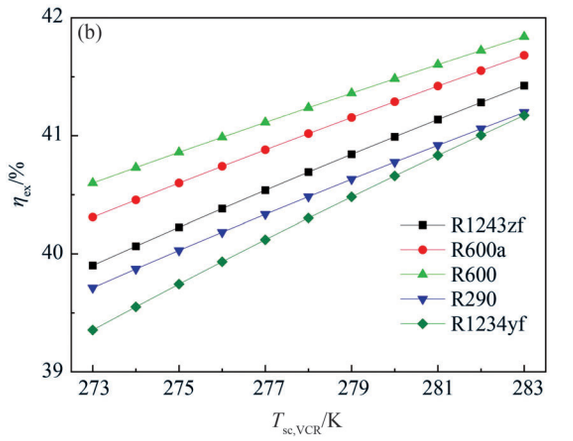


图 6　系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{sc,VCR}$ 的变化

Fig. 6　Changes of system E_{tot} and η_{ex} with $T_{sc,VCR}$

另外,当 $T_{sc,VCR}$ 一定时,工质 R600 的系统 E_{tot} 最小,而 η_{ex} 从大到小的工质排序与系统 η_{rt} 一致.以工质 R600 为例,$T_{sc,VCR}$ 每升高 1 K,系统 E_{tot} 平均减小4.7 kW,而系统 η_{ex} 平均增加 0.12 个百分点.

3.3　ORC 蒸发温度的影响

图 7 示出了当 $T_{con,VCR}$、$T_{sc,VCR}$、$T_{con,ORC}$ 分别为 308、277、288 K 时,不同 VCR 工质下系统 η_{rt} 随 $T_{eva,ORC}$ 的变化.由图 7 可知,对于给定的 VCR 工质,$T_{eva,ORC}$ 越高,系统 η_{rt} 越大,这是因为 $T_{eva,ORC}$ 的升高会使得系统 W_{net} 变大;而 $T_{con,VCR}$ 和 $T_{sc,VCR}$ 保持不变,造成系统 COP_{VCR} 和 ORC 蒸发器换热量($Q_{eva,ORC}$)也不变,系统 η_{ORC} 随之增大,结合式(11)可得,系统 η_{rt} 逐渐变大.当 $T_{eva,ORC}$ 一定时,系统 η_{rt} 从大到小的工质排序与前文改变 $T_{con,VCR}$ 和 $T_{sc,VCR}$ 所得结果一致.以工质 R600 为例,$T_{eva,ORC}$ 每升高 2 K,系统 η_{rt} 平均增加 1.8 个百分点.

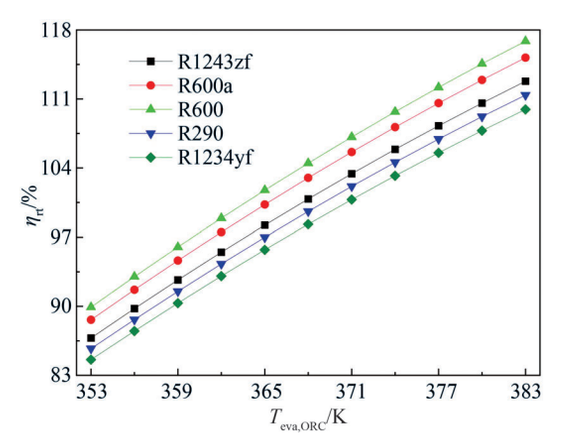


图 7　系统 η_{rt} 随 $T_{eva,ORC}$ 的变化

Fig. 7　Change of system η_{rt} with $T_{eva,ORC}$

图 8 示出了系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{eva,ORC}$ 的变化.由图 8 可知,当 VCR 工质一定时,随着 $T_{eva,ORC}$ 的

升高,系统 E_{tot} 逐渐变小,而 η_{ex} 持续提升.其内在机理为,$T_{eva,ORC}$ 的升高会提高热源出口温度(T_{13}),造成 E_{hs} 逐渐变小;此时,系统 W_{com} 保持不变,而 W_{net} 不断增大,促使系统 E_{tot} 逐渐减小.根据式(14)可得出,系统 η_{ex} 会逐渐上升.另外,在 $T_{eva,ORC}$ 变化范围内,工质 R1234yf 的系统 E_{tot} 最大,η_{ex} 最小,而工质 R600 的系统 E_{tot} 最小,η_{ex} 最大.以工质 R1234yf 为例,$T_{eva,ORC}$ 每升高 2 K,系统 E_{tot} 平均减小 61.1 kW,而 η_{ex} 平均增加 0.32 个百分点.

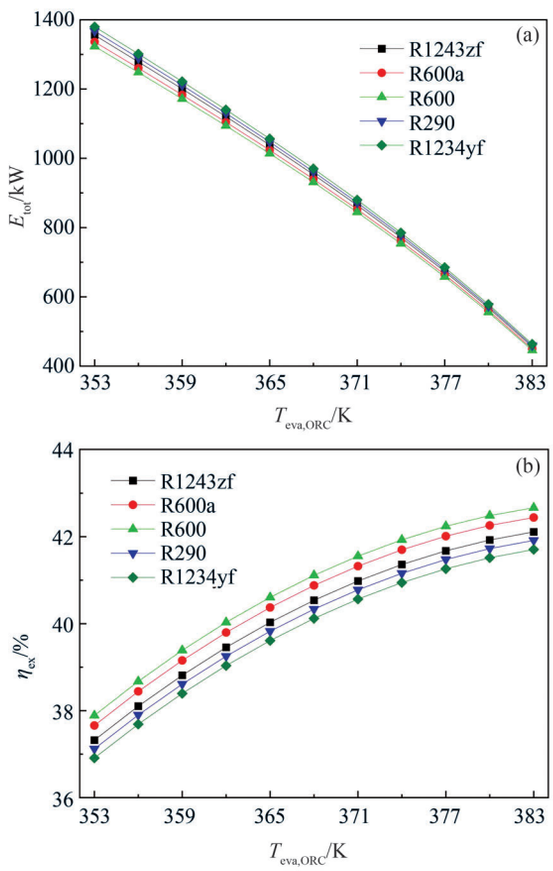


图 8 系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{eva,ORC}$ 的变化

Fig. 8 Changes of system E_{tot} and η_{ex} with $T_{eva,ORC}$

3.4 ORC 冷凝温度的影响

图 9 示出了当 $T_{con,VCR}$、$T_{sc,VCR}$、$T_{eva,ORC}$ 分别为 308、277、368 K 时,不同 VCR 工质下系统 η_{rt} 随 $T_{con,ORC}$ 的变化.由图 9 可知,对于给定的 VCR 工质,$T_{con,ORC}$ 越高,系统 η_{rt} 越小.内在机理如下,$T_{con,ORC}$ 的升高会提高系统膨胀机出口工质焓值(h_7),造成系统 W_{net} 减小,η_{ORC} 也同步减小.由于 $T_{con,ORC}$ 的变化对系统 COP_{VCR} 没有影响,结合式(11)可得出,系统 η_{rt} 逐渐降低.另外,在 $T_{con,ORC}$ 变化范围内,不同 VCR 工质对应的系统 η_{rt} 减小幅度基本相同,而 η_{rt} 从大到小的工质排序与上述 3 个热力学参数的影响结果一致.$T_{con,ORC}$ 每升高 1 K,系统 η_{rt} 平均减小 1.41 个百分点.

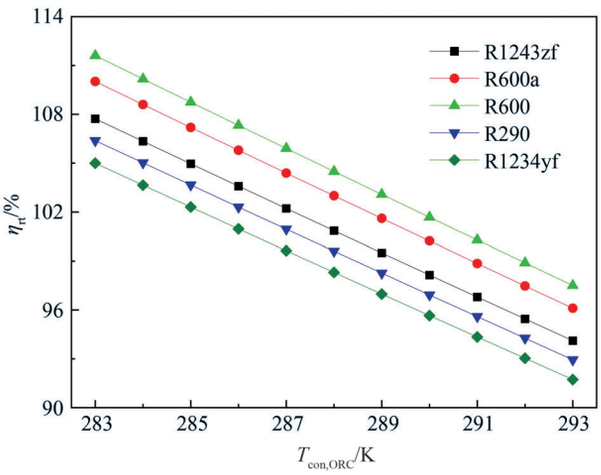


图 9 系统 η_{rt} 随 $T_{con,ORC}$ 的变化

Fig. 9 Change of system η_{rt} with $T_{con,ORC}$

图 10 示出了系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{con,ORC}$ 的变化.

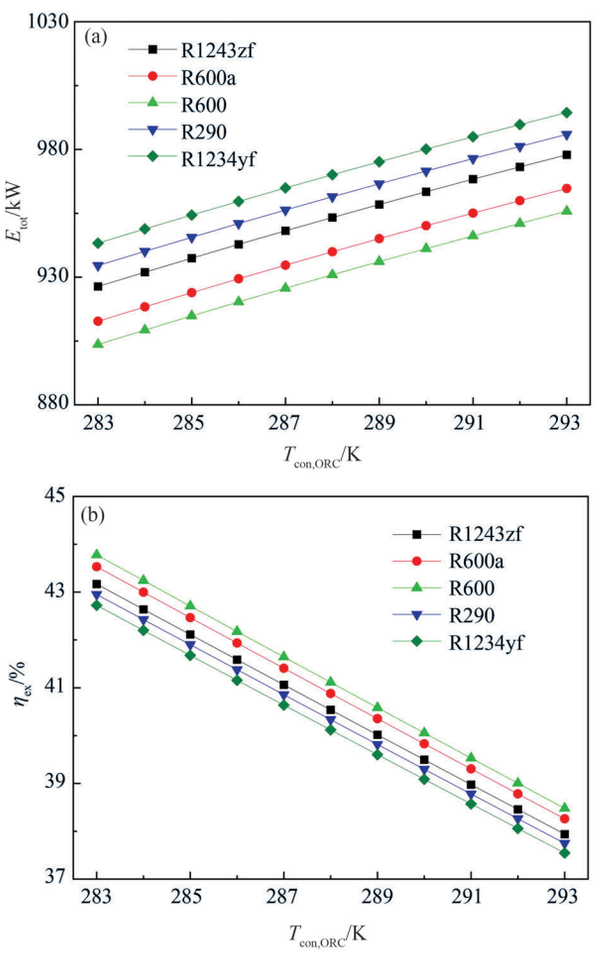


图 10 系统 E_{tot} 和 η_{ex} 随 $T_{con,ORC}$ 的变化

Fig. 10 Changes of system E_{tot} and η_{ex} with $T_{con,ORC}$

由图 10 可知,当 VCR 工质一定时,随着 $T_{con,ORC}$ 的升高,系统 E_{tot} 逐渐变大,而 η_{ex} 逐渐变

小.其原因在于,提高 $T_{con,ORC}$ 会减小系统 W_{net},而此时系统 E_{hs} 和 W_{com} 均保持不变,最终造成 E_{tot} 逐渐增大;结合式(14)分析,系统 η_{ex} 会随之减小.另外,在 $T_{con,ORC}$ 变化范围内,工质 R600 的系统 E_{tot} 最小,η_{ex} 最大,而不同 VCR 工质对应的系统 E_{tot} 和 η_{ex} 变化幅度基本相同.$T_{con,ORC}$ 每升高 1 K,系统 E_{tot} 平均增加 5.22 kW,而 η_{ex} 平均减小 0.53 个百分点.

3.5　敏感度分析

为了验证系统 η_{rt}、E_{tot} 和 η_{ex} 对热力学参数的敏感性,采用不同热力学参数对系统性能的导数比较其敏感程度.导数(De)表示两个无穷小量的比值,具体表达式为

$$De=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{15}$$

式中:dx 是热力学参数的微小变化;dy 是系统性能对应 dx 的变化幅度.

根据上述结果分析可知,在 4 种热力学参数变化范围内,工质 R600 的系统热力学性能较好,故选择工质 R600 作为参数敏感性分析的研究对象.基于系统 η_{rt}、E_{tot} 和 η_{ex} 的计算结果,不同热力学参数对应的系统性能平均导数如表 4 所列.以 $T_{sc,VCR}$ 为例,系统 η_{rt} 和 E_{tot} 导数的平均值为 0.808 和 4.75,这意味着 $T_{sc,VCR}$ 每升高 1 K,系统 η_{rt} 平均增加 0.808 个百分点,而系统 E_{tot} 平均减小4.75 kW.

表 4　不同热力学参数下系统性能敏感性分析

Table 4　Sensitivity analysis of system performance under various thermal parameters　　K

参数	η_{rt}		E_{tot}		η_{ex}	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
$T_{con,VCR}$	−4.557~−2.756	3.554	19.76~21.85	20.76	−0.579~−0.505	0.54
$T_{sc,VCR}$	0.817~0.799	0.808	−5.14~−4.38	4.75	0.131~0.118	0.124
$T_{eva,ORC}$	1.03~0.764	0.898	−25.04~−36.65	29.25	0.262~0.06	0.159
$T_{con,ORC}$	−1.434~−1.388	1.411	5.66~4.78	5.22	−0.536~−0.524	0.53

从表 4 中还可以看出,$T_{con,VCR}$ 对系统 η_{rt} 和 η_{ex} 的敏感度最高.对于系统 η_{rt} 而言,$T_{con,VCR}$ 对应的导数平均值为 3.554,这是 $T_{sc,VCR}$ 和 $T_{eva,ORC}$ 对应导数平均值的 4 倍多,也是 $T_{con,ORC}$ 对应导数平均值的 2 倍多.对于系统 η_{ex} 而言,$T_{con,VCR}$ 对应的导数平均值为 0.54,其次是 $T_{con,ORC}$(0.53)和 $T_{eva,ORC}$(0.159),而 $T_{sc,VCR}$ 对应的导数平均值最小,仅为 0.124.此外,$T_{eva,ORC}$ 对系统 E_{tot} 的敏感度最高,$T_{eva,ORC}$ 每升高1 K,系统 E_{tot} 平均减小29.25 kW,说明 $T_{eva,ORC}$ 的升高能够有效降低系统不可逆损失,但 $T_{eva,ORC}$ 对系统 η_{rt} 和 η_{ex} 的敏感度相对较小.$T_{eva,ORC}$ 对应的系统 E_{tot} 导数平均值为 29.25,其次是 $T_{con,VCR}$(20.76)和 $T_{con,ORC}$(5.22),而 $T_{sc,VCR}$ 对应的导数平均值最小,仅为 4.75.因此,对于储冷型 CB 系统,提高系统 η_{rt} 和 η_{ex} 应优先考虑降低 $T_{con,VCR}$,此时系统 E_{tot} 的下降幅度也较大.

4　结论

(1)对于给定的 VCR 工质,系统 η_{rt} 随 $T_{con,VCR}$ 和 $T_{con,ORC}$ 的升高而减小,随 $T_{sc,VCR}$ 和 $T_{eva,ORC}$ 的升高而增大.$T_{con,VCR}$ 和 $T_{con,ORC}$ 每升高1 K,系统 η_{rt} 分别平均减小3.55%和1.41%,而 $T_{sc,VCR}$ 和 $T_{eva,ORC}$ 每升高 1 K,系统 η_{rt} 分别平均增加0.81%和0.9%.当系统热力学参数一定时,系统 η_{rt} 从大到小的 VCR 工质排序为 R600,R600a,R1243zf,R290 和 R1234yf.

(2)系统 E_{tot} 随着 $T_{con,VCR}$ 和 $T_{con,ORC}$ 的升高而增大,随 $T_{sc,VCR}$ 和 $T_{eva,ORC}$ 的升高而减小.$T_{con,VCR}$ 和 $T_{con,ORC}$ 越低,$T_{sc,VCR}$ 和 $T_{eva,ORC}$ 越高,系统 η_{ex} 越大.$T_{con,VCR}$ 每升高 1 K,系统 E_{tot} 平均增加 20.8 kW,而系统 η_{ex} 平均减小 0.54 个百分点.$T_{eva,ORC}$ 每升高 1 K,系统 E_{tot} 平均减小 29.2 kW,而 η_{ex} 平均增加 0.16 个百分点.

(3)$T_{con,VCR}$ 对系统 η_{rt} 和 η_{ex} 的敏感度最高,对应的系统性能导数平均值分别为 3.554 和 1.411,其次是 $T_{con,ORC}$ 和 $T_{eva,ORC}$,$T_{sc,VCR}$ 的敏感度最小.$T_{eva,ORC}$ 对系统 E_{tot} 的敏感度最高,其次是 $T_{con,VCR}$ 和 $T_{con,ORC}$,$T_{sc,VCR}$ 的敏感度最小.对于储冷型 CB 系统,提高系统 η_{rt} 和 η_{ex} 应优先考虑降低 $T_{con,VCR}$,此时系统 E_{tot} 的下降幅度也较大.

(4)储冷型 CB 系统的核心创新是将原先储热型 CB 系统的能量逻辑从“高温储热、正向温差发电”转向“低温储冷、反向温差发电”,其最大价值在于以低成本、低技术风险的“降冷源”方式,大幅

提升ORC循环温差,突破储热型CB系统的热源温度与温差上限,同时高效利用低品位热源,拓展了CB系统在钢铁企业中的应用场景与经济性.

5 参考文献

[1] Loni R, Najafi G, Bellos E, et al. A review of industrial waste heat recovery system for power generation with organic Rankine cycle: recent challenges and future outlook [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125070.

[2] Lin Y C, Chong C H, Ma L W, et al. Quantification of waste heat potential in China: a top-down Societal Waste Heat Accounting Model[J]. Energy, 2022, 261: 125194.

[3] Yin R Y, Liu Z D, Shangguan F Q. Thoughts on the implementation path to a carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry [J]. Engineering, 2021, 7(12): 1680-1683.

[4] Zhang L, Na H M, Yuan Y X, et al. Integrated optimization for utilizing iron and steel industry's waste heat with urban heating based on exergy analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 295: 117593.

[5] Wang Y, Zhang D Y, Ji Q, et al. Regional renewable energy development in China: a multidimensional assessment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124: 109797.

[6] Liu L T, Zhai R R, Hu Y D. Performance evaluation of wind-solar-hydrogen system for renewable energy generation and green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic [J]. Energy, 2023, 276: 127386.

[7] Abdalla A N, Nazir M S, Tao H, et al. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102811.

[8] Zhao C Y, Yan J, Tian X K, et al. Progress in thermal energy storage technologies for achieving carbon neutrality[J]. Carbon Neutrality, 2023, 2(1): 10.

[9] 冯军胜,严亚茹,赵亮,等. 基于有机朗肯循环的卡诺电池热储能系统性能分析[J]. 储能科学与技术,2024,13(11):3930-3938.
(Feng Junsheng, Yan Yaru, Zhao Liang, et al. Performance analysis of a Carnot battery thermal energy storage system based on organic Rankine cycle [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3930-3938.) [万方]

[10] Li W, Wang S Y, Xu S G, et al. An intensive review of ORC-based pumped thermal energy storage [J]. Energy, 2025, 330: 136792.

[11] Steinmann W D. The CHEST (compressed heat energy storage) concept for facility scale thermo mechanical energy storage[J]. Energy, 2014, 69: 543-552.

[12] 赵永亮,王朝阳,刘明,等. 基于跨临界循环的卡诺电池储能系统构型优化[J]. 工程热物理学报,2021,42(7):1659-1666.
(Zhao Yongliang, Wang Chaoyang, Liu Ming, et al. Configuration optimization of Carnot battery energy storage system based on transcritical cycles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(7): 1659-1666.)

[13] Frate G F, Antonelli M, Desideri U. A novel pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 1051-1058.

[14] 林小杰,徐家豪,孙鹏,等. 基于相变材料的蒸汽卡诺电池热力学循环设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(1):161-168.
(Lin Xiaojie, Xu Jiahao, Sun Peng, et al. Thermodynamic cycle design of steam Carnot battery based on phase change material [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(1): 161-168.)

[15] 卢沛,王晋,陈锴煌,等. 新型全时段耦合余热的卡诺电池系统构建及热-经济性评估[J]. 工程热物理学报,2023,44(11):3084-3090.
(Lu Pei, Wang Jin, Chen Kaihuang, et al. Thermo-economic evaluation of a novel Carnot battery with thermal integration during charging and discharging process [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(11): 3084-3090.)

[16] 张宇,李敏霞,李君,等. 面向数据中心液冷装置余热回收的卡诺电池储能系统可行性分析[J]. 储能科学与技术,2024,13(11):3921-3929.
(Zhang Yu, Li Minxia, Li Jun, et al. Feasibility analysis of a Carnot battery energy storage system for waste heat recovery of liquid cooling units in data centers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3921-3929.)

[17] Bellos E, Tzivanidis C, Said Z. Investigation and optimization of a solar-assisted pumped thermal energy storage system with flat plate collectors [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 237: 114137.

[18] 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):1461-1470.
(Yu Boxu, Han Rui, Liu Qian, 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): 1461-1470.)

[19] 黄正杰,罗向龙,梁颖宗,等. 基于填充床相变蓄热器的卡诺电池系统特性研究[J]. 工程热物理学报,2025,46(4):1034-1040.
(Huang Zhengjie, Luo Xianglong, Liang Yingzong, et al. Study on the characteristics of a Carnot battery based on a packed bed latent heat storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(4): 1034-1040.)

[20] Zhang M Y, Shi L F, Hu P, et al. Carnot battery system integrated with low-grade waste heat recovery: toward high energy storage efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106234.

[21] 冯军胜,严亚茹,王璐,等. 耦合低温余热回收的热泵储电系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术,2024,13(12):4384-4395.
(Feng Junsheng, Yan Yaru, Wang Lu, et al. Thermodynamic performance study of a pumped thermal energy storage system coupled with low-temperature waste heat recovery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4384-4395.)

[22] Iqbal Q, Fang S, Zhao Y, et al. Thermo-economic assessment of sub-ambient temperature pumped-thermal electricity storage integrated with external heat sources [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 285: 116987.

(下转第493页)

on the removal technologies of Zn and Sn elements from scrap steel[J]. Special Steel,2025,46(6):43-53.)

[5] 韩伟刚,郦秀萍,张春霞,等. 铁水包空包加盖保温效果[J]. 钢铁,2015,50(12):91-94.
(Han Weigang, Li Xiuping, Zhang Chunxia, et al. Heat preservation of hot metal ladle by capping[J]. Iron & Steel, 2015,50(12):91-94.)

[6] 魏薇. 优化转炉炼钢炉料结构的几点思考[J]. 世界钢铁,2014,14(1):6-8.
(Wei Wei. Study on the optimization of burden structure for BOF steelmaking[J]. World Iron & Steel,2014,14(1):6-8.)

[7] Gao F,Wang Z D ,Bao P Y,et al. Research on the Precise Addition of Scrap Steel Based on Molten Iron Conditions During the Converter Smelting Process [J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2024,10(4):1-16.

[8] 蔡昌旺,李天学. 鱼雷罐内加废钢对耐材影响分析[J]. 甘肃冶金,2024,46(1):25-28.
(Cai Changwang, Li Tianxue. Analysis of influence of scrap steel in torpedo tank on resistant materials [J]. Gansu Metallurgy,2024,46(1):25-28.)

[9] 伍洋,谭方关,李亚伟,等. 铁水包底砌筑结构对应力分布的影响[J]. 钢铁研究学报,2023,35(7):801-810.
(Wu Yang, Tan Fangguan, Li Yawei, et al. Influence of masonry structure at bottom of hot metal ladle on stress distribution[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(7):801-810.)

[10] 徐国涛,赵元,吴杰,等. 加废钢条件下铁水包的异常侵蚀与用材问题探讨[J]. 耐火材料,2022,56(1):56-60.
(Xu Guotao, Zhao Yuan, Wu Jie, et al. Discussion on abnormal corrosion and material selection of hot iron ladles with steel scrap addition[J]. Refractories,2022,56(1):56-60.)

[11] Tahmasebi P. A state-of-the-art review of experimental and computational studies of granular materials: Properties, advances, challenges, and future directions [J]. Progress in Materials Science,2023,138:101157.

[12] Ueda S, Natsui S, Fan Z Y, et al. Influences of physical properties of particle in discrete element method on descending phenomena and stress distribution in blast furnace [J]. ISIJ International,2010,50(7):981-986.

[13] Wang L G,Ge R H,Chen X Z. Establishing an oblique impact breakage master curve using a DEM bonded contact model[J]. Computers and Geotechnics,2022,145:104668.

[14] 杨鑫康,赖徐强. 基于 EDEM 的新型溜井落矿轨迹及受力特征分析研究[J]. 黄金,2025,46(11):23-28.
(Yang Xinkang, Lai Xuqiang. Analysis of ore trajectory and force characteristics in new ore passes based on EDEM[J]. Gold,2025,46(11):23-28.)

[15] 吕坤. 高炉炉型与炉料结构适应性离散元模拟[D]. 沈阳:东北大学,2021.
(Lü Kun. EDM simulation of adaptability between blast furnace profile and burden structure [D]. Shenyang: Northeastern University,2021.)

[16] Mitra T, Saxén H. Simulation of burden distribution and charging in an ironmaking blast furnace [J]. IFAC-PapersOnLine,2015,48(17):183-188.

[17] Georgakopoulos E, Hosseini A, Kerry T, et al. Experimental and discrete element method analysis of galvanized steel scrap particles along and after an inclined chute[J]. Steel Research International,2022,93(8):2200075.

(上接第 484 页)

[23] Wu D,Ma B,Zhang J,et al. Working fluid pair selection of thermally integrated pumped thermal electricity storage system for waste heat recovery and energy storage [J]. Applied Energy,2024,371:123693.

[24] Qiao H N, Yang B, Yu X H. Development of an efficient cross-scale model for working fluid selection of Rankine-based Carnot battery based on group contribution method [J]. Renewable Energy, 2025, 238: 121961.

[25] Xia R,Wang Z,Cao M L,et al. Comprehensive performance analysis of cold storage Rankine Carnot batteries: energy, exergy,economic,and environmental perspectives[J]. Energy Conversion and Management,2023,293:117485.

[26] 冯军胜,王欢欢,王海涛,等. 热源温度对亚临界 ORC 系统热经济性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(12):4866-4875.
(Feng Junsheng, Wang Huanhuan, Wang Haitao, et al. Effect of heat source temperature on thermal-economic performance of subcritical ORC system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53 (12): 4866-4875.)