节能环保与综合利用

烧结冷却烟气低温余热 ORC 系统建模与热经济性能

冯军胜[1]，程新妮[1]，王欢欢[1]，赵 亮[2]，董 辉[2]
（1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院，安徽 合肥 230601；2. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819）

摘要：本文以烧结冷却烟气低温余热为有机朗肯循环（organic Rankine cycle，ORC）系统热源，建立超临界 ORC 系统热力和经济模型，并选取 R134a 为 ORC 工质，研究变温热源下膨胀机的进口温度和压力，以及工质冷凝温度对系统热经济性能的影响。研究结果表明：系统净输出功随膨胀机进口温度的增加而增加，随膨胀机进口压力和工质冷凝温度的增加而减小，但系统单位温度的传热量随之均减小。当系统热力参数一定时，热源进口温度越大，系统净输出功和单位温度的传热量越大。在实际操作过程中，存在适宜的热源进口温度和系统热力参数使得 ORC 系统获得较大的净输出功和较小的单位温度传热量。

关键词：烧结矿；余热回收；有机朗肯循环；净输出功；单位温度传热量
中图分类号：TF046.4；TK11^{+}5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2024)01－0093－06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.013

Modeling and thermal economic performance of low-temperature waste heat ORC system for sintering cooling fume

FENG Junsheng[1], CHENG Xinni[1], WANG Huanhuan[1], ZHAO Liang[2], DONG Hui[2]
(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;
2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The low-temperature waste heat of sintering cooling fume is used as the heat source of the organic Rankine cycle (ORC) system, the heat and economic model of the supercritical ORC system is established, and R134a is selected as the ORC working substance to study the influence of the inlet temperature and the pressure of the expander under the variable temperature heat source, as well as the condensing temperature of the working substance on the thermal economic performance of the system. The results show that the net output work of the system increases with the increase of the inlet temperature of the expander, and decreases with the increase of the inlet pressure of the expander and the condensing temperature of the working substance, but the heat transfer per unit temperature of the system decreases. When the thermal parameters of the system are constant, the larger the inlet temperature of the heat source, the greater the net output work of the system and the heat transfer per unit temperature will be. In the actual operation process, there are suitable heat source inlet temperature and thermal parameters of the system, so that the ORC system can obtain a larger net output work and a smaller heat transfer per unit temperature.

Key words: sinter; waste heat recovery; organic Rankine cycle (ORC); net output work; heat transfer per unit temperature

收稿日期：2022－09－01；**修回日期**：2023－01－10
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51974087）；安徽省高校自然科学研究项目（2022AH050262）；安徽建筑大学科研基金项目（2020QDZ02）
作者简介：冯军胜（1988—），男，副教授，从事烧结余热回收利用、新型热力循环等方面的研究。
通信作者：董 辉（1969—），男，教授，从事烧结余热回收利用方面的研究。

伴随着污染物和温室气体的排放，化石能源的使用给环境保护带来了巨大挑战。在国家提出“双碳”战略的背景下，工业生产过程中余热资源的高效回收利用是实现碳达峰、碳中和目标的重要路径。我国钢铁行业存在着大量烧结低温余热资源，但由于回收利用难度大，绝大部分被放散，造成能源浪费和环境污染[1]。目前，加强对低品位余热的回收利用也已作为提高能源利用效率的关键措施之一被纳入我国《“十四五”工业绿色发展规划》中。因此，钢铁行业烧结低温余热资源的高效回收利用对降低钢铁企业生产工序能源消耗和促进钢铁工业绿色发展都具有十分重要的现实意义[2]。

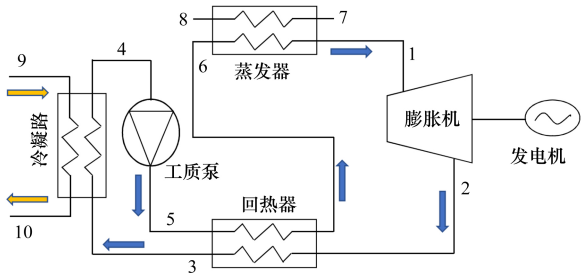
有机朗肯循环(organic Rankine cycle，ORC)系统可有效回收利用工业领域的低温余热资源[3]，其循环工质是有机流体，具有低沸点和高饱和蒸汽压力的热力特性，即使在热源温度低于 100 ℃时也可以正常运行，完成较低品位余热向高品质电能的转换。近年来，工业领域中针对低温余热 ORC 系统开展了大量研究，主要集中在工质筛选、系统性能分析以及系统循环过程优化等方面。其中，王建永等[4]以 90～150 ℃地热能作为 ORC 系统热源，研究了不同工质下系统的循环性能，并认为 R245fa 工质的系统净输出功最大；ZINSALO 等[5]以最小投资成本和最大㶲效率为目标对 20 种 ORC 系统循环工质进行优选，并认为 R1233zd(E)是系统最佳循环工质；JAVANSHIR 等[6]采用干工质为 ORC 工质，研究了带内回热器的 ORC 系统的热力性能，发现增加内回热器数量能有效提高系统的热效率；WU 等[7]以 120 ℃热风余热作为 ORC 系统热源，分析了不同混合工质对系统热效率的影响；WANG 等[8]建立了一种 ORC 系统热力学模型，并采用综合评分法获得了评价系统热力性能和经济性能的综合指标，同时对系统运行参数进行利润优化分析。

综上可知，热源流体的物性参数及进出口温度的变化对 ORC 系统运行性能影响很大，这使得已有 ORC 研究结果的应用具有一定的局限性。目前，针对烧结冷却烟气低温余热 ORC 的研究较少，仅有的研究主要对亚临界 ORC 系统的可行性和热力性能进行分析[9-10]，涉及 ORC 系统热经济性能的研究尚无。基于此，根据烧结冷却烟气不具有露点腐蚀的特点，本文以钢铁行业烧结环冷机末段出口冷却烟气低温余热作为 ORC 系统热源，建立超临界回热式 ORC 系统的热力模型和经济模型，分析变温热源下系统的净输出功和单位温度传热量的变化规律，进而讨论不同热力循环参数对 ORC 系统热经济性能的影响，为采用 ORC 技术深度回收利用烧结冷却烟气低温余热资源奠定理论基础，同时为钢铁行业烟气低温余热资源的高效回收利用提供新途径。

1 ORC 系统模型的建立

1.1 系统原理

烧结烟气低温余热 ORC 发电系统原理如图 1 所示。由图 1 可知，循环的烟气余热来自钢铁行业环冷机末段烧结矿的冷却过程，其在蒸发器中将热量传递给工质后直接排空。余热发电系统由蒸发器、膨胀机、回热器、冷凝器和工质泵等 5 个设备组成。其中，在系统中增加回热器是为了回收部分膨胀机排汽余热，减小单位质量工质在蒸发器内换热量，进而增加系统循环热效率[11]。



状态点：1—蒸发器内工质出口；2—膨胀机内工质出口；3—冷凝器内工质进口；4—冷凝器内工质出口；5—工质泵内工质出口；6—蒸发器内工质进口；7—烟气进口；8—烟气出口；9—冷却水进口；10—冷却水出口。

图 1 有机朗肯循环系统原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of ORC system

图 2 为超临界状态下 ORC 循环的温熵(*T-S*)图。由图 2 可知，ORC 循环由定压加热过程(7～1)、绝热膨胀过程(1～2)、定压冷却过程(3～5)、绝热加压过程(5～6)和回热过程(6～7)等 5 个热力过程组成。此外，过程(1～2s)为工质

在膨胀机内的等熵膨胀过程，过程(5～6s)为工质在工质泵内的等熵压缩过程。

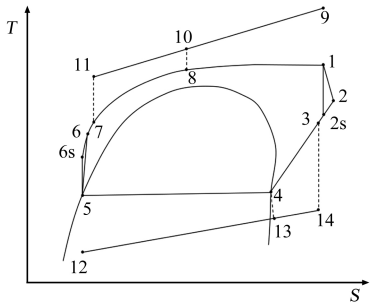


图 2　有机朗肯循环 *T-S* 图

Fig. 2　*T-S* diagram of ORC system

1.2　ORC 数学模型

根据热力学第一定律可知，工质和烟气在蒸发器内的换热量(热功)为

$$Q = m_g c_p (T_9 - T_{11}) = m_f (h_1 - h_7) \tag{1}$$

式中：Q 为工质和烟气在蒸发器内的换热量，kW；m_g为烟气的质量流量，kg/s；c_p 为烟气的定压比热容，J/(kg·K)；T_9 和 T_{11}分别为烟气在状态点 9 和 11 处的温度，K；m_f为工质的质量流量，kg/s；h_1 和 h_7 分别为工质在状态点 1 和 7 处的比焓，kJ/kg。

在过程 1～2 中，膨胀机对外做功(W_t，kW)为

$$W_t = m_f (h_1 - h_{2s}) \eta_t \tag{2}$$

其中：

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \tag{3}$$

式中：h_i(i 为图 2 中 1～14 以及 2s、6s 状态点)为工质在状态点 i 处的比焓，kJ/kg；η_t 为膨胀机的等熵效率。

在过程 3～5 中，冷凝器的换热量(Q_c，kW)为

$$Q_c = m_f (h_3 - h_5) \tag{4}$$

在过程 5～6 中，工质泵消耗的功(W_p，kW)为

$$W_p = m_f (h_{6s} - h_5) / \eta_p \tag{5}$$

其中：

$$\eta_p = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} \tag{6}$$

式中：η_p 为工质泵的等熵效率。

在过程 6－7 中，回热器的换热量(Q_r，kW)和回热度(ε)分别为

$$Q_r = m_f (h_7 - h_6) \tag{7}$$

$$\varepsilon = \frac{h_7 - h_6}{h_{7s} - h_6} \tag{8}$$

式中：h_{7s}为状态点 7 与状态点 2 温度相同时对应的工质焓值，kJ/kg。

在过程 7～1 中，蒸发器内的吸热量(Q_e，kW)为

$$Q_e = m_f (h_1 - h_7) \tag{9}$$

根据热力学第一定律可知，系统净输出功(W_{net}，kW)为

$$W_{net} = W_t - W_p \tag{10}$$

蒸发器内单位温度传热量($Q_{UA,e}$，kW/K)为

$$Q_{UA,e} = \frac{Q_e}{\Delta T_{7\sim1}} \tag{11}$$

式中：$\Delta T_{7\sim1}$为定压加热过程(7～1)的对数平均温差，K。

冷凝器内单位温度传热量($Q_{UA,c}$，kW/K)为

$$Q_{UA,c} = \frac{Q_{3\sim4}}{\Delta T_{3\sim4}} + \frac{Q_{4\sim5}}{\Delta T_{4\sim5}} = \frac{m_f (h_3 - h_4)}{\Delta T_{3\sim4}} + \frac{m_f (h_4 - h_5)}{\Delta T_{4\sim5}} \tag{12}$$

式中：$\Delta T_{3\sim4}$和 $\Delta T_{4\sim5}$为过程(3～4)和过程(4～5)的对数平均温差，K；$Q_{3\sim4}$和 $Q_{4\sim5}$为过程(3～4)和过程(4～5)的换热量，kW。

回热器内单位温度传热量($Q_{UA,r}$，kW/K)为

$$Q_{UA,r} = \frac{Q_r}{\Delta T_{6\sim7}} \tag{13}$$

系统总的单位温度传热量(Q_{UA}，kW/K)为

$$Q_{UA} = Q_{UA,e} + Q_{UA,c} + Q_{UA,r} \tag{14}$$

2　计算结果与讨论

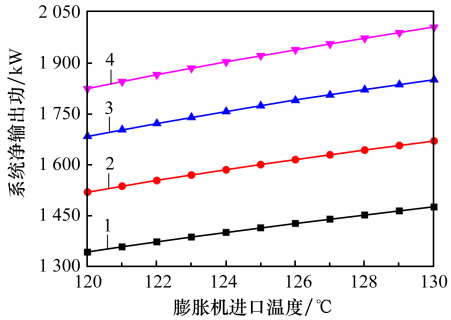
本文以钢铁行业烧结环冷机四段出口冷却烟气的低温余热作为超临界回热式 ORC 系统的热源，根据工质物性随温度和压力的变化，采用 Matlab 软件和物性查询软件 Refprop9.0 对上述模型进行求解。基于循环有机工质应具有良好的热物性、安全性和环保性等特点[12]，选取 R134a(临界温度为 101.1 ℃，临界压力为 4.06 MPa)作为系统循环工质，研究变热源温度下膨胀机进口温度

和压力，以及工作冷凝温度对系统净输出功和单位温度传热量的影响。ORC 系统的初始计算参数如表 1 所示。

2.1 膨胀机进口温度的影响

在膨胀机进口压力为 4.5 MPa，冷凝温度为 30 ℃时，膨胀机进口温度对系统净输出功的影响如图 3 所示。由图 3 可见，当热源进口温度一定时，随着膨胀机进口温度的增加，系统净输出功逐渐增加。这是因为，膨胀机进口温度的增加使得膨胀机内单位工质的做功能力增加，虽然循环工质质量流量会有所下降，但单位工质做功能力的增加幅度要大于工质质量流量减小的幅度，导致系统净输出功增加。以热源进口温度 150 ℃为例，膨胀机进口温度在 120 ~ 130 ℃范围内每增加 1 ℃，系统净输出功平均增加 15.1 kW。

由图 3 还可以看出，当膨胀机进口温度一定时，热源进口温度越高，系统净输出功越大。这是因为，热源进口温度的增加会使得蒸发器内烟气与工质换热温差增大，换热强度也会随之增大，由于蒸发器内单位工质吸热量不变，故而工质质量流量会随之增加，导致系统净输出功增加。以膨胀机进口温度为 125 ℃为例，热源进口温度在 145 ~ 160 ℃范围内每增加 5 ℃，系统净输出功平均增加 169.1 kW。

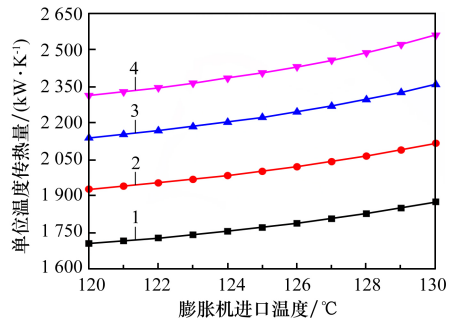


温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

图 3 膨胀机进口温度对系统净输出功的影响

Fig. 3 Effect of expander inlet temperature on the system net output power

图 4 为膨胀机进口温度对系统单位温度传热量的影响。由图 4 可知，当热源进口温度一定时，随着膨胀机进口温度的增加，系统单位温度传热量逐渐增加。这是因为，由于蒸发器内烟气和工质的换热温差减小，导致蒸发器内单位温度传热量增加，虽然工质质量流量的减小会使得冷凝器和回热器的换热量有所下降，但二者之间的单位温度传热量之和的下降幅度较小，低于蒸发器内单位温度传热量的增加幅度，故而系统单位温度传热量逐渐增加。以热源进口温度为 150 ℃为例，膨胀机进口温度在 120 ~ 130 ℃范围内每增加1 ℃，系统单位温度传热量平均增加 18.9 kW/K。



温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

图 4 膨胀机进口温度对系统单位温度传热量的影响

Fig. 4 Effect of expander inlet temperature on the system heat transfer quantity per unit temperature

由图 4 还可以看出，当膨胀机进口温度一定时，随着热源进口温度的增加，系统单位温度传热量逐渐增加，并且增加幅度逐渐减小。这是因为，由于蒸发器窄点的温差一定，热源进口温度的增加会导致蒸发器出口烟气温度的降低，蒸发器内换热的对数平均温差减小，故而蒸发器内单位温度传热量增加。由于工质质量流量的增加，冷凝器和回热器内换热量增加，其单位温度传热量也会随之增加。另外，受到蒸发器窄点温差的限制，蒸发器出口烟气温度下降幅度逐渐减小，导致工质质量流量增加幅度也较小，故而系统单位温度传热量增加幅度逐渐减小。以膨胀机进口

表 1 初始计算参数设定值

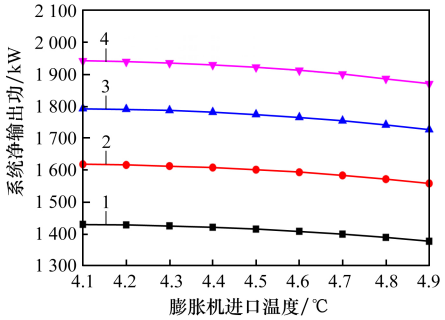
Table 1 Settings of initial calculation parameters

烧结冷却烟气流量/(kg·s^{-1})	烧结冷却烟气温度/℃	冷却水进口温度/℃	工质泵等熵效率	膨胀机等熵效率	回热器回热度	蒸发器窄点温差/℃	冷凝器节点温差/℃	环境温度/℃
136	145 ~ 160	20	0.8	0.85	0.6	10	5	20

温度为 125 ℃为例，热源进口温度在 145 ~ 160 ℃范围内每增加 5 ℃，系统单位温度传热量分别增加 231. 1、222. 2 kW/K 和 183. 1kW/K。

2. 2　膨胀机进口压力的影响

在膨胀机进口温度为 125 ℃，冷凝温度为 30 ℃时，膨胀机进口压力对系统净输出功的影响如图 5 所示。由图 5 可知，当热源进口温度一定时，系统净输出功随膨胀机进口压力的增加而逐渐减小。这是因为，膨胀机进口压力的增加使得工质泵的功耗增加，由于膨胀机对外做功变化很小，导致系统净输出功减小。以热源进口温度 155 ℃为例，膨胀机进口压力在 4. 1 ~ 4. 9 MPa 范围内每增加 0. 1 MPa，系统净输出功平均减小 8. 3 kW。



温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

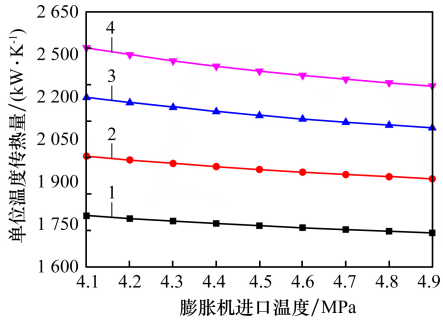
图 5　膨胀机进口压力对系统净输出功的影响

Fig. 5　Effect of expander inlet pressure on the system net output power

膨胀机进口压力对系统单位温度传热量的影响如图 6 所示。由图 6 可知，当热源进口温度一定时，系统单位温度传热量随膨胀机进口压力的增加而逐渐减小。这是因为，由于蒸发器内烟气和工质的换热温差增加，导致蒸发器内单位温度传热量减小。另外，回热器进口工质温度增加和出口工质减小导致回热器换热量减小，回热器内单位温度传热量也会减小，故而系统单位温度传热量逐渐减小。以热源进口温度为 155 ℃为例，膨胀机进口压力在 4. 1 ~ 4. 9 MPa 范围内每增加0. 1 MPa，系统单位温度传热量平均减小 15. 6 kW/K。

2. 3　工质冷凝温度的影响

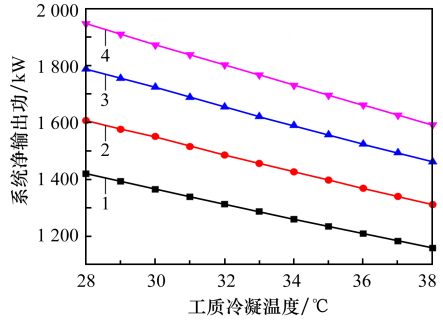
在膨胀机进口温度和压力分别为 125 ℃和 4. 5 MPa时，工质冷凝温度对系统净输出功的影响如图 7 所示。由图 7 可见，当热源进口温度一定时，系统净输出功随工质冷凝温度的增加而逐渐减小。这是因为，工质冷凝温度的增加会导致膨胀机对外做功减小，系统净输出功也随之减小。以热源进口温度为 160 ℃为例，工质冷凝温度在 28 ~ 38 ℃范围内每增加 1 ℃，系统净输出功平均减小 35. 5 kW。



温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

图 6　膨胀机进口压力对系统单位温度传热量的影响

Fig. 6　Effect of expander inlet pressure on the system heat transfer quantity per unit temperature

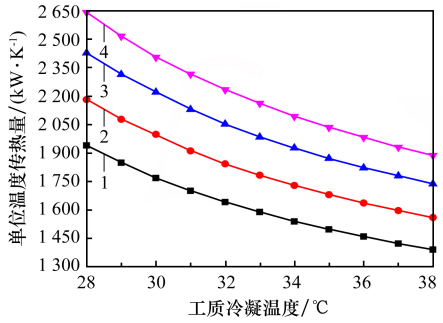


温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

图 7　工质冷凝温度对系统净输出功的影响

Fig. 7　Effect of condensing temperature of working medium on the system net output power

图 8 为工质冷凝温度对系统单位温度传热量的影响。由图 8 可知，当热源进口温度一定时，系统单位温度传热量随工质冷凝温度的增加而逐渐减小。这是因为，由于工质质量流量基本不变，工质冷凝温度的增加会使得工质在蒸发器和冷凝器内的换热量减小，以冷凝器内换热温差增加，导致蒸发器和冷凝器内单位温度传热量大幅减小，故而系统单位温度传热量会逐渐减小。以热源进口温度为 160 ℃为例，工质冷凝温度在 28 ~ 38 ℃范围内每增加 1 ℃，系统单位温度传热量平均减小 75. 4 kW/K。



温度(T_9)/℃：1—145；2—150；3—155；4—160。

图 8 工质冷凝温度对系统单位温度传热量的影响

Fig. 8 Effect of condensing temperature of working medium on the system heat transfer quantity per unit temperature

3 结 论

（1）当热源进口温度一定时，系统净输出功和单位温度传热量随膨胀机进口温度的增加而增加，但随膨胀机进口压力和工质冷凝温度的增加而逐渐减小。在实际操作过程中，存在适宜的膨胀机进口温度和压力，以及工质冷凝温度使得 ORC 系统综合性能（热力性能和经济性能）较好，即系统获得较大的系统净输出功和较小的系统单位温度传热量。

（2）当 ORC 循环工质热力参数一定时，热源进口温度越大，系统净输出功和单位温度传热量均越大。在实际操作过程中，存在某一热源进口温度也会使得系统综合性能较好。

（3）采用 ORC 能够有效回收烧结冷却烟气低温余热，为烧结矿余热资源的高效回收及梯级利用指明了方向。此外，本研究成果可为烧结冷却烟气低温余热 ORC 系统的参数优化和设计运行提供理论支持和数据参考。

参考文献：

[1] 董辉，王爱华，冯军胜，等. 烧结过程余热资源回收利用技术进步与展望[J]. 钢铁，2014，49(9)：1－9.
DONG Hui, WANG Aihua, FENG Junsheng, et al. Progress and prospect in sintering waste heat resource recovery and utilization technology[J]. Iron and Steel, 2014, 49(9): 1－9.

[2] 王国遥. 烧结环冷烟气余热梯级利用技术的探索[J]. 烧结球团，2018，43(2)：72－77.
WANG Guoyao. Exploration of gradient utilization technology of waste heat in sintering flue gas of circular cooler[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2): 72－77.

[3] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报，2016，61(17)：1856－1857.
HE Yaling. Research on the major common basic problems of the efficient and comprehensive utilization of industrial waste heat[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(17): 1856－1857.

[4] 王建永，王江峰，王红阳，等. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. 工程热物理学报，2017，38(1)：13－19.
WANG Jianyong, WANG Jiangfeng, WANG Hongyang, et al. Working fluid selection of organic Rankine cycle geothermal power generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 13－19.

[5] ZINSALO J M, LAMARCHE L, RAYMOND J. Performance analysis and working fluid selection of an organic Rankine cycle power plant coupled to an enhanced geothermal system[J]. Energy, 2022, 245: 123259.

[6] JAVANSHIR A, SARUNAC N, RAZZAGHPANAH Z. Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 852－864.

[7] WU Y D, ZHU Y D, YU L J. Thermal and economic performance analysis of zeotropic mixtures for organic Rankine cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 57－63.

[8] WANG X, LIU X M, ZHANG C H. Parametric optimization and range analysis of organic Rankine cycle for binary-cycle geothermal plant[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 256－265.

[9] 邵颖聪，董辉，孙用军，等. 有机朗肯循环回收低温烧结余热发电的可行性分析[J]. 烧结球团，2014，39(4)：50－54.
SHAO Yingcong, DONG Hui, SUN Yongjun, et al. Feasibility analysis on recovering low temperature sintering waste heat for power generation by using organic Rankine cycle[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(4): 50－54.

[10] 张九磊，赵亮，董辉. 一种烧结余热复合循环发电系统的构建与分析[J]. 烧结球团，2019，44(6)：68－73；78.

（下转第 105 页）

48(8):69 – 81.
LIU Xuan, LI Jun, SHI Bo, et al. Leakage bag detection technology of bag filter based on phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2019,48(8):69 – 81.

[4] 郑金达. 基于粉尘颗粒相检测的滤袋破损状态高灵敏度辨识[D]. 天津:河北工业大学,2018.
ZHENG Jinda. High-sensitivity identification of the damage status of filter bag based on dust particle phase detection[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.

[5] 李旭东,张建明,谢志鹏,等. 基于三尺度嵌套残差结构的交通标志快速检测算法[J]. 计算机研究与发展,2020,57(5):1022 – 1036.
LI Xudong, ZHANG Jianming, XIE Zhipeng, et al. A fast traffic sign detection algorithm based on three-scale nested residual structures[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020,57(5):1022 – 1036.

[6] 王月明,李世翔,翟容清,等. 基于 YOLOv3 算法的烧结厂台车箅条缺失检测研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):30 – 34;53.
WANG Yueming, LI Shixiang, ZHAI Rongqing, et al. Research on detection of missing trolley grate bars in sintering plant based on YOLOv3 algorithm[J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(5):30 – 34;53.

[7] 房良睿,王月明,李真如,等. 基于 YOLOv3 算法的链箅机台车车轮故障检测系统[J]. 烧结球团,2021,46(1):76 – 82.
FANG Liangrui, WANG Yueming, LI Zhenru, et al. Fault detection system for the trolley wheel of chain grate based on YOLOv3 algorithm[J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(1):76 – 82.

[8] 肖成勇,李擎,王莉,等. 基于 CBAM-Unet 的铁矿球团边缘分割实验方法[J]. 烧结球团,2022,47(2):8 – 15;23.
XIAO Chengyong, LI Qing, WANG Li, et al. Edge segmentation experimental method of iron ore pellets based on CBAM-Unet[J]. Sintering and Pelletizing, 2022,47(2):8 – 15;23.

[9] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//Proc of the 27th IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE,2014:580 – 587.

[10] TARG S, ALMEIDA D, LYMAN K. Resnet in resnet: Generalizing residual architectures[Z/OL]. arXiv, (2016 – 03 – 25)[2016 – 03 – 25]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.08029.

[11] LIN T Y, DOLLáR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017:2117 – 2125.

[12] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector[C/OL]//LEIBE B, MATAS J, SEBE N, et al. ECCV 2016: Computer Vision. Springer, Cham,2016(9905):21 – 37. https://doi.org/10.1007/978 – 3 – 319 – 46448 – 0_2.

[13] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An incremental improvement[Z/OL]. arXiv,(2018 – 04 – 08)[2018 – 04 – 08]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767.

[14] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[Z/OL]. arXiv,(2017 – 08 – 07)[2018 – 02 – 07]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.02002.

(上接第 98 页)

ZHANG Jiulei, ZHAO Liang, DONG Hui. Construction and analysis of compound cyclic power generation system of sintering waste heat[J]. Sintering and Pelletizing, 2019,44(6):68 – 73;78.

[11] JAVANSHIR A, SARUNAC N, RAZZAGHPANAH Z. Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids[J]. Applied Thermal Engineering,2017,123:852 – 864.

[12] WANG E H, ZHANG H G, FAN B Y, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle(ORC) for engine waste heat recovery[J]. Energy,2011,36(5):3406 – 3418.