doi:10.12068/j.issn.1005－3026.2026.20250126

数据与机理融合的高炉多目标优化模型

钟再锡[1]，王 圣[1]，李琪琪[1]，张 琦[1,2,3]

（1.东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；2.东北大学 低碳钢铁前沿技术教育部工程研究中心，辽宁 沈阳 110819；3.东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：高炉炼铁工序是中国钢铁行业节能降碳的关键环节.然而,庞大的操作参数和复杂的黑箱冶炼机理为高炉操作优化带来了巨大挑战.为此,以某钢厂4 700 m³高炉为研究对象,基于数据与机理融合驱动的高炉仿真模型,构建了以高炉炼铁工序能耗和碳排放最小化为目标的多目标优化模型,并采用粒子群优化算法与帕累托前沿方法对其进行求解,从而评估该高炉在实际运行条件下的极限能耗与碳排放水平.结果表明,优化后吨铁水烟气、高炉渣和煤气的余热发生量分别下降了20.76,17.22和8.71 MJ.此外,热风炉热效率提升了4.23%.最终,优化后的高炉炼铁工序吨铁水能耗及其碳排放分别降至370.77 kg标煤和624.46 kg,相较于基准工况分别降低了7.80 kg标煤和24.94 kg.

关 键 词：高炉;工艺参数优化;数据与机理结合;能耗;碳排放;多目标优化

中图分类号：TF 04 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)06-0054-07

Multi-objective Optimization Model for Blast Furnace Based on Data and Mechanism Integration

ZHONG Zai-xi[1], *WANG Sheng*[1], *LI Qi-qi*[1], *ZHANG Qi*[1,2,3]

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Frontier Technologies of Low-Carbon Steelmaking, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Qi, E-mail: zhangqi@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The blast furnace ironmaking process is a crucial stage for energy conservation and carbon emission reduction in China's steel industry. However, the massive operating parameters and complex black-box smelting mechanisms pose significant challenges to the operation optimization of blast furnaces. To this end, a 4 700 m³ blast furnace in a steel plant was taken as the research object. Based on a blast furnace simulation model driven by the integration of data and mechanisms, a multi-objective optimization model aiming at minimizing the energy consumption and carbon emission of the blast furnace ironmaking process was constructed. Then, the model was solved by the particle swarm optimization algorithm and the Pareto front method to evaluate the limit levels of energy consumption and carbon emission of the blast furnace under actual operating conditions. The results indicate that after optimization, the waste heat generation amounts of flue gas, slag, and blast furnace gas per ton of hot metal decrease by 20.76, 17.22, and 8.71 MJ, respectively. In addition, the thermal efficiency of the hot blast stove increases by 4.23%. Ultimately, the energy consumption and carbon emission per ton of hot metal of the optimized blast furnace ironmaking process are reduced to 370.77 kgce and 624.46 kg, respectively, representing decreases of 7.80 kgce and 24.94 kg compared with the baseline conditions, respectively.

Key words: blast furnace; process parameter optimization; data and mechanism integration; energy consumption; carbon emission; multi-objective optimization

收稿日期：2025-10-29

基金项目：国家科技重大专项(2025ZD1602400)；国家自然科学基金资助项目(52474435)；宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202307).

作者简介：钟再锡(1995—),男,广东河源人,东北大学博士研究生.

通信作者：张 琦,E-mail:zhangqi@mail.neu.edu.cn.

我国是世界钢铁大国.2024年，粗钢产量占世界粗钢总产量的54%[1]，如此规模的粗钢产量所消耗的能源约占我国总能耗的12.7%，并贡献了大约15%的碳排放[2].因此，钢铁行业的节能和减排对于中国“双碳”目标的实现具有重要意义.值得注意的是，高炉–转炉长流程是我国主要的钢铁生产工艺，其产量占比约为90%[1]，这意味着高炉–转炉长流程是钢铁行业主要的能耗和碳排放来源.近年来，国内主要钢铁企业和相关研究机构都在尝试通过研发氢基竖炉–电弧炉生产工艺来替代长流程钢铁生产工艺.然而，即使在最为乐观的情境下，中国在2050年仍将有约40%的钢铁产能通过高炉–转炉长流程实现[3].根据中国钢铁工业协会统计，在高炉–转炉长流程生产工艺的能源消耗中，2023年重点钢铁企业的吨铁水能耗为387.42 kg标煤，在吨钢综合能耗中占比超过70%[4]，且造成了48%的碳排放.无论从行业统计还是相关学术研究来看，高炉都是钢铁行业节能减排的重点关注对象.

为了显著降低传统高炉的碳排放，各国都在积极开展富氢高炉研究，包括喷吹焦炉煤气[5]、改质焦炉煤气[6]、天然气[7]和纯氢[8]等富氢气体.然而，高炉喷吹富氢气体仍存在较多的技术和经济问题有待解决.例如，崔小杰等[9]指出富氢比例、富氢对高炉内部影响的基础研究和富氢冶炼成本等问题都还未得到解决；张淑会等[10]通过分析富氢高炉的冶炼特点指出富氢高炉在发挥氢还原优势的同时，容易导致高炉下部热量不足和铁矿石粉化率加剧等问题.

因此，目前实现高炉系统节能和减排的主要途径是优化现有工艺参数.经过长期的技术改造和优化实践，高炉工序的节能潜力已逐渐减小[11]，依赖专家经验和工程试验的传统参数优化方法面临成本高、周期长和适应性差等问题.与此同时，信息技术与人工智能的快速发展，以及钢铁行业多年工业运行所积累的大量数据，为高炉优化提供了新的契机[12].基于此，本文提出了一种融合数据与机理的高炉工艺参数优化方法，以期实现能效与减排的协同提升.

1　高炉多目标优化模型构建

1.1　高炉仿真模型构建

高炉仿真模型的构建过程如图1所示.由于高炉内部反应机理复杂，本研究通过构建基于数据驱动的软传感器来预测反映高炉内部还原状态的煤气利用率，然后将其计算结果作为高炉能质平衡模型的输入参数，从而建立数据与机理双驱动的高炉仿真模型.

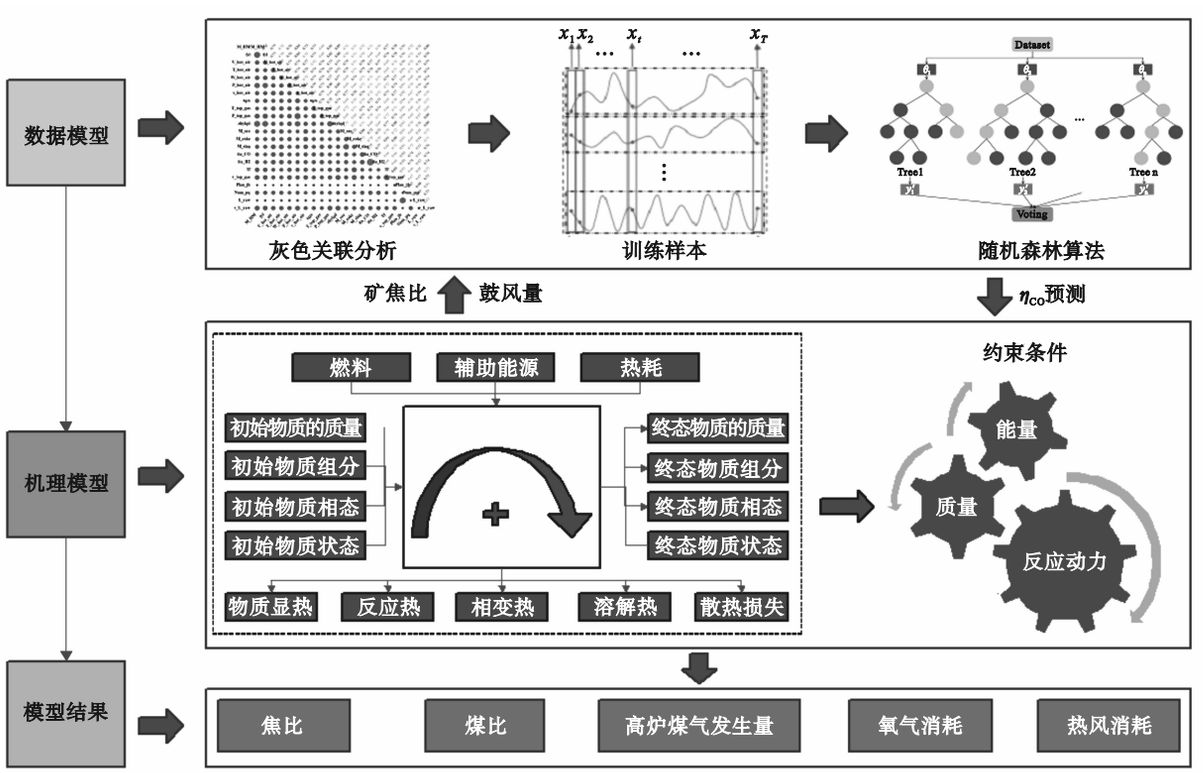


图1　高炉混合建模框架

Fig. 1　Hybrid modeling framework of blast furnace

首先基于随机森林算法构建了高炉数据驱动模型,用于预测高炉煤气利用率.以国内某钢厂4 700 m^3高炉为研究对象,结合机理知识与专家经验,从影响高炉生产过程的关键工艺参数中筛选出10个关键特征变量(见表1).选取该高炉在2021—2024年期间以天为时间粒度采集的1 148条历史运行数据作为样本集,其中前70%的样本用于模型训练,后30%的样本用于模型验证.基于随机森林算法构建了高炉煤气利用率预测模型,其预测值和实际值对比见图2.结果表明,采用随机森林算法的煤气利用率预测模型在验证集上的决定系数(R^2)和平均绝对误差(MAE)分别达到0.71和0.34%,相较于其他机器学习算法表现出最好的预测精度.这主要得益于随机森林算法的集成学习特性和较强的抗过拟合能力,使其即使在小样本数据条件下,仍能保持较高的预测精度和稳定性.

表1 选取10个高炉生产的关键参数

Table 1 Ten selected key parameters for blast furnace production

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
输入变量	鼓风温度	高炉风量	鼓风压力	鼓风速度	煤气流速	鼓风湿度	高炉顶压	喷枪数量	下降料速	炉渣量

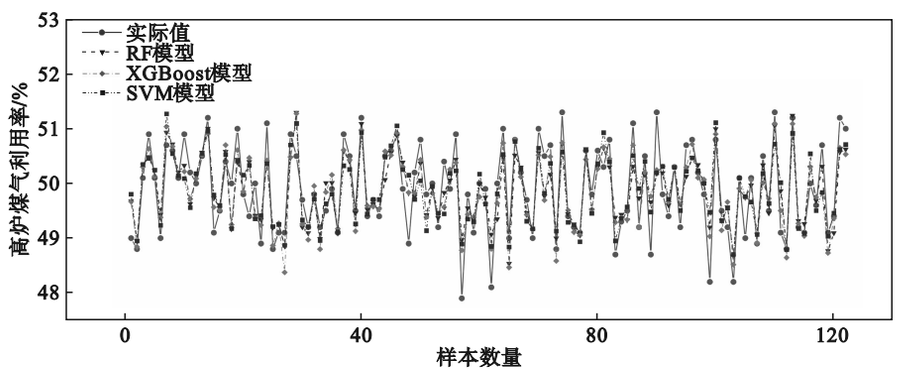


图2 基于随机森林算法的高炉煤气利用率预测效果[13]

Fig. 2 Prediction performance of blast furnace gas utilization rate based on random forest algorithm[13]

其次,基于质量和能量守恒定律构建高炉能质平衡模型,用于计算其所消耗的燃料和能源介质.高炉详细的物质流和能量流如图3所示.高炉主要消耗烧结矿、球团矿、块矿、熔剂、焦炭和煤粉等原料,同时消耗热风和氧气等动力介质,最终在其内部经过直接还原和间接还原反应,铁矿石和熔剂转变为铁水、炉渣和炉尘排出,燃料、热风和氧气转变为高炉煤气排出,其物质投入产出分析如图3a所示.高炉冶炼过程所需要的能源投入分别来自原料和热风带入的显热、燃料燃烧释放的化学能以及造渣释放的成渣热,这些热量分别用于高炉内部的直接还原反应、间接还原反应和脱硫的热量消耗,煤粉、风口水分和碳酸盐的分解热耗,原料带入水分蒸发和固态铁熔化的相变热耗,以及残留在产品中的显热,详细的高炉各项热量收入和支出如图3b所示.

在高炉内部化学反应中,直接还原反应占比的高低反映了高炉内部动力学反应状态,对高炉燃料和热风的消耗以及高炉煤气发生量具有显著影响,可通过直接还原度表示:

$$R=\frac{1}{\left(1+\eta_{CO}\right)}+\frac{2.5V_{CO}^{Fe_2O_3}}{\left(1+\eta_{CO}\right)m_{Fe}}-\frac{2.5\left(\eta_{H_2}V_{H_2}^{total}+\eta_{CO}V_{CO}^{coke}\right)}{\left(1+\eta_{CO}\right)m_{Fe}}-\frac{4.7\eta_{CO}\left(m_C^{hj}+m_C^{fk}\right)}{\left(1+\eta_{CO}\right)m_{Fe}}. \quad (1)$$

式中:m_{Fe}和$V_{H_2}^{total}$分别为铁水中铁质量和进入高炉煤气的氢气体积;m_C^{hj}和m_C^{fk}分别代表合金元素还原(Si,P,Mn和Ti)消耗的碳量和进入风口燃烧的碳量;$V_{CO}^{Fe_2O_3}$和V_{CO}^{coke}分别表示还原Fe_2O_3消耗的和焦炭加热释放的CO体积;η_{CO}和η_{H_2}分别表示炉内CO和H_2的利用率,其中η_{CO}可通过数据驱动模型进行计算,η_{H_2}在本研究中被假定为44.5%.

为了验证高炉仿真模型的准确性,将所研究高炉在2024年4月1日到2024年5月31日运行期间的原燃料条件和工艺参数代入高炉仿真模型进行计算,最后将高炉焦比和热风流量的预测值与实际值进行对比,如图4所示.可以看出,高炉焦比和热风流量的预测值与实际值基本吻合,从而验证了本研究所构建高炉仿真模型的准确性.

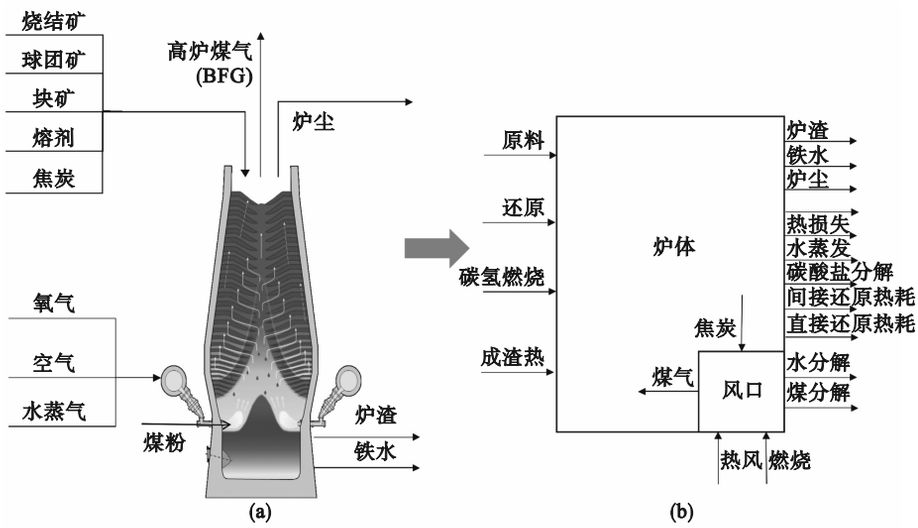


图3　高炉的物质流和能量流[14]

Fig. 3　Material and energy flows of blast furnace[14]

(a)—高炉物质流分析;(b)—高炉能量流分析.

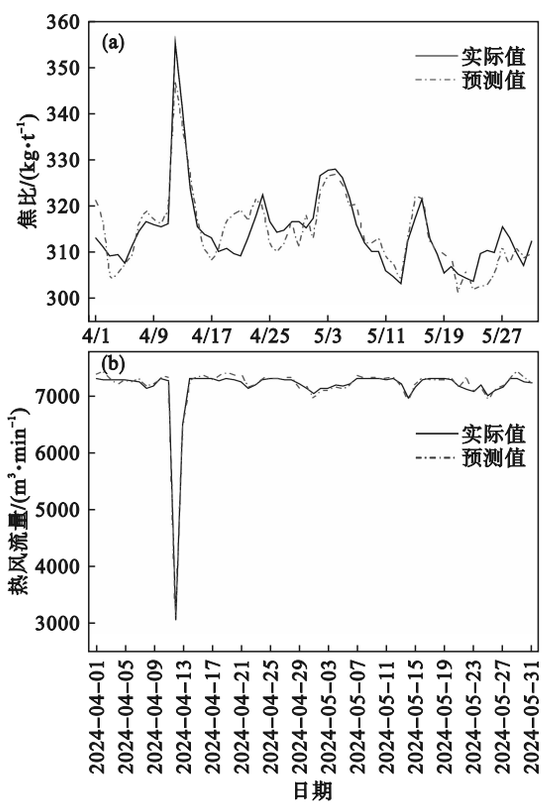


图4　焦比和热风流量各自实际值与预测值对比

Fig. 4　Comparison between actual and predicted values of coke rate and hot blast flow

和减少违反物理规律和生产操作的解,根据高炉实际运行能达到的最大值和最小值设定这 13 个决策变量的上下边界,如表2所示.优化模型的优化目标为高炉炼铁工序能耗和碳排放最小化,其目标函数表示如下[15]:

$$E = e_f + e_r - e_h, \tag{2}$$

$$C = C_f + C_r - C_p - C_h. \tag{3}$$

式中:E为高炉工序能耗;e_f,e_r和e_h分别为原燃料带入的化学热、显热和回收的余能;C为高炉工序的碳排放;C_r和C_f分别为原燃料带入的碳量;C_p和C_h分别为产品和余能回收的碳量.

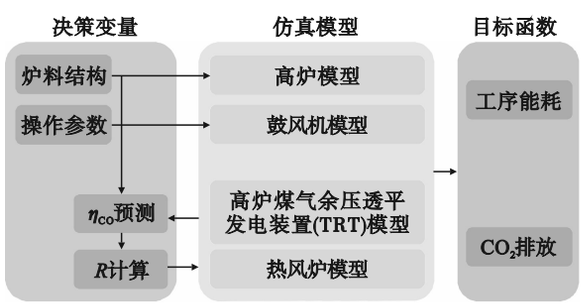


图5　高炉炼铁系统多目标优化框架

Fig. 5　Multi-objective optimization framework for blast furnace ironmaking system

1.2　高炉多目标优化框架搭建

图5为本文所提出的高炉炼铁系统多目标优化框架,主要包含决策变量、仿真模型和目标函数等.选取表征炉料结构的3个参数和10个操作参数作为优化模型的决策变量,其中炉顶煤气温度和热风炉烟气温度在本研究中被视为可优化的结果参数.为了避免超出仿真模型的适应范围

1.3　高炉多目标优化模型求解

在建立高炉多目标优化模型后,需要选择合适的优化算法对模型进行求解.由于该优化模型的底层仿真框架中嵌入了机器学习模型,传统求解方法(如基于Pyomo平台的混合整数非线性规划算法)难以适应机器学习模型所表现出的非线性和不规则特征,从而导致寻优效果较差.相比

之下，基于群体智能的粒子群优化(particle swarm optimization，PSO)算法具有较强的适应性和快速收敛特性[16].因此，本文选用PSO算法对高炉多目标优化模型进行求解，其具体数学原理可参见文献[17].高炉多目标优化模型的求解流程如图6所示.首先设定工序碳排放水平，在该条件下利用PSO算法求解高炉工序最小能耗，以获得对应的优化结果.随后，在相同的求解流程下逐步降低工序碳排放水平，并求解各碳排放水平下的最优能耗值.最后，根据帕累托前沿，确定高炉炼铁工序碳排放与其能耗之间的最优平衡解，从而完成高炉多目标优化模型的求解过程.

表2 高炉优化模型决策变量的边界设定

Table 2 Boundary settings of decision variables in blast furnace optimization model

决策变量	单位	数值范围	决策变量	单位	数值范围
吨铁水烧结矿消耗	kg	1 100~1 300	热风压力	kPa	400~430
吨铁水球团矿消耗	kg	120~200	鼓风速度	m/s	250~290
吨铁水块矿消耗	kg	290~330	高炉顶压	kPa	230~250
吨铁水喷吹煤消耗	kg	150~180	下降料速	m/h	6~6.9
富氧率	%	0~3	煤气预热温度	℃	170~210
高炉煤气比例	—	0.9~0.92	助燃空气预热温度	℃	160~190
热风炉排气温度	℃	250~270			

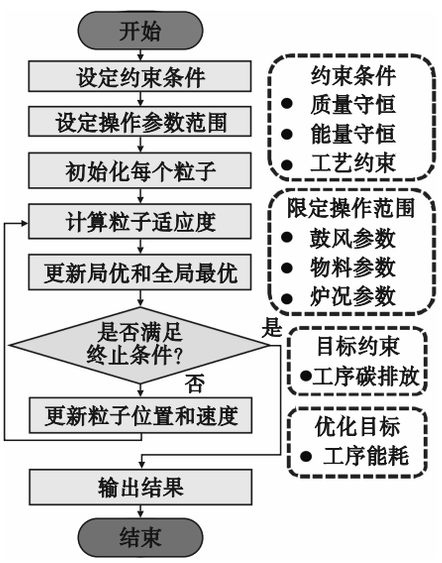


图6 高炉炼铁系统多目标优化框架

Fig. 6 Multi-objective optimization framework for blast furnace ironmaking system

2 结果与讨论

高炉工艺参数优化结果如表3所示.从表中可知，与基准工况相比，高炉经过优化后吨铁水能耗和碳排放分别下降了7.8 kg标煤和24.94 kg，降幅分别达到了2.06%和3.84%.这主要是因为经过优化后鼓风制度和下降料速得到了改善，使得风口理论燃烧温度降低了39 ℃，煤气利用率提高了0.3%，这明显提高了碳基还原剂的利用效率.此外，渣比下降了9.36 kg/t，同时热风炉排气温度降低了17.19 ℃，这降低了高炉和热风炉的热量损失，使得炼铁工序运行所需的燃料消耗得到了显著下降.因此，经过高炉内部反应状态优化和降低炼铁工序热损失，高炉炼铁工序能耗及其碳排放得到了显著下降.

表3 高炉工艺参数优化结果及基准值

Table 3 Optimization results and benchmark values of blast furnace process parameters

决策变量	单位	基准值	最佳值	决策变量	单位	基准值	最佳值
吨铁水烧结矿消耗	kg	1 193	1 180	热风压力	kPa	427.5	426.11
吨铁水球团矿消耗	kg	136.66	121.72	鼓风速度	m/s	277.00	288.85
吨铁水块矿消耗	kg	304.81	323.34	高炉顶压	kPa	246.70	241.63
吨铁水喷吹煤消耗	kg	170.22	171.22	喷枪数量	个	38	37
富氧率	%	1.77	1.07	下降料速	m/h	6.60	6.55
高炉煤气比例	—	0.91	0.91	空气预热温度	℃	178.5	150
热风炉排气温度	℃	267.19	250.00	煤气利用率	%	49.86	50.16
煤气预热温度	℃	168	167.95	高炉鼓风量	m^3/t	997.82	961.91
吨铁水发电量	kW·h	42.93	41.31	煤气发生量	m^3/t	1 482	1 500
渣比	kg/t	301.14	291.78	煤气消耗量	m^3/t	415.35	396.67
风口理论燃烧温度	℃	2 089	2 050	焦比	kg/t	314.29	306.76
吨铁水碳排放	kg	649.40	624.46	吨铁水能耗	kg标煤	378.57	370.77

高炉炼铁工序的余热主要包括烟气余热、高炉渣余热和炉顶煤气余热，表4所示为基准工况与最佳工况下这3种余热的总量及其回收情况.从余热发生量角度，最佳工况下吨铁水烟气、高炉渣和

煤气所携带的余热量分别为188,546和347 MJ,相比基准工况分别下降了21,17和9 MJ,这是由高炉炼铁工序总体能源利用效率提高所导致的.从余能回收角度,最佳工况下3种余热的回收占比分别为69.15%,0%和42.94%,相比基准工况分别降低了1.66%,0%和0.32%,这是由余热资源品质和数量下降导致的.由于目标钢铁企业并未考虑炉渣余热回收技术,这导致高炉渣余热回收量为0.因此,增加炉渣余热回收装置可以进一步提高炼铁系统的能源利用率,这是因为炉渣余热在高炉余热资源中占比最大.

表4　高炉炼铁工序余热利用分析

Table 4　Waste heat utilization analysis of blast furnace ironmaking process　　MJ·t^{-1}

余热	基准值	基准回收量	最优值	最优回收量
烟气	209	148	188	130
煤气	356	154	347	149
高炉渣	563	0	546	0

优化后的炼铁工序各子设备能效分析如图7所示.从图中可知,最优工况下高炉、热风炉、鼓风机和TRT的设备热效率分别为72.67%,90.48%,83.81%和42.84%,分别相较基准值变化了−0.1%,4.23%,0.1%和−0.41%.可以看出,热风炉的能效提升最为明显,该变化主要是由于热风炉排烟热损失减少.然而,高炉和TRT的热效率略微低于其基准值.这是由高炉煤气利用率及其散热损失的显著改善使得高炉还原反应所需热耗和碳消耗下降导致的(在高炉本体热效率计算时,直接还原和间接还原反应消耗的热量被视作铁水生产的有效热耗).

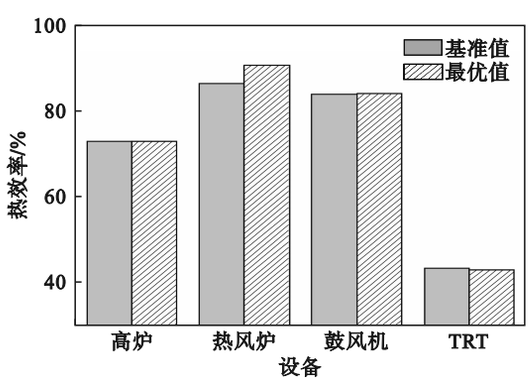


图7　高炉炼铁工序各子设备能效分析

Fig. 7　Energy efficiency analysis of sub-equipment in blast furnace ironmaking process

3　结　　论

1)构建了一种融合数据驱动与机理模型的高炉工艺参数多目标优化模型.该模型综合考虑了高炉过程的物质与能量守恒机理以及实际生产数据特征,并采用粒子群优化(PSO)算法对多目标优化问题进行求解,通过帕累托前沿分析获得了不同能耗−碳排放权衡关系下的最优解集,进而确定了具有实际可操作性的高炉炼铁最佳工况.

2)以某钢厂4 700 m^{3}高炉操作工况优化为例,优化后吨铁水的烟气、炉渣和煤气所携带的余热分别相较基准值下降了20.76,17.22和8.71 MJ,同时热风炉热效率提升了4.23%.此外,最佳工况下的吨铁水能耗及其碳排放分别为370.77 kg标煤和624.46 kg,分别相较基准工况下降了7.80 kg标煤和24.94 kg.这些结果将为高炉炉长的决策和操作提供有效的参考.

参考文献:

[1] Worldsteel. World steel in figures 2025 [EB/OL]. (2025−06−09) [2025−09−15]. https://worldsteel. org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025.

[2] Zhang Y J, Yue Q, Chai X C, et al. Analysis of process parameters on energy utilization and environmental impact of hydrogen metallurgy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,361:132289.

[3] Chang Y F, Wan F, Yao X L, et al. Influence of hydrogen production on the CO_2 emissions reduction of hydrogen metallurgy transformation in iron and steel industry [J]. *Energy Reports*, 2023,9:3057−3071.

[4] 王维兴. 2023年中钢协会员单位能源消耗述评[EB/OL]. (2024−03−23) [2025−07−15]. https://m. mysteel. com/a/24032316/1F73C33BE79C2D0C_abc.html.
(Wang Wei-xing. Review of energy consumption of CISA member units in 2023[EB/OL]. (2024−03−23) [2025−07−15]. https://m.mysteel.com/a/24032316/1F73C33BE79C2D0C_abc.html.)

[5] Sun M M, Pang K L, Gu Z Y, et al. Analysis of the theory and practice of hydrogen-enriched blast furnace ironmaking [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 127: 702−716.

[6] Tonomura S, Kikuchi N, Ishiwata N, et al. Concept and current state of CO_2 ultimate reduction in the steelmaking process (COURSE50) aimed at sustainability in the Japanese steel industry [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2016, 2(3): 191−199.

[7] Zhang J L, Li K J, Liu Z J, et al. Primary exploration of hydrogen metallurgy [M].Singapore: Springer Nature, 2024.

[8] CLIFFS. Cleveland−Cliffs completes successful blast furnace hydrogen injection trial at Indiana Harbor #7 blast furnace [EB/OL]. (2024−01−26) [2025−07−15]. https://www. clevelandcliffs. com/news/news-releases/detail/620/cleveland-cliffs-completes-successful-blast-furnace.

[9] 崔小杰,胡长庆.高炉富氢冶炼发展现状与展望[J].中国冶金,2024,34(5):1−10.
(Cui Xiao-jie, Hu Chang-qing. Research trends and prospects of hydrogen-rich ironmaking in blast furnace [J]. *China Metallurgy*, 2024,34(5):1−10.)

(下转第67页)