

考虑电炉短流程的钢铁工业园区 综合能源系统低碳运行模式分析

赵海祺^{1,2}, 董树锋¹, 南斌¹, 张祥龙³

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027; 2. 浙江大学工程师学院 杭州市 310015;
3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 102209)

摘要: 我国钢铁行业减碳压力大, 然而传统高炉长流程冶金碳排放居高不下, 氢冶金技术又尚不成熟, 因此提出了发展电炉短流程炼钢的中期低碳发展方式。首先, 针对具备新能源、储能设备、高炉煤气发电技术以及高炉长流程和电炉短流程两种冶金工序的钢铁工业园区综合能源系统, 构建其供用能结构并且给出设备及冶金工序模型; 其次, 建立考虑碳排放和设备运行成本的园区优化调度模型; 最后, 在不同的场景中, 研究引入新能源、储能设备和高炉煤气发电技术对电炉钢生产比例的影响, 以及不同电炉钢比例对园区经济性的影响。算例结果表明, 新能源、储能设备和高炉煤气发电技术的引入将提高园区电炉钢比例, 降低园区生产运行成本, 有效减少碳排放。

关键词: 综合能源系统; 电炉短流程; 高炉煤气发电技术; 碳排放; 钢铁工业

Analysis of Low Carbon Operating Models in Steel Industrial Community Integrated Energy System Considering Electric Arc Furnace Short Process

ZHAO Haiqi^{1,2}, DONG Shufeng¹, NAN Bin¹, ZHANG Xianglong³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

ABSTRACT: The iron and steel industry in China is under pressure to reduce carbon emissions; however, the carbon emissions from the traditional blast furnace long-process metallurgy remain high, and the hydrogen metallurgy technology is still in infancy. Therefore, the development of electric arc furnace short-process steelmaking is the low-carbon development approach in the medium term. First, the energy supply and consumption structure of an integrated energy system of the steel industrial community is constructed, with new energy sources, energy storage equipment, blast furnace gas generation technology, and two metallurgical processes: the blast furnace long-process and electric arc furnace short-process. Then, a model of the equipment and metallurgical processes is presented. Second, an optimal dispatch model that considers carbon emissions and equipment operating costs is developed for the community. Finally, the impact of introducing new energy sources, energy storage equipment, and blast furnace gas generation technology on the proportion of electric arc furnace steel production, as well as the impact of different proportions of electric arc furnace steel on the economics of the community, is investigated in different scenarios. The results show that the introduction of new energy, energy storage equipment, and blast furnace gas power generation technology will increase the proportion of electric arc furnace steel in the community, reduce the community's production and operating costs, and reduce carbon emissions.

This work is supported by State Grid Corporation of China Research Program(No. 5100-202256008A-1-1-ZN).

KEYWORDS: integrated energy system; electric arc furnace short process; blast furnace gas power generation; carbon emissions; iron and steel industry

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2023)06-0023-10

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.06.003

0 引言

我国碳排放量占世界总碳排放量的28.8%^[1] 碳减

排局势严峻。作为负责任的大国,我国在积极践行《联合国气候变化框架公约》和《巴黎协定》等公约的同时,提出了“双碳”时间表,为遏制全球变暖做出贡献^[2]。

煤炭占我国能源生产与消费总量的70%以上,若要如期实现“双碳”目标,必须改善“一煤独大”的

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5100-202256008A-1-1-ZN)

能源消费方式^[3-4]。钢铁工业每年的碳排放量约占全国碳排放总量的15%,减碳压力巨大。我国2020年粗钢产量约占世界产量的56.8%^[5],但我国电炉钢发展缓慢,2021年我国电炉钢占比仅为10.6%,在主要产钢国中处于末尾^[6]。即使钢铁企业近年在减碳降耗上做出了努力,但以高炉长流程炼钢为主的冶金方式显然不能确保钢铁工业在2030年前实现碳达峰。相关政策指出,钢铁工业要在冶金工艺上做出变革,实现节能降碳^[7]。文献[8]指出,实现钢铁工业的低碳发展,短中期的研究重点在于继续降低各流程碳排放以及提高电炉短流程炼钢比例。

电炉短流程炼钢成为短中期替代长流程炼钢产能的最佳选择^[9],其原因在于:我国废钢资源日益充足^[10-11],以废钢为冶金原料能减轻铁矿对外依存度^[12-13];电炉短流程炼钢的吨钢碳排放仅为长流程炼钢的1/3,即使与目前示范工程应用的氢冶金气基竖炉短流程炼钢相比也能降低20%以上^[14-15];相较于氢气的制备成本^[16],以废钢为冶金原料更具经济性,在分时电价激励下,当废钢成本在2000元/t时,谷电时段的电炉短流程炼钢的经济性就已优于高炉长流程炼钢,并且电炉短流程吨钢产能投资和土地占用均少于高炉长流程^[9],具有推广基础。

目前工业界与学界已经开始对应用电炉短流程的炼钢生产模式进行探索,但现有的研究存在两类问题。首先,学界先前对低碳冶金技术的研究主要聚焦于氢冶金在中国钢铁工业的应用^[17-20],对电炉短流程炼钢的研究缺乏整体性,仅关注企业利用分布式新能源实现电力侧减碳或废钢作为冶金原料实现生产侧减碳的合理性。如文献[21]验证了使用风光互补技术获得1600℃以上熔炼高温进行金属冶炼的可行性;文献[9]论证了采用废钢作为短流程炼钢原料可以减少吨钢碳排放量。其次,针对冶金生产全流程的研究多以高炉长流程炼钢为研究对象,未考虑新型低碳技术接入和碳排放约束对钢铁企业生产费用的影响。如文献[22]以某实际高炉冶金生产线为例,对冶金生产过程中的能量流进行建模,建立了钢铁生产物质流与能量流协同优化模型,提高了能源利用效率;文献[23]提出了一种基于静态、动态因素及钢铁能源自身波动规律的建模方案,描述了物质、能量网络的耦合关系,提出了一种能源调度和优化方法;文献[24]综合考虑电力、煤气等能源介质的供需和生产成本,建立了能耗最小的多周期耦合数学模型。考虑碳排放成本和电炉短流程炼钢工序,从整体的角度对钢铁工业园区低碳运行模式的研究尚未见报道。

针对上述问题,本文考虑碳排放成本,从综合能

源系统角度对含电炉短流程炼钢工序的钢铁工业低碳运行模式进行了研究,以某实际钢铁工业园区为例,构建了高炉煤气发电机组、高炉长流程和电炉短流程两种冶金工序的数学模型,对具备新能源、储能设备、高炉煤气发电技术以及高炉长流程和电炉短流程两种冶金工序的典型钢铁工业园区综合能源系统进行了描述,提出并建立了综合考虑园区综合能源系统的原料成本和环境成本的园区优化模型,之后提出新能源建设、高炉煤气发电机组和储能设备等多种能源规划方案对运行成本的影响,探讨电炉钢比不同时园区的减碳效果、经济性和生产用能结构,评估得到该钢铁工业园区电炉短流程炼钢的最佳比例,最后对园区通过提高电炉钢比例能够达到的节能减碳效果进行了讨论。

1 钢铁工业园区综合能源系统

1.1 园区能源系统分析

钢铁工业园区是一个多能输入的综合能源系统,系统的能源输入包括电能和煤炭:由煤供给热能,满足高炉长流程炼钢的热能需求;电网供应电能满足高炉长流程炼钢和电炉短流程炼钢的电能需求。在“双碳”背景下,园区可以通过建设屋顶光伏发电和回收高炉转炉煤气发电减少园区从电网的购电,另外在园区内建设储能设备可以实现电能和煤气利用的时序转移,提高新能源和回收煤气的利用率。

采用能源集线器的形式^[25-26],建立包含两种生产工序、光伏、储能设备和高炉煤气发电机组的钢铁工业园区综合能源系统,结构如图1所示。

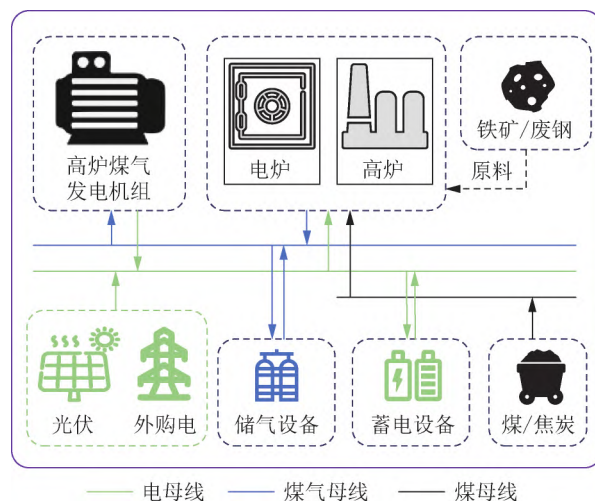


图1 钢铁工业园区综合能源系统结构

Fig. 1 Integrated energy system structure for steel industrial community

如图1所示,钢铁工业园区综合能源系统主要包括:1) 能源和原料的输入,包括外购电、外购煤炭和

铁矿/废钢等; 2) 能量的转化,包括高炉煤气发电机组等; 3) 能量的储存,包括蓄电设备和储气设备等; 4) 能量的使用,包括高炉长流程炼钢和电炉短流程炼钢等; 5) 能量的汇集和分配,包括电母线、煤气母线和煤母线等。

1.2 钢铁园区综合能源系统建模

1.2.1 高炉长流程钢铁冶炼工序建模

高炉长流程炼钢模型输入为电能、煤和铁矿,输出为粗钢和煤气。表 1 为高炉长流程和电炉短流程两种冶金流程成本对比。根据文献[9]、[27]和表 1,可以建立高炉长流程炼钢模型,高炉长流程炼钢生产速率与用料速率、用煤炭速率和用电速率的关系可表达为:

$$\begin{cases} K_{lp} = q_{lp,coal} \cdot W_{coal} \\ K_{lp} = q_{lp,Fe} \cdot W_{Fe} \\ K_{lp} = e_{lp} \cdot P_{lp} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{lp} 为高炉长流程炼钢的钢铁生产速率, t/h; W_{coal} 和 W_{Fe} 分别为高炉长流程炼钢消耗煤炭速率和铁矿石速率, t/h; P_{lp} 为高炉长流程炼钢的耗电功率, kW; $q_{lp,coal}$ 、 $q_{lp,Fe}$ 和 e_{lp} 分别为高炉长流程炼钢的用煤系数、用铁矿系数和耗电系数,表示通过高炉长流程炼钢工序生产 1 t 粗钢需要的煤炭量、铁矿量和电能。

表 1 两种冶金流程成本对比

损耗项目	吨钢消耗值	
	长流程炼钢	短流程炼钢
铁矿石/t	1.65	
废钢/t		1.1
电耗/kWh	150	400
煤耗(炭耗)/t	0.5	
其他材料损耗/元	390	390

高炉长流程炼钢会产生高炉煤气和转炉煤气,其中的主要成分为 CO、CO₂、H₂ 等,是炼钢重要的副产品。除直接生产自用外,还剩余大量低热值煤气,钢铁企业为获得额外收益,进一步优化资源配置,会回收煤气在高炉煤气发电机组中燃烧产生电能供应园区使用。高炉长流程炼钢生产速率和回收低热值煤气速率的关系可表示为:

$$G_{lp} = \eta_{eg,lp} \cdot P_{lp} \quad (2)$$

式中: G_{lp} 为高炉长流程炼钢回收的煤气速率, kW, 在本文中为方便计算,通过热值换算将煤气进气速率 (m³/h) 转换为煤气消耗功率 (kW), 以下皆同; $\eta_{eg,lp}$ 为煤气回收效率,详细的推导过程见附录 A^[28-29]。

1.2.2 电炉短流程钢铁冶炼工序建模

电炉短流程炼钢模型输入为电能和废钢,输出为粗钢。根据文献[9]、[27]和表 1,可以建立电炉短流程炼钢模型,可表达为:

$$\begin{cases} K_{dp} = q_{dp,sFe} \cdot W_{sFe} \\ K_{dp} = e_{dp} \cdot P_{dp} \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{dp} 为电炉短流程炼钢的钢铁生产速率, t/h; W_{sFe} 为电炉短流程炼钢消耗废钢速率, t/h; P_{dp} 为电炉短流程炼钢的耗电功率, kW; $q_{dp,sFe}$ 和 e_{dp} 为电炉短流程炼钢的消耗废钢系数和耗电系数,表示通过电炉短流程炼钢工序生产 1 t 粗钢需要的废钢量和电能。

1.2.3 高炉煤气发电机组建模

高炉煤气发电技术作为钢铁企业利用低热值高炉煤气发电新技术^[30],既能有效利用煤气资源,又可稳定煤气管网波动,图 2 为高炉煤气发电机工作运行原理。

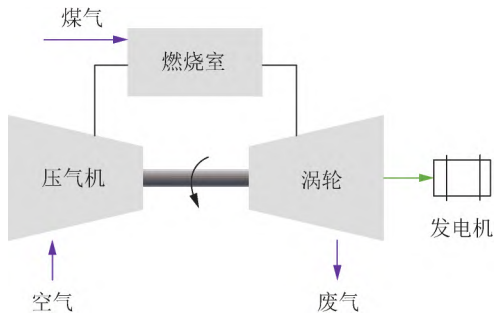


图 2 高炉煤气发电机组的工作运行原理

Fig. 2 Operating principle of blast furnace gas generating sets

由于煤气本身为碳排放产物,因此可认为高炉煤气发电机组燃烧煤气不产生额外碳排放。园区内高炉煤气发电机组通过燃烧高炉长流程炼钢回收的低热值煤气发电供给园区使用,可以增加园区额外收益^[31]。按照图 2 进行建模,可得到高炉煤气发电机组的发电功率与煤气消耗速率的关系为:

$$P_{gt} = \eta_{ge,gt} \cdot G_{gt} \quad (4)$$

式中: P_{gt} 为高炉煤气发电机组发电功率, kW; G_{gt} 为高炉煤气发电机组进气功率, kW; $\eta_{ge,gt}$ 为高炉煤气发电机组发电效率。

1.2.4 储能设备建模

储能装置是综合能源系统提升能量使用效率的重要设备,可实现能量在时间维度的转移。储能设备可以将某时刻多余或廉价的能量存储起来,并在能源价格较为昂贵或需要能量的时刻释放,以此实现用能成本的降低^[32]。储能设备的通用动态模型可表示为:

$$S_x^{t+1} = S_x^t (1 - \delta_x) + \left(\eta_{x,c} P_{x,c}^t - \frac{P_{x,d}^t}{\eta_{x,d}} \right) \Delta t \quad (5)$$

式中:下标 x 表示储存的能量类型,储电和储煤气分别用 es 和 gs 表示; δ_x 表示储能设备的能量耗散率; S_x^{t+1} 和 S_x^t 分别表示储能设备充/放能后和充/放能前储存的能量; $P_{x,c}^t$ 和 $P_{x,d}^t$ 分别为 t 时段的充能和放能功率; $\eta_{x,c}$ 和 $\eta_{x,d}$ 分别为充能、放能效率; Δt 为调度周期。式(5)表现了相较于充/放能前,储能设备充/放能后储存能量的变化。

2 钢铁工业园区优化调度模型

2.1 目标函数

钢铁工业园区以日生产成本最低为目标函数,日生产成本由原料成本(包括铁矿/废钢和煤炭购买费用)、电成本(外购电费用)、碳排放成本和设备运维成本四部分构成,可表示为:

$$C = \min(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \quad (6)$$

其中,原料成本 C_1 可表示为:

$$C_1 = \sum_{t=1}^n (p_{lp,coal} W_{coal}^t + p_{lp,Fe} W_{Fe}^t + p_{dp,sFe} W_{sFe}^t) \Delta t \quad (7)$$

式中: $p_{lp,coal}$ 、 $p_{lp,Fe}$ 和 $p_{dp,sFe}$ 分别为煤炭、铁矿石和废钢价格,元/t; W_{coal}^t 、 W_{Fe}^t 和 W_{sFe}^t 分别为 t 时段煤炭、铁矿石和废钢使用速率, t/h; n 为调度时段数。

购电成本 C_2 可表示为:

$$C_2 = \sum_{t=1}^n p_b^t \cdot P_b^t \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中: p_b^t 和 P_b^t 分别为 t 时段购电价格和购电功率,购电价格的单位为元/(kW·h),购电功率单位为 kW。

碳排放成本 C_3 可表示为:

$$C_3 = \lambda_{carbon} \sum_{t=1}^n (\beta_{lp} K_{lp}^t + \beta_{dp} K_{dp}^t + \beta_e P_b^t) \Delta t \quad (9)$$

式中: λ_{carbon} 为碳处理价格,元/t; β_{lp} 和 β_{dp} 分别为高炉长流程炼钢、电炉短流程炼钢的碳排放系数, t/t, 表示生产 1 t 粗钢产生的等效碳排放; β_e 为外购电的碳排放系数, t/kWh, 表示从电网购买 1 kWh 电能产生的等效碳排放,碳排放系数是指人类生产生活过程中消耗单位能量或生产单位产品产生的碳排放数量^[33]。本文引入碳排放系数以方便进行钢铁工业园区碳排放量的估算。运维成本 C_4 可表示为:

$$C_4 = \sum_{t=1}^n [\varepsilon_{gt} P_{gt}^t + \varepsilon_x (P_{x,c}^t + P_{x,d}^t)] \Delta t \quad (10)$$

式中: ε_{gt} 和 ε_x 分别为高炉煤气发电机组和储能设备的运维成本,元/kW。

2.2 约束条件

2.2.1 能源母线平衡约束

对于电平衡,有以下约束:

$$P_b + P_{pv} + P_{gt} + P_{es,d} = P_{lp} + P_{dp} + P_{es,c} \quad (11)$$

对于煤气平衡,有以下约束:

$$G_{lp} + P_{gs,d} = P_{gs,c} + G_{gt} \quad (12)$$

等式(11)左侧表示输入电母线的能量,包括园区外购电功率 P_b 、光伏发电功率 P_{pv} 、高炉煤气发电机组发电功率 P_{gt} 和蓄电设备放电功率 $P_{es,d}$; 右侧表示从电母线输出的能量,包括高炉长流程炼钢用电功率 P_{lp} 、电炉短流程炼钢用电功率 P_{dp} 和蓄电设备充电功率 $P_{es,c}$ 。等式(12)左侧表示输入煤气母线的能量,包括从高炉长流程炼钢过程中的回收煤气功率 G_{lp} 和储气设备放能功率 $P_{gs,d}$; 右侧表示从煤气母线输出的能量,包括高炉煤气发电机组进气功率 G_{gt} 和储气设备充能功率 $P_{gs,c}$ 。

2.2.2 储能设备约束

对于储能设备,在任一时段充能状态和放能状态均不可同时存在。因此,设定 $v_{x,c}$ 和 $v_{x,d}$ 为 0-1 状态变量, $v_{x,c}$ 为 1 表示外界向储能设备充能, $v_{x,d}$ 为 1 表示设备向外放能。即可对储能设备有以下约束:

$$0 \leq P_{x,c}^t \leq v_{x,c} \cdot P_{x,c}^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{x,d}^t \leq v_{x,d} \cdot P_{x,d}^{\max} \quad (14)$$

$$v_{x,c} + v_{x,d} \leq 1 \quad (15)$$

式中: $P_{x,c}^{\max}$ 和 $P_{x,d}^{\max}$ 为储能设备的最大充能功率和最大放能功率, kW。式(15)表示储能设备存在 3 种工作方式: 储能设备充能、储能设备放能和储能设备不充能也不放能。

对储能设备的容量也作如下约束:

$$S_x^{\min} \leq S_x^t \leq S_x^{\max} \quad (16)$$

$$S_x^0 = S_x^n \quad (17)$$

式中: $S_x^{\max}$ 和 $S_x^{\min}$ 分别表示储能设备的最大储能容量和最小储能容量, kWh。式(17)表示储能设备在调度周期结束时刻和初始时刻的储能量相等。

2.2.3 其他设备技术约束

设备技术约束指所有设备均应在允许的范围內工作,其出力均不能超过最大限制,对于炼钢作业,由于其停机降温会造成资源浪费和对设备不可逆损坏,因此设定最小限制(数值为最大限制的 10%)使炼钢在整个调度过程中均运行。则 t 时段各设备的出力均应满足以下约束:

$$\begin{cases} P_{gt}^{\min} \leq P_{gt}^t \leq P_{gt}^{\max} \\ K_{lp}^{\min} \leq K_{lp}^t \leq K_{lp}^{\max} \\ K_{dp}^{\min} \leq K_{dp}^t \leq K_{dp}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{gt}^{\min}$ 和 $P_{gt}^{\max}$ 为高炉煤气发电机组的最小和最大发电功率, kW; $K_{lp}^{\max}$ 和 $K_{lp}^{\min}$ 、 $K_{dp}^{\max}$ 和 $K_{dp}^{\min}$ 分别为高炉长流程炼钢的最大和最小小时产量,电炉短流程炼钢的最大和最小小时产量, t/h。

另外,对高炉煤气发电机组的最大爬坡比作出以

下约束:

$$P_{gt}^{t+1} - P_{gt}^t \leq \Delta P^{max} \cdot \Delta t \tag{19}$$

式中: P_{gt}^{t+1} 和 P_{gt}^t 分别为 $t+1$ 时段和 t 时段高炉煤气发电机组的发电功率; ΔP^{max} 为高炉煤气发电机组的最大爬坡比 kW/min 。

3 钢铁工业园区运行分析

3.1 场景描述

本文所分析的某实际钢铁工业园区建有高炉冶金生产线和电炉冶金生产线各两条,年产钢 150 万 t,年用电量可达 350 GWh 以上,参照相关文献和实际工程^[8,15,20,29,31],对该园区拟建设的能源系统关键参数设置如表 2 所示。

表 2 园区关键参数
Table 2 Key parameters of the community

设备参数	数值
光伏容量/MW	2
高炉煤气发电机组容量/MW	18
蓄电设备容量	2 MW/8 MWh
储气设备容量	3 MW/12 MWh

第 2 节描述的钢铁工业园区综合能源系统优化调度模型实质上为混合整数线性规划模型,可采用 MATLAB 调用 CPLEX 工具求解模型。

钢铁生产企业采用根据供货合同的订单式生产方式^[34],因此算例以日产量 4 000 t 粗钢为计划产量进行优化调度。为了表现钢铁园区建设在未来的发展趋势,下面分 5 个场景分析不同的综合能源系统结构对园区运行成本的影响,场景设置如表 3 所示,表中“×”表示未建设该装置,“√”表示建设有该装置。

表 3 场景分类
Table 3 Classifications of case studies

场景	PV	高炉煤气 发电机组	储能	
			储电	储煤气
1	×	×	×	×
2	√	×	×	×
3	√	×	√	×
4	√	√	√	×
5	√	√	√	√

场景 1 为未建设光伏、储能设备和高炉煤气发电机组的场景;场景 2 设置为钢铁工业园区利用厂区屋顶和园区空余土地建设分布式光伏的场景;场景 3 设置为钢铁工业园区在包含分布式光伏以外还包含蓄电设备;场景 4 设置为钢铁工业园区包含分布式光伏、蓄电设备,

并引入高炉煤气发电技术;场景 5 设置为钢铁工业园区在场景 4 的基础上进一步加入了储气设备,可以对产生的多余煤气进行储存。

根据《关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见》^[35]以及进一步降低电炉短流程炼钢成本的需要,在园区中采用分时电价激励电炉短流程炼钢的负荷向夜间用电低谷转移,分时电价的时段划分和对应电价如表 4 所示。

表 4 分时电价
Table 4 Time-of-use price

时段	电价/(元/kWh)
01:00 — 08:00 23:00 — 24:00	0.48
08:00 — 12:00 15:00 — 19:00	0.88
12:00 — 15:00 19:00 — 23:00	1.10

钢铁工业园区中的综合能源系统设备参数如表 5 所示。

3.2 园区运行结果分析

3.2.1 不同场景下运行结果分析

图 3 为场景 1—5 中两种冶金工艺在各调度周期的产量。表 6 为各场景运行结果。

定义折合吨钢成本为总生产运行成本中实际用于某炼钢流程的成本与通过该流程生产的粗钢量的比值,计算方法为:

$$\theta_y = \frac{\sum_{t=1}^n C_{1,y}^t + C_{2,y}^t + C_{3,y}^t + C_{4,y}^t}{\sum_{t=1}^n K_y^t \Delta t} \tag{20}$$

式中: θ_y 表示炼钢流程 y 的折合吨钢成本; $C_{1,y}^t$ 、 $C_{2,y}^t$ 、 $C_{3,y}^t$ 和 $C_{4,y}^t$ 分别表示 t 时段折合到炼钢流程 y 的原料成本、电成本、碳排放成本和设备运维成本; K_y^t 表示炼钢流程 y 的粗钢生产速率; Δt 为调度周期; y 表示炼钢流程 $y \in \{lp, dp\}$, lp 和 dp 分别表示高炉长流程炼钢和电炉短流程炼钢。

根据式(20)以及表 4 的分时电价,可以得到 5 种场景下高炉长流程炼钢和电炉短流程炼钢在不同电价区间的折合吨钢成本,如表 7 所示。

综合对比 5 种场景运行结果和各场景下两种冶金工艺在各调度周期的产量,可以得到以下结论:

1) 光伏发电设备的引入,提高了园区自发电比例。随着新设备的接入,园区的自发电量增加,相较于场景 1,场景 2 通过光伏自发电使园区的用电成本降低了 15 687 元,促使园区日生产成本下降。

表 5 园区综合能源系统设备参数
Table 5 Equipment parameters for integrated energy systems in community

指标		数值
高炉长流程炼钢	$q_{lp,coal}$	2
	$q_{lp,Fe}$	0.61
	e_{lp}	0.006 7
	$\eta_{eg,lp}$	1.13
	$P_{lp}^{max}/(t/h)$	160
	$P_{lp}^{min}/(t/h)$	16
电炉短流程炼钢	$q_{dp,sFe}$	0.91
	e_{dp}	0.002 5
	$P_{dp}^{max}/(t/h)$	80
	$P_{dp}^{min}/(t/h)$	8
高炉煤气发电机组	$\eta_{ge,gt}$	0.3
	P_{gt}^{min}/kW	1 800
	P_{gt}^{max}/kW	18 000
	$\Delta P_{gt}^{max}/(kW/min)$	33.3
蓄电设备	δ_{es}	0.002 5
	$\eta_{es,c}$	0.96
	$\eta_{es,d}$	0.96
	$P_{es,c}^{max}/kW$	2 000
	$P_{es,d}^{max}/kW$	2 000
	S_{es}^{max}/kWh	8 000
	S_{es}^{min}/kWh	1 000
储气设备	δ_{gs}	0.001 7
	$\eta_{gs,c}$	0.96
	$\eta_{gs,d}$	0.96
	$P_{gs,c}^{max}/kW$	3 000
	$P_{gs,d}^{max}/kW$	3 000
	S_{gs}^{max}/kWh	6 000
	S_{gs}^{min}/kWh	1 000
园区经济指标	$P_{lp,coal}$	2 400
	$P_{lp,Fe}$	700
	$P_{dp,sFe}$	2 000
	λ_{carbon}	30
	β_{lp}	2.2
	β_{dp}	0.6
	β_e	0.972×10^{-3}
	ε_{gt}	0.063
	ε_{es}	0.005
	ε_{gs}	0.028

2) 蓄电设备的引入 ,降低了光伏弃光率。由场景 2 的运行结果可知 ,由于生产计划的约束 ,在光伏发电达到峰值之前 ,就存在光伏发电未能充分利用的

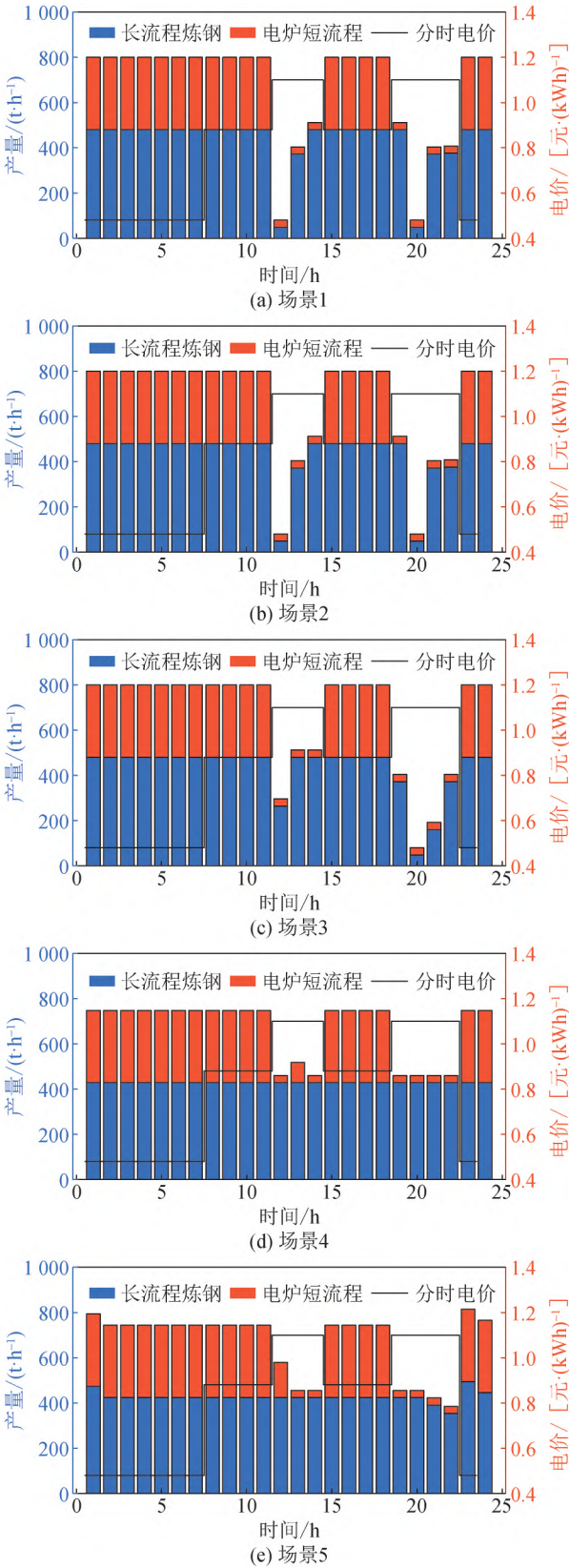


图 3 不同场景下两种冶金工艺在各调度周期产量
Fig. 3 Yield of two metallurgical processes at each dispatch cycle in different cases

弃光现象。而储能设备的引入 ,使得多发的电能被储存起来 ,在需要的时候释放 ,进一步降低了园区日生产成本。但由于光伏发电设备和蓄电设备的引入并

表 6 不同场景下运行结果
Table 6 Optimal results in different scenarios 元

场景	C_1	C_2	C_3	C_4	C
1	10 889 720	682 400	196 032	0	11 768 152
2	10 889 720	666 713	196 032	0	11 752 466
3	10 889 720	662 557	196 032	555	11 748 864
4	10 886 729	576 749	195 332	33 577	11 692 387
5	10 883 163	581 112	193 497	34 383	11 692 154

表 7 不同场景下 2 种炼钢流程的折合吨钢成本
Table 7 The equivalent cost of steel for 2 steelmaking processes under different scenarios 元/t

场景	炼钢流程	吨钢成本		
		谷时电价	平时电价	峰时电价
1	长流程	2 933	2 993	3 026
	短流程	2 800	2 960	3 048
2	长流程	2 933	2 990	3 007
	短流程	2 800	2 951	3 018
3	长流程	2 933	2 989	2 996
	短流程	2 799	2 951	3 000
4	长流程	2 925	2 975	2 965
	短流程	2 778	2 911	2 900
5	长流程	2 908	2 957	2 964
	短流程	2 772	2 898	2 882

没有使电炉短流程炼钢在电价峰价时段的成本降低至小于高炉长流程炼钢,因此场景 2 和场景 3 相较于场景 1 并没有提高电炉短流程炼钢的产量。

3) 当引入高炉煤气发电机组后(场景 4) 相较于场景 3,电炉短流程炼钢的峰时电价区间的折合吨钢成本由 3 000 元降低至 2 900 元,高炉长流程炼钢的峰时电价区间的折合吨钢成本由 2 996 元降低至 2 965 元,光伏发电和高炉煤气发电机组发电产生的额外收益使电炉短流程炼钢在峰时电价区间折合吨钢成本小于高炉长流程炼钢,此时园区内企业倾向于提高电炉炼钢的产量以节约日生产成本。

4) 储气设备的引入使煤气在每个调度周期的产生与高炉长流程炼钢的产量“解耦”,高炉煤气发电机组发电产生的额外收益更多补贴到了电炉短流程炼钢工艺上,相较于场景 4,场景 5 电炉短流程炼钢与高炉长流程炼钢折合吨钢成本的差值从 65 元增大至 82 元,使电炉钢的比例进一步加大。

综上所述,如场景 5 描述的具备分布式光伏、储电设备、高炉煤气发电机组和储气设备的钢铁工业园区综合能源系统可以有效降低碳排放和园区运行成本。

3.2.2 园区电炉钢替代潜力的评估

将场景 5 设定为以固定的电炉钢比例进行生产,观察园区电炉钢比例升高时日运行成本的变化。当电炉钢比例从 15% 变化到 35% 时,其日生产成本变化如表 8 所示。

表 8 电炉钢比例变化时日生产成本变化
Table 8 Change in daily production costs when the proportion of electric arc furnace steel changes 元

电炉钢比例	C_1	C_2	C_3	C_4	C
0.15	11 057 000	396 205	235 200	48 281	11 736 686
0.20	11 016 000	415 601	225 600	45 711	11 702 912
0.25	10 975 000	460 954	216 000	43 140	11 695 094
0.30	10 934 000	513 566	206 400	40 594	11 694 560
0.35	10 893 000	566 339	196 800	38 025	11 694 165

从园区经济性指标中可以看到,从 15% 的电炉钢比例到 35% 的电炉钢比例,碳排放处理费用降低了 16.3%,并且由于园区更多使用非峰电时段电能进行电炉短流程炼钢和减少高炉长流程炼钢,园区的设备运维成本也逐渐降低,园区的日运行成本也随之降低。

进一步提高电炉钢的比例,当电炉钢比例提高到 40% 时,相较于 35% 的电炉钢比例,园区的日生产成本出现了上升,通过遍历,可以确定日运行成本最小时对应的电炉钢生成比例为 36.1%,如图 4 所示。

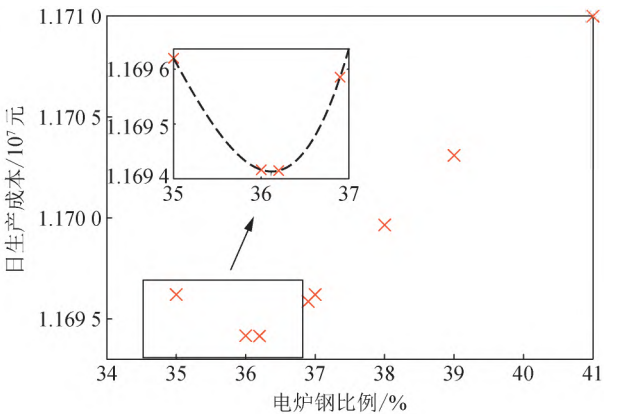


图 4 日生产成本与电炉钢比的关系
Fig. 4 Daily operating costs in relation to the electric arc furnace steel ratio

因此,相比于当前电炉钢比例 10% 的现状,场景 5 所述的钢铁工业园区将电炉钢比例提高到 36.1% 时,能够降低园区生产运行成本和碳排放,据此得出结论:所研究园区的电炉短流程炼钢替代高炉长流程炼钢潜力为 29%。

3.2.3 对园区节能减碳潜力的讨论

图 5 所示为表 6 中不同电炉钢比例场景以及 10% 电炉钢场景对应的用能比例以及总能耗。随着

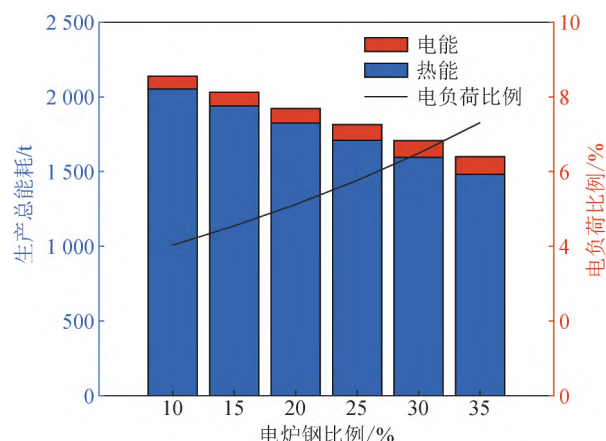


图5 不同电炉钢比例下电热负荷比例以及总能耗

Fig. 5 Proportion of electric heat load and total energy consumption for different electric arc furnace steel ratios

新能源、储能设备和高炉煤气发电技术的引入,电负荷部分替代了热负荷,生产能效也有提高,因为高炉长流程炼钢的能源使用效率较低,大量的能量以热能形式散逸,而以电能为主要驱动的电炉短流程炼钢利用电能直接发热熔炼金属,能量利用率高,因此随着电炉钢比例的提高,电负荷占生产所需负荷的比例将逐渐提高,园区生产能效也将提高,总能耗降低。

基于本文的研究数据和该园区每年150万t粗钢产量计算,电炉短流程炼钢的替代能带来巨大的碳减排效益,预计当电炉钢比例达到36.1%时,园区每年能够减少碳排放量1606.4t,相当于园区总碳排放量的19.6%,可有效降低园区碳排放。

通过以上讨论可知,随着未来电炉钢原料价格的进一步降低以及“双碳”进程的推进,以产业聚集型园区为主要生产形式的钢铁工业将更依赖于采用电炉短流程炼钢作为产能提升和减少碳排放的手段,推广具备分布式光伏、储电设备、高炉煤气发电机组和储气设备的钢铁工业园区综合能源系统建设方案,可以有效减少碳排放,助力钢铁行业碳达峰、碳中和的早日实现,助力全国2030年碳达峰目标的实现。

4 结 论

文中给出了典型钢铁工业园区综合能源系统结构,构建了电炉短流程炼钢、高炉长流程炼钢和高炉煤气发电机组的数学模型,建立了以日生产成本最低为目标的园区优化调度模型。通过比较不同的能源系统规划方案对园区运行成本的影响,以及不同电炉钢比例对园区经济性的影响,对所研究钢铁工业园区电炉钢比例的提高潜力进行了评估,得到以下结论:

1) 钢铁工业园区可以充分利用电价谷价和平价时段进行电炉短流程炼钢生产。在“双碳”背景下,当电炉短流程炼钢的成本优于高炉长流程炼钢时,企

业倾向于提高电炉炼钢的产量。

2) 对于典型钢铁工业园区,提高电炉钢比例可以实现节能减碳,当所研究钢铁工业园区电炉钢比例提高到36.1%时,可以实现碳排放和总能耗的双减,可每年减少园区碳排放19.6%,减少总生产能耗23.8%。

3) 具备分布式光伏、储电设备、高炉煤气发电机组和储气设备的钢铁工业园区综合能源系统规划方案,可以提高所研究园区自发电比例,有效减少电力侧碳排放,以及提高电炉钢比例,实现生产侧减碳。

本文仅考虑了全废钢电炉短流程炼钢工艺,未来将进一步研究“废钢+铁水”混合电炉短流程炼钢的合理性以及对钢铁工业碳排放和成本的影响。

5 参考文献

- [1] International Energy Agency. Global energy review: CO₂ emissions in 2020[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [2] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586(7830): 482-483.
- [3] 罗仕华,胡维昊,刘雯,等. 中国2060碳中和能源系统转型路径研究[J/OL]. 中国科学: 技术科学, 2022 [2022-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5844.TH.20220714.1552.002.html>.
- [4] LUO Shihua, HU Weihao, LIU Wen, et al. Transition pathway for China to achieve carbon neutrality by 2060[J/OL]. Scientia Sinica (Technologica), 2022 [2022-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5844.TH.20220714.1552.002.html>.
- [5] 王利兵,张赞. 中国能源碳排放因素分解与情景预测[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 1-9.
- [6] WANG Libing, ZHANG Yun. Factors decomposition and scenario prediction of energy-related CO₂ emissions in China[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 1-9.
- [7] World Steel Association. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020[EB/OL]. Brussels: World Steel Association, 2021 [2022-8-15]. <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/Global-crude-steel-output-decreases-by-0.9-in-2020.html>.
- [8] World Steel Association. Steel statistical yearbooks 2000 to 2019[R]. Brussels: World Steel Association, 2011-2022.
- [9] 工业和信息化部,发展改革委,生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见[EB/OL]. 北京: 工业和信息化部,发展改革委,生态环境部, 2022 [2022-1-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm.
- [10] 姚同路,吴伟,杨勇,等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505-513.
- [11] YAO Tonglu, WU Wei, YANG Yong, et al. Analysis on low-carbon development of China's steel industry under “dual-carbon” goal[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(6): 505-513.
- [12] 上官方钦,殷瑞钰,李煜,等. 论中国发展全废钢电炉流程的战略意义[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 86-92.
- [13] SHANGGUAN Fangqin, YIN Ruiyu, LI Yu, et al. Discussion on

- strategic significance of developing full scrap EAF process in China [J]. Iron & Steel, 2021, 56(8): 86-92.
- [10] VERCAMMEN S, CHALABYAN A, RAMSBOTTOM O, et al. The growing importance of steep scrap in China [R]. New York: McKinsey Company, 2017.
- [11] CHALABYAN A, LI Y, TANG R, et al. How should steelmakers adapt at the dawn of the EAF mini-mill era in China? [R]. New York: McKinsey Company, 2019.
- [12] 李鸿熹. 基于出口垄断势力的中国铁矿石贸易分析[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- LI Hongxi. Analysis of China iron ore trade based on export monopoly power [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [13] WU J, YAG J, MA L, et al. A system analysis of the development strategy of iron ore in China [J]. Resources Policy, 2016, 48: 32-40.
- [14] 朱凯, 张艳红. “双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 65-72.
- ZHU Kai, ZHANG Yanhong. Research on application of hydrogen in power industry under “double carbon” circumstance [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 65-72.
- [15] 危中良, 戴金华. 氢能在钢铁企业应用方向的探讨[J]. 冶金动力, 2022, 41(3): 67-70, 86.
- WEI Zhongliang, DAI Jinhua. Discussion on the application direction of hydrogen energy in iron and steel enterprises [J]. Metallurgical Power, 2022, 41(3): 67-70, 86.
- [16] 张焱, 郝振波, 朱振涛, 等. 海上风能岸上制氢的经济可行性分析[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 148-154.
- ZHANG Yan, HAO Zhenbo, ZHU Zhentao, et al. Economic feasibility analysis of onshore hydrogen production using offshore wind power [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 148-154.
- [17] 李峰, 储满生, 唐珏, 等. 基于LCA的煤制气-气基竖炉-电炉短流程和高炉-转炉流程环境影响分析[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 577-583.
- LI Feng, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Environmental performance analysis of coal gasification-shaft furnace-electric furnace process and BF-BOF process based on life cycle assessment [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7): 577-583.
- [18] 李少飞, 顾华志, 黄奥. 钢铁行业氢冶金技术的发展初探[J]. 耐火材料, 2021, 55(4): 360-363.
- LI Shaofei, GU Huazhi, HUANG Ao. Development of hydrogen metallurgy technology in iron and steel industry [J]. Refractories, 2021, 55(4): 360-363.
- [19] 柴锡翠, 岳强, 张钰洁, 等. 氢冶金的研究现状及其能耗状况分析[C]//第十一届全国能源与热工学术年会论文集. 安徽: 中国金属学会能源与热工分会, 2021: 117-125.
- CHAI Xicui, YUE Qiang, ZHANG Yujie, et al. Research status and energy consumption analysis of hydrogen metallurgy [C]// Proceedings of the 11th Conference on Energy and Thermal Engineering. Anhui: Energy and Thermal Engineering Branch of the Chinese Society for Metals, 2021: 117-125.
- [20] 张鹏成, 徐箭, 孙元章, 等. 氢能驱动下钢铁园区能源系统低碳发展模式[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 10-20.
- ZHANG Pengcheng, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Low-carbon development mode for energy system of iron and steel park driven by hydrogen energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 10-20.
- [21] 侯明山, 范新有, 刘超, 等. 非碳冶金高温熔炼的研究[J]. 特殊钢, 2011, 32(5): 14-17.
- HOU Mingshan, FAN Xinyou, LIU Chao, et al. A study on non-carbon steelmaking at high temperature [J]. Special Steel, 2011, 32(5): 14-17.
- [22] 孙彦广, 梁青艳, 李文兵, 等. 基于能量流网络仿真的钢铁工业多能源介质优化调度[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 1065-1079.
- SUN Yanguang, LIANG Qingyan, LI Wenbing, et al. Steel industry multi-type energy optimized scheduling with energy flow network simulation [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 1065-1079.
- [23] 梁青艳. 基于流程网络仿真的钢铁企业炼钢调度和能源优化[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2021.
- LIANG Qingyan. Steelmaking scheduling and energy optimization of iron and steel enterprises based on process network simulation [D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2021.
- [24] 张琦, 提威, 杜涛, 等. 钢铁企业富余煤气-蒸汽-电力耦合模型及其应用[J]. 化工学报, 2011, 62(3): 753-758.
- ZHANG Qi, TI Wei, DU Tao, et al. Coupling model of gas-steam-electricity and its application in steel works [J]. CIESC Journal, 2011, 62(3): 753-758.
- [25] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
- MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [26] 邱纯, 应展烽, 冯奕, 等. 计及碳配额的混合储能综合微能源网优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 119-127.
- QIU Chun, YING Zhanfeng, FENG Yi, et al. Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering carbon quote [J]. Electrical Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 119-127.
- [27] 李晶, 王新江, 潘宏涛. 钢铁工业长流程和短流程的比较分析[N]. 世界金属导报, 2018-12-28(B02).
- LI Jing, WANG Xinjiang, PAN Hongtao. Comparative analysis of long and short processes in the steel industry [N]. World Metal Herald, 2018-12-28(B02).
- [28] 苏泽立. 高炉煤气回收发电项目碳减排问题探究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- SU Zeli. Discussion on carbon emission reduction of blast furnace gas recovery power generation project [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [29] 李海东. 全烧富余高炉煤气汽轮发电系统的设计及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- LI Haidong. Design and application of steam turbine power generation system burning all surplus blast furnace gas [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [30] 冯伟忠, 李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 452-461.
- FENG Weizhong, LI Li. Research and practice on development

- path of low-carbon , zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under “double carbon” targets [J]. Power Generation Technology , 2022 , 43(3) : 452-461.
- [31] 吴丹, 赵双鹏, 黄金船, 等. 浅谈高炉煤气在鞍钢的发电利用[J]. 冶金与材料, 2020 , 40(1) : 157-158.
- WU Dan , ZHAO Shuangpeng , HUANG Jinchuan , et al. Discussion on power generation utilization of blast furnace gas in angang [J]. Metallurgy and materials , 2020 , 40(1) : 157-158.
- [32] 张长云, 黄景光, 李振兴, 等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022 , 41(1) : 108-116.
- ZHANG Changyun , HUANG Jingguang , LI Zhenxing , et al. Optimal configuration of wind-hydrogen-storage hybrid microgrid capacity in polar environment [J]. Electrical Power Engineering Technology , 2022 , 41(1) : 108-116.
- [33] 汪锋, 豆南南, 喻冬梅. 基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费 CO₂ 排放量测算 [J]. 电力系统自动化, 2014 , 38(17) : 105-112.
- WANG Feng , DOU Nannan , YU Dongmei. Measurement of provincial CO₂ emission from fossil energy consumption based on carbon emission flow in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems , 2014 , 38(17) : 105-112.
- [34] 郑忠, 龙建宇, 高小强, 等. 钢铁企业以计划调度为核心的生产运行控制技术现状与展望 [J]. 计算机集成制造系统, 2014 , 20(11) : 2660-2674.
- ZHENG Zhong , LONG Jianyu , GAO Xiaoqiang , et al. Present situation and prospect of production control technology focusing on planning and scheduling in iron and steel enterprise [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2014 , 20(11) : 2660-2674.
- [35] 发展改革委, 国家能源局. 关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见 [EB/OL]. 北京: 发展改革委, 国家能源局, 2015 [2022-03-20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2878235.htm.
-
- 收稿日期: 2022-09-11
- 作者简介:
- 赵海祺(1999) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网控制和综合能源系统关键技术, E-mail: zhaohaiqi@zju.edu.cn;
- 董树锋(1982) 男, 博士, 副教授, 通信作者, 主要研究方向为电力系统高性能计算、综合能源系统优化运行, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn;
- 南斌(1998) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行优化, E-mail: 3160105500@zju.edu.cn;
- 张祥龙(1983) 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、智能电网规划与设计, E-mail: zhangxianglong@chinasperi.sgcc.com.cn。
- (编辑 张小飞)

附录 A

高炉长流程炼钢可回收的低热值煤气量的推导过程如下:

根据重钢公司生产线测试, 高炉、焦炉产生的煤气除生产自用、供动力能厂热车间、热力车间现有燃气锅炉用气外, 还将剩余大量的低热值高炉煤气。高炉、焦炉剩余煤气量之比约为 19:1。

之后计算各部分煤气的热值, 高炉煤气中可燃气体占比为 23% CO、2.7% H₂ 和 0.45% CH₄, 根据混合气体燃料的发热量计算公式, 可得:

$$Q_{\text{高炉}} = 3\,385.7 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{A1})$$

焦炉煤气中可燃气体占比为 11% CO、55% H₂、23% CH₄ 和 3.3% C_mH_n, 根据混合气体燃料的发热量计算公式, 可得:

$$Q_{\text{焦炉}} = 1\,4318.5 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{A2})$$

按照高炉、焦炉 19:1 的比例混合, 可得到回收煤气的热值:

$$Q_{\text{煤气}} = 4\,075 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{A3})$$

假设高炉长流程炼钢吨钢回收煤气为 $a \text{ m}^3/\text{t}$, 炼钢小时产量为 $b \text{ t/h}$, 则可用于发电的煤气功率为 $4\,075ab \text{ kJ/h}$, 约合 $1.13ab \text{ kW}$, 设定 $a = 150$, 则煤气回收功率 G_{lp} 与高炉长流程炼钢产量 K_1 的关系为:

$$G_{\text{lp}} = 170 \cdot K_{\text{lp}} \quad (\text{A4})$$

即煤气回收功率 G_{lp} 与高炉长流程炼钢用电功率 P_{lp} 的关系为:

$$G_{\text{lp}} = 1.13 \cdot P_{\text{lp}} \quad (\text{A5})$$