基于碳素流分析铁前系统 CO_2 排放及减排措施

杜学强[1,2]，周继程[1,3]，上官方钦[3]，郦秀萍[3]，崔志峰[4]

（1. 钢铁研究总院，北京 100081；2. 冶金自动化研究设计院，北京 100071；3. 中国钢研科技集团有限公司钢铁绿色化智能化技术中心，北京 100081；4. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：本文通过对铁前系统碳素流和能量流进行分析，并基于碳素平衡原理，构建工序层级和铁前系统层级的碳素流输入－输出模型，得出焦化工序的煤气燃烧、烧结工序的固体燃料和点火煤气消耗、炼铁工序焦炭和喷煤消耗的碳排放潜力最大，同时指出改变铁前系统能源结构和重视高炉煤气和焦炉煤气的回收与低碳化利用以及开发节能新技术是解决铁前系统 CO_2 排放问题的重要措施。

关键词：铁前系统；碳素流；能量流；CO_2；双碳；能源结构

中图分类号：X511；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0024－05

doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.004

CO_2 emission and reduction measures of pre-iron system based on carbon flow analysis

DU Xueqiang[1,2], ZHOU Jicheng[1,3], SHANGGUAN Fangqin[3], LI Xiuping[3], CUI Zhifeng[4]

(1. *Central Iron and Steel Research Institute, Beijing* 100081, *China*; 2. *Automation Research and Design Institute of Metallurgical Industry, Beijing* 100071, *China*; 3. *Steel Green Intelligent Technology Center, China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing* 100081, *China*; 4. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The input-output model of carbon flow at the process level and pre-iron system level is constructed based on the analysis on carbon flow and energy flow in the pre-iron system and the principle of carbon balance; it is concluded that the carbon emission potential of gas combustion in the coking process, solid fuel and ignition gas consumption in the sintering process, coke and coal injection consumption in the iron-making process is the greatest, while it is also pointed out that changing the energy structure of the pre-iron system and paying attention to the recovery and low carbon utilization of blast furnace gas and coke oven gas as well as developing new energy-saving technologies are important measures to solve the problem of CO_2 emissions in the pre-iron system.

Key words: pre-iron system; carbon flow; energy flow; CO_2; twin-carbon; energy structure

2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会作出“CO_2 力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”（简称“双碳”）的庄严承诺，体现了大国担当，也为钢铁行业绿色低碳发展明确了方向。“双碳”战略不是就低碳谈低碳，而是致力于建设公平繁荣的社会、富有竞争力的低碳经济。以碳排放总量控制和碳排放强度控制“双控”为抓手，促进经济结构、能源结构、产业结构的转型升级，推进生态文明建设和生态环境保护，持续改善生态环境质

收稿日期：2021－12－23；**修回日期**：2022－01－26

基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFB1712801)

作者简介：杜学强(1972—)，男，博士研究生，从事冶金自动化与节能评价方面的研究。

通讯作者：周继程(1981—)，男，博士，从事冶金流程工程学理论与应用方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量，推动高质量发展，建设美丽中国[1]。

钢铁工业经过 150 年的发展基本形成了两大类流程[4]：① 以铁矿石、煤炭等为原料的高炉—转炉—轧钢流程，即高炉—转炉长流程；② 以废钢资源为原料、电力为能源的电炉—精炼—连铸—轧钢流程，即电炉短流程，其碳排放强度约为长流程的 1/3 ~ 1/4[5]。由于资源条件限制，中国钢铁工业形成了以长流程为主的流程结构，其中长流程比例约占 90%，而电炉短流程的比例仅为 10% 左右。此外，铁前系统能源消耗约占全流程能源消耗总量的 70% 以上[6-8]，CO_2 排放约占企业 CO_2 直接排放量的 60% 以上。2020 年我国钢铁行业 CO_2 排放总量约为 1.7×10^9 t，约占全国 CO_2 排放总量的 15%，仅次于电力行业[2-3]。钢铁行业碳减排压力巨大，责任重大。因此，在“双碳”目标下，从碳素流的角度分析铁前系统碳足迹，从而挖掘铁前系统的减碳潜力，对于实现钢铁行业节能降碳具有重要意义。

1　关于钢铁行业碳减排途径

当前关于中国钢铁行业如何实现“碳达峰”、“碳中和”的讨论已在如火如荼的进行，行业管理部门也在积极制定钢铁行业“碳达峰”、“碳中和”路线图和行动方案。由于钢铁行业的碳排放总量与粗钢产量和碳排放强度密切相关。因此，要实现钢铁行业“碳达峰”首先要实现粗钢产量的达峰，如果粗钢产量持续增长，那么钢铁行业 CO_2 排放总量必定也持续增加，“碳达峰”也无从谈起。对于高炉—转炉长流程钢厂来说，如何降低碳排放强度应是当前钢铁企业重点关注的问题，可以从以下几个方面开展工作。

（1）优化企业原、燃料结构，提高废钢使用比例，降低铁钢比，减少能源消耗，进而降低 CO_2 排放。

（2）重视节能技术的应用效果，提高生产过程能源利用效率。

（3）重视全流程碳素流，尤其需对能源消耗比例较大的铁前系统进行深入研究，进一步挖掘其节能降碳潜力。

（4）重视界面技术的研究，尤其是炼铁—炼钢、炼钢—连铸、连铸—热轧的工序衔接，提高流程的运行效率，减少过程的能量损失，提高流程的系统能效。

（5）构建钢厂与社会或其他行业的生态链接，实现全社会的资源能源节约，进而降低全社会的能耗和 CO_2 排放。

2　高炉—转炉长流程中的碳足迹

高炉—转炉长流程的碳排放主要是由能源消耗引起，其煤炭约占长流程能源消耗总量的 95% 以上。周继程等[9]对钢铁制造流程能源转换机制的研究结果表明，高炉—转炉长流程能源转换的核心问题是煤的高效转换以及碳素能量流的高效运行问题。因此，对于高炉—转炉长流程而言，其 CO_2 排放实际上主要是煤在钢厂平面布置上进行传输、转换、利用的动态过程，其核心问题是碳素能源的高效转换和碳素能量流的高效运行问题，具体流程见图 1。

由图 1 可见，高炉—转炉长流程中的碳足迹如下：煤炭以洗精煤的形式进入焦化工序，被转换为焦炭、焦油、粗苯和焦炉煤气等二次能源，此时碳元素被转化为单质 C、CO、CO_2、CH_4、C-H 化合物等多种形式；焦粉或无烟煤在烧结工序被燃烧利用生成 CO_2 和少量 CO；焦炭和喷吹煤在高炉内经过燃烧和还原反应转化为高炉煤气和铁水中溶解的少量[C]；铁水中[C]在转炉炼钢工序与氧气发生化学反应转化为转炉煤气和钢水[C]；回收的副产煤气作为燃料被用于焦炉、烧结机、热风炉、加热炉、钢铁包烘烤等，少数企业利用副产煤气合成化工产品，但最终仍以 CO_2 的形式排放到大气中。

3　铁前系统碳素流输入 – 输出模型

由以上分析可知，铁前系统是长流程企业减少 CO_2 排放的重点。因此本文根据铁前系统的主要工序(焦化、烧结和炼铁)对其碳素流和能量流进行解析。

3.1　铁前系统碳素流与能量流分析

3.1.1　焦化工序中的碳素流与能量流

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

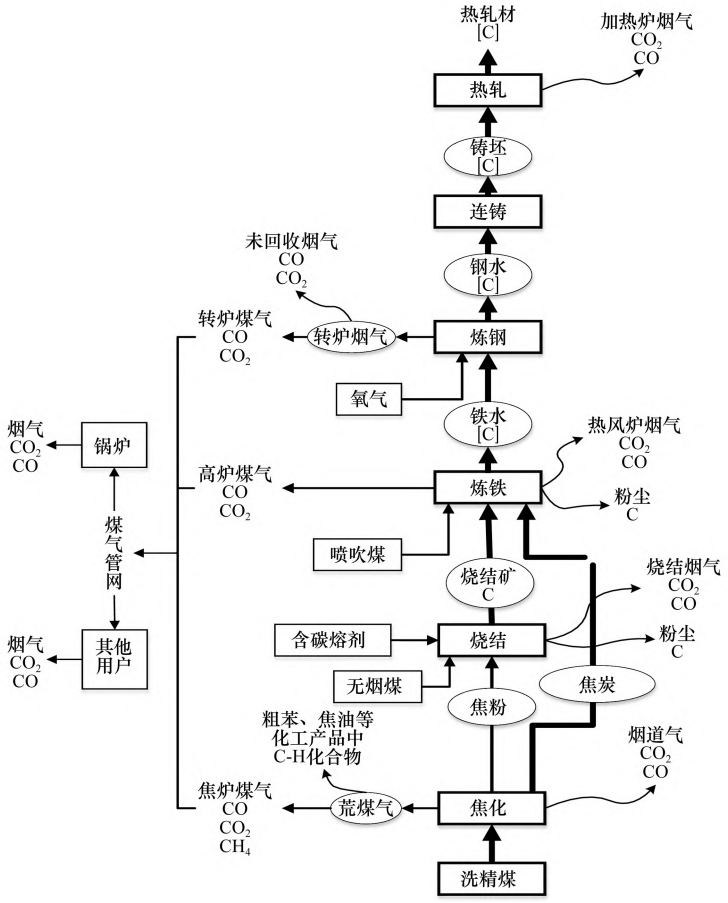


图1 高炉—转炉长流程碳足迹示意

Fig. 1 Carbon footprint diagram of BF-BOF process

焦化工序中的碳素流主要以洗精煤和气体燃料的形式进入，洗精煤在炭化室中通过燃烧室中的气体燃料(天然气、焦炉煤气、高炉煤气或混合煤气)燃烧间接加热干馏成焦炭，同时转换成焦炉煤气、焦油和粗苯等副产物中的C或碳氢化合物以及焦炉烟气中的CO_2等。

焦化工序的能量流主要是加热焦炉用煤气对炭化室内的洗精煤进行间接加热并发生干馏的过程，加热煤气的热量使得炭化室内的洗精煤转化为焦炭、焦炉煤气、焦油等其它化工产品及其相应的显热和热损失以及焦炉烟气显热。

由炼焦工序能量流分析可以得出：供给焦炉的热量，约有98%来自煤气的燃烧热，是主要的能量消耗；温度为1 000 ℃左右的焦炭带走的热量约占供入焦炉热量的35%~40%；温度为750~800 ℃的荒煤气带走的热量约占供入焦炉热量的30%左右[10]；回收焦炭、焦炉煤气的显热及潜热是余热回收、形成碳素流循环的重点。

3.1.2 烧结工序的碳素流与能量流

烧结工序中的碳素流主要以固体燃料和点火煤气的形式进入，固体燃料经过点火煤气点燃燃烧后最终转变为CO_2、CO，因烧结混合料中的固体燃料分布不均匀、烧结工艺不同等因素的影响，部分固体燃料燃烧不完全，形成了烧结粉尘和烧结矿以及返矿中的残碳。

烧结过程带入的能量主要包括点火煤气、固体燃料、返回料及粉尘中残碳等燃烧的化学热，还包括各种物料的显热和化学反应热等；能量支出主要是烧结矿和烧结废气带走的物理热，化学不完全燃烧与残碳损失的化学热，蒸发、分解耗热以及散热损失等。

烧结过程中铁素流与碳素流相互作用、相互影响。一方面铁素流在碳素流的作用下发生

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金属氧化物的还原反应，并生成液相，不同的燃料配比以及添加方式对烧结过程铁元素的物理状态、物理性质产生影响，表现为烧结矿的矿物组成、烧结矿质量和成品率变化；另一方面，烧结混合料中铁元素的不同物理性质以及返矿的比例和质量都将直接影响碳素流的耗散。

3.1.3　炼铁工序的碳素流与能量流

炼铁工序的碳素流主要是以焦炭、喷吹煤的形式进入高炉，在炉内与氧气和金属氧化物发生燃烧和化学反应被转换为 CO 和 CO_2；过程中也会发生少量的析碳反应。此外，由于高炉炉内的特殊条件，会有相当数量的碳元素发生渗碳反应进而溶入铁水。

可见，炼铁过程中碳素流主要来自焦炭和喷吹煤，少量来自烧结矿中的残碳；如果高炉内添加石灰石等含碳熔剂，则还会有少量来自含碳熔剂分解产生的 CO_2。碳素在高炉炉内发生复杂的物理和化学变化后，最终都将转化为 CO、CO_2 进入到高炉煤气中，部分溶解于铁水中，少量进入粉尘中随高炉煤气逸出炉外。

碳素在高炉炉内以氧化反应为主，大部分以 CO 和 CO_2 的形式进入高炉煤气，其中50%~55%左右被转化为 CO，45%~50%左右被转化为 CO_2；此外，吨铁约有 45~50 kg/t 的碳素通过渗碳溶入铁水，6 kg/t 左右进入粉尘[11]。

3.2　铁前工序碳素流输入－输出模型

铁前工序碳素流输入－输出模型见图 2。

结合图 2，以生产 1 t 生铁为基准，则工序的每股碳素流(碳素流的表现形式包括 CO、CO_2、CH_4 等)表示如下。

(1)来自外界的碳素流：作为能源或原料

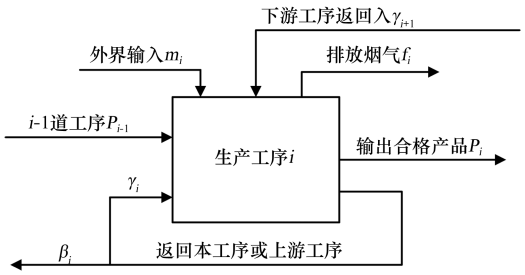


图 2　铁前工序碳素流输入－输出示意

Fig. 2　Input-output diagram of carbon flow in pre-iron process

从流程外加入第 i 道工序的原料(如洗精煤、焦炭等)，设其碳素流量为 m_i(t/t-$_{铁}$)。

(2) 来自上道工序的碳素流：第 i-1 道工序的产品携带的碳素输入给第 i 道工序，其碳素流量为 $p_{i\text{-}1}$(t/t-$_{铁}$)。

(3) 外排及外销的碳素流：第 i 道工序向环境排放的各种废烟气，其碳素流为 f_i(t/t-$_{铁}$)。

(4) 循环利用的碳素流：第 i 道及其下游各工序产生的副产煤气及不合格产品携带的碳素，作为原料重新返回到本工序或其他上游工序循环使用，其碳素流量分别为 λ_i、β_i、γ_{i+1}，(t/t-$_{铁}$)。

(5) 进入下道工序的碳素流：第 i 道工序生产的合格产品携带的碳素，其碳素流量为 P_i(t/t-$_{铁}$)。

由此建立第 i 道工序的碳素流输入－输出模型如式(1)：

$$m_i + p_{i-1} + \lambda_i + \gamma_{i+1} = P_i + \beta_i + f_i \tag{1}$$

3.3　铁前系统碳素流输入－输出模型

基于铁前生产工序的碳素流，假设铁前系统由 n 道生产工序组成，则钢铁制造流程的碳素流可如图 3 所示。

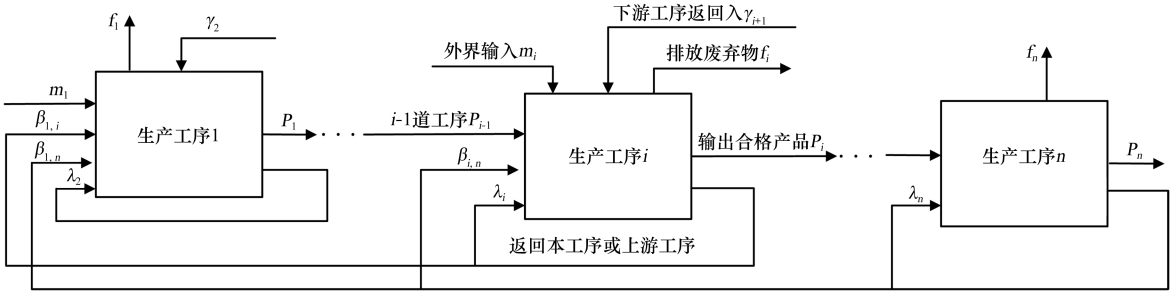


图 3　铁前系统碳素流输入－输出示意

Fig. 3　Input-output diagram of carbon flow in pre-iron system

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（1）吨铁外界输入碳素流，即生产1 t生铁所需外界输入的碳素总和m(t/t-$_{铁}$)如式(2)：

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{2}$$

（2）吨铁循环碳素流，即生产1 t生铁内部循环的碳素流总和β(t/t-$_{铁}$)如式(3)：

$$\beta = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \beta_{i,j} \tag{3}$$

（3）吨铁排放碳素流，即生产1 t生铁外排的碳素流总和q(t/t-$_{铁}$)如式(4)：

$$q = \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{4}$$

（4）吨铁CO_2直接排放：铁前系统在生产过程中排放的CO_2，主要包括企业自身消耗的化石燃料(煤、焦炭等)、碳酸盐熔剂(石灰石、白云石等)等含碳原料所产生的CO_2排放量Ω(t/t-$_{铁}$)如式(5)：

$$\Omega = \sum_{i=1}^{n} q_i \times \frac{44}{12} \tag{5}$$

4 铁前系统碳排放影响因素分析及减排措施

铁前系统的CO_2排放量与能源消耗密切相关，当能耗增加时，CO_2排放量必然增加。因此减少铁前系统CO_2排放量应从提高能源利用效率，减少化石能源消耗；采用碳素占比低的能源，比如天然气、氢气等；提高铁前系统二次能源回收利用效率，比如焦炉煤气、高炉煤气、冲渣水余热等方面开展工作。

通过对铁前系统碳素流和能量流分析可知，焦化工序的煤气燃烧、烧结工序的固体燃料和点火煤气消耗、炼铁工序的焦炭和喷煤的碳排放潜力最大。因此，改变铁前系统的能源结构是解决其CO_2排放问题的重要措施之一。铁前系统需要跟踪的碳减排技术包括高温高压干熄焦、低碳厚料层烧结技术、富氧烧结技术、生物质能烧结技术、微波烧结技术、烧结烟气循环利用技术、烧结矿显热高效回收技术、富氢高炉和全氧高炉等。

输入铁前系统的碳素约80%以CO_2和CO的形式进入煤气，吨焦焦炉煤气产生量约为400 m^3，吨铁高炉煤气产生量约为1 600 m^3。因此，对于铁前系统来说，应尽量提高煤气在系统内的利用率，减少煤气输出系统，但是对于钢铁全流程来说，高炉煤气和焦炉煤气又是不可或缺的燃料。因此，充分回收利用副产煤气，减少副产煤气的放散及其低碳化使用是铁前系统降低碳排放的另一个重要措施。主要途径包括：充分利用副产煤气，提高热风炉温度，从而降低高炉燃料比，减少CO_2排放；高炉喷吹焦炉煤气，实现富氢冶炼等。

5 结 论

（1）对于高炉—转炉长流程而言，其CO_2排放实际上主要是煤在钢厂平面布置上进行传输、转换、利用的动态过程，其核心问题是碳素能源的高效转换和碳素能量流的高效运行问题。

（2）建立了工序层级和铁前系统层级的碳素流输入－输出模型，铁前系统碳减排的核心是提高能源利用效率，减少碳素能源消耗。

（3）改变铁前系统能源结构和重视高炉煤气和焦炉煤气的回收与低碳化利用以及开发节能新技术是解决铁前系统CO_2排放问题的重要措施。

参考文献：

[1] 苍大强. 钢铁工业“碳达峰”“碳中和”及低碳技术的误区及实现路径[J]. 中国冶金,2021,31(9):3－8.
CANG Daqiang. Misunderstandings and realistic path of "carbon peak" "carbon neutrality" and low carbon technologies in iron and steel industry [J]. China Metallurgy,2021,31(9):3－8.

[2] 上官方钦,刘正东,殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金,2021,31(9):15～20.
SHANGGUAN Fangqin,LIU Zhengdong,YIN Ruiyu. Study on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutrality" in steel industry in China [J]. China Metallurgy,2021,31(9):15－20.

[3] 上官方钦,周继程,王海风,等. 气候变化与钢铁工业脱碳化发展[J]. 钢铁,2021,56(5):1－6.
SHANGGUAN Fangqin, ZHOU Jicheng, WANG Haifeng, et cl. Climate change and decarbonization developmengt of steel industry [J]. Iron and Steel,2021,56(5):1－6.

(下转第57页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

uation analysis and prospect of iron and steel raw material for electric arc furnace steelmaking[J]. Iron and Steel, 2021, 56(11):55 – 62.

[16] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2015:192.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2015: 192.

[17] International Organization for Standardization. Iron ores-Dynamic test for low-temperature reduction-disintegration: ISO 13930—2015[S].

[18] International Organization for Standardization. Iron ores-Determination of disintegration and metallization of feedstock for direct reduction by gas reforming processes: ISO 11257—1998[S].

[19] International Organization for Standardization. Iron ores-Determination of reducibility and metallization of feedstock for direct reduction by gas reforming processes: ISO 11258—1999[S].

[20] 徐梦杰. 铁精矿球团气基直接还原基础研究[D]. 长沙:中南大学,2018:45.
XU Mengjie. Fundamental research on gas-based direct reduction of pellets made from iron ore concentrates[D]. Changsha: Central South University, 2018:45.

[21] GUO Y, LIU K, CHEN F, et al. Effect of basicity on the reduction swelling behavior and mechanism of limestone fluxed iron ore pellets[J]. Powder Technology, 2021, 393:291 – 300.

[22] 张金良. 熔剂性赤铁矿球团焙烧特性及高炉还原行为研究[D]. 长沙:中南大学,2012:49 – 51.
ZHANG Jinliang. Roasting characteristics and reduction behaviors of fluxed Brazilian Hematite oxidized pellets[D]. Changsha: Central South University, 2012:49 – 51.

[23] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展[J]. 钢铁,2021,56(4):9 – 15.
GUO Yufeng, LIU Kuo, LIU Yajing, et al. Research progress on reduction swelling mechanism and influencing factors of iron ore pellets[J]. Iron and Steel, 2021, 56(4):9 – 15.

[24] YI L, HUANG Z, JIANG T, et al. Swelling behavior of iron ore pellet reduced by H_2-CO mixtures[J]. Powder Technology, 2015, 269:290 – 295.

(上接第 28 页)

[4] 殷瑞钰. 冶金流程工程学(第 2 版)[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
YIN Rui-yu. Metallurgical process engineering[M]. 2nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[5] 上官方钦,张春霞,胡长庆,等. 中国钢铁工业的 CO_2 排放估算[J]. 中国冶金,2010,20(5):37 – 42.
SHANGGUAN Fangqin, ZHANG Chunxia, HU Changqing, et al. Estimation on CO_2 emission in chinese iron and steel industry and enterprises[J]. China Metallurgy, 2010, 20(5): 37 – 42.

[6] 郦秀萍,上官方钦,周继程,等. 钢铁制造流程中碳素流运行与碳减排途径[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.
LI Xiuping, SHANGGUAN Fangqin, ZHOU Jicheng, et al. Carbon flow and carbon emission reduction in iron and steel manufacturing process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020.

[7] 张龙强,陈剑. 钢铁工业实现“碳达峰”探讨及减碳建议[J]. 中国冶金,2021,31(9):21 – 25;52.
ZHANG Longqiang, CHEN Jian. Discussion on achieving “carbon peak” and suggestions for reducing carbon in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9):21 – 25;52.

[8] 张琦,贾国玉,蔡九菊,等. 钢铁企业炼铁系统碳素流分析及 CO_2 减排措施[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(3):392 – 394;403.
ZHANG Qi, JIA Guoyu, CAI Jiuju, et al. Carbon flow analysis and CO_2 emission reduction strategies of Iron-making system in steel enterprise[J]. Journal of Northeastern University (Natrual Science), 2013, 34(3):392 – 394;403.

[9] 周继程,郦秀萍,上官方钦,等. 钢铁制造流程能源转换机制与能源利用效率分析[J]. 钢铁,2019,54(4):76 – 85.
ZHOU Jicheng, LI Xiuping, SHANGGUAN Fangqin, et al. Study on energy conversion mechanism and energy efficiency of steel manufacturing process[J]. Iron and Steel, 2019, 54(4):76 – 85.

[10] 胡长庆. 物质流、能量流分析与新一代钢铁制造流程[D]. 北京:钢铁研究总院,2006.
HU Changqing. Material flow, energy flow analysis and new generation steel manufacturing process[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2006.

[11] 周继程. 钢铁制造流程能量流网络构建与案例研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2014.
ZHOU Jicheng. Construction and case study on energy flow network of steel manufacturing process[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2014.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net