

基于数字仿真模型的钢铁长流程碳排放优化

张汉隆

华北电力大学数理学院, 河北 保定

收稿日期: 2022年2月17日; 录用日期: 2022年3月18日; 发布日期: 2022年3月24日

摘要

在碳达峰、碳中和目标下, 钢铁行业作为能源消费和二氧化碳排放大户, 面临着严峻的碳减排压力, 如何实现钢铁行业碳减排是一项迫切且巨大的系统工程。目前钢铁生产中以传统的长流程生产工艺为主, 该生产工艺具有成熟度高和成本低的优势, 但碳排放量较大。通过工艺流程划分, 物质流、碳素流的分析, 构建了长流程碳排放数字仿真模型, 详细分析了各工艺流程的碳排放情况, 并结合钢铁行业的低碳技术, 在充分考虑成本因素等约束的条件下, 构建了钢铁行业长流程生产工艺优化模型, 为推进长流程生产工艺实现减碳提质提供了可参考的优化方案。

关键词

钢铁行业, 碳排放, 工艺流程, 物质流, 碳素流

Optimization of Carbon Emission in Long Process of Iron and Steel Based on Digital Simulation Model

Hanlong Zhang

School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding Hebei

Received: Feb. 17th, 2022; accepted: Mar. 18th, 2022; published: Mar. 24th, 2022

Abstract

Under the goal of carbon peak and carbon neutralization, the iron and steel industry, as a major energy consumer and carbon dioxide emitter, is facing severe pressure on carbon emission reduction. How to realize carbon emission reduction in the iron and steel industry is an urgent and huge systematic project. At present, the traditional long process production process is mainly used in

iron and steel production. This production process has the advantages of high maturity and low cost, but the carbon emission is large. Through the division of process flow and the analysis of material flow and carbon flow, the long process carbon emission digital simulation model is constructed, the carbon emission of each process flow is analyzed in detail, and the long process production process optimization model of iron and steel industry is constructed in combination with the low-carbon technology of iron and steel industry and under the constraints of cost factors, it provides a reference optimization scheme for promoting long process production process to reduce carbon and improve quality.

Keywords

Iron and Steel Industry, Carbon Emissions, Technological Process, Material Flow, Carbon Flow

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢铁行业作为能源消耗和碳排放大户，占全国碳排放总量的 15%~18%。因此，为实现碳达峰碳中和的目标，推动钢铁行业的制度改革与科技创新迫在眉睫。目前，国内以长流程为主，占 90%左右，本文将基于数字仿真模型优化钢铁长流程碳排放。在满足当代钢铁行业生产需求的基础上，以钢铁行业长流程的几个主要工序为基础进行改进，实现低碳减排任务。曲余玲、张琦等分别为钢铁行业的低碳减排提出了宝贵的意见[1] [2]。当下，钢铁行业内部主要工序的能源利用效率低是钢铁行业低碳减排的主要问题，由于钢铁行业内缺乏低碳技术，成熟的低碳生产工艺未得到广泛应用，增加了碳排放。

本文将从以下三个方面研究：分工艺流程构建长流程碳排放数字化仿真模型，通过计算机程序求解模型满意解，改善各工序原料配比，实现碳减排；构建长流程资源循环利用体系，以桑基图为基础，用物质流表示内部资源的关系，改善长流程内部工序联系，实现碳减排；结合长流程成本约束限制、工序条件限制，同时运用新型低碳科技，改进钢铁行业的工艺，以降低碳排放量。

2. 碳排放计算方法分析

根据中国统计局公布的数据，2020 年内，中国粗钢产量达到 10.53 亿吨，同比增长 5.2%，钢铁行业能耗约占全国能耗的 8.9%。作为主要的碳排放行业，其在生产过程中存在高能耗、高污染、高排放等问题，需要对其内部工序进行工艺优化，提高能源利用率，推动钢铁行业高质量发展。而目前钢铁行业主流生产方式分为高炉-转炉(BF-BOF)路线(图 1)与电弧炉(EAF)路线(图 2)，本文将长流程生产方式为例进行分析，对现钢铁行业长流程生产方案提出改良优化方案。如图 1 所示，将钢铁行业内部工序分为焦化、烧结/球团、高炉、转炉、连铸、轧钢六大工序。通过对各工序碳排放的优化分析，利用图论提出整体的长流程生产工艺优化方案，助力钢铁行业减碳提质。

2.1. 钢铁行业长流程工序碳排放边界分析

如图 3 所示，各工序物质的流向已用箭头标出。据此，工序模型碳素流主要影响因子便可确定，进而根据主要影响因子成分的不同，确定各工序模型的变量。

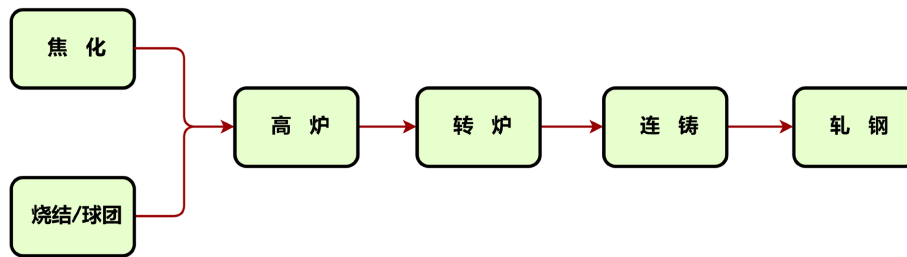


Figure 1. Route of BF-BOF

图 1. BF-BOF 路线

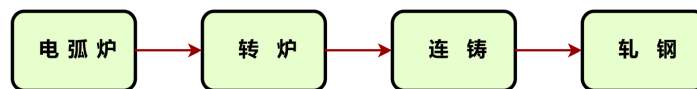


Figure 2. Route of EAF

图 2. EAF 路线

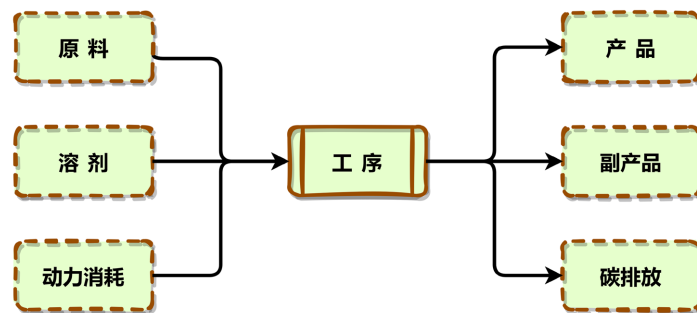


Figure 3. Process model boundary determination

图 3. 工序模型边界确定

2.2. 确定碳排放因子

碳排放因子是碳排放计算公式的关键，其计算方法取决于物质的含碳种类[3] [4] [5]。根据物质含碳种类的不同，本文将碳排放因子分为三类：直接碳排放因子、间接碳排放因子与抵扣碳排放因子。

直接碳排放因子计算公式如下：

$$\sigma_j = g_j \times c_j \times hv_j \times o_j$$

式中，下标 j 表示第 j 种原料； g_j 为原料购入量； c_j 是基于热值的排放因子； hv_j 是热值； o_j 为氧化率； σ_j 为原料直接碳排放因子。

间接碳排放因子计算公式如下：

$$\sigma_h = r_h \times u_h$$

式中， r_h 为 σ_h 生产时动力时消耗原料燃烧产生碳排放量； u_h 为动力终端所消耗利用效率。

抵扣碳排放因子计算公式如下：

$$\sigma_k = p_k \times s_k$$

式中， p_k 为原料所含碳元素比例； s_k 为碳元素转为二氧化碳的分子质量转化系数。

2.3. 碳排放计算公式的优化

根据 2.2 节中碳排放因子的分类，优化现有各工序碳排放计算公式如下：

$$PEC_i = \sum_{j=1}^J \sigma_j \times I_j + \sum_{h=J+1}^H \sigma_h \times I_h - \sum_{k=H+1}^N \sigma_k \times O_k$$

式中, I_j 表示为某种原料, $\sum_{j=1}^J \sigma_j \times I_j$ 表示某种原料含碳部分的碳排放量, 单位 tCO_2 , 此 σ_j 为直接碳排放因子; $\sum_{h=J+1}^H \sigma_h \times I_h$ 表示非含碳能源的碳排放量, 单位 tCO_2 , 此 σ_h 为间接碳排放因子; $\sum_{k=H+1}^N \sigma_k \times O_k$ 表示产品、副产品等的碳排放量, 单位 tCO_2 , 此 σ_k 为抵扣碳排放因子[3]。

得到各工序对应的优化碳排放计算公式后, 需要根据钢铁行业的碳素流图确定与碳排放因子相关的物质。所谓“碳素流图”, 即桑基图的一种表现形式, 通过观察此图, 可得到含碳物质在各个工序间的流向, 从而划分出碳输入物质和碳输出物质, 再根据物质的类型判断物质的碳排放因子所属的种类。

优化前的碳素流图绘制如图 4 所示。

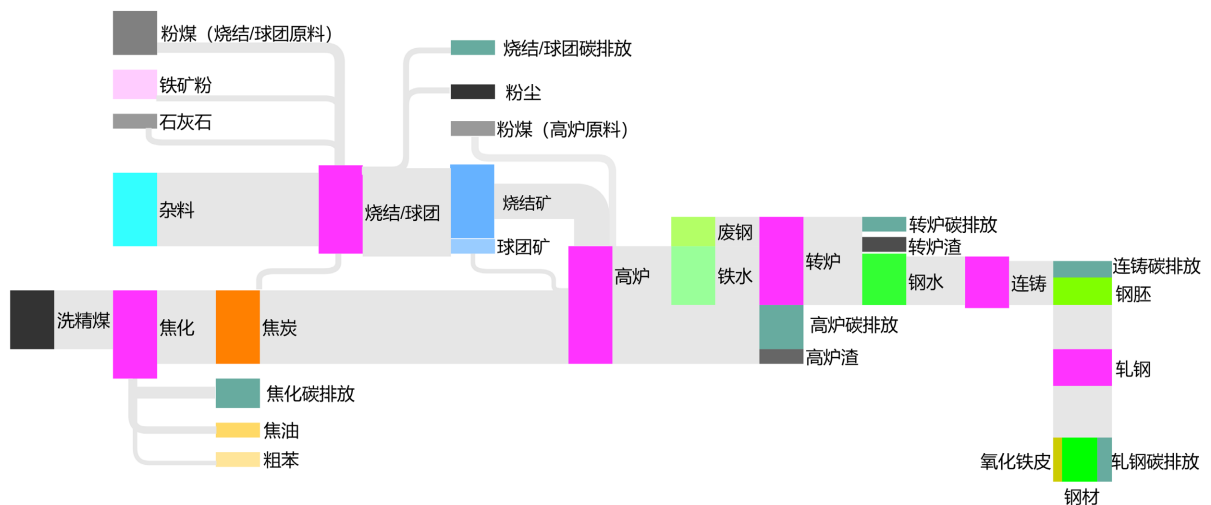


Figure 4. Carbon flow diagram

图 4. 碳素流图

随着钢铁行业不断发展, 促进钢铁行业碳达峰、碳中和的低碳科技也在不断提高, 通过搜集国家发布的节能低碳技术目录及其他相关人员研究[2], 以及对模型的试算, 本文将在图 4 基础上, 根据下面表 1 中的技术, 对相应工序模型进行优化, 使低碳科技应用到钢铁长流程生产数字仿真模型中。

Table 1. Examples of various processes of low-carbon technology

表 1. 低碳技术各工序采用举例

工序	低碳技术
焦化	干法熄焦 捣固炼焦技术
烧结	烧结余热回收利用技术 厚料层烧结技术
高炉	高炉喷煤技术 高炉煤气回收技术
轧制	加热炉蓄热式燃烧技术 连铸坯热装热送技术

3. 钢铁行业碳减排规划模型

3.1. 模型理论与求解

以钢铁行业长流程工艺的能源结构、内部关系、低碳科技应用条件等方面为约束对钢铁行业进行优化,旨在求得工序相应最低碳排放量。根据此最优解特性,选择使用规划模型构建工序模型。根据工序产品构建的碳素流网络,选取合适产品生产线路,求得最佳碳排放路径。

钢铁行业因工序产品多样,由工序总碳排放量每新加一道工序,使得该钢铁行业模型碳排放量在现加工序中仍保持最小碳排放量。将未在总模型内的工序不断加入到总模型内,进而选取出关于碳排放量的最小生成树,得到碳排放量最小、总体产量满意的钢铁行业长流程生产模型。

3.2. 数字仿真模型建立

根据钢铁长流程生产的客观规律,并注意到部分流程副产品可循环利用的特性,本文考虑从以下方面完成各工序模型的约束条件建立:

- 1) 成本上下限约束;
- 2) 原料供应量约束;
- 3) 元素守恒约束;
- 4) 反应元素供应量约束;
- 5) 物料守恒约束;
- 6) 工序产量约束;
- 7) 工序副产品产量约束(焦炉煤气、高炉煤气等);
- 8) 可循环利用副产品的守恒约束(焦炉煤气、高炉煤气等)。

下面以高炉工序模型建立为例:(其他流程数字仿真模型的约束条件,均来源于上面提到的八个方面,这里不再赘述)。

高炉工序规划模型

根据钢铁行业各个工序能耗的比较分析,高炉炼铁工序能耗约占到总体系统能耗 70%左右,高炉炼铁是钢铁行业减碳的重点[5]。

高炉工序变量确定:

根据高炉的原料数据、工艺和产品质量参数限制决定出对高炉碳排放具有影响的变量[6],见表 2。假定高炉生产出铁水量为 1 吨为结果进行建模。

Table 2. Variables of blast furnace process model
表 2. 高炉工序模型变量

变量	含义	计算单位/方式
x_1	烧结矿	kg/t
x_2	球团矿	kg/t
x_3	铁矿	kg/t
x_4	焦炭	kg/t
x_5	煤粉	kg/t
x_6	熔剂	kg/t
x_7	BFG 消耗量	m ³ /t

Continued

x_8	COG 消耗量	m^3/t
x_9	鼓风量	m^3/t
x_{10}	BFG 外输量	m^3/t
x_{11}	铁水 Si 元素量	%
x_{12}	铁水 P 元素量	%
x_{13}	铁水 S 元素量	%
x_{14}	铁水 Fe 元素量	%
x_{15}	铁水 Mn 元素量	%
x_{16}	铁水 C 元素量	%
x_{17}	高炉渣量	kg/t

高炉工序目标函数确定:

为达成钢铁行业碳减排目标, 将高炉工序模型用 CO_2 排放量作为目标函数, 通过规划模型求得最小 CO_2 排放量。根据上述条件, 列出高炉工序的目标函数:

$$PEC_{bf} = \sum_{i=1}^9 x_i \times \sigma_i - x_{10} \times \sigma_{10} - x_{16} \times \sigma_{16} - x_{17} \times \sigma_{17}$$

式中, PEC_{bf} 为高炉工序的 CO_2 排放量; σ_i 表示为 x_i 变量的碳排放因子。

高炉工序约束条件确定[7]:

1) 根据高炉炉渣的碱度, 要求生铁的三元碱度在一定范围内, 符合生铁的生产工艺:

$$\zeta_1 \leq \frac{\sum_{i=1}^6 (\text{CaO})_i x_i}{\sum_{i=1}^6 (\text{SiO}_2)_i x_i - \alpha_0 x_{11}} \leq \zeta_2$$

式中, ζ_1 表示二元碱度的下限; ζ_2 表示二元碱度的上限; α_0 为 Si 元素转化 SiO_2 成分转化系数。

2) 高炉炉渣中对 MgO 含量也具有含量要求:

$$\zeta_3 \leq \frac{\sum_{i=1}^6 (\text{MgO})_i x_i}{x_{17}} \leq \zeta_4$$

式中, ζ_3 表示 MgO 含量下限; ζ_4 表示 MgO 含量上限。

3) 高炉铁水对各个元素含量要求:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} = 1$$

$$\zeta_5 \leq x_{11} \leq \zeta_6$$

$$x_{12} \leq \zeta_7$$

$$x_{13} \leq \zeta_8$$

式中, ζ_5 对铁水中 Si 含量要求下限, ζ_6 对铁水中 Si 含量要求上限; ζ_7 对铁水中 P 含量要求上限; ζ_8 对铁水中 S 含量要求上限。

4) 高炉原料对矿石分量要求要求:

$$\zeta_9 \leq \frac{x_1}{\sum_{i=1}^6 x_i} \leq \zeta_{10}$$

$$\zeta_{11} \leq \frac{x_2}{\sum_{i=1}^6 x_i} \leq \zeta_{12}$$

$$\zeta_{13} \leq \frac{x_3}{\sum_{i=1}^6 x_i} \leq \zeta_{14}$$

$$\zeta_{15} \leq \frac{x_4}{\sum_{i=1}^6 x_i} \leq \zeta_{16}$$

式中, ζ_9 对矿石原料中烧结矿含量要求下限, ζ_{10} 对矿石原料中烧结矿含量要求上限; ζ_{11} 对矿石原料中球团矿含量要求下限, ζ_{12} 对矿石原料中球团矿含量要求上限; ζ_{13} 对矿石原料中铁矿含量要求下限, ζ_{14} 对矿石原料中铁矿含量要求上限; ζ_{15} 对矿石原料中焦炭含量要求下限, ζ_{16} 对焦炭原料中铁矿含量要求上限。

5) 高炉炉渣生成约束, 高炉炉渣主要由原料中矿石生成, 根据炉渣的主要成分, 通过原料矿石计算得出:

$$x_{17} = \sum_{i=1}^6 \left[(\text{CaO})_i + (\text{Al}_2\text{O}_3)_i + (\text{MgO})_i + (\text{S})_i + (\text{Mn})_i + (\text{SiO}_2)_i \right] x_i - \alpha_1 x_{13} - \alpha_2 x_{15} - \alpha_3 x_{11}$$

式中, α_1 为铁水转化炉渣 S 元素系数; α_2 为铁水转化炉渣 Mn 元素系数; α_3 为铁水转化炉渣 SiO_2 元素系数。

6) 高炉煤气生产平衡约束:

$$x_{10} = \alpha_4 \left[\sum_{i=1}^6 (\text{C})_i x_i + (\text{C})_8 x_8 + (\text{C})_9 x_9 - (\text{C})_7 x_7 \right] + \alpha_5 \left[(\text{H}_2)_8 x_8 + (\text{H}_2)_9 x_9 - (\text{H}_2)_7 x_7 \right] + \alpha_6 \left[(\text{N}_2)_8 x_8 + (\text{N}_2)_9 x_9 - (\text{N}_2)_7 x_7 \right]$$

式中, α_4 为 C 元素转化高炉煤气成分系数; α_5 为 H_2 转化高炉煤气成分系数; α_6 为 N_2 转化高炉煤气成分系数。

7) 高炉成本约束:

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i x_i + \beta_9 x_9 \leq CT_{bf}$$

式中, β_i 为 x_i 原料的价格转化系数; CT_{bf} 为高炉工序成本上限。

3.3. 系统模型简述

钢铁行业作为高能耗、高污染的碳排放大户。其行业生产流程又分为高炉-转炉长流程与电炉短流程生产方式, 两者碳排放量之间相差巨大, 新兴短流程较之长流程能耗低, 碳排放量少, 但其生产方式在国内较为少见。因此, 优化现有钢铁行业长流程生产模型是很有必要的。

钢铁行业长流程生产总体优化模型总目标函数如下:

$$E_c = \sum_{i=1}^6 PEC_i \times \delta_i$$

式中, E_c 为系统模型碳排放量; PEC_i 为工序模型碳排放量; δ_i 为钢铁碳排放转化系数。

总模型以六大基本工序为基础, 由各个工序规划模型结合得到, 完成对长流程工艺的优化。

在满足各工序模型工艺要求、成本要求、产品产量等约束的条件下, 以各工序原有生产技术为基础, 根据最优化路径算法, 适当选用符合生产实际的新型低碳科技, 使钢铁长流程生产碳减排更进一步。

4. 实例分析

以国内某钢铁厂长流程生产数据为模型输入, 利用 Python 编程语言的相关科学计算库, 实现模型并求出模型满意解。最后将优化结果与该厂实际生产情况进行对比, 以验证模型的优化效果; 并对满意解进行数据可视化分析, 为该厂的长流程工艺提供改进意见。

4.1. 焦化工序碳排放模型优化结果

结合某焦化厂生产工艺条件, 将相关工艺参数代入焦化工序碳减排模型。根据焦化厂生产情况得出焦化工序优化结果, 由表 3 表示。

Table 3. Carbon flow result of each unit product in coking process

表 3. 焦化工序各单位产品碳流结果

	物质	单位	用量	碳排放因子
原料	1/3 焦煤	kg/t	223.15	2.43
	肥煤	kg/t	205.67	2.38
	焦煤	kg/t	502.09	2.57
	瘦煤	kg/t	167.36	2.40
	气煤	kg/t	55.79	2.96
产品	焦炭	kg/t	1000.00	2.01
	焦油	kg/t	187.50	3.40
	粗笨	kg/t	62.50	3.47

经过上述模型优化结果计算得知焦化工序碳排放量为: 487.04 kg CO₂。相比与一般生产工序吨工序碳排放结果, 减少碳排放量 93.86 kg CO₂。

优化结果与该厂实际生产相比:

- 1) 肥煤用量减少约 50%;
- 2) 新增转炉煤气用量 278.94 kg。

综上所述, 焦化工序碳排放主要源头在于用煤种类选择上。

因此, 对于焦化工序碳减排方案重点应在煤炭等化石燃料的合理搭配利用, 同时综合使用煤气回收技术。

4.2. 烧结/球团工序碳排放模型优化结果

根据现烧结厂相关技术要求, 结合烧结模型, 解出烧结/球团模型优化结果, 具体情况如表 4 所示。

Table 4. Carbon flow result of each unit product in Sintering/pelletizing process**表 4.** 烧结/球团工序各单位产品碳流结果

	物质	单位	用量	碳排放因子
原料	南非粉	kg/t	179.04	0.0012
	纽曼粉	kg/t	166.07	0.0015
	巴西卡粉	kg/t	52.79	0.0008
	澳混合粉	kg/t	253.25	0.001
	镁粉	kg/t	298.86	0.0014
	烧结矿粉	kg/t	2.83×10^{-10}	0.0023
	焦粉	kg/t	50.00	3.077
	白云石	kg/t	3.11×10^{-10}	0.445
产品	生石灰	kg/t	3.16×10^{-10}	0.424
	烧结矿渣	kg/t	9.63×10^{-14}	0.0147
	烧结矿	kg/t	1000.00	0.0023

由上述情况计算求得现烧结碳减排优化结果为：152.67 kg CO₂。相比与传统烧结厂，模型优化结果减少碳排放量 27.27 kg CO₂。

根据上述结果表示，烧结工序能源消耗主要在于原矿配料选择情况上。

因此该厂可以通过选择合适原矿、寻找合适的原料配比解决烧结工序碳排放较多的问题。

4.3. 转炉工序碳排放模型优化结果

将转炉相关工艺参数，带入转炉工序优化模型，求得物质用料情况如表 5。

Table 5. Carbon flow result of each unit product in converter process**表 5.** 转炉工序各单位产品碳流结果

	物质	单位	用量	碳排放因子
原料	废钢	kg/t	337.48	0.0037
	铁水	kg/t	949.94	0.147
	石灰	kg/t	40.18	0.424
	白云石	kg/t	10.93	0.445
	矿石	kg/t	25.41	0.0012
产品	转炉炉渣	kg/t	162.42	0.073
	钢水	kg/t	1000.00	0.037

在转炉工序优化模型求得优化结果为：191.67 kg CO₂。与一般转炉工序碳排放量结果相比，碳排放量减少 36.32 kg CO₂。

优化结果与该厂实际生产结果相比：

- 1) 新增高炉煤气输入量 53.57 m³；
- 2) 新增焦炉煤气输入量 9.37 m³。

综上所述，转炉工序的碳减排方案主要还是在原有技术的基础上，适当引进煤气回收技术、余热回

收技术等的融合方案。

新型融合方案的实施会给转炉工序的节能减排方面带来较明显的成效。

4.4. 该钢铁厂总体碳排放模型优化结果

根据上述仿真模型求得，该厂最优吨钢碳排放量为 1583.40 kg，并绘制各工序碳排放量百分比对比图，如图 5 所示。

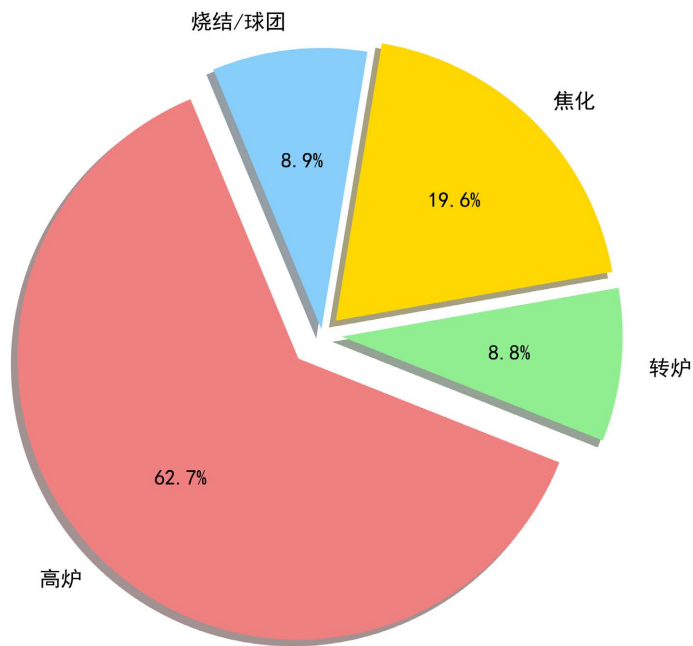


Figure 5. Comparison chart of carbon emission percentage of each process
图 5. 各工序碳排放量百分比对比图

以碳素流图为渠道，对钢铁长流程原有方案和本文提出的基于数字仿真优化方案进行对比，如下：

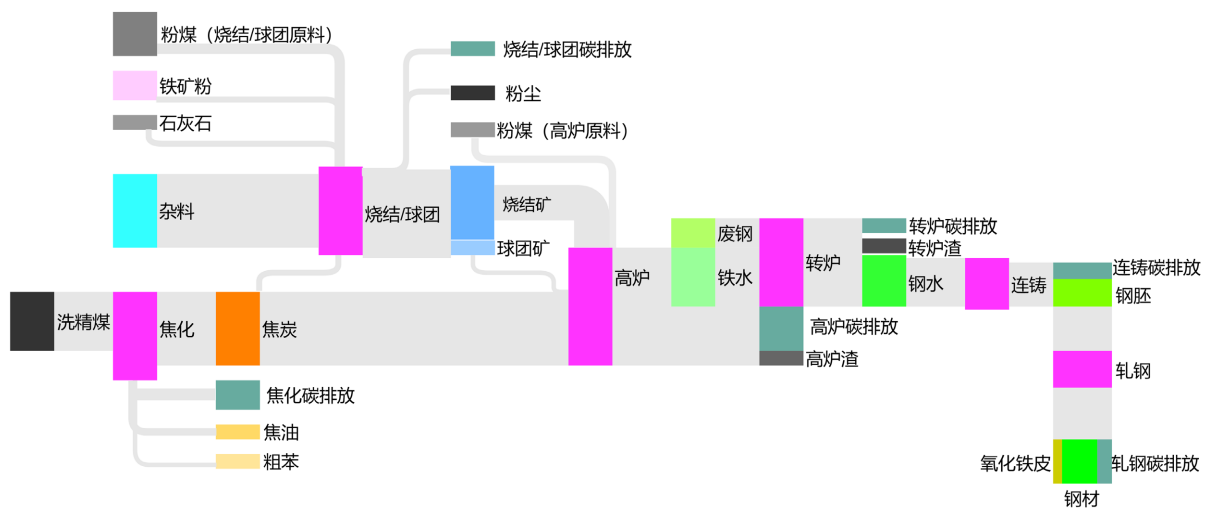


Figure 6. Carbon flow diagram of original scheme
图 6. 原有方案碳素流图

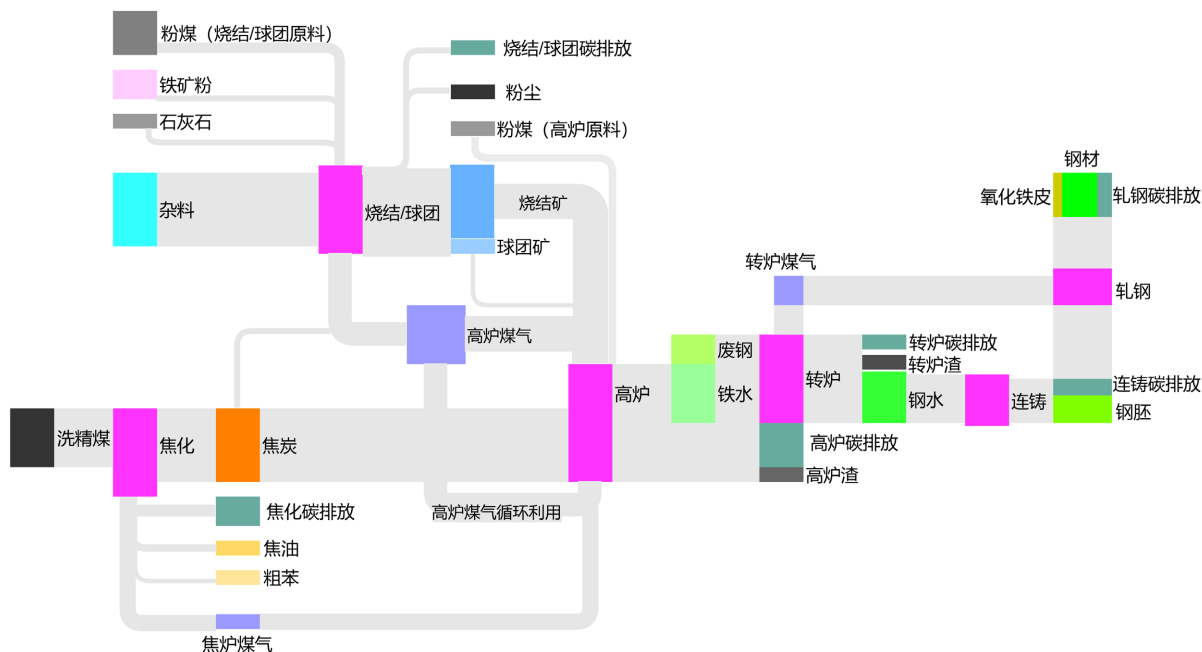


Figure 7. Optimization results of digital simulation model

图 7. 数字仿真模型优化结果

由图 5、图 6、图 7 结合 4.1~4.3 节的结果分析得到：由于钢铁行业长流程工艺中高炉工艺的碳排放量占比最大，钢铁行业应将低碳减排的重心放在高炉工序上，多引入成熟的新型低碳科技，同时优化生产过程中的能源供给结构。另外，各工序的具体碳减排方案可参考 4.1~4.3 节。

5. 总结

本文基于数字仿真模型，将钢铁行业长流程生产工艺数字化，利用运筹学中图模型的最小生成树理论进行建模，再考虑引进钢铁行业较成熟的低碳技术优化原有模型，最后基于最小生成树算法 Prim 算法的 Python 编程实现，辅以国内某钢铁企业的生产数据，求得该钢铁企业各个工序碳排放数字化仿真模型的满意解。

本文对满意解进行了不同形式的可视化，以便进行结果分析。

分析可得，该钢铁企业减少碳排放量的方法概括如下：在图模型满意解的指导下，减少原料消耗量、增加物料重复利用(如：钢铁行业系统中煤气回收利用)，使用新型低碳科技减少碳排放。

根据优化结果，对该钢铁企业提出以下几点建议：

1) 增加废钢使用量，将废钢利用到转炉炼钢当中，减少相应铁矿石的能源消耗。重复利用废料，仿照电炉短流程生产工艺，增加废钢使用比重，会有效减少钢铁行业长流程工艺的能源消耗与碳排放量。

2) 优化钢铁工业结构，改进钢铁长流程生产结构，需要从各个工序原料使用量及配比、新兴低碳科技使用等方面进行优化，进而为钢铁长流程生产的各个工序提供优化方案。

备注：

本文提出的模型主要基于一般性钢铁长流程生产理论建立，实际应用时还需根据实际情况，做适当修改。

致 谢

本文是在华北电力大学(保定)数理系刘明浩老师精心指导和大力支持下完成的。他渊博的知识、开阔

的视野和敏锐的思维给了我深深的启迪。

最后，再次对关心、帮助我的老师和同学表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 曲余玲, 狄嫣, 邢娜. 碳达峰、碳中和对钢铁行业的影响及路径分析[J]. 冶金经济与管理, 2021(4): 36-38.
- [2] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 152-163.
- [3] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 1-9.
- [4] 玉琦彤. 中国电力行业碳排放脱钩效应情景模拟[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 194-200.
- [5] 勾丽明, 张清华, 陈瀛, 等. 基于碳排放抵扣的碳排放计量方法研究——以钢材生产为例[J]. 中国环境管理, 2016, 8(6): 99-103.
- [6] 张宗旺, 车晓锐, 张宏博. 高炉多目标优化模型的建立及验证[J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 178-182.
- [7] 陈伟, 武鹏飞, 王宝祥, 等. 烧结-高炉炼铁全过程炉料结构智能优化系统[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 8-13+24.