高炉冶炼

基于碳税机制的高球比冶炼炼铁系统碳排放及经济性评估

孟啸宇[1]，张建良[1]，韩基祥[2]，焦克新[1]，陈子罗[2]，范筱玥[1]
（1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 中钢设备有限公司，北京 100080）

摘要：随着钢铁行业碳定价机制的日益完善，高炉炼铁的经济性评价正从单一的“生产成本”考量向“生产成本 + 碳税成本”转变。本文聚焦提高球团配比后高炉碳排放及碳税经济情况，构建涵盖炼铁系统的物质 - 能量流、碳排放与经济性分析模型，分析球团配比变化对炼铁系统能耗、碳排放及成本结构的影响。结果表明：当球团配比从 20% 增至 80% 时，吨铁 CO_2 排放量降低 12.46%，在不同碳价情景下炼铁总成本随球团配比呈现差异化变化特征。随着碳价提高，高球团配比带来的减排效益可转化为经济优势，提出“碳税反转点”可作为高炉炉料结构优化的重要经济判据。

关键词：高炉炼铁；高配比球团；碳排放；碳税；经济分析
中图分类号：F426.31；X322 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2026)01 - 0196 - 08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.017

Carbon emission and economic evaluation of blast furnace ironmaking systems with high pellet ratios based on carbon tax mechanism

MENG Xiaoyu[1], ZHANG Jianliang[1], HAN Jixiang[2], JIAO Kexin[1], CHEN Ziluo[2], FAN xiaoyue[1]
(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: With the increasingly perfecting of carbon pricing mechanisms in iron and steel industry, the economic evaluation of blast furnace ironmaking is changing from a single focus on “production costs” to a combined consideration of “production costs + carbon tax costs”. In this paper, through focusing on the carbon emission and carbon tax economics of blast furnaces after the pellet ratio is increased, a model including material-energy flow, carbon emission, and economic analysis of the ironmaking system is built to analyze the impact of changes in pellet ratio on energy consumption, carbon emission and cost structure. The results show that when the pellet ratio increases from 20% to 80%, the CO_2 emission per ton of iron decreases by 12.46%. Under different carbon price scenarios, the total cost of ironmaking shows characteristics of differential change with the pellet ratio changing. As carbon prices rise, the emission reduction benefits of high pellet ratio can be converted into economic advantages, it is proposed that the concept of “carbon tax reversal point” can be used as an important economic criterion for optimizing the burden structure of blast furnaces.

Key words: blast furnace ironmaking; high pellet ratio; carbon emission; carbon tax; economic analysis

钢铁工业作为能源消耗和二氧化碳排放最为集中的基础产业之一，正面临日益严格的碳排放

收稿日期：2026 - 01 - 09；**修回日期**：2026 - 01 - 13
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2024YFE0208900)
作者简介：孟啸宇(2000—)，男，博士研究生，从事炼铁排放追踪和炉缸活性研究。
通信作者：张建良(1965—)，男，教授，博士生导师，从事炼铁原燃料性能优化、高炉操作及高炉长寿、非高炉炼铁、炼铁过程大数据及智能化等方面的研究。

约束和持续攀升的碳定价压力。随着碳税、碳排放权交易等碳定价机制逐步建立并趋于强化，炼铁过程的经济性已不再仅由传统的原燃料价格和能耗水平决定，碳排放成本正成为影响工艺路线选择和生产制度优化的重要因素[1-2]。在此背景下，如何在满足高炉稳定运行与高效生产的前提下，实现碳排放的有效削减，并在经济层面具备可行性，已成为高炉炼铁技术发展的关键问题之一。

高炉炉料结构是影响炼铁过程能量利用效率、燃料消耗水平及碳排放强度的核心因素。提高球团矿在炉料中的配比，被普遍认为是一种具有显著节能减排潜力的技术途径[3-4]。球团矿作为优质炉料，具有更高的铁品位和更稳定的化学组成，有利于降低渣量、改善炉内反应条件，从而减少燃料消耗，降低单位铁水的碳排放强度[5-6]。然而在实际生产中，一方面受限于“双碳”政策推进初期，部分企业球团生产技术升级滞后，未能充分发挥其低碳优势；另一方面，企业长期面临球团生产原料对外依存度高、采购成本波动大，且球团生产过程中能源成本居高不下的双重压力，导致球团矿在高炉炉料中的占比普遍不高。

随着碳税政策的出台，高炉使用球团矿的减排优势逐渐得到重视，碳排放权交易市场的推进也促使炼铁成本进行重组。本文基于国内某钢铁企业 3 000 m^3 高炉的实际生产数据，构建多场景分析模型，量化球团矿配比对能耗、碳排放的影响，结合碳税政策测算成本变化，为高炉工艺低碳转型提供参数优化方案与经济评估依据。

1　工艺描述与核算边界

炼铁系统是高炉—转炉长流程中 CO_2 排放的重点环节，包含焦化、烧结、球团及高炉炼铁工序[7]。为系统评估球团配比变化对炼铁系统能耗、碳排放及经济性的影响，本研究以典型长流程炼铁体系为分析对象，构建覆盖焦化、烧结、球团及高炉炼铁工序的综合核算边界，自炼铁相关原燃料进入各工序起，至铁水产出及主要副产物形成止。焦化、烧结和球团工序作为高炉炉料和燃料的上游生产环节，其能源消耗和碳排放通过折算方式分配至单位产品；高炉炼铁工序则作为核心研究对象，直接核算其物质流、能量流及碳素流的变化情况。

1.1　焦化工序

焦化是高炉炼铁过程中最主要的固体燃料来源，其能耗与碳排放主要来源于炼焦煤中碳元素的转化以及焦炉加热过程中的燃料燃烧。焦化过程产生的煤气还可以作为燃料输送至球团工序与烧结工序。

1.2　烧结和球团工序

烧结和球团是高炉炉料准备阶段的两种主要工艺，其能源消耗结构和碳排放特征存在显著差异。烧结工序以固体燃料燃烧和高温氧化反应为主要特征，燃料消耗量较大，碳排放强度相对较高；而球团工序通常依赖气体或清洁燃料进行焙烧，单位碳排放水平较低[8]。在本研究中，球团配比的变化通过调整球团矿与烧结矿在高炉炉料中的配比实现。烧结和球团工序的能耗及碳排放按照单位成品矿的统计数据进行核算，并根据其在炉料结构中的配比变化，折算至单位铁水的系统能耗与碳排放中。为保证分析的可比性，假定两种炉料的化学成分和粒度指标满足高炉稳定运行要求。

1.3　高炉工序

高炉炼铁工序是系统内能源消耗和碳排放最集中的环节，其能耗主要来源于焦炭燃烧、喷吹煤燃烧以及鼓风系统的能量输入；碳排放则主要由燃料碳向炉顶煤气、铁水溶碳及其他碳素消耗的转化过程产生[9]。本研究在后续模型中将通过物质守恒、能量平衡及碳素流分析，对上述影响进行定量刻画。

2　模型构建

为定量评估球团配比变化对高炉炼铁过程物质－能量流、碳排放及经济性的综合影响，本研究在明确系统边界与核算原则的基础上，构建了一个由高炉物质－能量流模型、炼铁碳排放核算模型及经济性分析模型组成的综合分析框架。模型以球团配比为核心自变量，通过分析其对燃料消耗、碳排放强度及成本结构的影响，揭示不同

碳价情景下高配比球团冶炼的经济特征。

2.1 高炉物质－能量流模型

在高炉炼铁理论基础上，采用守恒分析的方法，对球团配比变化条件下的物质与能量流进行描述。以1 t铁水为计算基准，高炉炉料输入与输出满足质量守恒，方程见式(1)。

$$M_{in} = M_{out} \tag{1}$$

式中：M_{in}为输入总质量，kg/t，包括球团矿、烧结矿、焦炭、喷煤、助燃氧气等输入量；M_{out}为输出总质量，kg/t，包括铁水、炉渣、高炉煤气、粉尘等输出量。

高炉炼铁的能量输入等于能量输出与损失之和，方程见式(2)。

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \tag{2}$$

式中：Q_{in}为能量总输入，GJ/t，包括焦炭燃烧热、喷煤燃烧热、热风物理热等输入；Q_{out}为能量总输出，GJ/t，包括铁水物理热、炉渣物理热、高炉煤气化学热等输出；Q_{loss}为能量损失，GJ/t，包括炉体散热、冷却水带走热量等，按总输入能量的8%~10%计算。

球团配比提高后，炉料结构改善、渣量减少，使得单位铁水对应的熔渣显热消耗和反应热需求降低[10]。在满足高炉热平衡条件的情况下，单位铁水所需的燃料消耗量随之下降。基于上述关系，模型将球团配比与燃料比建立定量关联。

2.2 炼铁碳排放核算模型

碳排放核算遵循统一系统边界，包括炼铁系统各工序产生的温室气体排放，碳排放总和等于各工序排放之和，工序碳排放计算方法见式(3)。

$$E_C = E_{燃料} + E_{熔剂} + E_{电热} - E_{固碳} \tag{3}$$

式中：E_C为工序总排放，kg/t；$E_{燃料}$为燃料燃烧产生的直接碳排放，kg/t；$E_{熔剂}$为熔剂产生的直接碳排放，kg/t；$E_{电热}$为购入电力热力隐含的间接碳排放，kg/t；$E_{固碳}$为生产固碳产品的内含碳排放，kg/t；各项碳排放通过排放因子法进行计算，各工序的CO_2排放因子取自国家相关规定。

2.3 经济性分析模型

将炼铁工艺各参数的影响转化为每吨生铁的实际成本，进行经济评估。将综合成本拆解为生产成本和碳税成本，计算出某一时期内钢铁企业的炼铁综合成本。生产成本由企业当月生产财务报表得到。碳税成本根据式(4)计算。

$$T_C = E_C \times C_P \tag{4}$$

式中：T_C为碳税成本，元；C_P为碳价(每吨CO_2单价)，元/t。

通过上述经济性分析模型，本文能够系统评估球团配比变化在不同碳定价情景下的经济后果，为高炉炉料结构优化提供定量决策支持。

3 数据收集与验证

3.1 数据收集

本研究的数据来源：① 企业生产数据。该数据来自钢铁企业稳定生产期的生产报表，包括焦化、烧结、球团、高炉工序的原料单耗、能耗、产品产量等。② 行业标准数据。碳排放因子来自《企业温室气体排放核算与报告指南 钢铁行业(CETS—AG—03.01—V01—2024)》，能源价格来自《中国钢铁工业年鉴2024》[11-12]。③ 实验室分析数据。球团配比改变后炼铁系统生产参数变化由实验室模型分析计算。④ 碳税价格数据。预测未来碳税价格如表1所示[13]。

表1 预测碳税价格

Table 1 Predicted carbon tax prices

年份	保守碳税(CO_2单价)/(元·t^{-1})	激进碳税(CO_2单价)/(元·t^{-1})
2025	100	100
2030	130	207
2040	350	946
2050	1 000	2 593
2060	2 000	4 431

3.2 模型验证

为确保模型准确性，将冶炼关键参数代入模型，通过调整输入参数计算结果，与实际生产数据进行比较验证，高炉冶炼关键参数如表2所示，对高炉物质－能量流模型进行验证，允许物质流模型计算误差小于10 kg，能量流模型计算误差小于5%。

表3、4分别显示了物质－能量流模型的计算结果与工厂数据的误差验证，为基于模型参数改变分析对炼铁排放、综合成本的影响提供了可能。

表 2　高炉关键冶炼参数

Table 2　Key blast furnace smelting parameters

矿石结构（烧结∶球团∶块矿）	入炉品位/%	利用系数/（$t\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$）	焦比/（$kg\cdot t^{-1}$）	煤比/（$kg\cdot t^{-1}$）	风温/℃	富氧率/%
55∶30∶15	58.5	2.80	350	152	1 200	4.5

注：矿石结构指各组分间的质量比。

表 3　物料平衡

Table 3　Material balance

收入项/[kg·(tHM)$^{-1}$]						支出项/[kg·(tHM)$^{-1}$]					
矿石	焦炭	煤粉	风量	合计	绝对误差/%	生铁	炉渣	煤气	炉尘	合计	相对误差/%
1 626.85	350.00	152.00	1 207.17	3 336.02	4.65	1 000.00	317.61	1 992.53	21.24	3 331.38	0.14

表 4　能量平衡

Table 4　Energy balance

收入项	能量/[MJ·(tHM)$^{-1}$]	占比/%	支出项	能量/[MJ·(tHM)$^{-1}$]	占比/%
风口前碳素燃烧释放热量	2 480.00	25.25	氧化物分解耗热量	6 826.89	69.51
			脱硫耗热量	40.79	0.42
直接还原碳氧化放热	902.22	9.19	炉渣带走热量	864.32	8.80
			铁水带走热量	1 240.00	12.63
间接还原 CO 氧化放热	4 169.73	42.45	炉顶煤气带走热量	390.99	3.98
间接还原 H_2 氧化放热	584.12	5.95	游离水蒸发耗热	8.79	0.09
鼓风带入热量	1 685.50	17.16	炉尘带走热量	2.99	0.03
—	—	—	热损失	446.77	4.55
总计	9 821.57	100	总计	9 821.57	100

4　结果与讨论

4.1　高炉物质 – 能量流分析

基于高炉原燃料成分及关键冶炼参数，改变球团配比，采用高炉物质 – 能量流模型计算在球团配比为 20%~80% 情况下的物料消耗结果，探究球团配比对燃料消耗的影响，变化情况如表 5 所示。

由表 5 可知，炉球团配比提高 10%，吨铁矿石消耗降低 16.97 kg，渣量降低 19.02 kg，燃料比降低 6.2 kg。这主要是由于球团矿的铁品位较高、脉石含量低，使得在生产吨铁的情况下，入炉矿石量得以减少，渣量下降，同时炉渣带走的热量变少，高炉热量充沛，降低了焦炭在炉内的热负担，使得焦炭更多地用于还原反应而非补偿

表 5　球团配比对高炉冶炼参数的影响

Table 5　The influence of pellet ratio on blast furnace smelting parameters

球团配比/%	矿石消耗/[kg·(tHM)$^{-1}$]	渣量/[kg·(tHM)$^{-1}$]	焦比/[kg·(tHM)$^{-1}$]	燃料比/[kg·(tHM)$^{-1}$]
20	1 661.03	362.32	376.17	524.17
30	1 644.49	343.41	370.11	518.01
40	1 626.29	322.59	363.83	511.83
50	1 608.09	302.01	357.67	505.66
60	1 590.14	281.76	351.50	499.49
70	1 574.90	264.25	345.33	493.33
80	1 559.24	248.21	339.16	487.16

热损失，从而实现焦比的降低。但球团矿的加入导致软熔带上移[14]，需要配合良好的炉料透气性和稳定的料柱结构，在高炉稳定的条件下，提高球团配比能够为降低燃料消耗创造条件。

4.2 炼铁碳素流与碳排放分析

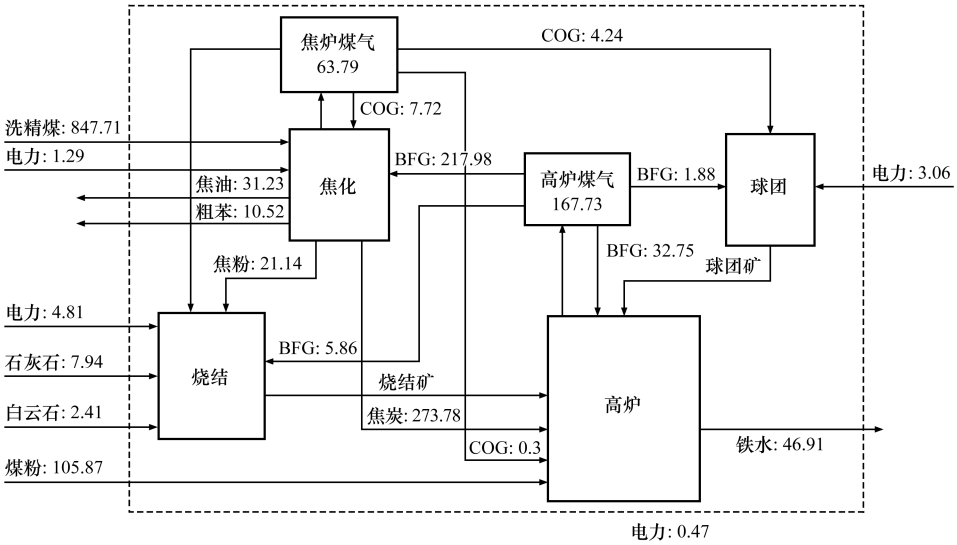
基于统一核算边界，对涵盖焦化、烧结、球团及高炉炼铁工序的炼铁系统碳素流向进行了定量分析，结果如图 1 所示。其中，焦化工序是系统的主要碳素来源，高炉工序是碳素消耗与排放的集中单元，而烧结和球团工序则在系统中承担碳素中间转化和能量利用的作用[15]。

炼铁系统的碳素流直接决定了碳排放的规模与路径，其核心是碳素的氧化过程与排放载体。焦化过程碳排放来源于洗精煤的干馏气化和煤气燃烧，除焦炭外还有焦油、粗苯等副产物产出；烧结、球团过程排放来源于焦粉、煤气的燃烧和熔剂分解释放的 CO_2；高炉炼铁综合焦炭、煤粉的气化和燃烧，生产出煤气的过程中大量碳素转化为 CO_2，各工序电力输入隐含的碳排放也需计入。当球团配比为 30% 时，各工序碳排放水平及占比分别如表 6 与图 2 所示。

由表 6 可知，此时碳排放为 1 159.05 kg/tHM，结合图 2 分析可知，球团工序除自身碳排放占比较低外，其减排潜力还体现在通过改善高炉炉料结构、降低燃料消耗，从而带动高炉和前端工序排放下降的系统效应。当球团配比由 20% 提高至 80% 时，炼铁系统各工序碳排放的变化趋势如图 3 所示。由图 3 可知，随着球团配比的提高，炼铁系统各工序碳排放呈现出明显差异化的变化趋势，影响程度最明显的是烧结和球团工序。随着球团配比从 20% 增加至 80%，吨铁产生的 CO_2 从 1 473.2 kg/tHM 降低至 1 289.7 kg/tHM，降幅达到 12.46%。每增加 10% 的球团配比，吨铁 CO_2 排放量可降低 22.9 kg 左右。高炉的碳排放随球团配比提高而持续下降，球团工序的碳排放随球团入炉量提高而逐步增加。然而，相比高炉和烧结工序的减排幅度，球团工序碳排放的增加量较小，系统整体碳排放仍向降低变化，焦化的碳排放同样下降，与前述物质 – 能量流分析中燃料比随球团配比降低的趋势一致。球团配比提高并未导致系统碳排放在工序间的转移，而是通过降低高炉燃料消耗和烧结矿需求，实现了炼铁全流程的净减排。

4.3 碳税驱动下的成本结构演变

为了量化碳约束对炼铁经济性的冲击，本研究建立了动态成本分析模型。以 30% 球团配比工况为例，当前生产成本（P_C）为 2 405.09 元/tHM，叠加 2025 年基准碳税后，总成本（T_C）升至 2 521.00 元/tHM。情景模拟显示，随着碳定价机制的深化，至2060年保守及激进情景下，吨铁成



数字代表生产1 t产品输入/输出的碳素质量，kg/t (例如生产1 t焦炭所用洗精煤输入的碳素质量为847.71 kg/t)；COG为焦炉煤气，BFG为高炉煤气。

图 1 炼铁系统碳素流分析

Fig. 1 Carbon flow analysis of the ironmaking system

表 6　炼铁工序碳排放水平

Table 6　Ironmaking process carbon emission level

工序	产品	(产量/用量)/[kg·(tHM)$^{-1}$]	排放因子/$tCO_2 \cdot t^{-1}$	CO_2排放量/[kg·(tHM)$^{-1}$]
焦化	焦炭	370	0.692	256.08
烧结	烧结矿	897	0.159	142.11
球团	球团矿	489	0.044	21.52
高炉	铁水	1 000	0.739	739.35
合计	—	—	—	1 159.05

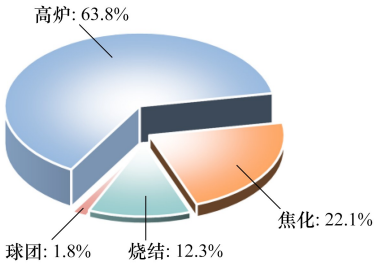
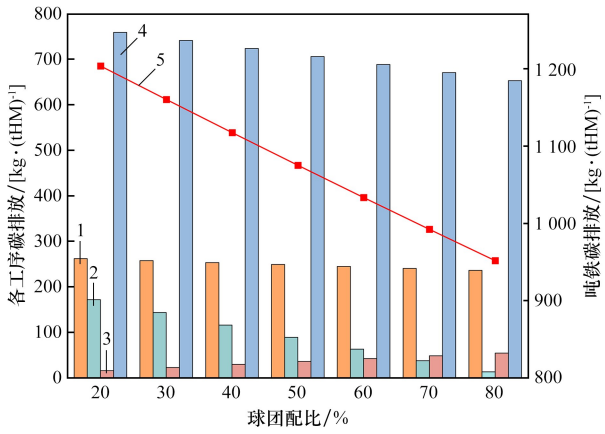


图 2　炼铁各工序排放占比

Fig. 2　Emission proportions of individual ironmaking process steps



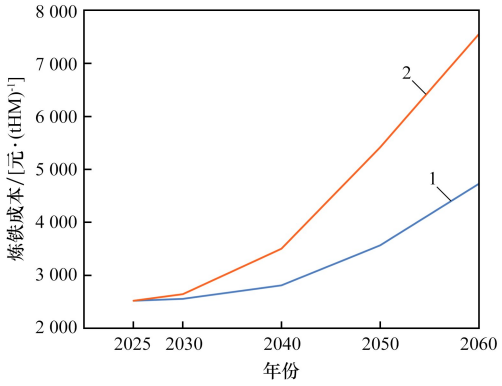
1—焦化；2—烧结；3—球团；4—高炉；5—总排放。

图 3　各工序碳排放随球团配比的变化情况

Fig. 3　Variation of carbon emissions in each process with pellet ratio

本将分别突破 4 700 元和 7 500 元大关，如图 4 所示。这一趋势表明，碳税成本正逐渐从高炉经济性的外生扰动因子转化为内生决定性因子。

在当前碳价水平下，碳税成本仅占炼铁总成本的一小部分，对炼铁经济性的影响相对有限。然而，在球团配比不变的条件下，碳税成本随碳价呈线性增长，并将在中长期情景下由成本边缘因素转变为炼铁经济性的主导因素。这一结果表



1—保守成本；2—激进成本。

图 4　球团配比 30%情况下含碳税的吨铁成本预测值

Fig. 4　Predicted hot metal cost per ton with carbon tax at 30% pellet ratio

明，未来碳价机制可能显著改变传统高炉炼铁工艺的经济评价体系。

随着未来碳价水平的提高，碳税成本在炼铁总成本中的占比不断增加，球团配比变化所引起的碳排放差异开始对总成本产生显著影响。图 5 展示了在不同碳价情景下，炼铁总成本相对于基准工况的变化量随球团配比的变化关系。

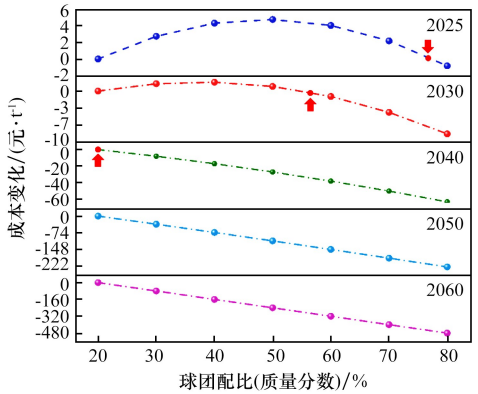


图 5　不同碳价阶段球团配比提升带来的总成本变化情况

Fig. 5　Total cost variation due to pellet ratio increase at different carbon price levels

由图 5 可知，在低碳价情景下，总成本变化随球团配比的提升呈现出明显的先升后降的特征，并在高球团配比区间出现成本平衡点，即为“碳税反转点”，在此点之后继续提升球团配比，总成本开始下降，说明随着碳价的提高，高球团配比带来的碳税经济优势逐渐可以抵消生产成本劣势。从长期视角来看，随着碳价水平的提高，“碳税反转点”逐渐向低球团配比方向移动，球团配比的经济最优区间随碳价水平动态变化，“碳税反转点”

为高炉炉料结构优化提供了明确的经济判据。

在高碳价情境下，总成本变化量呈现出明显的下降趋势，曲线斜率随着碳价的提高不断增大。这表明在高碳价情况下，提高球团配比带来的碳税经济优势远超其本身成本上升的负面影响，在高球团配比工况下表现出明显的经济优势。“碳税反转点”在高碳价情景下消失，这意味着在未来严格碳排放约束条件下，提高球团配比将成为炼铁过程的必然经济选择。

5 结 论

本文围绕高炉高配比球团冶炼条件下炼铁过程的碳排放特征及经济性问题，构建了涵盖高炉炼铁工序的物质－能量流、碳排放与经济性分析模型，系统研究了球团配比与碳价水平对炼铁总成本的耦合影响规律，主要结论如下。

（1）随着球团配比提高，高炉入炉原料结构得到优化，渣量和燃料消耗显著降低，系统能量利用效率得到改善。物质－能量流分析表明，炉料结构优化是驱动高炉燃料比下降和能耗降低的重要原因。

（2）炼铁系统碳排放强度随球团配比提高呈线性下降趋势。当球团配比从20%增至80%时，吨铁CO_2排放量降低12.46%（约183.5 kg/tHM）。虽然球团工序自身排放略有增加，但其带来的高炉燃料节约与烧结矿减量效应远超前者，实现了系统边界内的净减排。

（3）“碳税反转点”可作为炉料结构优化的经济判据。随着碳价升高，该反转点逐渐向低球团配比区间移动。在高碳价情景下，高球团配比带来的减排收益完全覆盖了原料成本劣势。这意味着在未来的碳约束环境下，提升球团配比将从单纯的技术减排手段，转变为降低炼铁总成本的必然经济选择。

参考文献：

[1] 上官方钦,段志伟,崔志峰,等. 新形势下中国钢铁行业碳达峰碳中和若干问题探讨[J]. 钢铁,2024,59(9):22－31.
SHANGGUAN Fangqin, DUAN Zhiwei, CUI Zhifeng, et al. Discussion on several issues of carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry under new situation[J]. Iron & Steel,2024,59(9):22－31.

[2] 顾颜,陈瑜. 碳市场对钢铁行业的影响及企业应对措施建议[J]. 冶金管理,2022(14):73－78.
GU Yan,CHEN Yu. Influence of carbon market on steel industry and suggestions for enterprises' countermeasures[J]. China Steel Focus,2022(14):73－78.

[3] 唐珏,秦纪乐,储满生,等. 低碳炼铁工艺发展现状探讨与展望[J]. 中国冶金,2025,35(7):83－95.
TANG Jue, QIN Jile, CHU Mansheng, et al. Discussion and prospects on development status of low-carbon ironmaking processes[J]. China Metallurgy, 2025, 35(7):83－95.

[4] 张福明,徐文轩,程相锋,等. 高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术分析[J]. 钢铁,2024,59(3):32－45.
ZHANG Fuming, XU Wenxuan, CHENG Xiangfeng, et al. Analysis on key process and technology of blast furnace ironmaking on high charging proportion of pellet ore[J]. Iron and Steel,2024,59(3):32－45.

[5] 张建良,刘征建,焦克新,等. 炼铁新技术及基础理论研究进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1630－1646.
ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, JIAO Kexin, et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021,43(12):1630－1646.

[6] CHEN M Y,ZHOU H,WANG C,et al. Influence of blast furnace pellet proportions on environmental impact and global warming:A life cycle assessment[J]. Fuel,2025, 381:133571.

[7] NA H M,SUN J C,YUAN Y X,et al. Theoretical energy consumption analysis for sustainable practices in iron and steel industry[J]. Metals,2024,14(5):563.

[8] 刘征建,黄建强,张建良,等. 高炉高比例球团冶炼技术发展和实践[J]. 辽宁科技大学学报,2021,44(2):85－91.
LIU Zhengjian, HUANG Jianqiang, ZHANG Jianliang, et al. Development and practice of high-pellet-proportion smelting technology of blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2021, 44(2):85－91.

[9] 刘征建,王家保,张建良,等. 高炉能耗现状及降耗技术展望[J]. 钢铁研究学报,2023,35(1):1－10.
LIU Zhengjian, WANG Jiabao, ZHANG Jianliang, et al.

Status of energy consumption and prospect of consumption reduction technology in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research,2023,35(1):1 – 10.

[10] 袁喻兴,闫天一,那洪明,等. 炼铁系统能耗和成本的集成优化及分析[J]. 中国冶金,2022,32(1):97 – 103.
YUAN Yuxing, YAN Tianyi, NA Hongming, et al. Integrated optimization and analysis of energy consumption and cost in ironmaking system[J]. China Metallurgy,2022,32(1):97 – 103.

[11] 生态环境部办公厅. 关于印发《企业温室气体排放核算与报告指南 钢铁行业(CETS—AG—03.01—V01—2024)》等 2 项全国碳排放权交易市场技术规范的通知[EB/OL]. (2025 – 01 – 24)[2026 – 01 – 09]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202501/t20250124_1101316.html.
General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on Printing and Distributing Two Technical Specifications for the National Carbon Emissions Trading Market, Including the Guidelines for Accounting and Reporting of Greenhouse Gas Emissions of Enterprises-Iron and Steel Industry (CETS-AG-03.01-V01-2024)[EB/OL]. (2025 – 01 – 24)[2026 – 01 – 09]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202501/t20250124_1101316.html.

[12] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会. 中国钢铁工业年鉴 2024[M]. 北京:冶金工业出版社,2024.
Editorial committee of China iron and steel industry yearbook. China iron and steel industry yearbook 2024[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2024.

[13] 陈德荣,张建良,李克江. 绿色低碳钢铁概论——中国钢铁碳中和之路[M]. 北京:冶金工业出版社,2025.
CHEN Derong, ZHANG Jianliang, LI Kejiang. Introduction to green and low-carbon steel:China's steel industry path to carbon neutrality[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2025.

[14] 范筱玥. 高炉软熔带渣相形成及演变基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
FAN Xiaoyue. Study on the formation and evolution of the slag phase in the cohesive zone of blast furnace[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2022.

[15] 杜学强,周继程,上官方钦,等. 基于碳素流分析铁前系统 CO_2 排放及减排措施[J]. 烧结球团,2022,47(1):24 – 28.
DU Xueqiang, ZHOU Jicheng, SHANGGUAN Fangqin, et al. CO_2 emission and reduction measures of pre-iron system based on carbon flow analysis[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):24 – 28.

(上接第 135 页)

[17] 何木光,张义贤,宋剑,等. 钒钛磁铁精矿预制粒烧结研究[J]. 中国冶金,2012,22(11):35 – 38.
HE Muguang,ZHANG Yixian,SONG Jian,et al. Sintering of V-Ti magnetite concentrate particles prefabricated[J]. China Metallurgy,2012,22(11):35 – 38.

[18] 杨永斌,唐培垚,王林,等. 预造球强化难制粒精矿烧结工艺[J]. 烧结球团,2024,49(3):25 – 32.
YANG Yongbin,TANG Pieyao,WANG Lin,et al. Process of pre-pelletizing strengthened sintering of refractory concentrates[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):25 – 32.

[19] 朱德庆,丑建磊,潘建,等. 圆筒混合机粘料机理研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):14 – 18.
ZHU Deqing,CHOU Jianlei,PAN Jian,et al. Mechanism research of material bonding on the drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):14 – 18.

[20] JIANG T,XU L P,ZHONG Q,et al. Efficient preparation of blast furnace burdens from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process[J]. JOM, 2021,73(1):326 – 333.

[21] JIANG T,YU Z W,PENG Z W,et al. Preparation of BF burden from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process (CAP)[J]. ISIJ International,2015,55(8):1599 – 1607.