

# 氢基竖炉工艺减污降碳协同绩效评价

罗宇洁, 李峰宇

(内蒙古科技大学 经济与管理学院, 内蒙古 包头 014000)

**[摘要]** 为了评价氢基竖炉工艺的减污降碳协同绩效,本文构建了氢基竖炉工艺减污降碳协同绩效评价体系,运用耦合协调度模型构建污染物排放、碳排放和成本控制三者之间的协同指数,并评价了传统高炉-转炉长流程和三种氢基竖炉工艺(焦炉煤气制氢、天然气制氢、绿电制氢)加电炉工艺的减污降碳协同效果。研究表明:在减少污染物排放和碳排放方面,全绿电绿氢工艺的表现最优;在成本方面,全绿电绿氢工艺的综合成本最高;对比各个工艺的减污降碳协同指数,氢基竖炉工艺在减污、降碳和成本控制之间的协调性强于长流程高炉-转炉工艺。其中,焦炉煤气制氢和天然气制氢工艺的减污降碳协同指数分别为0.843和0.722,分别达到了良好协调发展和中级协调发展的水平;而全绿电绿氢工艺由于成本过高,减污降碳协同效果次之,减污降碳协同指数只有0.463,处于濒临失调衰退程度,如果电价成本和贴现率可以降低,该工艺的整体协调效果也会随之上升。

**[关键词]** 氢基竖炉; 污染物排放; 碳排放; 成本控制; 绿电制氢; 耦合协调度

**[中图分类号]** TF55 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)04-0015-08

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.04.003

## 0 引言

当前我国生态文明建设已步入深度转型阶段,其核心战略正从末端治理转向源头控制,着力构建污染减排与碳减排协同治理体系。电力、工业、交通等行业是温室气体和污染物排放的主要来源,也是减污降碳协同增效的发力点。这些行业需要积极探索和实践减污降碳的有效路径和措施,以实现绿色低碳发展。其中,钢铁行业作为我国经济发展的基础和支柱产业,是落实减污降碳的重点行业。推动

钢铁行业节能减排、绿色低碳发展,不仅有助于实现“双碳”目标,而且是突破能源资源环境约束瓶颈、实现高质量发展的内在要求。为实现“双碳”目标,钢铁产业需减少对传统流程的依赖,发展新工艺技术,并分阶段确立研究重点,同时注重节能降碳减污的协同效应,推动全产业链的绿色转型和工艺革新,以实现可持续发展。

现在我国钢铁生产以“高炉-转炉”长流程为主,生产过程包括烧结、球团、焦化、高炉和转炉等工序,存在能耗高、CO<sub>2</sub>排放量大、污染物生成量多等问题。为降低钢铁生产过程二氧化碳排放,钢铁企业积极开展氢冶金技术路径研究,希望通过“以氢代碳”实现绿色低碳发展,其中氢基直接还原技术成为行业研究热点<sup>[1]</sup>。氢基竖炉直接还原技术是以富氢或纯氢气体作为还原剂,通过大型竖炉设备生产固态海绵铁的变革性技术,主要分为Midrex法和HYL/Energiron法两种方法,在国外已实现成熟应用<sup>[2]</sup>。Midrex法是以天然气为原料;HYL/Energiron法是以天然气、煤制气或焦炉煤气为原料,这两种方法制备的CO+H<sub>2</sub>总量均在90%以上。随着制氢技术的成熟,可以进一步制备减污降碳协同效果更好的绿氢,生产绿氢可以依赖多种技术,例如水电解、微生物电解、光电化学和光催化水分解、太阳能热化学水分解、直接水热解,以及某些生物质的气化、热解和重整过程<sup>[3]</sup>。

**[收稿日期]** 2025-06-04

**[基金项目]** 中央支持地方高校改革发展项目“聚焦于大气污染物与碳排放协同治理的内蒙古高碳行业减污降碳协同增效研究”(编号:040406220203/201)。

**[作者简介]** 罗宇洁(1973—),女,内蒙古包头人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为项目投资决策、资源型企业环境成本研究、行政事业性单位财务管理等。

**[通信作者]** 李峰宇(2000—),男,山西吕梁人,内蒙古科技大学硕士。

**[引用格式]** 罗宇洁,李峰宇.氢基竖炉工艺减污降碳协同绩效评价[J].绿色矿冶,2025,41(4):15-22.

LUO Yujie, LI Fengyu. Collaborative performance evaluation of pollution reduction and carbon reduction in hydrogen-based shaft furnace process[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(4): 15-22.

我国有关减污降碳协同评价的研究起步虽然较晚,但是发展很快,近年来相关的研究也是层出不穷。从研究对象来看,有学者从城市角度出发,直接以我国 270 个地级及以上的城市作为样本,研究中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析,发现不同时空尺度减污、降碳的主要驱动力有所差异,减污降碳效应存在南方优于北方、先减污后降排的发展趋势<sup>[4]</sup>。有关减污降碳协同评价的大多数研究都集中在城市和区域层面,而针对具体企业评价的研究相对较少。从研究方法来看,常用的减污降碳协同评价方法有相关系数法<sup>[5]</sup>、协同效应评估指数<sup>[6]</sup>、协同减排当量指标<sup>[7]</sup>、协同控制效应坐标系法<sup>[8]</sup>、弹性系数法<sup>[9]</sup>等。而本文采用耦合协调度模型,将耦合协调度定义为减污降碳协同指数,对不同钢铁冶炼工艺的减污降碳协同性展开评价。耦合协调度模型可以用于判断变量之间的发展是否有序,目前已经广泛应用于环境和碳排放等领域的相关性分析中。之前的评价方法都是构建两种变量各自变化的值,通过比值来反应两种变量的协同性,这类方法的缺点在于只能体现出二者是否协同,却不能进一步表示出二者的协同程度,而耦合协调度模型可以给出具体的变量耦合协调程度的值,更加直观地对比不同情况下的变量之间的协同度。

为研究焦炉煤气制氢、天然气制氢和绿电制氢这三种不同制氢方式下的氢基竖炉工艺,本文构建了污染物排放、碳排放和成本控制这 3 个维度的氢基竖炉减污降碳协同绩效评价体系,利用耦合协调

度的方法计算减污降碳协同指数,全面评价氢基竖炉工艺的减污降碳协同性,并且对电价和贴现率两个因素展开了敏感性分析,最后提出推进钢铁企业氢冶金减污降碳协同增效的政策建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究框架

为积极响应国家政策,从“双碳”目标发展到“减污降碳协同增效”目标,钢铁行业采取了各个方面的措施,在严格的能耗、环保、碳排放政策的约束下,积极开展氢冶金技术路径研究。为科学准确地量化氢基竖炉工艺的运行情况,实现以污染物排放、碳排放和成本控制这三者协同达到最优的目标,本文构建了减污降碳协同绩效指标体系,进而量化不同工艺的减污降碳协同指数。

从不同评价维度来看,污染物排放主要考虑的是大气污染物,包括颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>,以单位粗钢产量的颗粒物排放量、SO<sub>2</sub>排放量和 NO<sub>x</sub>排放量这三个指标进行核算;碳排放主要考虑的是 CO<sub>2</sub>排放量,因为钢铁企业在生产过程中排放的 CO<sub>2</sub>占温室气体的 99% 以上,且我国提出“2030 年达到碳达峰”的目标,所以以单位粗钢产量的 CO<sub>2</sub>排放量这一指标进行核算;成本控制主要考虑的是传统长流程和三种氢基竖炉工艺的投资成本以及能耗成本两部分,以单位粗钢产量的投资成本和能耗成本这两个指标进行核算(表 1)。以上指标性质均属于负向指标,指标数值越低,就代表减污降碳效果越好。

表 1 减污降碳协同绩效指标体系

维度层	指标层	公式	指标性质
污染物排放	单位粗钢产量的颗粒物排放量	颗粒物排放量/粗钢产量	负
	单位粗钢产量的 SO <sub>2</sub> 排放量	SO <sub>2</sub> 排放量/粗钢产量	负
	单位粗钢产量的 NO <sub>x</sub> 排放量	NO <sub>x</sub> 排放量/粗钢产量	负
碳排放	单位粗钢产量的 CO <sub>2</sub> 排放量	CO <sub>2</sub> 排放量/粗钢产量	负
成本控制	单位粗钢产量的投资成本	投资成本/粗钢产量	负
	单位粗钢产量的能耗成本	能耗成本/粗钢产量	负

### 1.2 减污降碳协同指数

耦合协调度是用于衡量两个或多个系统之间相互作用、协同发展程度的综合性指标。“耦合度”是反映系统间相互依赖的程度,“协调度”是反映系统间良性互动的程度,而“耦合协调度”结合了耦合度和协调度,广泛应用于经济学、生态学、城市规划、区域发展等领域,例如评估经济与环境的协调发展、城市化与资源利用的协同关系等;目前在环境和碳

排放的研究领域,耦合协调度也被广泛应用。传统长流程和三种氢基竖炉工艺的污染物排放、碳排放和成本控制这三者之间的耦合度计算公式<sup>[10]</sup>见式(1)。

$$C = \{U_1 \times U_2 \times U_3 / [(U_1 + U_2 + U_3) / 3]^3\}^{1/3} \quad (1)$$

式中, $C$ 为三个子系统耦合度; $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 分别表示污染物排放、碳排放、成本控制三个维度子系统的综合发展水平。耦合度采用极差标准化值表示,取值

范围是  $C \in [0, 1]$ 。当  $U_1 = U_2 = U_3$  时,  $C = 1$ , 表示系统间完全均衡; 若某一系统明显滞后,  $C$  趋近于 0;  $C$  值越大, 表示氢基竖炉工艺的污染物排放或碳排放或成本控制的效果越好, 反之越差。针对已有有关耦合度的研究, 将其分为不同的评价等级(表 2)。

表 2 耦合度及评价等级

耦合度( $C$ )	耦合度等级	含义
[0.00, 0.00]	耦合度极低	系统间处于无序状态
(0.00, 0.30]	低水平耦合阶段	系统间处于低耦合水平
(0.30, 0.50]	拮抗阶段	系统间处于拮抗阶段
(0.50, 0.80]	磨合阶段	系统间处于磨合阶段, 进入良性耦合
(0.80, 1.00]	高水平耦合阶段	系统间趋向于有序发展
[1.00, 1.00]	耦合度极高	系统间达到良性共生耦合, 系统将趋于新的有序结构

协调度计算公式见式(2)。

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \gamma U_3 \quad (2)$$

式中,  $T$  为协调度;  $\alpha, \beta, \gamma$  为权重系数, 反映不同系统的重要性, 需满足  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。本文研究焦点是“耦合协调度”, 核心在于衡量传统长流程三种制氢方式下氢基竖炉工艺中环境目标(污染物/碳排放)与经济目标(成本)之间的协同水平。若某一维度权重过高(如成本占 70%), 计算结果将退化为“经济性主导的减排评估”, 失去对“多目标协同”的表征能力。若赋予成本更高权重, 结果会系统性偏向焦炉煤气和天然气工艺(低成本高排放); 若赋予碳排放更高权重, 则绿氢(零碳高成本)必然占优, 只有等权重才可公平对比不同制氢路径的协同潜力。所以笔者认为污染物排放、碳排放和成本控制同等重要, 即  $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

耦合协调度计算公式见式(3)。

$$D = \sqrt{CT} \quad (3)$$

式中,  $D$  为耦合协调度, 本文将减污降碳协同指数定义为耦合协调度, 取值范围是  $D \in [0, 1]$ ; 当指数越接近 1, 说明氢基竖炉工艺的减污降碳协同效果越好, 反之越差。耦合协调度又可进一步划分为 10 种类型(表 3)。

### 1.2.1 污染物排放维度

污染物排放量的计算公式<sup>[11]</sup>见式(4):

$$G = B_g \beta_g \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中,  $G$  为某污染物排放量, 本文研究的污染物排放主要选取颗粒物、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ;  $B_g$  为燃料的消耗量;  $\beta_g$

表 3 耦合协调度及耦合协调类型

耦合协调度( $D$ )	阶段划分	类型划分
[0.00, 0.10)	失调衰退区	极度失调衰退
[0.10, 0.20)		严重失调衰退
[0.20, 0.30)		中度失调衰退
[0.30, 0.40)		轻度失调衰退
[0.40, 0.50)	过渡调和区	濒临失调衰退
[0.50, 0.60)		勉强协调发展
[0.60, 0.70)	协调发展区	初级协调发展
[0.70, 0.80)		中级协调发展
[0.80, 0.90)		良好协调发展
[0.90, 1.00]		优质协调发展

为各类污染物的排放因子, 见表 4。本文针对传统高炉-转炉长流程和焦炉煤气直接还原、天然气直接还原、全绿电绿氢直接还原三种不同的氢基竖炉工艺进行研究, 传统高炉-转炉长流程主要的排放源是燃烧煤和天然气, 其他少量的能源消耗暂不考虑; 焦炉煤气直接还原工艺主要的排放源是燃烧焦炉煤气; 天然气直接还原工艺主要的排放源是燃烧天然气; 而全绿电绿氢直接还原工艺的直接排放近乎为 0。

表 4 污染物排放因子参考值

排放来源	颗粒物	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$
燃烧焦炉煤气/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	0.50	0.20	0.30
燃烧天然气/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	0.24	0.10	0.63
燃烧煤/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	5.00	16.0	7.60

注: 污染物排放因子参考 IPCC、IEA 及行业报告 *Hydrogen Production Emissions*。

### 1.2.2 碳排放维度

碳排放量的计算公式<sup>[12]</sup>见式(5)~(7)。

$$E = E_f + E_p - E_c \quad (5)$$

$$E_f = \sum_{i=1}^n AD_i EF_i \quad (6)$$

$$E_{p,c} = \sum_{i=1}^n P_i EF_i \quad (7)$$

本文的碳排放定义为  $\text{CO}_2$  的排放, 式中  $E$  为  $\text{CO}_2$  排放总量;  $E_f$  为消耗的燃料燃烧产生的  $\text{CO}_2$  排放量;  $E_p$  为净购入电力消耗产生的  $\text{CO}_2$  量;  $E_c$  为固碳产品隐含的  $\text{CO}_2$  排放量;  $AD_i$  为第  $i$  种燃料的活动水平;  $EF_i$  为第  $i$  种燃料的碳排放因子;  $P_i$  为第  $i$  种物质的净消耗量, 电力资源的单位为  $\text{MW} \cdot \text{h}$ , 固体物质单位为  $\text{t}$ , 气体物质单位为  $\text{万 Nm}^3$ ;  $EF_i$  为第  $i$  种物质的

碳排放因子,见表5。

表5 CO<sub>2</sub>排放因子参考值

制氢方式	排放来源	CO <sub>2</sub> 排放因子
煤	燃烧煤	1.609 7 kg/kg
焦炉煤气	燃烧焦炉煤气	0.762 2 kg/m <sup>3</sup>
天然气	燃烧天然气	2.162 kg/m <sup>3</sup>

注:CO<sub>2</sub>排放因子参考《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》。

### 1.2.3 成本控制维度

成本的计算公式<sup>[13]</sup>见式(8)~(10)。

$$C = M_c / V \quad (8)$$

$$M_c = ACC_j + OM_j \quad (9)$$

$$ACC_j = I_j \frac{d}{[1 - (1 + d)^{-L_j}]} \quad (10)$$

式中, $C$ 为单位粗钢产量的总成本, $M_c$ 为氢基竖炉工艺的总成本, $V$ 为粗钢的产量; $ACC_j$ 为氢基竖炉工艺的投资成本; $I_j$ 为工艺 $j$ 的投资成本; $d$ 为折现率,本文中取8%; $L_j$ 为工艺 $j$ 的寿命; $OM_j$ 为氢基竖炉工艺的能耗成本。消耗能源只考虑主要燃烧能源,即煤、焦炉煤气、天然气和电力,其他少量的能源消耗暂不作考虑。

### 1.3 数据来源

本文选取的案例为某钢铁企业建设实施的氢基竖炉项目,采用氢气直接还原配合电炉短流程。氢基竖炉流程比传统长流程能耗更低、环境负荷更小,因为氢基竖炉的核心是气固逆流还原反应,利用氢气(H<sub>2</sub>)在高温下还原铁矿石(主要为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>),生成金属铁和水,产物中没有CO<sub>2</sub>,碳排放可以大幅减少,该工艺是钢铁行业低碳转型的关键技术。

氢基竖炉还原工艺流程如图1所示,首先还原气经过加热,在富氧环境下反应产生水、氢气和一氧化碳,与氧化球团接触发生还原反应,同时注入焦炉煤气与直接还原铁接触,再经过顶部气体热交换器,炉顶气的热量被用于生产蒸汽,后经过冷却和洗涤系统,经压缩机压缩,再通过二氧化碳捕集单元,选择性地脱除还原反应期间产生的二氧化碳;之后混合气体主要剩余成分为甲烷和氢气,再被送往加热炉用作补充还原剂,形成闭合的工艺气体回路。

本研究以粗钢产品为边界,计算传统长流程和氢基竖炉电炉短流程的污染物排放、碳排放和成本,其中排放因子引用了《中国钢铁生产企业温室气体

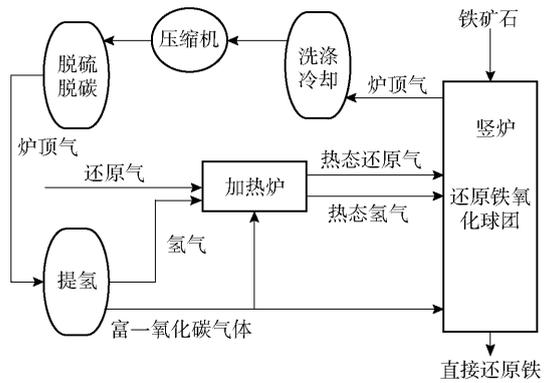


图1 氢基竖炉还原工艺流程

排放核算方法与报告指南(试行)》中的参考值,氢基直接还原还原污染物排放参考国内百万吨级天然气/焦炉煤气氢基竖炉项目环评数据。高炉-转炉长流程传统工艺和焦炉煤气、天然气以及绿电绿氢的氢基竖炉工艺流程的主要能源消耗及能源的价格见表6~7。

表6 某企业不同工艺下的主要能源消耗

工艺	煤/kg	焦炉煤气/m <sup>3</sup>	天然气/m <sup>3</sup>	电力/kW·h
高炉-转炉	1 386.25	—	1.85	180.38
焦炉煤气制氢	—	634.5	—	533.56
天然气制氢	—	—	332.25	776.56
绿电绿氢	—	—	—	4 309.06

表7 主要消耗能源的价格参考值

能源	煤/ (元·kg <sup>-1</sup> )	焦炉煤气/ (元·m <sup>-3</sup> )	天然气/ (元·m <sup>-3</sup> )	电力/ (元/kW·h)
单价	0.475	1.65	2.5	0.3

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同评价维度的结果分析

#### 2.1.1 污染物排放维度

不同工艺下的污染物排放情况如图2所示。由图2可知,从不同的工艺来看,传统高炉-转炉长流程的污染物排放远高于氢基竖炉加电炉短流程的工艺污染物排放;尤其是SO<sub>2</sub>的排放量,长流程工艺生产1t的粗钢,SO<sub>2</sub>的排放量可达5.02 kg,而三种氢基竖炉工艺的SO<sub>2</sub>排放量分别只有0.58 kg、0.14 kg、0.09 kg。这是因为在长流程中铁矿石需经过烧结处理,烧结过程中使用含硫燃料(如焦粉、无烟煤),这些燃料燃烧后生成SO<sub>2</sub>,研究表明烧结工序的SO<sub>2</sub>排放占钢铁全流程的70%以上;而焦炉煤气氢基直接还原技术因通过燃烧焦炉煤气来制氢气,也会造成

SO<sub>2</sub>的排放,所以其SO<sub>2</sub>排放量略高于另外两种氢基竖炉工艺。与传统高炉-转炉长流程相比,焦炉煤气直接还原加电炉工艺的吨钢污染物排放可以下降约73%;天然气直接还原加电炉工艺的吨钢污染物排放可以下降约83%;而全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的吨钢污染物排放更是可以下降95%以上。

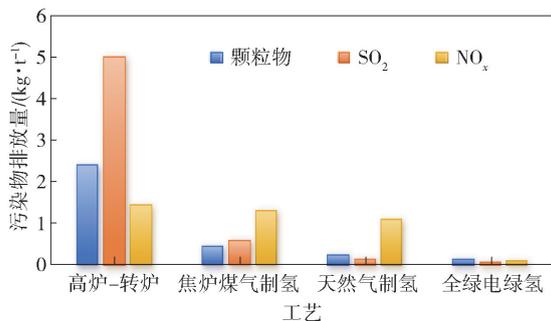


图2 不同工艺的污染物排放情况

## 2.1.2 碳排放维度

不同工艺下的碳排放情况如图3所示。由图3可知,高炉-转炉长流程的吨钢CO<sub>2</sub>排放可达到1871.3 kg,在该工艺中焦炭作为主要原料,既是还原剂又是燃料,导致大量CO<sub>2</sub>排放,高炉炼铁是长流程中能耗最高的工序,其能耗占全流程总能耗的60%以上;后续的烧结和焦化工序也都需大量焦粉或煤粉作为燃料,其燃烧直接排放CO<sub>2</sub>。氢基竖炉还原工艺从根源上摆脱了对传统化石能源的依赖,减少了炼焦、渣处理等工艺流程,在降低碳排放量方面潜力最大。焦炉煤气直接还原加电炉、天然气直接还原加电炉和全绿电绿氢直接还原加电炉的吨钢CO<sub>2</sub>排放量分别为1077 kg、1124.5 kg、169.1 kg。其中,焦炉煤气和天然气直接还原加电炉工艺相比高炉-转炉长流程,吨钢CO<sub>2</sub>排放量下降了40%左右,而全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的吨钢CO<sub>2</sub>减排量达到了90%左右。全绿电绿氢制备过程中近乎无碳排放,后续电炉工艺会产生少部分CO<sub>2</sub>的释放,如果球团工序中的化石原料采用可再生能源替代,就可以更进一步接近全过程零排放的目标。由此可见,氢冶金工艺是零碳排放的一条重要技术路径。

## 2.1.3 成本控制维度

电价和贴现率是影响成本的重要因素,本文设定电价是0.3元/kW·h,贴现率是8%,各个工艺的投资成本和能耗成本如图4所示。由图4可知,高炉-转炉工艺的吨钢投资成本最高,达到了584.148元;其次是全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的投资

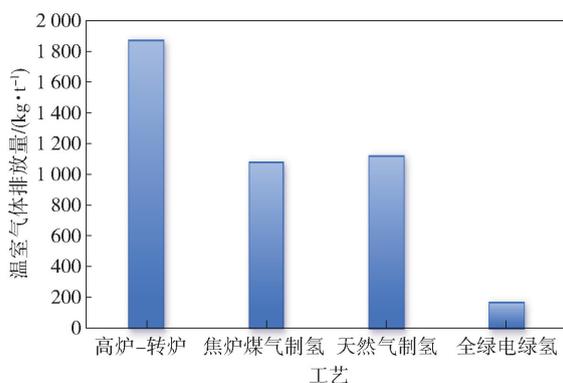


图3 不同工艺的碳排放情况

成本,也有374.715元,而焦炉煤气和天然气直接还原加电炉工艺的吨钢投资成本相差不大,分别为241.055元和289.267元。

在能耗成本方面,全绿电绿氢直接还原加电炉工艺最高,吨钢能耗成本可达1292.718元,传统的绿氢制备方法是碱性电解水制氢技术,需要消耗大量电力,另外电解槽设备也需要用到多种贵金属作为催化剂,成本颇高,这也是绿氢还未能普及氢冶金工艺的重要原因。天然气直接还原加电炉工艺的能耗成本次之,吨钢能耗成本也达到了1063.593元,因为我国天然气资源较为匮乏,中国天然气对外依存度超40%,价格受国际油气市场波动影响显著;此外,天然气需依赖管网或液化运输,进一步增加供应链成本。而我国的焦化规模大、焦炉煤气丰富的国情,是焦炉煤气制氢成为最常用制氢方式的原因之一,焦炉煤气直接还原加电炉工艺的能耗成本相对最低,仅为461.456元,仅为全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的35%,是天然气直接还原加电炉工艺的43%。

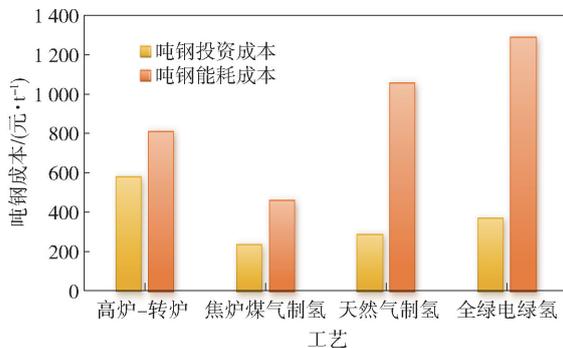


图4 不同工艺的成本控制情况

## 2.2 减污降碳协同指数分析

基于耦合协调度模型,本文将耦合协调度定义为减污降碳协同指数,分析评价了传统高炉-转炉长流程工艺和焦炉煤气、天然气、全绿电绿氢三种氢

基竖炉工艺的减污降碳协同指数之间的差异。在电价为 0.3 元/kW·h, 贴现率为 8% 条件下, 不同工艺的减污降碳协同指数见表 8。

由表 6 可知, 传统高炉-转炉长流程工艺的减污降碳协同指数只有 0.131, 属于严重失调衰退的程度, 说明传统的高炉-转炉长流程工艺在污染物排放和碳排放方面还存在很大不足, 难以实现减污降碳的协同发展, 而且高炉-转炉的投资成本和能源消耗也都处于较高的水平, 综合来看传统高炉-转炉长流程工艺的减污降碳协同性最差。焦炉煤气直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数为 0.843, 达到了良好协调发展的程度。天然气直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数为 0.722, 也达到了中级协调发展的程度。全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数仅有 0.463, 处于濒临失调衰退的水平。上述结果说明焦炉煤气和天然气氢基竖炉工艺的减污降碳协同度均较好, 可以做到减污的同时协同降碳, 并且稳定控制成本在合理范围, 使得三者可以协调发展; 而全绿电绿氢工艺虽然减污降碳效果最好, 但是因为其投资成本和能耗成本均过高, 导致整体减污、降碳、成本控制之间的耦合协调程度较差, 从而并不能三者协调发展。目前我国钢铁行业还是普遍采用焦炉煤气直接还原工艺加电炉工艺, 如果未来可以有效实施降本措施, 绿氢冶金将会有很好的发展前景。

表 8 耦合协调度计算结果

工艺	耦合度 $C$ 值	协调度 $T$ 值	耦合协调 度 $D$ 值	耦合协调程度
高炉-转炉	0.727	0.024	0.131	严重失调衰退
焦炉煤气制氢	0.955	0.744	0.843	良好协调发展
天然气制氢	0.931	0.560	0.722	中级协调发展
全绿电绿氢	0.323	0.663	0.463	濒临失调衰退

### 2.3 敏感性分析

因为电价和贴现率对氢基竖炉工艺成本影响最大, 因此通过改变电价和贴现率对不同工艺的减污降碳协同指数进行敏感性分析, 结果分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 维持贴现率为 8% 时, 电价的涨幅变动对传统高炉-转炉长流程工艺的成本影响不大, 所以该工艺的减污降碳指数由 0.1 缓慢增长, 仍处于严重失调衰退的程度。同理, 焦炉煤气直接还原加电炉工艺的减污降碳指数随着电价增加在

0.843 上下小幅变动, 仍处于良好协调发展程度。当电价从 0.3 元/kW·h 上涨到 0.6 元/kW·h 时, 全绿电绿氢工艺的能耗成本随之翻倍, 但是减污降碳协同指数变化不大, 保持在 0.463 左右, 依旧处于濒临失调衰退程度; 而天然气直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数由 0.729 逐渐上涨至 0.793, 一直维持在中级协调发展水平; 当电价从 0.3 元/kW·h 下降到 0.05 元/kW·h 时, 绿氢工艺的成本巨幅下降了 83% 左右, 减污、降碳、成本控制三者之间的耦合协调程度也随之上升, 减污降碳协同指数达到了 0.977, 直接处于良好协调发展程度。对于天然气直接还原加电炉工艺, 由于天然气的价格居高不下, 对比电价下降时的全绿电绿氢工艺, 没有了成本优势, 整体的减污、降碳、成本控制耦合协调度下降至初级协调发展程度, 减污降碳协同指数只有 0.693 左右。当电价低于 0.175 元/kW·h 时, 全绿电绿氢工艺的污染物排放、碳排放、成本控制三者的协同性最好, 而如果电价常年保持高于 0.2 元/kW·h 的水平时, 焦炉煤气直接还原技术依旧是氢基竖炉工艺的制氢方式首选, 其减污降碳协同指数相对最高。

全绿电绿氢直接还原技术对电力的需求极大, 电价的波动对其影响也是最大的, 电价的持续下跌, 可使得该工艺的能耗成本急剧下降, 与天然气氢基竖炉工艺的能耗成本持平, 再加上其原本具有低污染物排放和低碳排放的优势, 减污、降碳和成本控制三者的耦合协调水平就会提高, 减污降碳指数也会变大; 相反如果电价持续升高, 相比较其他工艺, 其成本过高的问题使得耦合协调水平较低。

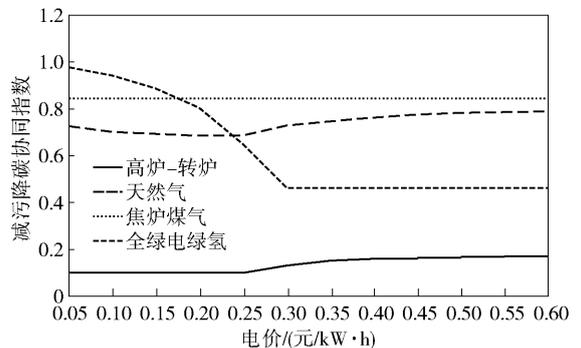


图 6 不同电价下的减污降碳协同指数

由图 7 可知, 维持电价为 0.3 元/kW·h 时, 贴现率的变动对不同工艺的减污降碳协同指数影响没有电价变化带来的影响大。由于贴现率的变动影响投资成本的变动, 焦炉煤气直接还原加电炉工艺的投资成本最小, 本身就处于良好协调发展的水平, 所以

贴现率的变动对其影响最小,减污降碳协同指数几乎维持在0.843左右;同理,天然气直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数也在0.72上下小幅变化。当贴现率降到4%时,全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数增大到0.511,达到勉强协调发展的水平;当贴现率降到1.5%时,全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的减污降碳协同指数可以增大到0.61,提高到初级协调发展的水平。

随着贴现率的增大,由投资成本的计算公式可知,氢基竖炉工艺的投资成本增加比传统高炉工艺更快,所以传统高炉工艺与氢基竖炉工艺的投资成本差距逐渐缩小,使得成本相对之前更加趋于协同,传统高炉-转炉长流程工艺的减污降碳协同指数就会缓慢提高,但是整体仍然处于严重失调衰退的水平。受贴现率变化影响最大的工艺是全绿电绿氢直接还原加电炉工艺,这是因为一方面其投资成本高于焦炉煤气和天然气氢基竖炉工艺,另一方面绿氢设备的使用寿命也长于其他工艺的设备使用寿命,由前文的成本计算公式可知,贴现率的降低,会使得投资成本下降,但是全绿电绿氢工艺的成本下降幅度大于其他工艺,减污降碳协同指数就会出现较为明显的增大。

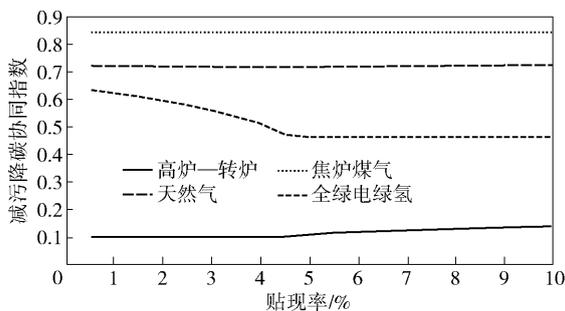


图7 不同贴现率下的减污降碳协同指数

### 3 建议

1) 持续推进环保超低排放技术改造。针对高炉-转炉长流程,要强化源头减排、严格过程治理和优化末端治理,持续推进烧结、球团制备、焦炭生产、炼铁高炉及炼钢转炉等核心生产环节的超低排放技术升级与工艺革新,实现温室气体和大气污染物的协同减排。例如,高炉采用高比例球团冶炼是降低传统长流程钢铁生产 $\text{CO}_2$ 排放量的有效措施,高炉使用球团矿的比例每增加10%,可以减少10%~15%的 $\text{CO}_2$ 排放。

2) 优化能源结构。针对高炉-转炉长流程,引入生物质炭或废塑料替代部分焦炭,降低化石燃料依

赖;针对氢基竖炉工艺,提升废钢回收体系效率,降低电炉短流程原料成本;多气源灵活调配与副产氢利用,短期内混合使用焦炉煤气、天然气重整气和绿氢,平衡减排与成本;工业副产氢提纯后直接用于氢冶金,每吨氢气成本仅7~8元,可作为过渡期低成本氢源。

3) 发展降本策略。利用风光发电或低价绿电制氢,可将绿氢成本降至逐步接近煤制氢成本;部署钢铁行业减污降碳重点研发项目,加强减污降碳技术和装备的研发与推广应用,探索与新能源企业、电网公司合作开发“源网荷储”一体化项目,降低综合用能成本;政府层面应设立专项技改引导基金,对应用成熟超低排放技术的企业提供设备投资补贴或低息贷款支持,并加快相关技术标准更新,倒逼落后产能升级。例如,中国宝武湛江的零碳氢基竖炉,通过广东省专项补贴和国家绿电交易试点,大大压缩了绿氢成本,为大规模商业化应用提供了重要参考路径和经验。

### 4 结论

1) 在污染物排放和碳排放方面,全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的表现最优,无论是颗粒物排放、 $\text{SO}_2$ 排放、 $\text{NO}_x$ 排放还是 $\text{CO}_2$ 排放都是最低,焦炉煤气和天然气直接还原加电炉的工艺效果次之,传统高炉-转炉长流程工艺的效果最差,污染物排放和碳排放最多。在成本方面,则是全绿电绿氢直接还原加电炉工艺的成本最高,天然气直接还原加电炉的工艺次之,焦炉煤气直接还原加电炉和传统高炉-转炉长流程工艺的成本最低。

2) 总体来看,氢基竖炉工艺在减污、降碳和成本控制之间的协同性均强于传统高炉-转炉长流程工艺,尤其是焦炉煤气和天然气直接还原工艺的减污降碳指数分别可以达到0.843和0.722,分别处于良好和中级协调发展的水平,而全绿电绿氢工艺由于成本过高,耦合协调程度较差,目前只能处于濒临协调发展程度。相较氢基竖炉而言,传统高炉-转炉长流程工艺的污染物排放和碳排放过高,要想实现减污降碳协同增效发展,还需要调整能源结构,从源头治理、过程控制及末端治理全方位进行控制和技术改造。

3) 对电价和贴现率进行敏感性分析可知,当电价降至0.3元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 以下时,全绿电绿氢工艺的能耗成本降低幅度最大;随着电价和贴现率的持续降低,其成本甚至可以低于天然气直接还原工艺的成本,同时污染物排放、碳排放和成本控制三者之间的

耦合协调程度,即减污降碳协同指数会随之提高,从而达到协调发展的水平。

### [参考文献]

- [1] 赵志龙. 绿色低碳冶金技术进展及前景展望[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(5): 1-8.
- [2] 冀宗贺, 刘艳峰, 李兰杰, 等. 氢基竖炉生产直接还原铁的工艺特点及减碳环节[J]. 烧结球团, 2025, 50(3): 20-25.
- [3] 杨森, 薛姿杰, 王彧斐, 等. 基于绿氢的化工低碳转型与研究现状[J]. 化工进展, 2025, 44(6): 3288-3304.
- [4] 原伟鹏, 孙慧, 王晶, 等. 中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J]. 经济地理, 2022, 42(10): 72-82.
- [5] 宋飞, 付加锋. 世界主要国家温室气体与二氧化硫的协同减排及启示[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1439-1444.
- [6] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 268-278.
- [7] 毛显强, 邢有凯, 胡涛, 等. 中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 748-756.
- [8] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 等. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 388-399.
- [9] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 等. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(12): 1-7.
- [10] 高月明, 王建童, 张伟, 等. 污水处理厂减污降碳协同绩效评价[J/OL]. 环境科学, 1-13[2025-04-18].
- [11] 覃柳妹, 覃保林, 黄奎贤, 等. 关于企业大气污染物排放量核算的探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(24): 37-38, 41.
- [12] 龙跃, 田晨, 鲍继伟, 等. 河北省典型钢铁企业炼铁工序碳减排潜力分析[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 1-8, 17.
- [13] 银洲, 况悦, 刘丹丹, 等. 炼铁工序减污降碳协同增效技术评估方法研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 33-42.

## Collaborative Performance Evaluation of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Hydrogen-based Shaft Furnace Process

LUO Yujie, LI Fengyu

(School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

**Abstract:** In order to evaluate the synergistic performance of pollution reduction and carbon reduction in hydrogen-based shaft furnace process, this paper constructed a synergistic performance evaluation system for pollution reduction and carbon reduction in hydrogen-based shaft furnace process. The coupling coordination degree model was used to construct the synergistic index among pollutant emission, carbon emission and cost control. The synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in traditional blast furnace-converter long process and three hydrogen-based shaft furnace processes (hydrogen produced by coke oven gas, hydrogen produced by natural gas, hydrogen produced by green electric) was evaluated. The research shows that the all-green electric green hydrogen process has the best performance in reducing pollutant emissions and carbon emissions. In terms of cost, the comprehensive cost of the all green electric green hydrogen process is the highest; comparing the synergistic index of pollution reduction and carbon reduction of each process, the coordination between pollution reduction, carbon reduction and cost control of hydrogen-based shaft furnace process is stronger than that of long process blast furnace-converter process. Among them, the synergistic indexes of pollution reduction and carbon reduction of coke oven gas hydrogen production process and natural gas hydrogen production process are 0.843 and 0.722, respectively, which reach the level of good coordinated development and intermediate coordinated development. Due to the high cost of the all-green electric green hydrogen process, the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction is second, and the synergistic index of pollution reduction and carbon reduction is only 0.463, which is on the verge of imbalance and recession. If the electricity price cost and discount rate can be reduced, the overall coordination effect will also increase.

**Key words:** hydrogen-based shaft furnace; pollutant emissions; carbon emissions; cost control; green electric hydrogen production; coupling coordination degree