

国内外钢铁行业低碳发展策略分析

崔志峰¹⁾, 徐安军^{1)✉}, 上官方钦²⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 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
✉通信作者, E-mail: anjunxu@126.com

摘 要 在绿色化、低碳化发展的时代背景下, 全球钢铁行业纷纷开展低碳研究工作, 各类低碳技术层出不穷. 首先概述了全球钢铁行业 CO₂ 排放现状, 以及主要产钢国家的碳减排目标, 并对其低碳策略进行详细的分析, 指出国际钢铁行业的低碳发展方向主要聚焦于发展电炉流程、氢冶金、碳捕集利用与封存和清洁能源利用等方面. 随后聚焦我国钢铁行业碳排放现状, 梳理了中国钢铁行业实现“双碳”目标的应对策略, 指出减量化发展、流程结构调整是未来我国钢铁行业低碳发展的主攻方向. 最后, 为了使前文所提的宏观策略更加具体化, 又选取我国某一典型钢铁企业, 以其技术特点、地理位置、资源禀赋、发展规划为主要依据, 针对性地分析并提出了 7 条适合该企业的减排路径, 为其绿色低碳发展指明方向.

关键词 CO₂ 排放; 碳达峰; 碳中和; 低碳技术; 钢铁

分类号 X1

Low-carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry

CUI Zhi-feng¹⁾, XU An-jun^{1)✉}, SHANGGUAN Fang-qin²⁾

1) School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Steel Industry Green and Intelligent Manufacturing Technology Center, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China
✉ Corresponding author, E-mail: anjunxu@126.com

ABSTRACT In an era of green and low-carbon development, the global steel industry has conducted low-carbon research, and various low-carbon technologies have continuously emerged. This paper summarizes the CO₂ emission status of the global steel industry and international steel enterprises, such as ArcelorMittal, Nippon Steel, POSCO, and Big River Steel, and summarizes the carbon emission reduction targets and low-carbon development projects of major steel-producing countries, such as the United States and Japan. Based on this, the low-carbon strategy is analyzed in detail, noting that the low-carbon development direction of the international iron and steel industry is mainly focused on developing electric furnace processes, hydrogen metallurgy technology, carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology, and clean energy utilization. In addition, the EU is actively building a carbon emission trading system and achieving carbon reduction using policies and regulations such as a carbon tax and carbon border tax. After analyzing the low-carbon development situation of the international steel industry, this paper focuses on the low-carbon green development of the domestic steel industry. Firstly, combined with the total output of crude steel, total CO₂ emissions, CO₂ emissions per ton of steel, and other data of China's iron and steel industry, this paper analyzes the status quo of carbon emissions in China's iron and steel industry. Secondly, it summarizes the carbon emission reduction targets of Baosteel, HBIS, and other large state-owned iron and steel enterprises. Thirdly, the countermeasures for China's steel industry to achieve a “carbon peak and carbon neutrality” are summarized as follows: implement crude steel output control, adjust the production process structure, conduct research and development of low-carbon energy-saving technology, and build a carbon trading system; among them, reduction development and process structure adjustment are the main future directions of low-carbon development of China's iron and steel industry, while low-carbon energy-saving technology and a carbon

trading system are important guarantees for China's iron and steel industry to achieve carbon neutrality. Finally, to make the four macro strategies proposed above more specific and visualized, a typical steel enterprise in China is selected based on its technical characteristics, geographical location, resource endowment, and development planning. Seven emission reduction paths, including iron resource optimization, process optimization and reconstruction, system energy efficiency improvement, energy consumption structure optimization, low-carbon technology transformation, industrial coordination, and carbon reduction management enhancement, are analyzed and proposed to point out the direction of green and low-carbon development for the enterprise.

KEY WORDS CO₂ emission; carbon peak; carbon neutrality; low-carbon technology; steel

随着社会经济的迅速发展,由温室气体排放引起的全球气候变化问题愈发严重. 据国际能源署(IEA)统计数据显示:2019 年全球由化石燃料燃烧引起的碳排放总量已达到 336 亿吨,相较于 1990 年的 205 亿吨,增幅高达约 63.9%^[1]. 同时根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)估算,若 CO₂ 排放量继续以此高速率增长,则全球平均气温将升高 6 ℃,甚至更高^[2],这也将对人类的生存环境造成不可逆转的严重影响.

在众多碳排放行业中,钢铁生产作为典型的铁-煤化工过程,不仅是资源能源密集型产业,也是 CO₂ 排放大户. 据世界钢铁协会数据统计,2020 年全球钢铁行业平均每生产 1 t 钢排放 1.85 t^[3] 二氧化碳. 2020 年,全球共生产约 18.78 亿吨^[4] 钢,钢铁行业的直接碳排放总量约为 26 亿吨^[5],占全球

人类活动碳排放总量的 7%~9%,是全球主要碳排放源之一. 因此,在推进全球低碳发展的工作中,钢铁行业义不容辞地应承担更大的减排责任.

1 国际钢铁工业低碳发展概况

1.1 国外钢铁企业碳排放现状

2021 年 11 月,世界钢铁协会发布了《2021 年可持续发展指标报告》^[6],报告统计了 2007—2020 年间,国际钢铁协会会员企业(如: ArcelorMittal、POSCO、ThyssenKrupp 等)吨钢 CO₂ 排放量及能源消耗量. 结果显示:国际钢协会员企业的吨钢碳排放量多在 1.75~1.85 t 范围内波动;吨钢能耗多维持在 20 GJ 水平上下. 具体数据情况如图 1 所示,图中吨钢碳排放量和吨钢能耗为世界钢协根据转炉及电弧炉两种工艺路线的产量份额进行加权计算确定.

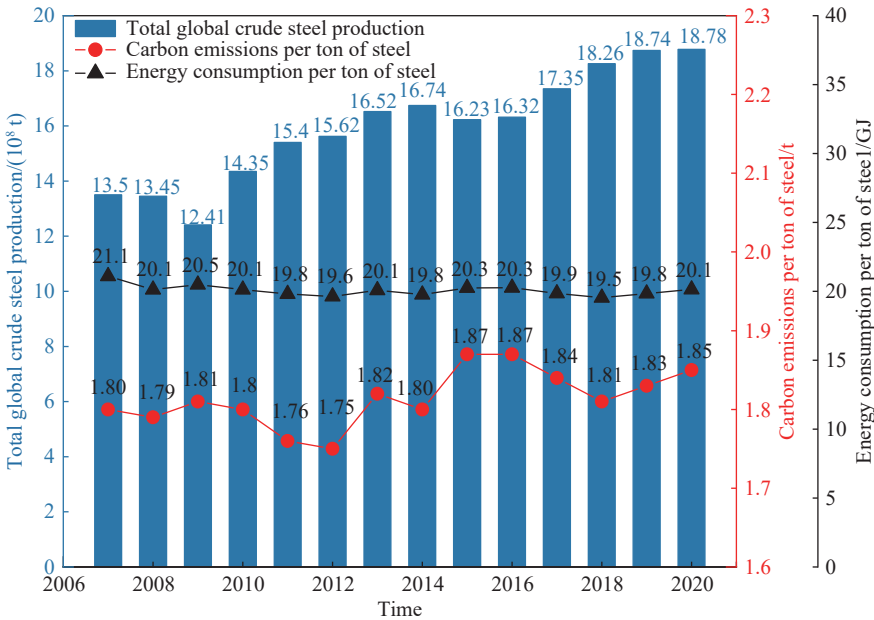


图 1 全球钢铁企业粗钢产量、吨钢碳排放及吨钢能耗情况

Fig.1 Crude steel output, carbon emission, and energy consumption per ton of steel of global steel enterprises

世界钢协的统计数据只能反映全球钢铁行业碳排放的平均水平,为全面客观描述不同国家、不同规模、不同工艺流程钢铁企业碳排放情况,选取以下典型钢铁企业,对其碳排放总量及吨钢碳排

放量两个指标进行统计分析.

安赛乐米塔尔(ArcelorMittal)作为全球粗钢产量最大的钢铁企业之一,其年均粗钢产量高达 9000 万吨;其中,高炉-转炉长流程(BF-BOF)、直

接还原-电炉流程(DRI-EAF)及全废钢电炉短流程(Scrap-EAF)的产量占比分别为: 83%、7%、10%。根据国际钢协制订的 CO₂ 排放计算方法, 三种流程的 CO₂ 排放量如图 2 所示。值得注意的是: 根据安赛乐米塔尔年度气候报告^[7]中的统计数据显

示, BF-BOF 流程吨钢碳排放量约为 Scrap-EAF 流程的 4 倍之多。这一数据也客观反映出了全废钢电炉短流程巨大的降碳潜力, 对中国钢铁行业未来的发展具有一定的借鉴意义。

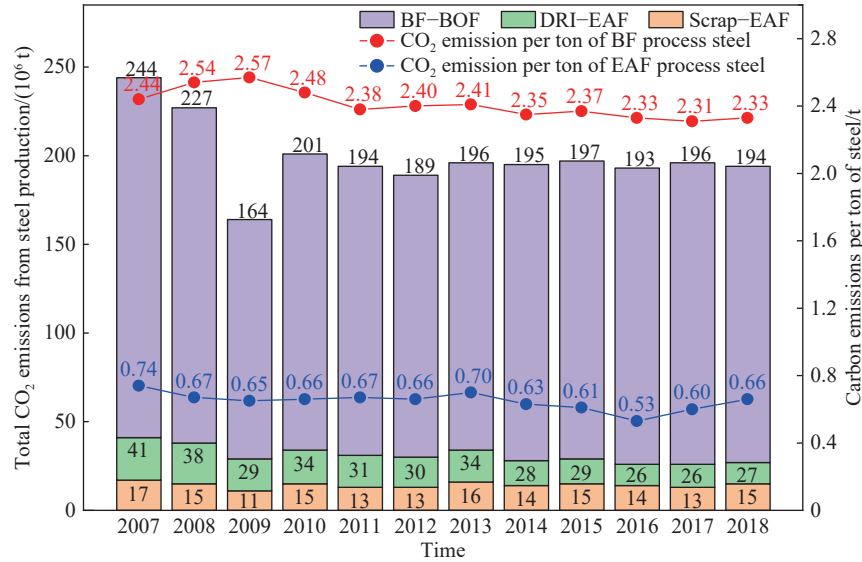


图 2 2007—2018 年 ArcelorMittal 碳排放量变化图

Fig.2 ArcelorMittal carbon emissions bar graph from 2007 to 2018

新日本制铁株式会社(Nippon Steel Corporation)是目前日本产钢量最大的钢铁企业, 也是日本主要的碳排放企业之一。据新日铁 2020 年度环境

报告^[8]显示, 2019 年度企业粗钢总产量高达 3954 万吨, CO₂ 总排放量约为 9400 万吨, 吨钢 CO₂ 排放量为 2.06 t, 具体碳排放数据及变化情况如图 3 所示。

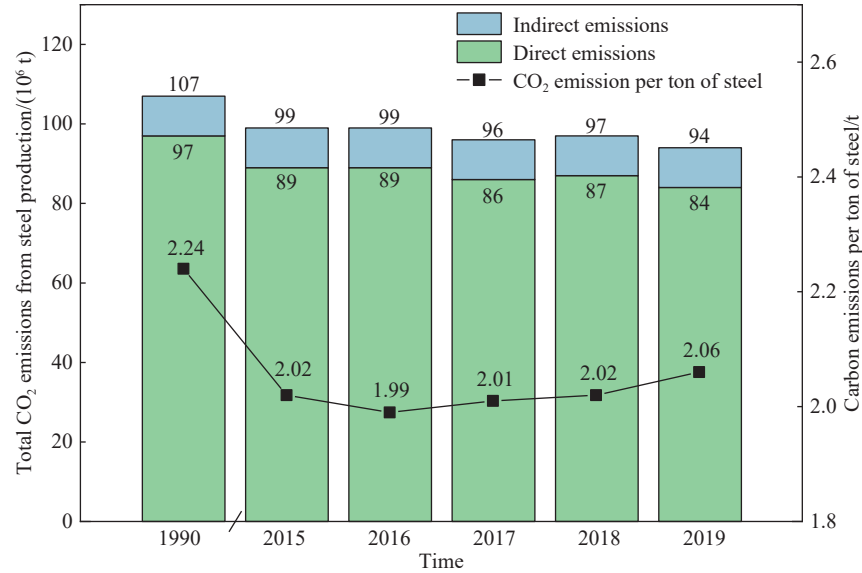


图 3 2015—2019 年 Nippon Steel Corporation 碳排放量变化图

Fig.3 Nippon Steel Corporation carbon emissions bar graph from 2015 to 2019

浦项钢铁公司(Pohang Iron and Steel Company)是韩国最大的钢铁公司, 也是全球最大的钢铁制造厂商之一, 其每年为全球超 60 多个国家及地区

提供钢铁产品 2600 多万吨。据 2020 年浦项制铁企业公民报告^[9]中相关数据显示, 较 2019 年 8020 万吨的企业碳排放量而言, 2020 年碳排放总量略有

下降, 为 7560 万吨; 但吨钢碳排放强度未见明显降低, 详细的数据情况如图 4 所示。

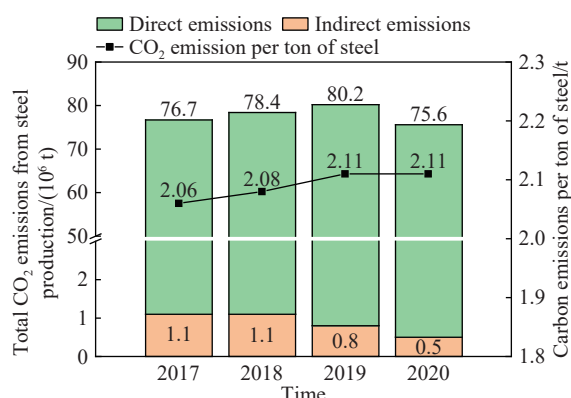


图 4 2017—2020 年 POSCO 碳排放量变化图

Fig.4 POSCO carbon emissions bar graph from 2017 to 2020

中国钢铁股份有限公司 (China Steel, 简称中钢) 是中国台湾省最大的钢铁企业, 虽然年产量远不及宝钢、河钢等内地钢铁企业, 但其依旧拥有较高国际地位及影响力。参考 2020 年企业社会责任报告书^[10]中的相关数据, 自 2015 年以来, 中钢年 CO₂ 排放总量多保持在 2000 万吨, 吨钢碳排放量多在 2.3~2.4 t 水平区间范围内。具体碳排放数据如图 5 所示。

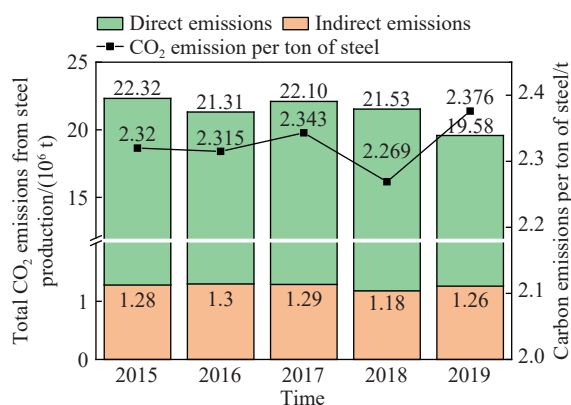


图 5 2015—2019 年中钢碳排放量变化图

Fig.5 China Steel (Taiwan) carbon emissions bar graph from 2015 to 2019

美国大河钢铁厂 (Big River Steel) 是一座以电弧炉冶炼、精炼、薄板坯连铸连轧为生产工艺的高效短流程钢铁企业。参考其《2019 年度企业社会责任报告》^[11]中统计的数据, 2020 年企业共回收利用废钢 182.39 万吨, 生产直接还原铁水 163.44 万吨, 电炉吨钢电耗 681.5 kW·h·t⁻¹, 与国内电炉吨钢电耗水平接近, 但其 EAF-RH 工艺流程 CO₂ 排放总量仅为 21.03 万吨, 合吨钢 CO₂ 排放量为 0.129 t, 远小于国内电炉流程吨钢 CO₂ 排放量的 0.46 t。究

其原因主要是因为美国能源结构与我国存在明显差异, 其电力碳排放因子远小于我国; 以 2019 年电力碳排放因子为例, 美国约为 0.42 t·(MW·h)⁻¹^[12], 中国约为 0.58 t·(MW·h)⁻¹^[13]。详细碳排放情况如图 6 所示。

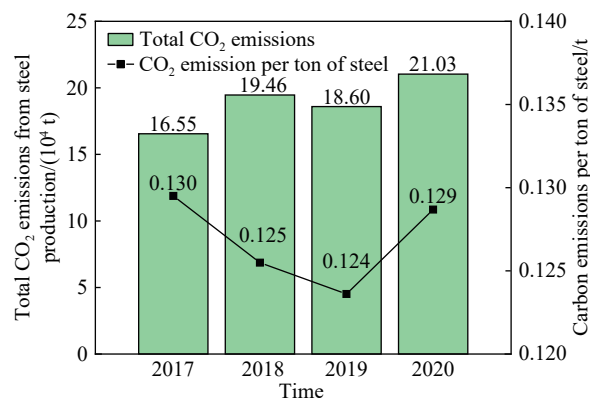


图 6 2017 年~2020 年美国大河钢铁厂碳排放量变化图

Fig.6 Big River Steel carbon emissions bar graph from 2017 to 2020

通过上述结果分析, 目前国际钢铁行业碳排放主要存在以下特征:

(1) 同一钢铁企业吨钢碳排放量不一定是逐年降低的。虽然各类节能降碳技术不断普及应用, 但吨钢 CO₂ 排放量还与当年企业的产品结构、用能结构、原燃料质量以及管理水平等密切相关。

(2) 不同钢铁企业的吨钢 CO₂ 排放数据不能简单地直接比较。因为各国家地区原料条件不同, 各钢铁企业流程结构不同、能源结构不同, 甚至其 CO₂ 排放的计算方法、统计口径和范围都存在差异, 因此仅通过简单比较 CO₂ 排放指标来评价孰优孰劣, 是不可靠、不科学的。这也启示中国钢铁行业有必要积极开展 CO₂ 排放计算方法的研究工作。

(3) 相较于 BF-BOF 流程而言, EAF 流程吨钢碳排放要小得多。由此可见, 调整流程结构、发展全废钢电炉流程是钢铁行业碳减排的有力措施。

(4) 整体而言, 各钢铁企业 CO₂ 排放总量降幅较小, 部分企业甚至有上浮趋势。因此, 钢铁行业依旧面临着严峻的降碳压力和减排任务。

1.2 钢铁工业碳减排目标及策略

面对严峻的生态环境形势, 主要产钢国及钢铁企业纷纷制订低碳发展战略目标, 具体内容如表 1 所示。

为如期达成上述减排目标, 各主要产钢国及企业陆续启动低碳发展项目, 研发低碳生产技术, 经过相关文献调研^[14-19], 汇总如表 2 所示。

表 1 主要产钢国及钢铁企业低碳发展战略目标一览表

Country/Industry	Low carbon development strategic goals	Related policy documents
United States	On the basis of greenhouse gas emissions in 2005, strive to reduce emissions by 30% in 2025, 42% in 2030, and 83% in 2050	《American Clean Energy and Security Act》
United States Steel Corporation	Reduce greenhouse gas emission intensity by 20% by 2030	
Nucor Corporation	35% reduction in 2015 total CO ₂ emissions by 2030	《Nucor 2020 Corporate Sustainability Report》
Japan	On the basis of 2008 greenhouse gas emissions, strive to achieve a reduction of 60% to 80% by 2050	《Striving For A Low Carbon Society In Japan》 《Action Plan For Realizing Low Carbon Society》
Nippon Steel Corporation	By 2030, CO ₂ emissions will be reduced by 30% from 2013 to 70 million tons	
Korea	On the basis of 2017 greenhouse gas emissions, strive to achieve a 24.4% reduction in 2030 and carbon neutrality in 2050	《Basic Law On Low Carbon Green Growth》 《2050 Long Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy》
POSCO	Short-term goal: 20% CO ₂ reduction in 2030 Intermediate-term goal: 50% CO ₂ reduction in 2040 Long-term goal: carbon neutrality by 2050 Emission reduction baseline: Average CO ₂ emission of enterprises from 2017 to 2019 (78.8 million tons)	
Hyundai Steel	80% CO ₂ reduction by 2050	
European Union	Greenhouse gas emissions by 2030 are based on a 55% reduction in 1990 and full carbon neutrality by 2050	《European Green New Deal》 《2030 Climate Target Plan》
ArcelorMittal	CO ₂ emissions from European operations in 2030 are reduced by 30% based on 2018 (194 million tons), Achieving net-zero carbon emissions overall by 2050	
ThyssenKrupp	30% reduction in CO ₂ emissions by 2030, The total output of green steel reaches 3 million tons	
Tata Steel Europe	CO ₂ emissions will be reduced by 30% to 40% in 2030, Achieving carbon neutrality by 2050	

表 2 主要产钢国低碳项目/技术一览表

Country/Region	Participating units	Low carbon project/ Technical name
United States	U.S. Department of Energy American Iron and Steel Institute	1. Research project on new technologies of CO ₂ emission in steel production and low carbon steelmaking 2. Iron Ore Melting Oxidation Electrolysis Technology 3. Hydrogen-based Reduction Ironmaking Flash Melting Technology
	Nucor Corporation	100% Wind Energy Powered Steelmaking Project
	Evrast Group、American Electric Power Company	100% Solar Powered Steelmaking Project
Japan	Japan Iron and Steel Federation	COURSE50
	Japan Iron and Steel Institute	Zero emission power generation technology
Korea	Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea	COOLSTAR
European Union	European Steel Technology Platform (ESTEP)	ULCOS
	ThyssenKrupp	Carbon2Chem
	Salzgitter、Tenova	SALCOS
Germany	ArcelorMittal	MIDREX H2
	SSAB、LKAB、Vattenfall	HYBRIT
Sweden		
Austria	Voestalpine、Siemens AG、Verbund	H2FUTURE

参考表 2, 未来钢铁行业低碳发展的方向及策略主要有以下几点:

(1) 大力发展电炉短流程。相较于高炉—转炉

长流程, 全废钢电炉流程无论是在能耗水平, 还是在碳排放方面均具有一定的优势。美国由于具备丰富的社会废钢资源, 其电弧炉炼钢技术迅速发

展,目前电炉钢比已达到 70% 左右,这也为美国钢铁工业的低碳发展奠定了良好基础。

(2)开展氢冶金技术研发。欧盟超低二氧化碳排放炼钢工艺研究项目 (Ultra-low CO₂ steelmaking, ULCOS) 是已知的氢基炼钢最早的综合研究项目;此外,日本 COURESE50 项目、瑞典 HYBRIT 项目、奥地利 H2FUTURE 项目、SALCOS 项目等也

均是氢冶金技术研发的典型代表项目。虽然氢冶金拥有巨大的节能降碳潜力,但目前仍处于研发起步阶段,面临众多严峻挑战^[20]。

首先,如何保证制氢技术路线的经济性与低碳性?目前,工业制氢的方式多种多样,消耗的能源种类也各不相同,导致其制氢成本也有所差距,具体如表 3 所示。

表 3 各制氢技术成本一览表^[21]

Table 3 List of Costs of various hydrogen production technologies

Types of hydrogen production	Hydrogen production method	Energy price	Hydrogen production cost
Hydrogen production from water electrolysis	Valley Electricity Electrolysis Hydrogen Production	0.3 ¥·(kW·h) ⁻¹	20 ¥·kg ⁻¹
	Industrial Electricity Electrolysis Hydrogen Production	0.6 ¥·(kW·h) ⁻¹	38 ¥·kg ⁻¹
	Green Electricity Electrolysis Hydrogen Production	0.1 ¥·(kW·h) ⁻¹	10 ¥·kg ⁻¹
Hydrogen production from fossil fuels	Coal hydrogen production	550 ¥·t ⁻¹	10 ¥·kg ⁻¹
	Hydrogen production from natural gas	3 ¥·m ⁻³	13 ¥·kg ⁻¹

从表 3 中不难发现,工业制氢技术可划分为两类:一是以 COURESE50 项目为代表的石化能源制氢,也是目前最广泛应用的制氢技术,但这种方式使用的仍是高碳能源,无法有效避免 CO₂ 排放问题。二是以 HYBRIT 项目、H2FUTURE 项目等为代表的电解水制氢,其中若使用的电力资源来源于火力发电,则该技术实质仍是使用高碳能源,仅转移了碳排放源,并不能有效减少碳排放;只有使用风能、光能等可再生清洁能源发电时,该技术相较于化石能源制氢法,才能够有效减少 CO₂ 排放,但由于“绿电”技术尚未成熟,故大规模、低成本地制取“绿氢”依旧面临着严峻的技术挑战。因此,参考表 3 内相关数据,再结合目前各制氢技术特点,笔者认为:工艺成本低、技术成熟度高的煤炭(气)制氢技术是现阶段主流的制氢形式,但未来,电解水制氢(尤其是绿电电解制氢)的发展及提升空间是广阔的,必将成为最优的制氢技术方案。

其次,如何安全稳定地做好氢气的储运?氢能源大规模高效利用的关键就是成熟的储氢和运输技术,目前较常见的储氢工艺主要有高压气态储氢、低温液态储氢以及固态储氢等。其中,高压气态储氢由于其能耗低、成本低、技术成熟、充放氢速度快等优点,已成为当前车用储氢普遍应用的技术;低温液态储氢虽然其储氢密度高、纯度高,但储氢过程能耗大、成本高,故仅在航空航天等特殊领域有所应用;固态储氢技术在氢燃料电池汽车应用方面优势明显,但目前仍存在诸多技

术难题,是未来储氢技术发展的重要方向。

(3)开展碳捕集、利用与封存(CCUS)技术研发。由德国教育与科技部立项,蒂森克虏伯等 15 家企业合作承担的 Carbon2Chem 项目就是碳捕集利用(CCU)技术工业应用的典型代表。该项目的主要目的是探索利用炼钢厂废气来生产含有 C、H 的合成气体,进而用于生产氨气、甲醇等初级化工产品。预计该项目可经济地回收利用德国钢铁工业每年排放的 2000 万吨 CO₂ 气体,约占整个工业及制造业总 CO₂ 排放量的 10%,具有极大的减碳潜力。

而目前,碳捕集封存(CCS)技术仍面临着碳泄漏、地表变形、诱发地震等地质封存问题^[22],CCU 技术也因高昂的投资成本而限制了发展。因此,与氢冶金技术一样,CCUS 技术正处于试验研发的起步阶段,还未大规模地投入工程应用。

(4)清洁能源利用。美国纽柯钢铁公司在密苏里州塞达利亚建成了全美首座 100% 风能供电的炼钢厂,耶弗拉兹北美公司将旗下落基山炼钢厂改造成全美首座 100% 太阳能供电的炼钢厂,以上都是新能源在冶金行业成功应用的典型案例,值得国内重点钢铁企业学习借鉴。

1.3 其他低碳发展方针对策

钢铁行业要实现“碳达峰、碳中和”的双碳目标,仅仅依靠低碳技术是远远不够的,各国还需从市场、政策、法规的层面着手,采取相应的减碳措施。其中,碳交易与碳税作为碳减排的两种主要政

策工具,得到了各国政府的广泛应用.

(1)碳交易.

碳交易,即将二氧化碳排放配额视作一种商品,通过支付金额来获得一定数量的二氧化碳排放配额,以完成国家或政府下发的碳减排目标,原理如图 7 所示. 碳交易是一种基于市场调控的、低成本控制或减少温室气体排放的政策工具^[23]. 2005 年 1 月,欧盟碳排放交易体系正式建立并投入运行,并逐步发展成为全球最大的多国家、多领域温室气体排放权交易体系.

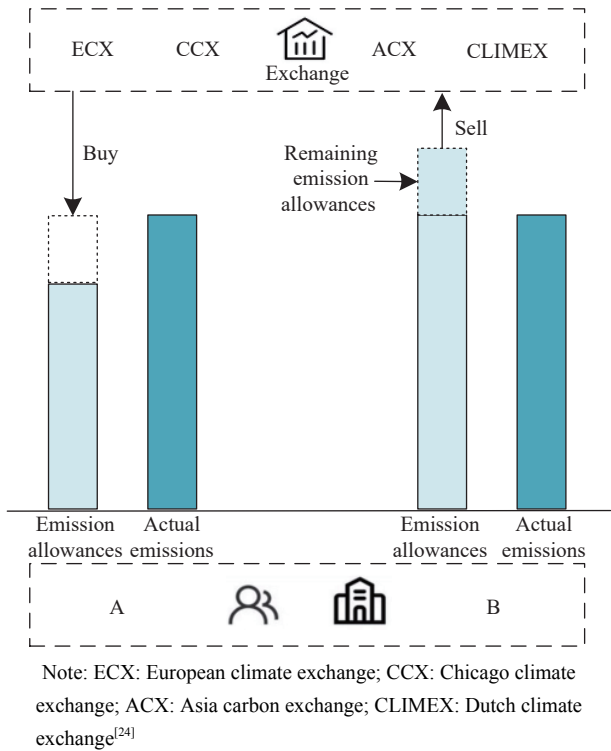


图 7 碳交易基本原理图

Fig.7 Basic principles of carbon trading

碳排放交易体系的核心是碳排放配额分配,政府需统筹国家排控目标与各行业、各企业的减排潜力后,将碳排放配额精准地分配下去. 以欧盟碳交易市场为例,免费分配给各企业/部门的碳配额是根据所属行业碳排放基准值计算得到的,具体的计算公式^[25]如下所示:

$$\text{Allocation} = \text{Benchmark} * \text{HAL} * \text{CLEF} * \text{CSCF} \quad (1)$$

其中, Allocation 为企业/部门获得的碳配额量, t; Benchmark 为行业基准值,指该行业每生产 1 t 产品排放的 CO₂ 量, t·t⁻¹; HAL 为历史活动水平,指该企业与基准值对应的当年历史产量, t; CLEF 为碳泄漏暴露因子,是恒定的 100% 或一个递减函数,具体取决于碳泄漏状态; CSCF 为跨部门修正因子,一般情况下由欧盟委员会统一确定.

行业基准值表示某一行业碳排放的平均水平,精确的基准值是合理分配碳配额的前提与基础. 对于如何确定基准值,欧盟给出的方案^[25]是:

(a)定期更新行业基准值. 目前使用的基准值是根据 2007—2008 年的行业数据确定的,同时计划在 2021—2025 年和 2026—2030 年间分别更新一次基准值,以保证数据的时效性;

(b)默认情况下,考虑到工艺进步带来的降碳效果,基准值每年降低 1%;

(c)对于减排潜力较低的行业,基准值每年降低 0.5%,而对于减排潜力较大的行业,基准值每年降低 1.5%.

(2)碳税.

碳税是指针对碳排放量征收一定的税额. 征收碳税一方面可以减少化石燃料的需求量,进而减少二氧化碳的排放量;另一方面,国家及政府增加了税收,有利于低碳技术研发资金的投加. 通过征收碳税以达到减碳的目的,最初是在 20 世纪 90 年代由一些北欧国家提出的,随后日本、新西兰等其他一些国家也纷纷考虑开征碳税.

(3)碳边境税.

碳边境税又称“碳关税”,是在碳税基础上形成的概念. 在国家或地区采取相应碳减排措施(如征收碳税)后,该地区内的部分高耗能产业就向其他未采取碳减排措施的国家转移,从而引起被转移国家碳排放量增长,这也被称作“碳泄漏”现象. 为解决该问题,欧洲议会于 2021 年 3 月通过了一项欧盟碳边境调节机制(CBAM)的决议,提出欧盟将对部分进口商品征收碳关税. 碳边境税的实施要求我国钢铁企业在出口钢材产品时,必须提供欧盟认可的产品全生命周期评价(LCA)报告,这也对我国钢铁行业的 LCA 研究工作提出了新的要求与挑战.

2 中国钢铁工业碳达峰、碳中和形势分析与应对策略

2.1 中国钢铁行业碳排放现状

工业生产是 CO₂ 等温室气体的主要排放源之一,中国作为目前最大的工业国,其工业生产造成的能源消耗量约占全球工业能源消耗总量的 35%,工业 CO₂ 排放量约占全球工业 CO₂ 排放量的 50%^[26-27]. 而钢铁行业作为工业生产的重要领域,是能源消费大户,也是 CO₂ 排放大户,因此做好钢铁行业的减排降碳工作是达成“碳达峰、碳中和”目标的关键保障.

采用上官方钦等^[28]提出的 CO₂ 排放计算方法,并选取《中国能源统计年鉴》^[29]中黑色金属冶炼及压延加工业的终端能源消费量数据,上官方钦等^[30]对我国 1991—2020 年钢铁行业的粗钢产量及碳排放情况进行了粗略估算,并得出以下结论:

(1)中国钢铁行业粗钢产量日益增长,由 1991 年的 7075 万吨逐步增长到 2020 的 10.65 亿吨,产量增长约 14.05 倍;

(2)中国钢铁行业吨钢 CO₂ 排放量逐年降低,由 1991 年的 3.91 t 降低到 2020 年的 1.63 t,降幅达 58%,由此也客观反映出我国在过去 30 年间的节能减排工作上取得了一定的成果;

(3)中国钢铁行业由能源消耗引起的 CO₂ 排放总量在 2014 年前增速迅猛,在 2014 年达到 17.35 亿吨后,呈现逐年下降趋势。但由于近两年粗钢产

量的增加,自 2019 年开始全国钢铁行业碳排放总量又呈现上升趋势;据相关数据显示,2020 年钢铁行业 CO₂ 排放总量高达 15.98 亿吨,占全国 CO₂ 排放总量的 15%。

2.2 国内钢铁企业碳减排目标

虽然近 30 年的节能减排工作取得显著成果,但由于粗钢产量基数巨大,我国钢铁行业依旧面临着严峻的碳减排压力。为应对全球气候变化问题,中国积极主动地做出减排承诺。2020 年 9 月 22 日,在第 75 届联合国大会上,习近平总书记代表中国明确表示:中国力争于 2030 年前实现碳达峰,努力争取 2060 年前实现碳中和。

为积极相应国家碳减排号召,国内各大钢铁企业陆续发布了碳达峰、碳中和的目标规划,具体如表 4。

表 4 国内部分钢铁企业碳达峰、碳中和行动规划

Table 4 Action plan for carbon peak and carbon neutrality of some domestic steel companies

Steel Company	Proposed Carbon Peaking, Carbon Neutrality Target Plan
China Baowu Steel Group Corporation Limited	Carbon peak in 2023
	By 2025, have the technological ability to reduce carbon by 30%
	30% carbon reduction from peak carbon emissions by 2035
	Carbon neutrality in 2050
HBIS Group Corporation Limited	Carbon peak in 2022
	Reduce carbon emissions by more than 10% from peak carbon emissions by 2025
	Reduce carbon emissions by more than 30% from peak carbon emissions by 2030
	Carbon neutrality in 2050
Baotou Iron and Steel Group Corporation Limited	Carbon peak in 2023
	By 2030, have the technological ability to reduce carbon by 30%
	50% carbon reduction from peak carbon emissions by 2042
	Carbon neutrality in 2050
Anshan Iron and Steel Group Corporation Limited	Carbon peak by 2025
	Achieve breakthroughs in the industrialization of cutting-edge low-carbon metallurgical technology by 2030
	30% carbon reduction from peak carbon emissions by 2035

从上述企业发布的碳减排规划看,其拟定的碳达峰、碳中和时间均早于“双碳”目标规划时间;同时相较于部分国际钢铁企业(表 1),国内钢铁企业拟定的减排目标更高,减排力度更大,未来极有可能将引领世界钢铁行业的低碳发展。

2.3 中国钢铁行业碳达峰、碳中和应对策略

参阅上官方钦等^[30]绘制的中国钢铁行业碳中和技术路线图以及相关文献^[31-32],我国钢铁工业实现碳达峰、碳中和的应对策略主要可概括为以

下几点:

(1)落实粗钢产量控制,实现减量化、高质量发展。吨钢碳排放强度和粗钢总产量是影响碳排放总量的两个因素,其中,粗钢产量与碳排放总量之间更是具有很强的相关性。因此,若想减少碳排放总量,必须严格控制全国粗钢产量,实行总量削减、淘汰落后产能政策。

(2)调整生产流程结构。减少了焦化、烧结、高炉等炼铁全系统的全废钢电炉冶炼短流程,相

较于高炉—转炉长流程而言, 具有能耗低、污染少等优点. 相关研究数据表明, 同样生产 1 t 钢材, 短流程的 CO_2 排放总量不及长流程的 1/3. 由此可见, 发展全废钢电炉短流程是未来钢铁工业低碳发展的主要方向.

(3) 研发低碳节能技术. 国内钢铁企业及科研院所应从单体装置节能减排技术、工序间衔接匹配界面技术、全流程动态有序协同连续优化技术等三个方面^[33] 进行研发及应用. 在大力推行流程界面优化、高品质钢材冶炼、化石能源替代等较成熟常规技术应用的同时, 也要积极开展氢冶金、CCUS 等创新型颠覆技术的研发, 为实现双碳目标提供技术保障.

(4) 建设碳交易体系等其他策略. 相关职能部门应加强碳排放管理、碳交易体系建设等工作的开展, 要时刻关注国际碳市场、碳关税的变动, 及时做出相应调整, 维护国内碳市场平稳的同时, 实现市场机制碳减排的目的.

2.4 国内某钢铁企业低碳发展案例解析

针对上节所提出的各类减碳路径, 现选取国内某一典型钢铁企业, 以其技术特点、地理位置、资源禀赋、发展规划为依据, 针对性地分析并提出 7 条适合该企业的低碳发展路径, 总结归纳如下, 以供参考.

(1) 铁素资源优化.

(a) 提高长流程球团比

据统计, 2020 年该企业长流程球团矿用量占比约为 25%, 采用其自主研发的高比例球团技术后, 预计 2030 年长流程球团比可提升至 38%.

(b) 提高长流程废钢比

随着社会废钢资源的累计增多, 该企业长流程废钢比预计可从当前的 16% 增大至 2030 年的 20%.

(2) 流程优化重构.

(a) 优化长短流程比例

2020 年, 该企业长流程产量占比为 97%, 短流程产量占比为 3%; 2030 年, 企业规划降低长流程占比至 78%, 提升短流程占比至 13%, 同时发展氢冶金流程, 约占 9%.

(b) 采用工序界面技术

目前, 该企业由于出铁时间与转炉冶炼时间不匹配、铁水包/钢包在线个数多、周转慢等问题造成铁钢界面、钢铸界面、铸轧界面温降较大, 通过应用各类“界面技术”, 预计 2030 年三个界面的温降可分别降低 60、50 和 130 $^{\circ}\text{C}$, 同时带来一定

的节能降碳效果.

(3) 系统能效提升.

(a) 降低工序能源单耗

2020 年, 该企业各工序能耗虽然均低于行业单位产品能耗限额值, 但与先进值之间还存在一定差距; 在采取煤调湿、烧结矿显热回收等低碳节能技术后, 预计 2030 年各工序能耗均有一定幅度的下降.

(b) 提高企业自发电量

2020 年, 该企业自发电比例仅为 45%, 2030 年, 企业规划将自发电比例提升至 70%.

(c) 加快企业智能化改造

目前整个企业生产设备及管理设备的智能化水平不高, 在该方向上预计存有百万吨的减碳潜力.

(4) 用能结构优化.

(a) 增大社会绿电用量

随着社会电力结构的改善, 钢铁企业可用社会绿电量逐步增多, 这一部分也将给企业带来一定的减碳空间.

(b) 加强可再生能源利用

该企业位处华北平原, 常年光照充足, 风力资源丰富, 若对这部分可再生清洁能源加以利用, 定会取得可观的减碳效果.

(5) 低碳技术变革.

(a) 应用氢冶金技术

目前, 对于国内钢铁行业而言, 氢冶金技术正处于实验研究阶段, 并没有大规模地应用于工业生产过程. 而该企业战略定位较高、技术理念先进, 故其规划在 2023 年后, 逐步建成共约 500 万吨的氢冶金流程, 这一技术也是未来行业实现碳中和的重要支撑.

(b) 应用碳捕集、利用与封存技术

与氢冶金技术类似, 碳捕集、利用与封存技术也属于一种颠覆性变革技术; 由于其成本较高, 目前在钢铁企业内的应用实例较少. 但该技术作为行业实现碳中和的重要保障, 其带来的减碳潜力是不容忽视的.

(6) 产业协同降碳.

该企业厂区周边存有丰富的森林资源, 故该企业在利用森林碳汇固碳方面具有得天独厚的优势; 除此之外, 该企业在炉渣资源化回收利用方面也有一定的技术储备; 以上这些与林业、建筑业等其他行业协同降碳技术, 也将给企业带来显著的降碳成果.

(7) 降碳管理强化.

除上述降碳路径外,企业还应该重视低碳发展管控平台及保障机制的建立。例如,企业应积极搭建“企业碳核算管控平台”、“产品碳足迹分析平台”、“企业碳资产管理平台”,应建立健全“企业碳排放管理标准体系”、“企业碳金融交易制度”,同时还要加强人才队伍建设,增加全体员工碳减排意识。上述措施均会在无形中促进及保障企业低碳化、绿色化发展!

3 结论

(1) 当前国际钢铁行业面临严峻的降碳压力和减排任务,对此,美国、欧盟、韩国、日本等主要产钢国陆续制订低碳发展战略,并启动低碳发展项目,主要聚焦在发展电炉流程、氢冶金、CCUS和清洁能源利用四个方向上。

(2) 减量化发展和流程结构调整是我国钢铁行业低碳发展的主攻方向,但同时也不能忽视节能技术带来的降碳潜力,而对于氢冶金、CCUS等颠覆性低碳技术,虽然其作为未来低碳发展的一个重要方向,但也需清晰认识到在实践过程中,仍存在众多技术性难题,普及应用的时间期限存在极大不确定性,尚不能作为钢铁行业碳中和的决策依据。

(3) 在钢铁行业的低碳发展上,国内外基本处于同一起跑线上,相较于部分国外钢铁企业,国内钢铁企业拟定的碳减排目标更高,减排力度更大;通过这一轮的变革,未来极有可能引领世界钢铁行业的低碳发展。

(4) 未来钢铁行业必将是碳排放权交易及征收碳税、碳边境税的主要对象,故国内钢铁企业应时刻关注国外碳交易及碳税的进展,及时开展企业碳核算、产品碳足迹等相关研究工作,提前布局,把握机会。

参 考 文 献

- [1] International Energy Agency. Global Energy Review 2020 [R/OL]. *Report Online* (2020-04-27) [2022-01-05]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/7e802f6a-0b30-4714-abb1-46f21a7a9530/Global_Energy_Review_2020.pdf
- [2] Zhao Y J. *Study on Carbon Emission Cost Accounting and Evaluation of Iron and Steel Enterprises* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2012
(赵雅敬. 钢铁企业碳排放成本核算与评价研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012)
- [3] World Steel Association. Climate change and the production of iron and steel [R/OL]. *Report Online* (2021-05-19) [2022-01-05]. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel.pdf>
- [4] World Steel Association. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020 [R/OL]. *Report Online* (2021-01-26) [2022-01-05]. <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/Global-crude-steel-output-decreases-by-0.9--in-2020.html>
- [5] International Energy Agency. Iron and steel technology roadmap [R/OL]. *Report Online* (2020-10-08) [2022-01-05]. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [6] World Steel Association. Sustainability Indicators 2021 Report [R/OL]. *Report Online* (2021-11-13) [2022-01-05]. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2021-Report.pdf>
- [7] ArcelorMittal. Climate Action Report (2019) [R/OL]. *Report Online* (2019-05-29) [2022-01-05]. https://storage.arcelmittalprod.blob.core.windows.net/media/hs4nmyya/am_climateactionreport_1.pdf
- [8] Nippon Steel Corporation. 2020 Sustainability Report [R/OL]. *Report Online* (2020-10-09) [2022-01-05]. <https://www.nipponsteel.com/common/secure/en/csr/report/nsc/pdf/report2020.pdf>
- [9] POSCO. POSCO Corporate Citizenship Report 2020 [R/OL]. *Report Online* (2021-06-04) [2022-01-05]. https://www.posco.co.kr/docs/eng6/jsp/dn/irinfo/posco_report_2020.pdf
- [10] China Steel Corporation. 2020 Corporate Social Responsibility Report [R/OL]. *Report Online* (2021-05-11) [2022-01-05]. <https://www.csc.com.tw/csc/hr/e/hr-2020.pdf>
(中国钢铁股份有限公司. 2020年企业社会责任报告[R/OL]. 在线报道 (2021-05-11) [2022-01-05]. <https://www.csc.com.tw/csc/hr/e/hr-2020.pdf>)
- [11] Big River Steel. Corporate Social Responsibility Report (2019) [R/OL]. (2021-05-24) [2022-01-05]. <https://bigriversteel.com/wp-content/uploads/2021/05/BRS2106-CSR-Report-Update-052421-Final.pdf>
- [12] Energy Information Administration. How much carbon dioxide is produced per kilowatt-hour of U. S. electricity generation? [EB/OL]. *Question Online* (2021-11-04) [2022-01-05]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>
- [13] China Electricity Council. China Electricity Council Releases Annual Development Report of China's Electric Power Industry 2020 [R/OL]. *Report Online* (2020-06-12) [2022-01-05]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-284175>
(中国电力企业联合会. 中电联发布《中国电力行业年度发展报告2020》[R/OL]. 报告在线 (2020-06-12) [2022-01-05]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-284175>)
- [14] Xue Q G, Yang F, Zhang X X, et al. Development of an oxygen blast furnace and its research progress in University of Science and Technology Beijing. *Chin J Eng*, 2021, 43(12): 1579
(薛庆国, 杨帆, 张欣欣, 等. 氧气高炉的发展历程及其在北京科技大学的研究进展. *工程科学学报*, 2021, 43(12): 1579)
- [15] Zhang J L, Liu Z J, Jiao K X, et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking. *Chin J Eng*, 2021, 43(12): 1630

- ((张建良, 刘征建, 焦克新, 等. 炼铁新技术及基础理论研究进展. 工程科学学报, 2021, 43(12): 1630)
- [16] Yan J J. Progress and future of ultra-low CO₂ steel making program. *China Metall*, 2017, 27(2): 6
(严珺洁. 超低二氧化碳排放炼钢项目的进展与未来. 中国冶金, 2017, 27(2): 6)
- [17] Wang D Y. Breaking-through iron-making technologies in ULCOS project. *World Iron Steel*, 2011, 11(2): 7
(王东彦. 超低碳炼钢项目中的突破型炼铁技术. 世界钢铁, 2011, 11(2): 7)
- [18] Hu J G, Guo Y L, Zhou W T, et al. Analysis of the progress and application prospects of new low-carbon ironmaking technology in the united states. *China Steel Focus*, 2011(2): 51
(胡俊鸽, 郭艳玲, 周文涛, 等. 美国低碳炼铁新技术的进展及应用前景分析. 冶金管理, 2011(2): 51)
- [19] Zhang L N, Li H, Cheng L, et al. Overview of low-carbon technology development in foreign steel industry. *Yejin Jingji Yu Guanli*, 2018(5): 30
(张利娜, 李辉, 程琳, 等. 国外钢铁行业低碳技术发展概况. 冶金经济与管理, 2018(5): 30)
- [20] Zhang J L, Li K J, Liu Z J, et al. *Primary Exploration of Hydrogen Metallurgy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021
(张建良, 李克江, 刘征建, 等. 氢冶金初探. 北京: 冶金工业出版社, 2021)
- [21] Zhong Dian Jing Wei. Cost analysis of China's main hydrogen production technologies: Coal production has obvious advantages [EB/OL]. *Sohu Website Online* (2021-02-29) [2022-01-05]. https://www.sohu.com/a/449697033_121028641
(中电经纬. 中国主要制氢技术成本分析: 煤制氢优势明显 [EB/OL]. 搜狐网页在线 (2021-02-29) [2022-01-05]. https://www.sohu.com/a/449697033_121028641)
- [22] Xie H P, Liu H, Wu G. China's carbon dioxide emissions technology should be developed in the direction of CCU. *Energy China*, 2012, 34(10): 15
(谢和平, 刘虹, 吴刚. 中国未来二氧化碳减排技术应向CCU方向发展. 中国能源, 2012, 34(10): 15)
- [23] Duan M S, Pang T. Basic elements of emission trading scheme. *China Popul Resour Environ*, 2013, 23(3): 110
(段茂盛, 庞韬. 碳排放权交易体系的基本要素. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 110)
- [24] Li X P, ShangGuan F Q, Zhou J C, et al. *Carboniferous Flow Operation and CO₂ Emission Reduction in Steel Manufacturing Process*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020
(郇秀萍, 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. 北京: 冶金工业出版社, 2020)
- [25] Emissions-EUETS. EU ETS Product Benchmarks [EB/OL]. *Website Online* (2013-09-15) [2022-01-05]. <https://www.emissions-euets.com/product-benchmarks>
- [26] International Energy Agency. CO₂ Emissions from fuel combustion 2019 highlights [R/OL]. *Report Online* (2019-11-23) [2022-01-05]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Highlights.pdf
- [27] International Energy Agency. Material efficiency in clean energy transitions [R/OL]. *Report Online* (2019-03-22) [2022-01-05]. <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>
- [28] ShangGuan F Q, Zhang C X, Li X P, et al. Discussion on the CO₂ emission calculation method & its application in the steel plants // *Proceedings of the 2011 National Metallurgical Energy Conservation, Emission Reduction and Low-Carbon Technology Development Seminar*. Tangshan, 2011: 6
(上官方钦, 张春霞, 郇秀萍, 等. 钢铁企业CO₂排放计算方法及其应用探讨 // 2011年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会文集. 唐山, 2011: 6)
- [29] Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistical Yearbook* (2018). Beijing: China Statistics Press, 2019
(国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2018). 北京: 中国统计出版社, 2019)
- [30] ShangGuan F Q, Liu Z D, Yin R Y. Study on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutrality" in steel industry in China. *China Metall*, 2021, 31(9): 15
(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. 中国冶金, 2021, 31(9): 15)
- [31] Yang T. The development of low-carbon technology in the iron and steel industry abroad and China's CO₂ emission reduction strategy. *China Steel*, 2011(6): 12
(杨婷. 国外钢铁工业低碳技术发展与中国减排CO₂策略. 中国钢铁业, 2011(6): 12)
- [32] ShangGuan F Q. *Study on the Optimization of Full Scrap EAF Process—City Steel Plants & Decarbonization of Steel Industry* [Dissertation]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2021
(上官方钦. 全废钢电炉流程优化研究——城市钢厂与钢铁工业脱碳化[学位论文]. 北京: 钢铁研究总院, 2021)
- [33] Yin R Y. *Metallurgical Process Engineering*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004
(殷瑞钰. 冶金流程工程学. 北京: 冶金工业出版社, 2004)