

双碳背景下钢铁行业转型发展路径研究

白茜茜, 段江娇

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年8月4日; 录用日期: 2023年10月4日; 发布日期: 2023年10月12日

摘要

在当前追求高质量发展的背景下, “碳达峰” “碳中和” 双碳目标的明确提出使得国内各制造业的碳排放量受到了空前广泛的关注。所谓碳达峰是指碳排放量达到峰值, 而碳中和则是碳排放量的排放和吸收相等达到没有新的碳排放的水平。而钢铁行业作为国内31个制造业中的碳排放量大户, 其碳排放占据了全国碳排放总量的15%, 因此钢铁行业应如何在双碳目标下进行绿色转型、产品升级, 也成了当前我国钢铁行业所面临的实际问题。本文从双碳目标的提出对钢铁行业的影响出发, 以控制钢铁行业产能产量、促进废钢行业规模发展、提高电弧炉短流程在粗钢冶炼工艺中的占比等方面研究我国钢铁行业应该如何调整其产品结构, 实现钢铁行业的双碳目标, 构建绿色可持续发展模式。

关键词

钢铁行业, 双碳目标, 短流程, 去产能, 废钢行业

Study on the Transformation and Development Path of Iron and Steel Industry in the Context of Dual Carbon

Xixi Bai, Jiangjiao Duan

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 4th, 2023; accepted: Oct. 4th, 2023; published: Oct. 12th, 2023

Abstract

In the context of the current pursuit of high-quality development, the carbon emissions of the domestic manufacturing industries have received unprecedented attention due to the explicit proposal of the dual-carbon goals of “peak carbon” and “carbon neutrality”. The so-called carbon peak

refers to the peak of carbon emissions, while carbon neutrality means that the emission and absorption of carbon emissions are equal to the level of no new carbon emissions. The steel industry, as a major carbon emitter in 31 domestic manufacturing industries, occupies 15% of the total national carbon emissions, so how the steel industry should carry out green transformation and product upgrading under the dual-carbon target has also become a practical problem faced by China's iron and steel industry at present. Starting from the impact of the proposed dual-carbon target on the iron and steel industry, this paper studies how China's iron and steel industry should adjust its product structure to realize the dual-carbon target of the iron and steel industry and build a green and sustainable development mode by controlling the production capacity of the iron and steel industry, promoting the development of the scale of the scrap industry, and increasing the proportion of the electric arc furnace short process in the crude steel smelting process, and so on.

Keywords

Iron and Steel Industry, Dual Carbon Targets, Short Processes, Capacity Removal, Scrap Industry

Copyright © 2023 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

我国社会主义发展进程经过数十年积累,已经站到了新的起点,实现减排降碳已经成为促进我国经济社会发展全面绿色转型的总抓手,双碳目标的提出更加强调了我国对于治理碳排放的决心。“碳达峰”“碳中和”双碳目标的明确提出使得各行各业的碳排放量受到了空前广泛的关注,其中钢铁行业作为国内31个制造业中的碳排放量大户,如何调整钢铁行业的生产成为了关乎碳排放治理的重要课题。2022年1月,国务院印发了《“十四五”节能减排综合工作方案》对于“十四五”时期节能减排工作作出总体部署,对钢铁行业提出新要求和新目标,对钢铁行业推进节能减排、绿色转型具有重要的指导意义。

关于我国钢铁行业碳排放量现状,上官钦,刘正东,殷瑞钰(2021)经过对CO₂排放计算,对比得出了钢铁行业的碳排放与粗钢产出量具有很强的相关性,减少粗钢产出,调整钢铁行业的产业结构的优化升级有着至关重要的影响[1]。双碳目标的提出对钢铁行业产品升级的影响也有不少学者进行了相关研究,高春艳,牛建广等(2021)针对钢铁生产阶段EAF短流程炼钢与BF-BOF长流程炼钢的碳排放进行比较,结果表明,BF-BOF炼钢每吨粗钢CO₂排放量为1.15 tCO₂/吨,EAF炼钢法为0.05 tCO₂/吨,可以很明显的看出EAF炼钢法在减排方面的效果;而黄维,秦子然,邢娜,曲余玲(2021)以废钢行业的发展及其对钢铁行业的影响为例,研究了在碳中和背景下,加大废钢在钢铁行业的应用对于钢铁行业的重大意义;另一方面,根据张超,王韬等(2018)年对于我国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估,推断中国钢铁最终产品国内消费量可能在2020年前后达到6.7亿吨左右的峰值,2040年下降至4.2亿吨。

综上所述,大量文献就我国钢铁行业的产品转型升级做出了细致研究,证明了双碳目标对于我国钢铁行业的产品升级有着前瞻性指引的作用。众多学者对钢铁行业的减排和转型都表示肯定,但关于钢铁行业产品结构该往何种具体结构发展尚未明确。

本文将从两个方面对钢铁行业产业结构的转型方向进行分析。第一,研究我国钢铁行业目前产品结构状况,找出双碳目标下这样的结构是否合理;第二,根据其他国家的经验和我国实际,提出钢铁行业转型的有效路径。

2. 我国钢铁行业的现状

2.1. 我国钢铁行业产品结构的现状

钢铁行业产品一般指以“铁”为主要基础元素的金属基础产品, 主要分为生铁、粗钢以及钢材三大类产品。生铁是直接由高炉中生产出的粗制铁, 可进一步精炼成钢、熟钢或工业纯铁, 再熔化铸造成专门的形状。粗钢是用生铁或废钢等含铁原料, 经过转炉或电弧炉等冶炼设备提纯, 将含碳量降到规定范围、并将其他元素含量调整到规定范围, 获得符合最终钢材所要求的化学成份的钢水, 大部分再用连铸机铸成钢坯、或用钢锭模铸成钢锭, 小部分直接铸造成铸钢件。钢材是钢锭、钢坯或钢材通过压力加工制成的一定形状、尺寸和性能的材料[2]。大部分钢材加工都是通过压力加工, 使被加工的钢(坯、锭等)产生塑性变形。根据钢材加工温度不同, 可以分为冷加工和热加工两种。

由表 1 中的数据可以看出自 2017 年至 2021 年, 我国钢铁行业三大类产品产量整体是呈现上升的态势, 并且在总量中的占比基本保持稳定[3]。其中, 生铁产量和粗钢产量加起来占钢铁行业总产量的约 60%。这既反映了我国钢铁行业产品结构的低端化, 也反映了钢铁行业低碳发展的艰巨性。

Table 1. China's steel industry product output, 2017~2021 (ten thousand tons)

表 1. 2017~2021 年我国钢铁行业产品产量(万吨)

指标	2021 年	2020 年	2019 年	2018 年	2017 年
生铁产量	86856.8	88752.4	80936.5	77105.4	71075.9
生铁占比	26.82%	27.08%	26.88%	27.49%	27.44%
粗钢产量	103278.8	106476.7	99634.2	92826.4	83172.8
粗钢占比	31.90%	32.49%	33.10%	33.10%	32.10%
钢材产量	133666.8	132489.2	120477.4	110551.6	104818.3
钢材占比	41.28%	40.43%	40.02%	39.41%	40.46%
钢铁产品总量	323802.4	327718.3	301048.1	280483.4	259067

表 2 的数据中前五行主要显示了我国钢材产量中的主要钢材产量, 可以看出自 2017 年至 2021 年我国的钢材总产量整体呈现上涨的趋势, 只有 2021 年表现出下跌的态势。

Table 2. China's major steel production, 2017~2021 (ten thousand tons)

表 2. 2017~2021 年我国主要钢材产量(万吨)

指标	2021 年	2020 年	2019 年	2018 年	2017 年
钢筋	25206.3	26639.1	24971.6	20961.0	19997.7
线材	15585.1	16655.6	15682.0	14448.8	12973.4
冷轧薄板	4510.9	3912.3	3251.6	3003.4	3277.3
中厚宽钢带	17932.7	17046.1	14938.3	15455.3	13779.6
焊接钢管	5883.2	6166.6	5619.2	4837.2	5317.1
主要钢材产量总和	69118.2	70419.7	64462.7	58705.7	55345.1
钢材总产量	133666.8	132489.2	120477.4	110551.6	104818.3
主要钢材占钢材总产量之比	51.71%	53.15%	53.51%	53.10%	52.80%
主要钢材增长率	-1.85%	9.24%	9.80%	6.07%	-5.11%

钢材分为普钢和特钢, 特钢指那些由于成分、结构、生产工艺特殊物理、化学性能或者特殊用途的钢铁产品, 与普钢在用途上有着较大差别。我国钢铁行业主要钢材都是属于附加值偏低的普钢或者是中低端特钢(转炉流程的优质碳素钢、电炉流程的不锈钢、合金工具钢), 表 2 中列出的五种主要钢材占比超过钢材总产量的 50%。如此高的普钢和中低端特钢占比, 可以说多方面的因素所造成的。由于我国钢铁工业是在计划经济体制下不断发展起来的, 在早年作为经济主要推动力的钢铁行业, 在缺乏炼制高端特钢技术的背景下, 形成了以追求产量为首要目标的粗放生产经营模式[4], 导致我国钢企如今产品结构呈现出以普钢为主部分中低端特钢的局面, 相比于高技术含量、高附加值的高端特钢(高清洁度、高均匀性、精细组织、高尺寸精度、高性能), 如硅钢、高档模具钢等等, 目前由于部分技术问题, 不能生产或者生产能力不足或者是一些汽车合资企业要求等原因导致这部分钢材需要依靠进口满足[5]。这也是我国作为钢材产量第一大国却仍有钢材进口的原因之一。

2.2. 我国钢铁行业碳排放量的现状

我国钢铁行业粗钢炼制流程主要涉及高炉 - 转炉长流程路线和电弧炉短流程路线[6]。相较于利用电能电弧炉短流程, 所消耗的能源而导致的碳排放, 高炉 - 转炉流程所造成的碳排放吨钢排放上能减少约 1.6 吨碳排放, 几乎是降低了 75% 的碳排放。在当下双碳目标的方针下, 减少粗钢中转炉钢的占比, 降低生钢产量正是一条可行的实施路径。

由图 1 我们可以清楚的得出, 我国在黑色金属冶炼技术上的进步, 吨钢碳排放量在逐年的下降, 已经从 2000 年的 4.23 吨降至 2020 年的 1.97 吨[7]。这部分的技术进步主要来自于我国钢企对于铁前工序中对焦化、烧结工艺的能源利用效率的提升, 如燃烧技术的提高, 以应用空气 - 燃料双预热、蓄热式燃烧技术、富氧燃烧技术等, 这些燃烧技术的应用提高了我国钢企对于炼钢过程中能源利用率, 降低了吨钢的能源消耗; 以及对余热转换效率的提升, 由于钢铁炼制过程中每个工序都存在升温 and 降温, 其中降温工序中的余热属于非必要能耗, 提升其转换效率, 也能降低吨钢的能源消耗。这也是我国这些年吨钢能耗下降, 从而顺势导致碳排放降低的原因。但是由于我国钢铁行业粗钢产量的逐年上升, 导致我国钢铁行业的碳排放量在逐年的上涨。

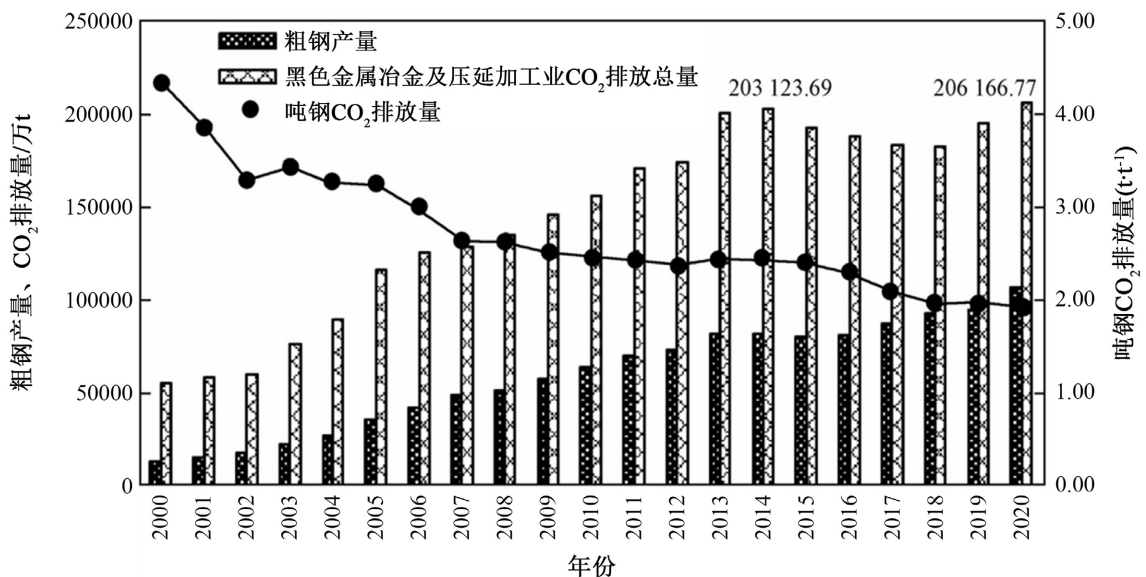


Figure 1. China's iron and steel industry carbon emissions over the years

图 1. 我国钢铁行业历年碳排放量

3. 我国钢铁行业产品结构亟需升级

我国钢铁行业在“十三五”期间,在去产能、技术创新等方面取得了一定的成果,但仍然存在需要改善或进一步深化改革的诸多方面,下文将从产能产量、废钢行业以及长短流程方面进行阐述。

3.1. 我国钢铁行业过高的无效产能及产量

3.1.1. 粗钢产能过剩,需求不足

我国的粗钢需求主要分为两部分,国内需求和国外需求,主要以国内需求为主导。2015年以前,大量的政府基建项目对于钢铁有着大量的需求,但在十八大以后,确立了经济新常态的思想,并减少了通过政府支出的方式来刺激国内经济增速,政府基建项目的减少使得国内需求随之疲软[8];另一部分是来自国外的需求。过去我国依靠生产要素上的相对优势,在国际大宗商品市场上,以相对优惠的价格,迅速占据了粗钢的国际市场,各国尤其是发达国家对我国粗钢的进口需求大大增加,这也进一步刺激了我国钢铁行业大发展。但是,近年来我国生产要素优势下降,带来了我国粗钢出口价格的上涨,且伴随着以美国为主的国家以中外长期贸易逆差为由开展了贸易战,这都导致外国市场对于我国的进口需求的下降。以2015年为例,2015年全国粗钢产量8.04亿吨,产能利用率70%左右,而粗钢实际需求量6亿吨左右。

3.1.2. 特钢占比偏低,缺乏核心技术

如图2中所示,我国钢铁行业的特钢产量占比长期处在15%左右,由于核心技术的缺乏,我国在硅钢、高端模具钢、航天军工用钢等高端特钢上无法通过自身的产出满足需求,需要从国外进口高质量钢材,形成我国向发达国家出口低端钢材,国外发达国家向我国出口高端特钢的局面。由于国内外环境的变化[9],我国对外出口的低端钢材数量在减少,但仍存在需要进口高端特钢的局面。由于国内外环境的变化,我国对外出口的低端钢材数量在减少,但仍存在需要进口高端特钢的情况,这对国内的发展是不利的,很容易出现受制于人的局面。因此需要在现有的技术下,创新炼制高端特钢的技术,将核心技术掌握在自己的手中,将炼制特钢的成本降低,在特钢产量上实现自给自足。

3.2. 我国废钢行业发展不足

废钢能给钢铁企业生产带来诸多收益,废钢对于钢铁行业的重要之处在于其可以替代生铁作为生产钢材的原材料,但由于我国废钢行业仍在起步发展的阶段,当下面临着诸多问题。归结起来主要是三点:1)我国废钢资源量不足。虽然近些年来我国钢铁储蓄量持续上升,但钢铁产品的报废需要一定的时间,而我国的钢铁产品大规模报废期还未到来。2)我国废钢价格不具备优势,成本较高,钢企缺乏使用废钢作为原材料的动力。当前,废钢加工企业税收风险依然存在,尤其的进项税票的问题一直没有得到解决,国家优惠政策落实不一,异地开票存在经营风险[10]。3)我国废钢品质良莠不齐,由于我国对于废钢行业的行业监管程度不够,导致存在不规范的废钢回收企业以及小电炉钢厂,这使得正规废钢加工企业承担了极大的经营风险。而且钢企生产高质量的钢材对于废钢质量也是有着一一定程度的要求,国内供给质量的良莠不齐对我国钢企在大批量生产高质量钢材上造成一定的阻力。

3.3. 我国钢铁行业长流程炼制工艺占比过高

当前我国在粗钢冶炼以高炉-转炉长流程和电弧炉短流程为主,由表3中的数据我们可以得出,在粗钢炼制过程中运用铁矿石为原料通过高炉-转炉长流程炼制与运用废钢为原料通过电弧炉短流程炼制可节约铁矿石1.6吨、0.4吨焦炭、1吨的原煤,同时减少1.6吨二氧化碳、3吨固体废物的排放。

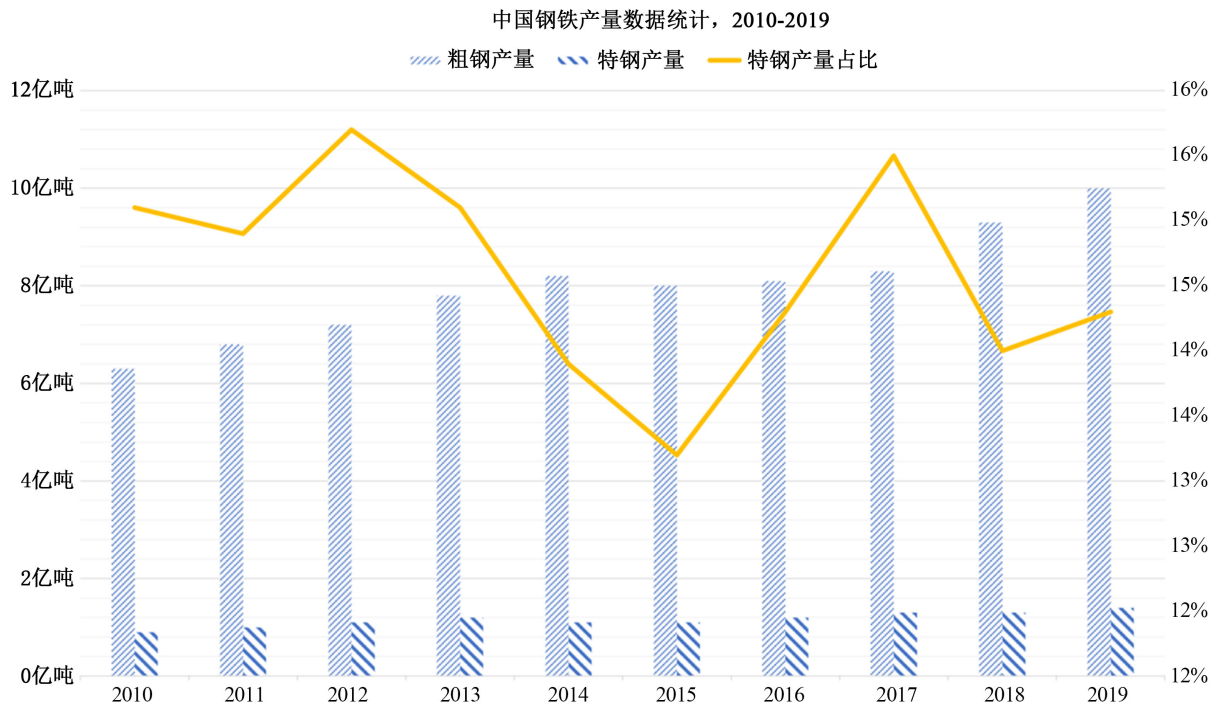


Figure 2. China's steel production statistics
图 2. 中国钢铁产量数据统计

Table 3. Production parameters of different steel production processes in China's steel enterprises
表 3. 我国钢企不同钢铁生产流程生产参数

流程	吨铁矿石消耗量/t	吨钢 CO ₂ 排放/t	吨钢能耗(标准煤)/kg
高炉-转炉长流程	约 1.65	1.8~2.2	600~700
全废钢炼炉短流程	0	0.4~0.8	350

从横向对比的角度看, 我国的电弧炉短流程占比才 10%, 与世界平均 30% 的水平, 还有较大的差距。这与过去我国钢企的发展方针有关[11], 但也与废钢行业发展缓慢有着极大的关联。由于电弧炉短流程要依靠以废钢为原材料炼制粗钢, 在我国废钢行业的发展程度不高的环境下, 即使大范围推行电弧炉也只会造成产能的浪费。而目前, 我国废钢比刚达到 20%, 与世界 35%~45% 的平均废钢比仍有较大差距, 但当前我国废旧废钢进入了快速增长期, 全国钢铁积蓄量从 2000 年 13 亿吨增长到 2020 年 100 亿吨, 废钢资源的大幅增加, 将快速推进废钢行业的发展, 以满足我国钢企提升电弧炉炼钢占比后对废钢资源的需求[12]。

在当前以高炉-转炉和电弧炉两种炼制工艺主导的局面下, 通过对比表 3 与表 4 中国际部分钢企与我国钢企在长流程的碳排放数据, 我国钢企在长流程冶炼的能源消耗已经处于世界前列, 并且据中钢协 2020 年的数据显示我国重点统计钢铁企业综合能耗为 545.27 千克/吨[13], 已经低于世界平均 575 千克/吨。如果要实现大幅降低, 只有实现核心技术的突破完成普遍适用氢冶金技术, 这需要长期的研发, 是短期无法迅速实现的。而另一方面, 则是通过提高电弧炉的占比, 这在短期内是能够有效实行的, 在以不新增产能为前提下, 将 2021 年的粗钢产量作为最高限, 并在 2025 年前, 将我国钢铁行业 10% 的电弧炉占比提升至 15%, 则有助于将钢铁行业的碳排放实现逐年降低, 从而实现碳达峰。

Table 4. CO₂ emissions from selected international long-process steel companies (unit/tonne)
表 4. 国际部分长流程钢铁企业 CO₂ 排放数据(单位/吨)

	2018 年	2017 年	2016 年
日本制钢	2.02	2.01	1.99
JFE	2.04	2.06	2.02
POSCO	1.92	1.90	1.88
俄新钢	1.91	1.90	1.91
谢韦尔	2.10	1.91	1.99
安米集团	2.12	2.12	2.14
塔塔钢铁	2.30	2.29	2.30

4. 我国钢铁行业产品结构转型的有效实施路径

4.1. 调节我国钢铁行业总产出并调节钢材产品结构

首先, 要巩固好“十三五”时期的成果, 继续降低粗钢和生铁的产量。“十三五”时期 1.5 亿吨粗钢去产能目标提前完成, 这对于钢铁行业达成双碳目标前进了一大步, 在此基础上, 在“十四五”时期, 钢铁行业依旧需要着重关注调节粗钢和生铁的产量, 可以以 2021 年的产量作为最高限, 在严格控制不新增产能的前提下, 通过降低无效产能, 最终达到降低钢铁行业整体生铁和粗钢产量的目标。通过稳定或降低总产量直接减少碳排放, 将碳排放控制在一个峰值, 以期早日实现碳达峰目标。

其次, 对钢企进行低碳排放的改造。2020 年, 中国钢铁工业协会重点统计企业吨钢能耗达到 545 千克标煤, 较 2015 年下降 4.7% 左右。截止 2021 年, 全国 240 多家企业约 6.8 亿吨粗钢产能已完成或正在实施超低排放改造, 这极大有利于达成双碳目标。在“十四五”期间, 我国钢铁行业需要在巩固此前成果的基础上, 进一步深化改革, 稳步对全国钢企产能实施并完成超低排放改造。钢铁行业作为污染物和碳排放最大的重点行业之一, 面临着减污降碳的双重压力, 要统筹推进减污降碳协调治理, 加快低碳冶金技术的研发, 提高能源利用率, 不断推进钢铁企业向绿色低碳转型[14], 切实推进钢铁行业实现高质量发展。助推钢铁行业在达到碳达峰后, 通过降低吨钢排放, 早日实现碳中和的目标。

最后, 是要调整我国钢企钢材结构, 提高特钢的占比, 尤其是提高高端特钢的产量, 降低普钢的占比。通过调整钢材的结构, 不但能给钢企带来经济效益, 提高利润率, 还能使得单位碳排放带来的效用提升。

4.2. 推进废钢行业发展

废钢铁回收利用产业作为一个低风险低收益的行业, 其由于投资金额大、回报率低的问题, 容易出现融资难的问题, 加之其国家税收上与其他行业相同, 都是缴纳 25% 的所得税、17% 的增值税, 相比而言双重课税带来的税收压力较大, 企业容易出现流动性风险。这都导致废钢企业融资难的问题[15], 对于废钢行业扩大规模造成一定的阻碍。假设央行能出台一些针对废钢行业类似抵押补充贷款的结构性的货币政策, 用以补充废钢企业的流动性, 帮助其扩大规模。或者是国家出台一些针对废钢行业的优惠税收政策, 用以改善废钢行业的收益率, 这也能有助于其获取资金扩大规模。

4.3. 提高短流程炼钢工艺的占比

首先, 电弧炉短流程炼钢需要以废钢作为原材料, 我国此前的废钢供给缺乏, 导致短流程炼钢工艺

的占比较低,且大多用于冶炼特殊钢材,而粗钢仍以高炉-转炉长流程为主,这也是我国钢铁行业成为碳排放大户的主要原因。因此,提高短流程工艺的占比需要以废钢行业的发展作为一定的前提,需要废钢的供给达到一定的程度后,通过将粗钢炼制从长流程慢慢转变成短流程[16],以达到降低碳排放量的目标。

其次,我国短流程工艺普及率较低,还是由于通过短流程冶炼粗钢相比于用铁水炼钢并不具备成本优势,由于运用电弧炉炼钢相比高炉-转炉需要更多的能源,主要以电能为主[17],但是相比欧美,我国的电能价格几乎是他们的两倍,这也导致我国钢企用电弧炉冶炼粗钢不具有经济效益,主要以冶炼特殊钢材为主。而这则需要我们的自主创新,通过加大在短流程工艺上的研究力度,在能源消耗方面进行节省。在资金方面可以向商行进行融资[18],例如通过新推出的碳减排支持工具获取资金,以此来支撑节能方面的研发。同时也要逐步推进短流程工艺的普及,减少对长流程的依赖。

5. 结论

本文通过研究多位学者的文章,总结了钢铁行业在减碳历程中需要着重关注改革的四个方面,分别是过高产能产量、废钢行业规模不足、电弧炉短流程占比不足以及调节钢材产品结构。这是我国钢铁行业这几十年高速发展过程中所累积下来的问题,需要我国钢铁行业结合当前的发展环境,对其产品结构作出相应的调整。

在产能产量方面,在“十三五”期间,我国钢铁行业提前完成了1.5亿吨的粗钢去产能的任务,但仍需控制粗钢和生铁产能产量,需要在巩固去产能成果的基础上,降低钢铁行业生铁、粗钢产量,对钢企进行低碳改造提高能源利用率。

在废钢行业方面,要运用宏观上的政策手段,给予废钢企业资金以及税收方面的政策支持,帮助其扩张规模以适应我国钢企对于废钢资源的需求量。并且加大科研资源在废钢炼制工艺上的投入,确保核心技术的掌握。同时加强对废钢企业的监管完善监管体系,确保废钢资源的质量。

在提高短流程占比方面,首先是要加强科研创新,掌握短流程冶炼的核心技术,减少能源的消耗,使得运用短流程冶炼粗钢更具经济效益,在减碳的同时提高钢企的收益。但这也需要废钢行业的发展作为一定的前提。其次,可以通过提高运用短流程的占比,将产能运用到生产高品质的钢材上去,提高产能利用率,同时以国内供给满足国内对高品质钢材的需求,在当前发展的国际形势下,降低受制于人的风险。

在钢材产品结构方面,要提高特钢占比,通过技术引进以及加大科研技术的投入,提升钢企对高端特钢的产量,以此满足我国国内对于高端特钢的需求缺口。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Li, Z.L., Dai, H.C., et al. (2019) Assessment of the Carbon Emissions Reduction Potential of China's Iron and Steel Industry Based on a Simulation. *Energy*, **183**, 279-290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.099>
- [3] 贾帅帅,邢美惠. 产能过剩背景下国内外钢材价格联动关系研究[J]. 经济与管理科学, 2016(6): 118-121.
- [4] 黄维,秦子然,邢娜,曲余玲. 废钢产业发展及其对钢铁行业的影响[J]. 冶金经济与管理, 2021(5): 36-38.
- [5] 李新创,高升. 钢铁工业绿色发展途径探讨[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(1): 19-27.
- [6] 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.
- [7] 于果. 经济新常态下钢铁工业高质量发展的实践探索[J]. 中国管理信息化, 2020(23): 159-160.
- [8] 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.
- [9] Ren, L., Zhou, S., et al. (2021) A Review of CO₂ Emissions Reduction Technologies and Low-Carbon Development in the Iron and Steel Industry Focusing on China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **143**, Article 110846.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110846>

- [10] 魏莉, 陈伟达, 杨焯. 考虑碳排放政策和市场需求更新的钢铁企业生产决策[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1199-1210.
- [11] 上官方钦, 汤志刚, 温燕明, 酃秀萍. 炼焦化学工业绿色发展工程科技战略[J]. 钢铁, 2015, 50(12): 11-18+41.
- [12] 田欣, 罗子凡, 王化璇, 等. 中国钢铁足迹的脱钩趋势与演变特征研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 725-732.
- [13] 屈葵葵. 钢铁行业产品结构调整的污染减排效应研究[J]. 智富时代, 2017(3): 123-124.
- [14] 马悦. 供给侧结构性改革背景下钢铁行业产品结构特征及优化对策[J]. 企业改革与管理, 2020(19): 223-224.
- [15] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢铁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): 33-38.
- [16] 张超, 王韬, 陈伟强, 刘刚, 杜欢政. 中国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2018(10): 169-176.
- [17] 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]. 绿色制造, 2021(4): 36-38.
- [18] 张琦, 沈佳林, 许李松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁, 2021(10): 152-163.