

· 综述 ·



三类钢铁制造流程降碳路线综述

倪冰¹, 崔志峰², 上官方钦¹, 郦秀萍¹, 李涛¹

(1 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;

2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据对钢铁行业低碳发展的分析和设想, 未来钢铁生产制造流程将在减量化发展进程中, 逐渐演变为高炉-转炉长流程、全废钢电弧炉短流程和氢冶金-电弧炉流程三大类。影响三类钢铁生产制造流程碳排放水平的关键因素包括流程结构、原料结构、能源结构、产品结构、装备水平、管理水平、技术水平等。采用中国钢研构建的双碳分析模型(CISRI-CPCN), 绘制了三类流程的降碳路线图。研究结果表明, 三类流程碳排放量逐年降低。从 2020—2060 年, 长流程的 CO₂ 排放量从 2.0 t/t(钢)降低到 0.87 t/t(钢), 可通过碳汇、碳交易等手段实现碳中和。2050 年短流程从 0.45 t/t(钢)降低到接近 0, 有望实现“近零碳”冶炼。2060 年氢冶金电弧炉流程(50%废钢+50%HDRI 原料结构)从 1.31 t/t(钢)降低到接近 0, 基本实现碳中和。综合考虑国民经济的发展需求, 建议未来钢铁行业在减量化发展过程中, 对三类流程的产品结构进行逐步调整。长流程的产品结构应逐步过渡到以生产平材产品为主, 特别是高端板材, 主要布局在沿海深水港地区。短流程应以建筑用长材为切入口, 逐步替代中小高炉-转炉流程, 部分生产合结钢等优特钢或不锈钢等单一品种, 主要布局在废钢资源丰富的城市周边。目前氢冶金-电弧炉流程尚处于探索和开发阶段, 需要克服其在绿氢、经济性、技术可靠性以及工程化等方面的诸多困难。

关键词: 钢铁制造; 流程结构; 全废钢电弧炉; 氢冶金; 低碳发展

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00141 **中图分类号:**TF089

Overview on Carbon Reduction Routes of Three Types of Iron and Steel Manufacturing Processes

Ni Bing¹, Cui Zhifeng², Shangguan Fangqin¹, Li Xiuping¹, Li Tao¹

(1 Steel Industry Green and Intelligent Manufacturing Technology Center, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the analysis and assumption of the low-carbon development of the iron and steel industry, the future iron and steel production and manufacturing processes will gradually evolve into three categories: blast furnace-converter long process, all-scrap electric arc furnace short process and hydrogen metallurgy-electric furnace process. The key factors affecting the carbon emission level of the three types of processes include process structure, raw material structure, energy structure, product structure, equipment level, management level, technical level, etc. This paper uses the "carbon peak and carbon neutrality" analysis model (CISRI-CPCN) constructed by China Iron and Steel Research Institute to draw a carbon reduction roadmap for the three types of processes. The research results show that the carbon emission of the three types of processes decreases annually. From 2020 to 2060, the CO₂ emission of the long process will be reduced from 2.0 t/t (steel) to 0.87 t/t (steel), and carbon neutrality can be achieved through carbon sinks, carbon trading and other means. In 2050, the short process will be reduced from 0.45 t/t (steel) to close to 0, which is expected to achieve "near-zero carbon" smelting. In 2060, the hydrogen metallurgical electric arc furnace process (50% scrap steel + 50% hydrogen direct reduced iron raw material structure) will be reduced from 1.31 t/t (steel) to close to 0, basically achieving carbon neutrality. Comprehensively considering the development needs of the national economy, it is recommended that the steel industry gradually adjust the product structure of the three types of processes in the development of steel industry reduction in the future. The product structure of the long process should gradually transform into the production of flat products, especially high-end flat products, which are mainly distributed in coastal deep-water port areas. The short process should take the long products for construction as the entry point, gradually replace the small and medium-sized blast furnace-converter process, and partially produce single varieties such as combined steel and other high-quality special steel or stainless steel, mainly in the layout around cities with rich scrap steel resources. At present, the hydrogen metallurgy-electric furnace process is still in the stage of exploration and development, and many difficulties in green hydrogen, economy, technical reliability and engineering needed to be overcome.

基金项目: 国家级--中国工程院战略咨询研究项目(品牌项目)(2022-PP-01-04);其它--现代生态智能电炉与电炉短流程关键技术开发(事20161190ZD)

作者简介: 倪冰(1974—),男,博士,正高级工程师;

E-mail: nibingcisri@163.com;

收稿日期: 2023-07-13

通信作者: 上官方钦(1984—),男,博士,正高级工程师;

E-mail: 13811710701@qq.com

Key Words: Steel Manufacturing; Process Structure; All-scrap Electric Furnace; Hydrogen Metallurgy; Low-carbon Development

1978年改革开放以来,中国钢产量不断增长,粗钢产量多年位居世界第一。钢铁行业装备逐步实现大型化,钢铁集中度稳步提高,普特钢体系日益健全,科技创新不断深化,大力支撑了国民经济建设。但钢铁行业面临着日趋严峻的环保形势,它仍然是CO₂排放大户,脱碳化发展任重道远^[1-3]。以煤为主的能源结构导致巨大的环境压力,矿石资源对外矿依赖过高,行业产能过剩,流程匹配不均衡,特钢比例较低等等,这些问题需要采用能源和流程结构调整、淘汰落后产能、提速高端产品发展等方法^[4-5]解决,以助力实现碳达峰碳中和目标。

目前,中国钢铁生产制造流程以传统高炉-转炉长流程为主,电弧炉短流程为辅,前者粗钢产量占90%,后者占10%。根据世界钢铁协会最新发布的《2022年可持续发展报告》^[6],2021年世界钢铁行业的结构为长流程(BF-BOF)71%,短流程(Scrap-EAF)22%,直接还原铁电弧炉流程(DRI-EAF,非绿氢)为7%。同年全球BF-BOF流程的平均CO₂排放量为2.32 t/t(钢),Scrap-EAF流程为0.67 t/t(钢),DRI-EAF流程为1.65 t/t(钢)。由此可见,后两类钢铁制造流程在碳减排方面具备较大的潜力,是未来钢铁行业实现绿色低碳转型发展的重要方向。该报告^[6]指出未来流程的碳排放变化趋势,本文分析了三类流程的变化趋势,预测了未来碳排放水平的变化趋势。

1 未来钢铁行业的三类流程设想

要实现碳达峰、碳中和目标,要从宏观上调整流程结构,实行总量削减、淘汰落后,不宜继续提高产量,要走高质量、减量化的发展道路,高度重视脱碳化。资源脱碳化,要特别重视合理使用废钢,降低焦炭用量^[7];能源脱碳化,要少用化石能源,转而用电,特别是充分利用电网弃电和绿电;生产制造流程脱碳化,在“双碳”落实进程中,应该在减量化的发展进程中逐步协同有序布局^[8]。

颠覆性技术的研发和应用是实现全球温控目标的关键。按实现碳减排的影响程度,以氢冶金为代表的减碳技术最有可能实现突破,当前初步形成氢基竖炉直接还原炼铁技术、氢基流化床直接还原炼铁技术、高炉富氢冶炼技术和富氢熔融还原炼铁技术四大技术路径,未来有可能发展成为与传统流

程相当的独立流程,占据一定比例。

上述背景下,生产制造流程结构将发生渐进式改变。根据中国钢研构建的双碳分析模型(CISRI-CPCN)的分析,在“双碳”落实进程中,流程结构将逐渐演变为三大类,即高炉-转炉长流程、全废钢电弧炉短流程和氢冶金-电弧炉流程,这三类流程的结构比例将在减量化的发展进程中逐步进行有序调整^[9]。

1.1 高炉-转炉长流程

以铁矿石为主要原料的高炉-转炉长流程将逐步过渡到以生产平材产品为主,特别是薄板、中厚板等高端板材的大批量产品,以及部分特钢产品^[10-11],其布局主要集中在沿海深水港地区,预计到2060年其流程占比将减少到15%左右。

1.2 全废钢电弧炉短流程

全废钢电弧炉流程的发展,要从建筑用长材的生产流程变革做起。应该以全废钢电弧炉流程生产建筑用长材来逐步替代以中、小高炉-转炉流程生产螺纹钢、线材等大宗产品,即以适当的布局发展城市钢厂^[12]、利用“城市矿山”。这类钢厂以生产建筑用长材为主,主要布局在废钢资源丰富的城市周边,规模约为50~200万t/年,以1~2条全废钢电弧炉短流程生产作业线为主。预计该流程到2060年占比可达60%,这一措施对钢铁行业脱碳化潜力很大,约占钢铁行业双碳进程中降碳贡献的35%。此外,如果钢材产品结构中的建筑用长材完全由全废钢电弧炉短流程来生产,则长流程还将会获得更多优质的原燃料,实现高端精品的制造,这也将进一步促进长流程的脱碳化发展。

1.3 氢冶金-电弧炉流程

氢冶金流程是以氢取代碳作为还原剂和能源^[13],从源头减少碳还原剂及其带入的硫、灰分导致的硫化物排放和炉渣排放。产出的无碳、低硫的氢直接还原铁(HDRI),通过界面衔接技术,连接电弧炉短流程,用优质原料扩展高端特殊产品的价值转化,构建氢冶金-电弧炉流程清洁高效生产系统^[14]。“绿氢”的生产和利用为钢铁企业实现CO₂的净零排放提供了方向。当前世界上还没有纯氢冶金的工业化应用实例,推行该工艺还需要不断地试验完善。同时,氢气的大规模制备、输送和储存还存在瓶颈,成本和安全都是发展纯氢基工程化稳定

运行的限制因素。对于 HDRI 这一优质中间产品,应考虑其在高端特钢等领域的拓展,体现资源价值。目前氢冶金-电弧炉流程尚处于探索和开发阶段,可鼓励有条件的企业开展氢冶金流程工业化试验。乐观预测,氢冶金流程到 2060 年占比将达到 25% 左右。

2 影响三类流程碳排放水平的关键因素

依据《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》计算 CO₂ 排放。影响碳排放水平的因素包括计算方法、流程结构、原料结构、用能结构、产品结构以及企业的装备水平、管理水平和技术操作水平等。

2.1 流程结构

目前,长流程的碳排放量约为 1.8~2.2 t/t(钢)。全废钢电弧炉短流程的碳排放量约为 0.30~0.60 t/t(钢)。如果每年短流程替代长流程生产 3 亿 t 粗钢,将减少 CO₂ 排放约 4.8 亿 t/年。氢基竖炉直接还原工艺有望成为未来氢冶金的主流工艺,本研究的氢冶金流程主要是指氢基竖炉直接还原-电弧炉炼钢-轧钢工艺。该流程主要包括制球(冷压矿粉制球后烧结成球团)、竖炉生产 HDRI、电弧炉炼钢、连铸、轧钢等工序。以目前的技术水平,无法实现全绿氢生产,使用灰氢的氢冶金流程(100% HDRI 原料)的碳排放约为 1.72 t/t(钢)。流程结构对钢铁行业碳排放具有重要影响,短流程碳排放显著低于长流程。未来氢冶金流程实现绿氢生产后,和短流程一样,有望实现近零碳排放。

2.2 原料结构

铁矿石和废钢是钢铁生产的主要原材料。长流程以铁矿石和焦炭生产铁水,添加 10%~30% 的废钢^[15-16]生产钢材;短流程以 100% 废钢资源生产钢材;氢冶金流程应尽可能多地用绿氢还原铁矿石生产的直接还原铁,配加一定量的废钢为原料生产钢材。采用铁矿石为原料的生产流程要明显高于采用废钢为原料的生产流程的碳排放。中国废钢使用比例一直偏低,远低于世界钢铁工业平均废钢比 40% 的水平。主要原因在于中国累积粗钢仍不充分,不能产生足够的废钢量。未来废钢资源随着粗钢蓄积量的增加而增长,将逐步满足流程的需求^[17-19]。

2.3 能源结构

中国“富煤、贫油、少气”的能源特点,决定了钢铁工业以煤炭为主的能源结构。长流程主要使用

焦炭,用能结构中能源包括煤炭、电力、天然气、油等。随着可再生能源比重提升,长流程用能结构有所改善,但以煤炭为主的能源结构仍难以改变,因而长流程的脱碳化相对困难得多。

与长流程不同,短流程能源消耗以电力为主,少量使用天然气、碳粉等。未来随着新能源装机容量的提升,2030 年国内有望实现一次能源中非化石能源占比 25%,对化石能源消耗将进一步降低,实现电力系统的深度脱碳化,因而短流程是最有可能实现近零排放甚至是零排放的^[20]。

氢冶金流程消耗的能源主要以氢气和电力为主。氢气作为重要的二次能源,根据不同的制备方法可将其分为灰氢(伴有大量 CO₂ 排放制得的氢)、蓝氢(将 CO₂ 通过捕集、封存、利用,从而避免大量排放制得的氢)、绿氢(将非化石能源发电后,通过电解得到的氢)三种。目前灰氢约占全球氢气产量的 95% 左右;蓝氢应用较少;绿氢更少。传统能源制氢技术成熟,产氢量大,成本控制较好,在未来一段时间内仍是制氢的主要途径。新型制氢技术至今尚未取得产业化推广的原因,仍在于技术和成本^[21]。目前,中国绿氢资源的规模只有 7 万 t 左右,到 2030 年,中国将部署电解槽装机约 80 GW,绿氢产量约 500 万 t,2060 年绿氢产量约 1 亿 t。预计钢铁行业获得 30% 绿氢配额,可以支持 3 亿 t 铁产量,届时满足 6 亿 t 粗钢产量(其中 3.6 亿 t 为废钢电弧炉流程生产)的要求。

2.4 产品结构

根据不同的分类标准,可以将钢材分成很多不同的产品种类。传统上认为电弧炉更适宜于生产特殊钢^[22],转炉生产普钢,目前的品种界限已经模糊,很多转炉生产优特钢^[23-24]。流程对产品结构影响逐渐淡化,产品差别一方面在于最终成分不同,所需冶金辅料添加量和冶炼时间不同;另一方面是由于产品加工深度和尺寸规格不同,从而导致加工强度和加工量不同。对同样流程而言,产品的深加工程度越高或产品附加值越高,其能耗和 CO₂ 排放越高。这里,选取最终产品为同品种规格的热轧材作为一致的边界条件。

2.5 装备水平、管理水平与技术水平

企业装备水平、管理水平、技术水平等,都会影响碳排放水平。一般而言,生产设备规模越大,生产效率越高,碳排放越低,但当设备大到一定程度时,碳排放相对稳定,不再有明显的降低。因此设

备要追求合适规模的大小而非最大规模。通常,企业的管理越精细,碳排放越低^[25]。但管理一般是间接反映了成效,很多管理产生的绩效是难以量化和相互比较的。影响三类钢铁流程碳排放水平的重点在于技术进步,工艺技术越先进,碳排放越低。

根据以前的研究结果^[26-28],选取高炉-转炉长流程、全废钢电弧炉短流程和氢冶金-电弧炉流程(原料50%废钢+50% HDRI)的碳排放量基准值分别是2020年的2.0、0.45、1.31 t/t(钢),分析未来的降碳路线。

3 三类流程减碳路线分析

3.1 分析模型

根据《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》确定钢铁企业某一年的碳排放量,以此作为基准年,依据采取的降碳措施的差异估算出下一年的碳排放量。以此类推,预测未来若干年的碳排放量。降碳措施主要包括各类减碳技术、铁素资源结构变化、能源结构变化、流程结构变化等。在此基础上,阐述不同降碳措施之间的协同降碳机理和流程层次的逻辑关系,构建既适用于企业又适用于行业的分析模型。模型既可以计算历史数据又可以预测未来发展趋势,适用于单独或多个钢铁制造流程,可以量化能源消耗总量和能源消耗强度、CO₂排放总量和CO₂排放强度、各类降碳措施的减排贡献以及铁素资源结构变化、能源结构变化、流程结构变化等重要指标。

3.2 高炉-转炉长流程降碳路线

影响长流程吨钢CO₂排放的主要因素包括高炉富氢、球团替代、转炉废钢比例、全国发电能源结构、各工序能效、界面技术、自发电比例、炉渣利用、智能化技术等因素。选择2020年为计算基准年,该年排放量为2.00 t/t(钢)。长流程CO₂排放量将逐年平稳下降,但由于使用铁矿和焦炭,到2060年仍有碳排放量0.87 t/t(钢),自身难以实现碳中和。剩余的碳排放量通过CCUS、碳汇、碳交易等措施^[29-32]处理后,才能有望实现碳中和。

3.3 全废钢电弧炉流程降碳路线

3.3.1 影响因素

影响短流程CO₂排放的主要因素包括全国发电能源结构、各工序能效、界面技术、炉渣利用、智能化技术等因素。以全废钢电弧炉钢厂为例,以2020年为基准年,测算到2050年期间吨钢生产的CO₂排放情况,分析各类减碳技术、措施的发展前景及减

排贡献,规划全废钢电弧炉短流程的不同阶段发展目标。结合短流程的发展现状,作如下假设,以1 t粗钢为计算基数,只考虑100%全废钢的电弧炉流程。考虑2022—2060年全国电力能源结构调整对CO₂排放的影响,电力因子逐年降低^[33-34],到2060年接近于0。考虑能效提升,到2025年各工序(电弧炉、精炼、连铸、轧钢等)能耗达到能耗限额标准的准入值;到2030年各工序能耗达到能耗限额标准的先进值;到2050年各工序能耗达到基于企业实际的工序能耗极限值。考虑界面技术^[35],如钢包加盖、连铸高拉速温度止损、热装率提升等,得到普及应用,界面温降大幅下降。考虑智能化技术应用,考虑炉渣资源化利用,按照钢铁和建材对半分摊减排效益。

3.3.2 路线图分析

电弧炉发展已有百余年的历史,技术成熟可靠,未来几十年的技术进步路径相对清晰,对碳排放的影响也相对明确。根据模型计算得到短流程路线如图1所示,初始碳排放0.45 t/t(钢)。随着各节能降碳措施的落实,到2030年全废钢电弧炉短流程的吨钢碳排放量有望降低至0.29 t/t(钢),2040年降低至0.11 t/t(钢),到2050年碳排放接近0,有望实现碳中和。

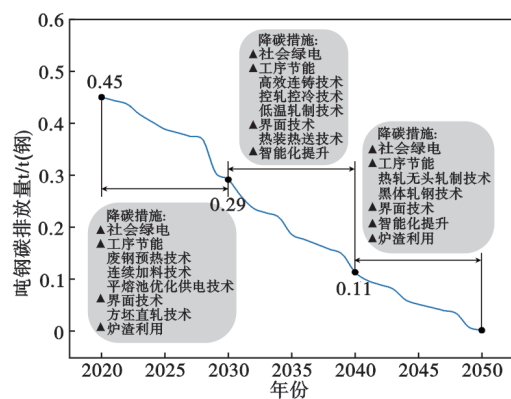


图1 全废钢电弧炉短流程降碳路线

Fig. 1 All-scrap electric furnace short-process carbon reduction route

影响短流程的降碳因素如图2所示。由图2可知,社会绿电影响为0.26 t/t(钢),是最重要的影响因素;各工序节能为0.14 t/t(钢),是次要因素;其他因素界面技术、智能化提升、炉渣利用等影响较小。

将降碳的影响因素分解落实到各个工序中,用

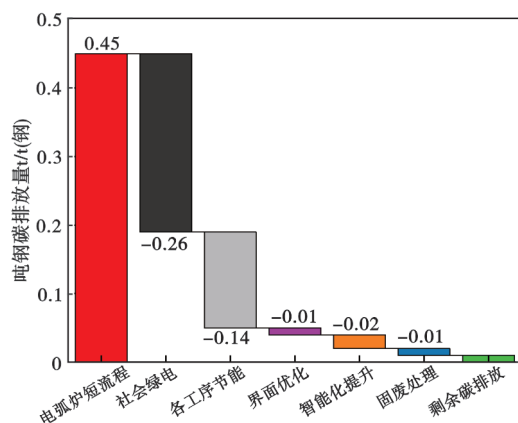


图2 影响短流程降碳的因素

Fig. 2 Factors affecting short process carbon reduction

同样的方法可以作图,如图3所示。可以发现,在整个流程中电弧炉工序的减碳潜力最大,高达0.18 t/t(钢),占整个流程降碳潜力的40%;其次是轧钢工序,其减碳潜力约为0.16 t/t(钢),占整个流程降碳潜力的37%;然后是精炼工序,其减碳潜力约为0.05 t/t(钢),占整个流程降碳潜力的11%。主要原因是这3个工序用电量排前3名,是耗能大户,因此潜力也大。除此之外,铸轧界面、连铸工序、炉渣利用、钢铸界面以及公辅也具有一定的降碳潜力,虽小但不能忽视。

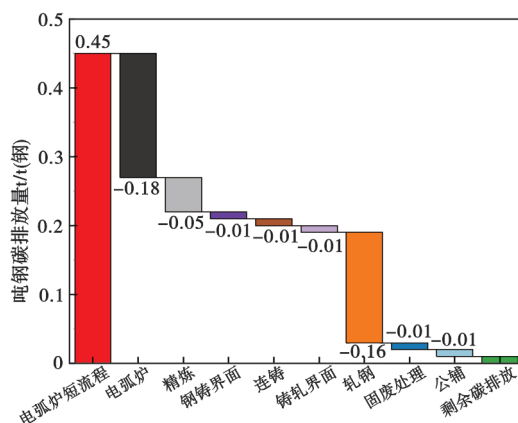


图3 全废钢电弧炉流程各工序降碳图

Fig. 3 Carbon reduction diagram of each process in the whole scrap steel electric furnace process

随着社会电力因子不断降低,电弧炉流程成为最易实现的钢铁工业脱碳化发展的途径。电力可以“削峰填谷”灵活使用,电弧炉消纳社会废钢,提高工序节能效果,实现钢厂与城市的和谐共存。这些是发展全废钢电弧炉流程的显著优势,应以全废钢电弧炉流程生产建筑用长材来逐步替代以中、小

高炉-转炉流程生产螺纹钢、线材等大宗产品。目前国内有500多座电弧炉,多部署在城市周边,以支持实现“城市钢厂”。这类钢厂以生产建筑用长材为主,部分生产合结钢等优特钢或不锈钢等单一品种,布局在废钢资源丰富的城市周边,规模约为50~200万t/年,以1~2条生产线为主。流程替代后,长流程将会获得更多优质的原燃料,实现精料入炉,也会进一步促进自身的脱碳化发展。

3.4 氢冶金-电弧炉流程降碳路线

3.4.1 影响因素

影响氢冶金流程CO₂排放的主要因素包括氢直接还原铁结构(制球方式、竖炉生产时绿氢使用比例、HDRI和废钢使用比例等)、全国发电能源结构、各工序能效、界面技术、炉渣利用、智能化技术等因素。选择2020年为计算基准年,该年吨粗钢CO₂排放量1.31 t/t(钢)。作如下假设,竖炉使用氢气生产直接还原铁,2020年灰氢占比100%,以后逐年减少,到2060年全部使用绿氢。作为电弧炉生产原料,氢冶金-电弧炉流程实现100% HDRI冶炼,近20年内都是较难实现的,因此,考虑50%废钢+50% HDRI。考虑2020—2060年全国电力能源结构调整对CO₂排放的影响。工序主要是球团和竖炉、电弧炉和轧钢,采用各种节能技术,2030年各工序能耗为能耗限额标准的准入值;到2040年各工序能耗达到能耗限额标准的先进值;到2050年各工序能耗达到基于企业实际的工序能耗极限值。铁钢界面温降主要是指HDRI从出竖炉到入电弧炉过程中的温降。这部分温降约为70℃左右,为低温热源,回收利用效率低,不再考虑。考虑对炼钢-连铸、连铸-热轧二个区段开展界面优化工作,使界面技术得到普及应用,减少铁素物质流在传输过程中的温降,界面温降大幅下降。考虑智能化技术应用。开展炉渣资源化利用,按照钢铁和建材对半分摊减排效益。

3.4.2 路线图分析

目前氢冶金-电弧炉流程尚处于探索和开发阶段,不确定性因素较多。在上述假设的基础上,分析CO₂排放的结果如图4所示。在2020年碳排放量1.31 t/t(钢),是最高值。采用各种降碳措施后,碳排放量逐年降低,在2060年碳排放量接近0,基本实现碳中和。

分解影响氢冶金电弧炉流程降碳的因素,如图5所示。在整个流程中竖炉绿氢生产HDRI工

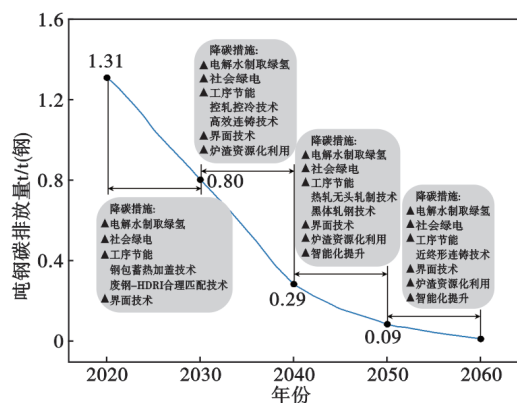


图4 氢冶金电弧炉流程降碳路线

Fig. 4 Hydrogen metallurgy electric furnace process carbon reduction route

序的减碳潜力最大,高达0.64 t/t(钢),占流程降碳潜力的49%;其次是采用社会绿电,其减碳潜力约为0.29 t/t(钢),占整个流程降碳潜力的22%;然后是各个工序节能,其减碳潜力为0.27 t/t(钢),占整个流程降碳潜力的21%。此外,界面技术、智能化提升、电弧炉炉渣回收利用等对CO₂的减排也有着一定的影响。

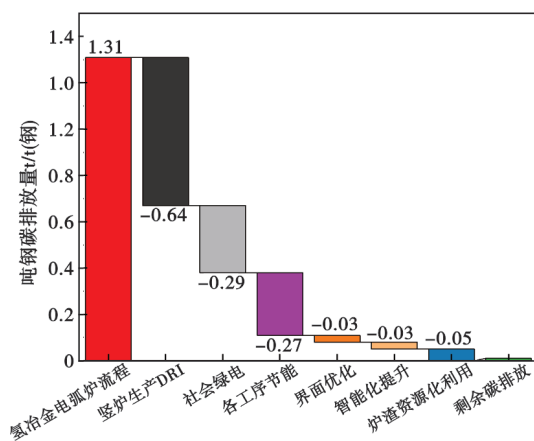


图5 影响氢冶金电弧炉流程降碳的因素

Fig. 5 Factors affecting carbon reduction in Hydrogen metallurgical electric furnace process

把降碳影响因素分解落实到各个工序中,用同样的方法可以作图,如图6所示。可以发现,低碳技术变革(生产HDRI的使用绿氢比例)是最重要的因素,高达0.64 t/t(钢);由于用电耗能较多,制球、电弧炉和轧钢工序具备较大的降碳潜力,分别为0.22、0.20、0.15 t/t(钢);除此之外,精炼、铸轧界面、连铸工序、固废处理、钢铸界面以及公辅也具有一定的降碳潜力。

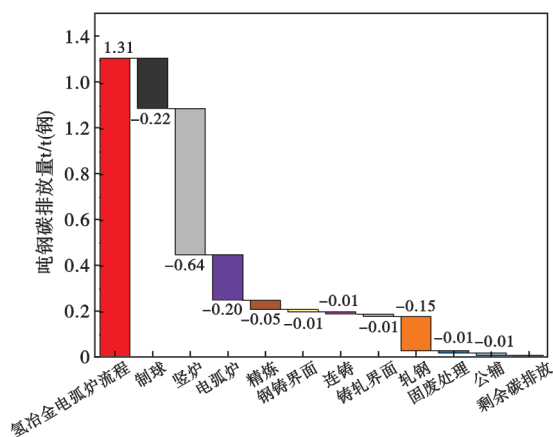


图6 氢冶金电弧炉短流程各工序降碳图

Fig. 6 Hydrogen metallurgy electric furnace short process carbon reduction diagram of each process

目前氢冶金-电弧炉流程尚处于探索和开发阶段,影响其降碳的主要因素在于氢还原生成HDRI,其作为优质的原料,应考虑发挥其最大作用,用来生产优特钢材等高端产品。2023年张宣科技全球首例120万t氢冶金示范工程实现绿色DRI产品连续生产,未来可鼓励有条件的企业开展更多氢冶金-电弧炉流程工业化试验和生产。氢冶金流程和短流程互为补充,成为新型的优钢生产线。

4 总结及建议

(1)未来钢铁行业生产制造流程将在减量化发展过程中逐渐演变为高炉-转炉长流程、全废钢电弧炉短流程和氢冶金-电弧炉流程三大类。影响三类流程碳排放水平的关键因素包括流程结构、原料结构、能源结构、产品结构、企业装备水平、管理水平、技术水平等。

(2)采用CISRI-CPCN模型分析三类钢铁制造流程降碳路线。考虑各种降碳因素后,从2020—2060年三类流程碳排放量逐年降低。长流程的碳排放量从2.0 t/t(钢)降低到0.87 t/t(钢),可通过碳汇、碳交易等手段实现碳中和;2050年短流程从0.45 t/t(钢)降低到接近0,基本实现碳中和;2060年氢冶金-电弧炉流程(50%废钢+50%HDRI原料结构)从1.31 t/t(钢)降低到接近0,基本实现碳中和。汇总三类流程降碳的结果,钢铁行业仅靠自身难以实现碳中和,需要与其他行业进行产业融合,剩余的碳排放量通过CCUS、碳汇、碳交易等措施处理后,有望实现碳中和。

(3)结合降碳路线分析,建议与流程相匹配的产品结构需要有所转变。由目前的建筑长材生产

逐步过渡到以生产板材产品为主,长流程将成为优特钢的生产企业。发展全废钢电弧炉流程,以短流程生产建筑用长材来逐步替代以中小高炉-转炉流程生产螺纹钢、线材等大宗产品,适当布局发展城市钢厂。如果钢材产品结构中的建筑用长材完全由全废钢电弧炉流程来生产,高炉-转炉长流程将会获得更多优质的原燃料,实现精料入炉,也将进

一步促进高炉-转炉长流程的脱碳化发展。目前氢冶金-电弧炉流程尚处于探索和开发阶段,尚需要突破诸多难点技术。HDRI作为优质的原料,应考虑发挥其最大作用,用来生产优特钢等高端产品。可鼓励有条件的企业开展氢冶金-电弧炉流程工业化试验,氢冶金流程未来和短流程互为补充,用优质的HDRI生产优特钢。

参考文献

- [1] 张琦,田硕,沈佳林. 中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图[J]. 钢铁, doi: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230123.
- [2] 崔志峰,徐安军,上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496-1506.
- [3] 邢奕,崔永康,田京雷,等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 801-811.
- [4] 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.
- [5] Yin R Y, Liu Z D, Shanguan F Q. Thoughts on the Implementation Path to a Carbon Peak and Carbon Neutrality in China's Steel Industry[J]. Engineering, 2021, 7(12): 1680-1683.
- [6] World Steel Association. Sustainability Indicators 2022 report[R]. [S. l.]: World Steel Association, 2022.
- [7] Ren M, Lu P T, Liu X R, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117209.
- [8] 那洪明,何剑飞,袁喻兴,等. 钢铁企业不同生产流程碳排放解析[C]//中国金属学会能源与热工分会,东北大学. 第十届全国能源与热工学术年会论文集. 2019:7.
- [9] 上官方钦,周继程,王海风,等. 气候变化与钢铁工业脱碳化发展[J]. 钢铁, 2021, 56(5): 1-6.
- [10] 曹文全,俞峰,王存宇,等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 1-10.
- [11] 陈星宇,徐振,王宁,等. 低屈服比高强度海工钢研究进展[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 1-5.
- [12] 上官方钦. 全废钢电弧炉流程优化研究——城市钢厂与钢铁工业脱碳化[D]. 北京:钢铁研究总院, 2021.
- [13] Tanaka H. Resources trend and use of direct reduced iron in steel-making process[J]. Kobelco Technol. Rev, 2015, 33(1): 1-7.
- [14] Morales R D, Conejo A N, Rodriguez H H. Process dynamics of electric arc furnace during direct reduced iron melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002, 33(2): 187-199.
- [15] 李立凯,高放,王敏,等. 废钢比对转炉钢液过氧化的影响及配料调优[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 39-45.
- [16] 陈均,梁新腾. 200 t转炉半钢冶炼提高转炉废钢消耗的试验研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 32-36.
- [17] 崔志峰,上官方钦,王方杰,等. 2022—2060年中国废钢资源量分析预测[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 126-133.
- [18] 上官方钦,酆秀萍,周继程,等. 中国废钢资源发展战略研究[J]. 钢铁, 2020, 55(6): 8-14.
- [19] 卜庆才,吕江波,李品芳,等. 2020—2030年中国废钢资源量预测[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 45-49.
- [20] 上官方钦,殷瑞钰,李煜,等. 论中国发展全废钢电弧炉流程的战略意义[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 86-92.
- [21] 谢欣烁,杨卫娟,施伟,等. 制氢技术的生命周期评价研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(6): 2147-2158.
- [22] 朱喜达,陆家生,赵勇智,等. 冷作模具钢(Cr12MoV)短流程生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 10-13.
- [23] 赵斌,张娜,彭国宏,等. 复吹转炉双联工艺冶炼X80管线钢脱磷试验研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 52-55.
- [24] 肖丙政,谢海平,魏刚武,等. GCr15轴承钢转炉冶炼中“C-P-T”协同控制工艺优化研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 54-59.
- [25] 范铁军. 钢铁企业数字化转型探索[J]. 中国钢铁业, 2020(8): 41-42+45.
- [26] 上官方钦,张春霞,胡长庆,等. 中国钢铁工业的CO₂排放估算[J]. 中国冶金, 2010, 20(5): 37-42.
- [27] 上官方钦,张春霞,酆秀萍,等. 关于钢铁行业CO₂排放计算方法的探讨[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(11): 1-5+10.
- [28] 上官方钦,张春霞,酆秀萍,等. 钢铁企业CO₂排放计算方法及其应用探讨[C]. 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: 87-92.
- [29] 张利娜. 钢铁行业低碳技术应用及发展研究[J]. 冶金能源, 2023, 42(2): 3-6+32.
- [30] 张洲培. 碳交易政策背景下钢铁行业碳绩效评价分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(3): 31-33.
- [31] 上官方钦,周焯,李涛,等. 钢铁行业碳排放管理与服务平台的设计与开发[J]. 中国冶金, 2023, 33(1): 34-40.
- [32] Wang X Y, Yu B Y, An R Y, et al. An integrated analysis of China's iron and steel industry towards carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2022, 322: 119453.
- [33] 舒印彪,张丽英,张运洲,等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
- [34] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [35] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2023.