

特色专题

低碳排炼钢技术发展路径分析

王岩¹, 李晶^{1*}, 史成斌¹, 刘荣²

摘要 为实现钢铁工业高质量发展和碳中和目标,推动低碳排炼钢技术的研发与应用是核心路径。系统分析了当前炼钢流程的结构性变革,重点探讨了通过高废钢比冶炼及使用直接还原铁等清洁原料,以实现转炉工序的低碳化运行。同时,深入剖析了电弧炉炼钢技术如何通过绿色电力、智能供电、生物质碳源及降低辅料消耗等技术,迈向低碳乃至“近零碳”冶炼的技术方向。从技术集成、政策引导与能源结构转型等维度,提出了系统化的低碳排炼钢发展路径,为钢铁工业的高质量与可持续发展提供理论支撑和实践参考。

关键词 碳中和;近零碳排;电弧炉炼钢;转炉炼钢

欧盟理事会的碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM, 也称“碳关税”)设定2023—2025年为实施过渡期,并将于2026年正式实施^[1]。届时,欧盟进口商需购买与在欧盟碳价规则下生产商品应付碳价等值的碳证书。钢铁行业受“碳关税”的影响最大,将增加中国向欧盟出口钢铁的碳成本,降低产品竞争力。另外,欧盟的碳贸易将加入强制的第三方审核的碳足迹报告。“碳足迹”是指某一产品在其生命周期过程中所导致的直接和间接的CO₂及其他温室气体(以CO₂排放当量表示)排放总量。碳边界调节机制、产品碳足迹要求,迫使钢铁行业进行碳核算与行业碳排放控制,国内外先后开展了产品碳足迹评价和标准制定^[2]。

钢铁行业是实现中国“双碳”目标的关键行业之一。2023年中国钢铁工业碳排放近18亿t,占国内碳排放总量约16%。中国钢铁行业也在积极践行绿色

低碳钢铁产品生产,以更加绿色低碳的优质产品积极参与国际市场竞争^[3]。例如,2022年,中国钢铁行业环境产品声明(EPD)平台上线首发。奔驰、宝马、大众等国际车企纷纷使用宝钢股份生命周期评价作为减轻汽车产品环境影响的工具,从车辆选材的源头就关注其碳足迹。2023年,山东钢铁集团永锋临港有限公司也发布了钢材产品碳足迹报告。

随着欧盟CBAM碳边界机制生效实施,将对中国出口欧盟的钢铁产品形成严重制约。发展低碳钢铁既是应对气候变化的重要对策,也是中国赢得未来全球钢铁产业话语权的重要筹码。随着中国生态环境部《碳排放权交易管理暂行条例(草案)》征求意见稿的出台,开征碳税将进一步推动低碳炼钢技术的创新发展^[4]。钢铁生产主要有以高炉—转炉为核心的长流程炼钢和以电弧炉为核心的短流程炼钢2类。针对钢铁工业绿色低碳高质量发展的重大战略,应重视降低长流程铁前工序碳排放,这就涉及炼钢流程的变革问题,在此基础上,注重低碳排炼钢技术的开发与应用。基于上述行业背景和技术发展趋势,本文针对

1. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室,北京 100083

2. 江西台鑫钢铁有限公司,上饶 334000

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-10-02

基金项目: 江西省上饶市“揭榜挂帅”项目(2021A004)

作者简介: 王岩,博士研究生,研究方向为“近零碳”排放电弧炉冶炼技术,电子邮箱: d202310662@xs.ustb.edu.cn; 李晶(通信作者),教授,研究方向为转炉/电弧炉炼钢、炉外精炼及纯净钢冶炼技术,电子邮箱: lijing@ustb.edu.cn

引用格式: 王岩,李晶,史成斌,等. 低碳排炼钢技术发展路径分析[J]. 科技导报, 2025, 43(21): 54-60; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01082

炼钢流程的变革、高废钢比/直接还原铁(direct reduced iron, DRI)的低碳转炉冶炼技术和电弧炉低碳或“近零碳”冶炼技术进行评述,并给出了低碳炼钢的思考和建议。

1 炼钢流程的变革

中国钢铁生产以高炉—转炉长流程为主,2023 年长流程炼钢碳排放占了 90% 以上。严重依赖煤基化石能源,是导致碳排放量较高的首要因素。图 1 所示为长、短流程碳排放比较^[5-7]。长流程碳排放为 1.8~2.2 t/t 钢,短流程碳排放为 0.5~0.7 t/t 钢^[5-7],其中长流程炼钢铁前工序碳排放占了近 90%。因此,应重视铁前工序降低碳排放,这就涉及到流程再造的问题。

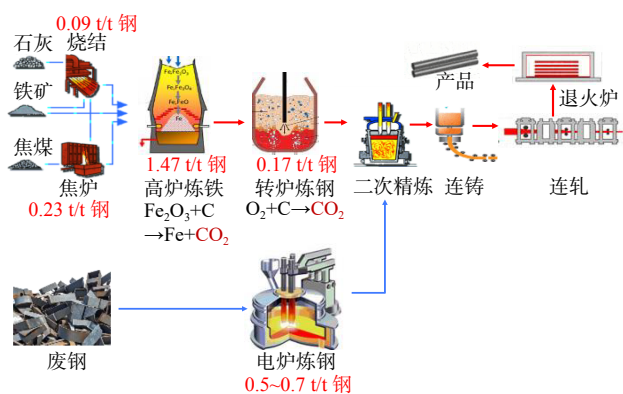


图 1 长、短流程碳排放比较

绿色氢能被认为是无碳经济的关键,氢能应用是冶金行业低碳绿色化转型的有效途径。虽然短期内不具备大范围推广氢冶金的可能性,但是应加强氢冶金研发。一般意义上的氢冶金是指入炉还原气含氢高于 55%(体积分数)条件下,还原铁矿石、球团矿生产优质 DRI 的气基竖炉直接还原。基于氢冶金的气基竖炉—电弧炉短流程具有碳减排 50% 以上潜力,是欧洲国家和美国、日本等先进产钢国家研发的热点。为此,应针对纯氢和合成气等为还原剂的新型低碳冶炼体系,构筑“直接还原—转炉/电弧炉”流程新冶金技术体系,攻克直接还原竖炉氧化球团技术、气基竖炉还原技术及装备、粉矿流态化还原过程强化技术、流化床直接还原技术及装备等,实现钢铁行业的净零碳/低碳流程再造工艺技术与示范。以气基竖炉还原

技术为例,要形成炉料性能协同优化、氢基竖炉内氢碳交互作用、短流程多目标优化等理论技术,构建完整的氢基竖炉直接还原理论和技术,建立氢基竖炉短流程系统碳足迹及绿色协调性评价体系。中国部分省市已开始这方面的研究工作,如河北省 2022 年钢铁联合基金就提出“氢气气基竖炉直接还原流程基础理论与集成应用”,开展富氢气基竖炉直接还原流程的基础理论和关键瓶颈技术研究,解决高品质富氢气体深度净化与重整、氢气气基竖炉直接还原、碳捕集与资源化利用等氢冶金全过程关键科学问题,形成富氢气体直接还原理论体系与工程转化集成技术。其中氢能直接还原制品深度处理就提出研究电弧炉冶金深度处理元素的渣—金迁移、转化与分离机理;提出熔分提纯调控机制,富碳相的迁移、转化与 FeO—C 反应动力学^[8]。

针对钢铁产业深度脱碳,在低碳高效能和钢铁—化工联产基础上,辅以氢能替代化石能源,研发应用氢基竖炉—电弧炉短流程新工艺技术,在适宜区域实现钢铁工艺流程革新和能源结构优化,为深脱碳或无涉碳钢铁生产提供全新途径,开发了碳捕集与利用(carbon capture and utilization, CCU)技术,协同研发氢冶金、钢铁—化工联产、跨工业系统智能制造等低碳关键共性前沿技术(图 2)^[9]。

国内在氢冶金、钢铁—化工联产等碳中和前沿技术研发方面尚处于起步阶段。河钢宣钢张宣高科全球首例 120 万 t 氢冶金示范工程项目,实现了安全稳定连续生产 DRI 产品。DRI 产品金属化率达到 94%,关键指标完全达到合格产品标准,预计每年可减少 CO₂ 排放 80 万 t,减排比例高达 60% 以上。韩国浦项开发的氢还原电熔炼铁技术(hydrogen breakthrough ironmaking technology, HYREX),采用成熟的流化床反应器技术,并使用氢气代替煤炭作为还原剂,将细铁矿石转化为 DRI。然后,再将 DRI 放入电熔炉(electric smelting furnace, ESF)中生产铁水,通过使用绿氢和不产生 CO₂ 的可再生能源产生的电力来实现接近零排放。其工艺流程如图 3^[10]所示。

2020 年 8 月瑞典钢铁(Swedish Steel AB, SSAB)建成投产 HYBRIT 项目,即“突破性氢能炼铁技术”的项目,旨在用可再生电力生产的氢替代传统炼铁使用的焦炭,实现炼铁过程的零排放。预计到 2045 年,

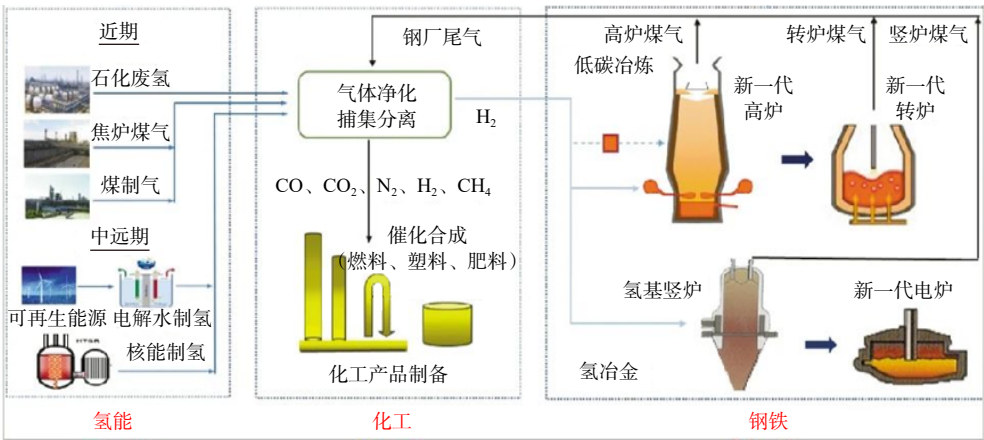


图2 钢铁碳中和技术路线



图3 氢还原直接炼铁技术

SSAB 将实现非化石能源炼钢的目标。

突破、掌握和完善氢冶金关键技术的同时,要高度重视炼钢脱碳化发展道路。炼钢是钢铁生产流程的工序之一,除了炼铁工序脱碳化,炼钢脱碳化也是钢铁产业脱碳化的重要环节之一,如图4所示。殷瑞钰等^[1]表示,脱碳化意味着要从图4所示的5个方面着力:一是资源脱碳化,特别是合理使用废钢;二是能源脱碳化,少用或不用化石能源,转而用电,特别是充分利用电网弃电;三是生产制造流程脱碳化,首先从

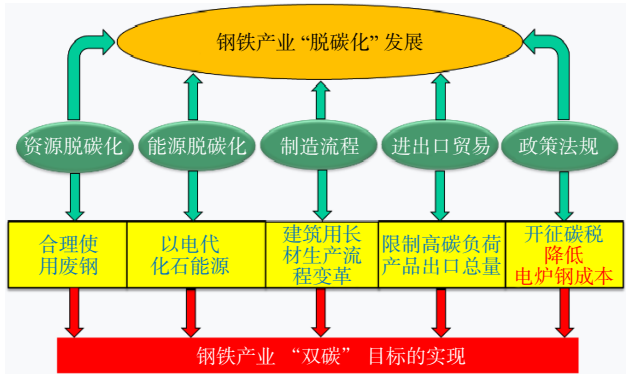


图4 钢铁产业“脱碳化”发展

建筑用长材的生产流程变革做起,合理布局城市周边钢厂;四是进出口贸易脱碳化,以税收、配额等措施限制高碳负荷产品的出口总量;五是政策法规脱碳化,分阶段开征碳税、分行业实施碳交易,出台脱碳化负面清单,酝酿脱碳化立法。同时,还强调通过供给侧结构性改革,推动产业结构优化,降低高耗能制造业、能源行业、交通运输业的碳排放。加强提高碳汇能力。

2 高废钢比/DRI 低碳转炉冶炼技术

高废钢比低铁耗冶炼已成为转炉减少碳排放、降低成本的重要手段。废钢资源是制约转炉高废钢比低铁耗冶炼的一个重要原因,必须使用废钢替代品或新的金属料。随着 DRI 技术的发展,DRI 将应用于转炉炼钢生产,为实现转炉低碳冶炼提供了一个新方法。由于历史、设备、效率、成本等多方面原因,转炉长流程工艺在未来较长时期内仍然将占据钢铁生产的主要地位。DRI 产量的增加及低铁耗在转炉炼钢方面的成本优势,特别是实现双碳目标对长流程炼钢的要求,迫使转炉工序必须调整原料结构,采用高废钢/DRI 比例的金属料结构。

在转炉出钢量不变的前提下,高废钢比碳减排在于降低了铁水生产过程中的碳排放以及转炉炼钢冶炼过程碳氧化导致的碳排放。提高转炉废钢比的方法通常包括废钢预热、添加补热剂和提高二次燃烧率等。废钢利用率越高,吨钢碳排放降低越显著;补热剂有碳质与硅质之分,硅质补热剂提升废钢比的效果优于碳质补热剂,但硅质补热剂碳排放因子较高,若

热量利用率较低,可能会导致吨钢碳排放量增加;随着二次燃烧率的提高,燃烧热利用率对废钢比和吨钢碳排放量的影响越发显著^[12]。

废钢配加比例提高后,特别是超过 20% 时,转炉熔池温度低,熔池传热、传质速度变慢,吹氧反应区的热量向熔池其他部分的传递速度降低,废钢的熔化速度减慢,延长了废钢的熔化时间,温度低导致补吹率上升。补吹时,温度每升高 10℃ 约需要氧化 140 kg 铁,钢铁料消耗增加约 2.8 kg/t,造成生产成本上升^[13]。如果加入大量轻废钢提高废钢比,在开吹后,氧枪射流也会被大量轻废钢隔断,容易产生开吹打火不顺的现象,影响冶炼周期。同时,废钢比的提高,还会使转炉前期炉温较低,导致石灰熔解慢,炉渣生成量低,熔池中硅氧化形成的低碱度渣与炉衬发生反应而侵蚀炉衬^[13-14]。因此,要确定合理的废钢比。

转炉中采用 DRI 替代废钢的合适比例为 35%~50%,DRI 的加入提高了石灰消耗,降低了熔池中的磷含量和残余元素含量,但替代量大于 60% 时会出现喷溅^[15]。还有研究认为,合理的 DRI 替代废钢的比例为 10%~30%^[16]。低 SiO₂ 含量(硅质量分数约为 0.42%)的 DRI 加入量不大于废钢的 40%,否则会使氧耗增加,钢铁料消耗降低,综合成本降低^[17]。

废钢在钢液中熔化是相变过程,固相废钢熔化后进入钢液,这一相变过程受钢液与废钢间传质、传热以及传质和传热耦合作用的影响^[18]。由于成分与温度的差别,废钢在钢液中和在铁水中熔化机制不同。当熔池碳含量大于废钢碳含量时,废钢熔化过程中伴随着熔池向废钢渗碳。影响熔池与废钢间碳传质速率的主要因素是传质系数^[19]。铁水中硅含量高,可以抑制碳传质,不利于废钢在铁水中的熔化^[20]。

DRI 与废钢在发热元素含量、杂质元素含量等方面存在显著差别,这些差别决定了 DRI 熔化特性及其对冶炼过程的影响与废钢存在很大不同。对废钢在铁液和钢液中升温熔化特性研究较多,而 DRI 在转炉冶炼过程中的应用,目前还只有简单的替换废钢比例的研究,其他相关研究还较少,特别是其在铁液中的熔化机制以及 DRI 与废钢在熔化过程中的相互作用效果。高废钢/DRI 对熔池热量的需求、对产品冶金质量的影响及大渣量对转炉冶炼工艺的影响也少见报道。因此,要研究废钢/DRI 的升温特性和氧化行

为、废钢/DRI 在铁水中熔化的热-动力学机制,提高 DRI 和废钢利用比例,拓展转炉冶炼原料结构,开发高废钢/DRI 装入比条件下转炉低碳冶炼关键技术。

3 开发和应用低碳或“近零碳”电弧炉炼钢技术

全球能源互联网发展合作组织在《中国 2030 年前碳达峰研究报告》提出,实现碳达峰要“以清洁替代转变能源生产方式,以电能替代转变能源使用方式”。钢铁绿色生产的工艺改造包括电弧炉炼钢和氢能炼钢。电弧炉炼钢是推动电能替代的主要途径,以废钢为主要原料、电力为主要能源,该方式能耗、排放量低,节能减碳优势明显。

发达国家电弧炉炼钢技术起步较早且发展较快,为应对全球气候变化,低碳电弧炉炼钢新技术不断涌现。电弧炉供电方面,在静态同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)应用中引入构网型控制方案,进一步改善了电炉使用中的电能质量和电压分布,减少了谐波,并且通过补偿电网扰动改善了负载的供电^[21]。利用传统的碳源造泡沫渣占电弧炉直接碳排放总量的 40%~70%^[22],为实现电弧炉冶炼过程减碳目标,有必要用生物炭等替代传统碳源。Aderhold 等^[23]利用不同的石灰基产品,通过压块和挤压及真空挤压生产出致密的生物炭块,解决了生物炭密度低、易破碎的问题,该炭块可以喷入电炉中促进炉渣起泡。Sydney Steel Mill(SSM)钢厂与 Laver-ton Steel Mill(LSM)钢厂使用橡胶颗粒和焦炭混合物作为炉渣发泡剂分别进行了 4160 次和 3473 次工业试验,取得了炉渣的泡沫化程度增加、电耗降低、冶炼时间缩减等效果^[24-26]。另一方面,降低冶炼过程渣料消耗是降低原料生产过程碳排放的主要途径之一。电弧炉回收废旧镁碳砖可代替轻烧白云石作电弧炉炼钢熔剂,更重要的是,其中的 MgO 是电弧炉泡沫渣的必要成分,对维持泡沫渣悬浮固相的饱和及防止炉衬侵蚀有着重要作用,镁碳砖中的碳与渣中 FeO 反应为泡沫渣提供了气源,减少了传统炭质还原材料,如焦炭粉的加入量。在电弧炉冶炼中回收利用废旧镁碳砖实现了降低渣料和电能消耗的目的^[27-28]。高效搅拌技术是缩短电弧炉冶炼时间,降低吨钢电耗

的重要手段之一,促进了冶炼过程降碳。ABB 冶金公司应用 CFD 软件模拟了 ArcSave 电磁搅拌装置应用电弧炉冶炼过程中偏心出钢时的熔体的流动情况,瑞典奥托昆普不锈钢公司利用该装置开发了不锈钢冶炼过程中 FeCr 合金高效熔化技术,生产能耗降低 3%~4%,电极消耗降低 8%~10%^[29]。

为实现“双碳”目标要求,2016 年后,国家以及各省市层面相继出台了一系列政策、文件鼓励电弧炉炼钢技术的发展。在推动钢铁行业碳达峰方面提出:促进钢铁行业结构优化和清洁能源替代,大力推进非高炉炼铁技术示范,提升废钢资源回收利用水平,推行全废钢电弧炉工艺。推广先进适用技术,深挖节能降碳潜力,鼓励钢化联产,探索开展氢冶金、CO₂ 捕集利用一体化等试点示范,推动低品位余热供暖发展^[30]。

随着中国废钢资源的积累增加,按照绿色可循环理念,应注重以废钢为原料的短流程电弧炉炼钢的发展。鼓励产业耦合,建设绿色工业园区,推进钢铁与建材、电力、化工等产业及城市间的耦合发展,实现钢铁制造、能源转换和废弃物消纳 3 大功能^[31-32]。鼓励高炉—转炉长流程企业转型为电弧炉短流程企业,通过工艺改造减少污染物排放,达到超低排放要求。有序引导电弧炉短流程炼钢发展,更好发挥电弧炉短流程炼钢企业绿色低碳、市场调节的作用。鼓励具有废钢、电价、市场等优势条件的高炉—转炉长流程钢厂转型发展电弧炉短流程炼钢。开发具有自主知识产权的新型电弧炉装备,加快制定短流程炼钢标准。通过加强废钢资源保障体系建设、降低用电成本、鼓励金融机构支持采用短流程炼钢的先进特钢企业等措施,支持企业提高市场竞争力。鼓励在中心城市、城市集群周边布局符合节能环保和技术标准规范要求的中小型电弧炉炼钢企业,生产适应区域市场需求的产品,协同消纳城市及周边废弃物^[33-37]。

根据发达国家钢铁工业发展的规律,随着中国废钢积蓄量的增加、电价的降低、废钢加工分类及智能识别相关技术的发展,以无碳/低碳 DRI 和全废钢为金属料的电弧炉炼钢将得到快速发展。以美国为例,近年来,为应对全球气候问题,积极谋划钢铁工业转型升级,致力于布局流程优化,以废钢、DRI 短流程代替铁水长流程工艺,大力发展气基直接还原炼铁技术、碳捕集与封存技术等清洁生产技术,积极探索建

立区域性清洁能源中心,立足氢气生产和利用为主的碳减排技术发展,为实现电弧炉炼钢工艺近零碳发展提供技术支撑。

GHG(Greenhouse Gas)Protocol 针对温室气体核算与报告设定了 3 个范围:范围 1 排放是公司直接燃烧产生的温室气体排放,范围 2 排放是公司购买的能源产生的温室气体排放,而范围 3 则是这两者以外公司产生的所有排放。GHG Protocol 是一套国际上广泛认可的温室气体核算体系。“近零碳排放”电弧炉短流程冶炼,包括冶炼过程近(净)零碳排放(范围 1)、清洁绿色能源生产的净零碳排放(范围 2)、原料生产等其他方面的近零碳排放(范围 3)。冶炼过程近(净)零碳排放是冶炼过程熔池近零碳氧化控制、造泡沫渣的无碳化或生物质应用、电极的净零碳化制备或消耗的最低化;绿色清洁能源生产的净零碳是指生产过程采用无 CO₂ 排放的能源,包括风能、光伏、水力发电等非化石能源,从源头上杜绝 CO₂ 的产生及排放;原料生产等其他方面的近零碳排放包括原辅料(包括铁合金)生产过程的碳捕集和应用过程的减量化、耐材的长寿化和固废的资源化利用。以上技术的应用,可以实现电弧炉短流程冶炼碳排放降低到 0.15 t CO₂/t 钢以下,甚至 0.10 t CO₂/t 钢以下。

不考虑发电及石灰等原辅料生产过程中的碳排放,电弧炉冶炼过程碳排放主要由向熔池喷炭粉吹氧造泡沫渣、废钢(包括生铁等其他金属料)中碳的氧化、熔池碳还原炉渣中(FeO)或 DRI 中 C-FeO 的反应及不可避免的电极消耗造成。电弧炉炼钢采用平熔池操作,主要依靠电弧加热金属熔池升温,C-O 反应等产生的化学热所占的比例很小。为了提高电弧加热效率,进行泡沫渣操作就显得极为重要。电弧炉冶炼过程主要是喷碳粉和吹氧发生碳氧反应造成的碳排放。特别是电弧炉使用氢还原的无碳 DRI 后,如果还用碳粉喷吹形成泡沫渣,碳排放量仍然较大。要实现 DRI 在电弧炉中的应用,要明确低碳或无碳 DRI 熔化—热动力学行为及 DRI 熔化机理,探明熔化升温过程 DRI 对成渣及渣—金反应影响,加速废钢/DRI 的熔化,缩短熔化时间,降低电极消耗造成的碳排放。因此,应针对上述问题开展电弧炉冶炼过程降碳的科学研究,为实现电弧炉冶炼过程“近零碳”排放提供理论依据。电弧炉冶炼过程降碳可以考虑使用

无碳或生物质发泡剂,在渣中形成大量弥散微小气泡,且具有良好稳定性;其不仅满足钢液脱磷的需要,而且发泡剂中不包含碳单质,如炭粉、焦炭等。生物质粉剂主要由各种生物质资源制成,包括植物、微生物等,及以植物、微生物为食物的动物和产生的废弃物。此外,如果 CO_2 能被捕集并循环使用,参与到 CO_2 大循环中, CO_2 也可作为发泡气体,那么电弧炉炼钢过程将不涉及碳排放,有利于实现电弧炉低碳冶炼或“近零碳”排放冶炼。

4 结论

在全球碳中和背景下,国际贸易 CBAM 与产品碳足迹核算要求正日益成为推动低碳炼钢技术创新的重要外部驱动力。为实现钢铁工业的深度脱碳,构建以氢能为核心的新一代冶金技术体系至关重要,亟须发展“氢基直接还原—电炉/转炉”的零碳/低碳工艺流程,并推动其产业化示范。同时,必须着力优化转炉冶炼的原料结构,通过提高废钢与 DRI 比例,研发适应高废钢/DRI 装入条件的低碳冶炼关键技术,从而显著降低转炉过程的碳排放强度。此外,应有序引导电弧炉短流程炼钢发展,充分发挥其绿色低碳禀赋,并重点开发基于氢还原 DRI 金属料的低碳乃至“近零碳”电弧炉炼钢技术,最终实现冶炼过程的“零碳排放”目标。

参考文献 (References)

- [1] 刘夏青,赵立华. 欧盟碳边境调节机制对中国钢铁行业的影响: 基于产品碳足迹视角[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 135–140.
- [2] 李新创,李晋岩,霍咚梅,等. 关于中国钢铁行业产品碳足迹评价标准化工作的思考[J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 1–7.
- [3] 王国栋. 生成式AI(AIGC)助力钢铁行业转型升级[J]. 科技导报, 2025, 43(13): 1–2.
- [4] 生态环境部办公厅. 关于公开征求《碳排放权交易管理暂行条例(草案修改稿)》意见的通知[EB/OL]. (2021–03–30) [2024–10–01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202103/t20210330_826642.html.
- [5] 上官方钦,殷瑞钰,崔志峰,等. 钢铁工业低碳化发展[J]. 钢铁, 2023, 58(11): 120–131.
- [6] Na H M, Gao C K, Zhang M H, et al. Life cycle assessment analysis of the environment load from typical Chinese steel enterprises[J]. Journal of Environmental Accounting and Management, 2017, 5(1): 1–9.
- [7] Zhang Q, Xu J, Wang Y J, et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO_2 emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows[J]. Applied Energy, 2018, 209: 251–265.
- [8] Li J H, Barati M. Kinetics and mechanism of decarburization and melting of direct-reduced iron pellets in slag[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(1): 17–24.
- [9] 储满生,王国栋. 钢铁产业碳中和技术途径[C]//第十三届中国钢铁年会论文集(摘要)——大会特邀报告&分会场特邀报告. 北京: 冶金工业出版社, 2022: 161–162.
- [10] Posco Newsroom. [Special feature for the 50th anniversary of the ISM's completion] POSCO will open a new history of iron with hydrogen reduction ironmaking[EB/OL]. (2023–07–13) [2024–10–01]. <https://newsroom.posco.com/>.
- [11] 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.
- [12] 杨建平,姚柳洁,高攀,等. 面向转炉高废钢比冶炼工艺的废钢比与碳排放理论计算[J]. 中国冶金, 2023, 33(6): 133–140.
- [13] 李经哲,马德刚,王建兴,等. 高废钢比例对炼钢工艺的影响[J]. 河北冶金, 2017(7): 67–69.
- [14] 金磊,司宇,栗克建. 80 t转炉提高废钢比的生产实践与炉况维护[J]. 连铸, 2021, 46(1): 21–25.
- [15] 王建昌,王彦平,张永亮. 直接还原铁在转炉的应用效果分析[J]. 炼钢, 2008, 24(6): 19–21.
- [16] 杨怀春. 直接还原铁在转炉使用效果分析[J]. 甘肃冶金, 2011, 33(5): 29–30.
- [17] 张玺,姚嘉斌,袁洁. 海绵铁在转炉炼钢中使用效果分析[J]. 甘肃冶金, 2019, 41(5): 8–12.
- [18] Wei G S, Zhu R, Tang T P, et al. Study on the melting characteristics of steel scrap in molten steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(7): 609–617.
- [19] Brabie L C, Kawakami M. Kinetics of steel scrap melting in molten Fe–C bath[J]. High Temperature Materials and Processes, 2000, 19(3/4): 241–256.
- [20] Liu C S, Zhang H, Fang Q, et al. Effect of silicon concentration on melting behavior of scraps in hot metal[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(4): 1668–1678.
- [21] Rasmussen J, Elm C J. Grid-forming control functionality for STATCOMs in steelmaking applications[J]. Iron & Steel Technology, 2024(5): 21.
- [22] Demus T, Reichel T, Schulten M, et al. Increasing the sustainability of steel production in the electric arc furnace by substituting fossil coal with biochar agglomerates[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(8): 564–570.
- [23] Aderhold J, Böhringer J, Ford M, et al. Use of different lime-based products to promote agglomeration of bio-charcoal for EAF injection through extrusion and tableting processes[C]//Proceedings of AISTech 2023 Proceedings. Tokoy: AIST, 2023: 577–586.

- [24] Sahajwalla V, Khanna R, Zaharia M, et al. Environmentally sustainable EAF steelmaking through introduction of recycled plastics and tires: Laboratory and plant studies[J]. *Iron & Steel Technology*, 2009, 6(4): 43–50.
- [25] O'Kane P, Fontana A, Skidmore C, et al. Sustainable EAF steelmaking through the use of polymer technology[C]// *Proceedings of the AISTech 2016*. America: Association for Iron & Steel Technology, 2016.
- [26] 韩成金, 朱荣, 魏光升. 电弧炉炼钢应用生物质的研究进展[J]. *过程工程学报*, 2022, 22(10): 1368–1378.
- [27] Luz A P, Vivaldini D O, López F, et al. Recycling MgO–C refractories and dolomite fines as slag foaming conditioners: Experimental and thermodynamic evaluations[J]. *Ceramics International*, 2013, 39(7): 8079–8085.
- [28] Conejo A N, Lule R G, Lopéz F, et al. Recycling MgO–C refractory in electric arc furnaces[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 49(1): 14–31.
- [29] Teng L D, Meador M, Ljungqvist P. Application of new generation electromagnetic stirring in electric arc furnace[J]. *Steel Research International*, 2017, 88(4): 1600202.
- [30] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.
- [31] 毛新平. 锻造绿色钢铁新质生产力：可持续钢铁材料的技术攻坚与产业突围[J]. *科技导报*, 2025, 43(19): 1–2.
- [32] 工业和信息化部. 钢铁工业整升级规划(2016—2020年)[EB/OL]. [2024–10–01]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gbwxwfbh/xwfbh/gyhxxhb/document/1519520/1519520.html>.
- [33] 生态环境部. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html.
- [34] 工业和信息化部. 对十三届全国人大二次会议第7404号建议的答复[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/jytafwgk/art/2020/art_ffe941fc3d1e4477a773287f7e62bd1f.html.
- [35] 工业和信息化部. 关于推动钢铁工业高质量发展的指导意见(征求意见稿)[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gt/art/2020/art_ee017956d1d948a99a64448d06974894.html.
- [36] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2022/art_fc8736cbc5364d6eb19ce17eb0b0cc9c.html.
- [37] 工业和信息化部, 发展改革委, 生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见[EB/OL]. [2024–10–01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2022/art_fc8736cbc5364d6eb19ce17eb0b0cc9c.html.

Path analysis of low-carbon steelmaking technology development

WANG Yan¹, LI Jing^{1*}, SHI Chengbin¹, LIU Shen²

1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Jiangxi Taixin Iron and Steel Co., Ltd., Shangrao 334000, China

Abstract In order to achieve green, low carbon and high-quality development of the iron and steel industry, the development and application of low carbon emissions steelmaking technology should be noted. The study systematically analyzes the structural transformation of the current steelmaking process, with a focus on achieving low-carbon operation in the converter process through high scrap steel ratio smelting and the use of clean raw materials such as direct reduced iron (DRI). At the same time, an in-depth analysis was conducted on how electric arc furnace steelmaking technology can move towards the forefront of low-carbon and even "near zero carbon" smelting through technological solutions such as green electricity, intelligent power supply, biomass carbon sources, and reducing auxiliary material consumption. Finally, a systematic low-carbon emission steelmaking development path was proposed from the dimensions of technology integration, policy guidance, and energy structure transformation, providing theoretical support and practical reference for the high-quality and sustainable development of the steel industry.

Keywords carbon neutrality; near-zero carbon emissions; EAF steelmaking; BOF steelmaking ●



(责任编辑 魏来)