碳中和背景下我国低碳炼铁技术发展现状与前景

潘钊彬
（中冶南方工程技术有限公司，湖北 武汉 430223）

摘要：我国钢铁生产工艺长期以“高炉—转炉”长流程为主，能源结构高碳化特征明显。作为钢铁流程中的碳排放大户，炼铁系统深度减碳成为我国钢铁行业实现碳中和目标的关键。本文分别从高炉炼铁和非高炉炼铁两个角度出发，梳理总结了各主要低碳炼铁工艺技术的研究进展和主要问题，并对其应用前景进行了展望。我国钢铁工业应把技术创新作为降碳的核心要素，结合行业发展趋势和自身特点，加大力度开发适合我国国情的低碳炼铁新技术；综合考虑资产保值、技术成熟程度和降碳潜力，短期内应以基于现有高炉工艺的深度脱碳技术创新为主要方向，从而为远期零碳钢铁的发展提供过渡方案和缓冲空间；中长期以富氢气基竖炉直接还原技术为发展重点，不断提升其技术成熟度和经济适用性，逐步提高氢气比例直至全氢冶炼；氢基熔融还原技术和电解还原铁技术的发展任重道远，未来有望成为实现我国钢铁行业碳中和目标的解决方案之一。

关键词：碳中和；低碳炼铁；高炉；直接还原；熔融还原
中图分类号：TF5；X701.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)01－0035－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.005

Development status and prospect of Chinese low-carbon ironmaking technology under carbon neutrality background

PAN Zhaobin
(WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: China's iron and steel production process has been dominated by the long process of "blast furnace-converter" for a long time with obviously high-carbon characteristics of energy structure. As a major carbon emission in the iron and steel process, deep carbon reduction in the ironmaking system has become the key to achieving the goal of carbon neutrality in China's iron and steel industry. The research progress and main problems of the main low-carbon ironmaking technologies are summarized from such two perspectives as blast furnace ironmaking and non-blast furnace ironmaking, and their application prospects are prospected. China should take technological innovation as the core element of carbon reduction in the iron and steel industry, combine the development trend of the industry and its own characteristics, and increase efforts to develop new low-carbon ironmaking technologies suitable for China's national conditions. Considering asset preservation, technology maturity and carbon reduction potential, deep decarbonization technology innovation based on existing blast furnace processes should be the main direction in the short term, so as to provide a transitional plan and buffer space for the development of zero-carbon iron and steel in the long term. In the medium and long term, the direct reduction technology development of hydrogen-rich shaft furnace will be the focus, and its technical maturity and economic applicability will be continuously improved, and the proportion of hydrogen will be gradually increased until full hydrogen smelting. The development of hydrogen-based smelting reduction technology and electrolytic reduced iron technology still has a long way to go, and it is expected to become one of the solutions to achieve the carbon neutrality goal of China's iron and steel industry in the future.

收稿日期：2022－11－16；**修回日期**：2022－12－13
作者简介：潘钊彬(1987—)，男，高级工程师，从事炼铁工艺技术方面的研究工作。

Key words: carbon neutrality; low-carbon ironmaking; blast furnace; direct reduction; smelting reduction

随着全球人口和经济规模的不断增长，以二氧化碳为主的温室气体排放导致全球气温持续上升，人类正在经历热浪、洪水、干旱、海平面上升等一系列气候灾害，减少二氧化碳排放、尽快实现碳中和成为全世界刻不容缓的课题。中国政府高度重视气候变化问题，主动做出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的减排承诺，并制定了一系列的工作方案和节能减排措施，展现了对全球环境治理的大国担当[1-2]。

我国作为全球最大的钢铁生产国和消费国，粗钢产量连续27年占据世界第一。从工艺流程结构看，我国钢铁生产以高炉—转炉长流程为主，长流程钢产量占比约为90%；从能源消费结构上看，煤、焦炭等化石能源投入占比达80%以上，高碳化特征明显。目前我国钢铁行业碳排放量占全球钢铁行业的60%以上，占全国碳排放总量的15%以上，是我国碳排放量最大的制造行业[3-4]。过去20年间，我国钢铁工业在节能减排方面取得了显著成效，重点大中型钢铁企业吨钢综合能耗(折标煤)从2000年的920 kg/t降低到2022年的551 kg/t，已处于国际先进水平。但由于能耗总量巨大，我国钢铁行业的低碳转型任务仍然非常艰巨。

作为钢铁流程中的碳排放大户，炼铁系统碳排放量占钢铁全流程碳排放总量的70%以上[5-6]。以高炉为核心的炼铁系统深度减碳成为我国钢铁行业实现碳中和目标的关键。在全球低碳发展浪潮兴起、我国“碳达峰、碳中和”战略加速推进的背景下，炼铁工作者有必要对低碳炼铁技术的发展形势进行梳理和总结，从而选择合适的低碳炼铁技术路线和研究方向，更好地为实现我国钢铁工业低碳转型升级和可持续发展贡献力量。

1 我国低碳炼铁技术的发展现状

1.1 高炉炼铁

近年来，随着大型高炉、富氧大喷煤、高顶压、高风温、煤气干法除尘、TRT/BPRT等技术的普及应用，我国高炉工序能耗(折标煤)持续下降至390 kg/t以下，在能源利用效率和冶炼效率方面已处于世界先进水平。在不采用突破性技术的前提下，高炉炼铁大幅降低能耗、减少碳排放的空间较为有限。

在“双碳”国家战略的推动下，我国在基于高炉工艺的低碳炼铁新技术方面开展了大量研究和实践，包括：① 原(燃)料结构优化，如高炉富氢冶炼、生物质冶炼、微波烧结、等离子加热、富氢烧结、高球团比、新型炉料(铁焦、含碳复合球团、预还原烧结矿)等；② 用能效率提升，如提高操作水平降低燃料比、加强余热余能利用(炉顶煤气循环、炉顶均压煤气回收、冲渣水余热综合利用、高炉渣显热利用等)、智能化高炉等；③ 二氧化碳捕集、利用和封存(CCS/CCUS)。其中，高炉富氢冶炼、炉顶煤气循环氧气高炉、碳铁复合炉料是行业较为看好的高炉低碳炼铁技术。

1.1.1 高炉富氢冶炼

高炉富氢冶炼是在风口或者炉身下部向高炉内喷吹焦炉煤气、天然气、废塑料、氢气等富氢物料作为还原剂取代部分焦炭，利用氢气还原铁矿石渗透速度快、还原能力强、产物不含碳等优势，增加间接还原比例、提高反应速率、减少碳排放量的工艺流程。

早在20世纪60年代，本钢、鞍钢就已经开展过高炉喷吹焦炉煤气试验。进入21世纪以来，济钢、八钢等多家钢铁厂相继在高炉上进行了喷吹富氢气体实践，取得了一定的成果。其中，济钢在4号高炉进行了喷吹焦炉煤气工业试验，结果表明：当吨铁喷气量为62.51 m^3/t时，焦比降低5.28 kg/t，煤比降低40.63 kg/t，碳排放减少75 kg/t[7]；八钢在430 m^3高炉通过喷吹焦炉煤气等富氢气体，结合超高富氧、炉顶煤气循环等工艺，取得了固体燃料消耗量降低30%、碳排放量减少超21%的效果[8]；上海大学与河北昌黎县兴国精密机件有限公司联合完成了我国首次向高炉喷吹纯氢冶炼试验，通过向高炉喷吹1 800 m^3/h、250 m^3/t的纯氢气，实现了降低焦比10%以上、减少碳排放量10%以上和铁产量增加13%以上的效果。毕传光等[9]基于梅钢2号高炉的原燃料条件采用多流体高炉数学模型对高炉喷吹焦炉煤气进行数

值模拟研究，结果表明：向高炉喷吹 50 m^3/t 焦炉煤气，可降低焦比 14.43%、减少碳排放 8.61%。

目前高炉富氢冶炼在实际应用中还存在诸多问题，如炉内氢还原的基础理论还不完善、吸热反应导致局部上冷下热、超高温燃烧带来的喷枪及风口寿命问题、炉料低温还原粉化问题、煤气水分增加带来的布袋板结和管道腐蚀等，距离大规模工业化应用还有一定的距离。另外，由于高炉中焦炭的骨架作用无法被替代，以及氢还原吸热反应对炉内温度的影响，高炉富氢冶炼的减碳潜力受到较大限制，其碳减排幅度约为 10%~20%。

1.1.2　炉顶煤气循环氧气高炉

炉顶煤气循环氧气高炉的主要特征是用纯氧取代传统的热风，同时将炉顶产生的煤气经过除尘、干燥、CO_2 分离、加热、加压等处理后重新鼓入高炉中，并大量喷吹煤粉，其工艺流程如图 1 所示。该工艺流程的优势在于利用炉顶高热值煤气和炉内无氮环境，提高还原气体的浓度、发展间接还原，从而提高冶炼强度并降低燃料比，同时可大大降低 CO_2 分离成本，有利于低碳冶炼的实现。结合 CCS/CCUS 技术，理论上可减少碳排放量 50% 以上。

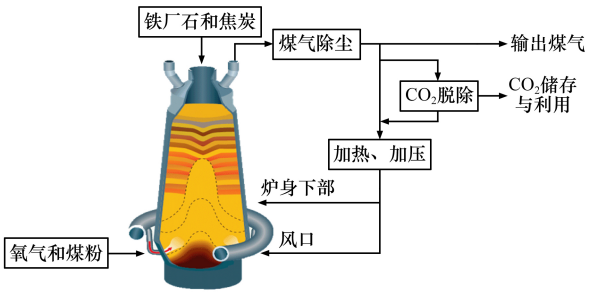


图 1　炉顶煤气循环氧气高炉工艺流程

Fig. 1　Top gas cycle oxygen blast furnace process flow chart

自 20 世纪 70 年代氧气高炉被提出以来，我国炼铁工作者对其进行了长期的理论分析和实验研究。高攀等[10]、王成善等[11]、邵久刚等[12]通过建立氧气高炉工艺综合数学模型，模拟了在全氧、炉顶煤气循环等条件下高炉焦比、理论燃烧温度、煤气利用率等参数的变化规律；八钢基于现有的高炉炼铁工艺研发了富氢碳循环氧气高炉，并计划在 430 m^3 高炉上分三期进行生产实践，目前已经完成了一期和二期试验，结合焦炉煤气喷吹达到富氧率为 50%、燃料比下降 21.3% 的生产效果。

1.1.3 碳铁复合炉料

铁焦是一种新型碳铁复合炉料，即将铁矿石和煤粉按一定比例破碎混合，经预热、成型、碳化后制成的含有金属铁的特殊焦炭。铁焦工艺流程如图 3 所示。碳化过程铁矿石还原生成的金属铁弥散分布于碳基质内，该铁焦对碳气化反应起良好催化作用，使得铁焦具有高反应性，其气化反应在较低温度下即可进行[13]。高炉使用适量铁焦代替焦炭后，可明显降低热储备区温度，提高 CO 体积分数，促进铁矿石还原反应、提高炉身工作效率，进而增加产量、降低焦比、减少 CO_2 排放。同时，铁焦可实现低品位铁矿石和弱黏结性煤的综合利用，节约宝贵的炼焦煤和高品位矿石。理论研究表明，使用部分含铁 43% 的铁焦可使热空区温度降低 186 ℃，炉身效率提升 8.6%，CO_2 排放量减少 6% 以上[14-15]。

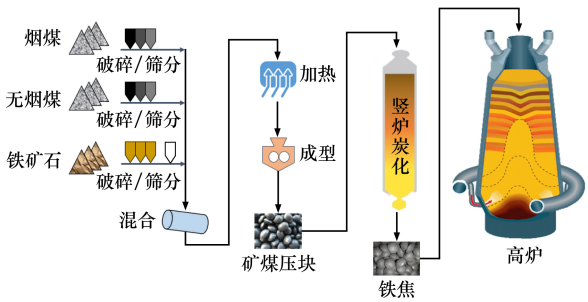


图 2　铁焦工艺流程

Fig. 2　Ferro coke process flow chart

铁焦技术始于 20 世纪三四十年代。近年来，由于焦煤资源的日益匮乏以及环保力度的加大，铁焦研究重新被人们重视。于鲁等[16]采用高温热台显微镜、扫描电镜等研究了铁矿粉对铁焦炭化过程体积的影响，结果表明：随着铁矿粉的增加，铁焦炭化过程中体积逐渐缩小，铁矿粉种类对铁焦体积影响较小；王宏涛等[17]利用荷重还原软化滴落试验研究了铁焦添加量对高炉综合炉料滴落性能的影响，结果表明：随着铁焦配比的增加，炉料软化区间逐渐加宽，熔化区间逐渐收窄，炉料滴落压差下降，料层透气性改善；史世庄等[18]通过在炼焦煤种添加不同种类铁矿粉，研究添加铁矿粉的种类及配比等对铁焦初始反应温度的影

响，结果表明：在配煤中添加铁矿粉后铁焦初始反应温度显著降低，煤的性质和堆密度对铁焦初始反应温度影响较小。目前宝武集团已将铁焦作为战略性低碳革新技术纳入其碳中和技术路线图，并开展了相关试验研究。下一阶段，研究铁焦合理配煤配矿、提高铁焦冷热强度、扩大铁焦生产规模、探索铁焦入炉后合理的操作制度等将成为研究的重点。

1.2 非高炉炼铁

目前世界范围内的非高炉低碳炼铁技术包括富氢气基直接还原技术、氢基熔融还原技术和电解还原铁矿石技术。其中，MIDREX、HYL/Energiron气基竖炉直接还原在国外已实现大规模工业化应用，入炉还原气中的氢气比例已达50%以上，氢基熔融还原工艺在中国已实现落地转化，电解还原铁矿石技术尚处于实验室研究阶段。

中国在非高炉低碳炼铁前沿技术尤其是氢冶金方面强力跟进，已呈现出百花齐放的创新发展态势，并取得了阶段性的进展。如河钢120万吨规模的氢冶金示范工程、宝钢湛江百万吨级氢基竖炉直接还原示范工程、中晋太行30万吨/年的氢基直接还原铁项目、建龙赛思普氢基熔融还原法冶炼高纯铸造生铁项目、酒钢煤基氢冶金项目等。

总体来看，我国非高炉低碳炼铁技术创新实践以氢冶金为主，涵盖煤基直接还原、气基直接还原、熔融还原等多个方向，呈现齐头并进、多点开花的发展态势，其中在国外发展较为成熟的气基竖炉直接还原技术已成为国内多数企业的重点研究方向。目前部分低碳炼铁技术已建成示范工程，并取得了一定的创新突破，但尚处在工业性试验阶段，存在成本较高、技术不成熟、氢能产业链不完善等问题，距离实现大规模工业化生产还有较长的路要走。

2 我国低碳炼铁技术的应用前景

2.1 高炉炼铁

虽然现阶段以富氢冶炼、炉顶煤气循环氧气高炉、铁焦为代表的高炉低碳炼铁技术还不够成熟，在实际应用中还存在许多问题，但综合考虑资产保值、技术成熟程度、减碳经济性等因素，短期内我国应该以基于高炉工艺的深度降碳炼铁技术创新为主，主要原因如下。

（1）现存高炉资产数额庞大且服役年限较短。我国钢铁生产以高炉长流程为主，现存高炉资产数额以千亿计。据不完全统计，目前全国符合规范条件钢铁企业共有高炉800多座，总产能约9亿吨，其中大部分高炉服役年限较短。特别是十三五以来，通过产能置换、环保搬迁等方式，改造或新建了一大批装备水平先进的高炉，新建高炉炼铁产能超过3亿吨，占现有炼铁总产能的三分之一以上，其中仅2021年一年发布的产能置换方案涉及的新建炼铁产能就将近6 500万吨。因此，如果高炉炼铁流程在短期内被取代，不仅巨额的年限较短的高炉资产将归零，造成极大的浪费，同时也将对我国现有的钢铁工业结构带来巨大的冲击和影响。

（2）高炉工艺短期内无可替代。作为目前最优秀的炼铁反应器，现代高炉炼铁工艺已十分成熟，在生产规模、技术成熟度、稳定性、能源利用效率等方面具有绝对的优势，短期内还没有任何一种非高炉炼铁工艺可以完全取代它。同时，由于我国废钢资源供应不足且分布不均、废钢回收利用体系不完善、废钢价格长期居高不下等原因，我国电炉短流程工艺无论是成本竞争力还是产量规模都远不及高炉长流程工艺，加上我国电力行业CO_2排放系数较高，电炉碳减排潜力受到一定限制。因此高炉炼铁短时间内还将是中国钢铁工业的主流工艺。

（3）通过上下游社会协作有望实现高炉炼铁深度减碳。虽然短期内高炉工艺无法摆脱对焦炭的依赖，其减碳的潜力相对有限，但是随着CCS/CCUS、绿色制氢等技术的逐步成熟和推广应用，高炉工艺结合该技术有望实现深度减碳，从而与其他零碳冶炼技术一起组合成为实现我国钢铁行业碳中和目标的综合解决方案。

高炉长流程深度减碳技术将为远期零碳钢铁的发展提供缓冲空间，成为钢铁工业实现碳中和的过渡方案甚至终极答案之一。目前来看，世界各主要钢铁生产国均未彻底放弃高炉深度减碳路线，我国应该从自身实际情况出发，近期内在同

步研究开发各类低碳炼铁工艺技术的基础上，以基于现有高炉工艺的深度减碳技术创新为主要研究方向，从源头、过程、末端等全方位角度来实现高炉炼铁的低碳绿色发展。

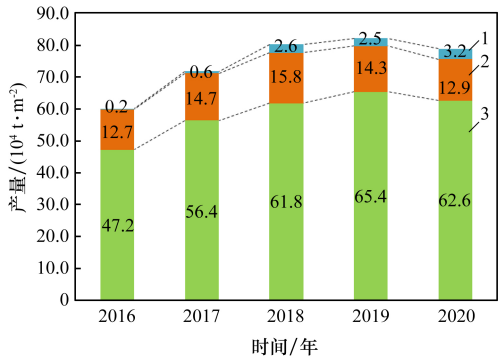
2.2　非高炉炼铁

炼铁工艺深度减碳的关键是“代碳”，即采用清洁能源取代焦炭和煤作为炼铁的燃料和还原剂。因此，无论是以 COREX、FINEX 为代表的煤基熔融还原工艺，还是以回转窑、转底炉为代表的煤基直接还原工艺，亦或基于煤制气的气基直接还原工艺，其本质上是“以煤代焦”，而不是“代碳”，因此无法大幅度降低碳排放。而符合“代碳”要求的非高炉炼铁工艺包括富氢气基直接还原工艺、氢基熔融还原工艺和电解还原法等。

2.2.1　气基竖炉直接还原炼铁工艺

气基竖炉直接还原炼铁工艺可以彻底摆脱对焦炭的依赖，避免焦化和烧结工序产生的环境污染，加上其产品纯净、能源消耗低，可使用富氢气体从而大幅度降低碳排放等优点，是世界上普遍认可的最有可能实现低碳甚至零碳冶金的炼铁工艺，受到了重点关注并得到了长足的发展。

近年来，除 2020 年由于新型冠状病毒感染疫情导致产量略有下降外，气基竖炉直接还原铁的产量逐年增长，从 2016 年的 6 000 万吨增长到 2020 年的 7 880 万吨（如图 3 所示）。其中 Midrex 和 HYL/Energiron 是两种主要的气基直接还原工艺，占直接还原铁总产量的 70% 以上。还原气可采用天然气、煤制气、焦炉煤气等富氢气体，其



1—其他工艺；2—HYL/Energiron 工艺；3—MIDREX 工艺。

图 3　2016—2020 年气基竖炉直接还原铁产量变化

Fig. 3　Change of direct reduced iron output in gas-based shaft furnace from 2016 to 2020

中 Midrex 工艺还原气中氢气占比达 50% 以上，HYL/Energiron 工艺中氢气占比则可达 80% 以上，100% 采用氢气的全氢竖炉直接还原技术则正在开发中。

研究显示，相比于高炉炼铁工艺，采用气基竖炉直接还原炼铁工艺可以减少 CO_2 排放量 50% 以上，如果采用全氢竖炉冶炼则可实现碳减排量 90% 以上。因此，在绿氢和绿电基础上的“全氢气基竖炉直接还原炼铁/废钢 + 电炉炼钢”是未来最有可能的零碳钢铁技术路径。

综合考虑减碳潜力和技术成熟程度，气基竖炉直接还原炼铁工艺将成为我国研究的重点方向且有望实现重大突破。由于我国天然气资源匮乏，而工业副产品焦炉煤气资源较为丰富，因此在低成本绿氢制备技术取得重大突破之前，使用焦炉煤气为气源的气基竖炉直接还原将成为我国从“碳冶金”到“纯氢冶金”的重要过渡技术。接下来，我国将不断提升以焦炉煤气、天然气、煤制气、氢气以及它们的组合为气源的富氢竖炉直接还原技术的成熟度和经济性，研究解决高比例氢气冶炼存在的强吸热反应影响炉内温度场进而影响氢气利用效率和反应速率、设备在氢气环境中耐高温高压腐蚀的安全性能要求高、产品无渗碳反应活性大、绿氢生产成本高储存困难等关键制约问题，从而逐步提高还原气中的氢气比例直至全氢冶炼。

随着富氢冶炼技术的逐步成熟和绿氢制备成本的不断下降，综合考虑碳税成本因素，预计氢基直接还原技术将在 2030 年左右具备一定的市场竞争力，并逐步进入市场开始规模化商业运营。

2.2.2　氢基熔融还原炼铁工艺

氢基熔融还原炼铁工艺是一种将氢冶金和熔融还原相结合的新型低碳炼铁技术，其采用富氢介质代替碳作为还原剂将铁矿石在反应器内进行还原获得液态铁水，该技术可采用焦炉煤气、氢气、等离子氢等作为富氢还原剂。建龙集团已在内蒙古建成了一座年产 30 万吨富氢熔融还原工艺生产线，拟通过“H_2 + COG”、纯 COG、纯 H_2、等离子氢等多代技术更迭，最终实现全氢熔融还原炼铁。目前，该项目尚处于煤 + 焦炉煤气富氢熔

融还原示范阶段。

理论上，高温条件下 H_2 可以代替碳高效地还原熔融态铁氧化物，降低能源消耗，减少二氧化碳等有害气体排放，从而实现绿色低碳冶炼。但氢基熔融还原反应器熔池中反应复杂，熔融状态下碳氢耦合、全氢冶炼的物理化学机理尚不明晰，与气基竖炉直接还原技术相比，氢基熔融还原技术起步较晚，相关研究和实践较少，技术成熟度和工业化程度较低，还需要进行大量的科学研究和实践检验。

2.2.3 电解还原铁工艺

电解还原铁是使用电能将铁矿石转化成金属铁和氧气，不需要传统炼铁工艺中的焦化、烧结、球团、高炉等工序，结合绿电可以实现二氧化碳零排放，也可大幅度降低粉尘、SO_2、NO_x 等污染物的排放量。

电解还原铁技术最有前景的工艺路线包括碱性溶液电解法和熔融氧化物电解法，主要有欧盟ULCOS项目的电解冶金法(ULCOWIN)、电流直接还原法(ULCOLYSIS)和波士顿金属公司的熔融氧化物高温电解法(MOE)，其原理是将铁矿石置于碱性电解质溶液或高温熔融电解质溶液中，再通入电流电解还原，氧气从阳极放出，金属铁在阴极生成。

电解还原铁技术目前尚处在实验室研究阶段，技术成熟度相对较低，因此未被纳入国际能源署发布的钢铁行业减碳技术路线图的可持续发展方案。但是从长远来看，电解还原铁技术属于二氧化碳净零排放技术，在低成本可再生电力大规模应用之后，有望在低碳可持续钢铁生产流程中占有一席之地。

3 结 论

(1) 在全球脱碳浪潮的推动下，各国钢铁行业纷纷提出了碳中和工作路线图和行动方案，且均把技术创新作为降碳的核心要素。我国钢铁工业应结合全球发展趋势和自身特点，加大力度开发适合我国国情的低碳炼铁新工艺、新技术，为实现碳中和目标打下坚实基础。

(2) 虽然现阶段我国以富氢冶炼为代表的高炉低碳炼铁新技术还不够成熟，在实际应用中还存在诸多问题，但综合考虑资产保值、技术成熟程度、减碳经济性等因素，短期内我国炼铁应该以基于现有高炉工艺的深度减碳技术创新为主要方向。

(3) 综合考虑降碳潜力和技术成熟程度，富氢气基竖炉直接还原炼铁工艺将成为我国炼铁的重点研究方向且有望实现重大突破，预计在2030年左右将具备一定的市场竞争力，并逐步进入市场开始规模化商业运营。

(4) 我国氢基熔融还原技术和电解还原铁技术的技术成熟度相对较低，还需要进行大量的科学研究工作，但是从长远来看，二者均有望在未来的低碳可持续钢铁生产流程中占有一席之地。

参考文献：

[1] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 低碳炼铁 势在必行[J]. 炼铁,2021,40(4):1-3.
YANG Tianjun, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Low carbon ironmaking is imperative in facing environment challenge[J]. Ironmaking, 2021, 40(4): 1-3.

[2] 王新东,郝良元. 现代炼铁工艺及低碳发展方向[J]. 中国冶金,2021,31(5):1-5;18.
WANG Xindong, HAO Liangyuan. Analysis of modern ironmaking technology and low-carbon development direction[J]. China Metallurgy, 2021, 31(5): 1-5;18.

[3] 高建军,齐渊洪,严定鎏,等. 中国低碳炼铁技术的发展路径与关键技术问题[J]. 中国冶金,2021,31(9):64-65.
GAO Jianjun, QI Yuanhong, YAN Dingliu, et al. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 64-65.

[4] 潘钊彬,乔军. 炼铁工业发展现状及趋势之我见[J]. 炼铁,2020,39(6):21-22.
PAN Zhaobin, QIAO Jun. Current development status and trend of ironmaking industry[J]. Ironmaking, 2020, 39(6): 21-22.

[5] 叶恒棣,郑富强,胡兵,等. 氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团,2022,47(1):10-11.
YE Hengdi, ZHENG Fuqiang, HU Bin, et al. Status and

development trend of hydrogen-based fuel non-blast furnace ironmaking technology[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):10 – 11.

[6] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望[J]. 钢铁,2020,55(8):11 – 12.
ZHANG Fuming. Development and prospect of green and low carbon ironmaking technologies in Shougang[J]. Iron and Steel,2020,55(8):11 – 12.

[7] 刘学燕,毛学芹,薄涛,等. 济钢 4 号高炉喷吹焦炉煤气工业试验[J]. 炼铁,2019,38(4):39 – 42.
LIU Xueyan, MAO Xueqin, BO Tao, et al. Commerical test of COG injection in Jinan steel's NO. 4 BF[J]. Ironmaking,2019,38(4):39 – 42.

[8] 季书民,许晓兵,李涛. 八钢富氢碳循环氧气高炉低碳冶金生产实践[C]//2023 年全国高炉炼铁学术年会论文集. 南宁:中国金属学会,2023:555 – 559.
JI Shumin, XU Xiaobing, LI Tao. Low carbon metallurgy production practice of hydrogen-rich carbon circulating oxygen blast furnace in Bagang[C]//National Annual Conference of Blast Furnace Ironmaking Proceedings. Nanning: The Chinese Society for Metals, 2023: 555 – 559.

[9] 毕传光,唐珏,储满生. 梅钢 2 号高炉喷吹焦炉煤气数值模拟[J]. 钢铁,2018,53(4):89 – 96.
BI Chuanguang, TANG Jue, CHU Mansheng. Mathematical modeling of Mei steel No. 2 BF with coke oven gas injection[J]. Iron and Steel,2018,53(4):89 – 96.

[10] 高攀,李强,张作良,等. 喷吹循环煤气氧气高炉的静态模型[J]. 材料与冶金学报,2013,12(1):7 – 12.
GAO Pan, LI Qiang, ZHANG Zuoliang, et al. A comprehensive static model for oxygen blast furnace with recycling gas injection[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2013,12(1):7 – 12.

[11] 王成善,时艳文,李丹丹,等. 全氧高炉炼铁工艺模拟分析[J]. 重庆大学学报,2014,37(9):47 – 58.
WANG Chengshan, SHI Yanwen, LI Dandan, et al. Simulation research on oxygen blast furnace ironmaking process[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(9):47 – 58.

[12] 邵久刚,张建良,王广伟,等. 高炉全氧炼铁工艺理论分析[J]. 冶金能源,2013,32(4):22 – 28.
SHAO Jiugang, ZHANG Jianliang, WANG Guangwei, et al. Theoretical analysis of oxygen-blast furnace ironmaking process[J]. Energy for Metallurgical Industry,2013,32(4):22 – 28.

[13] 鲍继伟,储满生,柳政根,等. 铁焦制备与高炉应用的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(8):38 – 39.
BAO Jiwei, CHU Mansheng, LIU Zhenggen, et al. Research progress on preparation and application of iron coke in blast furnace[J]. Iron and Steel,2020,55(8):38 – 39.

[14] NOMURA S, HIGUCHI K, KUNITOMO K, et al. Reaction behavior of formed iron coke and its effect on decreasing thermal reserve zone temperature in blast furnace[J]. ISIJ International,2010,50(10):1388.

[15] YAMAMOTO T, SATO T, FUJIMOTO H, et al. Reaction behavior of ferro coke and its evaluation in blast furnace [J]. Tetsu-to-Hagan,2011,97(10):501 – 509.

[16] 于鲁,徐润生,王炜,等. 铁矿粉对铁焦炭化过程体积演变的影响[J]. 钢铁研究学报,2019,31(6):516 – 520.
YU Lu, XU Runsheng, WANG Wei, et al. Effect of iron ore powder on volumetric evolution of iron coke during carbonization[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019,31(6):516 – 520.

[17] 王宏涛,储满生,赵伟,等. 热压铁焦对高炉综合炉料熔滴性能的影响[J]. 东北大学学报,2016,37(8):1108 – 1112.
WANG Hongtao, CHU Mansheng, ZHAO Wei, et al. Effect of iron coke hot briquette on softening-melting and dripping properties of blast furnace mixed burden[J]. Journal of Northeastern University,2016,37(8):1108 – 1112.

[18] 史世庄,罗永辉,毕学工,等. 铁焦初始反应温度影响因素分析[J]. 武汉科技大学学报,2016,39(2):98 – 101.
SHI Shizhuang, LUO Yonghui, BI Xuegong, et al. Analysis of influencing factors of initial reaction temperature of iron coke[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology,2016,39(2):98 – 101.