

炼钢极限碳排的分析研究

朱荣*, 任鑫, 薛波涛

北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083

Analysis and Research of Ultimate Carbon Emission in Steelmaking Process

Zhu Rong*, Ren Xin, Xue Botao

Carbon Neutrality Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China

1. 前言

我国政府 2020 年提出了“碳达峰、碳中和”的国家战略目标^[1], 2021 年我国粗钢产量 10.33 亿吨, 占世界的 53%以上, 产生的 CO₂ 排放占全国的 15%左右。降低化石能源消耗, 减少 CO₂ 排放总量和排放强度, 确保国家实现“双碳”目标, 已成为钢铁行业的重要任务。

目前我国钢铁流程主要由以铁矿石为原料的高炉-转炉“长流程”(BF-BOF 流程)和以废钢为原料的电炉“短流程”(EAF 流程)两类。电弧炉炼钢短流程具有流程短、绿色环保等特点, 因此发展电弧炉短流程是今后我国钢铁行业的主要发展趋势。

中国钢铁工业长流程比例占比约为 90%, 而电炉短流程的比例约为 10%^[2]。受废钢资源的影响, 未来较长时期, 中国钢铁工业仍将以高炉-转炉长流程为主。本文将结合当前我国炼钢超低碳排放背景, 探究“双碳”背景下寻求炼钢极限碳排路径, 助力钢铁行业绿色低碳发展。

2. 炼钢极限碳排路径

长流程炼钢工艺的吨钢 CO₂ 排放量为电炉短流程工艺的 3 倍以上^[3], 难以作为钢铁行业绿色低碳发展路径。随着我国废钢资源的总量增加, 废钢循环及加工产业链的完善, 发展电弧炉短流程是钢铁行业低碳发展的主要方向。

因此根据废钢资源的变化, 低碳前沿技术的研究进展, 预计在 2035 年前, 钢铁行业碳排仍以高炉-转炉长流程为主要减碳方向, 称为 BLUE 35-BOF; 2035-2060 年, 钢铁工业碳排将以电弧炉短流程减碳为主, 届时钢铁行业将逐步实现深度减碳, 称为 GREEN 60-EAF, 见图 1 所示。

2.1. BLUE 35 减碳路径

BLUE 35 减碳路径以高炉-转炉长流程工序降碳为主, 兼顾电炉短流程绿色低碳技术发展。国内外历经数十年高炉-转炉长流程炼钢工艺减碳研究, 目前部分研究成果已经在生产中直接或间接得到验证。以下从铁前低碳生产、低碳炼钢技术两方面介绍高炉-转炉长流程限碳排路径。

2.1.1. 铁前低碳生产

高炉-转炉长流程中, 铁水生产过程带来的 CO₂ 排放占据主导地位, 炼铁系统约占钢铁流程 CO₂ 排放的 70%左右。因此, 推进低碳铁水生产, 实现源头减碳, 是实现长流程-转炉炼钢工艺极限碳排放的重要保证。

铁前低碳生产要以降低化石燃料消耗为核心，焦化工序 CO_2 的排放主要来源于燃料燃烧和焦化生产消耗各种能源和载能环节间接带来的 CO_2 排放。焦化工序的冶金低碳生产的焦化技术包括：干法熄焦技术、焦炉煤调湿生产、捣固焦技术等。还需重点专注氢基高炉用高强度、高反应性焦炭。高炉炼铁工艺的节能减排技术呈现出多样化特点，我国高炉炼铁必须在低碳环保、加快应用新型节能减排技术，包括：高炉复合燃料喷吹技术（煤粉、废塑料、生物质等）、高炉富氢冶炼技术、氧气高炉、高炉煤气 CO_2 脱除等技术。如高炉富氢冶炼通过在高炉中喷吹焦炉煤气、氢气和天然气，替代传统高炉中焦炭和煤的作用，实现高炉系统 CO_2 减排 8% 左右^[4-6]。高炉复合喷吹废塑料、废轮胎、富氢还原气，实现高炉燃料减量的无碳替代，使 CO_2 的排放量降低约 10%。

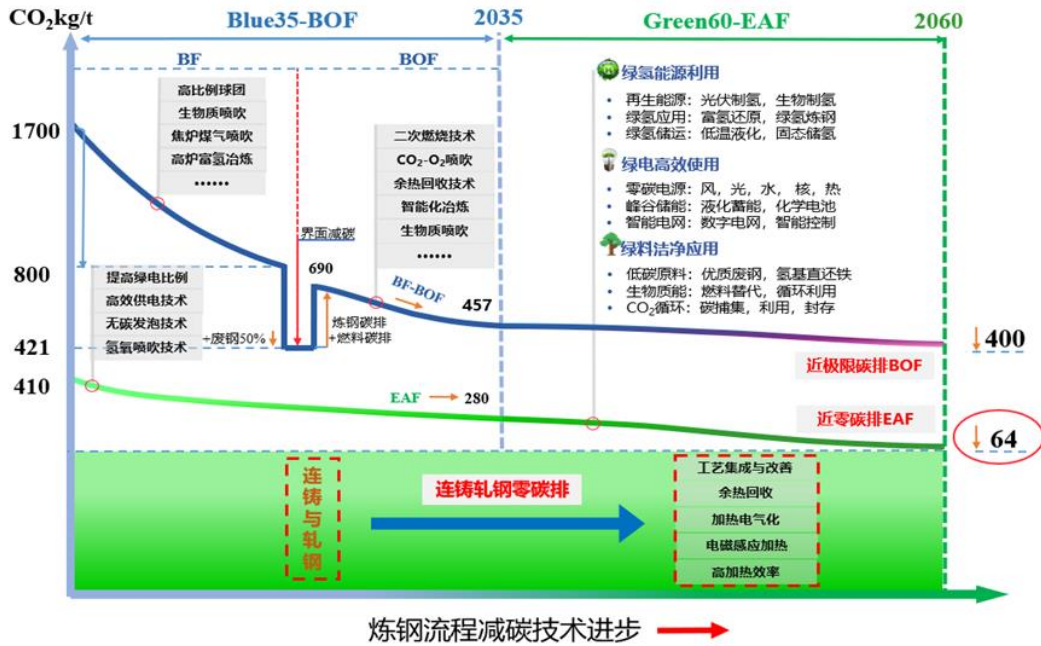


图 1 BLUE 35-BOF、GREEN 60-EAF 炼钢碳减排路径

Fig. 1 BLUE 35-BOF、GREEN 60-EAF carbon reduction pathway in steelmaking

2.1.2. 低碳炼钢技术

转炉炼钢是以铁水为主原料，配加一定量废钢。根据炉内热平衡计算，通常废钢比例低于 20%。转炉炼钢增大废钢比例能够减少 CO_2 排放，转炉炼钢的废钢比每增加 10%（即铁水比例减少 10%），吨钢的 CO_2 排放量减少约 6%；转炉炼钢废钢比由 20% 提升至 30%，吨钢 CO_2 排放量减少约 182 kg；废钢比由 20% 提升至 50%，吨钢 CO_2 排放量减少约 547 kg。根据某厂转炉的生产数据，不同比例废钢比的吨钢坯碳排及能耗如图 2 所示。

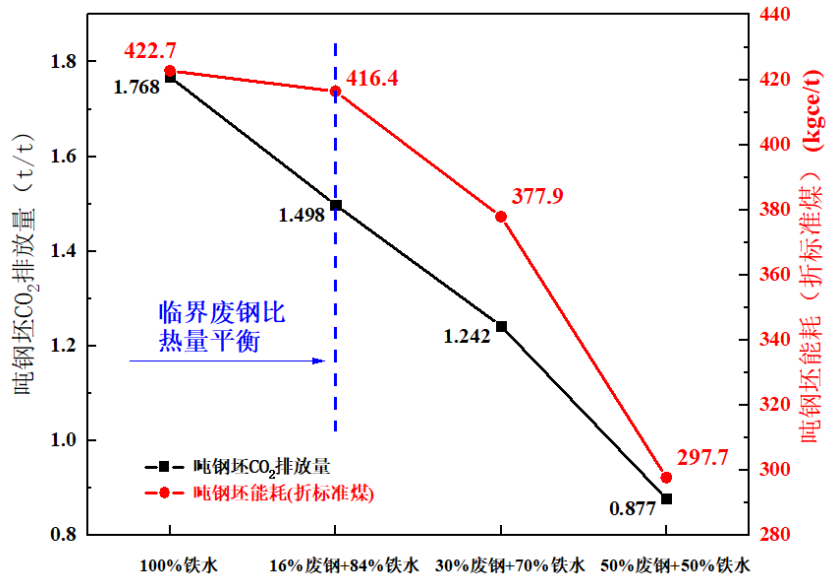


图2 不同比例废钢吨钢坯碳排及能耗

Fig. 2 Carbon emission and energy consumption per ton of steel for different scrap ratios

基于我国转炉流程占比高的基本国情，开发转炉高废钢比冶炼工艺，在转炉内以更高比例的低碳炉料（废钢/DRI）替代高炉铁水进行冶炼，将成为转炉炼钢的必然选择，经济效益和社会效益将日益凸显。

作者团队申请并承担了宝武“全球低碳冶金联盟”首批低碳基金，将开发基于高冷料比的转炉底喷煤粉/生物质炭技术，见图3。与无烟煤相比，生物质炭作为一种零碳能源，拥有与煤相近的热值、较低硫氢含量、更好的燃烧反应性，是双碳背景下转炉底吹燃料的重要选择。依托顶吹氧气、底吹氧气-生物质粉-石灰粉的复吹转炉将是今后实现高废钢比的重要方法。废钢加入转炉后，采用底吹氧气-生物质粉、顶吹氧气进行炉料预热，通过向转炉内兑入高温铁水，在补充热量的同时，依靠底吹石灰粉快速完成磷等元素的去除，可降低炼钢原辅料消耗，满足钢液纯净度的要求。

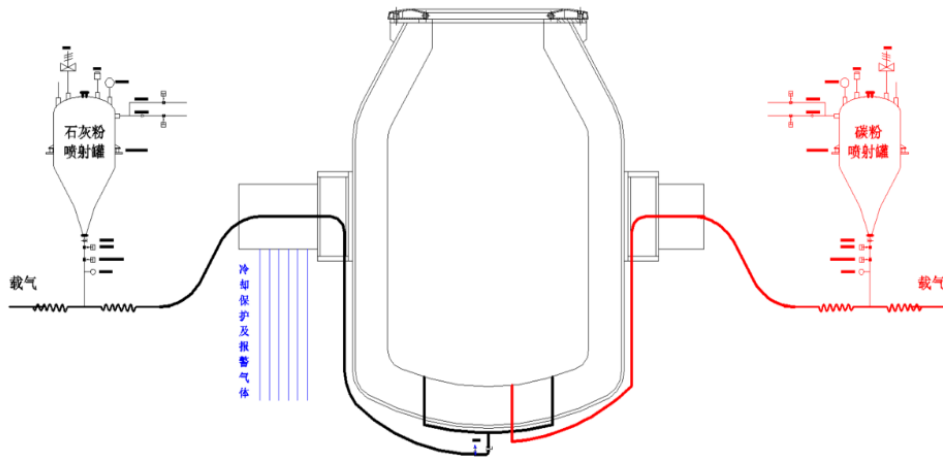


图3 转炉底喷煤粉/生物质炭技术

Fig. Bottom spray coal powder/biomass carbon technology in BOF

转炉炼钢主要节能降碳措施主要见表1，可以发现不同减碳手段的减碳效果。

表 1 转炉炼钢低碳冶炼技术及其降碳效果

Table 1 Low carbon smelting technology and its carbon reduction effect in BOF

低碳冶炼技术	降碳效果 kgCO ₂ /t
转炉底吹生物质炭粉	182
石灰石炼钢	65
铁钢界面减碳	45
底喷石灰粉	30
CO ₂ -O ₂ 复合喷吹	22

在电炉炼钢短流程炼钢技术方面，作者提出了弧炉炼钢近零碳排放新工艺，从能量来源碳近零、冶炼过程碳近零、原料生产碳近零三个层面实现电弧炉低碳炼钢。并结合绿电供电、氢能烧嘴、无碳发泡、氨基直还铁等相关研究基础，分析该工艺的实现可行性，在 2035 年，电弧炉碳排放将由当前 410 kg·t⁻¹ 钢降至 280 kg·t⁻¹ 钢^[7]。

以现有国内水平吨铁碳排 1700 kg·t⁻¹ 计算，采用低碳模式生产，焦化、球团、烧结、高炉工序将碳排放降低至 800 kg·t⁻¹；按转炉 50%废钢+50%铁水原料结构生产核算，采用转炉底喷生物质炭粉替代传统煤粉结合废钢预热等技术，可实现 2035 年长流程-转炉炼钢工艺极限碳排至 457 kg·t⁻¹ 钢坯^[8]。

2.2. GREEN 60 发展路径

GREEN 60 发展路径以电炉炼钢短流程工序降碳为主。其主要减碳方向包括绿氢、绿电、绿色原料 100% 利用。鉴于 2035 年，电弧炉炼钢技术碳排放将达 280 kg·t⁻¹ 钢的水平，从冶炼单体技术方面难有突破，因此将减碳方向落实到绿电、绿氢、绿色能源的使用方面。

电力是电炉炼钢短流程工艺直接用能的主要形式，电力来源低碳化，尤其结合未来电炉炼钢短流程冶炼工艺及突破性技术的实施，将有效降低钢铁企业二氧化碳排放量。绿电指利用太阳能、风能、核能、氢能等不产生 CO₂ 排放的外来能源，将其转化为电能，如果将这部分绿色电能高效利用到炼钢过程中，即可从能量来源上达到碳近零的目标。

通常光伏和风力是互补的。阳光强烈时，风力相对较弱，因此当阳光不充足及黑夜时，风力将发挥作用。光伏和风电都是受天气影响较大的新能源，发出的电能不能稳定供给用户直接使用，通常用储能系统进行能量储存及调节。由于电弧炉用电需求峰谷变化快，用电量较大，储能系统要求比容量大、输出效率高、循环寿命要求长等。作者提出了由风光互补发电系统供电、储能系统进行调节的电弧炉炼钢微电网，可以充分利用风光的互补优势，使用清洁能源的同时，在获得更低的成本下，保证电弧炉的平稳生产，见图 4。该技术在经济上也是可行的，经测算：光电、风电和谷电的三种能源的价格平均在 0.2-0.3 元·kW·h⁻¹，使得电弧炉炼钢生产的能源成本下降，具备实现电弧炉炼钢生产的“能量供给碳近零”目标。

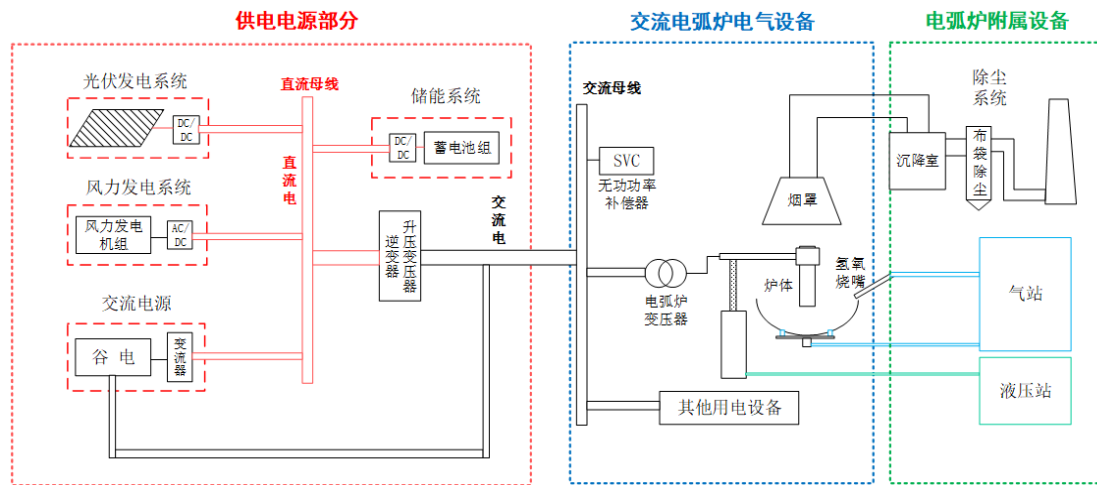


图4 绿电供电及电弧炉电气系统

Fig.4 Green electric power supply and electric arc furnace electrical system

氢能作为一种清洁、高效、可持续发展的能源，在钢铁生产流程中的应用是研究热点之一。集束射流氧枪被广泛应用于电弧炉生产过程中，起到废钢助熔、高效供氧的作用。作者将氢能和集束氧枪技术结合，利用氢气来代替作为集束氧枪燃料气体的天然气、煤气等，形成氢氧集束射流氧枪，从而实现氢能在电弧炉炼钢的有效利用。氢气相比甲烷和乙烷，氢气点火能量低，火焰稳定性好，可燃流速高，可满足炼钢生产提速及冷区热量补充的要求。

为实现炼钢厂的转炉-精炼-连铸全工序降碳减碳，精炼、连铸等工序应着眼于绿色化、低碳化技术，充分发挥“绿氢能源”、“绿电高效”和“绿料洁净”等技术，挖掘炼钢厂全工序节能减碳潜力。

具体措施包括：①加热电力化。钢包烘烤、中间包烘烤等冶金容器耐材的烘烤采用绿能加热取代燃气加热技术、中间包采用等离子加热技术等，实现精炼工序加热烘烤零碳排。②绿料洁净化。氢能作为一种清洁、高效、可持续发展的新能源，若将其应用到钢包烘烤等，配合全氧燃烧，采用的燃烧介质完全不涉及碳元素；连铸坯采用氢氧切割，铸坯切割不再产生 CO_2 ，理论计算吨钢降低碳排放 $0.692 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。③高效连铸技术。随着连铸工艺的不断发展和近终形连铸、连铸坯热装热送技术等高效连铸技术得到长足进步，其在节能减排、降耗等方面发挥示范作用。据测算，采用高效连铸技术吨钢碳排可降低 $27.49 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

在GREEN 60阶段，充分发挥“绿氢能源”、“绿电高效”和“绿料洁净”等技术，高炉-转炉长流程工序吨钢碳排将降至 400 kg/t ，电弧炉短流程吨钢碳排将降至 64 kg/t ，实现钢铁行业深度减碳。

3. 突破性低碳技术的思考

钢铁行业真正意义上实现绿色低碳发展，不仅仅要发展单元节能减碳技术，更要发展钢铁全流程突破性低碳技术。立足于现有低碳技术储备，作者建议关注以下突破性技术在钢铁行业的开发应用。

3.1. 炼钢突破性技术

3.1.1. 埋弧炉-转炉流程新工艺

在高炉-转炉长流程冶炼工艺中， CO_2 排放量主要集中在铁前工序，即高碳铁水的生产工序。降低铁水的加入量，提高废钢或DRI的使用量将是最有效的减碳方法。在埋弧炉中预熔废钢或DRI后，直接转入转炉或与高炉铁水混合，装入转炉使用，配合埋弧炉采用100%绿电，将大幅降低炼钢 CO_2 排放。近期国内外已有提出埋弧炉-转炉流程新工艺，其工艺流程图见图5。

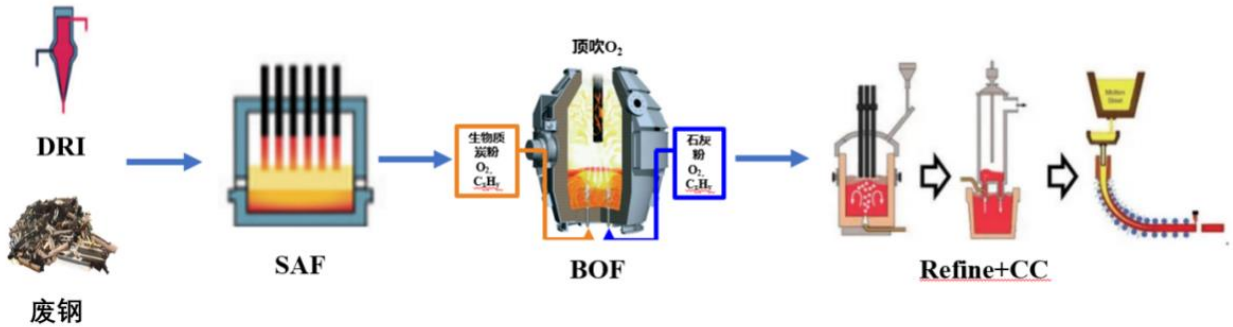


图 5 埋弧炉-转炉流程工艺流程图

Fig.5 Submerged arc furnace - converter process process flow chart

以铁水和废钢为原料对埋弧炉-转炉流程炼钢碳排、能耗、成本的影响：废钢入炉比例增加 10%，吨钢碳排平均降低 156 kg/t，吨钢能耗降低 47 kgce/t。

3.1.2. 全连续超短流程电弧炉炼钢工艺

传统电弧炉炼钢工艺主要存在以下问题：能量消耗高，工序间“界面”存在大量能量耗散；生产周期长，不同工序衔接匹配不畅；设备利用率低，工序功能分散，工序间紧凑程度低，无法实现全流程连续生产，难以充分发挥电弧炉超高功率供电系统、高效连铸等关键装备的设计效能与制造潜力。为克服现有电弧炉炼钢存在的系统性问题，2016 年，作者提出并开展了“全连续超短流程电弧炉炼钢工艺”研究，其工艺流程见图 6，包括电弧炉，出钢溜槽，精炼床和连铸机四个直接相连的工位。其特点为：原料连续加入，成品铸坯连续产出，各工位中的物质与能量保持动态平衡，可实现低耗高效生产。

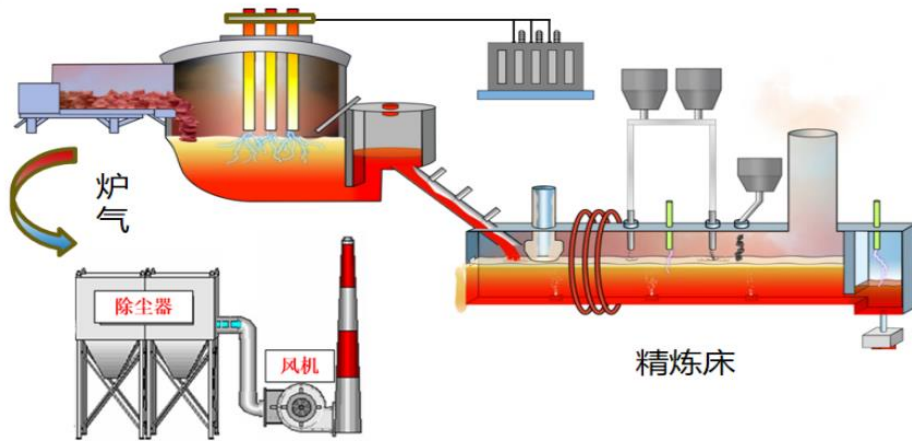


图 6 全连续超短流程电弧炉炼钢工艺示意图

Fig.6 Schematic diagram of fully continuous ultra-short flow electric arc furnace steelmaking process

全连续超短流程电弧炉炼钢工艺物料消耗更低、能量利用效率更高，可降低电弧炉出钢温度至 1580℃ 甚至更低，缩短电弧炉冶炼周期 10 min；终点钢水过氧化程度低，钢铁料消耗下降。与传统电弧炉短流程相比，全连续超低碳新流程碳排放量减少 14.2%，年产量提高 31.7%，极具发展潜力。其与传统电弧炉短流程炼钢工艺指标对比见表 2。

表 2 技术指标对比

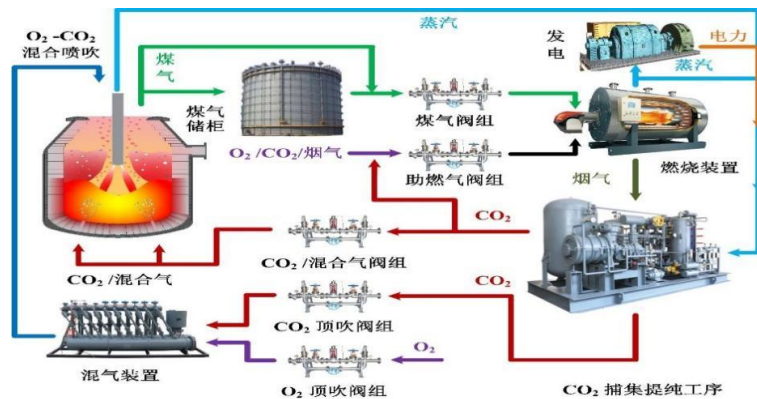
Table 2 Comparison of technical indicators

项目	传统短流程电弧炉 炼钢工艺	全连续超短流程电弧 炉炼钢工艺	变化 量	变化率
钢铁料消耗 (kg/吨钢)	1108.01	1099.29	-8.72	-0.8%
合金消耗 (kg/吨钢)	12.04	11.00	-1.04	-8.6%
冶炼电耗 (kWh/吨钢)	419.08	356.35	-62.73	-15.0%
能量损失 (kWh/吨钢)	420.83	301.52	-	-28.4%
			119.31	
生产成本 (元/吨钢)	3399.66	3281.87	-	-3.5%
			117.79	
年产量 (万吨钢)	70.18	92.40	+22.22	+31.7%
总能耗 (kgce/吨钢)	191.64	164.09	-27.55	-14.4%
碳排放量 (kg-CO ₂ /吨钢)	534.91	458.89	-76.02	-14.2%

3.2. CCUS 技术在钢铁行业的应用

二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 是指将 CO₂ 从能源行业、制造业排放的尾气或大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO₂ 永久减排的过程。CCUS 作为我国实现碳中和目标的重要组成部分，不仅是我国煤炭、石油化工、天然气等化石能源行业实现低碳转型的有力举措，更是钢铁行业减碳的终极手段，解决最后的钢铁行业碳排，努力实现碳中和。

经多年研究与探索，发现 CO₂ 应用于转炉冶炼可改善多项技术指标，炼钢过程要求 CO₂ 气源稳定、压力高、流量大和洁净等特点，因此钢铁企业的 CO₂ 气源主要考虑石灰窑烟气、发电厂烟气、轧钢加热炉烟气或煤气直接分离等。将分离提纯后的 CO₂ 作为转炉冶炼顶底复吹气，目前已在多个企业应用。提出了“转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环利用”的新工艺思路^[9]，即转炉煤气富氧燃烧实现烟气中 CO₂ 富集，并采用 PSA 法分离提纯烟气中 CO₂，其中转炉煤气燃烧副产蒸汽和 CO₂ 冶炼工序增产转炉煤气可供 CO₂ 捕集工序使用，目的是实现转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环低成本利用。新工艺思路有助于推动钢铁企业大规模捕集 CO₂ 并应用。“转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环利用”的新工艺思路如图 7 所示。

图 7 转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环利用Fig.7 CO-CO₂ mass energy conversion in converter steelmaking with self-recycling

3.3. 钢铁流程产 CO₂ 的绿色钢-化联产技术

因大量排放 CO_2 ，空气中浓度已达到约 400ppm 以上，带来了严重的环境和社会问题。因此，减少 CO_2 的排放是世界可持续发展的必要措施。作者提出了以钢铁流程尾气提纯制备 CO_2 为核心的 CO_2 绿色钢-化联产、钢农联合等消纳技术，见图 8。钢铁企业是碳排放大户，其制造工序排放大量高 CO_2 浓度的尾气，包括石灰窑尾气、热风炉尾气、高炉煤气、转炉煤气、轧钢加热炉尾气等，集中建立工序排放尾气净化提纯 CO_2 装置，低成本回收 CO_2 并作为资源重新整合利用，回收的 CO_2 气体不仅满足钢铁企业自身需要，还可以拓展延伸应用至石油、天然气、农业、化工及食品等行业。

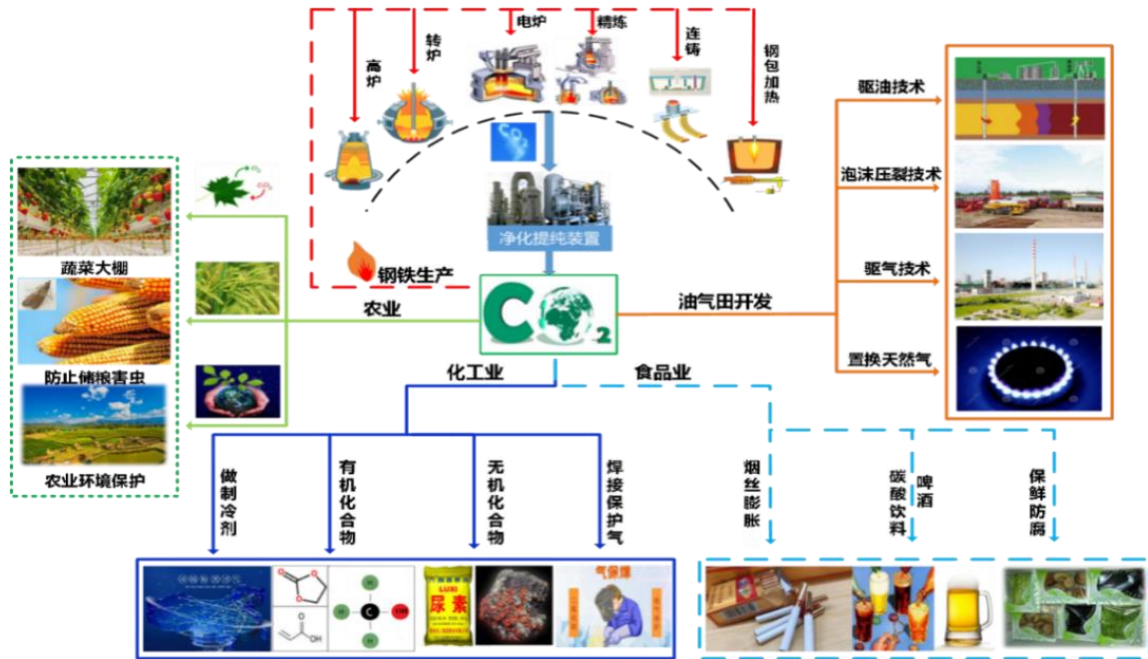


图 8 CO_2 绿色钢-化联产消纳技术示意图

Fig.8 Diagram of CO_2 green steel-chemical co-production and consumption technology

4. 结论

本文结合当前我国炼钢极限碳排放背景，探究了碳中和背景下炼钢极限碳排发展路径，提出钢铁行业“BLUE 35、GREEN 60”发展模式，至 2035 年，炼钢碳排放减量仍以高炉-转炉长流程为主；2035-2060 年，炼钢碳排路径将以电弧炉短流程减碳为主。

结合“CCUS 在钢铁行业的应用”及“钢铁流程 CO_2 的绿色钢-化联产消纳技术”等全流程突破性低碳技术，至 2060 年，高炉-转炉长流程工序吨钢碳排将降至 400 kg/t，电弧炉短流程吨钢碳排将降至 64 kg/t，实现钢铁行业深度减碳，助力钢铁行业逼近碳中和目标。

致谢

感谢国家自然科学基金（No.52074024，No.51974024）和中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLFCF202108）。

参考文献

- [1] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J].中华人民共和国国务院公报,2020(28):5-7.
- [2] 张琦,贾国玉,蔡九菊,等.钢铁企业炼铁系统碳素流分析及 CO₂ 减排措施[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(03):392-394.
- [3] 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(09):21-25.
- [4] Guangwei Wang et al. Experimental and kinetic studies on co-gasification of petroleum coke and biomass char blends[J]. Energy, 2017, 131 : 27-40.
- [5] Paul O. Biney et al. Kinetics of the pyrolysis of arundo, sawdust, corn stover and switch grass biomass by thermogravimetric analysis using a multi-stage model[J]. Bioresource Technology, 2015, 179 : 113-122.
- [6] 邢相栋,王莎,张秋利,等.高炉喷吹废塑料与兰炭混合燃烧及动力学[J].钢铁研究学报,2019,31(03):258-264.
- [7] 朱荣,魏光升,张洪金.近零碳排电弧炉炼钢工艺技术研究及展望[J].钢铁,2022,57(10):1-9.
- [8] 朱荣,任鑫,薛波涛.转炉炼钢工艺极限碳排放研究进展[J].钢铁,2023,58(03):1-10.
- [9] 冯超.转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环利用的基础研究[D].北京科技大学,2022.