钢铁行业 CO_2 排放特征及治理技术分析

刘含笑[1]，吴黎明[1,2]，赵 琳[1]，崔 盈[1]，王少权[1]，斯洪良[1]，周亚宁[3]，周 号[1]，薛建仓[3]

（1. 浙江菲达环保科技股份有限公司，浙江 诸暨 311800；2. 杭州钢铁集团有限公司，浙江 杭州 310000；3. 宁波钢铁有限公司，浙江 宁波 315000）

摘要：针对钢铁行业 CO_2 减排严峻的问题，本文首先系统梳理了长流程炼钢各工序的 CO_2 排放特征，得出石灰窑烟气、烧结烟气、炼焦煤气、高炉煤气、转炉煤气中 CO_2 的体积分数分别为 10%～40%、7%～10%、2%～4%、9%～12%、15%～20%；接着研究分析了碳替代与碳捕获等控碳技术，以及 CO_2 资源化利用技术，得出高炉富氢冶炼和富氢气基竖炉是我国氢冶金发展的两大主要方向，应重点采用化学吸收法进行 CO_2 捕获，在 CO_2 综合利用上，重点考虑针对钢厂特殊工序，CO_2 作为搅拌、控温、覆盖保护、稀释气等发挥作用；最后结合某 4×10^6 t/a 钢卷产能的长流程钢铁企业开展的 CO_2 捕获及综合利用项目分析了相关技术推行的可行性。本文可为国内钢铁行业科学精准有序降碳提供借鉴。

关键词：钢铁行业；碳达峰；碳中和；CO_2；碳捕获；低碳规划

中图分类号：X511；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0038－10

doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.006

Analysis on CO_2 emission characteristics and treatment technologies in iron and steel industry

LIU Hanxiao[1], WU Liming[1,2], ZHAO Lin[1], CUI Ying[1], WANG Shaoquan[1], SI Hongliang[1], ZHOU Yaning[3], ZHOU Hao[1], XUE Jiancang[3]

(1. *Zhejiang Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhuji* 311800, *Zhejiang*, *China*;
2. *Hangzhou Iron & Steel Group Co., Ltd., Hangzhou* 310000, *Zhejiang*, *China*;
3. *Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo* 315000, *Zhejiang*, *China*)

Abstract: In view of the serious problem of CO_2 emission reduction in the iron and steel industry, the CO_2 emission characteristics of each process of long process steelmaking are firstly systematically sorted out, and it is concluded that the volume fractions of CO_2 in lime kiln flue gas, sintering flue gas, coking coal gas, blast furnace gas and converter gas are 10%～40%, 7%～10%, 2%～4%, 9%～12%, 15%～20% respectively; then carbon control technologies such as carbon substitution and carbon capture, as well as CO_2 resource utilization technologies are studied and analyzed. It is concluded that blast furnace hydrogen-rich smelting and hydrogen-rich gas-based shaft furnace are the two main directions for the development of hydrogen metallurgy in China, which should focus on chemical absorption method for CO_2 capture. In CO_2 comprehensive utilization, the special processes for steel mills are focused on, CO_2 is taken as mixing, temperature control, cover protection, dilution gas, etc. Finally, the feasibility of implementing related technologies is analyzed in combination with the medium CO_2 capture and comprehensive utilization project carried out by a long-process steel enterprise with a capacity of 4 million tons/year of steel coil. This paper can provide references for the subsequent scientific, precise and orderly carbon reduction in the domestic steel industry.

Key words: iron and steel industry; peak carbon dioxide emissions; carbon neutrality; CO_2; carbon capture; low carbon planning

收稿日期：2021－09－30；**修回日期**：2021－12－20

基金项目：浙江省“尖兵”计划碳专项项目(2022C03030)；国家重点研发计划(2017YFB0603202)

作者简介：刘含笑(1987—)，男，高级工程师，浙江省“万人计划”青年拔尖人才，从事工业烟气治理及碳减排技术研发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CO_2 是导致温室效应的罪魁祸首之一，严控工业 CO_2 排放已达成全球共识。2020 年中国 CO_2 排放量达 9.89×10^9 t[1]，而钢铁行业是重要的工业 CO_2 排放源。据统计，2020 年中国工业 CO_2 主要排放源中钢铁行业占比达 24%[2]。

针对钢铁工业 CO_2 排放强度高的生产特性，国内学者开展了一系列研究。在碳核查方面：赵艺伟等[3]基于某钢厂实际生产数据，分别采用投入产出法和全生命周期法计算了吨钢 CO_2 排放量，发现全生命周期算法更为精准；李肖如等[4]系统梳理了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)及国内地方层面的钢铁行业碳核算方法，发现碳排放因子的选取是钢铁行业碳核算的重要影响因素，建议进一步细化碳排放因子，提高核算精确度；刘宏强等[5]研究发现采用投入产出法和全生命周期法计算结果差异较大，发现全生命周期方法系统的边界更加完整。在碳减排方面：徐向阳等[6]对京津冀地区钢铁行业节能和 CO_2 减排的技术路径进行了研究分析，发现采用成本低、节能量大的技术和征收一定的 CO_2 排放税能够有效地促进 CO_2 减排；毛艳丽等[7]探讨了碳捕获、利用与封存(Carbon Capture、Utilization and Storage，CCUS)技术在钢厂的应用，变压吸附法和化学吸收法将成为未来钢厂 CO_2 捕获技术的主流；王磊等[8]探讨并分析了高炉喷入焦炉煤气降低钢铁行业碳消耗和碳排放的潜力，并最终确定碳减排量与喷吹焦炉煤气量的关系；马洛文[9]研究分析了烧结机低碳环保生产技术工艺，采用三段混合、液密封环冷机的冷却技术、烧结机内脱硝等技术，满足了节能、环保、低碳的生产目标。值得注意的是，目前的碳排放统计数据多采用物料衡算的方式，缺少工程实测数据支撑，且未将 CO_2 排放特征、减碳与控碳技术及 CO_2 资源化利用技术作为整体来分析研究。

本文通过系统梳理长流程炼钢各工序的 CO_2 排放特征，研究分析碳替代与碳捕获等控碳技术、CO_2 资源化利用技术等，并基于某实际工程开展具体项目示范的可行性研究，以期助力国内钢铁行业科学精准有序降碳。

1　CO_2 排放特征

我国钢铁以“高炉－转炉”长流程生产工艺为主(约占总体的 90%)，能源结构明显高碳化，煤、焦炭占能源投入近 90%，这导致了大量的 CO_2 排放。除中国以外，全球钢铁工业的电炉炼钢占比已达 40% 以上，美国电炉炼钢占比最高，达到 67%。“高炉－转炉”长流程工艺与电炉短流程相比(图 1)。长流程工艺更复杂、排放节点更多、物料来源更广，经初步测算，其 CO_2 排放量约为短流程的 4 倍(长流程炼钢吨钢 CO_2 排放为 1.7 ~ 2.5 t，短流程炼钢吨钢 CO_2 排放为 0.4 ~ 0.5 t[10]。钢铁工业生产体系中的各个环节几乎都排放污染物，一个年产 1×10^6 t 钢的企业，仅炼钢、炼铁、烧结 3 个工序每年就会产生约 8×10^9 m^3 烟气[11]，烟气中含有大量的污染物和 CO_2。典型长流程钢铁联合企业主要工艺及污染物排放如图 2 所示。其 CO_2 主要来源于石灰石(碳酸根)和煤，主要排放源包括石灰窑尾气、焦炉煤气、烧结烟气、高炉煤气、转炉煤气等。

从 CO_2 捕获成本来看，一般烟气中 CO_2 体积分数越高，捕获成本越低。铁前工序(包括烧

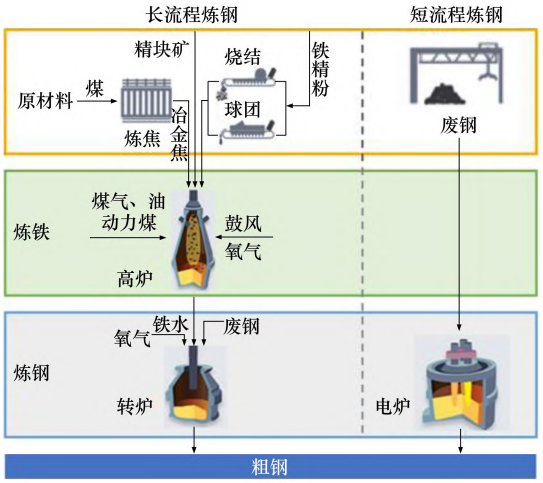


图 1　长流程炼钢和短流程炼钢工艺对比

Fig. 1　Comparison of long process steelmaking and short process steelmaking

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

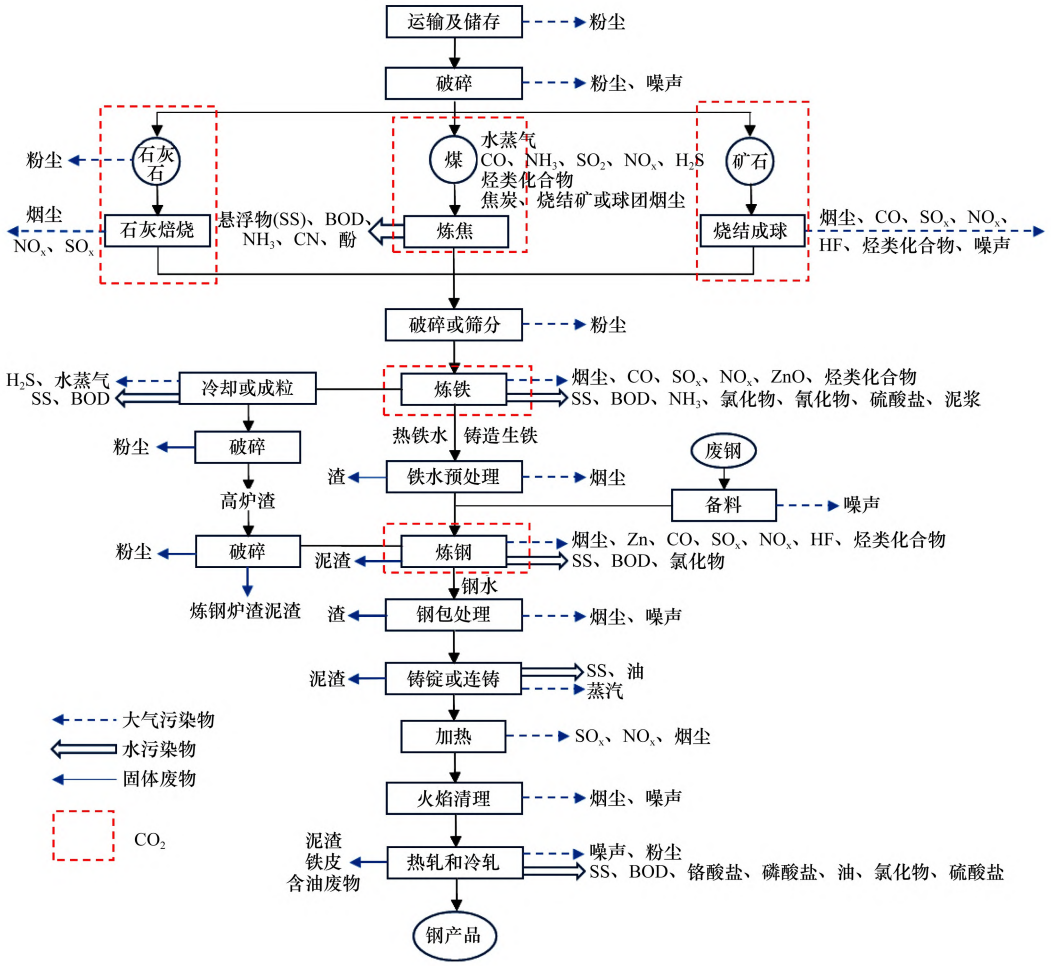


图 2 典型长流程钢铁联合企业主要工艺及污染物排放[11]

Fig. 2 Main process and pollutant discharge of typical long process iron and steel complex

结、球团、焦化、高炉等)的能耗约占钢铁生产总能耗的 90%，CO_2 排放约占吨钢总排放的 95%。石灰窑是通过煤或煤气煅烧石灰石，其 CO_2 排放量大，且烟气中 CO_2 体积分数相对较高，现有文献报道普遍在 10%~40%[12-13]，具体跟窑炉结构和工艺特点有关。铁矿烧结是典型的高能耗高污染过程，烧结烟气中 CO_2 体积分数一般在 7%~10%，CO 体积分数一般在 0.4%~1%[14-15]。炼焦用煤在焦炉中经过干馏后产生的黄褐色气体混合物——焦炉煤气，焦炉煤气主要成分是 H_2(54%~59%)，CO_2 体积分数一般在 2%~4%，CO 体积分数一般在5%~8%[16]。高炉煤气是高炉炼铁过程中产生的副产品，主要成分为 CO(25%~30%)和 N_2 (55%~60%)，CO_2 体积分数一般在 9%~12%[16]，另外，高炉条件下高炉铁水的碳质量分数为 4.5%~5.4%[17]。转炉煤气是转炉炼钢过程中的副产品，热值约为高炉煤气的 2 倍，主要成分为 CO(60%~80%)，CO_2 体积分数一般在 15%~20%[16]。另外热风炉、连铸与轧钢等工序的烟气中也会含有 CO_2，其体积分数一般在 23%~28%、8%~11%[18]。长流程炼钢各工序烟气排放 CO_2 量占比见图 3，不同工序的 CO_2 排放体积分数对比见图 4。从烟气中 CO_2 体积分数来看，石灰窑、热风炉烟气的数据最好，但结合烟气量及年利用小时数，高炉炼铁、烧结和自备发电工序的累计排放量占比最高。

2 CO_2 控制技术

2.1 碳替代

原料或燃料替代是 CO_2 源头减排的重要措施之一。氢冶金是利用氢作为还原剂代替碳还

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

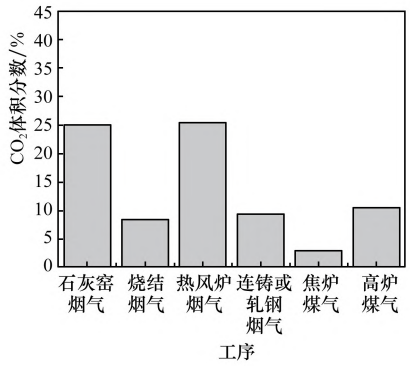


图 3　不同工序的烟气 CO_2 排放体积分数对比

Fig. 3　Comparison of CO_2 emission concentration of different processes

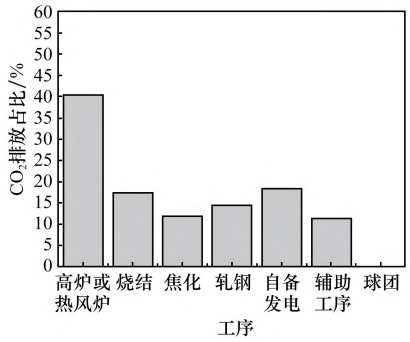


图 4　长流程炼钢各工序烟气的 CO_2 排放量占比[18]

Fig. 4　CO_2 emission ratio of each process in long process steelmaking

原，是减少长流程炼钢 CO_2 排放，保证钢铁工业绿色可持续发展的重要途径之一[19-20]。氢冶炼工艺主要包括高炉富氢冶炼工艺、富氢气基竖炉工艺和纯氢气基竖炉。其中，高炉富氢冶炼工艺是向高炉内喷吹焦炉煤气、天然气等富氢气体[21]，国内外开展试验的项目有鞍钢 9 号高炉(喷焦炉煤气量：30 $m^3/t_{-铁}$)、济南钢铁 4 号高炉(喷焦炉煤气量：63 $m^3/t_{-铁}$)、梅钢 2 号高炉(喷焦炉煤气量：50 $m^3/t_{-铁}$)、日本京滨炼铁厂 2 号高炉(喷天然气量：30 $m^3/t_{-铁}$)等；富氢气基竖炉是利用 H_2 等还原性气体作为还原剂，在竖炉内与球团矿、块矿等发生还原反应得到直接还原铁，代表性的是美国 Midrex 工艺和墨西哥 HYL-Ⅲ工艺；纯氢气基竖炉工艺采用纯的 H_2 作为还原剂直接还原铁矿，鉴于大规模制 H_2 难度大，目前该技术尚未得到工程推广。因此，综合考虑目前制氢和储氢装备与技术尚待完善、H_2 还原吸热降低炉温、H_2 比重低、制 H_2 成本高等，我国原、燃料条件下更适宜发展富氢气基竖炉[22]，且使用焦炉煤气等灰氢是中国从“碳代替”到“氢冶金”的重要过渡[23-25]。

目前，高炉富氢冶炼工艺在八一钢铁高炉已经实施了工业试验：具体是将炉顶脱除 CO_2 的还原煤气实现风口喷吹，并最终实现鼓风氧含量 50% 的超高富氧冶炼来实现绿色炼铁工艺技术的新突破，流程如图 5 所示。2020 年 7 月 15 日高炉开炉启动第一阶段工业试验；2020 年 10 月实现鼓风氧含量 35% 的冶炼目标，突破了传统高炉的富氧极限；2021 年 6 月 11 日，从欧冶炉脱碳后的煤气成功从风口再次喷入高炉，实现高炉碳减排 10%。后续该厂富氢碳循环高炉将通过技术升级和优化，实现全氧冶炼目标，实现碳减排 30%。

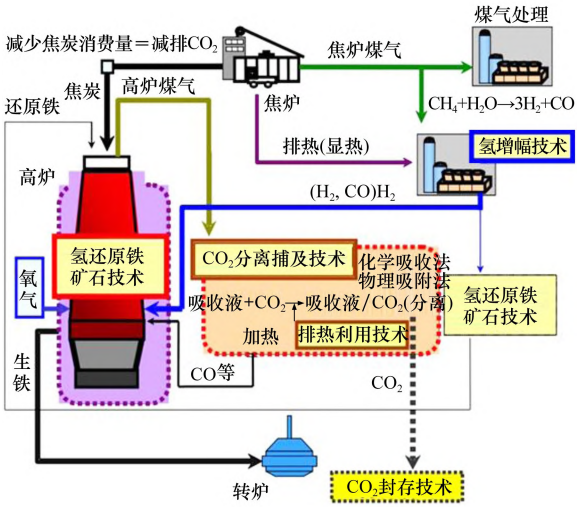


图 5　富氢碳循环流程示意

Fig. 5　Schematic diagram of hydrogen-rich carbon cycle

2.2　碳捕获

据测算，我国钢铁行业碳捕获技术 2030 年 CO_2 减排需求为 2×10^6 ~ 5×10^6 t/a，2060 年减排需求为 9×10^7 ~ 1.1×10^8 t/a[26]。根据前文所述，中国钢铁厂烟气或煤气中的 CO_2 主要为中等体积分数，可采用的 CO_2 捕获技术有化学吸收法、物理吸附法、膜法、生物法、低温蒸馏法等[27]，其中，化学吸收法在其他行业已有较成熟的工程试验应用，物理吸附法未来可实

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现更低的再生能耗水平(有望达到 1.5 GJ/t CO_2)[28]。不同技术的研究及应用进展情况如表1所示[27-29]。

表1 钢铁行业 CCUS 技术研究及应用进展

Table 1 Research and application progress of CCUS technology in iron and steel industry

技术类别	吸收/吸附剂	处理烟气	技术方	工程试验或示范
化学吸收法	不详	高炉煤气	宝钢特色的 BAO-CCU 技术	尚未开展试验
	30% MEA 水溶液、新型吸收剂 RITE-5 和 RITE-6	高炉煤气	日本新日铁公司	新日铁在君津厂4号高炉(日本 COURSE50 项目的子项目),1 t/d
	有机胺(对上述吸收剂进行了改良)	热风炉烟气		日本 COURSE50 项目,30 t/d
	有机胺	热风炉烟气		新日铁住金的室兰厂,120 t/d
	笼形水合物 NeoWhite(一种烷基铵盐)	高炉煤气	日本 JFE 钢铁公司	日本 JFE 公司鹤见厂,3 t/d
	氨水	高炉煤气	韩国 POSCO	韩国浦项制铁,10 t/d
	氨水	直接还原铁煤气	阿联酋钢铁公司与阿布扎比国家石油公司(ADNOC)、阿联酋的可再生能源公司三方联合	阿联酋钢铁 8×10^5 t/a
物理吸附法	变压吸附(PSA),吸附剂为沸石 ZEOLUMF-9HA(SiO_2 和 Al_2O_3 的混合结晶)	高炉煤气	日本 JFE 钢铁公司	日本 JFE 公司西日本制铁所福山厂(COURSE50 项目的子项目),3 t/d
	真空变压吸附(VPSA),吸附剂不详	高炉煤气	安赛乐米塔尔(安米)	Eisenhuttenstadt-EHS 钢厂,试验规模不详

3 CO_2 资源化利用技术

驱油、驱气、地质封存等是目前最主要的 CO_2 大宗消纳途径,预计2030年 CO_2 封存成本为40~50元/t,2060年封存成本为20~25元/t[26]。CO_2 资源化利用方面主要有矿化转化(石膏矿化、钢渣矿化、铝土矿化、混凝土养护等)、生物转化(微藻固碳)、化学转化(制甲醇、乙酸、甲烷等)、制食品级干冰等[30]。同时,针对钢厂特殊工序,CO_2 作为搅拌、控温、覆盖保护、稀释气等发挥作用[31-32],如图6所示。如在烧结工序方面,可采用烟气再循环工艺,不仅可以有效减少 NO_x 排放,还能提高余热利用效率[33];在高炉工序方面,可在高炉风口喷吹 CO_2、作为喷煤的载气等[34-35];在转炉工序方面,可以用作顶吹、底吹气[31];在精炼连铸工序方面,可以用作钢包精炼炉底吹搅拌、电弧炉底吹搅拌、连铸保护气等[36-37]。

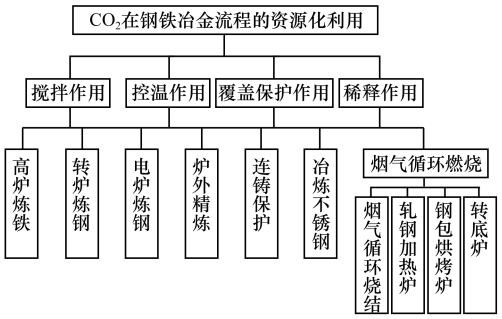


图6 CO_2 在钢铁冶金流程的资源化利用方式[31]

Fig. 6 Resource utilization of CO_2 in iron and steel metallurgical process

4 实际工程案例

本文针对某 4×10^6 t/a 钢卷产能的长流程钢铁企业,开展全流程碳捕获及资源化应用方案研究。出于烟气 CO_2 体积分数、建设场地和施工、运行安全等方面考虑,本文最终选定抽

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

取石灰窑烟气开展示范。现场石灰窑 C5、C6 两条生产线经超低排放改造，如图 7 所示。生产中，回转窑煅烧活性石灰时，石灰石分解产生的 CO_2 及燃料燃烧产生的 CO_2 等烟气，首先经过余热锅炉沉降大颗粒粉尘；然后除尘系统离线式脉冲袋式除尘器对烟气进行净化；净化后的气体经 C5、C6 除尘器风机由烟囱排至大气，出口烟尘排放低于 10 mg/m^3。石灰窑出口至布袋除尘器冷却风入口之间的高温段烟气温度在 260 ~ 300 ℃之间，平均约 270 ℃左右，单座石灰窑烟气流量为 1.3 × 10^4 m^3/h 左右，高温段烟气补充冷风后经布袋除尘器除尘，通过引风机将 190 ~ 200 ℃烟气经过余热回收装置后通过烟囱直排。



（a）全景图；（b）石灰窑工艺路线

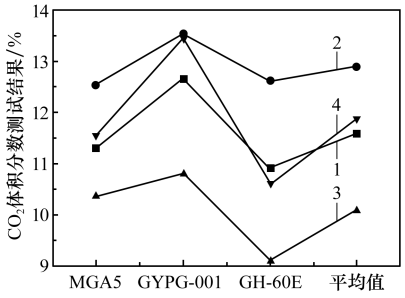
图 7　某 4 × 10^6 t/a 钢卷产能的长流程钢铁企业全景图及石灰窑工艺路线

Fig. 7　Panorama of a long process iron and steel enterprise with capacity of 4 million t/a steel coil and process route of lime kiln

初步计划在石灰窑工序建设 3 × 10^4 t/a CO_2 捕获规模的中试示范工程，为准确核算需抽取的烟气量，对排口处和预热器进出口处烟气中 CO_2 体积分数进行测定，为确保测定精准，分别采用 GH-60E 型自动烟尘烟气测试仪（国产）、GYPG-001 型便携式烟气分析仪（国产）和 MGA5 移动式红外气体分析仪（进口）3 台仪器开展对比测试，三台测试仪器所采用的测试原理均为非分散红外法[38-40]，测试结果对比如图 8 所示。由图 8 可知：3 种仪器测得结果差异不大，C5、C6 烟囱入口处 CO_2 平均值分别为 10.10%、11.88%，预热器出口处 CO_2 平均值分别为 11.64%、12.91%。鉴于预热器入口处烟气温度超过 1 000 ℃，GH-60E、MGA5 的采样系统都不能耐受，因此采用 GYPG-001 测定预热器前烟气中 CO_2 体积分数较好，测定结果

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

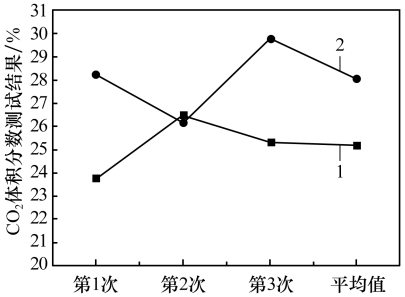
如图9所示。由图9可知：C5、C6预热器入口处CO_2平均值体积分数分别为25.20%、28.08%。经分析，烟囱入口、预热器出口处CO_2测试数据与文献数据和物料衡算数据(来料为碳酸钙，CaO质量分数超过50%；燃料为煤粉和焦炉煤气，煤粉实测固定碳质量分数为71%~74%，焦炉煤气实测CO、CO_2质量分数分别在5%~9%、0.5%~3%)差异很大，而预热器入口处CO_2测试数据与物料衡算结果基本相符。经现场排查，发现该石灰窑工艺中石灰石来料预热环节(预热器)为完全开放式投料，此时大量的冷风被吸入，造成烟气成倍稀释导致CO_2体积分数降低，经测试烟气中含氧量，预热器入口处含氧量不超过2%，但预热器出口和烟囱入口处含氧量竟超过了14%，后续在正式实施烟气CO_2捕获项目前，必须对预热器进行进料口密封，减少冷风掺混。



1—C5烟囱入口；2—C6烟囱入口；3—C5预热器出口；4—C6预热器出口。

图8 不同测试仪器测得CO_2体积分数数据对比

Fig. 8 Comparison of CO_2 concentration data measured by different instruments



1—C5预热器入口；2—C6预热器入口。

图9 预热器入口CO_2体积分数

Fig. 9 CO_2 concentration of preheater inlet

石灰窑共有210 m×40 m场地暂用于临时仓库、技改项目部，可作为本示范项目用地。周边配套有工业水、污水、蒸汽、压缩空气等能源介质管道，能介参数及余量均满足项目需求，靠近烧结区域变压器站，且区域内有石灰开关站、石灰低压配电室，可满足电力需求。预热器通过密封，将烟囱入口处烟气中CO_2体积分数提升至20%以上，预计需抽取1×10^4 m^3/h左右烟气量开展CO_2捕获，采用化学吸收法工艺，采用新型复合胺吸收剂(再生能耗控制在1.5 GJ/t CO_2以内)，捕获后的CO_2一部分用于开展钢渣矿化(1 000 t/a固碳规模)、微藻固碳(1 000 t/a固碳规模)、电催化转化(小试装置)研究，一部分用于钢厂内转炉顶吹/底吹、连铸保护气等，剩余部分根据需要制备食品级CO_2出售，待该捕获工艺中试试验项目技术成熟后，尝试开展全烟气量CO_2捕获，并研究地质封存工艺，该项目全流程工艺如图10所示。待长时间运行验证后，对实际运行的技术经济性进行综合评判，再根据需要，逐步由点到面将技术推广应用到全厂的焦化、烧结、高炉等工序，各工序全烟气量捕获规模测算如图11所示，总计约6.45×10^6~8.56×10^6 t/a。

5 结 论

(1) 钢铁行业占中国工业排放比例达24%，其中，铁前工序CO_2排放占吨钢总排放的95%。从烟气中CO_2体积分数来看，石灰窑、热风炉烟气的数据最好，一般分别在10%~40%、23%~28%，但结合烟气量及年利用小时数，高炉炼铁、烧结和自备发电工序的累计排放量占比最高。

(2) 钢厂碳替代主要是氢冶炼工艺，主要包括高炉富氢冶炼工艺、富氢气基竖炉工艺和纯氢气基竖炉。碳捕获方面，中国钢铁厂烟气或煤气中的CO_2主要为中等体积分数，可采用化学吸收法进行捕获，且技术相对成熟；在CO_2综合利用方面，应重点考虑针对钢厂特殊工序，CO_2作为搅拌、控温、覆盖保护、稀释气等发挥作用。

(3)通过对现场工程中的预热器进行密封，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

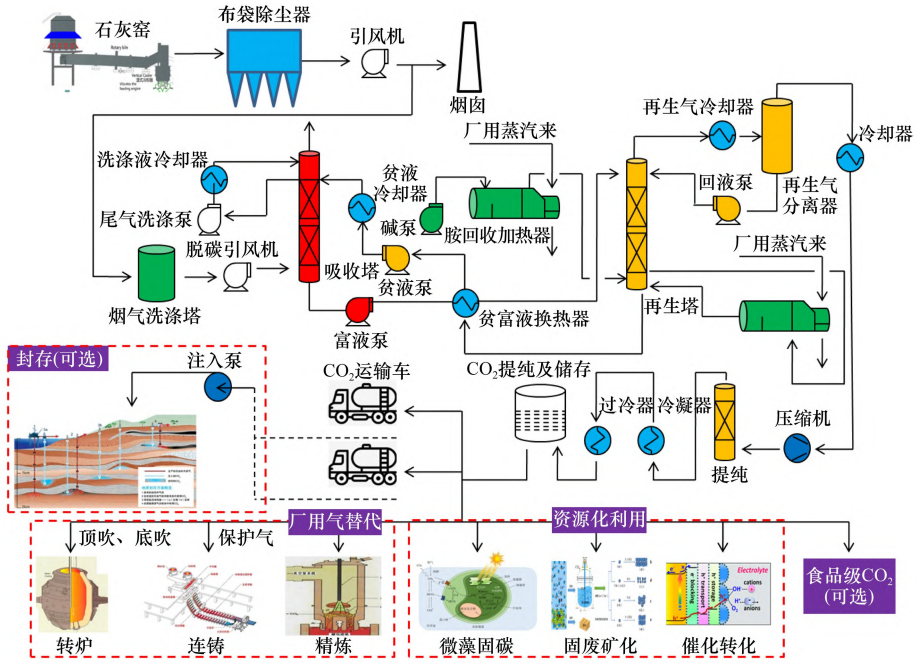
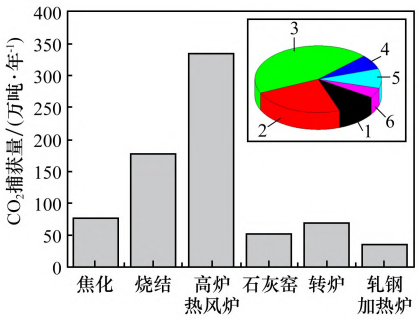


图 10　项目全流程工艺

Fig. 10　The whole process of the project



1—焦化 10.33%；2—烧结 23.72%；3—高炉热风炉 44.64%；4—石灰窑 7.06%；5—转炉 9.46%；6—轧钢加热炉 4.80%。

图 11　各工序全烟气捕获 CO_2 量估算

Fig. 11　Estimation of CO_2 captured by flue gas

提高烟尘入口 CO_2 体积分数至 20% 以上，开展 CO_2 捕获。捕获后的 CO_2 一部分用于开展钢渣矿化、微藻固碳、电催化转化研究，一部分用于钢厂内转炉顶吹与底吹、连铸保护气等，剩余部分根据需要制备食品级 CO_2 出售，待该捕获工艺中试试验项目技术成熟后，尝试开展全烟气量 CO_2 捕获，并研究地质封存工艺。

参考文献：

[1] 数谈世界．中国二氧化碳排放量全球第一！碳中和碳达峰形势严峻！[R/OL]．(2021－08－09)[2021－08－09]．https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707623617487891094&wfr=spider&for=pc.
Talk to the world with mathematics. China′s carbon dioxide emission ranks firss in the world! The situation of carbon neutralization and carbon peak is grim![R/OL]．(2021－08－09)[2021－08－09]．https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707623617487891094&wfr=spider&for=pc.

[2] 严刚．“十四五”绿色产业发展形势分析[R/OL]．北京：生态环境部环境规划院，2021.
YAN Gang. Analysis on the development situation of green industry in the 14th five year plan[R/OL]. Beijing: Environmental Planning Institute of Ministry of ecology and environment, 2021.

[3] 赵艺伟，左海滨，佘雪峰，等．钢铁工业二氧化碳排放计算方法实例研究[J]．有色金属科学与工程，2019，10(1)：34－40.
ZHAO Yiwei, ZUO Haibin, SHE Xuefeng, et al. Case study on calculation method of carbon dioxide emission in iron and steel industry[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(1): 34－40.

[4] 李肖如，谢华生，寇文，等．钢铁行业不同二氧化碳排放核算方法比较及实例分析[J]．安全与环境学报，2016，16(5)：320－324.
LI Xiaoru, XIE Huasheng, KOU Wen, et al. Discussion and case study on the CO_2 emission calculation methods in iron and steel industry[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 320－324.

[5] 刘宏强，付建勋，刘思雨，等．钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]．钢铁，2016，51(4)：74－82.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steelmaking process[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 74 – 82.

[6] 徐向阳,任明,高俊莲. 京津冀地区钢铁行业节能和 CO_2 减排的技术路径[J]. 生态环境,2017,33(11):38 – 43.
XU Xiangyang, REN Ming, GAO Junlian. Technology path of energy conservation and CO_2 emissions eduction of iron and steel Industry in Jing-Jin-Ji[J]. Ecological Economy, 2017, 33(11): 38 – 43.

[7] 毛艳丽,曲余玲,李博,等. 钢厂烟气 CO_2 捕捉技术的开发及其应用前景分析[J]. 钢铁,2016,51(8):6 – 10.
MAO Yanli, QU Yuling, LI Bo, et al. Development and application potential analysis of carbon dioxide capture technology from flue gas in steel works[J]. Iron and Steel, 2016, 51(8): 6 – 10.

[8] 王磊,郭培民,孔令兵,等. 高炉风口喷吹焦炉煤气的减排能力分析[J]. 烧结球团,2021,46(4):78 – 83.
WANG Lei, GUO Peimin, KONG Lingbing, et al. Analysis on carbon emission reduction ability of blast furnace tuyere with COG injection[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(4): 78 – 83.

[9] 马洛文. 宝钢4号烧结机低碳环保生产实践[J]. 烧结球团,2017,42(1):19 – 23.
MA Luowen. Production practice of low carbon environmental protection in Baosteel's No. 4 sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(1): 19 – 23.

[10] 吉立鹏,吴礼云,陈俊锋,等. 钢铁企业石灰窑二氧化碳减排研究与实践应用[J]. 冶金能源,2021,40(4):3 – 10.
JI Lipeng, WU Liyun, CHEN Junfeng, et al. Research and practice on carbon dioxide emission reduction of lime kiln in iron and steel enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2021, 40(4): 3 – 10.

[11] 张殿印,李惊涛. 冶金烟气治理新技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
ZHANG Dianyin, LI Jingtao. New technical manual for treatment of metallurgical flue gas[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

[12] 王玉兴,吴礼云. 基于富氧燃烧的套筒窑烟气 CO_2 回收与循环利用[J]. 冶金动力,2020,242(4):21 – 34.
WANG Yuxing, WU Liyun. Recovery and recycle of CO_2 from flue gas of sleeve kiln based on enriched oxygen combustion [J]. Metallurgical Power, 2020, 242(4): 21 – 34.

[13] 张伙荣,李正国,李征徐. 石灰窑烟气 CO_2 浓度数据偏差原因分析[J]. 纯碱工业,2020,51(4):33 – 35.
ZHANG Huorong, LI Zhengguo, LI Zhengtu. Analysis on the cause of deviation of CO_2 concentration data of lime kiln gas [J]. Soda ash industry, 2020, 51(4): 33 – 35.

[14] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气 CO_x 的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):14 – 22.
WANG Zhaocai, LIU Chen LI Jigan, et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x in sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 14 – 22.

[15] 廖继勇,郑浩翔,甘敏,等. 烧结烟气 CO 的产生及治理途径——生成机理及排放规律[J]. 烧结球团,2021,46(2):1 – 7.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas-formation mechanism and emission law[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 1 – 7.

[16] 王一坤,雷小苗,邓 磊,等. 可燃废气利用技术研究进展(1):高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气[J]. 热力发电,2014,43(7):1 – 14.
WANG Yikun, LEI Xiaomiao, DENG Lei, et al. A review on utilization of combustible waste gas(I): blast furnace gas, converter gas and coke oven gas[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(7): 1 – 14.

[17] 王广,王静松,左海滨,等. 高炉煤气循环耦合富氢对中国炼铁低碳发展的意义[J]. 中国冶金,2019,29(10):1 – 6.
WANG Guang, WANG Jingsong, ZUO Haibin, et al. Effect of blast furnace gas recycling with hydrogen injection on low carbon development of Chinese ironmaking[J]. China Metallurgy, 2021, 46(4): 78 – 83.

[18] 朱廷玉. 中国钢铁行业 CCUS 路线图[R/OL]. 北京:第一届碳中和愿景下碳捕集、利用与封存发展战略论坛,2021.
ZHU Tingyu. CCUS roadmap of China's iron and steel industry [R/OL]. Beijing: The first development strategy forum on carbon capture, utilization and storage under the vision of carbon neutralization, 2021.

[19] ARIYAMA T. Perspective toward long-term global goal for carbon dioxide mitigation in steel industry[J]. Tetsu-to-Hagane, 2019, 105(6): 567 – 579.

[20] VOGL V, AHMAN M, NILSSON L J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking[J]. Cleaner Production, 2018, 203(8): 736 – 748.

[21] 龚奂彰,黄秀玉. 钢铁行业碳减排技术应用与展望[J]. 中国冶金,2021,31(9):53 – 58.
GONG Huanzhang, HUANG Xiuyu. Application and prospect of carbon emission reduction technology in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 53 – 58.

[22] 唐珏,储满生,李峰,等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金,2020,296(8):1 – 6.
TANG Jue, CHU Mansheng, LI Feng, et al. Development status and future trend of hydrogen of hydrogen of metallurgy in China[J]. Hebeimet Allurgy, 2020, 296(8): 1 – 6.

[23] 潘聪超,庞建明. 氢冶金技术的发展溯源与应用前景[J]. 中国冶金,2021,31(9):73 – 77.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

PAN Congchao, PANG Jianming. Development trace and application prospect of hydrogen metallurgy technology[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 73 – 77.

[24] 王广，王静松，左海滨，等. 高炉煤气循环耦合富氢对中国炼铁低碳发展的意义[J]. 中国冶金，2019，29(10)：1 – 6.
WANG Guang, WANG Jingsong, ZUO Haibin, et al. Effect of blast furnace gas recycling with hydrogen injection on low carbon development of Chinese ironmaking[J]. China Metallurgy, 2019, 29(10): 1 – 6.

[25] 柳萌. 我国高炉炼铁技术发展方向之管见[J]. 炼铁，2021，40(3)：1 – 6.
LIU Meng. Understanding on BF ironmaking technology development trend in China[J]. Ironmaking, 2021, 40(3): 1 – 6.

[26] 生态环境部环境规划院. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)[R/OL]. (2021 – 11 – 01)[2021 – 11 – 01]. https://www.sohu.com/a/499340096_121015326.
Environmental Planning Institute of Ministry of ecology and environment. CCUS roadmap of China's iron and steel industry[R/OL]. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021). (2021 – 11 – 01)[2021 – 11 – 01]. https://www.sohu.com/a/499340096_121015326.

[27] 毛艳丽，曲余玲，李博，等. 钢厂烟气 CO_2 捕捉技术的开发及其应用前景分析[J]. 钢铁，2016，51(8)：6 – 10.
MAO Yanli, QU Yuling, LI Bo, et al. Development and application potential analysis of carbon dioxide capture technology from flue gas in steel works[J]. Iron and Steel, 2016, 51(8): 6 – 10.

[28] 中尾真一，佐藤让宣，东井隆行，等. 化学研究组·针对 CO_2 分离回收技术的高级化实用化的措施[J]. RITE Today, 2017, 40(12): 1 – 6.
NAKAO Shnichi, SATO Yoshinobu, HIGASHII Takayuki, et al. Efforts to the advaned and practical usage of CCS Technology[J]. RITE Today, 2017, 40(12): 1 – 6.

[29] 宋清诗，张永杰，陈国军. 高炉煤气碳捕获技术浅析[J]. 宝钢技术，2017，43(3)：1 – 14.
SONG Qingshi, ZHANG Yongjie, CHEN Guojun. Analysis of carbon capture technology for blast furnace gas[J]. Baosteel technology, 2017, 43(3): 1 – 14.

[30] Australia: GlobeCCS Institute. The global status of CCS 2019[R/OL]. (2020 – 06 – 01)[2020 – 06 – 01]. https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/.

[31] 朱荣，王雪亮，刘润藻. 二氧化碳在钢铁冶金流程应用研究现状与展望[J]. 中国冶金，2017，27(4)：1 – 10.
ZHU Rong, WANG Xueliang, LIU Runzao. Recent progress and prospective of application of carbon dioxide in ferrous metallurgy process[J]. China Metallury, 2017, 27(4): 1 – 10.

[32] 吉立鹏，张丙龙，曾卫民. 基于石灰窑回收 CO_2 用于炼钢的关键技术分析[J]. 中国冶金，2019，29(3)：49 – 52.
JI Lipeng, ZHANG Binglong, ZENG Weimin. Analysis on key technologies of CO_2 recovery from lime kiln for steelmaking[J]. China Metallury, 2019, 29(3): 49 – 52.

[33] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Influence of O_2 content in circulating flue gas on iron ore sintering[J]. J Iron Steel Res Int. 2013; 20(6): 1 – 6.

[34] 符政学，刘世聚，符晓，等. 向高炉喷吹二氧化碳的方法：101871026A[P]. 2010 – 10 – 27.
FU Zhengxue, LIU Shiju, FU Xiao, et al. Method for injecting carbon dioxide into blast furnace: 101871026A[P]. 2010 – 10 – 27.

[35] 郭晓庆，袁林，张军，等. 使用二氧化碳作传输介质进行高炉喷煤的方法：102382915A[P]. 2012 – 03 – 21.
GUO Xiaoqing, YUAN Lin, ZHANG Jun, et al. Method for injecting coal into blast furnace using carbon dioxide as transmission medium: 102382915A[P]. 2012 – 03 – 21.

[36] 谷云岭，朱荣，吕明，等. LF 精炼炉底吹 CO_2 气体的工业探索性研究[J]. 钢铁，2013，48(8)：34 – 39.
GU Yunling, ZHU Rong, LV Ming, et al. Exploratory research on bottom blowing CO_2 during the LF refining process[J]. Iron and Steel, 2013, 48(8): 34 – 39.

[37] 王欢，朱荣，刘润藻，等. 二氧化碳在电弧炉底吹中的应用研究[J]. 工业加热，2014，43(2)：12 – 17.
WANG Huan, ZHU Rong, LIU Runzao, et al. Application research of carbon dioxide in EAF bottom blowing[J]. Industrial Heating, 2014, 43(2): 12 – 17.

[38] 环境保护部. 固定污染源废气二氧化碳的测定非分散红外吸收法：HJ 870—2017[S]. 北京：中国环境科学出版社，2017.
Environmental Protection Department. Stationary source emission-Determination of carbon dioxide-Non-dispersive infrared absorption: HJ 870—2017[S]. Beijing: China Environment Press, 2017.

[39] 袁博，袁宇鹏，张祖伟，等. 基于差分吸收检测技术的非分散红外 CO_2 呼吸气体传感器[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2021. 33(1)：118 – 125.
WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, YAO Zilin, et al. Non-dispersive infrared CO_2 breathing gas sensor based on differential absorption detection technology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2021. 33(1): 118 – 125.

[40] 刘恒，任洪亮. 非分散红外二氧化碳检测仪研制[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2017. 38(6)：854 – 857.
LIU Heng, REN Hongliang. Carbon doxide detector based on non-dispersed infrared principle[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2017. 38(6): 854 – 857.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net