

钢铁行业固定源碳排放在线监测分析

张明晨, 刘 涛, 邓雯丽, 张冉冉, 汪 全

中冶检测认证有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月23日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

钢铁行业是国民经济的重要支撑,近年来虽然在产能优化、技术升级和绿色转型等方面取得了重大突破,但能源结构高碳化依旧突出。随着全国碳市场扩容覆盖钢铁行业,开展在线碳排放监测是推动钢铁行业低碳转型的基石。本文梳理了碳排放在线监测的重要参数、计算方法,对比了国内外对在线监测法的制度保障,论证了在线监测法是我国碳排放测算的重要发展方向。通过梳理长流程钢企的碳素流以及各工序生产特点,明确了球团烧结、炼铁、炼钢、轧钢等各工序的碳监测策略。

关键词

钢铁行业, 碳排放, 在线监测, 生产工序

Analysis of Online Carbon Emission Monitoring for Stationary Sources in the Steel Industry

Mingchen Zhang, Tao Liu, Wenli Deng, Ranran Zhang, Quan Wang

Inspection and Certification Co., Ltd., MCC, Beijing

Received: Jul. 23rd, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

The steel industry is an important support for the national economy, and although major breakthroughs have been made in production capacity optimization, technological upgrading and green transformation in recent years, its energy structure remains heavily carbon-intensive. With the expansion of the national carbon market to cover the steel industry, online carbon emission monitoring is the cornerstone of promoting the low-carbon transformation of the steel industry. This paper sorts out the important parameters and calculation methods of online carbon emission monitoring,

文章引用: 张明晨, 刘涛, 邓雯丽, 张冉冉, 汪全. 钢铁行业固定源碳排放在线监测分析[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 134-143. DOI: 10.12677/meng.2025.123017

and compares the institutional guarantees of online monitoring methods at home and abroad, indicating that online monitoring methods are an important development direction for carbon emission measurement in China. By analyzing the carbon flow within integrated steel plants and the production characteristics of each process, the carbon monitoring strategies of pelletizing and sintering, ironmaking, steelmaking, steel rolling and other processes are clarified.

Keywords

The Steel Industry, Carbon Emission, Online Carbon Emission Monitoring, Production Process

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为全球最大的钢铁生产与消费国,中国钢铁行业的碳排放约占全国总量的 15% [1],是制造业中碳排放最高的领域。为实现国家“双碳”目标,该行业亟需加快低碳转型以降低排放。2025 年 3 月 20 日,全国碳市场首次扩容,明确钢铁、有色(电解铝)及建材(水泥)行业将于 2025 年底前完成全国碳市场首轮履约,未来所有控排企业均须履行年度义务。因此,钢铁行业开展碳排放核算,将有助于在保障产量的前提下有效控制并逐步削减碳排放。

国家“双碳”目标确立后,确保碳排放监测的准确与可靠是实现目标的关键支撑。众多研究与应用显示,相比物料核算法,在线监测法在碳排放测算中精度更高[2][3]。通过长期实践和技术发展,欧美在碳监测领域也日益侧重采用准确度更优的直接监测法。基于国内外的实证经验与技术共识,在线监测法预计将在我国碳排放测算领域得到大规模应用。

2. 固定源碳排放在线监测法

当前我国主流认可的碳排放测算主要有两种方法:核算法与在线监测法[4]。核算法是我国当前主导方法,通过核算燃料(如煤炭)消耗量及排放因子计算碳排放。欧洲并行采用两种方法:核算法依据标准或质量平衡方法确定碳排放量;在线监测法则通过连续测量烟气中气体浓度及流速确定碳排放量。美国则强制要求燃煤及固体燃料燃烧设施必须使用在线监测法。

相比在线监测法,核算法测量误差较大且数据可靠性易受影响[5]。鉴于欧美发达地区普遍采用在线监测法,且碳中和理念发轫于发达国家,全球协调背景下,未来碳排放监测标准将更侧重在线监测法。因此,推广在线监测技术亦为国内未来发展趋势。

2.1. 在线监测法

在线监测法依赖于连续监测系统(Continuous Emission Monitoring System, CEMS),适用于数据连续性强、体量大且代表性充分的连续稳定排放源的碳排放量核算,根据采样方法的不同可以大致分为完全抽取法、稀释抽取法和直接抽取法三类。

CEMS 是一种用于实时监测和分析工业排放源气态污染物和颗粒物的综合自动化系统。它通过在固定源排放烟道(水平直管段或垂直烟囱)的匀速流场处,安装 CO₂ 分析仪、流量计、温湿度传感器等设备,在线测量浓度、流速、温湿度等参数[6],进而计算 CO₂ 排放总量。计算公式如下:

$$E_m = Q_g \times \theta_{\text{CO}_2} \times \frac{44}{22.4} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$Q_g = t \times s \times v_{\text{gas}} \times \frac{B_a + P_g}{101325} \times \frac{273}{273 + T_g} \times (1 - H_g) \quad (2)$$

式中, E_m 为单位时间内的 CO_2 排放量, 单位为 t; Q_g 为标准状态下单位时间内干烟气排放量, m^3 ; CO_2 为单位时间内 CO_2 排放标干体积浓度的均值, 单位为 m^3/s ; t 为测点运行时间, s; s 为测点尾端烟道的截面积, m^2 ; v_{gas} 为测点尾端烟道烟气流速, m/s ; B_a 为测点按照地点的环境大气压值, Pa; P_g 为测点尾端烟道压力, Pa; T_g 为测点尾端烟道烟气温度, $^{\circ}\text{C}$; H_g 为测点尾端烟道烟气湿度, %。

对计算结果影响最大的参数是 CO_2 浓度、烟气流速及速度场系数。对计算结果影响最大的参数是 CO_2 浓度、烟气流速及速度场系数。其中, CO_2 浓度数据的不确定度较低, 烟气流速的不确定度较高, 而速度场系数则取决于均速流场布点的空间代表性及校准设备的精确度。

2.2. 在线监测法不确定性分析

气体浓度方面, 钢铁行业烟气成分较复杂, 烟气中含有 CO 、 CH_4 、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等多种气体, 气体之间可能发生化学反应, 以及气体间的物理特性相近, 都会影响 CO_2 浓度的测量。例如, 某些污染物可能会与 CO_2 在测量设备中发生吸附或反应, 光谱分析仪中 CO 、 CH_4 对 CO_2 吸收峰干扰。而且, 不同生产工序的烟气中 CO_2 浓度差异较大, 若测量设备的量程选择不当, 在低浓度或高浓度测量时就会产生较大误差。针对这一问题, 可选择具有抗干扰能力的测量设备, 如采用红外光谱技术的分析仪, 它能有效区分不同气体成分, 减少交叉干扰。同时, 根据不同生产工序的烟气特点, 合理选择测量设备的量程, 确保在不同浓度范围内都能准确测量。

烟气流速方面, 钢铁生产过程中, 不同工序的烟气流速差异较大, 比如烧结机头的烟气流速常处于较低水平, 采用传统的皮托管等测量设备难以实现精准监测, 产生较大误差。同时, 烟气中含有的大量粉尘会附着在流速传感器上, 影响传感器的灵敏度和测量精度, 进而使流速数据出现偏差, 最终导致碳排放总量计算的不确定性增加。为降低这种不确定性, 可以采用更适合低流速测量的设备, 如超声波流量计, 它能在低流速环境下保持较高的测量精度。此外, 定期对传感器进行清洁和维护, 减少粉尘附着对测量的影响, 也是提升精准监测的有效措施。

速度场系数方面, 由于烟道内的气流受到管道形状、障碍物等因素的影响, 流速分布往往不均匀, 如果速度场系数确定不合理, 就会导致烟气流速的计算出现较大偏差。在钢铁企业的大型烟道中, 这种流速分布不均的情况更为明显, 进一步增加了速度场系数确定的难度。因此在碳排放监测布点过程中, 需要按照相关标准规范, 在烟道内进行多点流速测量, 通过合理的计算确定速度场系数。文献[7]中综合对比了国内外烟气排放标准方法对测量位置和测量的要求, 可为监测布点提供参考。同时, 定期对速度场系数进行校验和修正, 根据烟道内气流情况的变化及时调整, 以保证其准确性。

2.3. 国内外发展历程

在线监测技术的发展离不开政策制度的支持, 表 1 列举了国内外在线监测技术发展过程中的关键性政策。美国在线监测法发展较早, 始于 1970 年代, 通过陆续颁布多部法规, 美国政府规范了火电行业运用 CEMS 进行 CO_2 排放监测, 为其应用奠定制度基础。1971 年, 美国环保署发布 40 CFR Part 755《连续排放监测》(Continuous Emission Monitoring), 将 CO_2 纳入连续监测范围, 并制定了基于监测数据的核算方法。至此美国碳监测体系已基本完善, 涵盖设备安装、运行维护到数据处理上报等全流程的制度支撑。

为促进成员国履行《京都议定书》义务, 欧盟 2003 年通过第 2003/87 号指令, 实施温室气体排放全

面管理，确立“核算为主、监测为辅”的报告原则，规定测量法需辅以核算佐证。2007 年，欧盟发布第 2007/589 号决定，增补 CEMS 测定温室气体排放的指南，明确排放源不确定性要求及基于 CEMS 数据的计算方法，并赋予 CEMS 确定的排放量独立使用地位，认可度与核算法等同。

国内 CEMS 监测碳排放起步较晚。2020 年 6 月，生态环境部发布《生态环境监测规划纲要(2020~2035 年)》，明确温室气体测算遵循“核算为主、监测为辅”。2021 年 9 月，印发《碳监测评估试点工作方案》，启动重点行业温室气体直接监测试点。2025 年 5 月，生态环境部等部门联合印发《国家应对气候变化标准体系建设方案》，要求加强温室气体监测标准体系建设，加速制定钢铁等重点行业亟需的监测点位、自动监测及烟气流速标准。该方案将推动国内形成完善的碳监测、报告与核查体系。

Table 1. Key policies in the development of online monitoring technology at home and abroad
表 1. 国内外在线监测技术发展过程中的关键性政策

国家	年份	政策文件	相关内容
美国	1970	《清洁空气法》	要求纳入管控的发电设施须同步实施 CO ₂ 排放监测，利用 CEMS 或等效技术手段获取 CO ₂ 排放数据
	1993	《连续排放监测》	法规赋予了火电厂自主选用连续排放监测法或核算法的权利。针对火电 CO ₂ 排放 CEMS 的应用，该法规从设备配置要求、运行维护规范、数据质量保障措施等维度进行了细致规定
	2009	《强制性温室气体报告》	规定燃烧固态燃料且已安装 CEMS 的设施必须使用连续监测法监测报告 CO ₂ 排放，其他类型的设施可以选择连续监测法或核算法作为 CO ₂ 排放监测方法
欧盟	2003	《第 2003/87 号指令》	给出了“核算为主、监测为辅”的碳排放报告方法
	2004	《第 2004/156 号决定》	规定可通过测量法确定碳排放量，仍需得到一种核算法证实
	2007	《第 2007/589 号决定》	通过 CEMS 确定的排放量无需结合核算法证实，并在附件 12 中补充了用 CEMS 测定温室气体排放的导则，给出了排放源的不确定性要求和基于 CEMS 监测数据的计算方法
	2012	《监测及报告条例》 《认证和验证条例》	安装 CEMS 的企业在向主管当局申请监测计划并通过批准后，可以基于 CEMS 监测数据报告温室气体排放量
中国	2020	《生态环境监测规划纲要 (2020~2035 年)》	温室气体的测算遵循“核算为主、监测为辅”的原则，探索建立重点排放单位温室气体排放源监测管理体系和技术体系，在火电行业率先开展 CO ₂ 排放在线监测试点
	2021	《碳监测评估试点工作方案》 《“十四五”生态环境监测规划》 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》 《2030 年前碳达峰行动方案》	组织火电等五大重点行业企业开展 CO ₂ 等温室气体排放监测试点工作，推进碳排放实测技术发展和信息化水平提升
	2025	《国家应对气候变化标准体系建设方案》	加强温室气体监测标准体系建设，加快制定发电、水泥、钢铁等重点行业温室气体监测亟需的监测点位设置、自动监测、烟气流速监测标准

2.4. 搭建碳排放测算“混合模式”

针对长流程钢企生产模式，CEMS 可与基于排放因子法、物料衡算法的国家核算报告体系[8]形成“混合模式”，通过明确排放源分级标准、建立数据校验机制、搭建协同管理框架，实现两种技术路径的优势互补，既保证关键数据的精准性，又兼顾体系的完整性和实操性。

“混合模式”需建立科学的排放源分级标准,明确“主要排放源”及“无组织排放源”的边界。通常可依据排放贡献占比(如单源排放量占企业总排放量 80%以上的界定为主要源)、排放稳定性(如连续稳定排放且浓度波动较小的固定污染源)、监测可行性(如具备规范烟道、适合安装 CEMS 的固定排放口)等维度划分。例如,钢铁企业的烧结机头、高炉煤气回收系统,火电企业的燃煤锅炉等,这类排放源排放量大、工况相对稳定,且有成熟的 CEMS 安装和运行条件,适合作为主要排放源,强制要求安装 CEMS 进行实时在线监测,通过连续捕获烟气浓度、流速、湿度等参数,生成高频、动态的排放数据,作为核算的核心依据。而对于排放量占比低、排放形式分散的次要源(如中小型加热炉)和无组织排放源(如原料堆场扬尘、车间泄漏),由于其监测成本高、技术难度大,仍采用物料衡算法,通过统计原料消耗、燃料燃烧量等数据,结合行业排放因子进行核算,确保覆盖所有排放环节。

通过“混合模式”可构建双向数据校验机制,以消除两种方法的数据偏差。一方面,用 CEMS 的实时数据校准核算的参数精度。例如,主要排放源的 CEMS 数据可反向验证物料衡算中“单位产品能耗”“燃烧效率”等关键参数的合理性,若 CEMS 监测的某工序 CO_2 排放量与物料衡算结果偏差超过预设阈值(如 $\pm 5\%$),则需要对燃料台账记录、排放因子选取的复核,修正核算模型中的参数误差。另一方面,核算的全流程覆盖性可弥补 CEMS 的监测盲区,通过整体排放总量与各源数据之和的比对,验证 CEMS 对主要源监测的完整性。若 CEMS 监测的主要源排放量与物料衡算得出的企业总排放量差值,显著超出次要及无组织源的核算结果,需排查 CEMS 是否存在漏测、设备故障等问题。

“混合模式”既能发挥 CEMS 对主要排放源的精准监测优势,减少人为核算的误差和造假风险,又可通过核算覆盖难以在线监测的排放环节,有效避免监测盲区导致的数据失真。通过分级管理、数据互校、流程协同,让两种方法在统一的核算体系中发挥作用,最终形成“主要源数据精准可控、次要及无组织源核算有据可依”的完整排放数据,为碳排放监管、碳市场交易等提供更可靠的数据支撑。

3. 钢铁企业碳素流和碳排放分析

碳素在钢铁生产中既是燃料,也是冶炼还原剂,其物理化学状态、输送转运、焓值分配、组织和无组织排放等过程极为复杂。如果采用核算法,则需要对所有输入和输出原料、燃料以及能源包含的实际碳含量和生产这些产品所产生的碳排放进行核算[8],如图 1 所示。2025 年 1 月,生态环境部印发的《企业温室气体排放核算与报告指南钢铁行业(CETS—AG—03.01—V01—2024)》,从企业层级和工序层级角度出发,简单地给出了温室气体排放核算边界示意图,如图 2 所示,但对温室气体排放核算和报告范围、以及各工序的核算边界做出了更明确的规定。在线监测法侧重于实际直接排出的 CO_2 ,对于输入输出的电力生产过程产生的碳不做统计。而对于 CO_2 的在线监测必须细致考察碳素在各工序中的流转运输情况,以及 CO_2 排放具体位置和大致比例。

环保政策落地实施促使国内钢企剥离焦化产线,新建基地多不设炼焦环节,转而外购焦炭。伴随焦化产业集中,焦企聚集于煤矿产区,经物流向钢企供货。故多数钢企无焦化工序,其碳排放监测难以覆盖,需依据外购焦炭碳总量核算。此外,焦化产线碳素流及排放机制复杂,需专项研究。图 3 梳理了主流钢企生产中的碳素流转路径,本节据此进行逐项分析。

3.1. 球团、烧结和石灰窑

烧结工序中,混合料在烧结机台车上点燃,烟气经下部抽风管导入烟道,经除尘脱硫后直排。应在除尘脱硫后的排放口布设 CO_2 监测装置,规避烟尘干扰探头。因烧结物料常处于欠氧燃烧,烟气含高浓度 CO ,需同步监测其含量。实际监测中需考量企业采用的低碳烧结技术,如富氢燃料喷吹、蒸汽喷吹、厚料层控制、富氧鼓风点火等[9][10]。若废气含其他有机物(如二噁英等),应化学分析并核算其贡献的碳浓度。

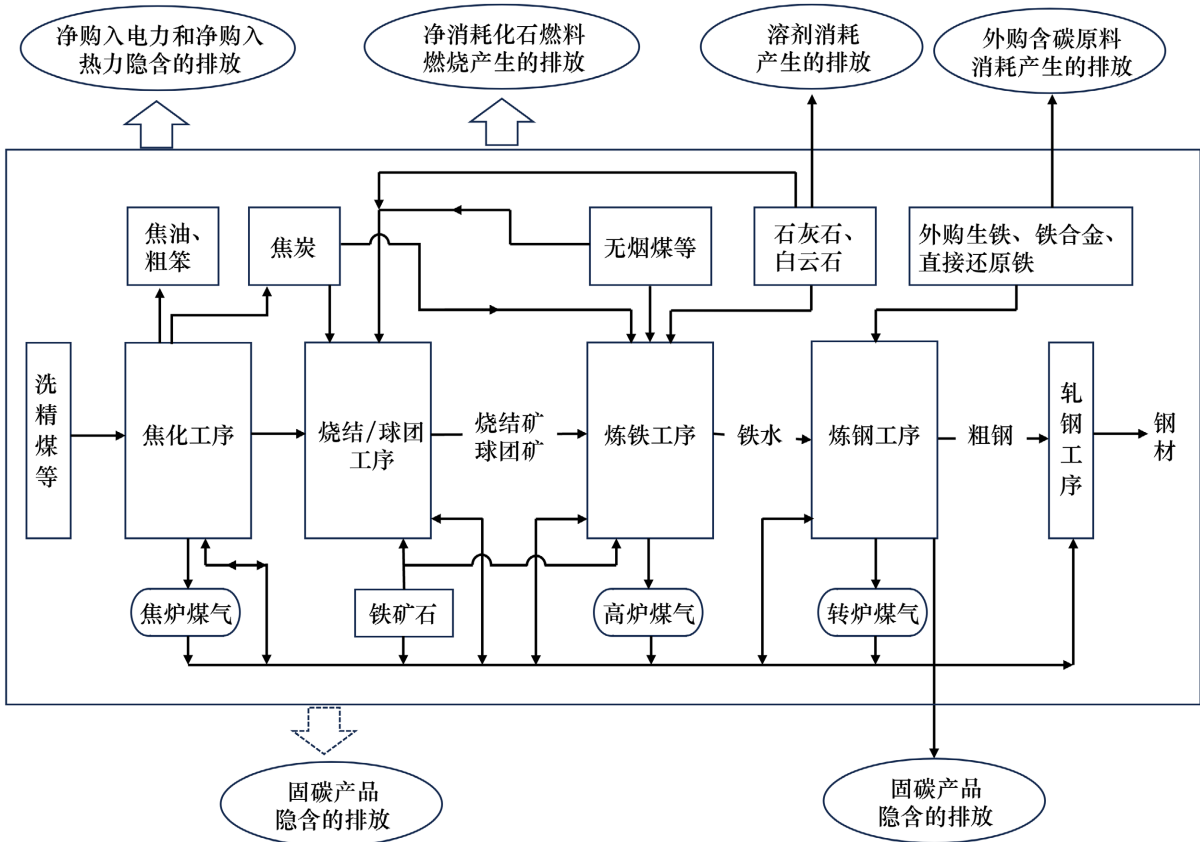


Figure 1. Greenhouse gas emissions and accounting boundaries of steel production enterprises [8]
图 1. 钢铁生产企业温室气体排放及核算边界[8]

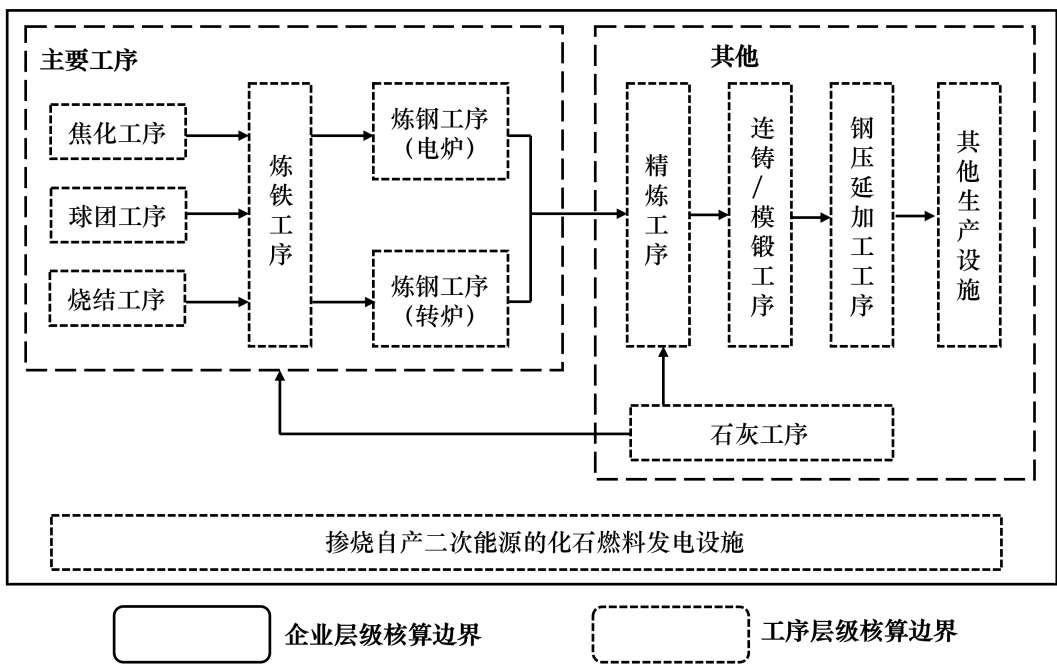


Figure 2. Schematic diagram of accounting boundaries
图 2. 核算边界示意图

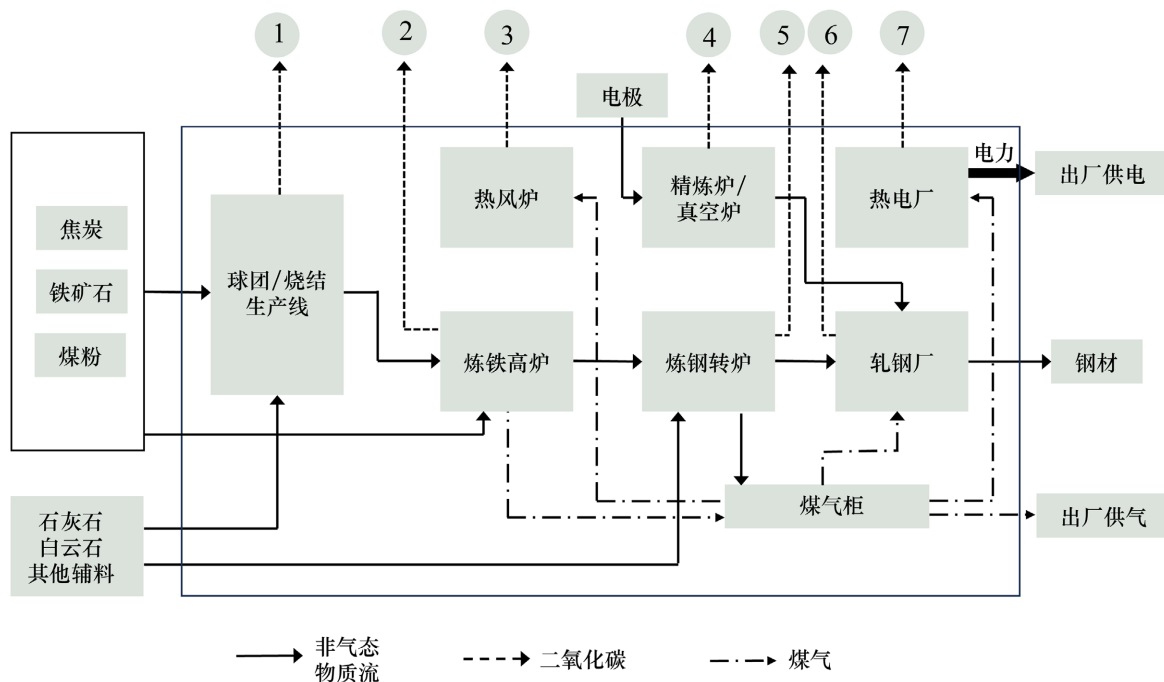


Figure 3. Schematic diagram of carbon flow and gas flow of iron and steel enterprises

图 3. 钢铁企业碳素流和气体流示意图

球团工序 CO_2 排放量通常仅为同产能烧结的一半。当前球团矿生产设备主要有竖炉、链篦机-回转窑、带式焙烧机三种[11]。其中竖炉因单机产能低、能耗高及球团质量不稳，已渐趋淘汰。链篦机-回转窑利用回转窑焙烧生球，部分企业用回转窑煅烧石灰石，烟气经窑尾烟道除尘脱硫净化后排放，可在净化装置后排放口设监测点。带式焙烧机类同烧结机台车，均借料带下方抽风装置引烟气入主烟道，其碳排放监测点位设置可参考烧结工序。

多数钢企配有石灰窑。窑内燃料氧化与石灰分解均产生 CO_2 ，导致烟气中 CO_2 浓度高(可达 20%以上)，可进行 CO_2 捕集。文献报道[12]显示某企业石灰窑废气经脱硫脱硝处理后，经两级 PSA 将 CO_2 由 23%提浓至 92%，再低温液化捕集，后续用于钢厂吹炼。石灰窑监测需考虑是否实施捕集。

3.2. 炼铁高炉和热风炉

高炉是碳素气化的主要区域，大部分焦炭、煤粉及辅料所含碳素在此转化为 CO 与 CO_2 ，少量渗入铁水。煤气是炼铁工序的一种主产品，产 1 t 铁水伴随 2.1~2.5 t 高炉煤气[13]。高炉煤气含碳占 85%~87%，余碳存于粉尘、废气及炉渣。煤气中 CO 与 CO_2 占比均处于 18%~26%区间，故高炉虽为碳素气化主场所，其本体直接排放 CO_2 比例不高，主要排放源自煤气放散所致。

高炉本体煤气放散分为均压放散与休风放散。炉顶料罐连通高炉内外，上料时罐内残留煤气放散属于均压放散。据统计，未回收时均压放散煤气约占高炉煤气总量 1% [14]。国内多数高炉经产能置换与环保改造，已装设均压放散回收系统[15]。罐内粗煤气借高压回收，压降后放散需监测该放散口。若企业采用引射法等强制全回收技术，则无需监测。因每次上料均需均压放散或回收，可在高炉运行时监测若干次放散，结合上料次数统计。

通常高炉年休风检修 4~6 次[16]，监测窗口期短，需协同企业检修计划，提前部署设备，单次常规放散监测后推算全年排放。国内钢企休风放散粗煤气多无法回收，经除尘环保处理后排放，可在排放口监测。高炉技术优化是减少碳排放的一种途径，如 TGR-BF 炉顶煤气循环[17][18]：以氧气代替空气，将高

炉煤气净化后,经蒸馏、吸附或吸收[19]等方法捕集 CO_2 ,提高 CO 浓度后从炉底吹入。此技术既提升煤气热值,又能直接捕集 CO_2 ,适合在国内推广。采用此工艺的企业,在最后核算排放需扣除回收捕集量。

热风炉是高炉的附属设备,炉内煤气燃烧加热换热介质,产生的废气经余热回收(多用于喷煤车间干燥煤粉或对热风炉助燃空气预热)后,经除尘净化后排放,需要监测排放量。先进的热风炉采用多级余热回收及双预热通道[20],需掌握企业换热组件与温度,以便挑选合适的监测设备。热风炉通常设 3~4 座,采用烧 2 送 1 或烧 2 送 2 模式,整体排放具规律性,短期监测明确规律后即可满足整体测算。

3.3. 转炉炼钢

转炉炼钢工序中,渗入铁水的碳在吹氧作用下氧化生成 CO ,与其他气体混合形成转炉煤气,对转炉 CO_2 排放监测时需区分一次烟气与二次烟气。

转炉一次烟气是吹氧时铁水中的碳与氧气反应生成的 CO 和 CO_2 ,形成含尘量较高的高温烟气。经烟罩收集、余热回收与除尘后成转炉煤气(CO 60%~80%,高焓值) [21]。未收集的烟气经点燃或无害化处理后除尘放散。因需要收集高炉煤气并对非收集的部分进行处理后放散,设备较为复杂,一般配置独立管线,需要独立监测。 CO_2 排放与生产节奏、吹氧参数相关,由于炼钢工序的工艺参数比较固定且生产节奏明确,因此 CO_2 排放监测数据可取多次排放的平均值。

转炉二次烟气产生于转炉非吹氧操作阶段,如加废钢、兑铁水及出钢等环节逸出的烟气,特点是温度较低(200°C ~ 300°C)、含尘量较少且 CO 、 CO_2 浓度较低。转炉作为开放系统,物料进出必然伴随二次烟气,转炉烟罩无法完全捕集二次烟气。转炉上方通常配置厂房集尘罩,用于大范围收集逃逸烟气,经厂房烟气总管除尘与环保处理后直接排放。因此,包含二次烟气的厂房集中烟气总管排放需单独监测。考虑到二次烟气排放节奏与炼钢炉批节奏同步,可通过对多炉批监测总结规律后进行长期推算。

需注意的是,部分转炉采用 O_2 - CO_2 混合底吹工艺,所用 CO_2 可能源自前序工艺捕集或企业外购,成为新的碳素输入,监测时需及时调整配置与计算方式。

精炼炉的电极消耗与增碳剂添加是两类外源碳素,因无氧化剂参与,此类碳基本融入铁水,仅少量随废气逸出。目前多数钢铁企业已完成环保改造,均已在炼钢车间设置烟气收集总管,集中收集精炼炉与真空炉烟气,此情况下无需单独监测精炼炉、真空炉的 CO_2 排放。

3.4. 轧钢

轧钢产能较大时,轧钢工序中的加热炉大量消耗煤气,高炉和转炉产生的煤气可能供应不足,部分企业需要外购天然气或焦炉煤气。随着环保政策相继落地实施,大部分钢企已实现连铸坯热送,降低煤气消耗。另有少数企业如莱钢永峰,其新建产线实现钢轧一体化,连铸连铸坯热直送轧机,完全取消加热炉或用感应加热辅助替代,几乎没有 CO_2 排放。

加热炉设计分类复杂,国内多家钢铁设计院所及钢铁生产企业对其均有较为独特的设计。随工业窑炉技术进步,近十年加热炉变革显著,整体趋向大型化,多采用优化燃烧或无焰燃烧、多段加热、长寿低导热炉衬、烟气反吹、多传感透明炉等先进技术[22]-[25]。烟气换热方面,先进炉型配煤气空气双蓄热装置,高温烟气分与煤气和空气换热后除尘排放,存在两个排放口,需要同步监测。部分企业用单蓄热、换热器或余热锅炉,均需注意排口数量温度并配置测量设备。此外,生产板带材和高端型钢需轧后热处理,使用燃气的热处理炉需考量其废气流向。

3.5. 热电厂

大部分钢铁企业已配置煤气柜,具备调峰与存储外购煤气的功能。满足轧钢工序用气需求后,富余

煤气通常输送至企业自有火力发电站,通过煤气发电供应全厂用电需求,减少或完全取消外部电网供电。尤其对采用连铸坯热直送轧钢工艺的企业而言,煤气基本在热电厂完成电能转化,若企业自有热电厂,需按火电机组 CO₂ 排放监测规范实施监测[26]-[28]。无自有热电厂的企业,余量煤气可能输送至外部发电站或市政管网,需结合实际情况分析。

3.6. 无组织排放

上述分析聚焦于钢企的有组织排放,然而因钢铁生产流程长、煤气和烟气管网繁复、生产流程和工艺复杂,尚存部分 CO₂ 无组织排放。典型如炼钢车间使用煤气预热钢水包和连铸中间包,连铸产线用乙炔焰切割钢坯,这部分消耗不可忽视,且在开放车间难测 CO₂ 浓度变化,有可能汇入厂房总烟道。比较准确法为实测钢水包和中间包平均消耗的煤气,以及连铸切割使用的燃料,结合日产量计算,并考虑厂房总烟道抽气效率。各阶段产生的废渣粉尘,如高炉炉渣、转炉精炼炉钢渣、烧结炼铁炼钢轧钢收集的粉尘,都含少量残留碳素,几乎不可回收。虽碳浓度低,但总量可观,需测算各类固废含碳量。其余管路逸散及开放逃逸难测,只能根据经验估算。

4. 总结

我国碳排放量测算起步相对较晚,近年来逐步明确在线碳排放监测应用。目前我国碳市场建设处于起步阶段,钢铁行业刚纳入全国碳市场,应借鉴欧盟和美国在碳排放在线监测上的发展经验,进一步促进钢铁行业低碳转型,推动全国碳市场的建设。我国碳排放在线监测相关标准制度尚不完善,只有个别行业、地区针对二氧化碳排放在线监测发布了技术规范标准,国家层面的相关标准仍处于空缺阶段。

钢铁企业的碳素流动呈现高度复杂性。碳素不仅作为能源载体为生产过程提供热能,更是炼铁等关键工序中不可或缺的还原剂。能量转化效率与输运路径直接决定了碳素流的实际分布,成为构建碳核算模型的核心变量。企业的生产方式差异、设备工装特性、生产计划安排及运行节奏波动会显著影响碳排放的三重维度:排放方式呈现有组织与无组织共存特征,总量受煤气放散率波动制约,空间点位覆盖自有电厂至轧钢加热炉等多源分布。这些因素同时动态改变监测边界的划定逻辑与方法选择策略。因此,制订监测计划前需全面掌握目标企业的设备配置细节,包括煤气柜容量等级和余热回收系统能效,并精准分析各工序产能匹配度。

参考文献

- [1] 朱荣,屠明伟,冯超. 基于钢化联产的高炉-转炉长流程极限碳排分析[J]. 中国冶金, 2025, 35(7): 1-13.
- [2] Bryant, R., Bundy, M. and Zong, R. (2015) Evaluating Measurements of Carbon Dioxide Emissions Using a Precision Source—A Natural Gas Burner. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **65**, 863-870.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1031294>
- [3] 李海洋,张亮,刘幸,等. 固定排放源烟气流量在线监测技术[J]. 上海计量测试, 2018, 45(5): 6-11.
- [4] 李博,王东滨,刘通浩,等. 固定污染源烟气 CO₂ 和流量在线监测分析[J]. 大气与环境光学学报, 2025: 1-21.
<https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250211.1405.002>, 2025-02-11.
- [5] 韩晶. 钢铁行业碳排放量实测核算法与在线监测法差异对比分析[J]. 中国高新技术, 2023(19): 121-123.
- [6] 向一铭. 烟气排放连续自动监测系统(CEMS)监测技术现状综述[J]. 科技资讯, 2018, 16(21): 116-117.
- [7] 李小龙,李军状,郑成强,等. “双碳”目标下烟气流速/流量手工监测方法发展现状[J]. 电力科技与环保, 2022, 39(4): 314-323.
- [8] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会. CB/T 32151.5-2015 温室气体排放核算与报告要求第 5 部分: 钢铁生产企业[S]. 北京: 生态环境部, 2015.
- [9] 余雪峰,钟庭梁,王延江,等. 烧结过程一氧化碳减排机理及技术分析[J]. 河北冶金, 2024(10): 71-79.

-
- [10] 胡玖林, 周浩宇, 刘前, 等. 铁矿烧结工艺过程 CO 生成机理及减排关键技术[J]. 中国冶金, 2025, 35(2): 94-101.
- [11] 王新东, 张文强, 高冰, 等. 大型带式球团焙烧机的开发与应用[J]. 钢铁, 2025, 60(3): 26-35.
- [12] 董文亮, 袁天祥, 李海波, 等. 炼钢厂废气中二氧化碳的资源化利用技术及工业实践[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 236-248.
- [13] 姜维, 张永杰, 李海峰. 中国钢铁极致能效降碳实践与基础研究[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 2-12.
- [14] 张波, 薛庆斌, 牛得草, 等. 高炉煤气利用现状及节能减排新技术[J]. 炼铁, 2018, 37(2): 51-55.
- [15] 翟玉龙, 张昌, 王学利. 高炉炉顶放散碳回收工艺及应用[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集——9.能源、环保与资源利用. 北京: 冶金工业出版社, 2022: 110-114.
- [16] 周传典, 刘万山, 王筱留, 等. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [17] 严珺洁. 超低二氧化碳排放炼钢项目的进展与未来[J]. 中国冶金, 2017, 27(2): 6-11.
- [18] 张利娜, 李辉, 程琳, 等. 国外钢铁行业低碳技术发展概况[J]. 冶金经济与管理, 2018(5): 30-33.
- [19] 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(3): 53-58.
- [20] 苑鹏, 刘艺媛, 王雪娇, 等. 炼铁工艺绿色低碳及智能化技术研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 927-936.
- [21] 上官方钦, 干磊, 周继程, 等. 钢铁工业副产煤气资源化利用分析及案例[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 114-120.
- [22] 孙义燃, 桑绍柏, 陈富文, 等. 轧钢加热炉内传热过程的数值模拟及节能分析[J]. 工业炉, 2024, 46(3): 1-6.
- [23] 周维汉, 耿云峰, 迟建宙, 等. 轧钢加热炉富/全氧燃烧应用实践及思考[J]. 工业炉, 2024, 46(6): 27-31.
- [24] 张金友, 刘迪, 李朝泽, 等. 轧钢加热炉节能控制措施的探讨[J]. 工业炉, 2024, 46(5): 35-40.
- [25] 江华, 朱小辉. 轧钢加热炉超低氮排放无焰燃烧技术应用研究[J]. 工业炉, 2023, 45(6): 1-4.
- [26] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 1-13.
- [27] 张春雷, 赵良, 刘道, 等. 火电 CO₂ 排放连续监测的国际经验分析及启示[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 134-151.
- [28] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO₂ 排放监测模型及准确性验证[J]. 煤化工, 2022, 50(2): 18-21.