

钢铁企业碳排放连续监测策略和应用

刘 涛^{1*}, 赵四方¹, 王立青², 吕尚霖^{3#}

¹中冶建筑研究总院有限公司监测实验室, 北京

²芜湖新兴铸管有限责任公司, 安徽 芜湖

³国家市场监督管理总局重点实验室(建筑用钢及制品质量检测与监测), 北京

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月20日; 发布日期: 2026年9月29日

摘 要

碳排放监测是实现碳排放精准计量的主要技术手段, 是碳核查和碳交易体系的重要支撑。全球钢铁行业碳排放占总碳排放的7%, 但钢铁行业碳素流比火电行业复杂, 碳排放监测工作开展较少。本文分析了一系列适用于钢铁企业碳排放监测的气体流量和成分测量手段。通过对长流程钢铁企业进行碳素流梳理, 明确了球团烧结、炼铁、炼钢、轧钢等各工序的碳监测策略。针对某一具体的钢铁企业进行碳排放监测, 必须充分了解企业的设备工装、技术路线、产能匹配、环保能力等, 并以此制定监测策略。在监测资源有限的情况下, 应重点对球团、烧结、热风炉、轧钢加热炉和热电厂进行监测。对某企业轧钢加热炉进行碳排放监测表明该企业4条轧钢生产线正常运转日均排放1107吨CO₂, 与理论计算值差距6.9%, 可归因于生产工艺调整造成排放波动和无组织排放。

关键词

钢铁生产, 碳核查体系, 碳排放监测, 二氧化碳排放, 连续监测

Strategy and Application of Continuous Carbon Emission Monitoring in Steel Manufacture Factory

Tao Liu^{1*}, Sifang Zhao¹, Liqing Wang², Shanglin Lyu^{3#}

¹Key Laboratory of Quality Inspection and Monitoring, Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd. MCC Group, Beijing

²Wuhu Xinxing Ductile Iron Pipe Co., Ltd., Wuhu Anhui

³Key Laboratory of Quality Inspection and Monitoring of Construction Steel and Products, State Administration for Market Regulation, Beijing

Received: August 11, 2026; accepted: September 20, 2026; published: September 29, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘涛, 赵四方, 王立青, 吕尚霖. 钢铁企业碳排放连续监测策略和应用[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1537-1549. DOI: 10.12677/aep.2026.169155

Abstract

Carbon emission monitoring is the primary technical method to acquire accurate carbon emission measurement, and it is strongly supportive to the carbon emission trading system. The carbon emission in steel manufacturing industry counts for 7% of the gross carbon emission globally. Carbon emission monitoring is seldom performed due to the complexity of the carbon flow within a steel factory in comparison with a power plant. In this paper, various techniques and devices concerning gas flow and chemical composition measurement that are practical in a steel factory are analyzed. A proper carbon emission monitoring strategy fitting pelletizing, sintering, blast furnace, converter, rolling and power station in a steel factory is proposed in accordance with interpretation of the carbon flow in an integral process steel factory. A fully understanding of the manufacturing equipment, process, producing compatibility and pollution containment capacity of the specific steel factory is necessary before performing the monitoring. The monitoring concerning pelletizing, sintering, intermittent stove, rolling heating furnace and power station shall be prior in case that the monitoring resources are finite. A carbon emission monitoring was performed in a rolling workshop owning 4 rolling lines of a certain enterprise. It indicated that the workshop emits 1107 t of carbon dioxide daily, which is 6.9% lower than the theoretical value due to the fluctuation of manufacturing and unorganized emission.

Keywords

Steel Manufacture, Carbon Emission Accounting System, Carbon Emission Monitoring, CO₂ Emission, Continuous Monitoring

Copyright © 2026 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

钢铁产业是典型的高能耗、高污染、高排放行业，全球钢铁每年直接排放 26 亿吨 CO₂，占全球 CO₂ 排放总量的 7% [1]。我国钢材产量已经连续 26 年世界第一，2023 年粗钢产量占全球总产量的 53.9% [2]。我国钢铁产业主要采用铁矿石和煤焦还原的长流程生产工艺，年碳排放量约为 18 亿吨，占全国总排放量的 15% [3]。因此我国钢铁冶金行业的低碳转型压力是很大的，要达到“双碳”必须走低碳排放、低石化依赖、高能源效率的路线。

为了利用市场机制减少 CO₂ 排放和推动绿色低碳转型，世界各国相继建设碳排放权交易市场。2024 年 5 月 1 日，《碳排放权交易管理暂行条例》[4]正式施行。有效碳交易需要构建可监测、可报告、可核查的碳核查体系，简称 MRV 体系。MRV 体系作为支撑碳交易市场的根基，能够保证企业所排放温室气体数据的准确性、真实性和可比性，直接影响其碳配额的分配和交易。欧盟以立法和指令将 MRV 纳入碳交易体系，规定核查方法分为基于计算和基于直接监测[5]-[7]。GB/T 32150-2025《工业企业温室气体排放核算和报告通则》[8]明确了碳核查可采用计算法和实测法。其中计算法包括排放因子法和物料平衡法。排放因子法是基于原燃料端的排放量监测方法，将活动数据(包括燃料消耗量和燃料发热量等)和对应的排放因子(包括单位热值含碳量、元素碳含量、碳氧化率等)作为函数变量，计算得到企业的 CO₂ 排放量。物料平衡法是根据质量守恒定律，用输入物料中的含碳量减去输出物料中的含碳量进行平衡计算得到 CO₂ 排放量。

基于直接实测的方法主要为连续监测法,即烟气排放连续监测系统(CO₂ Continuous Emission Monitoring System),简称 CEMS。同时欧盟规定计算和监测结论具有同等法律地位。美国环境保护署强制企业执行温室气体报告制度,并强制要求有条件的企业使用 CEMS 系统[9][10]。2020 年 6 月,生态环境部发布《生态环境监测规划纲要(2020-2035 年)》[11],要求统筹实施温室气体监测。2021 年 9 月又印发《碳监测评估试点工作方案》[12],该方案要求在火电、钢铁、石油天然气开采等领域开展排放监测试点。2024 年中国钢铁工业协会发布 YB/T 6215-2024《钢铁企业二氧化碳排放监测技术规范》[13]统一了各方面技术路线,对钢铁行业二氧化碳监测进行标准规范。2025 年 3 月 20 日生态环境部发布关于印发《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》的通知[14],标志着钢铁行业正式纳入碳排放权交易,钢铁企业的碳排放核算和监测成为行业碳排放权交易的基本依据。

从当前钢铁行业的现状来看,钢铁企业的碳排放主要是通过计算法进行核算。通过核算法进行碳排放核查的企业,因企业类型、核算方案和标准等因素可能导致核算结果存在偏差[15],单纯依靠计算法难以进行核验和横向比对,不足以支撑碳交易。由于钢铁生产特殊的碳素流、能量流以及生产设备和 CO₂ 的排放情况较为复杂,开展 CO₂ 连续监测的企业数量和工程实践较少,所应用的监测技术方案还没有形成行业共识。行业标准 YB/T 6215-2024《钢铁企业二氧化碳排放监测技术规范》中规定了钢铁行业碳排放实测的部分技术规范,并明确了监测位置,但缺乏考察钢铁企业的设备选型和产能匹配等影响碳排放的核心要素,难以对钢铁企业碳排放实测进行指导。

鉴于目前钢铁企业 CO₂ 连续监测具体工程方案没有达成行业共识,为此本文尝试提出一套监测策略,研究路线是基于对 30 余家长流程钢材生产企业进行的调研,从碳素在钢铁生产的流动和传递出发,系统地讨论钢铁企业 CO₂ 监测的实操性问题,结合企业所采用的设备工装、生产工艺流程、环保技术等影响碳排放的因素,提出适合长流程生产企业的 CO₂ 监测位置和要点。需要再次明确的是,本文所关注的是钢铁企业内部实际排放的可以用监测设备进行实测的 CO₂,不涉及输入物料和能源在前序生产过程中造成的碳排放,不涉及出厂碳素和产品在后续生产或服役过程中产生的碳排放。

2. CO₂ 排放监测技术

国内外有关 CO₂ 监测的研究和工程应用大多是基于火电厂和锅炉运转的碳排放,主要原因是火电行业是碳排放最高的行业之一。火电机组工作过程是化石能源氧化得到 CO₂ 和热的过程,工作过程的碳素化学反应和碳素流输运过程是单向的,是较为理想的研究对象,适合建立碳排放模型并进行推广应用。借鉴火电行业碳监测的相关技术手段,通过对监测方法的合理调整能够适配钢铁行业的碳监测。近年来在线监测法在国内外都有较大发展,多位学者和工程师致力于改进监测方法,提高监测精度,适配特定行业或生产线的监测技术。Ackerman 等[16]对美国电厂碳排放量进行计算和监测,结果差异仅为 2.3%;Evans 等[17]研究 4 家电厂燃煤锅炉的碳排放量数据,表明 2 种方法的排放量结果差异 15%~26%,核算法结果低于监测法。李峥辉等[18]对比了在线监测碳排放与计算碳排放的结果,表明在线监测碳排放低于核算碳排放,差距范围在 5%~30%,同时发现碳排放与锅炉产出能量变化呈正相关关系,与过滤效率之间呈负相关关系。一般认为在线监测法出现误差的主要原因是流量测量的不确定性较大,以及难以监测无组织排放。

碳排放连续监测的基本技术路线是对排放气体中的 CO₂ 浓度、烟气流速、温度、湿度等参数进行在线监测,实时计算碳排放量。CEMS 系统主要由气体采样单元、监测和理化分析模块、数据处理单元以及控制系统组成,可以根据不同的应用场景进行配置。在各项参数测量中,最关键的是 CO₂ 浓度和气体流量测量技术。

2.1. 气体流量测量

工程应用中测量气体流量的主要方法有压差法、热导温差法、超声法和光学法[19]。压差法是最常见的手工测量方法,根据伯努利原理,测量流体经过节流件所产生的前后压差,计算得到流体的流速。测量工具是皮托管或 S 形皮托管,以及在此基础上衍生的三位皮托管和矩阵式流量计。美标、欧标、ISO 国际标准和我国国标行标均有皮托管测量流量的详细规范,其中我国标准是 GB/T 16157-1996 和 HJ 75-2017 等。皮托管流量计精度较高,但是在高粉尘烟气中容易堵塞,并且在气体温度较高的工况下精度和寿命将受到较大影响,不适合连续在线监测。但传统压差法测量比较灵活,设备便携,适合随机测量。热导式流量计以热传导原理为基础,根据流动中的流体和热源之间进行热量交换的关系,测量流量计温度变化计算流量,没有堵塞的问题,安装维护也较为便捷。缺点是测量基于热导引起的温度变化,计算结果波动性较大,测量精度较低。超声法是基于声波在运动介质中传播的多普勒效应[20],通过测量气流中声速和频率的变化计算气流速度。超声波流量计造价相对较高,但测量结果精确,也不受烟气工况影响,是钢铁企业较为理想的测量方法。李海洋等[21]利用超声波流量计测量某燃煤电厂的烟气流量,证明超声波流量计测量的重复性明显高于皮托管流量计。随着近年来超声测量技术成熟,设备模组化,整体造价成本大幅降低,成为新建生产线 CEMS 的主流方法。

除了直接测量法,近年来数值模拟对气体场进行建模和计算在流量测量中的应用得到较大发展[22][23],其结论可用于气体流量的预测和校准,也可以对流量测量的选点、设备配置、参数设定等进行优化以提高测量精度。郭振等[24]通过搭建实验平台,建立了对碳排放量测量结果不确定度进行评定的数学模型。蒙毅等[25]依据剪应力输运模型进行数值模拟,结合实际工况验证模型准确性,并提出非均匀测点布置方案,测量误差小于 4%。数值模拟计算的方法适合应对某些特殊情况和场景,比如烟道形状不规则,生产工艺节奏导致气流频繁无规律变化,不具备常规的气流测量条件等。

2.2. CO₂ 和 CO 浓度测定

传统 CO₂ 浓度测量方法是化学吸收法,使用不同的化学溶剂吸收相应成分的气体,可以兼顾 CO₂ 和 CO。存在问题是化学吸收必须精确测量测量前后的气体体积,无法连续测量,测量速度也较慢。相比之下,基于光学原理的现代监测技术,能实时在线监测,显著提高了监测效率和自动化程度。常用 CO₂ 浓度测量的光学法包括非分散红外吸收(Non-Dispersive Infrared, NDIR)光谱、傅里叶变换红外吸收光谱(Fourier Transform Infrared, FTIR)、可调谐激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)、差分吸收激光雷达法(Differential Absorption Lidar, DIAL)等[19][26]。

其中,NDIR 基于朗伯比尔定律,即根据烟气中的特定气体分子对特定波长红外光的选择吸收性来测量其浓度,具有精度高和响应快的优点。其缺点是对温度变化敏感,成分较为复杂的气体吸收的特定波长将变得复杂,干扰测量精度。FTIR 是利用红外线干涉仪的光路收到特定气体分子影响,改变了干涉频率和强度,通过傅里叶变换将光学参数与气体分子浓度建立函数关系进行测量。优点是信号多路传输,频谱宽量程大,分辨率高。缺点是气体需要做预处理,否则影响结果精确。TDLAS 和 DIAL 是基于特定气体分子与激光的交互作用,通过测量激光束在传播过程中特定波长光的吸收情况来解析其浓度。优点是灵敏度高,测量精确,快速分析,气体不需要预处理。存在问题是需要对气体状态参数进行补偿,必须时刻协同测量气体温度压力等。上述测量技术各有优缺点,对于特定行业和特定生产线,需要有针对性地选择并进行合理的配置。钢铁企业不同工序产生的排放气体中,CO₂ 浓度差距较大,可能介于 2%~70% 区间,部分工序的 CO₂ 浓度和气体状态参数随着该生产流程的不同阶段发生周期性变化,采用上述测量技术应根据 CO₂ 浓度进行相应适配和调整。

钢铁企业排放废气中有低浓度的 CO，由于排气总量大，CO 所携带的碳不可忽略，其监测和检测也是重要的内容。常见的 CO 监测的应用场景是矿井和锅炉等容易产生 CO 的工况环境，CO 作为有害气体是不允许出现在工作环境中，因此 CO 监测的主要作用是报警，对监测设备的要求是高灵敏，能够检测出微量的 CO。而钢铁企业不同工序排放废气中的 CO 浓度差异巨大，要求设备能够耐受高温且兼具较大的测量区间。测量 CO 的主要方法与 CO₂ 相近，都是基于电磁波通过特定气体后特定波长被吸收，CO₂ 的吸收波长为 0.800 μm，而 CO 的吸收波长为 1.567 μm [27]。综合以上，适合钢铁行业应用的具体技术方案是傅里叶变换红外吸收光谱(FTIR)、量子级联 QCL 激光器或者可调谐激光吸收光谱(TDLAS) [28]等。

3. 钢铁企业碳素流和碳排放分析

钢铁行业的碳素既要作为燃料，也作为冶炼还原剂。这导致碳素在钢铁企业中的物理化学状态、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，一般只需要确定进入企业碳素总量、最终产品固碳以及外购能源碳排放等直接间接碳，在 GB/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》[29]中明确规定了核算边界和各类能量和物质输入输出碳的计算方法。而对于 CO₂ 的直接监测必须细致考察碳素在各工序中的流转运输情况，以及 CO₂ 排放具体位置和大致比例。经过对国内数十家大中型长流程钢企考察，将目前主流钢企生产配置的碳素运转进行整理如图 1 所示，根据图 1 所示逐项分析。

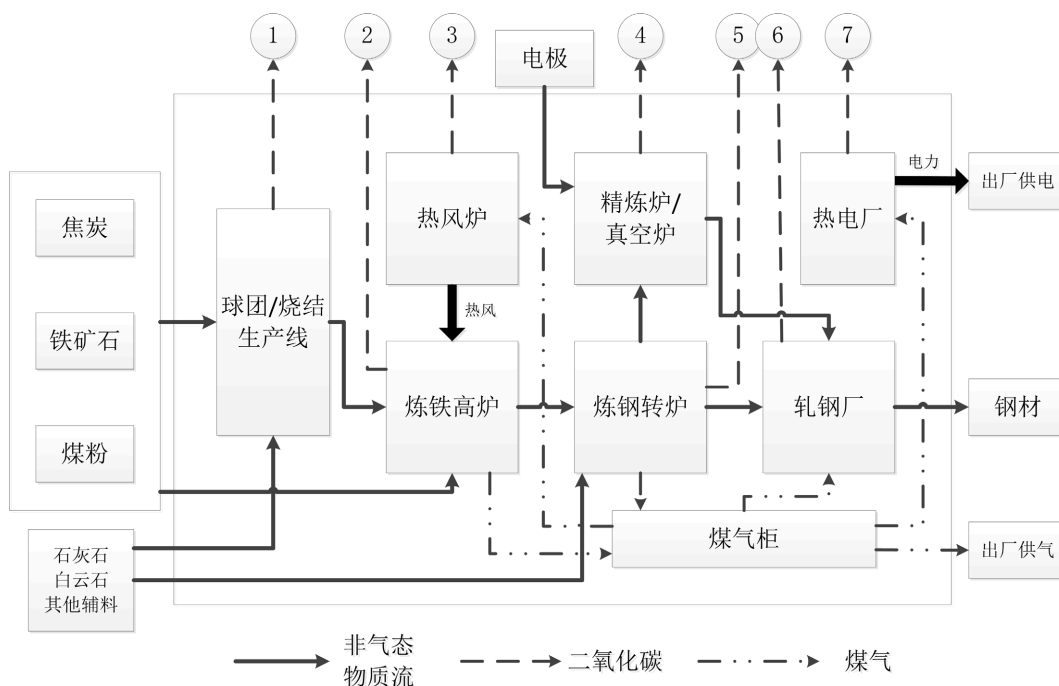


Figure 1. Diagram of carbon flow and gas flow in a steel factory

图 1. 钢铁企业碳素流和气体流示意图

首先对监测起始边界进行明确，GB/T 32151.5-2015 等国标、行标、地方或团体标准都将焦化生产线纳入碳核算的范围，而在本文中针对钢铁企业的 CO₂ 监测将炼焦工序排除在外，从原料预处理、球团烧结等工序开始监测。国内由于各地环保政策原因，大量钢铁企业将原有焦化生产线剥离，新建钢铁生产线或基地一般没有配套建设炼焦生产线，直接外购焦炭。随着炼焦产业集中度不断提高，炼焦企业一般集中在煤矿产区，通过物流运输供应各地钢铁企业。因此大多数钢铁生产企业不具备焦化生产线，炼焦

工序碳排放监测不适用大多数钢铁企业, 只能通过碳总量输入进行核算。此外, 焦化生产线的碳素流和碳排放较为复杂, 需另做专题研究。

其次, 从统计的方法来看, 计算法和监测法存在明确差异。核算法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凝结的碳排放进行核算。而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。这将造成两种方法对单一具体的生产工序所产生碳排放的理解存在差异。肖青[30]在对福建某钢铁企业进行碳素流分析后认为烧结与球团碳排放与高炉碳排放接近, 约为 240 至 260 kg 每吨粗钢, 转炉回收煤气则实际碳排放为-102.2 kg 每吨粗钢。而采用连续监测法, 高炉本体实际排放 CO_2 远低于其他工序, 转炉实际排放 CO_2 却是不可忽略的。

3.1. 球团、烧结和石灰窑

固体物料中碳素的输入最主要的来源为焦炭、煤粉、铁矿石、石灰石等辅料, 其中焦炭、煤粉、铁矿石的实际流向比较近似, 预处理过程上存在差异, 都进入球团烧结或直接进入高炉。其中烧结产生的废气温度较低, 为 $120^\circ\text{C}\sim 180^\circ\text{C}$, 成分复杂, 硫化物、氮化物和粉尘浓度较高[31][32]。采用烧结工艺, 烧结厂中混合料在烧结机台车点燃, 通过下方的抽风管道将烧结烟气抽入烟气管道中, 烟气经除尘脱硫处理后直接排放。应在除尘脱硫后排放口设置 CO_2 监测装置, 避免烟尘对探头的影响。由于烧结过程物料一般处于不完全燃烧状态, 烟气中的 CO 含量较高, 需要同时监测 CO 浓度。陈宇等[33]报道了宝钢股份宝山基地探索使用循环烟气烧结工艺, 同时降低烟气中的 CO_2 和 CO 浓度。在实际监测中应考察企业采用的环保低碳烧结技术, 诸如富氢燃料喷吹, 蒸汽喷吹, 厚料层控制, 富氧鼓风点火等[34][35]。如果废气中存在其他有机化合物如二噁英等, 应做化学分析, 计算有机化合物所贡献的碳浓度。

球团工艺的 CO_2 排放量一般只有同产能烧结的一半, 目前钢铁企业生产球团矿主要采用的设备可分为竖炉、带式焙烧机、链篦机-回转窑三种[36], 其中竖炉因单机生产能力低、能耗高及球团质量不稳定, 目前已经趋近淘汰。链篦机-回转窑工艺采用回转窑进行生球焙烧, 部分企业采用回转窑对石灰石进行煅烧用于烧结矿制备, 在回转窑尾部设有烟道, 经除尘脱硫净化后排放, 可在净化装置后的排放口设置监测点位。带式焙烧机与烧结机台车类似, 都是通过料带下方的抽风装置将烟气抽入主烟道中, 其碳排放监测位点可与烧结布置方式类似。

大部分钢铁企业配备石灰窑, 由于石灰窑中燃料氧化和石灰分解都产生 CO_2 , 烟气中 CO_2 浓度较高, 可达 20%以上, 因此石灰窑废气具备较好的 CO_2 捕集条件。相关文献[37]报道了某企业石灰窑废气经过脱硫脱硝后, 经过两次 PSA 变压吸附, 将 CO_2 浓度从 23%提升至 92%, 再经过低温液化进行捕集, 后续应用于炼钢厂的吹炼。对石灰窑进行监测应考虑是否进行捕集回收。

3.2. 炼铁高炉和热风炉

炼铁高炉是碳素气化的主要区域, 大部分的焦炭、煤粉和辅料所含的碳素都要在此转化成 CO 和 CO_2 , 少量通过渗碳作用融入铁水。常规认知中铁水是高炉的主要产品, 实际上产出 1 t 铁水伴随产出 2.1~2.5 t 高炉煤气[38], 高炉煤气作为主要的能源和碳素载体也是高炉的主产品。从能量的角度分析, 碳素的氧化过程提供了高炉 95%的能量, 支撑化学热力学所需的高温条件。根据能量极限理论计算, 吨钢最低碳消耗约为 385 kg 标煤, 其中大部分以铁水、炉渣、冷却水和散热、烟气显热等方式耗散, 主要的能量回收是高炉煤气化学能和余压余热发电, 理论极限回收量约 35%。从碳素的角度分析, 约有 10%~12%的碳素融入铁素, 经由铁水进入炼钢环节, 这部分碳素在转炉中氧化形成转炉煤气; 高炉煤气中的碳素占比为 85%~87%; 其余碳素在粉尘、废气和高炉渣中。高炉煤气中 CO 和 CO_2 占比都在 18%~26%区间, 根据宝钢 4 号高炉的数据都在 23%附近[39], 新建高炉一般配备煤气监测系统, 煤气在炉顶经过余压发电、余热

回收、除尘净化后进行监测,实时计算 CO 和 CO₂ 的流量,随后通过煤气管网输送至煤气柜或其他消耗煤气的场所。因此,高炉虽然作为碳素气化的主要场所,高炉本体直接向大气中排放 CO₂ 的量比例并不大,主要排放是由煤气放散造成。

高炉本体煤气放散口分为常规的均压放散和特殊时期的休风放散。炉顶料罐是沟通高炉内外环境的设备,上料时罐内残留煤气的放散即为均压放散。根据中钢协会会员单位统计,均压放散煤气如果不做回收,放散煤气为高炉煤气总量的 1%左右[40]。国内大部分高炉经过产能置换和环保改造,多数已经装备均压放散回收系统[32]。罐内粗煤气借助高压自然回收,压强下降后放散,需要对放散口进行监测。如果企业采用引射法等技术进行强制全回收,则无需进行监测。赵广江[41]对某企业均压放散全回收进行测算,2000 m³的高炉采用均压放散全回收日均回收量接近 32,000 Nm³/d。由于每次上料都需要进行均压放散或回收,可在高炉正常运转时监测一定上料次数的均压放散,再根据上料次数进行统计。

在高炉休风检修期间,炉顶需要进行休风放散,由于压强较低,休风放散回收一直是工程难题,相关技术还在探索。一般来说,高炉每年会有 4~6 次休风检修[42],休风放散的监测的窗口较短,需要与企业检修计划协同,提前布置监测设备,对一次常规休风放散监测后计算全年的排放量。国内钢企针对休风放散粗煤气多数是无法回收的,除尘和环保处理后排放,可在排放口进行监测。李永军等[43]对高炉休风放散相关资料进行研究,提出煤气加压风机回收法和引射器回收两种方法,但目前大部分休风放散回收系统都还处于研究探索阶段。少数企业采用全回收工艺的,无需进行监测。必须强调的是,无论均压放散还是休风放散,都是一项危险的煤气作业,排放废气中 CO 浓度较高,监测过程推荐无人值守或远程操作。

近年来低碳炼铁工程技术成为研究重点,一般采取两种方案。一是采用新工艺新设备,以日本钢铁联盟的 COURSE50 项目、瑞典的 HYBRIT 技术、宝武集团广东湛江氢基竖炉项目为典型代表的氢能冶金,以及美国麻省理工学院开展的熔融氧化物高温电解(MOE)研究等[44]。这些新技术目前多数还处于小范围的探索阶段,没有在我国钢铁行业中大规模推广。另一种方案是在现有高炉的基础上进行整体技术优化以减少碳排放,典型技术是 TGR-BF 高炉炉顶煤气循环[45][46],用氧气替代空气,将高炉煤气经过净化后采取蒸馏、吸附或吸收[47]等方法对 CO₂ 进行捕集,提高 CO 浓度后从高炉底吹入。该技术既能提高煤气热焓值,降低喷煤,又能够直接捕集 CO₂,减少整体碳排放,在当前国内钢铁行业现状下是比较适合推广和普及的低碳技术。对于采用炉顶煤气循环工艺的企业,排放监测在最终结论计算时需要考虑扣除回收捕集的 CO₂。

热风炉作为高炉的附属设备,需要在炉内点燃煤气加热换热介质,这部分燃烧过程产生的废气进行余热回收,一般送至喷煤车间对煤粉进行干燥预热或对热风炉助燃空气进行预热,再经过除尘净化处理直排大气,需要进行监测。不同的热风炉所采用的换热组件的换热效率不同,废气的温度区间可能介于 150℃~400℃[48]。较为先进的热风炉采用多级余热回收和双预热通道[44],需要充分了解企业的换热组件情况和温度,对监测设备做相应的温度设置。在本质上这部分能量也是进入高炉的碳素氧化产生,只是氧化的位置不同,最终这部分热量大部分也回归高炉。热风炉一般配备 3 到 4 座炉体,采取烧 2 送 1 或烧 2 送 2 的模式,整体排放节奏比较规律,短期监测明确规律后可满足整体计算评价要求。

3.3. 转炉炼钢

转炉炼钢工序中,铁水中的碳在吹氧下转变为 CO,和其他气体混合生成转炉煤气,运行良好的转炉氧化放热能够完全补偿转炉能源消耗,吨钢可能回收 100 m³ (约 50 kg) [38]。在对转炉 CO₂ 排放进行监测时,应区别对待转炉一次烟气和二次烟气。

转炉一次烟气是吹氧时铁水中的碳与氧气反应生成 CO 和 CO₂,形成烟尘含量较高的高温烟气

(1200℃~1400℃)。一次烟气并通过转炉烟罩进行收集,经过余热回收和除尘后作为转炉煤气。转炉煤气中 CO 含量为 60%~80%,是高焓值的可燃气体[49]。在炼钢吹氧的不同阶段,转炉煤气产生的效率不同,吹氧初期 Si、Mn、S 等元素与氧的化学亲和势更高,产生 CO 较少;吹氧中期大量产生 CO,是收集转炉煤气的主要阶段;吹氧后期碳耗尽,氧化铁增多。收集转炉煤气取决于碳氧分配比,高碳氧分配比可使 CO 浓度提升,但显热降低,需要找到合适的平衡点。张娟等[50]对某钢厂新建 250 t 转炉进行煤气回收改造,该转炉吹氧平均时间为 830 s,煤气回收时间为 616 s,经改造后可延长至 707 s,其余时间为煤气放散周期。在转炉前烧/后烧期存在 CO 和氧气共存的阶段,遇点火源有爆炸的风险,因此为了防止煤气的爆炸风险,转炉煤气的回收条件一般设定为 CO 浓度 $\geq 35\%$ 且氧气浓度 $\leq 2\%$ [51]。未收集的转炉烟气经过点燃或无害化处理除尘,经过放散口直接排放。由于一次烟气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,需要独立进行监测。这部分排放与企业的生产节奏和吹氧技术参数相关性较高,一般来说企业炼钢的工艺参数是比较稳定的,收集和排放的节奏比较明确,可在对若干炉批的监测后得出平均值。与高炉类似,新建转炉可能在煤气收集后实时监测煤气流量和成分,可作为监测整体计算和校核的重要数据。

转炉二次烟气来自转炉非吹氧的操作过程,如添加废钢和铁水、出钢等环节逸散的烟气,特点是温度较低(200℃~300℃),含尘量较少,CO 和 CO₂ 含量较低。相比高炉和其他加热炉,转炉属于开放系统,物料出入必然伴随二次烟气。转炉烟罩无法完全捕集二次烟气,炼钢车间一般在转炉上方配置厂房集尘罩,大范围地收集逃逸烟气,经过厂房烟气总管除尘和环保处理后直接排放。因此,包括二次烟气在内的厂房集中烟气总管排放需要单独进行监测。考虑到二次烟气排放的节奏也和炼钢炉批节奏同步,可进行若干炉批监测后得出规律进行长期计算。

值得注意的是某些转炉采用氧气 CO₂ 混合底吹,董文亮等[37]对首钢京唐炼钢厂氧气 CO₂ 混合底吹氧气 CO₂ 混合底吹进行试验,证明 CO₂ 体积分数为 8.1%时,碳氧积、炉渣 Fe 和脱磷率达到最好结果,采用类似技术的国内企业还包括三钢、安钢、酒钢等。这种工艺采用的 CO₂ 可来自前序工艺中捕集,也可由企业外购,成为新的碳素输入。该工艺也将转炉烟气中 CO₂ 的比例和煤气收集的方式,在监测过程中应及时调整配置和计算方法。此外,国内部分企业利用转炉煤气中 CO₂ 含量较高的特点,采取转炉煤气联合化工工艺,如河钢采用微生物发酵技术以转炉煤气为原料制取乙醇,石横特钢建成中国首套转炉煤气制甲酸装置[50],形成完全的碳捕集。

精炼炉的电极消耗和加入的增碳剂是两个外加的碳素,由于没有氧化剂,这部分碳基本融入铁素,有少量在电极加温的过程中跟随废气逃逸。目前大部分钢铁企业已完成环保改造,都在炼钢车间建立烟气收集总管,将精炼炉和真空炉烟气集中收集排放,在这种情况下无需单独监测精炼炉和真空炉的 CO₂ 排放。

3.4. 轧钢

轧钢车间加热炉的大量使用煤气的设备,企业的轧钢产能较大时,消耗大量煤气,在高炉和转炉生成的煤气有可能不足,部分企业需要外购天然气或焦炉煤气等燃料。近年来,随着“双碳”战略实施,对企业提出更多节能降耗的要求,大部分企业已经实现连铸坯热送,降低了煤气的消耗。另有少数企业,如莱钢永锋,新建生产线实现钢轧一体化,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 CO₂ 排放。

轧钢加热炉的设计分类较为复杂,国内多家设计单位和企业都有较为独特的设计。随着工业窑炉技术的不断演进,在近十几年来,加热炉的技术变化比较大,整体趋向于大型化,鼓励采用优化燃烧或无焰燃烧,多段加热,长寿命低热导率炉衬,烟气反吹,多传感透明加热炉等先进技术[52]-[55]。在烟气换

热技术方面,先进加热炉采用煤气空气双蓄热配置,高温烟气分别与煤气和空气进行换热后除尘排放,存在两个排放口,需要同时进行监测。部分企业采用单蓄热、换热器或余热锅炉,都应注意排放口的数量和温度,对测量设备进行相应配置。此外,生产板带材和高端型钢等产品需要在轧制后进行热处理,热处理炉使用煤气进行加热的需要考虑热处理炉废气流向。

3.5. 热电厂

大部分钢铁企业已经建设煤气柜,能够缓冲和储存多余以及外购的煤气,并对煤气成分进行配比调整。满足轧钢车间消耗煤气后,多余煤气一般输送至企业自有的火力发电站,使用煤气发电支撑全厂电气设备,降低甚至完全不需要外来供电。特别是企业采用连铸坯热直送轧钢的,几乎所有的煤气都会在热电厂转化为电能,进入高炉的焦炭和煤粉所带来的碳素中的绝大部分将在这里转化为 CO_2 排放。如果企业自有热电厂,应按照火电机组的 CO_2 排放监测方法进行监测[56]-[59]。如果企业不配备热电厂,可能将煤气输送厂外的发电站以及市政管网,需视情况具体分析。

3.6. 无组织排放

以上分析都是关注于钢厂的组织排放,实际上由于钢铁生产的碳素流行程较长,煤气管网复杂,生产流程和工艺链条复杂,还有部分 CO_2 无组织排放。比较典型的是炼钢车间使用煤气预热钢水包和连铸中间包,连铸生产线使用乙炔焰切割钢坯,这部分消耗量不可忽略,并且在开放的车间中难以测量 CO_2 浓度的变化,也可能汇入厂房烟气总管。比较准确的办法是测量钢水包和中间包平均消耗的煤气以及连铸切割时使用的燃料,结合每日生产总数进行测算,并考虑厂房总管抽气的效率。其次是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,都有少部分碳素残留,且几乎不可回收。虽然碳浓度较低,但总量较大,需要对不同固体废物含碳量进行测量计算。其他管路损耗和开放逃逸很难进行测量,一般只能根据经验进行估算。

3.7. 钢铁企业生产方式和配置对 CO_2 监测的影响

钢铁行业受到国家产业政策的严格限制,钢铁材料产品众多,生产方式多元,再加上企业规模、技术实力、地方政策等各方面因素影响,钢铁企业的产线和工装配置差异极大。最复杂的长流程炼铁炼钢轧钢企业,也存在各工序之间产能匹配的问题。比如常规生产长材和板材的企业,炼铁和炼钢产能一般能够匹配,但是在轧钢环节,差异出现在冷坯、热坯和热直送,这三种配置的碳素流和能量流差异巨大。而生产铸铁材料器件的企业,只具备炼铁生产线,大量煤气几乎全部用于发电。部分企业受市场行情影响,轧钢产能下调,将连铸钢坯外售,也将出现碳素流的改变,进而改变监测结果。因此对钢铁企业进行 CO_2 排放监测应充分与企业沟通,了解企业的产线设备工装配置情况,各个工序之间的产能匹配,摸清碳素流、铁素流、能量流的大致状况,合理选择监测点位和监测方法,避免出现监测漏项缺项。

此外,从前述分析可以看出在热风炉、轧钢加热炉、热电厂机组工序是有目的地燃烧煤气获取热能的工序,烧结和球团属于焦炭不充分燃烧,是主要的碳排放位置。而高炉、转炉放散,以及无组织排放,更倾向于工艺和设备条件本身的限制造成的碳排放,能够通过技术和设备的改进升级尽可能地减少碳排放。如果监测的精度要求不严格,或者企业对于煤气放散已经做到全回收,可以视情况忽略,将监测工作资源集中在碳排放占比较大的工序段。

4. 长流程钢铁企业 CO_2 排放监测案例

综合以上分析,下表整理出常规长流程钢铁企业各个工序碳排放监测的位置和要点。值得注意的是,

当前钢铁企业采用连续监测的工程实践较少，还缺乏各种监测技术在不同监测位置和场景中的适用性研究，后续工作中还需要重点研究该问题。

Table 1. Spots and gist of carbon emission monitoring of an integral steel factory

表 1. 长流程钢铁企业碳排放监测位置和要点

工序和工装设备监测位置		要点
球团	回转窑尾部，竖炉底部，带式焙烧机同烧结生产线	应考虑不同的设备排气温度的差异进行调整。如果环保处理效果不佳，应测量其他有机物对废气中碳的浓度贡献。
烧结	台车下方抽风管道汇入总管除尘脱硫后排放	考察是否利用烟气余热对原料或者其他物料进行预热，导致存在其他排放口。
石灰窑	石灰窑烟气总管	考虑是否采用 CO ₂ 回收捕集手段。
高炉	均压放散口和休风放散口	应充分了解放散口的回收情况，是自然回收还是强制回收，是全回收还是部分回收。
		休风放散监测应和企业充分沟通，配合企业生产和维护节奏。
		高炉煤气放散较危险，做好煤气防护。
热风炉	热风炉废气余热回收后总管除尘和环保处理后总排放口	考察是否使用高炉煤气循环联合碳捕集工艺等先进环保手段对碳排放的影响。
		注意热风炉燃烧和加热空气的工作节奏，废气余热回收的方法，用于空气预热还是用于处理煤粉等原料。余热回收效果决定排放废气温度，调整监测设备配置。
		转炉煤气放散情况与炼钢吹氧有关，应结合炼钢节奏连续监测。
转炉	转炉煤气放散口和炼钢厂废气总管排放口	二次烟气以及精炼连铸等工序集中进行收尘和废气处理的，应在全厂废气总管进行监测。
轧钢生产线	加热炉废气总管或轧钢厂废气总管排放口	充分了解企业使用冷坯、热坯还是热直送，是否具备热处理设备。
		对于双蓄热加热炉，一般有两个排放口。其他炉型需要明确排放口数量。
		废气温度差异较大，应注意调整监测设备配置。
热电厂	参照火电行业碳排放监测	了解企业是否配置热电厂，将多余煤气用于发电。
输出或外购燃气/		非监测项目，但必须了解企业自产煤气是否充足，除了起始的焦炭和煤，外购燃气是重要的碳输入源，在最终核算和验证时必须计入。
无组织排放	烘烤钢水包和中间包，连铸火焰切割，管网泄露，设备开口正常逃逸等	难以测量，可根据经验进行估算，如烘烤钢水包和中间包的管路一般设有煤气流量计，通过消耗进行计算。

按照表 1 的监测方法，对某被调研企业轧钢厂的 CO₂ 进行监测。选择轧钢厂的 CO₂ 监测是因为轧钢过程的碳素流最为简单，煤气经过加热炉燃烧后排放，碳素单线流动且没有过多无组织排放。

该企业有 4 条轧钢生产线，生产热轧带肋钢筋，配套 4 座空气煤气双蓄热步进式加热炉，采用 4 级加热，所有废气汇集至半干法脱硫系统，除尘后通过空废总管和煤废总管集中排放。采用差分吸收激光雷达(DIAL)设备在轧钢车间废气总管排气口进行气体成分监测，废气流量、压强和温度直接使用企业系统监测系统测量参数，考虑到气流量较大，可近似认为管内到出口的压强变化不会引起化学成分百分比的变化，烟气实测湿度较低，不做湿度补偿。监测时间持续 60 分钟，在这 60 分钟内 4 条轧钢生产线正常运转，每 3 分钟取值一次做出平均值，监测结果如表 2 所示。

Table 2. Exhaust gas monitoring of the emission main pipe in a steel factory
表 2. 某钢铁企业轧钢废气总管气体监测

排气口	管直径 m	流速 m/s	废气温度 ℃	压强 atm	测量时间 min	CO ₂ %	CO mg/m ³	硫化物 mg/m ³	氮化物 mg/m ³
空废口	2.6	15.5	97	1.27	60	4.2	4346	16.2	67.1
煤废口	3.2	14.3	93	1.16	60	3.15	1631	28.7	33.4

根据表 2 的数据进行计算，并将 CO 折算为 CO₂，每日总计排放 CO₂ 1107.0 吨。根据生产记录，该企业轧钢厂当月生产基本满负荷，每天有 4 个小时左右换辊时间，在换辊期间加热炉消耗煤气略微减少。从轧钢厂的煤气总管统计，平均每天消耗高炉煤气 220 万立方米，化验室提供数据 CO 含量为 29.37%。按照煤气数据，折算成 CO₂ 为 1183.8 吨。测量数据略低于理论数据，比例为测量值的 6.9%。出现差值的原因有三种可能，一是监测过程持续一小时，虽然轧钢线正常运转，但并非加热炉消耗煤气的高峰值，煤气的消耗量也受轧制产品工艺和加热炉状态影响，需要持续进行监测；二是加热炉系统的无组织排放，加热炉进出钢坯过程中的废气逃逸或废气除尘排放系统中的截留和逃逸；三是高炉煤气的 CO 含量受到高炉运行状态的影响出现变化。从火电行业相关文献进行的监测结果进行横向比对，这个监测结果是有说服力的。

5. 结论

- 1) CO₂ 实时监测意义重大，虽然目前大部分碳排放核算是基于计算评价的方法，但监测法能够真实反映企业所在地理位置直接向大气排放的情况，这是计算方法无法取代的。火电行业已经做了大量监测工作，有了许多数据积累，而钢铁行业因监测过于复杂还欠缺相关的实操案例和数据。随着钢铁行业纳入全国碳交易，直接监测是具备必要性的。
- 2) CO₂ 监测最主要的是对排放气体的流量和化学成分进行测量，钢铁生产的烟气经过环保处理后，仍存在一定的粉尘和温度，不同工序的烟气化学成分差异较大，需要可靠的测量方法和设备。比较合适的方法是采用超声法测量流量，采用激光吸收光谱或差分吸收激光雷达测量 CO 和 CO₂ 浓度。
- 3) 钢铁企业的碳素流远比火电厂复杂，碳素不但提供能量，也是过程重要的还原剂，能量的转化和输运是分析碳素流的重要因素，企业的生产方式、设备工装、生产计划和节奏极大地影响碳排放的方式、总量和位置，改变监测的边界和方法。在制订监测计划时需要充分了解目标企业的设备工装配置情况和各工序产能匹配，否则将严重影响监测的置信度。表 1 整理出常规长流程钢铁企业各个工序碳排放监测的位置和要点。
- 4) 对某企业轧钢加热炉进行 CO₂ 排放监测，监测结果与煤气输入理论值差距为 6.7%，造成差距的因素是加热炉排放受轧钢工艺和产品影响，加热炉和管网的非组织排放，以及高炉煤气本身的成分波动。

基金项目

国家自然科学基金资助项目：现代混凝土结构多屏障耐久性设计与控制理论方法研究(批准号：52038004)。

参考文献

[1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
[2] 世界钢铁协会. 世界钢铁统计数据 2024 [EB/OL].
<https://worldsteel.org/zh-hans/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/>, 2026-08-28.
[3] 冯相昭. “十四五”钢铁工业绿色低碳发展成效及未来路径建议[J]. 可持续发展经济导刊, 2025(10): 57-60.

- [4] 碳排放权交易管理暂行条例[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6930138.htm, 2026-08-28.
- [5] Göttel, H., Lenzen, B. and Schneider, C. (2019) Application of Continuous Emissions Measurement Systems (CEMS) for the Determination of CO₂ Emissions: Experience and Assessments by the German Emissions Trading Authority (DEHSt). German Emissions Trading Authority (DEHSt) at the German Environment Agency.
- [6] European Parliament, Council of the European Union (2003) Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 Establishing a Scheme for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading within the Community and Amending Council Directive 96/61/EC. *Official Journal of the European Union*, **L275**, 32-46.
- [7] Commission of the European Communities (2004) Commission Decision of 29 January 2004 Establishing Guidelines for the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council (Notified under Document Number C (2004) 130) (2004/156/EC). *Official Journal of the European Union*, **L59**, 1-74.
- [8] GB/T 32150-2025 工业企业温室气体排放核算和报告通则[S/OL]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=6E4997D6B3118055931BC13C71B9A452>, 2026-08-28.
- [9] U.S. Environment Protection Agency (2009) Mandatory Reporting of Greenhouse Gases. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2009-10-30/pdf/E9-23315.pdf>
- [10] 董文福, 刘泓汐, 王秀琴, 等. 美国温室气体强制报告制度综述[J]. 中国环境监测, 2011, 27(2): 18-22.
- [11] 生态环境部发布生态环境监测规划纲要(2020-2035年)[EB/OL]. <http://www.gthjjc.com/index/article/newsdetails/id/69.html>, 2026-08-28.
- [12] 碳监测评估试点工作方案[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/528181121_484815, 2026-08-28.
- [13] YB/T 6215-2024 钢铁企业二氧化碳排放监测技术规范[S/OL]. <https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=2D712DF8502B76D4E06397BE0A0A291F>, 2026-08-28.
- [14] 关于印发《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202503/t20250326_1104736.html, 2026-08-28.
- [15] 宁希翼, 万迎峰, 韩晶. 钢铁行业“双碳”标准体系建设的探讨[J]. 中国标准化, 2024(21): 80-86.
- [16] Ackerman, K.V. and Sundquist, E.T. (2008) Comparison of Two U.S. Power-Plant Carbon Dioxide Emissions Data Sets. *Environmental Science & Technology*, **42**, 5688-5693. <https://doi.org/10.1021/es800221q>
- [17] Evans, S., Deery, S. and Bionda, J. (2009) How Reliable are GHG Combustion Calculations and Emission Factors? *CEM 2009 Conference*, Milan, 1-14.
- [18] 李峥辉, 卢伟业, 庞晓坤, 等. 火电企业 CO₂ 排放在线监测系统的研发应用[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 182-189.
- [19] 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.
- [20] 罗培军. 电站锅炉烟气流量测量常用流量计的选择[J]. 电工文摘, 2013(2): 34-35.
- [21] 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.
- [22] 董鸿霖. 燃煤机组尾部烟道流场分析及流量测量方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [23] 钱丛昊, 冯璇, 朱小良. 多线法测量烟气流速的 CFD 模拟研究[J]. 发电设备, 2019, 33(6): 375-380.
- [24] 郭振, 王小龙, 任健, 等. 二氧化碳排放连续在线监测过程的模拟与不确定度评定[J]. 计量学报, 2022, 43(1): 120-126.
- [25] 蒙毅, 刘玺璞, 牛国平, 等. 高准确性火电厂 CO₂ 排放连续监测系统测点布置的数值模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(5): 465-476.
- [26] 达虹鞠, 许德刚, 王晨, 等. 典型炼油装置碳排放监测方法研究[J]. 油气田环境保护, 2023, 33(6): 38-43.
- [27] 姜萌, 冯文彬, 高慧, 等. 用于煤矿热动力灾害监测的一氧化碳传感器[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 793-799.
- [28] 张立群. 基于 TDLAS 的矿用激光一氧化碳检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 61-66.
- [29] GB/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/OL]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=C3237A45CDE613A6F008F81498A4C328>, 2026-08-28.
- [30] 肖青. 钢铁企业碳排放核算与碳减排技术探讨[J]. 冶金经济与管理, 2024(6): 10-13.
- [31] 石峥, 任晓芬, 张子平, 等. 烧结工序烟气治理方法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(1): 168-173.
- [32] 王成志, 顾甜, 张忠良, 等. 钢铁烧结、焦化烟气多污染物排放特征与净化技术应用现状[J]. 当代化工, 2025, 54(1): 172-179.

- [33] 陈宇, 刘臣, 王兆才, 等. 基于烟气循环烧结的 CO 过程控制优化工艺与技术[J]. 烧结球团, 2024, 49(6): 129-136.
- [34] 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.
- [35] 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+113.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 华建明, 孙国军, 郭敏雷. 宝钢高炉热风炉烟气超低排放治理工艺技术选择及应用示范[J]. 宝钢技术, 2024(1): 38-43.
- [40] 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.
- [41] 赵广江. 高炉均压煤气回收效益分析[J]. 河北冶金, 2024(1): 78-82.
- [42] 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.
- [43] 李永军, 冯燕波, 马广霄, 等. 高炉放散煤气治理技术[J]. 河北冶金, 2024(7): 81-86.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 杨凡. 高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造方案分析[J]. 冶金动力, 2022(5): 101-105.
- [49] 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.
- [50] 张娟, 刘振, 孙世涛, 等. 转炉一次烟气干法净化回收系统工艺的发展与探讨[J]. 冶金动力, 2025(1): 86-89.
- [51] 于鹏飞, 曾加庆, 林腾昌, 等. 国内转炉煤气回收概况与研究展望[J]. 铸造技术, 2018, 39(1): 240-245.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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+33.
- [58] 解婷婷, 孙友源, 郭振, 等. 火电机组碳排放连续监测技术研究与应用综述[J]. 发电技术, 2024, 45(5): 919-928.
- [59] 刘科, 杨兴森, 王太, 等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 47-53.