

钢铁行业大气污染治理科技发展分析与展望

王兰英

(中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038)

摘要: 钢铁行业是我国工业领域重要的大气污染源之一, 钢铁行业的大气污染治理是降低重点行业污染排放、打好污染防治攻坚战的重中之重。近年来, 我国在钢铁行业大气污染治理方面取得了显著成果。本文总结了我国“十一五”以来钢铁行业污染防治科技工作的部署, 并梳理分析了钢铁行业大气污染治理技术发展的阶段。基于末端治理、源头减排和过程控制、全过程耦合控制三个方面技术发展现状, 剖析了当前我国钢铁行业在多污染物协同深度减排和实现超低排放面临的形势和问题。最后, 面向“十四五”时期, 聚焦碳达峰碳中和目标, 提出了相关建议, 旨在深化大气污染防治科技工作, 为建设“美丽中国”和实现“双碳”目标提供关键科技支撑。在未来的发展中, 我们有理由相信, 在全社会的共同努力下, 钢铁行业将迎来更加清洁、高效和可持续发展。

关键词: 钢铁行业; 大气污染治理技术; 科技部署; 超低排放; 减污降碳协同

中图分类号: X511

文献标识码: A

Analysis and prospects of air pollution control techniques in the iron and steel industry

WANG Lanying

(The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China)

Abstract: The iron and steel industry is a major contributor to atmospheric pollution in China's industrial sector. Effective air pollution control in the iron and steel industry is critical for reducing emissions from key industries and winning the battle against atmospheric pollution. In recent years, China has achieved remarkable results in air pollution control in the iron and steel industry. This paper provides a comprehensive overview of the pollution prevention and control techniques deployed in the iron and steel industry since China's "Eleventh Five-Year Plan", focusing on the stages of the development of air pollution control technology. Based on the status quo of technology in three aspects: end-of-pipe treatment, source emission reduction and process control, and whole process coupling control, it analyzes the current situation faced by China's iron and steel industry in the synergistic deep emission reduction of multi-pollutants and the realization of ultra-low emission. Finally, facing the "Fourteenth Five-Year Plan" period, focusing on carbon peaking and carbon neutrality targets, we propose some suggestions to help to promote scientific and technical advancements in air pollution prevention and control. This work will provide critical support for constructing a "Beautiful China" and realizing the "dual-carbon" target. In the future, we believe that with the joint efforts of the whole society, the iron and steel industry will achieve cleaner, more efficient and sustainable development.

Keywords: Iron and steel industry; Air pollution control techniques; Technology deployment; Ultra-low emissions; Coordinated reduction of pollutants and carbon

收稿日期: 2023-10-18

DOI: 10.20078/j.eep.20231108

作者简介: 王兰英(1977—), 女, 河北霸州人, 副研究员, 主要研究方向为环境保护与可持续发展领域科技管理。

E-mail: wangly@acca21.org.cn

0 引言

钢铁行业作为我国经济的主要支柱,在 2020 年的粗钢产量达到了 10.53 亿吨,超过全球粗钢产量的一半。自 2017 年以来,钢铁行业大气污染排放量已超过火电行业,成为我国工业部门最大的排放源,钢铁行业大气污染治理是有效降低重点行业污染排放、打赢蓝天保卫战的重中之重。我国钢铁行业具有生产工序多、污染种类杂、排放总量大等特点,加之各地污染物排放标准与执行情况参差不齐,导致污染治理挑战巨大。近年来,在科技部、生态环境部、工信部等部门的支持下,我国钢铁行业大气污染控制技术快速发展,经历了从除尘、脱硫、脱硝等单一、常规污染治理向多污染物协同深度减排的发展阶段,超低排放核心技术取得重大突破,支撑我国钢铁行业超低排放改造。2020 年 9 月,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论会上明确提出,中国将努力争取在 2030 年前达到 CO₂ 排放峰值,并在 2060 年前实现碳中和,这标志着我国绿色转型发展进入了加速阶段。钢铁行业在全国碳排放总量中占比达 12% 左右。下一步,面向碳达峰、碳中和总体目标,钢铁行业需进一步加强减污与降碳的协同治理技术创新,开展适用低碳共性技术研发,构建钢铁行业绿色制造技术体系。

1 钢铁行业大气污染治理科技工作部署

炼钢工艺主要有高炉-转炉、废钢-电炉、直接还原-电炉和熔融还原-转炉四种。在我国,主要的炼钢工艺是高炉-转炉长流程,这一过程包括烧结、球团、焦化、高炉、转炉以及轧钢等环节(图 1)。钢铁行业主要污染物是细颗粒物、SO₂、NO_x 等^[1]。其中,烧结、炼铁、炼钢和炼焦等工序是颗粒物的主要来源,而烧结和球团等工序则主要负责排放 SO₂,烧结、炼焦以及热轧等工序则是 NO_x 的主要产生阶段^[2]。针对钢铁行业大气污染特点,国家科技部门设立了科技计划项目,超前部署、支撑引领行业大气污染治理技术的发展。“十一五”期间,通过国家高技术研究发展计划(863 计划)支持了“烧结机烟气半干法脱硫成套化技术与设备”等课题。“十二五”期间,通过 863 计划支持了“钢铁烧结烟气多污染物协同控制技术研究及示范”“钢铁窑炉烟尘 PM_{2.5} 控制技术与装备”和“钢铁烧结烟气 PM_{2.5} 无机膜高效捕集技术与装

备”等课题。“十三五”期间,通过国家重点研发计划“大气污染成因与控制技术研究”重点专项支持了“钢铁行业多工序多污染物协同控制技术”和“钢铁行业烟气多污染物全过程控制耦合关键技术”项目。

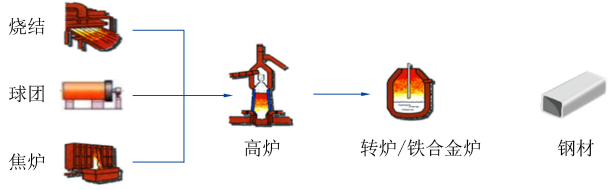


图 1 炼钢主要工艺流程

Fig. 1 Process flow of steel making

2 钢铁行业大气污染治理技术研发进展

在科技支撑引领下,我国钢铁行业大气污染治理技术发展大致经历了四个阶段。20 世纪 70 年代至 90 年代,是钢铁行业环保技术研究的起步阶段。20 世纪 90 年代以来,针对粉尘、SO₂ 等单一污染物的末端治理技术发展迅速。“十二五”以来,以源头控制技术以及基于半干法的钢铁单工序(主要涉及烧结、球团)烟气多污染物协同控制技术为主导的发展趋势逐渐显现。“十三五”时期开始,钢铁产业全流程超低排放控制技术逐渐引领行业走向^[3]。

2.1 污染物末端治理技术

20 世纪 90 年代以来,针对钢铁生产过程中高炉、烧结、球团和焦化等工序的大气污染物排放行为,研发了系列末端治理技术。针对钢铁窑炉颗粒物排放量大、分布不均匀等特性,开发了预荷电袋滤器除尘技术,降低了系统运行阻力,实现了微细粉尘的高效捕集。针对烧结和球团两个工序烟气 SO₂ 排放量大、原有的湿法脱硫技术水耗严重、二噁英排放显著等问题,开发了循环流化床、密相干塔、旋转喷雾干燥为主的半干法脱硫成套化技术,解决了相关技术难题。针对焦炉和烧结烟气 NO_x 排放量大、烟气温度低等问题,开发了中低温选择性催化还原(SCR)脱硝、臭氧氧化脱硝等关键技术,突破了中低温催化剂、还原剂/氧化剂分布均匀性、氧化产物调控等关键技术,全面支撑了钢铁行业 NO_x 的深度减排^[4-6]。

2.1.1 钢铁行业颗粒物治理技术

钢铁行业颗粒物治理技术是为了解决钢铁窑炉颗粒物排放量大、分布不均匀等特性而研发的。目前,常用的颗粒物治理技术包括重力除尘、旋风

除尘、电除尘以及布袋除尘等。但是,随着环保要求的逐渐严格,重力除尘和旋风除尘技术已无法达到特别排放标准($<40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。因此,当钢铁行业采用超低排放($10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)目标时,在湿法脱硫后加设湿式电除尘技术能够满足相应的环保要求。另外,对于半干法脱硫后的袋式除尘,可通过更换第三代滤袋或在布袋前增设粉尘预荷电装置来满足排放要求。预荷电袋滤器除尘技术利用施加一定的电压使粉尘颗粒带电,在过滤过程中产生静电吸附作用,荷电处理后的粉尘能够聚集成为大颗粒,并附着在布袋上形成疏松的过滤层,进而提升滤袋的过滤效能,确保烟气出口的粉尘浓度稳定维持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。该技术有效降低了系统运行阻力,实现了微细粉尘的高效捕集。此外,预荷电袋滤器具有结构简单、操作方便、维护成本低等优点,已被钢铁行业广泛接受,逐渐占据主导地位^[7]。

2.1.2 钢铁行业 SO_2 治理技术

钢铁行业烟气脱硫技术主要包括湿法脱硫技术、干法脱硫技术和半干法脱硫技术。湿法脱硫是指在湿态(液体或浆态)下使用脱硫剂进行脱硫的过程。湿法脱硫技术成熟且高效,但处理液体或污泥的难度大,设备易受腐蚀、投资和能耗较高。我国钢铁行业常用的湿法脱硫技术有石灰石-石膏法和氨法脱硫技术^[8]。干法脱硫是指在干态下进行的脱硫工艺,钢铁行业常用的干法脱硫技术包括活性炭吸附技术和干法脱硫技术(SDS)^[9-10]。半干法脱硫则结合了干法和湿法的特点,通过将脱硫剂溶解在水中或以浆液形式喷入烟道来洗涤烟气并进行脱硫。半干法脱硫技术具有高脱硫效率、无废水排放和较小腐蚀隐患等优点,但难以处理脱硫产物^[11]。常用的半干法脱硫技术有喷雾干燥吸收塔脱硫技术(SDA)、密

相干塔法和循环流化床(CFB)等^[12-13]。综合考虑,半干法脱硫技术在钢铁行业烟气脱硫方面具有更大的适用性,其在钢铁行业中的应用比例逐年增加。

2.1.3 钢铁行业 NO_x 治理技术

烟气脱硝作为一项关键的环境保护措施,在钢铁行业中具有重要意义。常用的方法包括中低温 SCR 脱硝、臭氧氧化脱硝和活性焦一体化法等。中低温 SCR 脱硝技术通过催化剂促使还原剂(如氨)与 NO_x 反应生成无害的氮气和和水,具有高脱硝效率、设备简单和运行可靠等优点。然而,该技术在运行时需要使用热风炉提高烟气温度,并消耗大量高炉煤气。此外,也存在脱硝过程中消耗大量高炉煤气以及未经净化的高浓度 CO 排放等问题。臭氧氧化脱硝技术利用臭氧的氧化性将 NO_x 氧化成无害的氮气和和水,具有无副产物、无污染和高脱硝效率等优点,但投资成本较高。活性炭(焦)一体化法依托活性炭(焦)的孔隙结构和较大的比表面积,通过吸附作用捕捉烟气中的 NO_x ,继而后用 NH_3 将吸附的 NO_x 还原为 N_2 ,从而能够同时去除多种污染物^[14]。

烧结烟气净化领域中,将半干法脱硫技术与中低温 SCR 脱硝技术相结合已被实践证明为一种行之有效的技术手段,其具有高净化效率、系统稳定性优异和协同脱除二噁英等优点。半干法脱硫耦合中低温 SCR 脱硝工艺如图 2 所示,该工艺通过半干法脱硫设备吸收焦炉烟气中的 SO_2 ,并将其转化为亚硫酸钠和硫酸钠,同时吸附大量粉尘。在此基础上,经过布袋除尘和换热器的处理后,焦炉烟气进入 SCR 反应器进行脱硝,最终排放到烟囱外。该技术已在邯钢焦化厂成功应用,实现了焦炉烟气的达标排放,粉尘颗粒物、 SO_2 和 NO_x 等污染物的浓度控制在 $10、30、150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以内。

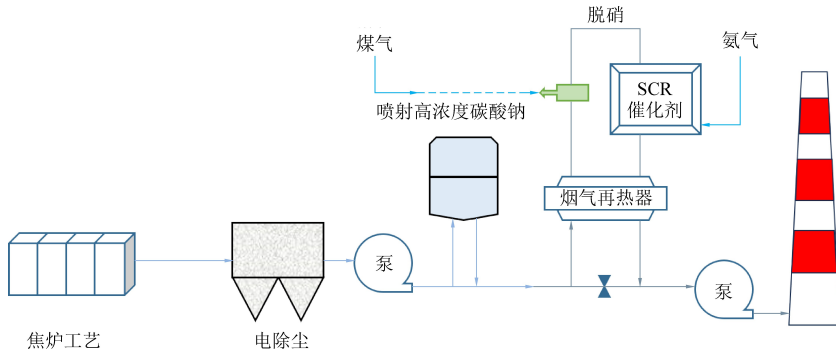


图 2 半干法脱硫耦合中低温 SCR 脱硝协同净化技术路线

Fig. 2 Collaboration of semi-dry desulfurization and medium-low temperature selective catalytic reduction denitrification

2.2 源头减排和过程控制

20世纪90年代美国驻北京大使馆于2010年公布的PM_{2.5}监测数据,使得PM_{2.5}问题成为中国公众关注的焦点,从而使空气污染问题更加受到各方面的重视。随着环保标准逐步严格,末端治理减排潜力逐渐减小,钢铁行业污染物减排策略逐步从末端治理转移到源头减排和过程控制。“十二五”以来,研发了高炉炉料结构优化的硫磺源头减排技术,突破了熔剂性球团生产和高比例球团冶炼等关键技术,建立了低污染、低排放的高炉冶炼技术体系,实现了基于原料替代的硫磺协同减排,为整个钢铁行业的源头减排提供技术路径^[15]。在单一污染物治理技术积累的基础上,结合近年来“多污染物协同控制”的技术需求,研发了活性焦一体化控制技术、半干法多污染物协同控制技术,实现了颗粒物、SO₂、NO_x、二噁英等多污染物的协同减排,推动钢铁行业从“单一污染物减排”模式发展到了“多污染物协同控制”模式^[16-17]。

2.2.1 基于高炉炉料结构优化源头减少污染和碳排放

球团矿是一种具有烟气量小、污染和碳排放强度低等优点的矿石^[18]。相比于烧结矿,球团矿的SO₂、NO_x、CO₂排放强度仅为其1/3到1/2,因此,增加球团矿在高炉炉料中的比例可以有效地减少污染物和碳的排放。在欧美国家,高炉球团率普遍超过90%,如瑞典钢铁公司(SSAB)、阿什兰钢厂和蒙克洛瓦钢厂的球团率分别为100%、90%和93%。然而,亚洲国家的球团比较低,如浦项光阳、新日铁以及中国分别占12%、10%和约10%,主要归因于球团矿的碱度较低(0.1~0.2)。

生产1吨球团矿的能耗约为25千克标准煤,明显低于生产烧结矿的能耗(50千克标准煤)。因此,增加高炉球团矿的比例可以显著减少钢铁工业对燃料的消耗所造成的污染和碳排放。然而,在炼铁过程中存在两个因素限制了高炉球团矿比例的提高。首先,我国生产的铁精矿普遍富含SiO₂,并且焊剂颗粒的机械强度较低,需要通过添加MgO添加剂来进行优化。其次,高炉内球团矿比重的增加会导致物料表面形状不稳定、气流不平衡和燃料比过高等问题,这些问题需要在以球团矿为主的结构中得到解决。为了保证炼铁的稳定性和高炉整体碱度一般稳定在1.05~1.20之间。因此,传统的酸性球团矿不能在以球团矿为

主的高炉中使用。为了满足高炉的碱度要求,开发碱性球团(碱度为0.8~1.0)和优化高炉炉料结构非常重要。

依托国家重点研发计划课题“基于高炉炉料结构优化的硫磺减排技术及示范”,研究人员成功研制了适用于高炉炼铁的助熔剂球团和高比球团等关键原料,并在唐山钢铁集团建立了550 m³高炉示范项目^[19]。通过提高高炉内球团比例从约10%至80%,成功地降低了SO₂、NO_x和CO₂的排放量52%、26%和10%。该方法已成功应用于唐山钢铁集团新建的2922 m³大型高炉。钢铁行业可以通过优化高炉炉料结构以及增加球团矿的使用量,有效减少NO_x和SO₂的排放,缓解末端治理的压力,同时还能提高煤气利用率和降低高炉入炉焦比,实现节能减排的目标^[20]。

2.2.2 活性炭法一体化技术

活性炭法一体化技术是一种综合处理焦炉烟气中SO₂、NO_x等多种污染物的方法。该技术通过将焦炉烟气引入预热锅炉回收热量,并进行冷却降温,然后进入活性炭吸附装置。吸附装置采用两级吸附塔,第一级主要用于脱硫,该过程以SO₂的吸附为首要步骤,继而在O₂和水蒸气的条件下,通过催化氧化反应进行处理。在脱硝过程中,第二级起到关键作用,通过喷入氨气作为还原剂,引发反应产生N₂和水,进而达到对NO_x去除的目的。此外,该技术在脱硫脱硝的过程中,还能够同步去除H₂S、HCN等其他污染物。在经过再生塔的再生处理之后,活性炭实现了循环利用。最后,经过净化的烟气在增压风机的推动下,被排放至烟囱之外。

该活性炭法一体化技术是在国家重点研发计划课题“焦炉烟气多污染物协同控制技术及示范”的框架下研发出来的。该技术中,两段式吸附塔的使用可以消除硫酸铵晶体对脱硝效率的干扰。此外,考虑到焦炉烟气中SO₂初始质量浓度偏低,首次提出利用再生过程中产生的SO₂来制造硫酸铵化学品。将经过物理处理的活性炭粉应用于污水处理,从而实现了资源的综合利用。

2.2.3 烧结烟气循环耦合增能增质工艺

随着烧结烟气超低排放技术的广泛实施,污染减排能力显著降低。然而,传统的“浓度控制”已无法满足对烟气污染深度削减的技术需求,因此急需寻求持续实现“总量控制”的方法^[21]。考虑到烧结生产过程中存在烟气排放量大、余热利用率

低的问题,烟气循环与增能增质成为实现烟气减量化和余热利用的首要技术^[22]。该技术通过提高烧结产量来减少碳排放,并通过减少固体燃料消耗来降低能源效率。

烧结烟气再循环法通过将部分废气引入燃烧空气中,降低了烧结气体中的氧浓度,从而降低了燃烧速度和烧结温度,污染物的浓度也得到了降低^[23]。依据烟气抽取位置的差异,烟气循环工艺可以被划分为内循环工艺和外循环工艺。外循环流程的循环风来自引风机,而内循环流程的循环风来自烧结机风箱^[24]。典型的烟气再循环工艺包括荷兰的EOS、日本新日铁的废气再循环、德国的LEEP和奥地利的EPOSINT^[25]。其中,只有EOS属于外循环过程,其余三个过程属于内循环过程。在内循环技术中,可以选择不同特性的波纹管进行优化,例如高温、富氧或高浓度污染物等^[26]。这些技术具备选择性,能够捕获来自不同波纹管的部分载热烟气并将其送回烧结机,进而实现部分烧结废热的回收以及固体燃料的节约。在回收的烟气中, NO_x 、CO和二噁英等污染物仍存在,因而可以实施部分净化处理^[27]。

然而,由于我国烧结原料复杂,烟气成分波动较大,国外的烟气循环模式无法直接应用。为此,在国家重点研发计划项目“钢铁行业烟气多污染物全过程控制耦合关键技术”的资助下,中国科学院过程工程研究所和河钢集团有限公司等单位携手,针对我国原料结构特点,共同研发了一种适用于烧结机的选择性烟气循环技术(图3)。凭借在烧结机风箱选型及关键设备设计等领域的创新性突破,该技术已成功应用于邯钢 $2\times 360\text{ m}^2$ 、 $2\times 400\text{ m}^2$ 和承钢 $3\times 360\text{ m}^2$ 等十余座烧结厂。其成果表现为废气循环率超过20%,吨矿外排烟气量减少15%以

上,烧结矿产量增长4%,固体燃料消耗降低3%。与超低排放相比,PM/SO₂/NO_x污染物进一步减少30%以上,CO和二噁英排放量减少30%以上。这种技术实现了“节能”和“减排”的集成,通过烟气减排打破了超低排放技术经济性的制约,并与后续的末端治理设施有效地配合,从而实现了过程控制与末端治理的目标。

2.3 全过程耦合控制技术

2013年,我国历史性地经历了严重的空气污染事件,从而推动了相关科研计划和国家政策文件的迅速实施和发布,钢铁行业污染排放治理技术向“环保与生产深度融合”方向发展。“十三五”以来,在国家重点研发计划“大气污染成因与控制技术研究”重点专项支持下,开展了“选择性烟气循环与活性焦一体化技术”“SCR脱硝耦合半干法脱硫技术”“臭氧梯级氧化硫硝协同吸收技术”等一系列超低排放技术研发,形成了“源头减量-过程控制-末端治理”全过程超低排放技术体系,并在国内大型钢铁企业率先进行超低排放技术的工程示范和推广,实现了节能减排和增产增效的功能耦合^[23]。钢铁行业超低排放技术的研发和应用,有力支撑了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》钢铁等行业超低排放改造目标的圆满完成。中国工程院对《打赢蓝天保卫战三年行动计划》评估结果表明,非电行业提标改造对空气质量持续改善贡献最大。

2.3.1 基于烟气减量与生物质减排协同控制技术

研究表明,通过将生物质燃料替代煤炭类化石燃料,可以有效地减少烧结过程中CO₂、SO₂及NO_x的产生。此外,采用烟气循环烧结技术可以降低烟气外排量,并在循环过程中吸附或降解粉尘和有害气体,从而降低粉尘、二噁英、NO_x和CO的排放。因此,将烟气循环和生物质烧结相结合可以实现多种污染物的大幅减量化排放^[28-29]。

为了实现烟气循环与生物质能烧结的有效结合,关键是确定适应生物质烧结的烟气循环方式,使得循环后的烟气特性有利于传播到烧结传热前沿和燃烧前沿,并合理利用循环烟气中的CO潜热和物理显热。这样可以改善生物质能烧结的产量和质量指标,并进一步促进节能减排^[30]。当木质炭替代40%的焦粉时,在外循环条件下,CO₂、CO、SO₂和NO_x的减排分别达到31.39%、19.84%、41.04%和42.25%;在内循环条件下,CO₂、CO、SO₂和NO_x的减排分别达到33.06%、22.06%、44.51%

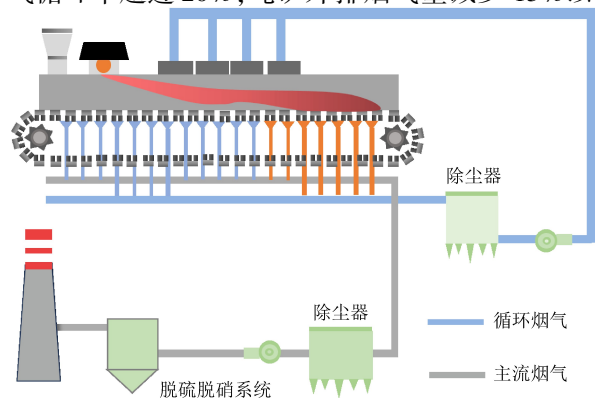


图3 烧结烟气选择性循环工艺流程

Fig. 3 Process flow of selective circulation of sintering flue gas

和 45.07%。在木质炭替代 40% 焦粉的情况下, 结合外循环和内循环方式, 与没有循环的烧结相比, CO_x 的减排分别增加了 12.74 和 13.13%, SO_2 的排放分别减少了 2.89% 和 6.36%, NO_x 的排放分别减少了 15.49% 和 18.31%。因此, 烟气循环与生物质能相结合可以综合降低 CO_x 、 SO_2 和 NO_x 的排放量。

2.3.2 焦炉低氮燃烧技术耦合末端活性炭吸附多污染物协同控制技术

对于焦炉烟气成分复杂且低硫高氮的特性, 研发了一种焦炉低氮燃烧技术, 开发了一种焦炉低氮燃烧技术, 并将其与活性炭多污染物 (SO_2 、 NO_x 、 H_2S 、 HCN 等) 的协同控制技术相结合, 以达到多污染物的协同控制和高效脱硝的目的。此外, 还整合了活性炭法烟气净化以及硫/炭粉无害资源化回收的成套装备技术 (图 4)^[31]。该技术在河钢唐钢 7 m 焦炉上建成示范工程, 炼焦过程中 NO_x 的生成量从 $600 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ 被减少到 $500 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ 以下, 污染物排放水平最终达到国家标准。

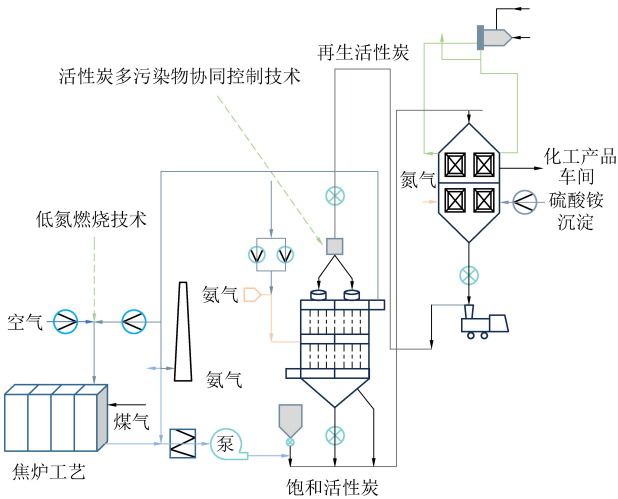


图 4 低氮燃烧耦合末端活性炭吸附的焦炉烟气多污染协同控制技术路线

Fig. 4 Low nitrogen combustion technology coupled with activated carbon adsorption for multi pollution collaborative removal from coke oven flue gas

2.3.3 烧结烟气循环技术耦合末端活性炭焦多污染物协同控制技术

活性焦工艺作为一种高效环保的污染控制技术, 能够实现多种污染物同步净化^[32]。然而, 该技术的吨矿运行成本较高, 并且随着烟气量的上升而上升, 工艺流程如图 5 所示。烧结烟气循环工艺被采用以降低烟气量, 该技术能够在保持烧结工艺稳定性的前提下, 将烟气量降低 20% 以上。

活性焦工艺在河钢邯钢 360 m^2 烧结机上成功得到应用, 并在此基础上引入了烟气循环技术, 实现了烟气排放量的大幅度降低, 同时 CO 、 NO_x 等污染物的生成量得到显著降低。在实施过程中, 各类污染物排放水平始终保持在超低排放标准范围内, 系统运行稳定, 几乎没有停机检修问题。基于此, 现场应用证实了该技术工艺具备稳健可靠的特性。在应用这项技术之后, 年排污成本降低了 760 万元。吨矿固体燃耗从 55.59 千克降至 52.51 千克, 每吨矿节省了 3.08 千克固体燃料, 从而带来年节能收益 12 960 万元。此外, 每年生产的浓硫酸达到 18 000 吨, 副产品年收益为 2 592 万元。烧结矿产量增幅超过 1%, 年度增产量可达 16.2 万吨, 因此每年带来 2 430 万元的效益。除此之外, 实现超低排放标准确保了每年至少免于限产一个月, 同时年产量提高 135 万吨, 从而带来了 20 250 万元/年的效益。可以看出, 该技术工艺具有显著的经济效益, 每年的总经济效益为 39 041 万元。

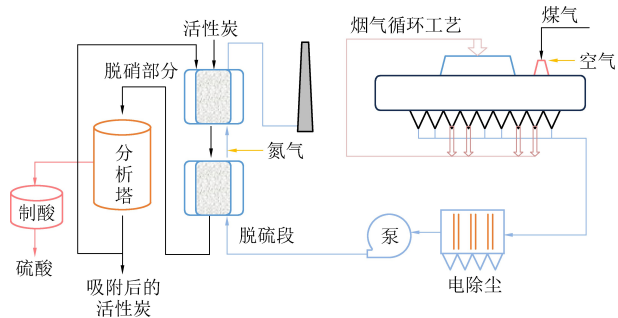


图 5 烧结烟气循环耦合活性焦多污染协同控制技术路线
Fig. 5 Sintering flue gas circulation coupling activated carbon adsorption for the collaborative control of multi-pollution

3 当前存在的问题

截至 2022 年 7 月底, 全国范围内已有 251 家钢铁企业 (具备 6.81 亿吨粗钢产能) 已完成或正在执行超低排放改造, 占钢铁总产量 10.13 亿吨的 67%^[33]。按照《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(环大气[2019]35 号), 目标是在 2025 年底之前, 重点区域的钢铁企业将基本完成超低排放改造, 全国范围内力求实现超过 80% 的产能改造目标^[34]。尽管钢铁行业超低排放关键技术 在应用示范中取得了显著效果, 但从目前钢铁行业超低排放改造的推进情况来看, 仍存在问题。同时, 面向双碳目标, 亟需推进减污降碳协同技术创新。

3.1 超低排放控制技术需要进一步深化,清洁生产工艺有待进一步提升

钢铁行业超低排放改造中,NO_x的高效治理是技术路线选择的关键。以烧结、焦化工序为例,典型的超低排放技术路线主要包括 SCR 脱硝、活性炭同时脱硫脱硝、或氧化脱硝,脱硝效率在 85% 以上^[35]。在追求高效率的同时,带来“废旧催化剂处置量增加、氨逃逸、臭氧逃逸”等二次污染风险,对现有超低排放控制技术的深化研究显得尤为迫切。同时,现阶段钢铁行业超低排放改造大多针对烧结、球团和焦化烟气治理,对上述工序以外的高炉/焦炉煤气净化、短流程炼钢污染物净化、高炉热风炉和轧钢热处理炉烟气净化等方面技术积累较弱,需要进一步提升清洁生产水平。

3.2 常规污染物和非常规污染物尚未实现协同减排

烧结、焦化工序和电炉炼钢过程中会产生二噁英、苯并芘和挥发性有机物(VOCs)等非常规污染物^[36],目前钢铁行业对上述非常规污染物排放标准过于宽松,例如二噁英仍执行 0.5 ng TEQ · Nm⁻³ 的排放标准^[37],远低于垃圾焚烧行业 0.1 ng TEQ · Nm⁻³ 的排放限值。加之监测技术的局限性,导致现有超低排放控制技术尚未全部覆盖非常规污染物。

3.3 减污降碳协同工艺技术储备不足

钢铁行业在全国碳排放总量中占比达 12% 左右。每生产 1 吨钢,使用高炉长流程工艺会导致 2.5 吨的 CO₂ 排放,采用电炉短流程工艺也会产生 0.5 吨的 CO₂ 排放。我国高炉-转炉长流程炼钢工艺占比 90%,其中以烧结、焦化、高炉为代表的铁前工序排放了全行业 90% 以上的大气污染物及 CO₂。碳达峰碳中和的目标将倒逼钢铁行业技术升级和高质量发展。随着我国碳达峰碳中和目标的推进和落实,钢铁行业作为碳减排的重点行业,必然面临生产工艺的大幅调整和升级^[38]。但当前我国大多钢铁企业处于低碳发展初级阶段^[39],烟气深度净化与 CO₂ 协同减排工艺技术储备不足。

4 展 望

钢铁行业是我国目前除火电外碳排放量最大的行业(图 6),钢铁行业碳减排也是我国实现碳达峰碳中和的重要路径之一。国务院《2030 年前碳达峰行动方案》(国发[2021]23 号)提出,推动钢铁行业碳达峰,促进钢铁行业结构优化和清洁能源替代,深挖节能降碳潜力,推动钢化联产,探

索开展氢冶金、CO₂ 捕集利用一体化等试点示范。面向钢铁行业超低排放改造需求以及我国碳达峰碳中和目标,在前期基础上,应聚焦多污染物深度净化和减污降碳协同技术,从以下三方面进一步推进钢铁行业大气污染治理科技工作,为建设“美丽中国”和实现“双碳”目标提供关键科技支撑。

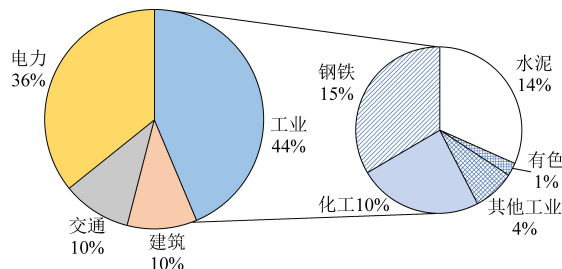


图 6 当前我国高碳行业碳排放比例

Fig. 6 Current proportion of carbon emissions in China's high-carbon industries

一是拓展多污染物协同控制技术,开展覆盖全流程的超低排放技术升级。在现行颗粒物、SO₂、NO_x 协同控制技术的基础上,加大二噁英、苯并芘、VOCs 等非常规污染物的超低排放一体化协同控制技术研发^[40]。在关注重点工序的基础上,进一步开展高炉/焦炉煤气、短流程炼钢、高炉热风炉和轧钢热处理炉等工序排放净化技术研究,实现覆盖钢铁行业全流程的耦合减排技术升级。从投资运行、减排效益、二次污染排放风险等方面加强不同超低排放技术路线综合评估研究,提升超低排放监测技术性能,形成科学的超低排放控制和监测技术工程技术规范。

二是大力推进减污降碳协同技术创新。开展烧结烟气全过程控制耦合节能技术研究,加强高炉煤气循环、焦炉煤气重整制氢及氢能产业链延伸技术等循环利用技术研发,提高资源利用效率。发展直接还原炼铁(DR)等避免直接碳排放(CDA)技术,开展高炉煤气净化循环耦合钢化联产、焦炉煤气制氢及氢能产业链延伸技术^[41]。进一步发展富氧冶炼、富氢冶炼、熔融还原炼铁等新型冶金技术,为落实 2021 年 10 月国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》提供科技支撑。

三是发展全过程智能化管理技术,提升生产全过程的节能降耗。开发钢铁行业全过程智能化管理系统,融合各生产环节的能源、资源投入与产出、排放数据,通过信息化、智能化技术对钢铁生产的全过程进行协调和优化,提高能源、资源的运行效率,提升生产全过程的节能降耗,打造绿色、智能化的新一代钢厂。

参考文献 (References) :

- [1] 施永杰. 我国钢铁行业的大气污染及整治措施[J]. 工程技术研究, 2020, 5(16): 245-246.
SHI Yongjie. Airpollution and remediation measures in China's steel industry [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(16): 245-246.
- [2] 于勇, 朱廷钰, 刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁, 2019, 54(9): 1-11.
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key process of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel, 2019, 54(09): 1-11.
- [3] YU Jiyong, XU Runsheng, ZHANG Jianliang, et al. A review on reduction technology of air pollutant in current China's iron and steel industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137659.
- [4] 刘铭辉, 刘涛, 肖成磊. 低温选择性催化还原(SCR)脱硝催化剂的研究进展[J]. 世界有色金属, 2018(21): 170-174.
LIU Minghui, LIU Tao, XIAO Chenglei. Research progress of low temperature selective catalytic reduction (SCR) catalysts for denitrification[J]. World Nonferrous Metals, 2018(21): 170-174.
- [5] ZHANG Yiwei, WANG Zhihua, HE Yong, et al. Experimental study on three additives used for the removal of nitrite, a by-product of ozone oxidation denitration technology [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32: 103236.
- [6] 刘新, 李娟娟. 臭氧氧化技术在烟气脱硝系统中的应用[J]. 煤炭与化工, 2023, 46(5): 130-132+142.
LIU Xin, LI Juanjuan. Application of ozone oxidation technology in flue gas denitrification system[J]. Coal and Chemical Industry, 2023, 46(5): 130-132+142.
- [7] 李东明, 陈盛建, 刘凯. PM_{2.5} 预荷电直通式袋滤器在山钢日照炼钢除尘中的应用[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(6): 61-64.
LI Dongming, CHEN Shengjian, LIU Kai. Application of PM_{2.5} pre-charged straight-through bag filter in Rizhao steelmaking dust removal [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(6): 61-64.
- [8] 张曼曼, 张德友, 方毅, 等. 湿法烟气脱硫硫酸石膏离心分离系统的开发及节能计算[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 369-371+377.
ZHANG Manman, ZHANG Deyou, FANG Yi, et al. Development and energy saving calculation of centrifugal separation system for waste acid gypsum in wet flue gas desulfurization [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 369-371+377.
- [9] 王辉. 高炉煤气干法精脱硫技术研究[J]. 当代化工研究, 2023, (18): 119-121.
WANG Hui. Study on fine desulphurization technology of blast furnace gas [J]. Modern Chemical Research, 2023, (18): 119-121.
- [10] 杨富廷, 王志强. 钢铁行业大气污染物深度治理技术探究[J]. 山东冶金, 2023, 45(3): 56-59.
YANG Futing, WANG Zhiqiang. Research on deep treatment technology of air pollutants in iron and steel industry [J]. Shandong Metallurgy, 2023, 45(3): 56-59.
- [11] 杨晓域, 黄亚继, 顾立群, 等. 半干法脱硫灰在湿法脱硫方面的实验研究[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3580-3585+3591.
YANG Xiaoyu, HUANG Yaji, GU Liqun, et al. Experimental study on wet desulphurization of semi-dry desulphurization ash [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(12): 3580-3585+3591.
- [12] ZHANG Yangguo, LI Qinghai, MENG Aihong, et al. Carbon monoxide formation and emissions during waste incineration in a grate-circulating fluidized bed incinerator [J]. Waste Management & Research, 2011, 29(3): 294-308.
- [13] 张文涛, 刘婷, 杨瑞波. 喷雾干燥半干法脱硫技术在玻璃厂中的利用探讨[J]. 玻璃, 2017, 44(10): 48-51.
ZHANG Wentao, LIU Ting, YANG Ruibo. Discussion on the utilization of spray dry absorption (semi-dry) desulphurization techlogy in glass factory [J]. Glass, 2017, 44(10): 48-51.
- [14] 卢熙宁. 半干法脱硫后的烧结烟气低温 SCR 脱硝催化剂的研发[D]. 北京: 北京科技大学, 2015: 5-14.
LU Xining. The research and development of low temperature SCR catalyst after sintering flue gas semi-dry desulphurization [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015: 5-14.
- [15] WU Xuecheng, YANG Yanping, GONG Yue, et al. Advances in air pollution control for key industries in China during the 13th five-year plan [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 123: 446-459.
- [16] 李金辉, 陶家杰, 于阳, 等. 脱硫剂喷吹耦合活性焦技术降低烧结烟气 SO₂ [J/OL]. 中国冶金: 1-9 [2023-10-20]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20230382>.
LI Jinhui, TAO Jiajie, YU Yang, et al. SO₂ reduction in sintering flue gas by desulfurizer injection and activated coke technology [J/OL]. China Metallurgy: 1-9 [2023-10-20]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20230382>.
- [17] 赵春林, 马子然, 王磊, 等. 燃煤掺烧可再生燃料发电烟气多污染物协同控制研究进展 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-19 [2023-10-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.230558>.
ZHAO Chunlin, MA Ziran, WANG Lei, et al. SO₂ reduction in sintering flue gas by desulfurizer injection and activated coke technology [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-19 [2023-10-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.230558>.
- [18] LYU Wei, SUN Zengqian, SU Zijian. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1314-1321.
- [19] 刘征建, 黄建强, 张建良, 等. 高炉高比例球团冶炼技术发展和实践 [J]. 辽宁科技大学学报, 2021, 44(2): 85-91.

- LIU Zhengjian, HUANG Jianqiang, ZHANG Jianliang, et al. Development and practice of high-pellet-proportion smelting technology of blast furnace [J]. Environment, Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2021, 44(2): 85-91.
- [20] 王国斌. 提高球团矿配比对高炉块状带料面形状和煤气流分布影响的研究[D]. 辽宁: 东北大学, 2015: 12-16.
WANG Guobin. Effect on high peller ration on burden layer profile and gas flow distribution in the lump zone of blast furnace[D]. Liaoning: Northeastern University, 2015: 12-16.
- [21] YUE Qiang, CHAI Xicui, ZHANG Yujie, et al. Analysis of iron and steel production paths on the energy demand and carbon emission in China's iron and steel industry[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 25(5): 4065-4085.
- [22] CHEN Yuan, FANG Yuan, FENG Weimin, et al. How to minimise the carbon emission of steel building products from a cradle-to-site perspective: A systematic review of recent global research [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133156.
- [23] ZHOU Hao, MA Pengnan, ZHOU Mingxi, et al. Experimental investigation on the conversion of fuel-N to NO_x of quasi-particle in flue gas recirculation sintering process[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1476-1486.
- [24] ZHI Yuanyu, FAN Xiaohui, GAN Min, et al. Reaction behavior of SO₂ in the sintering process with flue gas recirculation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016(7): 687-697.
- [25] FAN Xiaohui, WONG Guojian, GAN Min, et al. Establishment of refined sintering flue gas recirculation patterns for gas pollutant reduction and waste heat recycling [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 1549-1558.
- [26] LI Chaoqun, HAN Qingzhen, ZHU Tingyu, et al. Catalytic NO reduction by CO over Ca-Feoxides in the presence of O₂ with sintering flue gas circulation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(47): 20624-20629.
- [27] CHEN Yanguang, GUO Zhencheng, FENG Gensheng. NO_x reduction by coupling combustion with recycling flue gas in iron ore sintering process [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2011, 18(4): 390-396.
- [28] GAN Min, FAN Xiaohui, CHEN Xuling, et al. Reduction of pollutant emission in iron ore sintering process by applying biomass fuels[J]. ISIJ International, 2012, 52(9): 1574-1578.
- [29] GAN Min, FAN Xiaohui, JI Zhiyun, et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering; Influencing mechanism and emission reduction [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 42(1): 27-33.
- [30] 甘敏. 生物质能铁矿烧结的基础研究[D]. 湖南: 中南大学, 2012: 86-106.
GAN Min. Fundamental research on iron ore sintering with biomass energy[D]. Hunan: Central South University, 2012: 86-106.
- [31] 王新东, 侯长江, 田京雷. 钢铁行业烟气多污染物协同控制技术应用实践[J]. 过程工程学报, 2020, 20(9): 997-1007.
- WANG Xindong, HOU Changjiang, TIAN Jinglei. Application and practice of multi-pollutant cooperative control technology for flue gas in iron and steel industry[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(9): 997-1007.
- [32] 柳领君, 张玉亭, 魏全伟. 烧结/球团烟气活性焦脱硫脱硝技术研究[J]. 环境生态学, 2020, 2(9): 66-70.
LIU Lingjun, ZHANG Yuting, WEI Quanwei. Study on sintering/pellet flue gas desulfurization and denitrification technology of activated coke [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(9): 66-70.
- [33] 中国新闻网. 超低排放改造累计投资逾 1500 亿元 钢铁业减污降碳迎难而上[EB/OL]. (2022-09-06) [2022-12-12] <http://www.chinanews.com.cn/cj/2022/09-06/9845651.html>.
- [34] 中华人民共和国生态环境部. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[EB/OL]. (2019-04-29) [2022-12-12] https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html.
- [35] WANG Xindong, HOU changjiang, TIAN Jinglei. Application and practice of multi-pollutant cooperative control technology for flue gas in iron and steel industry J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(9): 997-1007.
- [36] LONG Hongming, DING long, QIAN Lixin, et al. Current situation and development trend of NO_x and dioxins emission reduction in sintering flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7): 3865-3876.
- [37] 何豪. 烧结协同处置垃圾焚烧飞灰的二恶英排放特性研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2022: 7.
HE Hao. Study on emission characteristics of dioxins from iron ore sintering co-treating MSW incineration fly ash[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2022: 7.
- [38] 涂正革. 降碳减污增效的协同研究——基于 SBM 方法对高能耗企业的硫碳减排效率测度[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 62(5): 161-174.
TU Zhengge. On the synergy of carbon reduction, pollution reduction and efficiency enhancement [J]. Journal of Central China Normal University (Humanities and Social Sciences), 2023, 62(5): 161-174.
- [39] 李新创. 中国冶金行业环保现状及发展前景分析[J]. 中华环境, 2021(8): 49-50.
LI Xinchuang. Analysis of environmental protection status and development prospect of metallurgical industry in China [J]. China Environment, 2021, (8): 49-50.
- [40] LIU Mengyue, LI Yue, XU Yue, et al. A multi-criteria group decision making framework for sustainability evaluation of sintering flue gas treatment technologies in the iron and steel industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136048.
- [41] ZHANG Youping, ZHOU Yusheng, LI Zhaoyi. Low coke rate ironmaking in blast furnace with hot gas injection[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2009, 16: 800-803.