

钢铁工业大气污染治理技术现状与发展趋势

陈晓萍

江苏永钢集团有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i5.3212

[摘要] 钢铁工业是主要的工业大气污染物排放源,其中以烟粉尘、二氧化硫和氮氧化物为主要的大气污染物。本文通过钢铁行业监测数据对主流的除尘技术、脱硫技术、脱硝技术的应用现状进行了分析,并根据三线表总结出各主流技术关键运行参数,分析了现有技术能耗高、协同性弱、固废利用率低等问题。结合超低排放相关标准论述了多污染物协同脱除技术、低碳冶金技术、智能化管控技术等先进技术应用的优点和发展趋势,研究旨在为控制污染和绿色转型提供技术基础,实现超低排放与节能减排协同发展。

[关键词] 钢铁工业; 大气污染; 治理技术; 超低排放; 协同治理

中图分类号: F416.31 **文献标识码:** A

Present situation and development trend of air pollution control technology in iron and steel industry

Xiaoping Chen

Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd.

[Abstract] Iron and steel industry is the main source of industrial air pollutants, among which smoke dust, sulfur dioxide and nitrogen oxides are the main air pollutants. This paper analyzes the application status of mainstream dust removal technology, desulfurization technology and denitrification technology through the monitoring data of iron and steel industry, and summarizes the key operation parameters of each mainstream technology according to the three-wire table, and analyzes the problems of high energy consumption, weak synergy and low solid waste utilization rate of the existing technology. Combined with the relevant standards of ultra-low emission, the advantages and development trends of advanced technology applications such as multi-pollutant collaborative removal technology, low-carbon metallurgy technology and intelligent management and control technology are discussed. The research aims at providing a technical foundation for pollution control and green transformation, and realizing the coordinated development of ultra-low emission, energy conservation and emission reduction.

[Key words] Iron and steel industry; Atmospheric pollution; Governance techniques; Ultra-low emissions; Collaborative Governance

引言

钢铁工业作为基础性重工业生产流程长,工序繁多,烧结、高炉和转炉等工序为排放大户。行业统计结果表明:2014—2023年重点钢铁企业吨钢SO₂及烟粉尘排放强度下降率分别达到81%、70.8%,取得显著的成效。现阶段全行业实施超低排放改造,但在复杂的烟气工况条件下,单一治理技术存在不足之处。系统地梳理了现有治理技术的应用现状并分析其存在的技术问题,预测出未来的发展趋势,以期今后钢铁工业大气污染精细化管理提供参考。引言字数: 172

1 钢铁工业大气污染物排放特征

1.1 主要污染物的种类与来源

在钢铁生产过程中,各环节均产生大量大气污染物。相对于其他行业,钢铁冶炼生产工艺流程长、连续性强,所产生污染物排放量大、构成复杂且工况波动大。其中,烟粉尘主要在烧结筛分、高炉炼铁、转炉炼钢及物料转运等工艺中产生。主要为矿物原料和冶炼金属等的粒状物。其粒径跨度广,尤其以细微颗粒物含量多而著称,很容易被滞留于空气中并扩散^[1]。SO₂主要是由于烧结中燃料燃烧过程中的硫以及原材料中的硫在高温氧化条件下形成的。其排放多少直接受原煤、烧结矿的含硫量等因素的影响。NO_x主要是在烧结与高炉热风炉等环节形成。这是因为在这些环节中,由于高温促使空气中的氮发生了氧化反应而产生的热型NO_x。同时在烧结时由于高温作用还会生成微量有毒有害物

质如重金属与二噁英等。该物质很难分解并且对人体的生物毒性大，所以会破坏大气生态环境，对生态环境的危害性很大^[2]。

1. 2 污染物排放行业数据特征

随着国内近年来日益严格的环保管控，钢铁企业全面实施超低排放，污染物排放总量持续下降。2024年底我国已经完成超80%的钢铁产能实现超低排放改造，改造的规模显著扩大，统计的重点钢铁企业的烟粉尘、SO₂及NO_x等指标平均值分别稳定在4.2mg/m³、28mg/m³以及45mg/m³以下，并且得到有效地控制。与传统的大胆生产相比，在实施超低排放改造后，通过增加相关末端治理措施和改变生产的燃烧方式等降低了吨钢污染的强度。但因钢铁产能比较大，在常态化的生产运行状态下，仍然有较高的排放量存在，加之冶炼烟气复杂多变以及治理技术改善更新较难等因素的影响下，我国钢铁企业大气治理任重道远^[3]。

2 钢铁工业大气污染主流治理技术现状

2. 1 颗粒物除尘技术

现有钢铁行业除尘工艺已经比较完善，目前行业内以采用袋式除尘、电袋除尘为主要的除尘手段，效率低下的静电除尘技术逐步退出市场。成熟的袋式除尘设备已经在各大钢铁企业广泛投入使用，该设备采用了性能优异的PTFE+PPS复合滤料，具备良好的耐高温及抗腐蚀能力，可以适应大多数的钢铁行业中的高含温气体和高含量粉尘气体并且带有一定腐蚀性的环境。同时配备了脉冲喷吹方式，可以在运行过程中有效地去除附着在滤袋表面灰尘，在运行过程中几乎全自动处理，能够保证达到除尘效率99.5%以上，并且稳定实现对排放的气体中颗粒物浓度值小于5mg/m³的要求，同时能够捕捉气体内部携带的微量重金属和二噁英等污染物，综合除尘能力较为明显^[4]。另外一种先进的除尘方法电袋除尘是充分利用了这两种先进工艺的技术优势，首先通过高压的方式实现了静电除尘快速地从气体中捕集到烟气中含有较多的粗粒尘粒，然后通过后期使用高精度滤袋捕捉更加细微的尘粒。对于一些高含尘浓度的环境条件来说具有很好的适用性。同时其运行过程中可靠性较好故障率相对较低，在一些大型烧结机以及大型高炉等重点部位有着广泛应用。

2. 2 烟气脱硫治理技术

针对钢铁烟气含尘量高、水蒸气含量大，烟气成分复杂，工况条件波动大的特点，目前，主流的脱硫技术大致有：湿法脱硫、半干法脱硫以及活性焦干法脱硫等三类，各种脱硫技术适用范围及脱硫效果各有千秋。

湿法脱硫以石灰石/石膏技术为最优且使用最多。其工艺系统的稳定性较高，对于负荷变动的承受能力比较强，可以达到98%以上的脱硫率，能够充分满足大型化钢铁机组超低排放控制的需求。但存在工艺废水多，浆液腐蚀性强导致管道和喷淋器等易发生锈蚀磨损，后期的运行维护成本高及设备更新费用大的问题。镁法脱硫具有反应速度快和适应性好等特点，在处理含有复杂成分的钢铁烟气方面效果明显。副产品可以回收提纯并得到资源化利用，经济效果好于传统的石灰石/石膏法，适合用于中小型的钢铁机组。

不需要庞大的污水处理系统，基建费用低、设备简单、便于老机组改造，脱硫率可达到85%~92%，但是脱硫副产物难以分离、成分复杂，资源化利用率较低。

活性焦干法脱硫属于当前比较先进的绿色环保新技术，主要基于活性焦的吸附、催化还原作用，同步对烟气中的SO₂、NO_x、烟尘、重金属和二噁英等污染物进行处理，能够实现多污染物协同治理。该技术全干法过程，无废水排放，不产生二次污染问题，且具有较高的脱硫效率，在95%以上，运行稳定，适应烧结、高炉等各种复杂烟气工况。而且被烟气吸附的活性焦可以通过热再生得到再次利用，解析出来的浓SO₂可以生产硫酸、硫磺等化工产品，副产物资源化利用率很高，满足钢铁企业绿色低碳发展的需求，已经逐步在大中型钢铁厂推广开来，作为超低排放背景下的脱硫技术发展的重要趋势^[5]。综上所述，目前各种类型的脱硫工艺均已成熟，基本上可以达到当前阶段的超低排放控制要求。

2. 3 烟气脱硝治理技术

脱硝环节污染物脱除难，是钢铁大气治理难点所在，目前主流脱硝技术有SCR选择性催化还原脱硝、臭氧氧化脱硝。其中，SCR选择性催化还原脱硝法工艺成熟，运行效果佳，是当前主流脱硝工艺，占据了70%以上市场占有率，在300~400℃条件下通过催化剂的作用将烟气中的NO_x还原为无害的氮气和水，可达到95%以上的脱硝效率，适合复杂成分的烧结机头烟气。然而烧结烟气含大量粉尘和硫物质，极易黏附和堆积于催化剂的表面，造成催化剂中毒或腐蚀，影响催化剂活性导致催化剂使用寿命短，需经常更换，后期维护运行费用高。臭氧氧化脱硝属于低温脱硝范畴，在较低温度下完成脱硝过程不需要对烟道气进行升温处理，适宜在温度低的情况下工作，并可以同时脱除其他气体污染物，工艺过程简单便于中小型烧结厂现有旧设备改造，但是其消耗的臭氧多耗能大运行费用高。

2. 4 主流治理技术关键参数对比

直观地表现各种主流治理技术的使用差异通过从治理效率，经济成本以及适用场所三方面的对比体现不同技术的优缺点提供客观的参考依据以便不同规模和类型的钢铁厂选择适合的工艺和技术。

表1 主流治理技术关键参数对比

治理技术类型	治理效率(%)	吨钢运维成本(元)	适用工序
袋式除尘	≥99.5	8.2	全生产工序
石灰石-石膏脱硫	≥98.0	15.6	烧结、高炉工序
活性焦干法脱硫	≥95.0	16.8	烧结、高炉全工序
SCR 脱硝	≥95.0	22.3	烧结机头工序
臭氧氧化脱硝	88.0-93.0	18.5	中小型冶炼工序

3 现有大气污染治理技术存在问题

3.1 单一治理技术适配性不足

目前国内大多数钢企采用分装置治理方式,除尘、脱硫和脱硝装置各自独立设置,呈分散布局,占地面积大,管线错综复杂,基建投资巨大。炼铁、炼钢烟气温度变化幅度较大、污染物之间耦合并叠加存在,并且烟尘粘性比较大,单一的烟气治理技术功能有限,不能同时实现多种污染物高效脱除,对于细微颗粒物和毒害气体的协同处理能力不强。在工况生产加减负荷的情况下,经常导致烟气波动频繁,部分企业末端排放口仍有排放超标情况出现,排放稳定性差。

3.2 资源利用及能耗管理较差

传统末端治理技术普遍面临着资源和能耗控制的欠缺,副产物固废资源化率低。湿法脱硫得到的副产物脱硫石膏和除尘器得到的冶炼烟尘,多数采取了简单的填埋和堆积方式处理,不仅浪费了矿产资源,而且堆放过程中还极易对土壤、二次扬尘带来污染。各环保工艺设备能耗都比较高,SCR脱硝需要热能对烟气升温,臭氧脱硝耗电多,风机及喷淋循环等都需要长时间运行,能耗损失巨大。统计表明,重点钢企环保设备的耗能占整个耗能的6.3%,高耗能压缩利润,降低经济效益。

3.3 智能化控制水平良莠不齐

行业智能化管控水平不一而足,资金充沛的大型钢铁企业采用技术成熟、精度较高的在线污染物监测装置实现了对烟气排放指标全天候监测。而中小钢铁企业由于资金投入与技术水平受限等原因使用在线监测仪器设备测量精度不足传感器老化问题频繁出现存在数据采集滞后、分析滞后和反馈滞后等弊端,治理设备在目前大多采用固定模式进行工作缺乏智能化调节能力,无法依据温度和烟气浓度的变化及时作出反应调整工况,生产低负荷运行下依然满负荷运行,能耗高浪费现象严重整体精细化、智能化调控能力不足亟待提高。

4 钢铁工业大气污染控制技术未来的发展趋势

4.1 多污染物协同脱除技术普及

随着超低排放工作的深入推进,多污染物协同脱除技术将是主流方向,改变传统分段、单一的处理方式,重点发展一体化烟气治理设备,同步实现粉尘、硫化物、氮氧化物和重金属一体化脱除。其中采用镁法一体化脱除多项污染技术及活性炭吸附催化一体化脱除多项污染技术对复杂钢铁烟气适应性强,抗干扰能力强,可简化工艺流程,缩小设备占地,便于维护管理。相比传统分体式治理技术,协同治理技术可减少冗余的设施设备,降低15%~20%基建投资,并且运维人力节省,适应大小不同的钢铁生产企业,行业通用性很强。

4.2 低碳冶金源头减排技术提升

源头防治污染的思想逐渐取代末端治理,低碳冶金源头减排技术得到迅猛发展。短流程的电炉炼钢省去了烧结、高炉等工序环节,且使用废钢作为主要原料,其污染物比长流程减少了75%以上,清洁生产优势巨大。氢冶金以清洁的能源——氢气代替煤炭还原铁矿石,没有燃煤污染物的产生,可使碳排放减少30

%以上从源头上削减了大气污染物生成量。此外多数企业还在改进高炉喷煤技术,准确控制参数,将喷煤量增加到200 kg/t Fe,降低了焦炭消耗比例,减少了燃料燃烧所产生的污染物。

4.3 智能化绿色管控体系完善

采用大数据、物联网、智能传感等手段建立全过程的污染物监测系统,监控烟气、设备和能源等,实时监测温度和浓度以及功率,采用智能控制算法自动调节治理设备工况。引入智能清灰技术和低温节能脱硝工艺,按照生产需求调整运行功率,最大限度减少设备无效能耗。完善副产物利用体系,对副产物如脱硫石膏、除尘灰和废脱硝催化剂等进行回收利用处理,达到资源再循环,形成了减排—治理—回用模式。

4.4 低经济消耗环保材料的改良

耗材成本占钢铁污染治理运维成本的主要部分,重点针对滤料、脱硝催化剂等主要耗材进行研发和更新换代。对PTFE滤料采用物理改性和化学改性相结合的方法,优化综合性能指标,提高滤料的耐高温性、耐腐蚀性及抗氧化性,延长滤料的使用寿命,降低除尘耗材的使用成本;开发出具有抗硫和抗粉尘能力的复合式低温催化剂,解决了现有催化剂中毒问题且工作温度窗口较窄的问题,扩大了SCR技术的温度适应范围,降低升温烟气所消耗的热能。据行业计算,更新后环保材料能够使企业总体运维成本下降10%—18%,有效提升了治理设备稳定长期运行的经济合理性。

5 结束语

目前我国钢铁工业大气污染治理技术体系已经完备,主要的除尘、脱硫和脱硝技术成熟可靠,超低排放改造效果显著。但单一功能有限,能耗较高、智能化程度低仍是行业短板,未来以协同控制和源头减排为重点,推动一体化多污染物协同治理技术及低碳冶金技术和配套的智能化管控手段以及新的环保材料在钢铁工业的应用,降低治理成本,提高治理效率,实现环境保护控制与生产效益兼顾。继续优化钢铁工业的大气污染治理工艺,在钢铁工业中实现环境管理的低碳化、精细化以及绿色发展。

[参考文献]

- [1]冯媛,赵侶璇,刘冰燕,等.广西钢铁行业大气污染治理现状及控制对策建议[J].环境工程,2024,42(06):63-70.
- [2]董如鑫,李娜,李智洋.钢铁冶炼过程中的大气污染与治理措施[J].冶金与材料,2024,44(04):130-132.
- [3]贾超.钢铁行业典型大气污染物及其治理现状浅析[J].冶金标准化与质量,2024,62(01):28-31.
- [4]王兰英.钢铁行业大气污染治理科技发展分析与展望[J].能源环境保护,2024,38(03):65-73.
- [5]申光辉.钢铁冶金行业污染治理现状及措施探析[J].中国金属通报,2021,(08):5-6.

作者简介:

陈晓萍(1985--),女,汉族,江苏人,本科,工程师;研究方向:环境工程;企业。