

超低排放背景下钢铁行业烟气污染物排放特征及监测技术优化

田 浩

(大连市生态环境事务服务中心, 辽宁 大连 116023)

摘 要 随着超低排放政策的实施, 钢铁行业面临严格的环保要求。本文分析了钢铁生产过程中主要烟气污染物(如 SO_2 、 NO_x 、PM、CO 等)的排放特征, 揭示了其来源和排放规律。钢铁行业的污染物排放在高炉、转炉、烧结等工艺环节中具有波动性和复杂性, 受到多种因素的影响。针对这一问题, 本文提出了激光光谱、红外吸收法和物联网智能监测等多参数协同监测技术, 能够实时监测污染物浓度并进行精确分析, 结合污染治理技术与闭环管理系统, 钢铁企业可以实现污染物的实时调控和高效治理, 满足超低排放要求。

关键词 烟气污染物; 超低排放; 监测技术; 污染治理; 闭环控制

中图分类号: X757

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.06.026

0 引言

随着环境保护要求日益提高, 我国政府出台了一系列政策推动钢铁行业实现“超低排放”。《钢铁工业污染物排放标准》(GB 28662—2012)及《“十四五”工业绿色发展规划》明确要求钢铁行业大幅减少污染物排放, 尤其是二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)等。在这一背景下, 钢铁行业面临着极大的排放控制压力。传统的监测方法已难以应对复杂且波动较大的烟气污染物, 尤其是在高炉冶炼、转炉炼钢等高温环境下, 污染物浓度波动较大, 传统采样与分析方法无法提供实时、精准的排放数据^[1]。因此, 实时在线监测技术和智能化闭环控制系统逐渐成为解决钢铁行业排放问题的关键。

1 钢铁行业烟气污染物排放特征分析

1.1 钢铁行业的主要烟气污染物

在钢铁生产过程中, 烟气污染物的种类繁多, 主要包括二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)、一氧化碳(CO)及挥发性有机化合物(VOCs)。这些污染物的生成源自多种生产工艺和燃料的使用, 尤其是在高炉冶炼、转炉炼钢、烧结、球团等环节中。二氧化硫(SO_2)主要来源于煤、焦炭和矿石中含硫物质的燃烧, 尤其是转炉炼钢和烧结工艺中, SO_2 的排放量较为显著。氮氧化物(NO_x)则主要来自燃料高温燃烧过程中空气中的氮与氧反应所产生的氮氧化物, 尤其是在高炉和转炉冶炼过程中, NO_x 的排放量较为突出。颗粒物(PM)是钢铁生产中最常见的污染物之一, 尤

其在烧结工艺和高炉炉料操作中, 粉尘的排放量非常可观, 通常在几百毫克/立方米以上^[2]。颗粒物的细小颗粒还会对环境和人体健康造成严重危害。钢铁行业中产生的CO主要来源于焦炭和其他燃料的不完全燃烧, 特别是在高炉冶炼过程中, 其排放量也是一个不容忽视的问题。此外, VOCs虽然在钢铁生产中相对较少, 但在某些特定工艺环节, 如烘干、加热等过程中, 也可能产生。钢铁行业的这些主要污染物在不同的工艺和生产阶段有不同的排放特征, 因此, 深入了解这些污染物的特性, 对于制定有效的排放控制策略至关重要。

1.2 烟气污染物的排放特征分析

钢铁行业的烟气污染物排放特征具有一定的复杂性, 主要体现在污染物浓度的波动性、工艺阶段性及多样性等方面。不同的生产环节、设备和燃料的使用都会直接影响烟气中污染物的生成和排放。例如, 在高炉冶炼过程中, 温度高达1 500℃以上, 煤气成分复杂, 排放的主要污染物为CO、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 以及颗粒物, 其中CO的排放尤为显著, 高炉煤气中的CO浓度可达到40%以上, 而 NO_x 和 SO_2 的浓度则随着煤气中氮和硫的含量变化而波动。在转炉炼钢过程中, 炉料中的含硫成分与氧化还原反应产生的 SO_2 是主要排放物, 同时 NO_x 和颗粒物也会在转炉加热和吹氧过程中大量生成^[3]。在烧结工艺中, 煤的燃烧和矿石中铁的还原反应是颗粒物和 SO_2 的主要来源, 且颗粒物浓度往往较高, 通常在几百毫克/立方米左右, 这对环境空气

质量构成了较大的压力。不同生产阶段的污染物排放特征和浓度差异要求钢铁企业在实施超低排放时,采取针对性的治理和监测措施。此外,钢铁生产中污染物的排放还与生产负荷、设备运行状态及气候条件等因素密切相关。例如,生产负荷的波动会直接导致烟气中污染物的浓度变化,通常在负荷较大时,污染物的排放浓度会上升,尤其是 NO_x 和 SO_2 的浓度。因此,钢铁行业需要根据各工艺环节的具体排放特征,合理设计污染物的监控与治理方案,以满足日益严格的环保要求。

2 钢铁行业烟气污染物监测技术现状与挑战

钢铁行业的烟气污染物监测技术近年来得到了快速发展,但由于该行业烟气成分复杂,生产过程中工况波动大,现有监测技术仍面临诸多挑战。监测技术的精准性、实时性以及适应性等因素直接影响到污染物排放的有效控制与超低排放目标的实现。以下是钢铁行业烟气污染物监测技术现状与面临的挑战,分为三大方面进行论述。

2.1 传统烟气监测技术的局限性

传统的烟气监测技术多依赖于烟气采样后分析的方式,这种方法存在一定的时滞性,难以实现对污染物排放的实时监控。在钢铁行业的生产过程中,烟气中污染物的浓度波动较大,尤其是在高炉冶炼、转炉炼钢、烧结工艺等过程中,污染物的排放受多种因素的影响^[4]。传统监测方法主要包括烟气采样法、化学分析法和物理分析法,如使用气体分析仪、滤膜法测定颗粒物浓度等。以二氧化硫(SO_2)的监测为例,传统的气体分析仪通常只能对 SO_2 进行周期性采样分析,响应时间较长,这对于高污染排放的及时调整无能为力。

2.2 实时在线监测技术的广泛应用与技术瓶颈

随着环保要求的提高,钢铁企业逐渐引入实时在线监测技术,旨在提供快速、准确的污染物浓度数据。激光光谱分析法、紫外吸收法、红外分析法等技术逐步成为烟气污染物监测的主流手段。激光光谱分析技术尤其受到广泛关注,它通过分析激光与烟气中分子相互作用的特性,能够快速识别并精确测定 SO_2 、 NO_x 、CO 等气体浓度。具体到钢铁行业,激光光谱法的应用使得对 NO_x 浓度的实时监测变得有可能, NO_x 在高炉和转炉等高温工艺中释放大,采用激光光谱技术可以在高温、高湿的环境下稳定工作,且能够满足 SO_2 、CO 等气体监测的需求。然而,尽管这些技术的精度较高,仍然存在一些技术瓶颈。例如,激光光谱技术的设备

价格较高,且对环境中的尘埃、烟雾等颗粒物具有一定的干扰作用。紫外吸收法和红外分析法虽然能够较为精确地监测二氧化硫和氮氧化物,但在高浓度污染物的环境中,其响应速度可能受到限制,无法实现及时的污染源追踪与调整。

2.3 环境复杂性与监测设备适应性挑战

在钢铁生产过程中,尤其是在高炉冶炼、转炉炼钢和烧结工艺中,烟气成分复杂且波动剧烈,这对监测设备提出了极高的适应性要求。钢铁厂烟气中的污染物浓度不仅因生产工艺不同而有较大差异,而且因工艺波动、原料配比和燃料质量等因素的变化,烟气成分也会实时变化^[5]。例如,高炉炼铁时,炉温高达 $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 左右,烟气中二氧化碳(CO_2)和水蒸气的浓度较高,且颗粒物浓度可能达到数百毫克每立方米,而这些气体成分对传统的监测仪器和传感器的稳定性带来了挑战。同时,钢铁厂周围的环境温度、湿度等因素也可能对监测设备的准确性产生影响。

3 钢铁行业烟气污染物监测技术优化方案

3.1 多参数协同监测技术应用与系统优化

在钢铁行业中,由于生产过程中的多变工况和复杂的烟气成分,单一污染物监测技术往往难以实现全面和精准的排放监控。为了解决这一问题,多参数协同监测系统通过综合多种检测技术,在提升检测精度的同时提高了应对复杂工况的能力。多参数监测系统通过结合激光光谱法、红外吸收法、紫外吸收法等技术,可同时监测 NO_x 、 SO_2 、CO、颗粒物等主要污染物的浓度变化^[6]。激光光谱技术,尤其是差分吸收光谱(DOAS)技术,已被广泛应用于钢铁生产中,特别是高炉和转炉冶炼阶段。在这些高温环境下,烟气温度可达到 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 到 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$,而激光光谱技术在此范围内的测量精度可达到 $\pm 3\%$ (相对浓度)。

例如,在转炉炼钢过程中, NO_x 浓度通常波动在 $2\ 000 \sim 5\ 000\ \text{ppm}$,使用激光光谱法可以在几秒钟内获取实时数据,具有较高的时效性和精度。红外技术则适用于 CO 的测量,钢铁厂中高炉煤气中的 CO 浓度可达到 40%,红外技术能够准确监测其浓度变化,并提供准确的排放数据。由于钢铁生产中烟气的湿度和温度变化剧烈,传统监测设备的可靠性和稳定性较差,因此将多种技术手段结合,能有效提升整体监测系统的综合能力。此外,系统还能够同时采集烟气中的湿度、温度等辅助数据,进一步提高了监测结果的可靠性,并可对污染物排放的动态变化进行精准控制,为钢铁企业满足日益严格的超低排放标准提供有力支撑。

3.2 大数据与物联网智能化监测技术的应用

随着物联网技术的成熟,钢铁行业的污染物监测正逐步迈向智能化、自动化方向。物联网技术通过将大量的传感器布设于钢铁厂的各生产环节,实时收集烟气中主要污染物(如 NO_x 、 SO_2 、 CO 、颗粒物)和工艺数据(如温度、湿度、气流速度等)。这些传感器不仅可以准确测量各类污染物的浓度,还能监控工艺参数,系统自动将数据传输至云平台,通过大数据分析,实时调整污染治理设备的运行状态。以 SO_2 为例,传统的 SO_2 监测设备通常需要进行周期性取样和分析,而基于大数据分析的智能监测系统可将 SO_2 的实时数据与脱硫系统(如湿法脱硫、干法脱硫)的运行数据关联,自动调节吸收塔的运行参数,提高脱硫效率^[7]。

例如,钢铁企业采用智能化脱硫系统时,通过实时监测 SO_2 浓度(通常在 $150 \sim 300 \text{ ppm}$),系统能够根据 SO_2 浓度自动调节吸收液的浓度和流量,确保脱硫效率在 90% 以上。此外,钢铁厂的 NO_x 和颗粒物浓度波动较大,通过与 SCR(选择性催化还原)系统的智能联动,系统能够动态调节氨气与氧气的投加量,确保 NO_x 的去除率达到 90% 及以上。基于物联网技术,钢铁企业不仅能够实时监测各项数据,还能通过云平台进行集中分析,提前预测污染物排放的趋势,并在超标之前采取有效措施,从而有效防止排放超标事件发生。智能监测系统的引入,将极大地提高钢铁企业对污染物的监控与治理能力,同时提升排放合规性和环境治理水平。

3.3 烟气治理与监测技术深度融合与优化闭环管理

钢铁行业的污染物治理技术主要包括脱硫、脱氮、除尘等手段,而实现污染物的有效治理,依赖于先进的监测技术和闭环控制系统的深度融合。在钢铁生产中,脱硫装置的运行效率直接与 SO_2 浓度密切相关。湿法脱硫技术被广泛应用于钢铁厂,通常采用石灰石-石膏法,该方法要求烟气中的 SO_2 浓度在经过处理后必须降至 80 mg/m^3 以下^[8]。通过将 SO_2 的实时监测数据与脱硫系统的控制系统相结合,能够在 SO_2 浓度超标时自动调节脱硫塔的吸收液浓度和喷雾量,确保脱硫过程的高效性。以某钢铁厂为例,其湿法脱硫系统的 SO_2 去除效率可达到 98% 以上,在实际运行中, SO_2 浓度可控制在 50 mg/m^3 以下。

此外, NO_x 的治理也同样依赖于实时监测与闭环控制系统的联动。钢铁厂常用的 SCR(选择性催化还原)技术,通过向烟气中喷射氨气与 NO_x 反应,减少 NO_x 排放。通过将实时 NO_x 监测数据与 SCR 系统的运行参数进

行联动,当 NO_x 浓度超过设定阈值时,系统自动调节氨气的投加量和催化剂的流量,从而实现 NO_x 的高效去除。实际应用中,钢铁企业通过这种智能闭环控制系统,可以将 NO_x 浓度控制在 $50 \sim 100 \text{ ppm}$,满足超低排放的要求。同时,钢铁厂中的除尘系统与实时颗粒物监测系统的联动也能有效减少颗粒物的排放。例如,通过自动调整除尘系统的滤袋清洗频率、风速等参数,钢铁企业能够保持颗粒物的浓度低于 30 mg/m^3 ,显著降低空气中的颗粒污染。通过这种监测与治理技术的深度融合,钢铁行业能够更精准地掌控污染物排放,实现更加高效的污染治理,助力企业顺利达到超低排放的环保标准。

4 结束语

钢铁生产中的烟气污染物排放特征复杂且波动大,传统监测技术已无法满足实时、精准的排放要求。因此,采用激光光谱、红外吸收、紫外吸收等先进技术,结合物联网智能监测系统,成为实现超低排放的关键。通过多参数协同监测与智能闭环控制系统,钢铁企业能实时获取污染物浓度数据,并自动调整治理设备,从而提高排放治理效率。同时,脱硫、脱氮、除尘等技术的深度融合,进一步优化污染物排放控制,确保环境保护目标的实现。未来,随着技术的发展,钢铁行业的监测与治理系统将更加智能化、自动化,为行业的绿色、低碳转型提供有力支持,推动钢铁行业实现可持续发展目标。

参考文献:

- [1] 陶泓帆,黄妍,李思密,等.基于超低排放典型工艺的钢铁烧结模拟烟气冷凝特性研究[J].环境科学研究,2023,36(07):1297-1305.
- [2] 夏青,刘通浩,尤洋,等.钢铁企业超低排放有组织排放评估监测常见问题与建议[J].环境保护,2023,51(05):36-39.
- [3] 陈妍.河唐钢球团烟气“超超低”排放工艺技术应用[J].中国冶金文摘,2023(05):52-54.
- [4] 惠安平.钢铁行业超低排放改造烧结球团有组织烟气治理技术方案研究[J].山西冶金,2023,46(11):198-200.
- [5] 蔺鑫,余明博,徐智章.钢铁企业超低排放改造管理模式研究[J].冶金经济与管理,2024(04):8-12.
- [6] 同[5].
- [7] 吕鹤,李晓新.钢铁企业超低排放改造的实施路径[J].中国资源综合利用,2023,41(03):178-184.
- [8] 张晓晨,常德政,施琪,等.钢铁行业超低排放改造可行性技术研究[J].河南建材,2024(01):41-44.