

冶炼过程污染物排放控制与环保治理研究

陈冬冬¹ 魏明鑫²

1.安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

2.安阳钢铁集团有限责任公司综合利用开发公司, 河南 安阳 455000

[摘要]冶金工业是基础性支柱产业,支撑工业化和城市化的同步发展带来了严重的多重介质大气、水、土污染问题。文中以“排放特征-控制技术-综合治理-效益分析”的脉络展开,全面阐述了重金属多介质联合排放的特点及其空间耦合风险,回顾了大气污染物、废气液固三态物质治理技术的研究进展和应用现状和发展趋势,从环境管理规定、清洁生产、资源回收利用以及智能化监控管理四个方面分析了综合防治体系的构建策略,综合评价主要污染物削减程度和技术成本效益情况。研究发现,冶金工业的污染物排放治理正在由末端治理转为全过程防治、由单一处置转向综合治理的发展路径,但区域发展不平衡、小微企业达标难以及长期运行维护保障能力弱等问题仍然制约着行业发展,要在制度、技术和市场三方面合力解决。

[关键词]冶炼过程; 污染物排放; 控制技术; 环保治理; 资源循环利用

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19778

中图分类号: TF815

文献标识码: A

Research on Pollutant Emission Control and Environmental Protection Governance in Smelting Process

CHEN Dongdong¹, WEI Mingxin²

1. Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455133, China

2. Comprehensive Utilization and Development Company of Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455000, China

Abstract: The metallurgical industry is a fundamental pillar industry that supports the synchronous development of industrialization and urbanization, which has brought serious problems of multi medium air, water, and soil pollution. The article is developed in the context of "emission characteristics - control technology - comprehensive governance - benefit analysis", comprehensively elaborating on the characteristics and spatial coupling risks of heavy metal multi-media joint emissions. It reviews the research progress, application status, and development trends of atmospheric pollutants, waste gas liquid-solid three state substance treatment technology, and analyzes the construction strategy of the comprehensive prevention and control system from four aspects: environmental management regulations, clean production, resource recycling and utilization, and intelligent monitoring and management. It comprehensively evaluates the degree of reduction of major pollutants and the cost-effectiveness of technology. Research has found that the treatment of pollutant emissions in the metallurgical industry is shifting from end of pipe treatment to full process prevention and control, and from single disposal to comprehensive treatment. However, problems such as uneven regional development, difficulty in meeting standards for small and micro enterprises, and weak long-term operation and maintenance capabilities still constrain the industry's development, and require joint efforts in institutional, technological, and market aspects to solve them.

Keywords: smelting process; pollutant emissions; control technology; environmental governance; resource recycling and utilization

引言

有色金属冶炼是国民经济发展的重要支撑产业之一,在 2025 年我国十种有色金属产量达到 8175 万 t,精炼铜和原铝的全球产量市场份额达到大约分别为 47%和 60%。巨大的生产规模带来沉重的环境污染负担-高强度冶炼过程产生大量的重金属、二氧化硫、氮氧化物以及固废,持

续对大气、水体及土壤进行破坏,甚至危及生态环境安全和人民群众的身心健康。近年来,在“双碳”战略与生态文明建设双重推动下,冶炼行业迎来了史上最大的绿色升级压力,氧化铝、电解铝、铜冶炼等重点环节的节能减碳改造已经从“选择题”变为了“必答题”。环境要求和排放门槛不断提升。怎样在保证工业安全、生产需要的情况

下,做到废气排放大幅度减少以及资源利用率大幅提高成为环境保护的重要问题。

1 冶炼过程污染物排放特征与来源解析

冶炼工序污染物种类多样,形式各异,可分为大气污染物、废液污染物和固态污染物三类,同时其在重金属元素迁移过程中有明显的多元介质联合释放特点。大气污染物质主要来自富氧烧结、熔化、鼓风以及其他高温生产过程中产生的大量二氧化硫氮氧化物粉尘以及气态或者颗粒态的铅、镉、汞、砷等重金属等,废液污染物质来源于烟气洗涤净化、淋洗渣水冷、机械冷却、湿法冶金等工序所产生的含有大量重金属离子、悬浮物、酸性物质等;固体废弃物主要有冶炼渣、除尘灰、污酸处理污泥、阳极泥等多种类型,组成成分也随着不同的生产工艺和不同的原材料有所区别。

一项对有色金属冶炼及加工行业(NFMSPI)的研究发现有37%企业废水中同时检测出镉、汞、砷、铅、铬5种重金属,另外也有23%企业的废气中有五种重金属被检出,体现了重金属排放介质贯穿性的特点;有色金属矿山采选行业(NFMMI)排放则以废水为主,有65%的废水样本含有这五种重金属。而高排放城市集中在“胡焕庸线”东侧的主要成矿区带之中,并且与高水体密度区、耕地密集区以及大气污染热点区的空间重合度较高,在华北和华南地区形成多个媒介交叉污染风险区域。

国内典型场地调查也印证了这些特点。江西省赣南地区一稀土冶炼场地土壤中的铅镉等含量随着冶炼年限的增加而逐年累积,在垂直方向上也已经超出了地表的范围,存在向地下的地下水扩散的风险。对于这样一种涉及多种污染介质的长距离迁移的污染物,治理就必须打破单一污染介质的管理模式,建立水气固三结合的综合管理模式来应对。

2 污染物排放控制技术

2.1 大气污染物控制技术

冶炼废气中有害物质主要是 SO_2 、 NO_x 、颗粒物以及含有重金属的粉尘等。石灰石-石膏湿法脱硫工艺比较成熟可靠,适用于大规模冶炼行业;双碱法、氧化镁法对低温烟气与小规模系统更为适用合理。脱硝方法仍然是选择性催化还原(SCR)工艺为主流技术,低温SCR催化剂的研发使得中低温烟气脱硝效果明显提高。

脱硫脱硝一体化技术日益受到重视。以活性炭/焦为基的脱硫脱硝一体化技术利用吸附与催化共同作用在同一设备中同时去除 SO_2 、 NO_x 及具有除尘、除重金属双重

功效,在钢铁烧结工艺以及一些铜冶炼厂有工程应用示范案例。一钢铁公司使用分段交错式活性炭脱硫脱硝一体化技术之后, SO_2 排放浓度小于 $35\text{mg}/\text{Nm}^3$, NO_x 排放浓度小于 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$,粉尘排放浓度小于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$,完全满足超低排放要求。同时复合陶瓷纤维滤袋除尘脱硝一体化技术可以将除尘和SCR脱硝结合在一个过滤组件里,减少烟气净化环节。

2.2 废水与固体废物控制技术

冶炼废水治理主要针对重金属高效去除及酸性废水的安全处置。传统的化学沉降法投加量大、污泥量多、贵金属回收难。而纳米零价铁依靠表面富集以及还原双重作用下对铅、镉、砷等有很好的富集去除效果,纳米零价铁具有高的比表面积特点开辟了冶炼废水处理的新途径。对于污酸处理,铅锌冶炼污酸资源化技术采用“重金属净化—氧化锌中和—除氟氯”三个阶段,重金属去除率在98%以上,90%以上污酸得以回用,中和渣生成较少。含氰废水中,黄金冶炼含氰废水中金、铜、锌等金属回收与水资源循环再利用技术取得实质进展。

固体废弃物管理,冶炼渣综合利用由降量化填埋变为高效回收。在锑冶金行业中,湖南冷水江市应用“中性中低温连续盐析技术”对砷碱渣进行无害化处理解决砷与锑再利用的问题,使低砷渣近乎“零”填埋、提纯废渣作为建筑原料;铜冶炼企业也采用浸出、熔炼、电解等方式回收铜及其铂、钯、金、银等多种金属,达到固废“吃干榨尽”的效果。铜冶炼废物已经成为环境方面的“宝藏”。

3 冶炼环保综合治理体系

3.1 环境政策标准与管理制度建设

污染物排放控制离不开制度保障。“十四五”期间,冶炼行业环境管理持续强化标准引领。2025年4月1日,《钢铁工业烧结废气超低排放治理工程技术规范》正式实施,为工程设计、施工、验收及运行维护提供系统技术规范。生态环境部同步推动限制类和淘汰类技术目录编制,引导技术迭代升级。管理制度层面,国家重点行业污染物减排政策将源头预防、排放减量和污染治理统筹推进,明确构建全过程全链条源头防控体系,累计制修订相关政策法规与技术标准逾28份。这些制度安排为冶炼行业环保治理提供了从宏观政策到微观规范的完整支撑。

3.2 清洁生产与源头减量措施

源头削减是最有效的减少污染物排放方式。生态环境部部长提出,随着清洁能源改造、短流程电炉炼钢等新技术的应用,企业的能源消耗以及污染排放都大幅度地减少

了,中国已经形成了世界最大的清洁钢铁生产和加工基地。有些企业对艾萨炉与转炉生产进行调控,形成灵活联动的工作模式,不需要增加新的环保设施就可以达到降耗减排的效果。“两段短流程炼铜工艺”取消了阳极炉环节,在很大程度上节约了综合能耗并减少了污染物排放。到2025年,铜冶炼综合能耗达到191千克标准煤/吨,比去年降低了2.9%，“十四五”期间每年降低2.2%，清洁生产节能减排成效开始显现。

3.3 资源循环利用与废物资源化

资源循环利用为冶炼行业减排降碳协同发展提供主要途径,在对冶炼渣进行资源化的研究中,黄金冶炼渣采用“两步法综合回收有价金属组分”,一段焙烧挥发金银铜铅锌、二段焙烧还原铁并磁选制备海绵铁的方法,在该方法下各有效元素的挥发率高达68%~97%以上,从而完成危险废物转向为有价值物质的过程,株洲冶炼集团“吃干榨尽”推进工作组整理出整个厂区渣物料来源及组成,有针对性地改进目前的工艺,实现了整个公司锌回收率的提高,铅渣含锌量降低明显,累计创收达到1500万元以上,给公司的固废资源化提供了一个可供借鉴的管理模式。另外,铜铅锌联合冶炼以及多源固废同步处置技术在国内五矿铜铅锌基地也已经得到很好的推广使用,在铜铅锌联合冶炼、多源固废综合利用等方面的技术进步都为我国有色金属资源的有效利用和绿色冶炼技术创新提供强有力的技术支持。

3.4 全过程环境监测与智能管控

智能化监测技术的应用渗透已经改变了冶炼产业环境监管运作方式,在碳排放管控上,中国铜业等大型骨干企业建立了全生命周期管理体系下的碳排放监测平台,可以精确到每一个工序节点上的碳排放情况,并及时向工艺调整以及能源管控上传信息;在重金属排放监测中,随着企业主动公开环境信息水平及在线监测数据质量不断提高,生态环境监测网覆盖面广、精准度高的特点也越来越明显,对于区域环境风险预判来说有了强有力的依据支撑。广西等有色金属产业大省已经开展了一场规模较大、范围

较广的涉重金属环境安全隐患大排查行动,建立动态更新的涉重金属污染源清单制度,使环境保护由事后治理变为事先预防。同时,有色金属行业的绿色公共服务平台也建设了起来,在平台内可以查询到企业的环评、排污许可、自行监测等信息,这是整个行业绿色发展信息化的基础保障。

4 治理效果评估与改进策略

4.1 主要污染物减排效果分析

近年来,冶金工业主要大气污染物削减取得积极进展。2025年一季度,全国城市平均PM_{2.5}浓度下降幅度达到5%,SO₂、NO₂、PM₁₀浓度均下降或者持平。从产业结构和技术方面来说,我国有超过80%的粗钢产量已实现超低排放改造,有近两亿吨的焦化、一亿四千万吨的水泥产能也已经实现改造。在有色金属冶炼方面,全国十余个铜冶炼PS转炉实现了大规模的绿色转型,竖罐炼锌已经如期关停,重金属粉尘无组织排放大幅减少。工业炉窑深治理和淘汰落后产能已经产生看得见摸得着的效果。

4.2 环境质量改善与绩效评估

减污措施对于区域环境质量的作用具有空间差异性以及时滞效应。在重金属排放量大的地区附近进行检测发现,在短期内虽然能迅速减少大气沉降浓度,但是由于土壤重金属累积效应无法逆转的趋势和水体受到沉积物再次释放的影响致使水体净化缓慢。而绩效考核存在的难题是如何构建由企业的污染物排放管控到最终人体健康的环境质量变化之间的追踪因果链条。目前主要是基于排放量减少的比例来进行考核,缺少对生态系统反应及人类健康获益程度等指标的具体化描述,以后要完善对于环境健康的衡量。

4.3 技术经济可行性评价

环保治理技术推广应用遇到的最大难题是经济上的合理性问题。通过全国80%以上的粗钢产能完成超低排放改造的数据来看,大型企业在规模和资金上有优势,单位吨粗钢环保改造花费可以处于合理范围内,但是对于年产量低于百万吨的中小型企业来说,进行深度脱硫脱硝改造的一次性投入占当年收入比重比较大,投资大回报慢,

表1 冶炼过程主要污染物控制技术概要

污染物类型	代表性控制技术	技术特征与要点	减排效果
二氧化硫	活性炭/焦脱硫脱硝一体化	吸附-催化协同,同步脱硫脱硝除尘	SO ₂ 排放浓度<35mg/Nm ³
氮氧化物	低温SCR脱硝/复合陶瓷滤管	中低温适用,除尘脱硝一体化	NO _x 排放浓度<50mg/Nm ³
重金属烟尘	高效袋式除尘协同化学捕集	多级过滤与吸附联合	颗粒物浓度<10mg/Nm ³
污酸/含重金属废水	硫化沉淀+纳米铁深度处理	重金属脱除与酸资源化协同	重金属脱除率>98%,90%污酸回用
冶炼渣/砷碱渣	中温连续盐析+有价组分回收	无害化与高值化同步	近零填埋,高纯度单质砷回收

使得企业面临很大的财务困境,对它们今后的发展产生巨大阻力。从企业的技术和经济方面来说,应该采取分步走、逐步实施的办法,在不影响排出物达标的情况下达到投资和产出的最佳效益比。而固废资源化过程中,新技术的应用经济效果非常好。在有价金属市场价格较为合理的情况下,冶炼渣中有色金属以及贵金属如铜、锌、铅及金、银、铂族金属等回收再利用项目一般具有较快的盈亏平衡点,对于这类项目来说,在环境保护和经济利益中寻找最佳平衡点是提高企业发展积极性的重点。

4.4 长效运行与持续改进机制

保证环保设备“建得起、稳得住、转得久”更加困难。目前存在的难点有如下几个方面:一些企业的脱硫脱硝装置运行负荷频繁变化、催化剂使用寿命低于设计要求、废水处理药剂投放精准度低造成运行费用较高、危险废物综合利用产品的销售渠道较窄等问题。持久稳定的运行方式需要从三个方面入手:一是体制上要健全排污许可量动态调整及超标追查机制并将其与环保设备运维绩效、排污权交易和差别电价挂钩;二是技术上要推行物联化实时监控以及预知性保养,做到工艺条件自动调节;三是市场化要扩展循环再生产品质量认证及购买补贴范围,打通物质流循环闭合回路。

5 结束语

冶炼过程污染物排放控制与环保治理是一个包含技术攻关、政策完善以及产业升级等方面的复杂而庞大的系统项目。我国冶炼业也已经初步建立起全方位全过程的污染防治体系,大气污染物减排成效显著,工业废水及固废处置利用率逐年提高,清洁生产和源头减量的理念逐渐植根于行业发展之中。然而重金属多种介质复合污染的空间累积效应、中小企业的改造资金瓶颈、长期稳定的运

行保障机制缺失等方面,依然是阻碍行业绿色发展的顽疾,必须加强对水资源、大气、固体废物的联防联控基础性工作、推广集成应用典型示范。突破某一个因素限制性的困境。根据不同行业以及不同规模的企业,制定差异化污染治理的技术方案及政策措施,防止一刀切,充分利用好数字化、智能化赋能,使环境监管由“人治型”转向“数治型”,打造涵盖污染物源头、传输途径及环境敏感点的全过程智慧监管系统,只有创新引领、制度保障、营商环境三股力量共同发力,才能做到高质量发展和高水平保护深度融合。

[参考文献]

- [1]邢奕,张辉,刘应书,等.钢铁工业烟气脱硝技术应用进展及前景[J].工程科学学报,2023,45(9):1412-1423.
- [2]王庆林.烧结烟气半干法脱硫后SCR脱硝中温设计低温运行研究与应用[J].现代矿业,2023(10):185-189.
- [3]杨森林,杨继荣,段方立.高温除尘脱硝一体化联合钠碱法脱硫工艺在锂冶炼转型窑烟气净化中的应用[J].绿色矿冶,2024(6):72-78.
- [4]许宝辉,李岩,阎学文,等.有色冶炼生产中高浓度含砷废水治理技术[J].广州化工,2023,51(23):134-137.
- [5]李鸿鹄,彭喜燕,安森,等.硫酸活化硫酸亚铁絮凝污泥对冶炼烟气中Hg⁰的脱除研究[J].中国环境科学,2023,43(11):5606-5615.

作者简介:陈冬冬(1991—),毕业于哈尔滨理工大学金属材料专业,就职于安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司,冶炼过程及控制助理工程师;魏明鑫(1991—),毕业于郑州航空工业管理学院电气及自动化专业,就职于安阳钢铁集团有限责任公司综合利用开发公司,电气助理工程师。