

有色冶金行业大气多污染物全过程控制耦合技术

吴联盟

北京铝能清新环境技术有限公司 北京 100000

摘要: 随着我国生态文明建设的深入推进和“双碳”战略目标的提出,有色冶金行业作为高能耗、高排放的重点工业领域,其大气污染治理面临前所未有的挑战。传统末端治理模式已难以满足日益严格的环保标准与资源高效利用需求。本文系统分析了有色冶金典型工艺(如铜冶炼、铅锌冶炼、铝电解等)中SO₂、NO_x、颗粒物、重金属(As、Pb、Hg、Cd等)、二噁英及氟化物等多污染物的产生特征与协同生成机制;在此基础上,提出“源头削减—过程控制—末端深度净化—资源化利用”四位一体的全过程控制理念,并重点阐述了基于多污染物协同脱除、能量梯级利用与副产物资源化的耦合技术体系。最后,对有色冶金大气污染控制技术的发展趋势进行了展望,为行业绿色高质量发展提供理论支撑与技术参考。

关键词: 有色冶金; 大气多污染物; 全过程控制; 耦合技术; 协同治理

引言

有色金属工业是我国国民经济的重要基础产业,涵盖铜、铅、锌、镍、钴、铝、镁等多种金属的采选、冶炼与加工。然而,该行业在生产过程中伴随大量能源消耗与复杂化学反应,不可避免地大气环境排放多种污染物。据生态环境部统计,有色冶金行业贡献了全国工业源SO₂排放量的约15%、颗粒物的8%,以及重金属(如铅、砷、汞)排放的30%以上,是大气复合污染防治的重点对象。近年来,《大气污染防治法》《“十四五”节能减排综合工作方案》《有色金属行业碳达峰实施方案》等政策法规相继出台,对有色冶金企业提出了“超低排放”“近零排放”甚至“负碳排放”的更高要求。传统“一塔一污”式的末端治理技术(如石灰石-石膏法脱硫、SCR脱硝、布袋除尘等)存在设备冗余、能耗高、副产物难处理、无法应对多污染物交互作用等问题,难以适应复杂工况与动态排放特征。因此,构建覆盖全工艺流程、融合多技术手段、兼顾环境效益与经济效益的“全过程控制耦合技术”体系,成为破解有色冶金大气污染治理困局的关键路径。

1 有色冶金大气多污染物来源与特性分析

1.1 典型工艺与污染物清单

有色冶金主要包括火法冶炼(如闪速熔炼、鼓风炉熔炼、转炉吹炼)与湿法冶炼(如酸浸、溶剂萃取、电积),以及电解精炼等过程。不同工艺产生的污染物种类与浓度差异显著。以铜冶炼为例,主流采用闪速熔炼—转炉吹炼—阳极炉精炼的工艺路线,其烟气中SO₂浓度可高达10%至20%,同时携带大量含铜、砷、铅、铋等元素的烟尘,并在高温燃烧条件下生成一定量的NO_x;若原料

中含有有机杂质,在不完全燃烧时还可能生成微量二噁英。铅锌冶炼则多采用鼓风炉或ISP密闭鼓风炉处理铅精矿,烟气中不仅含有3%至8%的SO₂,还富含铅尘、三氧化二砷、氧化锌及氟化物;而锌焙烧过程同样释放高浓度SO₂与ZnO粉尘。铝电解采用霍尔-埃鲁法,在日常运行中会持续排放HF气体和Al₂O₃粉尘,而在阳极效应发生期间,则会瞬时释放CF₄、C₂F₆等强温室气体及沥青烟(含多环芳烃)^[1]。此外,再生有色金属冶炼因原料成分高度不确定,常伴随二噁英、挥发性重金属及复杂有机污染物的排放,治理难度更大。

1.2 多污染物协同生成机制

有色冶金烟气中各类污染物并非孤立存在,其生成、迁移与转化过程具有显著的耦合性与相互影响。例如,在高温熔炼阶段,硫化物矿物分解不仅释放大SO₂,同时也促使伴生的砷、锑等重金属以氧化物或氯化物形式挥发进入气相,形成气态或吸附于细颗粒物上的有毒组分。SO₂的存在会改变烟气的酸碱环境,进而影响重金属在后续除尘设备中的冷凝行为与吸附效率。另一方面,NO_x主要来源于高温燃烧过程中的热力型生成,而二噁英则多在烟气冷却至250–450℃的“再合成窗口”内,由氯源、碳骨架及催化性金属(如铜、铁)共同作用通过“从头合成”途径生成。值得注意的是,部分用于脱硝的钒基SCR催化剂在特定条件下反而可能催化二噁英的生成,加剧污染风险。此外,细颗粒物(尤其是PM_{2.5})作为重金属、二噁英等持久性有毒物质的主要载体,其粒径分布与表面性质直接决定了后续净化设备的捕集效率。在铝电解过程中,HF极易与水蒸气结合形成腐蚀性强的酸雾,并与粉尘结合形成复合污染物,进一步增加治理复

杂度。上述复杂的交互关系表明,单一污染物的独立控制策略已难以奏效,必须转向多污染物协同控制的系统性思维。

2 全过程控制耦合技术体系构建

针对有色冶金大气污染的复杂性与多源性,本文提出“源头削减—过程控制—末端深度净化—资源化利用”四位一体的全过程控制耦合技术框架,强调从物料输入到最终排放的全链条集成优化,实现环境效益与资源效率的双重提升。

2.1 源头削减:清洁生产工艺优化

源头控制是减少污染物生成的根本途径,其核心在于通过工艺革新与原料管理,从起点抑制污染物的产生。在铜、铅等火法冶炼中,推广富氧熔炼技术可显著提高燃烧效率,减少助燃空气量,从而降低烟气总量30%以上,同时大幅提升SO₂浓度至15%以上,为后续高效制酸创造条件。配合X射线荧光(XRF)在线分析与人工智能算法对入炉物料进行智能配料,可有效降低原料中氯、氟及有机杂质的含量,从源头上抑制二噁英前驱体和HF的生成^[2]。在铝电解领域,研发并应用惰性阳极技术被视为革命性突破,该技术通过使用非碳基阳极材料,彻底消除碳阳极的消耗,从而杜绝CO₂、全氟化碳(PFCs)及沥青烟的排放,从根本上解决铝工业的碳污协同问题。对于再生有色金属冶炼,强化废杂金属的预处理环节至关重要,通过破碎、磁选、涡电流分选及热解脱氯等手段,有效去除塑料、橡胶等有机组分,可大幅降低熔炼过程中二噁英和挥发性有机物的生成潜力。

2.2 过程控制:工艺参数精准调控

在冶炼主体工艺运行过程中嵌入污染控制节点,是实现过程减排的关键。通过对熔炼炉出口烟气实施快速冷却策略,例如配置高效余热锅炉结合喷雾急冷系统,可在2秒内将烟气温度从1200℃骤降至200℃以下,有效避开250–450℃的二噁英再合成温区,阻断其生成路径。在特定工艺段引入还原性气氛,如在转炉或阳极炉区域精准喷入氨水或尿素溶液,可利用非催化还原(SNCR)原理在高温区原位脱除部分NO_x,避免后续增设独立脱硝装置带来的投资与能耗增加。此外,对传统敞口式设备如回转式阳极炉加装高效集气罩并维持微负压运行,可有效捕集逸散烟气,显著减少无组织排放,提升整体收集效率至95%以上,为末端治理提供稳定、可控的进气条件。

2.3 末端深度净化:多污染物协同脱除技术

末端治理环节需突破传统单元操作的局限,发展集成化、多功能的深度净化系统,以应对复杂烟气组分的协同脱除需求。

2.3.1 高温干法协同净化

对于高尘、高硫的高温烟气(如铜闪速炉出口),适宜采用高温干法协同净化路线。首先通过多级旋风除尘与余热锅炉回收高温热能(通常可产4.0MPa蒸汽用于发电),随后经静电除尘器去除绝大部分粗细颗粒物,除尘效率可达99%以上。在此基础上,引入活性焦/炭吸附一体化技术,利用其在120–150℃温度窗口下对SO₂、NO_x、单质汞(Hg⁰)及二噁英的同步吸附能力,实现多污染物一步脱除。吸附饱和后的活性焦可通过加热再生,释放出高浓度SO₂气体(浓度达15–20%)用于制酸,而NO_x则在再生过程中被热分解为N₂和O₂,实现污染物的资源化与无害化双重目标。

2.3.2 湿法—干法耦合净化

针对中低温、成分复杂的烟气(如铅鼓风炉、再生铜熔炼炉),湿法与干法技术的耦合更具优势。前端采用湿式电除尘器(WESP)可高效去除亚微米级颗粒物、酸雾及吸附态重金属,除尘效率远优于传统干式设备^[3]。后续设置氧化吸收塔,利用NaClO₂或H₂O₂等强氧化剂将难溶于水的NO氧化为易溶的NO₂或HNO₃,再通过碱液(如NaOH或Na₂CO₃)吸收实现高效脱硝,脱除率可达85%以上。为进一步保障重金属排放达标,可在湿法脱硫系统的浆液循环回路中投加巯基功能化的螯合树脂,该材料对As、Pb、Cd等离子具有高度选择性吸附能力,可使出水中重金属浓度稳定低于0.1mg/L,满足最严苛的排放标准。

2.3.3 低温催化协同净化

对于经初步净化后温度低于180℃的烟气,可采用低温催化技术进行深度处理。开发适用于低温工况的Mn–Ce/TiO₂等复合氧化物SCR催化剂,可在150–180℃范围内高效催化还原NO_x,同时在其载体上负载V₂O₅或贵金属Pt组分,赋予其催化裂解二噁英的能力,将其彻底分解为CO₂、H₂O和HCl。此外,针对单质汞难以被湿法洗涤去除的问题,可在催化剂表面引入氧化活性位点,将Hg⁰氧化为水溶性的Hg²⁺,便于在后续湿法系统中一并脱除,实现汞的全流程控制。

2.4 资源化利用:副产物高值化路径

将治理过程中产生的副产物转化为资源,是实现循环经济可持续发展的关键环节。高浓度SO₂烟气(>7%)经净化后采用“两转两吸”工艺制取98%工业硫酸,不仅可回用于湿法冶炼浸出工序,还可作为商品外售,创造经济价值。对于低浓度SO₂烟气,采用钠碱法脱硫可副产亚硫酸钠,经氧化后转化为硫酸钠(元明粉),广泛应用于玻璃、造纸等行业。电除尘灰、WESP污泥等富含重金属的固废,经火法富集或湿法浸出一萃取—电积等工艺,

可高效回收铜、铅、铋、钢等有色金属，残余渣则经稳定化/固化处理后安全填埋^[4]。此外，全厂各工序（熔炼、吹炼、阳极炉等）产生的余热通过梯级利用系统进行整合，吨铜可发电300–500kWh，显著降低综合能耗与碳排放强度。

3 技术挑战与发展趋势

3.1 技术挑战

首先，再生有色金属冶炼因原料来源广泛、成分高度复杂且波动剧烈，导致烟气中污染物种类与浓度呈现显著非稳态特征，现有净化系统在应对突发高氯、高有机物或高重金属负荷时，往往出现效率骤降甚至运行失稳的问题，亟需开发具有更强鲁棒性与自适应能力的智能调控系统。其次，烟气中普遍存在的砷、氟、碱金属等杂质对低温脱硝催化剂具有强烈的毒化作用，易造成活性组分烧结或孔道堵塞，大幅缩短催化剂寿命，增加运行维护成本，因此开发高抗中毒性能、宽温域适用的新型催化材料成为关键研究方向。第三，二噁英作为痕量但高毒性的持久性有机污染物，其在线监测技术长期滞后，目前仍依赖离线采样与实验室分析，周期长、成本高、代表性差，难以支撑实时优化控制，亟需发展基于激光光谱、质谱或生物传感原理的低成本、高灵敏度在线监测装备。更为重要的是，当前的大气污染控制体系主要聚焦于常规污染物（SO₂、NO_x、颗粒物）及有毒重金属，尚未有效整合碳减排目标，CO₂捕集、利用与封存（CCUS）技术与现有烟气净化流程的耦合路径尚不清晰，碳污协同治理存在明显空白。

3.2 发展趋势

面向未来，有色冶金大气污染控制将朝着智能化、材料化与系统化方向发展。通过融合物联网传感、大数据分析 with 数字孪生技术，构建污染物排放预测模型与净化系统自适应调控平台，实现“感知—决策—执行”闭环管理。在材料层面，金属有机框架（MOFs）等新型多孔

材料因其超高比表面积与可设计功能位点，在Hg⁰与二噁英吸附方面展现出巨大潜力；抗中毒、宽温域的低温催化剂研发也将加速推进。长远来看，将富氧燃烧、CO₂捕集与活性焦再生等单元进行深度耦合，探索“近零排放”甚至“负碳冶炼”路径，将成为行业绿色转型的战略方向。与此同时，亟需加快制定涵盖多污染物协同控制效果评估、副产物资源化标准及碳污协同核算方法的技术规范体系，为行业高质量发展提供制度保障。

4 结语

有色冶金行业大气多污染物治理已进入“系统集成、协同增效”的新阶段。本文提出的“源头削减—过程控制—末端深度净化—资源化利用”全过程控制耦合技术体系，通过工艺革新、多技术融合与物质能量循环，可以有效破解传统末端治理的瓶颈。该路径不仅能稳定实现超低排放，还可显著降低能耗与运行成本，推动行业绿色低碳转型。未来需进一步强化基础研究、技术创新与政策引导，构建更加高效、智能、可持续的有色冶金大气污染治理体系，为美丽中国建设与全球气候治理贡献行业力量。

参考文献

- [1]李新创,刘坤坤,刘涛,等."2+26"城市冶金行业大气污染管控方案[J].钢铁研究学报,2023,35(4):482-488.
- [2]胡衡彦,孙海侠,朱文科,等.某铜冶炼厂车间环境空气污染特征研究及其防治对策[J].现代盐化工,2023,50(4):95-98.
- [3]张代云,黎红波,欧阳义华,等.有色冶金工业发展中的环境保护与监测——评《有色金属冶金、材料、再生与环保》[J].中国有色冶金,2023,52(6):167.
- [4]宋幸智,陈铭.基于绿色发展的有色金属冶金工程管理模式创新[J].现代工程项目管理,2025,4(21).DOI:10.37155/2811-0625-0421-34.