

# 有色冶金铜铅锌冶炼过程污染物排放控制技术研究

林晓峰

上饶市广信区晶科光伏制造有限公司 江西南昌 334000

**摘要:** 有色金属铜、铅、锌是国民经济发展的关键基础材料,但其冶炼过程伴随大量污染物排放,包括二氧化硫、重金属、颗粒物及有机污染物等,对生态环境和人体健康构成严重威胁。本文系统分析了铜铅锌冶炼各工艺环节(包括火法冶炼、湿法冶炼及电解精炼)的污染物产生机制与排放特征,重点研究了源头控制、过程减排及末端治理的关键技术。通过对比国内外先进技术应用案例,结合我国冶炼行业实际情况,提出了“源头减量-过程优化-末端协同治理”的全过程控制策略,并对智能化监测与绿色冶炼技术的发展趋势进行展望,为行业实现低碳减排与可持续发展提供技术参考。

**关键词:** 铜铅锌冶炼; 污染物控制; 协同治理; 富氧熔炼; 重金属回收

## 引言

有色金属工业是国家战略性支柱产业,2022年我国铜、铅、锌产量分别达1100万吨、650万吨、780万吨,均居世界首位。然而,铜铅锌冶炼属于高能耗、高污染行业,火法冶炼中硫化矿焙烧、熔炼、吹炼等环节会释放 $\text{SO}_2$ (浓度可达5%–15%)、重金属(如As、Cd、Pb、Hg)及颗粒物(TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ ),湿法冶炼则产生含重金属酸性废水( $\text{pH}<2$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 浓度可达1000mg/L以上)。据《中国环境统计年报》数据,2021年有色金属行业 $\text{SO}_2$ 排放量占工业总排放量的12.3%,重金属排放量占比超30%,是大气污染和土壤重金属污染的主要来源之一。

随着《“十四五”节能减排综合工作方案》《重金属污染防治行动计划》等政策实施,冶炼企业面临严格的环保约束(如 $\text{SO}_2$ 排放限值降至100mg/ $\text{m}^3$ ,颗粒物限值30mg/ $\text{m}^3$ )。因此,研究高效、经济的污染物控制技术,对推动行业绿色转型、实现“双碳”目标具有重要现实意义。

## 一、铜铅锌冶炼污染物产生机制与排放特征

### (一) 铜冶炼污染物来源与特性

铜冶炼以火法为主(占比约80%),典型工艺为“焙烧-熔炼-吹炼-精炼”。

焙烧/熔炼环节:硫化铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )在高温(1200–1500℃)氧化反应生成 $\text{SO}_2$ (主要产物)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (炉渣)及铜锍( $\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$ ),同时释放 $\text{As}_2\text{O}_3$ (挥发性重金属)

和氟化物( $\text{HF}$ )。

吹炼环节:铜锍与氧气反应生成粗铜( $\text{Cu}>98\%$ ),烟气中 $\text{SO}_2$ 浓度可达10%–15%,并含有 $\text{PbO}$ 、 $\text{ZnO}$ 等颗粒物(粒径0.1–10 $\mu\text{m}$ )<sup>[1]</sup>。

电解精炼:粗铜电解过程产生含 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{As}^{3+}$ 的酸性废水( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 浓度180–200g/L),阳极泥中富集Au、Ag及Se、Te等稀散金属。

### (二) 铅锌冶炼污染物特征

铅冶炼以“烧结-鼓风炉还原”传统工艺为主,烧结过程产生高浓度 $\text{SO}_2$ (3%–8%)及 $\text{Pb}$ 蒸气(冷凝后形成 $\text{PbO}$ 颗粒物);鼓风炉烟气含 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 及 $\text{Hg}$ 、 $\text{Cd}$ 等挥发性重金属。锌冶炼多采用“焙烧-浸出-电积”工艺,锌精矿( $\text{ZnS}$ )焙烧生成 $\text{ZnO}$ (焙砂)和 $\text{SO}_2$ ,浸出环节产生含 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 的酸性废水( $\text{pH}1-3$ ),废渣(如铁矾渣)中重金属含量超《危险废物鉴别标准》限值( $\text{Pb}>5000\text{mg/kg}$ )。

### (三) 污染物排放共性与差异

铜铅锌冶炼污染物排放共性:均以 $\text{SO}_2$ 、颗粒物和重金属为主要特征污染物;差异在于:铜冶炼 $\text{SO}_2$ 浓度最高(可达15%),铅冶炼重金属( $\text{Pb}$ 、 $\text{Hg}$ )排放量最大,锌冶炼酸性废水量最大(吨锌产水10–15 $\text{m}^3$ )<sup>[2]</sup>。

## 二、污染物控制关键技术及应用

### (一) 源头控制技术

#### 1. 清洁原料与燃料替代

通过采用高品位精矿从源头削减污染物产生,例如铜精矿品位提升至25%以上、铅精矿达到60%以上,可

显著降低单位产品的矿石消耗量及后续污染物排放量。江西铜业的实践表明,将铜精矿品位从20%提升至28%后,吨铜生产过程中的二氧化硫排放量直接降低18%,有效减轻末端治理压力。燃料结构优化方面,推广天然气替代重油作为冶炼燃料,不仅可减少烟尘排放30%~50%,还能通过改善燃烧条件降低氮氧化物生成——甲烷燃烧的氮氧化物产率较重油降低50%以上,从源头实现多污染物协同削减。

## 2. 工艺优化与设备升级

熔炼工艺革新聚焦高效清洁生产,将传统反射炉熔炼改造为富氧闪速熔炼技术,通过将氧气浓度从空气中的21%提升至90%以上,大幅强化燃烧效率与反应速率,使烟气中二氧化硫浓度从3%~5%提高至10%以上,满足制酸回收对二氧化硫浓度 $\geq 4\%$ 的工艺要求,实现资源循环利用。连续化生产技术在铅冶炼领域成效显著,“氧气底吹熔炼+液态铅连续吹炼”联合工艺彻底替代传统烧结-鼓风机流程,通过取消高污染的烧结环节,粉尘排放量降低80%,同时二氧化硫回收率从85%提升至97%,既减少无组织排放,又提高硫资源利用率。

## (二) 过程减排技术

### 1. 烟气循环利用

针对高温烟气实施能量梯级利用与循环回用技术,闪速熔炼炉出口1300~1400℃的高温烟气首先经余热锅炉回收热量,产生的蒸汽用于发电实现能源回收,降温后的烟气部分返回熔炼系统参与反应,此举可减少新鲜空气吸入量30%以上,降低引风机负荷及系统能耗,同时减少末端尾气排放量。云南驰宏锌锗应用该技术后,吨锌冶炼电耗降低120kWh,实现节能减排双重效益<sup>[3]</sup>。

### 2. 重金属固化/分离

火法冶炼中通过精准添加CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等造渣剂,调控炉渣成分与熔点(控制在1100~1300℃),使铁、硅等杂质形成稳定玻璃体炉渣,阻止重金属随烟气挥发;湿法冶炼则采用选择性浸出工艺,如锌焙砂浸出过程中,通过稀硫酸溶液控制pH值在3.5~4.0,利用水解平衡使Fe<sup>3+</sup>形成氢氧化物沉淀而Zn<sup>2+</sup>稳定留于溶液,实现铁与锌的高效分离,为后续深度净化奠定基础,减少重金属在工序间的迁移扩散。

## (三) 末端治理技术

### 1. 大气污染治理

脱硫技术:

氨法脱硫:适用于高浓度SO<sub>2</sub>烟气(>5%),反应生

成(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(化肥),脱硫效率>98%,但需控制氨逃逸(<10mg/m<sup>3</sup>);

石灰石-石膏法:适用于低浓度SO<sub>2</sub>(<3%),产物石膏可用于建材,投资成本低(约200元/kNm<sup>3</sup>),但脱硫效率受液气比影响较大(液气比L/G=15~20L/m<sup>3</sup>时效率>95%)。

除尘技术:

电除尘器(ESP)对粒径>1μm颗粒物去除率>99%,但能耗较高(约0.5kWh/1000m<sup>3</sup>);袋式除尘器适用细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>),效率可达99.9%,但滤袋需耐高温(>200℃)、耐腐蚀(烟气含H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>雾滴)。

重金属捕集:

活性炭吸附法:活性炭对Hg<sup>0</sup>吸附容量达50~100mg/g,可通过浸渍Cl、Br等增强吸附活性;高效除尘+湿法洗涤联用(如文丘里洗涤器)可去除90%以上Pb、Cd颗粒物<sup>[4]</sup>。

## 2. 废水与固废处理

酸性废水处理:

中和沉淀(加Ca(OH)<sub>2</sub>调pH8~9)去除重金属离子(生成氢氧化物沉淀),但污泥量较大;膜分离技术(如纳滤NF)可浓缩回收Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>(回用率>80%),出水COD<50mg/L,达到《污水综合排放标准》一级限值。

固废资源化:

冶炼废渣(铜渣含Cu0.5%~1.5%)采用浮选-磁选联合工艺回收铜铁,尾矿用于制备微晶玻璃;阳极泥通过酸浸-电解提取Au、Ag,综合回收率>95%。

## 三、全过程协同控制策略与案例分析

### (一) 控制策略构建

基于“减量化、资源化、无害化”原则,提出全流程协同控制策略:

源头环节:推广高品位精矿选用与富氧强化熔炼技术,从生产源头减少单位产品污染物原始产生量;

过程环节:优化炉型结构设计(如采用圆形炉膛替代传统矩形结构,减少炉膛死角积灰与污染物残留)、加强烟气循环利用系统建设与余热高效回收装置应用;

末端环节:严格实行“脱硫-除尘-重金属深度治理”多污染物协同处理工艺,废水实施“分类收集-分质处理-梯级回用”闭环管理,固废遵循“优先资源回收-安全合规处置”分级管控原则<sup>[5]</sup>。

### (二) 应用案例

#### 1. 河南豫光金铅“绿色铅冶炼”示范工程

采用“富氧底吹熔炼+连续吹炼+烟气深度治理”工艺:

熔炼环节SO<sub>2</sub>浓度稳定在12%~15%，经两转两吸制酸（转化率99.7%），尾气SO<sub>2</sub><50mg/m<sup>3</sup>；

烟气依次经电除尘（除尘效率99.5%）、活性炭吸附（Hg去除率98%）、石灰石-石膏脱硫（总脱硫效率99.2%）；

酸性废水采用“中和沉淀-膜过滤-蒸发结晶”工艺，水回用率达90%，重金属污泥送危废中心安全处置。

该工程投产后，吨铅污染物排放较传统工艺降低85%，年减少SO<sub>2</sub>排放1.2万吨，获“国家环境友好工程”称号。

## 2. 江西铜业德兴铜矿铜冶炼升级项目

应用“闪速熔炼+闪速吹炼+智能环保管控”技术:

采用自动化控制系统（DCS）实时调节氧气浓度、炉膛温度，SO<sub>2</sub>捕集率提升至99.9%；

废水处理引入“膜生物反应器（MBR）+反渗透（RO）”双膜工艺，产水用于电解工序，回用率>95%；

建立污染物在线监测系统（CEMS），实时监控SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及颗粒物浓度，数据上传至环保部门平台。

项目投资12亿元，年减排SO<sub>2</sub>3.5万吨，颗粒物1800吨，年创环保效益超2亿元。

## 四、技术挑战与未来展望

### （一）现存问题

技术瓶颈突出：针对低浓度SO<sub>2</sub>（体积分数<1%）烟气，现有脱硫技术效率普遍低于85%，难以满足严格排放要求；Hg<sup>0</sup>等气态重金属因化学惰性强，传统吸附法去除率不足60%，协同脱除难度大。

成本压力显著：末端治理成本占冶炼企业总运营成本的15%~20%，其中先进脱硫设备单套投资超千万元，中小企业受资金限制难以升级；运维费用中吸附剂更换占比达40%，进一步加剧成本负担。

标准体系滞后：有机污染物管控存在空白，多环芳烃（PAHs）等特征污染物缺乏行业专属排放标准；新型污染物监测技术不足，纳米颗粒物（粒径<100nm）因检测方法缺失，尚未纳入常规监管范围。

### （二）发展趋势

智能化与数字化深度渗透：基于机器学习构建熔炼过程SO<sub>2</sub>生成量预测模型，实现风量、温度等参数动态优化，脱硫效率提升潜力达10%~15%；部署无线传感网

络（WSN）与边缘计算节点，实现烟气中SO<sub>2</sub>、Hg<sup>0</sup>浓度秒级监测，预警响应时间缩短至5分钟内。

低碳技术系统集成：推广“冶炼烟气制酸-余热发电”联产模式，吨酸可回收余热发电120~150kWh，降低碳足迹30%；耦合碳捕集利用（CCUS）技术，将制酸尾气中CO<sub>2</sub>转化为高纯度干冰，年减排量可达万吨级。

材料创新驱动效能跃升：研发SiC基陶瓷膜过滤材料，耐高温（>800℃）、抗腐蚀性能提升50%，除尘效率突破99.9%；开发MOFs金属有机框架吸附剂，通过孔道结构设计实现Hg<sup>0</sup>吸附容量达1.2~1.5g/g，为传统活性炭的3~5倍，且再生性能提升至8次循环后容量保持率>85%。

## 结论

铜铅锌冶炼污染物控制需从全流程入手，通过源头减量（高品位原料、富氧熔炼）、过程优化（烟气循环、余热回收）及末端协同治理（脱硫-除尘-重金属联用）实现达标排放。案例表明，采用先进技术可使SO<sub>2</sub>捕集率>99%，重金属排放量降低80%以上，同时通过固废资源化实现经济效益与环境效益双赢。未来应重点突破低浓度污染物治理、智能化管控及低碳技术融合，推动行业向绿色、高效、可持续方向发展。

## 参考文献

- [1] 常伟华, 李秀, 李博. 滇东北某硫化铅锌矿选矿试验研究[J]. 云南冶金, 2022, 51(3): 73-78. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0308.2022.03.014.
- [2] 李星, 李绪忠, 王杰, 王水云, 胡尧. 某大型铅锌冶炼厂含重金属酸性废水处理实例[J]. 硫酸工业, 2022(7): 41-44.
- [3] 姚树利, 李亚昆. 关于有色金属矿山能提高低品位金属铜铅锌银技术指标问题的研究讨论[J]. 中国金属通报, 2020. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2020.23.098.
- [4] 王松松, 王亲猛, 田庆华, 等. 铜富氧强化熔炼过程伴生铅锌元素定向分配行为调控[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 13. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36641.
- [5] 程亮, 汪友元, 余江鸿, 等. 从冶炼渣尘中回收有价金属制取金属盐类的实践[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(1): 3.