

# 铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染治理研究进展及管控建议

苗雨<sup>1</sup>, 罗纯<sup>2</sup>, 刘旭<sup>3</sup>, 张弛<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>矿冶科技集团有限公司, 北京

<sup>2</sup>河池市南丹生态环境局, 广西 河池

<sup>3</sup>潍坊市青州生态环境监控中心, 山东 潍坊

收稿日期: 2022年7月21日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年8月31日

## 摘要

近年来, 随着工业化进程的加快, 大气污染问题逐渐显现。有研究表明, 工业污染是大气污染的主要污染源之一。目前, 我国约有13万台工业炉窑, 对于工业大气污染物的贡献较大。为了实现工业大气污染物总量减排, 有必要对工业炉窑排放进行管控。本文总结了目前铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染治理现状, 并对今后大气污染管控提出了建议, 以有效防控重金属环境风险。

## 关键词

工业炉窑, 铅锌冶炼行业, 大气污染防治

# Research Progress and Management and Control Suggestions of Air Pollution Control in Industrial Furnaces and Kilns in Lead and Zinc Smelting Industry

Yu Miao<sup>1</sup>, Chun Luo<sup>2</sup>, Xu Liu<sup>3</sup>, Chi Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>BGRIMM Technology Group, Beijing

<sup>2</sup>Hechi Nandan Ecological Environment Bureau, Hechi Guangxi

<sup>3</sup>Weifang Qingzhou Ecological Environment Monitoring Center, Weifang Shandong

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Aug. 31<sup>st</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 苗雨, 罗纯, 刘旭, 张弛. 铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染治理研究进展及管控建议[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 906-912. DOI: 10.12677/aep.2022.124113

## Abstract

In recent years, with the acceleration of industrialization, the problem of air pollution has gradually emerged. Studies have shown that industrial pollution is one of the main sources of air pollution. At present, there are about 130,000 industrial furnaces and kilns in my country, which make a great contribution to industrial air pollutants. In order to reduce the total amount of industrial air pollutants, it is necessary to control the emissions of industrial furnaces. This paper summarizes the current status of air pollution control in industrial furnaces and kilns in the lead and zinc smelting industry, and puts forward suggestions for future air pollution control to effectively prevent and control the environmental risks of heavy metals.

## Keywords

Industrial Furnace, Lead and Zinc Smelting Industry, Air Pollution Prevention and Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会工业化程度的加快, 大气污染问题近些年频频呈现。有研究表明, 工业、燃煤、汽车、农业等是最主要的污染源, 其中工业污染是首要因素。据统计, 我国约有 13 万台工业炉窑, 主要分布在冶金、化工等行业[1] [2]。国内外工业炉窑的技术进步发展迅速, 国外在炉窑生产过程中已经实现了能源系统的实时监控, 而我国正处于从设备监控向全流程综合管理的转型中[3]。工业炉窑污染主要为大气污染, 其次为热污染和噪声污染, 其污染来源为各种燃料的燃烧, 产生的废气污染物包括碳氢化合物、一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫和烟尘等有害物质[4] [5]。

2019 年 7 月, 生态环境部联合国家发改委、财政部和工业和信息化部发布了《工业炉窑大气污染综合治理方案》, 用以指导工业炉窑的大气污染治理工作。2022 年 3 月, 生态环境部印发《关于进一步加强重金属污染防治的意见》, 指出主要目标“到 2025 年, 全国重点行业重点重金属污染物排放量比 2020 年下降 5%, 重点行业绿色发展水平较快提升, 重金属环境管理能力进一步增强, 推进治理一批突出历史遗留重金属污染问题。到 2035 年, 建立健全重金属污染防控制度和长效机制, 重金属污染治理能力、环境风险防控能力和环境监管能力得到全面提升, 重金属环境风险得到全面有效管控”[6]。因此, 铅锌冶炼作为重点行业有必要开展其工业炉窑大气污染管控研究, 以有效防控重金属环境风险。

## 2. 铅锌冶炼行业工业炉窑现状

### 2.1. 铅冶炼行业工业炉窑现状

2000 年以后, 我国铅冶炼行业产能快速增长, 到 2009 年, 年平均增速可达 16.4% [7], 精铅的年平均增长速度为 11.2%, 低于产能的增长。2003 年以后, 我国的精铅产量超过美国, 成为世界第一的精铅生产国。2018 年, 中国原生精铅产量达到 511.3 万 t, 主要产能集中于湖南、湖北、河南、云南、安徽等地。

铅冶炼工艺主要指熔炼工艺，大多以火法为主，主要的生产工艺如表 1 所示。

**Table 1.** Status of industrial furnaces and kilns in lead smelting industry

**表 1.** 铅冶炼行业工业炉窑现状

行业	生产工艺	工业炉窑(炉型)
铅冶炼	氧气底吹熔炼 - 鼓风机还原炼铅工艺	底吹炉 + 鼓风机
	富氧顶吹熔炼 - 鼓风机还原炼铅工艺	艾萨炉/奥斯麦特炉 + 鼓风机
	直接炼铅法	基夫赛特炉等
	氧气底吹熔炼 - 液态高铅渣直接还原法	底吹炉 + 侧吹炉/底吹炉
	氧气侧吹熔炼 - 侧吹还原炼铅技术	侧吹熔炼炉 + 侧吹还原炉

## 2.2. 锌冶炼行业工业炉窑现状

我国锌产量以原生锌为主，相比于发达国家 30% 的锌产量来自于再生锌，我国的锌二次利用率较低，仅为 3%，我国的再生锌增长率也较低。中国有色金属工业性协会的数据表明，2020 年，中国锌锭产量达到 642.5 万 t。国内精锌产量、产能分布也非常集中，主要分布在资源禀赋比较好的湖南、云南、陕西、广西和内蒙古等省区。

目前我国锌冶炼工艺以湿法冶炼为主，占到锌总产量的 90% 以上，其次为火法冶炼。主要的生产工艺如表 2 所示。

**Table 2.** Status of industrial furnaces in zinc smelting industry

**表 2.** 锌冶炼行业工业炉窑现状

行业	生产工艺	工业炉窑(炉型)
锌冶炼	湿法炼锌	沸腾焙烧炉
	竖罐炼锌	沸腾焙烧炉、焦结炉、竖罐
	密闭鼓风机炼锌	烧结机、密闭鼓风机
	电炉炼锌	沸腾焙烧炉、电炉

## 3. 铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染物的产生及治理现状

### 3.1. 铅冶炼主要工业炉窑大气污染物的产生和排放

铅冶炼生产过程中，废气主要污染物包括二氧化硫、氮氧化物、硫酸雾、颗粒物及重金属等。铅冶炼生产中的主要工业炉窑污染源和污染物种类见表 3。

### 3.2. 锌冶炼主要工业炉窑大气污染物的产生和排放

锌冶炼火法冶炼过程中的大气污染物主要来自于烧结过程中产生的含烟尘和二氧化硫的烟气，该烟气经除尘处理后进入制酸系统用以生产硫酸。湿法冶炼工艺中大气污染物的主要来源于焙烧过程，产生的冶炼烟气与火法冶炼一样进入制酸系统生产硫酸[8][9]。锌冶炼生产中的主要工业炉窑污染源和污染物种类见表 4。

**Table 3.** Air pollutants in main industrial furnaces and kilns during lead smelting production**表 3.** 铅冶炼生产过程中主要工业炉窑的大气污染物

污染类型	污染源	主要污染物
大气	制酸系统 (熔炼炉)废气	颗粒物、铅及其化合物、汞及其化合物、镉及其化合、砷及其化合物、 二氧化硫、氮氧化物、硫酸雾
	还原炉 + 烟化炉废气	颗粒物、铅及其化合物、汞及其化合物、镉及其化合、砷及其化合物、 二氧化硫、氮氧化物
	熔炼炉、还原炉、烟化 炉环境集烟	
	熔铅 (电铅)锅废气	颗粒物、铅及其化合物
浮渣反射炉废气	颗粒物、铅及其化合物、汞及其化合物、镉及其化合、砷及其化合物、 二氧化硫、氮氧化物	

**Table 4.** Air pollutants generated during zinc smelting**表 4.** 锌冶炼过程中产生的大气污染物

污染类型	污染源	主要污染物
大气	制酸系统废气 (沸腾焙烧炉烟气、烧结烟气)、	颗粒物、铅及其化合物、汞及其化合物、 镉及其化合、砷及其化合物、二氧化硫、 氮氧化物、硫酸雾
	烟化炉废气	
	挥发窑废气	颗粒物、铅及其化合物、汞及其化合物、 镉及其化合、砷及其化合物、二氧化硫、 氮氧化物
	多膛炉废气	
	焦结蒸馏系统废气	
	旋涡炉	
	锌精馏系统废气	
	烧结机头废气	
	密闭鼓风机环境集烟	
	电炉环境集烟	
	锌熔铸炉	

### 3.3. 铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染治理现状

铅锌冶炼工业炉窑大气污染治理技术主要包括除尘技术、脱硫技术、脱硝技术等[10][11]。

根据《工业源产排污系数手册》(2010)、《铅锌行业重金属产排污系数使用手册》以及铅锌冶炼行业重金属产排污系数相关研究成果[12], 铅冶炼富氧底吹-鼓风机炼铅(SKS法)、密闭鼓风机(ISP法)和富氧底吹-液态高铅渣直接还原(豫光炼铅法)工艺的大气污染物排放情况见表5。

根据《工业源产排污系数手册》(2010)、《铅锌行业重金属产排污系数使用手册》以及铅锌冶炼行业重金属产排污系数相关研究成果, 锌冶炼蒸馏法(竖罐、电炉)炼锌工艺、密闭鼓风机(ISP法)和湿法炼锌工艺的大气污染物排放情况见表6。

**Table 5.** Emissions of air pollutants from lead smelting  
**表 5.** 铅冶炼大气污染物排放情况

富氧底吹 - 鼓风炉炼铅工艺						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)	1196	5911	57.73	4.57	0.151	1.68
直接炼铅工艺						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)			22.18	1.878	0.113	0.937
密闭鼓风炉 ISP 工艺						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)	2320	9630	118.2	6.51	0.456	3.614

**Table 6.** Emissions of air pollutants from zinc smelting  
**表 6.** 锌冶炼大气污染物排放情况

蒸馏法炼锌						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)	9169	37065	5.67	3.8	0.383	5.667
密闭鼓风炉 ISP 工艺						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)	3665	19260	118.2	6.51	0.456	3.614
湿法炼锌工艺						
大气污染物种类	烟尘	SO <sub>2</sub>	Pb	As	Hg	Cd
含量(克/吨 - 产品)	853	15120	2.427	0.955	0.203	1.108

## 4. 我国铅锌冶炼行业大气污染排放标准执行中存在问题及建议

### 4.1. 存在问题分析

2010年9月27日,环境保护部发布了《铅、锌工业污染物排放标准》,2013年12月27日又发布《铅、锌工业污染物排放标准》(GB25466-2010)修改单,增加了大气污染物的特别排放限值。2020年12月21日,生态环境部与国家市场监督管理总局联合发布了《铅、锌工业污染物排放标准》(GB25466-2010)修改单,增加了水污染物总铊的排放限值要求。随着环境保护要求日趋严格和行业发展的变化趋势,目前大气方面存在以下问题尚有待进一步完善[9]:

#### 1) 标准污染物排放因子缺失

该标准中大气污染物排放因子仅对硫酸雾、汞及其化合物、铅及其化合物、二氧化硫、颗粒物等作出规定,并未考虑铅锌行业其他典型的污染因子,如氮氧化物和重金属镉、砷等。在标准的实际实施过程中,每个地方参照的标准不一致,有些参照《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)考量上述这些污染因子的达标情况,不仅无法反映出铅锌企业的实际情况,长期以来也不利于整个行业的有序发展。

## 2) 未充分考虑行业基准排气量

该标准中要求铅、锌冶炼炉窑过量空气系数为 1.7, 但并未对单位产品基准排气量这一重要参数作出规定。控制过量空气系数即控制炉窑运行过程中的空气消耗量, 因该行业熔炼过程中大多采用富氧熔炼工艺, 外排烟气中的氧含量普遍较高, 如果按过量空气系数来考核, 折算出来的结果跟实际差别较大, 不仅不能有效反映实际大气污染治理效果, 反而抑制了环境集烟的作用。因此, 单一控制过量空气系数而不对炉窑自身的基准排气量作出规定, 难以真正控制大气污染物的排放浓度, 同时还减弱了无组织排放源污染削减作用[13]。

## 4.2. 修订建议

根据以上的分析, 本文对于目前的标准提出了修改建议如下:

### 1) 完善污染因子及其排放标准

目前标准中缺失重金属等大气污染物排放因子, 建议增加镉、锑、砷、铊等重金属污染物的排放限值。

#### ① 镉及其化合物

镉是锌冶炼过程中的特征污染元素, 国内部分锌冶炼企业配有镉回收车间, 而标准中缺失镉及其化合物的排放限值。建议镉及其化合物的排放浓度限值为  $0.5 \text{ mg/m}^3$ 。

#### ② 砷及其化合物

砷为有色金属冶炼中的伴生元素, 因此有必要设定铅锌冶炼行业中砷的排放限值。具体可参照《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB-25467-2010)中砷的浓度限值  $0.4 \text{ mg/m}^3$  和《锡、锑、汞工业污染物排放标准》(GB30770-2014)中砷的浓度限值  $0.5 \text{ mg/m}^3$ 。

### 2) 对单位产品基准排气量作出规定

建议根据铅锌冶炼行业不同工序及不同炉型的特点, 对于炉窑自身的单位产品基准排气量做出相应的规定, 从而鼓励环境集烟。

### 3) 考虑不同行业特征因子排放

铅锌冶炼标准的修订可参照《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB-25467-2010)和《锡、锑、汞工业污染物排放标准》(GB30770-2014)标准中对于大气污染物限值的要求, 针对铅锌冶炼行业中不同生产类别和不同工序分别制定相应的排放限值[13]。

### 4) 开展颗粒物与重金属排放浓度关系的研究

目前标准中关于颗粒物的与重金属的排放浓度之间不成比例, 建议开展确定两者之间的线性关系研究, 修改完善标准。

## 5. 总结

铅锌冶炼作为重金属污染防控重点行业之一, 进一步提升重金属污染治理能力、环境风险防控能力和环境监管能力尤为必要。本文总结了铅锌冶炼行业工业炉窑大气污染治理现状, 并对今后管控给出了建议。

1) 进一步完善我国铅锌大气污染物排放标准。特别是增加对镉、砷等排放量大、环境风险高的大气特征污染物控制指标, 同时做好与相关排污许可规范的衔接。

2) 进一步推动重金属污染深度治理。自 2023 年起重点区域铅锌冶炼行业企业需执行颗粒物和重点重金属污染物特别排放限值。因此, 企业应加快推动颗粒物、重金属等大气污染物治理升级改造工程, 积极落实重金属减排。

3) 铅锌冶炼企业作为土壤污染重点监管单位, 由于通过大气沉降等途径释放的重金属在土壤中不断累积, 会对地下水安全产生环境和健康风险。因此, 企业应从源头上进行有效管控, 同时加强土壤及地下水环境保护监督管理, 有效防控重金属环境风险。

## 参考文献

- [1] 苗雨, 邱伟军, 林星杰. 超细颗粒物团聚技术研究现状及进展[C]//中国环境科学学会. 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 2016: 107-112.
- [2] 任东华. 我国地方工业炉窑大气污染物排放标准研究现状[J]. 资源节约与环保, 2015(4): 118, 129.
- [3] 魏小林, 黄俊钦, 李森, 潘利生, 陈立新, 谭厚章, 杨富鑫. 工业炉窑燃烧过程中节能减排问题的研究进展与发展方向[J]. 热科学与技术, 2021, 20(1): 1-13.
- [4] 刘莹. 我国大气污染防治区域协同立法研究[D]: [硕士学位论文]. 吉首: 吉首大学, 2021.
- [5] 朱广为. 工业炉窑的环保治理分析[J]. 工业炉, 2012, 34(4): 30-33.
- [6] 关于进一步加强重金属污染防治的意见[J]. 资源再生, 2022, (3): 54-57.
- [7] 林星杰. 铅冶炼行业重金属污染现状及防治对策[J]. 有色金属工程, 2011, 1(4): 23-27.
- [8] 赵桂久, 章申, 于丽长, 彭菊初. 铅锌冶炼厂大气污染主要模式及防治[J]. 地理科学, 1989(2): 158-162, 196.
- [9] 金尚勇. 铅锌冶炼废气污染物排放标准存在问题探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 72-75.
- [10] 闫静, 吴晓清, 罗志云, 燕潇, 张蕊. 国外大气污染防治现状综述[J]. 中国环保产业, 2016(2): 56-60.
- [11] 温珺琪. 中国大气污染防治技术综述[J]. 科技创新导报, 2019, 16(29): 106-107.
- [12] 陈德容, 白杨, 黄宇. 工业源产排污系数在污染源普查中的应用分析[J]. 能源与环境, 2021(3): 88-90.
- [13] 林星杰. 有色金属冶炼重点行业超细颗粒物污染源解析与控制技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017.8.