

铜矿浮选厂废气污染特征及治理技术研究

柯 玲

云南金沙矿业股份有限公司, 云南 昆明 654100

[摘要]铜矿浮选厂在生产过程中产生大量含粉尘及有害气体的废气, 具有排放源分散、污染物成分复杂、治理难度大等特点。文中系统分析了铜矿浮选厂废气的污染来源及特征, 梳理了当前废气收集系统与治理技术的现状及存在问题, 在此基础上从源头减排、高效收集、协同治理和智能控制四个维度探讨了废气治理关键技术。研究表明, 构建“源头控制-过程调节-末端收集”一体化的废气治理体系是提升铜矿浮选厂环境治理水平的有效路径。

[关键词]铜矿浮选; 废气治理; 粉尘控制; 协同治理; 智能控制

DOI: 10.33142/ucp.v3i3.20382

中图分类号: TD952.1

文献标识码: A

Research on the Characteristics and Treatment Technology of Waste Gas Pollution in Copper Mine Flotation Plant

KE Ling

Yunnan Jinsha Mining Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 654100, China

Abstract: Copper ore flotation plants generate a large amount of waste gas containing dust and harmful gases during the production process, which has the characteristics of dispersed emission sources, complex pollutant composition, and difficult treatment. The article systematically analyzes the sources and characteristics of pollution from copper ore flotation plant waste gas, summarizes the current status and problems of waste gas collection systems and treatment technologies, and explores key technologies for waste gas treatment from four dimensions: source emission reduction, efficient collection, collaborative treatment, and intelligent control. Research has shown that building an integrated waste gas treatment system of "source control - process regulation - end collection" is an effective way to improve the environmental governance level of copper ore flotation plants.

Keywords: copper ore flotation; waste gas treatment; dust control; collaborative governance; intelligent control

引言

铜矿浮选是铜资源开发的重要选矿过程, 它的基本原理就是向矿浆中加入浮选药剂, 使有用矿物和脉石矿物分离开来。浮选工艺过程中, 由于矿石的加工以及加药而产生的粉尘、有害气体较多。有色金属行业冶炼加工时废气排放量多、成分繁杂, 除了二氧化硫、氮氧化物这些传统气态污染物之外, 还有汞、铅这些重金属以及酸、碱、油雾这类难以处理的无机物, 治理难度较高, 给生态环境和人体健康造成严重影响。随着《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB25467-2010) 的发布, 铜矿浮选厂废气排放管理越来越严格。但是目前有关铜矿浮选厂废气污染特征和系统化治理技术的研究还比较薄弱, 现有的研究成果大多只关注单一污染物的控制, 缺少对废气全流程治理的认识。本文主要对铜矿浮选厂废气污染源及特征进行系统的分析, 对目前的治理现状和存在的问题进行梳理, 探究关键的治理

技术, 从而给铜矿浮选厂废气污染防治提供一定的借鉴。

1 铜矿浮选厂废气污染来源及特征分析

铜矿浮选厂的废气污染源存在于整个生产工艺过程中。从矿石进入厂区开始, 破碎、筛分工序就会产生大量的含尘废气。破碎、筛分等重要环节是粉尘产生最多的环节, 粉尘的产生同矿石的物理破碎方式、筛分强度有密切联系。粗碎、中细碎和筛分车间的粉尘颗粒物排放浓度要达到 GB25467-2010 铜、镍、钴工业污染物排放标准表 5 的排放标准, 即颗粒物 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ 。在磨矿和浮选过程中, 由于矿浆搅拌和浮选泡沫的爆裂都会产生夹带的矿物粉尘。更复杂的是浮选药剂的使用环节, 浮选工艺一般会加入硫酸、柴油、捕收剂、起泡剂等化学药剂, 在药剂制备过程中会伴随有少量的硫酸雾、VOCs 和恶臭气体逸出。另外精矿过滤、尾矿输送和尾矿库干滩等都会产生二次扬尘。就污染物的组成而言, 铜矿浮选厂废气有以下几点明

显的特点。第一，污染物种类繁多，有粉尘等颗粒物，有 SO_2 、 NO_x 等无机气态污染物，还有浮选药剂挥发出来的 VOCs 和恶臭气体。浮选粉尘和一般的矿尘相比，粒径小、扩散性大，而且由于吸附了浮选药剂而具有更高的毒理活性，严重危害作业环境和人员健康。第二，重金属的伴生污染比较明显。铜矿石中常含有铅、砷、镉、汞等重金属元素，在破碎、磨矿过程中随粉尘一起进入废气。根据该铜选厂改扩建项目的测算数据可以得出，该项目产生的粉尘排放量为 3060 千克/年，铅排放量为 1.06 千克/年、砷排放量为 0.25 千克/年、铜排放量为 17.8 千克/年。第三，排放源分布广，以无组织排放为主。破碎、筛分、输送、浮选、药剂制备、尾矿库等各个环节都有废气产生，浮选车间大多为开放或者半开放空间，废气收集困难。

2 铜矿浮选厂废气污染治理现状及存在问题

2.1 废气收集系统现状

目前铜矿浮选厂废气收集系统大多采用集气罩和管道负压收集相结合的方式。破碎、筛分等产生集中的工序一般在设备上方或者产生点处设置集气罩，用风机抽吸产生局部负压，把含尘气体吸入除尘系统。对现有的选矿环境控尘措施进行详细的分析，主要对封闭罩结构、负压抽风、湿法喷雾等多方面的控尘技术方案进行总结。在药剂制备车间，配药池上方设集气管道，将溢出的硫酸雾和 VOCs 收集起来送入净化装置。部分先进的浮选厂已经开始在浮选机的主体上设置集气罩，利用集气罩将尾气挡住，然后用负压风机把尾气抽走^[1]。但是就总体而言，铜矿浮选厂废气收集系统还存在覆盖率低、收集效率低等问题。集气罩收集效率达到 90% 以上，有部分废气以无组织形式排出去。尤其是浮选车间，由于设备布置分散、操作空间要求大，不能达到全密闭收集的效果，大量的含药剂气味的废气直接排到车间环境中。

2.2 常用废气治理技术分析

铜矿浮选厂常用的废气治理技术可以按照污染物种类分为除尘技术和有害气体净化技术两类。除尘技术中使用得最多的两种设备就是脉冲袋式除尘器和湿式除尘装置。袋式除尘器工作原理为含尘气体从风口进入灰斗后，一部分较大颗粒及凝聚的尘粒因惯性作用直接落入灰斗，起到预收尘的作用；进入灰斗的气流折转向上流入箱体，

当气流通过内部装有金属骨架的滤袋时，粉尘被阻留在滤袋外表面，净化后的气体进入滤袋上部的清洁室汇集到出风管排出。袋式除尘器对于细小的粉尘有很高的捕集效率，除尘效率可以达到 99% 以上，在含尘气体浓度较大的范围内，它的效率和阻力的变化并不大。湿式除尘是用水或其他液体与含尘气体接触，使液滴捕获粉尘颗粒，对高温、高湿、易燃粉尘的处理有独特优势，但是会产生废水等二次污染。旋风除尘器属于预处理设备，投资小、占地少，但是除尘效率低，一般用作袋式除尘的前级预处理装置。在有害气体净化上，浮选药剂挥发产生的 VOCs 和恶臭气体用活性炭吸附法因其适应性好、投资小而有应用前景。活性炭依靠丰富多样的孔隙结构以及巨大的比表面积来吸附废气中有机物分子。对硫酸雾等酸性气体，一般用碱液喷淋洗涤塔进行中和处理。部分浮选厂用集气罩、复喷洗涤器、复挡除沫器、活性炭吸附的组合工艺处理浮选车间废气。冶炼烟气脱硫工艺分为干法、半干法、湿法，铜冶炼过程中废气中含有铅、汞、砷等毒害物气态化合物，采用湿法脱硫工艺相当于在脱硫的同时烟气经过低温洗涤，气态毒害物质可以在脱硫过程中从烟气中脱除。

2.3 废气治理过程中存在的主要问题

目前铜矿浮选厂废气治理存在如下几个主要问题。第一，废气收集系统不完善是造成治理效果差的主要原因。由于浮选车间空间大、设备多，很难实现全面密闭，大量的废气以无组织的形式排放，即使末端处理设备的效率再高，如果收集环节不到位，整体治理的效果仍然不好。第二，现有的治理技术针对性不够强。浮选过程中产生的废气中含有硫化氢、氨等有害物质，若不经处理就直接排放到空气中，会对周围环境及人体健康造成严重危害。但是大部分浮选厂的废气治理仍然以除尘为主，对有害气体的净化考虑不够充分，没有制定出针对 VOCs、恶臭和重金属的综合治理措施。第三，治理设施运行管理没有规矩可循。部分企业为了降低运行成本，造成除尘器清灰不及时、喷淋液不经常更换、活性炭不能及时再生等现象，使实际处理效率远远达不到设计值。第四，高湿度、粉尘、再生困难使得活性炭吸附等技术不能广泛推广。浮选废气含湿量高，容易使活性炭吸附性能降低，而频繁的再生更换又大大提高了运行成本。

表 1 铜矿浮选厂常用废气治理技术综合对比

治理技术	适用污染物	净化效率 (%)	投资成本	运行费用	占地面积	二次污染	维护难度
旋风除尘	粗颗粒粉尘	70~90	低	低	小	无	低
布袋除尘	细颗粒粉尘	99 以上	中	中	中	废布袋	中
湿式洗涤	粉尘+酸性气体	85~95	中高	中高	中	废水	中
活性炭吸附	VOCs/恶臭	50~80	中	高	小	废活性炭	低
复合工艺	粉尘+有害气体	95~99	高	高	大	废水+废渣	高

2.4 废气治理影响因素分析

铜矿浮选厂废气治理效果受诸多因素的影响。废气自身的特性有废气的温度、湿度、粉尘浓度、粒径分布等都会影响到治理技术的选择以及效率。布袋除尘器对于废气温度有要求,温度过高会造成滤袋损坏;湿式洗涤塔的处理效率同气液接触面积、液气比以及喷淋液性质有关。东北极寒地区大型选矿厂冬季需要封闭保温,通风不良造成浮选车间内温度高、药剂气味久滞^[2]。由此可以看出季节变化以及车间通风状况属于决定废气处理效果的外部要素。从管理上讲,集气罩的位置、风机的风量、管道的密闭性等设计参数如果不合理,就会直接影响废气的收集效率。另外,浮选药剂种类及用量都会对 VOCs 产生量及组成造成影响,从而决定之后净化工艺的选择和效果。

3 铜矿浮选厂废气治理关键技术研究

3.1 废气源头减排技术

源头减排是废气治理的第一步,它主要依靠工艺改进和清洁生产来从源头上减少污染物的产生量,进而减轻后面收集和末端处理的负担。破碎环节可以采取低尘爆破、机械采掘、洒水作业等除尘降尘措施,在破碎筛分系统中实行密封,在输送管道上做全密封处理,从源头上控制粉尘的逸散。湿式磨矿工艺在磨矿过程中可以有效地减少粉尘的产生,湿法作业不但可以大大降低作业环境中粉尘的含量,而且有利于后续浮选作业中矿浆的制备。浮选环节中,浮选抽收剂随用随配、分段多次加药是减少药剂挥发的有效方法,通过改进药剂添加方式和时机,可以有效地降低药剂在制备和添加过程中挥发逸散,还可以探索浮选药剂的回用技术,大大降低药剂消耗和生产成本。物料输送部分使用密闭式皮带输送机或者管道气力输送,可以大大减少转运过程中粉尘的逸散。就整体而言,创建起“源头控制-过程调节-末端收集”一体化除尘系统是改善浮选厂环境治理水平的关键途径,必须把各个环节的源头减排举措系统整合起来,塑造出全流程的污染防控体系。

3.2 废气高效收集与密闭控制技术

高效收集是联系产生源和治理设施的纽带,收集效率的好坏直接关系到末端净化设施实际治理效果的好坏。对于破碎、筛分等产生集中的固定源,应该使用封闭罩结构加负压抽风的方式进行收集,封闭罩设计要兼顾操作方便和密闭性能,可以采用透明材质方便观察设备运行状态。对浮选车间等空间大、产生点多的场所,浮选设备入料口、筛料滚筒应采取密闭措施,在出料口上方设集气罩,废气收集效率 $\geq 99.5\%$ 。在全车间范围内可以采用整体通风和局部抽风相结合的方法,用合理的气流组织把车间内逸散

的废气排到收集口。一种选矿车间浮选系统清除异味负压系统,浮选机构顶部连接气味收集机构,气味收集机构侧面设置负压输送机构^[3]。管道系统设计也很重要,应合理确定管道风速、管径、走向,含尘管道风速一般控制在 $16\sim 20\text{m/s}$,防止粉尘沉积堵塞,做好管道密封,防止漏风造成收集效率降低。

3.3 粉尘与有害气体协同治理技术

铜矿浮选厂废气中粉尘和有害气体常常同时出现,单一治理手段很难兼顾,协同治理成了必然的选择。从技术路线看可以采取分级处理、逐级净化的方式,即先用旋风除尘器或者重力沉降室去除粗颗粒粉尘,减小后面设备的负荷,再用布袋除尘器高效捕集细颗粒粉尘,最后根据废气中有害气体种类的不同,选择湿式洗涤、活性炭吸附或者生物净化等工艺进行深度处理。湿式除尘工艺投资大、除尘效率低,单纯的旋风除尘投资小、占地小,但除尘效率低,电袋除尘效率高,但设备贵、占地大。因此组合工艺设计要达到治理效率和经济性的平衡。多点协同除尘系统可以把主要产生点的粉尘浓度降低 90% 以上,明显改善作业环境。有害气体协同去除上,用多项高效的化工分离技术来形成以多污染物协同治理和资源回收为技术核心的技术体系,依靠工艺革新和装备改善,达到废气中硫、氟、粉尘等污染物的有效去除和高值化利用。对含重金属的粉尘还要注意其资源化利用途径,防止二次污染。

3.4 废气净化系统优化与智能控制技术

废气净化系统优化以及智能控制,属于提高治理成效、削减运行费用的有效途径。系统优化时要依照浮选厂实际生产负荷变动情况,恰当安排除尘器及净化设备的处理能力,防止出现“大马拉小车”造成的能源浪费状况。对袋式除尘器来说,要改进清灰周期和脉冲压力,在保持除尘效率的同时减小压缩空气的耗费。对湿式洗涤塔进行在线监测,通过进出口浓度自动调节喷淋量、液气比来达到精准控制的目的。智能化选矿技术,比如用人工智能创建起来的选矿过程控制系统,在对生产数据实施实时监测、分析之后,能自主调节工艺参数^[4]。该理念也可以用来对废气治理系统进行应用,用粉尘浓度传感器、气体检测仪、压差变送器在线监测设备来获取各个治理单元的运行数据,利用智能算法来自动调节运行参数。当某个产生点的粉尘浓度上升的时候,系统就会自动增大该区域的风量;当布袋除尘器的压差达到设定值的时候,就自动开始清灰程序。智能控制一方面可以提高治理系统的稳定性、可靠性,另一方面也可以给精细化环境管理提供数据支持。

4 结语

铜矿浮选厂废气污染源多、成分杂,治理工作存在收集效率低、技术针对性差、运行管理粗放等问题。本文从废气来源和特征入手,对废气收集和治理技术的现状及存在的问题进行梳理,从源头减排、高效收集、协同治理、智能控制四个方面提出关键技术路径。研究表明,铜矿浮选厂废气治理不能只依靠单一的技术,而应该形成一个包含全过程的治理体系。随着环保标准越来越严格、智能控制技术日新月异地发展,铜矿浮选厂废气治理会向着高效化、智能化、资源化方向不断前进,达到环境保护和经济效益协调发展的目的。

[参考文献]

- [1]吴昕烨.中资企业海外铜矿投资的环境、风险与应对[J].国际工程与劳务,2026(7):42-45.
 - [2]杨坤,李静.酸性废水影响下的铜矿山水工环灾害链风险评估与综合治理[J].世界有色金属,2026(1):148-150.
 - [3]罗黎明.某大型露天铜矿高陡边坡隐患治理研究[J].采矿技术,2025,25(4):122-127.
 - [4]陆红.曙光金铜矿露天采场滑坡体治理研究[J].世界有色金属,2025(4):137-139.
- 作者简介:柯玲(1988—),女,汉族,云南省玉溪市人,环境保护工程师,本科,山东理工大学,土木工程专业,现就职于汤丹铜矿,安全环保部副主任,从事环保相关工作。