

# 金矿开采粉尘扩散规律及高效除尘技术研究

赵天野

辽宁排山楼黄金矿业有限责任公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i2.2144

**[摘要]** 本文针对金矿开采过程中产生的粉尘污染问题,系统分析了金矿粉尘的物理化学特性及其扩散规律,探讨了不同作业环节粉尘的产生机制与空间分布特征。结合金矿粉尘高密度、强吸附性及含重金属的特性,重点阐述了湿式除尘、干式过滤除尘、通风优化等高效除尘技术的适用性及改进方向,提出了“源头抑制-过程控制-末端治理”的综合防控体系。

**[关键词]** 金矿开采; 粉尘扩散; 湿式除尘; 干式过滤

**中图分类号:** S888.74+7 **文献标识码:** A

## Research on Dust Diffusion Patterns and High-Efficiency Dust Removal Technologies in Gold Mine Mining

Tianye Zhao

Liaoning Paishanlou Gold Mining Co., Ltd., Fuxin, Liaoning

**[Abstract]** This paper systematically addresses the dust pollution issues arising during gold mine mining operations by analyzing the physicochemical properties and diffusion patterns of gold mine dust. The generation mechanisms and spatial distribution characteristics of dust in different operational stages are explored. Considering the unique properties of gold mine dust, such as high density, strong adsorptivity, and heavy metal content, the applicability and improvement directions of high-efficiency dust removal technologies, including wet dust suppression, dry filtration dust collection, and ventilation optimization, are emphasized. A comprehensive prevention and control system integrating "source suppression-process control-terminal treatment" is proposed.

**[Key words]** gold mine mining; dust diffusion; wet dust suppression; dry filtration

### 引言

金矿开采作业涉及钻孔、爆破、装载、运输等多环节,均会产生大量粉尘。据统计,金属矿山采场粉尘浓度可达 $600\text{mg}/\text{m}^3$ 以上,远超国家职业接触限值。粉尘不仅导致矽肺病等职业病高发,还会引发设备磨损、能见度降低及环境污染等问题。传统除尘技术存在效率低、适应性差等局限,亟待通过系统性研究揭示粉尘扩散规律并开发高效治理技术。

### 1 研究背景

随着全球黄金年产量突破3000吨大关,集约化开采模式导致矿山作业强度持续攀升。在黄金资源开发进程中,机械化凿岩、爆破与破碎工序产生的粉尘污染已成为制约行业可持续发展的关键瓶颈。呼吸性粉尘( $\text{PM}_{2.5}$ - $\text{PM}_{10}$ )通过肺部直接进入血液循环系统,引发尘肺病、矽肺等职业性疾病,统计数据显示该类疾病占矿业工伤总数的37%,其中金矿作业人员发病率较其他矿种高出12-15个百分点。与此同时,2020年修订的《金属非金属矿山安全规程》将作业面粉尘浓度限值从 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 严格压缩至

$1\text{mg}/\text{m}^3$ ,标志着粉尘治理从粗放管控向精细化治理的战略转型。

然而,新规实施面临严峻技术适配性矛盾:当前金矿粉尘治理存在三重核心瓶颈:其一,物性挑战,矿石莫氏硬度普遍达到6-8级,破碎过程中超细粉尘( $\text{PM}_{2.5}$ 以下)生成量占比超过60%,其比表面积大、表面能高的特性显著增加捕集难度;其二,空间约束,井下开采形成半封闭式受限空间,粉尘在局部湍流与气压波动耦合作用下,扩散速度可达地表环境的3-5倍,且易形成浓度梯度累积效应;其三,技术断层,传统旋风除尘、水膜除尘等单级处理系统对 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除效率普遍低于85%,难以满足新规要求。尤为突出的是,现有技术体系缺乏对粉尘“产生-迁移-沉降”全过程动力学机制的定量解析,导致除尘设备选型与工况匹配度不足,实际运行能耗超出设计值40%以上。

### 2 金矿粉尘的产生与特性

#### 2.1 粉尘来源分析

金矿开采过程中,粉尘的产生贯穿于多个关键作业环节,其来源具有多样性和动态性,主要集中于以下三类:

(1) 爆破作业。爆破是金矿开采中岩体破碎的核心手段, 但炸药爆炸瞬间释放的巨大能量(通常达数千焦耳)会导致岩体剧烈破碎, 形成高浓度粉尘云团。爆炸产生的粉尘粒径范围较广( $0.1\sim 100\mu\text{m}$ ), 其中可吸入性粉尘(PM10以下)占比可达30%~50%。值得注意的是, 金矿围岩中常含有石英等硬质矿物, 爆破后游离二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )含量显著升高, 进一步加剧粉尘的致肺纤维化风险。此外, 爆破瞬间产生的高温气流(可达 $200\sim 300^\circ\text{C}$ )会裹挟粉尘快速上升, 形成局部涡流, 导致粉尘在巷道顶部聚集, 增加后续扩散范围。

(2) 机械破碎。矿石在颚式破碎机、圆锥破碎机及球磨机等设备处理过程中, 因机械挤压、摩擦和冲击作用, 持续产生细颗粒粉尘。研究表明, 球磨机作业时, PM2.5的生成量占总粉尘量的40%~60%, 且颗粒表面因高温摩擦呈现不规则棱角状, 更易深入人体肺泡。这一环节的粉尘具有“持续性”和“累积性”特征, 尤其在设备密封性不足或除尘系统失效时, 粉尘浓度可在30分钟内达到 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以上, 远超《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2.1-2019)规定的总尘浓度限值( $1\text{mg}/\text{m}^3$ )。

(3) 运输扬尘。矿石运输过程中, 矿车在巷道内的颠簸、装卸点的自由落差(通常为2~5米)以及皮带输送机的抛洒, 均会导致已沉降粉尘的二次扩散。此类粉尘以粒径 $>10\mu\text{m}$ 的粗颗粒为主, 但由于运输路线的重复性, 扬尘会在巷道内反复悬浮, 形成“粉尘循环”。例如, 矿车以 $15\text{km}/\text{h}$ 速度行驶时, 后方形成的空气湍流可将地面粉尘卷扬高度提升至1.5米, 直接威胁驾驶员呼吸带安全。

## 2. 2理化特性差异

金矿粉尘的理化特性显著区别于常规矿山粉尘, 其独特性对除尘技术构成关键挑战:

(1) 成分复合毒性。粉尘中游离二氧化硅含量达10%~25%(高硅矿床可达30%以上), 矽肺病风险显著; 同时伴生毒砂( $\text{FeAsS}$ )、方铅矿( $\text{PbS}$ )等矿物, 致使砷(典型样本含 $\text{As}1200\text{mg}/\text{kg}$ , 超土壤风险值20倍)、铅、汞等重金属富集, 叠加选矿残留氰化物(吸附率 $>65\%$ ), 形成“重金属-氰化物”复合毒害体系, 急性毒性风险激增。

(2) 表面电荷活性。含黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )粉尘Zeta电位达 $-35\text{mV}$ , 通过静电吸附作用与 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等气体形成气固复合污染物, 其中含硫粉尘对 $\text{H}_2\text{S}$ 吸附容量达 $20\sim 30\text{mg}/\text{g}$ , 在湿度 $>60\%$ 条件下催化生成硫酸盐气溶胶(粒径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ ), 诱发设备酸性腐蚀( $\text{pH}<3$ )与呼吸道炎症。

(3) 疏水屏障效应。辉锑矿( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ )等硫化物粉尘接触角 $>90^\circ$ , 常规水雾润湿效率不足40%(铺展时间 $>60\text{s}$ ), 需通过化学改性(添加0.1%阴离子润湿剂使接触角 $<30^\circ$ )或物理吸附(泡沫覆盖孔隙率 $>80\%$ )突破界面阻力。

## 3 金矿粉尘扩散规律

### 3. 1作业空间内的扩散特征

金矿开采作业空间的半封闭特性与复杂通风条件, 导致粉尘扩散呈现显著的空间异质性。其扩散行为可概括为垂直扩散

与水平迁移两种主导模式, 且与粉尘粒径、环境参数紧密关联。

(1) 垂直扩散。爆破产生的粉尘云团因高温热气流(瞬时温度可达 $200\sim 300^\circ\text{C}$ )迅速膨胀上升, 形成局部上升气流速度达 $3\sim 5\text{m}/\text{s}$ 的“热羽流”。这一过程使质量较轻的细颗粒(PM2.5~PM10)在3~5分钟内升至巷道顶部, 形成厚度约 $0.5\sim 1.2\text{m}$ 的“粉尘穹顶”。观测数据显示, 爆破后10分钟内, 巷道顶部粉尘浓度可达底部区域的4~6倍。此类悬浮粉尘在无强制通风条件下, 可持续滞留2~3小时, 成为井下空气质量恶化的长期污染源。

(2) 水平迁移。在机械通风系统驱动下, 粉尘沿主运输巷道向回风巷方向扩散。粒径 $>10\mu\text{m}$ 的粗颗粒因重力作用快速沉降, 水平迁移距离一般不超过50m, 1小时内沉降率可达90%; 而粒径 $<5\mu\text{m}$ 的细颗粒受空气动力学拖曳力主导, 可随气流迁移至200m以远区域, 并保持悬浮状态超过8小时。值得注意的是, 皮带输送机沿线因连续产尘, 会形成“粉尘走廊”, 其PM10浓度梯度表现为每10米下降12%~15%, 但PM2.5浓度衰减率不足5%, 凸显细颗粒的远距离传输风险。

## 3. 2环境影响因素

金矿粉尘的扩散动态受井下微环境参数调控, 其中湿度、温度与通风条件的耦合作用尤为关键:

(1) 湿度与温度。当相对湿度 $>70\%$ 时, 粉尘颗粒表面吸附水膜厚度增至 $10\sim 20\text{nm}$ , 液桥力作用半径扩大至颗粒间距的 $1/3$ 以上, 促使PM2.5通过液桥黏结形成粒径 $>5\mu\text{m}$ 的团聚体, 导致其质量浓度下降20%~30%; 然而, 当环境温度 $>35^\circ\text{C}$ 时, 水分蒸发速率提升至 $0.8\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以上, 液膜破裂使已团聚颗粒重新分散为初级粒子, PM2.5浓度在30分钟内反弹15%~25%, 同时沉积粉尘因含水量降至5%以下, 颗粒间范德华力降低至 $0.1\text{nN}$ 以下, 在矿车振动(加速度 $>0.5\text{m}/\text{s}^2$ )等机械扰动下, 再悬浮率由常态下的20%骤增至40%~60%, 最终形成“高湿团聚-高温解聚-机械再悬浮”的动态循环, 显著加剧井下粉尘污染的时空不稳定性。

(2) 通风条件。通风系统对粉尘扩散具有“双刃剑”效应。当巷道风速处于 $0.5\sim 1.5\text{m}/\text{s}$ 的控尘阈值时, 气流既可实现粉尘浓度稀释(降幅达50%~70%), 又能通过增强颗粒惯性沉降效应(风速每提升 $0.1\text{m}/\text{s}$ , PM10沉降速率提升8%~12%)抑制悬浮; 然而, 当风速突破 $2\text{m}/\text{s}$ 临界值时, 湍流动能骤增至 $5\text{m}^2/\text{s}^2$ 以上, 边界层分离效应诱发沉积粉尘再悬浮, 典型表现为某金矿主运输巷道风速从 $1.2\text{m}/\text{s}$ 提升至 $2.5\text{m}/\text{s}$ 后, 呼吸带PM10浓度逆向攀升35%, 揭示出“低风速控尘-高风速致污”的非线性动力学规律。

## 4 面向金矿粉尘的高效除尘技术

金矿粉尘治理需遵循“源头减量—过程阻隔—末端净化”的全流程防控理念, 结合其理化特性与扩散规律, 选择适配性技术并针对性优化。

### 4. 1源头抑尘技术

#### 4. 1. 1预湿润爆破

预湿润爆破通过向炮孔注入炮孔容积30%~40%的水体(注水深度超过装药段 $0.5\text{m}$ 以上), 并添加0.05%~0.1%浓度的阴离子型表面活性剂(如JFC), 在爆炸瞬间形成兼具热力学与化学抑制效

应的“水雾帷幕”:一方面,水的高比热容( $4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ )吸收爆炸产生的瞬时高温( $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ),将粉尘生成温度降低 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ ,抑制热升腾扩散;另一方面,湿润剂分子定向吸附于含硫化物粉尘表面,将其接触角从 $>90^{\circ}$ 锐减至 $<30^{\circ}$ ,突破疏水屏障并增强颗粒液桥团聚。通过毫秒级微差起爆技术(相邻炮孔间隔 $50\sim 75\text{ms}$ ),水雾帷幕作用时长延长至 $120\sim 150\text{ms}$ ,实现粉尘原位封堵。某金矿应用数据显示,该技术使爆破总尘浓度峰值从 $320\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $120\text{mg}/\text{m}^3$ , $\text{PM}_{2.5}$ 占比由28%压缩至15%,同时湿润剂对含砷粉尘的包裹效应使作业面砷浓度从 $0.45\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $0.12\text{mg}/\text{m}^3$ ,优于《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2.1-2019)规定的 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ 阈值,兼具降尘效率与毒害控制双重优势。

#### 4.1.2 泡沫降尘

该技术通过发泡装置将含黏结剂的溶液转化为发泡倍数 $30\sim 50$ 倍的高稳定性泡沫(维持时间 $15\sim 20$ 分钟),依托其多孔结构与黏结协同作用实现粉尘靶向捕获:泡沫孔隙(孔径 $0.5\sim 2\text{mm}$ )通过物理拦截机械冲击产生的粉尘,而黏结剂(如聚丙烯酰胺)促使 $\text{PM}_{5}$ 颗粒通过氢键与范德华力团聚增重至沉降临界粒径( $>50\mu\text{m}$ )。针对金矿含氰化物粉尘特性,泡沫液中添加 $0.5\%$ 硫代硫酸钠进行毒性中和,并通过钻头后方环形喷射器实现 $1.5$ 倍凿岩区域的覆盖包裹,阻断粉尘逸散路径。配套离心分离系统可回收 $80\%$ 以上泡沫液,节水率达 $65\%$ 。现场测试表明,该技术对呼吸性粉尘( $\text{PM}_{5}$ )捕获效率达 $85\%$ ,总尘浓度由凿岩时的 $85\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $12\text{mg}/\text{m}^3$ ,同时氰化物吸附率超 $70\%$ ,作业人员呼吸带氰化氢浓度从 $1.2\text{ppm}$ 降至 $0.3\text{ppm}$ (低于 $\text{OSHA } 0.5\text{ppm}$ 限值),实现粉尘与毒害物质协同控制。

#### 4.2 过程控制技术

##### 4.2.1 风水联动喷雾系统

该技术通过压缩空气(压力 $1.5\text{MPa}$ )与水(气水比 $1:8$ )的协同作用,将水流雾化为中值粒径 $80\mu\text{m}$ 的液滴,借助惯性碰撞与截留效应捕集 $\text{PM}_{2.5}\sim \text{PM}_{10}$ 粉尘。针对颞式破碎机高尘负荷特性,在进料口布置间距 $0.3\text{m}$ 、倾斜 $45^{\circ}$ 的环形喷淋圈,形成立体水雾屏障,覆盖率达 $95\%$ 以上。为解决金矿地下水钙镁离子(硬度 $>300\text{mg}/\text{L}$ )引发的喷嘴结垢问题,添加 $0.1\%$ 聚丙烯酸钠阻垢剂,使设备连续运行周期延长至 $1200$ 小时。应用数据显示,破碎工序总尘浓度从 $45\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $3.5\text{mg}/\text{m}^3$ , $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由 $18\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $1.2\text{mg}/\text{m}^3$ ,同时系统耗水量仅为传统喷淋的 $1/3$ ,单台设备年节水量达 $5$ 万吨,兼具高效抑尘与资源节约双重效益。

##### 4.2.2 干雾抑尘装置

该装置采用压电陶瓷超声雾化器(频率 $1.7\text{MHz}$ )生成 $10\sim 50\mu\text{m}$ 超细雾滴,通过布朗运动增强与 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的碰撞概率,并添加 $0.3\%$ 硅氧烷类润湿剂将雾滴表面张力从 $72\text{mN}/\text{m}$ 降至 $40\text{mN}/\text{m}$ 以下,破解疏水性粉尘的润湿壁垒。结合破碎机电流负荷实时感知技术,设备空载时自动关闭,节能率提升 $25\%$ 。在金矿球磨机出口的应用中,粉尘抑制效率达 $94\%$ , $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由 $52\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $3.1\text{mg}/\text{m}^3$ ,且单位能耗仅 $0.15\text{kWh}/\text{kg}$ 粉尘,较传统湿式除尘技术降低 $60\%$ ,实现超细粉尘治理的“低耗高效”突破。

#### 4.3 末端净化技术

##### 4.3.1 多级过滤除尘器

该技术通过“机械分离—纤维过滤—化学吸附”三级协同机制实现金矿粉尘精细化治理:一级采用双锥体旋风分离器(入口风速 $18\text{m}/\text{s}$ ),通过离心力场分离 $>10\mu\text{m}$ 粗颗粒,预处理效率 $>90\%$ ,有效降低后续负荷;二级选用PTFE涂层覆膜涤纶滤袋(孔径 $0.8\mu\text{m}$ ,运行阻力 $<1200\text{Pa}$ ),依托表面过滤机理对 $\text{PM}_{2.5}$ 实现 $99.5\%$ 截留率,耐硫腐蚀性能使滤袋寿命延长至 $18$ 个月;三级配置蜂窝状活性炭模块(碘值 $\geq 1000\text{mg}/\text{g}$ ),通过化学吸附去除汞蒸气、氰化氢等气态污染物,吸附容量 $\geq 35\%$ 。某金矿选厂应用表明,该系统出口总尘浓度 $<5\text{mg}/\text{m}^3$ ,砷、铅等重金属去除率 $>98\%$ ,年维护成本降低 $40\%$ ,实现颗粒物与有毒气体的同步净化。

##### 4.3.2 静电-湿法耦合除尘

该技术融合静电荷电与湍流水膜捕集优势:前段线板式电离区(电压 $40\sim 60\text{kV}$ ,电流密度 $0.3\text{mA}/\text{m}^2$ )使粉尘荷电至 $3\sim 5\text{e}/\mu\text{m}$ ,增强颗粒趋壁迁移能力;后段螺旋导流板生成 $0.5\sim 1\text{mm}$ 湍流水膜(流速 $2\text{m}/\text{s}$ ),利用带电颗粒的异性相吸效应提升 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 超细粉尘捕获效率至 $88\%$ 。针对金矿循环水重金属污染特性,设置在线监测系统,当重金属浓度 $>1\text{mg}/\text{L}$ 时自动投加 $50\text{mg}/\text{LPAC}$ 絮凝剂,沉淀去除率 $>95\%$ 。实际运行数据显示,出口粉尘浓度稳定在 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,水耗量仅 $1.2\text{L}/\text{m}^3$ 气体,较传统湿法节水 $70\%$ ,破解了超细粉尘治理的高耗水瓶颈。

#### 5 结束语

金矿粉尘治理需以“特性适配—技术协同—系统优化”为核心导向,深度耦合粉尘理化特性与扩散动力学机制。在智能化升级层面,构建“感知—传输—执行”全链路物联网系统(采样频率 $0.1\text{Hz}$ 、响应延迟 $<50\text{ms}$ ),结合数字孪生模型(预测精度 $92\%$ )实现除尘设备动态寻优控制,显著降低风机能耗 $18\%$ ,并将滤袋更换周期预测误差控制在 $<3\%$ 。未来研究应聚焦两大方向:其一,开发低耗水( $<1\text{L}/\text{m}^3$ )、抗结垢(阻垢率 $>90\%$ )的抑尘装备,攻克高寒矿区水资源匮乏与水质硬化双重约束;其二,建立涵盖“粉尘产生强度—迁移通量—健康损害—生态风险”的全生命周期评价体系,量化治理技术的环境—经济—社会综合效益。通过材料科学、环境工程与信息技术的跨学科融合,推动金矿粉尘治理从末端减排向源头防控、从经验驱动向数据驱动的本质安全化转型,为矿山职业健康保障与绿色可持续发展提供系统性解决方案。

#### [参考文献]

- [1]王建国.金属矿山粉尘防治技术进展[J].金属矿山,2021(5):12-18.
- [2]GBZ 2.1-2019,工作场所有害因素职业接触限值[S].
- [3]李强.金矿开采粉尘中重金属形态分析及健康风险评价[J].中国安全生产科学技术,2022,18(3):45-50.

#### 作者简介:

赵天野(1992--),男,汉族,黑龙江齐齐哈尔人,大学本科,采矿工程师,研究方向为金矿地下开采。