

# 大型露天矿运输道路粉尘控制与环境治理技术分析

蒲恒强

宏大爆破工程集团有限责任公司 广东 广州 510623

**【摘要】**：露天矿运输道路粉尘污染是矿山生产中突出的环境与安全共性问题，对作业环境、生态系统及人员健康均构成多重负面影响。以中泰圣雄黑山煤矿（年产400万t）为工程实例，从路面抑尘、车辆管控、智能监测、生态修复多维度梳理粉尘控制关键技术，构建粉尘治理效果评价指标体系与现场评估方法，本文剖析治理实施过程中存在的布局适配、设备运维、技术匹配等现实问题，结合矿区既有实测数据提出针对性优化改进路径。研究形成适配大型露天矿的粉尘管控与环境协同治理技术体系，可为同类矿山粉尘污染治理及绿色矿山建设提供参考借鉴。

**【关键词】**：露天矿；运输道路；粉尘控制；环境治理；生态修复

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.072

## 引言

露天煤矿规模化开采与运输作业持续产生大量道路扬尘，已成为制约矿山绿色生产、区域生态保护及安全生产管控的突出难题。随着煤炭产能持续提升，矿区运输路网通行频次不断加大，粉尘扩散范围持续拓宽，不仅扰乱现场正常生产秩序，还对周边水土、植被及人居环境形成持续性影响。当前行业缺乏系统化、体系化的粉尘综合治理模式，现有治理技术存在应用零散、管控精度不足等问题。依托大型露天煤矿实际工程案例，系统梳理粉尘污染危害、防控技术及协同治理举措，开展治理成效评价与技术优化探究，对完善矿山粉尘管控体系、推进生态矿山长效建设具有现实意义。

## 1 露天矿运输道路粉尘污染影响

### 1.1 粉尘对矿山作业环境的影响

露天矿运输道路产生的粉尘以细颗粒、干散状为主，在车辆行驶扰动与风力作用下长期悬浮于采掘、运输、排土等核心作业区上空，直接降低大气能见度，尤其在干燥、大风天气，能见度可降至不足50米。运输车辆、大型挖掘机、装载机等设备行驶和作业时，扬起的粉尘会迅速笼罩驾驶区域，遮挡驾驶员视线，导致会车、转弯、坡道制动、盲区观察等环节安全风险显著上升，极易引发碰撞、侧翻、坠坡等事故<sup>[1]</sup>。同时，粉尘持续沉降在设备表面，侵入轴承、齿轮、发动机、液压管路、电气控制柜等关键部位，造成磨损加剧、油路堵塞、散热不良、电路接触不良等问题，使设备故障率升高、维修周期缩短、运维费用大幅增加。此外，粉尘覆盖道路标识、安全警示牌、监控摄像头与传感器，削弱识别度和监测精度，干扰调度指挥、车辆调度和安全预警，破坏矿山连续、稳定、高效的生产秩序。

### 1.2 粉尘对周边生态环境的影响

露天矿运输道路粉尘在风力输送下呈带状、面状向矿区外围扩散，覆盖范围可延伸至周边农田、林地、草地、坡地及水域，对区域生态系统造成持续、多维度破坏。粉尘颗粒沉降于

植物叶片表面，堵塞气孔，阻碍光合作用与气体交换，导致叶片发黄、枯萎、脱落，抑制草本、灌木及乔木正常生长，造成植被长势衰退、生物量下降、群落结构退化。粉尘随雨水冲刷进入土壤后，会填充土壤孔隙，破坏团粒结构，导致土壤板结、透气性变差、保水保肥能力下降，影响农作物根系呼吸与养分吸收，造成减产、品质降低，长期累积可导致局部土地退化、生产力下降。细微粉尘漂移至河道、湖泊表面，会降低水体透光率，抑制浮游植物生长，破坏水生食物链，影响鱼类及水生生物生存。同时，粉尘长期沉降改变地表覆被，使原生植被衰退、耐尘杂草入侵，打破自然生态平衡，加剧区域水土流失与土地沙化风险。

### 1.3 粉尘对人体健康的潜在危害

露天矿道路粉尘中含有游离二氧化硅、重金属、矿物细颗粒等有害成分，粒径多集中在可吸入范围，长期暴露会对人体呼吸系统、心血管系统、皮肤及眼部造成不可逆损害。细颗粒物（PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>）经呼吸道进入人体后，可直达肺泡并长期沉积，难以排出，持续刺激肺组织，诱发支气管炎、哮喘、肺气肿，严重时导致尘肺病、肺纤维化，造成不可逆的呼吸功能损伤。粉尘携带的重金属与有毒物质进入血液循环后，会加重血管负担，损伤血管内皮，诱发高血压、动脉硬化、心肌缺血等心血管疾病。悬浮粉尘附着于皮肤，堵塞毛孔，影响汗液排泄与新陈代谢，引发皮肤干燥、瘙痒、炎症；粉尘刺激眼结膜，造成干涩、红肿、刺痛、结膜炎，长期可影响视力<sup>[2]</sup>。长期高粉尘环境作业会削弱呼吸道黏膜屏障，降低机体免疫力，易反复发生感冒、呼吸道感染等疾病，形成群体性健康隐患，严重影响从业人员身心健康与劳动能力。

## 2 露天矿运输道路粉尘控制技术

### 2.1 路面抑尘技术

路面抑尘是从源头减少粉尘起扬的基础手段，核心是通过化学材料实现路面颗粒固结与长效稳尘。选用高分子聚合物类抑尘剂，其成分可与路面矿质颗粒发生物理黏结与化学交联反

应,在表层形成连续致密的固化保护膜。该膜层能有效锁住路面内部毛细水分,抑制松散颗粒受车辆碾压、摩擦及风力扰动扬起,从根本上弱化扬尘产生条件。根据矿区道路通行强度、土质颗粒特性合理调配药剂浓度,采用专业喷洒设备均匀布液,保证药剂渗透至路面合理深度,适配不同季节温湿度变化,维持稳定固尘效果。相较于传统洒水,该技术避免了时效性短、作业频繁、水资源消耗大的缺陷,通过材料配方优化与喷洒工艺规范,构建长效化、低维护的路面固尘体系,保障运输路面长期处于低扬尘状态。

## 2.2 车辆管控抑尘技术

车辆管控是大型露天矿运输道路粉尘治理的核心,聚焦运输源头抑尘,通过装备改造与运行管理结合,构建扬尘防控体系。露天矿运输量大、车辆密集,运输车辆是道路粉尘主要源头,因此强化车辆管控是提升粉尘治理成效的关键。装备改造方面,重点优化矿用自卸卡车结构:加装耐磨损柔性密封挡尘装置,填补车厢缝隙,防止物料泄漏和粉尘逸散;规范物料装载标准,明确装载高度,严禁超装,避免运输中物料洒落产生二次扬尘;部分露天矿对货厢进行覆膜改造,全覆盖货厢减少粉尘飘散。运行管理方面,依托矿区自动化调度体系,优化车辆行驶工况:结合路况制定差异化限速标准,降低高速行驶产生的路面涡流;明确车间距,防止粉尘二次扩散;实时监控车辆行驶、装载状态,对违规行为预警处置,减少运行环节扬尘增量。技术升级方面,推广无人化运输装备,利用自动驾驶实现匀速行驶、精准控速,减少工况波动带来的粉尘;其可与调度、粉尘监测系统联动,根据粉尘浓度调整行驶参数,实现抑尘与效率协同提升<sup>[3]</sup>。综上,车辆管控已形成全链条源头抑尘路径,为露天矿道路粉尘治理提供有力支撑。

## 2.3 道路结构优化抑尘技术

道路结构优化是大型露天矿运输道路粉尘控制与环境治理的重要基建支撑,核心是通过提升道路自身稳定性、耐磨性与抗起尘能力,从源头减少路面扬尘产生,为粉尘治理筑牢基础。大型露天矿运输道路承载着重载矿用车辆的高频通行,长期受车辆碾压、风吹雨淋及物料散落冲击,易出现破损、起砂等问题,进而产生大量粉尘,因此优化道路结构是长效抑尘的关键举措。路基填筑阶段,选用级配优良、强度高的碎石混合料,严格按照施工规范分层碾压夯实,严控压实度与平整度,降低路基不均匀沉降风险,从根源上避免路面因沉降出现开裂、起砂、松散等隐患,减少粉尘产生源头。路面面层采用硬质耐磨集料铺设,增强路面抗碾压、抗磨损性能,延长路面使用寿命,减少长期车辆通行造成的表层破损与颗粒脱落,降低路面扬尘增量。同时优化路面横坡与排水坡度设计,完善侧边排水沟渠布设,确保能及时疏导路面积水与泥水混合物,防止路面因干湿交替、积水浸泡导致风化松散,进一步提升路面抗起尘能力。此外,增设道路防尘隔离带与边坡固化护坡结构,

采用植被防护与固化材料结合的方式加固边坡土体,弱化侧向风力对路面表层颗粒的吹蚀作用,减少风力扬尘。从路基筑牢、面层强化、排水完善到边坡防护,多维度优化道路结构,全面提升道路整体抑尘性能,为露天矿运输道路粉尘治理提供坚实的基建保障。

## 2.4 智能监测与精准抑尘技术

智能监测与精准抑尘依托信息化、智能化手段,实现粉尘动态管控与高效治理。在矿区全域网格化布设粉尘在线传感设备,实时采集颗粒物浓度数据,通过物联网传输架构,实现监测数据与矿区调度控制平台互联互通,形成全域粉尘时空分布动态数据库。系统搭载智能分析算法,构建粉尘浓度阈值预警模型,自动识别局部粉尘超标区域,联动智能洒水设备、雾炮抑尘装置,触发自动化定点靶向降尘作业。结合气象风速、风向、温湿度等环境参数,分析粉尘扩散迁移规律,动态调整抑尘作业强度、范围与频次,避免盲目作业造成资源浪费。形成监测、分析、预警、治理一体化闭环管控模式,提升粉尘治理的精准性、及时性与高效性,助力矿山智慧环保体系建设。

## 3 露天矿运输道路周边环境协同治理措施

### 3.1 粉尘扩散防控辅助

粉尘扩散防控辅助重在构建多层次物理与生态阻隔体系,从空间上阻断粉尘向外围扩散路径。结合矿区地形走向与常年主导风向,在运输干道两侧、作业区外围及粉尘易扩散区域,设置连续性植被防风屏障,优先选用根系发达、冠层浓密、耐旱耐旱的灌木与草本植物,形成高低搭配的带状绿植带,通过植物枝叶拦截、吸附悬浮粉尘,同时依靠根系稳固地表松散土体,抑制二次起尘。在植被屏障薄弱区段或关键风口位置,架设模块化柔性防尘围挡,采用金属框架搭配阻燃防尘网结构,围挡布设高度、间距及走向贴合气流运动规律,形成封闭性物理阻隔圈层,阻挡粉尘横向迁移<sup>[4]</sup>。对矿区低洼地带、天然沟谷进行适度整理,构建自然滞尘缓冲区域,利用气流绕流减速效应促使悬浮粉尘自然沉降,全面强化粉尘扩散的综合阻滞效果。

### 3.2 粉尘收集与固废处置

粉尘收集与固废处置聚焦散落粉尘的归集、处理与资源化利用,避免粉尘二次扩散并实现固废闭环管控。针对运输转载点、物料破碎站、道路交叉口等粉尘集中产生区域,采用封闭式集气罩与负压吸尘管路组合布设,形成定向捕集通道,将作业过程中扬起的微细粉尘高效输送至专用除尘装置,通过多级过滤结构分级拦截不同粒径粉尘颗粒,有效防止无组织粉尘向外逸散。对道路路面、作业场地长期沉积的粉尘,采用机械化清扫设备开展全域常态化作业,依靠负压清扫、湿式收集方式集中归集粉尘,从根本上杜绝人工清扫扰动浮尘所引发的二次扬尘问题<sup>[5]</sup>。归集后的粉尘废渣依据矿物组分与物理特性分区

分类存放，经固化、稳定化无害化处理，可作为路基填筑材料、生态修复覆土原料循环利用，也可回填至矿坑采空区实现

就地消纳，切实达成粉尘固废减量化、无害化、资源化处置目标。见图 1。

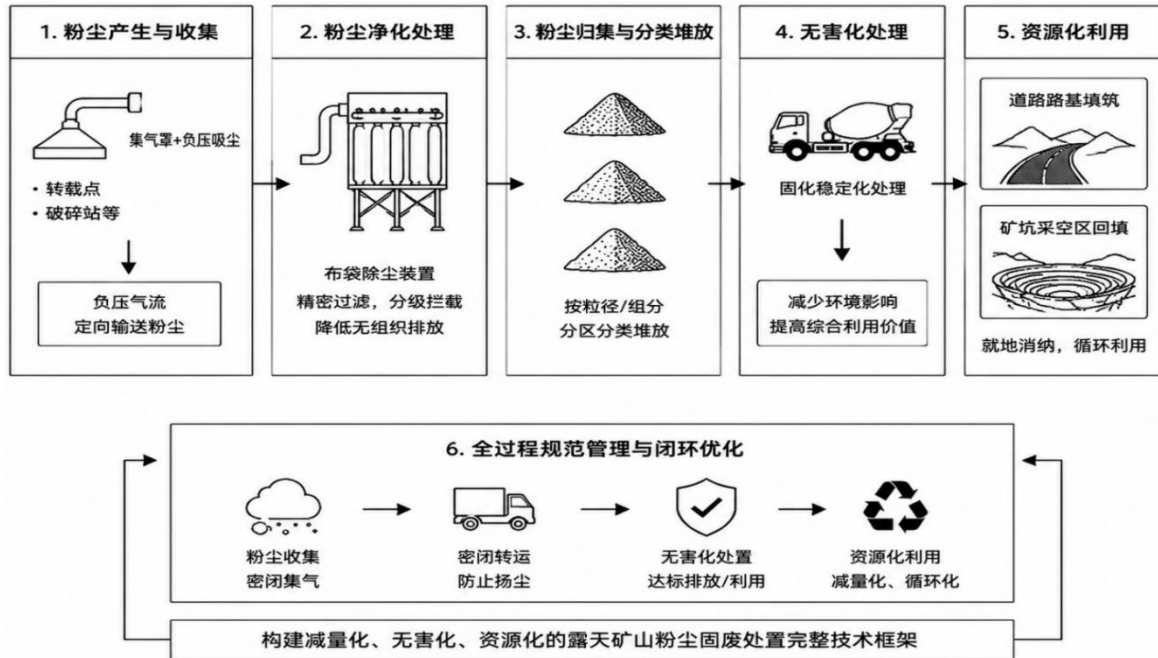


图 1 露天矿山粉尘收集与资源化利用流程示意图

### 3.3 周边生态修复配套措施

周边生态修复配套措施以重建稳定植被群落为核心，从根本上改善粉尘影响区域生态条件，实现长效固尘。结合矿区排土场、废弃边坡、道路两侧及粉尘沉降区域的地形坡度、土层厚度与土壤基质状况，进行分区规划与差异化治理，优先筛选本土、耐旱、耐贫瘠、抗粉尘胁迫的植被品种，提升植被定植成活率与长期适应性。对土壤条件较差区域，采用客土回填、有机质掺拌、土壤改良剂施用等方式，优化土壤颗粒结构，调节土壤酸碱度，提升土壤保水保肥能力，为植被生长创造良好基质条件。采用乔木、灌木、草本相结合的立体配置模式，构建层次丰富、结构稳定的植被群落，同步配套节水灌溉管网，保障植被生长期水分供给。植被群落成型后，可通过冠层持续阻滞吸附大气悬浮粉尘，依靠密集根系固结地表裸露土体，从源头抑制就地起尘与风力扬尘，逐步恢复区域生态功能，实现粉尘治理与生态修复深度融合。

## 4 粉尘控制与环境治理效果评价及优化

### 4.1 治理效果评价指标体系

以中泰圣雄黑山煤矿年产 400 万吨规模为依托，构建多维度、量化的露天矿运输道路粉尘治理效果评价指标体系，覆盖大气环境、生产作业、设备工况、生态恢复及经济投入五大核心维度。大气环境层面，将 TSP、PM10、PM2.5 实时浓度

作为核心评价因子，直观反映粉尘污染控制成效。生产作业层面，纳入路面起尘强度、矿区道路可视距离等指标，体现治理对现场作业条件的改善作用。设备工况层面，选取机电设备年均检修频次，衡量粉尘对设备损耗的控制效果。生态恢复层面，包含植被覆盖度、生态修复面积等指标，反映生态治理进展。经济投入层面，统计粉尘治理单项投入及年度运维费用，平衡治理效果与成本。参照行业环保限值标准划定各指标等级区间，结合中泰圣雄黑山煤矿生产规模赋予差异化权重占比，形成多层次量化评价架构，实现治理成效精准定级与横向对比。见图 2。

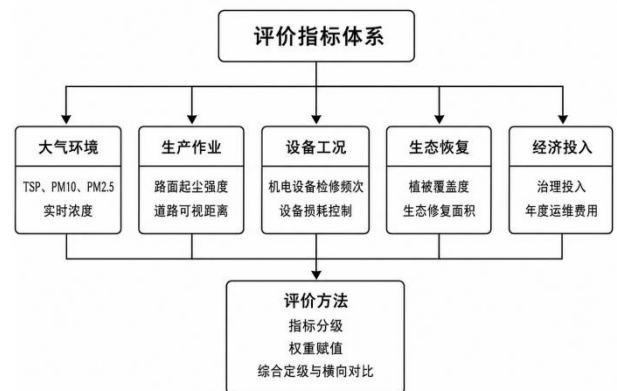


图 2 露天矿运输道路粉尘治理效果评价指标体系

## 4.2 现场检测与效果评估方法

针对中泰圣雄黑山煤矿 400 万吨级露天矿实际工况, 结合运输道路粉尘扩散范围广、瞬时浓度波动大、受作业工况影响显著等特点, 采用固定点位在线监测与移动巡回检测相结合的综合检测模式, 系统开展粉尘治理现场检测与效果评估工作, 为运输道路粉尘控制及全域环境治理提供科学数据支撑。矿区全域科学布设 12 套粉尘在线监测仪, 重点覆盖运输主干道、转载点、卸料区及穿爆作业区周边, 实现总悬浮颗粒物 (TSP)、可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 浓度全天候、不间断连续采集, 监测数据实时传输并接入矿区调度指挥平台, 形成长期、连续的粉尘浓度动态监测序列, 便于实时掌握粉尘污染动态。依托高精度便携式粉尘检测设备, 对运输道路、穿爆作业区、排土场等关键粉尘污染源区域, 开展分时段、多频次现场采样检测, 同步详细记录气象条件 (风速、湿度、温度)、作业车流量、运输车辆类型及行驶速度等辅助参数, 构建多时段、多区段、多工况的原始监测数据集<sup>[6]</sup>。对采集的职业危害因素检测评价数据进行系统整理、筛选与校验, 运用数据比对、均值统计、空间分布推演及趋势分析等方法, 重点对比粉尘治理措施实施前后运输道路及周边区域的粉尘浓度变化, 实测数据显示, 爆破作业区域粉尘浓度较治理前下降 35%, 运输道路扬尘浓度下降幅度达到预期标准, 以此定量研判粉尘治理措施的实际成效。整套检测评估流程经过现场实践优化, 形成适配中泰圣雄黑山煤矿年产 400 万吨级露天矿的粉尘实测与效能分析范式, 全面保障评估结果的客观性、精准性与可追溯性, 为露天矿运输道路粉尘控制技术优化及全域环境治理水平提升提供可靠依据。

## 4.3 治理过程中的现存问题分析

中泰圣雄黑山煤矿在粉尘治理落地运行中, 仍存在多方面现实短板, 制约治理效能充分发挥。现有 12 套在线监测仪集中布设于核心主干道, 偏远支线、排土场周边等区域存在监测点位空白, 无法实现全域粉尘数据全覆盖采集, 易出现局部污染漏管。智能抑尘车单台有效控尘面积 6000 平方米, 受布设数量限制, 部分边缘区域、作业盲区仍存在抑尘覆盖缺口, 难以做到无死角管控。树脂型长效抑尘剂按 1:23 浓度、单次 70

吨喷洒量作业时, 低温季节药剂渗透效果明显衰减, 长期连续施用还易引发路面板结硬化, 影响道路通行质量。规划 25 台无人驾驶矿卡规模化落地尚未完全完成, 部分路段仍依赖有人驾驶作业, 职业粉尘暴露风险未完全规避。4 万余亩排土场复绿区域存在局部植被长势不均, 粉尘扩散边缘区域生态修复配套措施跟进滞后, 治理资源配置与中泰圣雄黑山煤矿现场实际需求存在匹配偏差。

## 4.4 技术与措施优化改进建议

结合中泰圣雄黑山煤矿实测数据与现存短板, 制定针对性、可落地的优化改进路径, 全面提升粉尘治理水平。在现有 12 套粉尘在线监测仪基础上, 增补支线、排土场等薄弱区域监测点位, 补齐全域数据采集盲区, 实现粉尘污染实时全覆盖监控。以单台控尘面积 6000 平方米为基准, 合理增补智能抑尘车布设数量, 扩大有效抑尘范围; 结合 1:23 抑尘剂配比参数, 优化季节性喷洒方案, 调整单次 70 吨喷洒量的作业间隔, 缓解路面表层板结问题, 兼顾抑尘效果与道路养护需求。加快推进 25 台无人驾驶矿卡规模化落地进度, 完善采运全流程无人化管控模式, 从源头降低粉尘职业暴露隐患。依托中泰圣雄黑山煤矿 4 万余亩生态复绿实践经验, 优化乔灌草立体植被配置模式, 复制高植被覆盖度修复工艺; 同步完善抑尘废水收集回用链路, 以 35% 爆破粉尘降幅为基准, 持续迭代封孔新材料与抑尘工艺参数, 形成标准化优化方案, 为同规模露天矿山粉尘治理升级提供数据化技术参照。

## 5 结语

露天矿运输道路粉尘污染治理是绿色矿山建设的核心组成部分, 涉及技术应用、智能管控、生态修复等多个层面。结合大型露天煤矿实际治理实践, 系统梳理粉尘污染带来的多重危害, 整合路面抑尘、车辆管控、智能监测等核心技术, 配套完善扩散防控、废水回用、固废处置与生态修复协同措施。通过构建科学的评价指标与检测评估方式, 梳理现阶段治理存在的短板并给出优化方向。各类治理技术与工程实践经验可形成标准化应用范式, 为露天矿山粉尘常态化管控、生态环境持续改善以及矿山绿色低碳长效发展提供实践支撑与技术借鉴。

## 参考文献:

- [1] 赵晓亮, 杜婧, 宋子岭, 等. 北露天煤矿卡车道路防冻抑尘剂研发及试验[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(01): 167-172+179.
- [2] 周蕴卓, 徐梓菁, 毕林. 基于深度学习级联卷积网络的露天矿道路扬尘识别[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 312-320.
- [3] 赵晓亮, 杜婧, 夏诗杨, 等. 北露天煤矿卡车道路保湿型抑尘剂研发及工业试验[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(02): 446-454.
- [4] 霍江润, 李晶, 王党朝, 等. 胜利矿区煤炭粉尘污染时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(08): 3522-3534.
- [5] 肖双双, 马亚洁, 李卫炎, 等. 我国露天矿粉尘防治理论技术近 20 a 研究进展与展望[J]. 金属矿山, 2023, (07): 40-56.
- [6] 苗鹏飞. 露天矿运输路面扬尘污染问题分析及抑尘方法研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (13): 25-26