

煤矿掘进工作面除尘系统效能提升关键技术研究

柳民富 张 鹏

山东新陶阳矿业有限责任公司 山东 泰安 肥城市 271624

【摘要】：煤矿掘进工作面粉尘浓度高、扩散快，对作业安全与职业健康形成严重威胁。围绕除尘系统效能不足、气流组织紊乱及粉尘捕集效率不高等问题，构建源头抑尘、气流优化、高效净化与智能调控协同提升技术体系。通过优化通风参数与风筒布置结构，提高含尘气流定向控制能力；结合高效湿式与干式复合除尘技术，强化细微粉尘捕集效果；引入实时监测与自动调节机制，实现系统运行状态动态匹配。技术集成后可有效降低工作面粉尘浓度，提升除尘系统稳定性与适应性，为掘进工作面粉尘治理提供系统化技术路径。

【关键词】：煤矿掘进；除尘系统；效能提升；气流优化；智能调控

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.006

引言

掘进工作面是煤矿生产中粉尘产生最为集中的区域之一，钻孔、爆破与装运作业持续释放大量细微颗粒，极易形成高浓度悬浮粉尘环境。复杂巷道结构与局部通风条件交织，使含尘气流呈现紊乱流动状态，传统除尘方式往往难以实现稳定控制。粉尘治理已从单一设备改造逐步转向系统协同优化路径，如何在有限空间内实现气流精准引导与高效捕集，成为提升除尘水平的关键。围绕系统效能提升展开技术整合与结构优化，对改善作业环境质量具有重要现实价值。

1 掘进工作面除尘系统运行特征分析

(1)粉尘产生机理与扩散规律：掘进作业过程中，截割头高速旋转破碎煤岩体，瞬时冲击与摩擦作用使煤体结构失稳，大量细颗粒在剪切破坏与崩解过程中形成原生粉尘。装载与转载环节产生二次扬尘，颗粒在机械扰动与落差冲击下再次悬浮。细微粉尘粒径小、比表面积大，易在巷道空间内形成悬浮云团，并在通风负压与局部涡流作用下沿掘进方向迁移。呼吸性粉尘受气流速度梯度与巷道断面变化影响呈弥散分布状态，在掘进迎头区域形成高浓度积聚带，增加捕集难度。

(2)通风结构对气流组织的影响：局部通风系统通过风筒将新鲜风流送至迎头区域，但风筒出口射流与回风流交汇后易形成回旋流场。巷道断面尺寸、风筒悬挂高度及送风距离共同决定气流扩散角度与动压分布。当风筒末端距迎头过近或过远时，射流衰减不均匀，含尘气体易出现短路回流现象^[1]。断面不规则或存在设备阻挡时，气流受阻产生紊流区与低速滞留区，粉尘在这些区域沉降或滞留，削弱整体除尘效率。合理的气流组织应保证迎头区域形成稳定推移流场，为后端除尘设备创造有利捕集条件。

(3)现有除尘系统效能不足表现：部分除尘系统在设计阶段侧重单一设备性能，对整体风流匹配考虑不足，导致抽吸风量与产尘强度之间存在偏差。高浓度粉尘进入除尘器后，滤材负荷迅速增加，阻力升高，引发系统负压波动。湿式除尘装置在水雾粒径控制不当时难以实现对细微颗粒的充分包裹，干式设备则易出现滤筒堵塞与清灰不彻底现象。系统缺乏在线监测与自动调节功能，运行状态依赖人工经验判断，难以实现对掘进工况变化的实时响应，整体效能呈现不稳定特征。

2 除尘效能制约因素与关键问题辨析

(1)含尘气流捕集效率偏低：掘进迎头区域产尘强度高，含尘气体呈高速射流与弥散流并存状态，若抽吸口布置位置偏离主含尘气流通道，将导致有效捕集断面缩小。负压值不足或抽吸风量分配不合理时，细微颗粒易绕流通过，形成逃逸现象。呼吸性粉尘粒径微小，惯性力低，在气流中呈随流性运动，难以依靠单纯机械拦截实现高效分离。除尘器内部流场分布不均匀也会降低过滤介质利用率，使局部区域负荷集中，进一步削弱整体捕集能力，致使系统实际除尘效率低于设计水平。

(2)风流短路与紊流干扰问题：局部通风系统在掘进巷道内形成送风与回风并存的流动结构，当风筒出口位置、角度及送风速度控制不当时，射流可能直接进入回风通道，形成风流短路现象^[2]。该状态下，新鲜风流未充分覆盖迎头作业区，含尘气体在有限空间内循环滞留。巷道内设备布置密集，掘进机机体、输送机及支护结构对气流形成阻挡，导致流线弯曲与剪切层叠加，产生强紊流区。紊流增强了粉尘再悬浮概率，使沉降颗粒重新进入气流体系，干扰除尘装置的稳定抽吸效果。

(3) 系统运行匹配度不足: 除尘系统运行参数需与掘进工艺节奏保持协调, 但在实际生产中, 掘进速度、截割功率与出矸运输频率存在动态变化, 而通风与除尘参数调整滞后。抽吸风量与产尘强度失衡时, 系统负压分布出现波动, 影响气流定向控制。除尘设备选型与巷道断面条件不匹配, 可能导致风阻增大或风量衰减, 影响整体流场稳定。缺乏集中控制平台对风机转速、阀门开度及过滤阻力进行联动调节, 使各子系统处于相对独立运行状态, 协同效率难以充分发挥。

3 源头抑尘与气流组织优化技术

(1) 掘进设备协同抑尘措施: 掘进工作面粉尘治理应从产尘源头进行控制, 将抑尘技术嵌入截割、装载与转载全过程。掘进机截割部位可配置内喷雾与外喷雾复合系统, 通过高压细水雾在截齿周围形成雾幕区, 使破碎瞬间产生的粉尘颗粒在萌生阶段即被润湿包裹, 降低颗粒表面张力并增强团聚效应。喷雾压力、雾滴粒径及喷射角度需与截割功率和滚筒转速保持匹配, 以保证水雾覆盖截割轨迹并提高与粉尘的碰撞概率。装载部位可增设封闭式导料结构与负压吸尘口, 将转载冲击扬尘限制在局部空间内, 通过局部抽吸实现集中处理。掘进设备机身外壳与操作区域之间可形成半封闭结构, 减少粉尘向巷道纵深扩散。各抑尘单元通过管路系统与除尘主机联动, 实现喷雾开启、负压抽吸与设备运行状态同步控制, 使抑尘措施与产尘强度保持动态协调, 降低后端除尘负荷。

(2) 风筒布置与通风参数优化: 局部通风系统是形成有效气流组织的基础, 风筒布置形式直接影响送风射流形态与动压分布。风筒末端与迎头之间的距离应依据巷道断面尺寸及掘进机位置进行合理设定, 使射流在到达产尘区域时仍具备足够动能。风筒悬挂高度与轴线方向应与巷道中心线保持协调, 避免偏置导致射流贴壁流动。送风风量与风速参数需结合产尘强度与除尘主机抽吸能力进行匹配计算, 保证迎头区域形成稳定推进流场^[3]。通过调整风筒直径与材质, 降低沿程阻力与漏风率, 提高有效风量利用率。对于长距离掘进巷道, 可采用分段式风筒与中继风机组合方式, 保持气流压力梯度均衡。通风参数优化应基于流体力学模型分析, 结合现场测试数据, 对风速分布、压力场与含尘浓度分布进行综合修正, 使气流组织更加有序, 为除尘系统高效运行创造稳定流场环境。

(3) 定向导流与局部控尘技术: 在复杂巷道结构条件下, 单一送风难以完全控制含尘气流走向, 需通过定向导流装置对流场进行精细调节。可在掘进机周

边设置导流板与柔性风障, 引导含尘气流向预设抽吸区域集中, 减少横向扩散。局部负压罩结构可覆盖高产尘点位, 通过形成封闭或半封闭空间, 将粉尘限制在可控范围内。抽吸口形状与开口面积应根据气流速度分布进行优化设计, 增强对细微颗粒的吸附能力。为避免局部涡流干扰, 可在关键节点设置整流网或缓冲腔体, 使流线趋于平稳。导流与抽吸系统之间需保持风量平衡, 防止局部负压过大引发空气紊动。通过对气流路径进行分区控制, 使产尘区、扩散区与净化区之间形成明确界面, 强化粉尘沿预定路线移动, 提高整体除尘系统的协同效率。

4 高效净化与智能调控技术集成

(1) 湿式与干式复合除尘技术: 掘进工作面粉尘粒径分布范围广, 单一净化方式难以兼顾大颗粒沉降与呼吸性粉尘捕集需求。湿式除尘装置通过高速气液两相接触, 使粉尘颗粒在湍动液膜与水雾作用下发生碰撞、黏附与凝聚, 适用于处理高浓度含尘气流, 并可降低粉尘爆炸风险。为提高气液接触效率, 可在洗涤腔体内设置多级喷淋结构与旋流叶片, 使气流产生旋转运动, 延长粉尘在液相中的停留路径。干式除尘单元以滤筒或滤袋为核心, 通过纤维层拦截、惯性碰撞与扩散沉积实现精细分离, 适合处理低浓度、细粒径粉尘。复合除尘系统通常采用“预处理湿式降尘+末端干式精滤”结构, 使大颗粒在前端被有效削减, 减轻后续滤材负荷。系统内部需配置差压监测与脉冲清灰装置, 维持过滤阻力在合理区间。湿式单元与干式单元之间的风量分配应保持平衡, 避免局部过载或气流紊乱。通过结构一体化设计与管路优化布局, 实现高浓度粉尘条件下的连续稳定净化。

(2) 细微粉尘强化捕集技术: 呼吸性粉尘粒径小、惯性力弱, 易随气流绕过滤材表面, 传统机械拦截方式难以实现高效捕集。为增强对细微颗粒的控制能力, 可采用高效低阻复合滤材, 通过梯度纤维结构提高比表面积与孔隙率, 在保证通风量的同时提升扩散沉积效率。静电增强技术可在滤材表面形成稳定电场, 使带电粉尘颗粒在库仑力作用下吸附于纤维层, 提高捕集概率^[4]。旋流预分离装置可在进入主过滤区前形成离心力场, 使部分颗粒在惯性作用下偏离主流线, 实现初步分级分离。为防止滤材堵塞与阻力急剧上升, 可配置智能清灰系统, 通过压缩空气脉冲或振动装置定期剥离附着粉尘, 恢复过滤性能。对于高湿环境, 应选择耐水解与抗结露性能良好的滤材, 避免粉尘板结影响透气性。通过多种物理机制耦合应用, 实现对不同粒径粉尘的分级控制与高效截留。

(3) 粉尘浓度实时监测与自动调节: 提升除尘系统运行效能需依托实时数据支撑, 构建集监测、分析与调节于一体的智能控制体系。在掘进迎头、回风侧及除尘设备进出口布设粉尘浓度传感器, 结合风速、负压与温湿度传感器, 实现多参数同步采集。监测数据经控制单元处理后, 可对粉尘浓度变化趋势进行判别, 并根据设定阈值自动调节风机转速与阀门开度, 使系统抽吸能力与产尘强度保持协调。变频控制技术可平滑调整主风机运行工况, 减少能耗波动与机械冲击。通过建立粉尘扩散模型与控制算法, 对气流组织与净化单元运行状态进行联动管理, 实现多设备协同调控。控制系统应具备故障报警与数据存储功能, 便于运行状态追溯与参数优化。各子系统之间通过通信接口形成统一平台, 提升除尘系统的响应速度与运行稳定性。

5 系统协同优化与效能提升路径

(1) 多技术耦合运行机制: 掘进工作面除尘效能提升依赖各功能单元之间的协同配合, 需构建源头抑尘、气流调控与高效净化一体化运行机制。截割喷雾系统与局部抽吸装置通过联动控制实现同步启停, 使产尘瞬间即可进入负压控制区域, 减少粉尘外逸路径。通风系统输出风量与除尘主机抽吸风量之间保持动态平衡, 形成稳定的压力梯度, 保证含尘气流沿既定方向输送至净化单元。湿式预处理装置削减大颗粒负荷后, 将经初级净化的气流引入精滤系统, 提高过滤效率并延长滤材使用周期。控制平台通过数据整合对各子系统进行协调调度, 使风机频率、喷雾强度与清灰周期形成耦合关系。多技术协同运行能够减少单元之间的功能重叠与能量损耗, 优化系统内部流场结构与压力分布, 实现全过程闭环控制。

(2) 系统稳定性与适应性提升: 掘进工况具有周

期性与阶段性变化特征, 系统运行参数需具备良好的调节弹性。通过设置可调节风阀与变频驱动装置, 除尘系统可根据产尘强度变化及时调整抽吸能力, 避免出现负压不足或过度抽吸情况。关键部件采用耐磨、耐腐蚀材料, 提高在高湿、高粉尘环境下的运行可靠性^[9]。滤材结构设计兼顾强度与透气性能, 减少因阻力增加引发的风量衰减。管路布置应降低急转弯与局部阻力点数量, 使气流输送更加顺畅。控制系统具备自检功能, 可在传感器异常或风机故障时发出报警信号并启动备用方案。通过参数自适应调节与结构优化, 使除尘系统在不同断面尺寸与设备布置条件下均能维持稳定运行状态, 增强整体抗扰动能力。

(3) 整体效能提升效果分析: 系统协同优化后, 含尘气流在掘进迎头区域得到有效引导与集中处理, 粉尘迁移路径更加明确。源头抑尘措施降低初始浓度, 净化单元在较为均匀的流场条件下运行, 过滤效率得到提升。风量与负压分布趋于稳定, 减少局部紊动对捕集效果的干扰。滤材阻力增长速率减缓, 清灰周期更加合理, 设备运行时间得到延长。能耗水平通过变频调节得到控制, 系统负荷分配更加均衡。多技术集成后形成连续治理链条, 使产尘、输送与净化各环节衔接紧密, 整体运行状态保持在高效区间, 掘进工作面作业环境得到持续改善。

6 结语

煤矿掘进工作面除尘系统效能提升需依托源头抑尘、气流优化、高效净化与智能调控的协同构建, 强化多环节联动与参数匹配, 形成稳定有序的流场结构与净化体系。技术集成与运行机制优化能够改善粉尘迁移路径, 提升捕集效率与系统稳定水平, 为掘进作业环境治理提供系统化技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈明值,李乘龙,刘会东.煤矿掘进通防系统效能提升关键技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(9):28-30.
- [2] 聂猛猛,宗宪生.基于PID算法的煤矿掘进机械远程智能控制系统[J].信息记录材料,2026,27(2):177-179.
- [3] 徐明智,马增玺.煤矿掘进设备机电一体化智能控制系统优化设计与应用研究[J].中国高新科技,2025(16):25-27.
- [4] 刘庆高.煤矿掘进机液压系统泄漏故障处理探索[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(12):001-004.
- [5] 李鹏.新型露天煤矿边帮除尘系统设计[J].煤矿机械,2025,46(7):28-30.