

矿井局部通风流场紊乱特征及风流调控技术研究

王和平

山西省大同市煤矿第一中学校 山西 大同 037000

摘要: 矿井掘进工作面局部通风易受巷道受限空间、设备遮挡、风筒布设不当及通风参数失配影响,诱发涡流回流、风流偏移、通风死角等流场紊乱问题,造成瓦斯积聚、粉尘滞留、通风效率下降,严重威胁井下安全生产。为揭示流场紊乱演化机制,本文基于空气动力学与湍流理论,采用 RNGk- ϵ 湍流模型和 Fluent 数值模拟方法,系统分析局部通风流场紊乱特征与主控诱因,构建风筒优化、导流稳流、风压匹配、分区均衡通风的立体化风流调控技术体系。实测结果表明,该技术可有效消除通风死角与涡流,巷道风速均匀度提升 42.3%,显著提升通风稳定性与换气效率,可为矿井局部通风优化及流场紊乱治理提供参考。

关键词: 矿井局部通风; 流场紊乱; 湍流特征; 风流调控; 通风优化

Research on the Characteristics of Local Ventilation Flow Field Disturbance and Ventilation Control Technologies

Heping Wang

Datong No.1 Middle School for Coal Miners, Datong, Shanxi, 037000

Abstract: Local ventilation at mining face working sections is susceptible to disturbances caused by confined roadway spaces, equipment obstructions, improper duct layout, and mismatched ventilation parameters. These factors can induce flow field disturbances such as vortex recirculation, airflow deviation, and ventilation dead zones, leading to methane accumulation, dust retention, and reduced ventilation efficiency, thereby posing a serious threat to safe underground mining operations. To elucidate the evolution mechanism of flow field disturbances, this study employs aerodynamics and turbulence theory, utilizing the RNG k- ϵ turbulence model and Fluent numerical simulation methods to systematically analyze the characteristics of local ventilation flow field disturbances and their primary triggering factors. Based on these findings, a comprehensive ventilation control technology system—comprising duct optimization, airflow diversion and flow stabilization, wind pressure matching, and zoned balanced ventilation—is developed. Field measurement results demonstrate that this technology can effectively eliminate ventilation dead zones and vortexes, increase the uniformity of roadway air velocity by 42.3%, and significantly enhance ventilation stability and air exchange efficiency; thus, it provides a valuable reference for the optimization of local ventilation systems and the mitigation of flow field disturbances in coal mines.

Keywords: Local ventilation in coal mines; Flow field disturbance; Turbulence characteristics; Ventilation flow control; Ventilation optimization

引言

煤矿井下掘进巷道为独头受限空间,无法依托矿井全风压通风实现自主换气,必须依靠局部通风机配合风筒供风完成空气置换,是矿井通风系统的关键薄弱环节。流场紊乱主要表现为巷道风速分布不均、迎头涡流环流、风流偏移跑偏、回风逆流、局部通风死角等特征,直接造成掘进迎头有害气体稀释不彻底、微细粉尘长期滞留悬浮、作业区域空气质量不达标,是诱发瓦斯超限、粉尘爆炸、职业健康危害的重要诱因。

目前国内多数矿井局部通风设计多依据经验选取风筒直径、通风风速、风筒悬挂位置等参数,未结合巷道空间结构、设备布局开展流场适配性分析,通风参数与现场工况匹配度较差。众多学者围绕矿井局部通风优化开展了大量研究,现有研究多集中于

通风设备改造、风筒堵漏、变频调风等单一技术优化,对流场紊乱的精细化特征、形成机理、时空演化规律研究不够系统,尚未形成适配复杂掘进工况的立体化风流调控技术体系。

针对上述工程短板与研究不足,本文采用数值模拟与工程验证相结合的方法,系统探究矿井局部通风流场紊乱的典型特征与形成机制,精准定位风流失稳的核心影响因素,构建多维度风流调控技术方案,有效解决独头巷道风流紊乱、通风低效、有害介质积聚等难题。

1 矿井局部通风流场基础理论与紊乱类型

1.1 局部通风风流湍流理论

矿井掘进巷道局部通风风流属于受限空间湍流运动,风流在风筒射流、巷道壁面约束、设备遮挡、空气黏性阻力多重作用下,

呈现复杂的紊动扩散特征。风流运动遵循连续性方程与动量守恒方程,湍流脉动是诱发流场紊乱的根本动力。相较于常规管道均匀流,井下掘进巷道风流存在明显的速度梯度与压力梯度,风流质点无规则脉动剧烈,极易产生涡流、回流与风流分离现象。本文采用 RNGk- ϵ 湍流模型描述巷道风流湍流运动,该模型可精准适配井下受限空间、设备绕流、射流衰减等复杂湍流工况,能够有效捕捉微小涡流与风速突变特征,贴合矿井局部通风流场演化规律^[1]。

1.2 局部通风流场典型紊流类型

结合现场通风工况与仿真结果,可将矿井掘进巷道局部通风流场紊流现象划分为四类典型特征,各类紊流形式相互耦合、共同影响巷道通风稳定性。一是迎头涡流环流紊流,风筒射出风流冲击迎头岩壁后折返,与入射风流相互叠加,在迎头区域形成大范围闭合涡流,风流循环滞留,无法正常排出,造成迎头瓦斯、粉尘积聚;二是风流偏移紊流,风筒悬挂偏心、巷道单侧设备遮挡导致风流偏向巷道一侧,另一侧形成低速通风死角,风速分布极度不均;三是风速骤变紊流,巷道断面突变、设备阻挡引发风流挤压、分流,局部风速急剧升高或骤降,湍流强度大幅提升;四是回风逆流紊流,长距离掘进工况下风筒沿程漏风严重、送风压力不足,巷道后部风流压力失衡,出现局部回风逆流现象,污染风流二次折返作业区^[2]。

1.3 流场紊流危害分析

流场紊流对矿井掘进工作面安全生产危害显著:首先,涡流与通风死角会导致有害气体无法有效稀释排出,瓦斯局部积聚超限,极大提升瓦斯爆炸风险;其次,紊流湍流会加剧微细粉尘悬浮扩散,延长粉尘滞留时间,恶化作业环境,增大职业健康危害;再次,风流不稳定会导致通风效率大幅下降,能耗升高、通风资源浪费;最后,风流剧烈脉动会造成局部通风风压频繁波动,易引发通风设备共振、故障,降低局部通风系统运行稳定性。

2 局部通风流场紊流数值模拟研究

2.1 模型构建与参数设置

以某矿综掘煤巷为工程背景,巷道断面为矩形,宽 4.8m、高 3.6m,选取掘进迎头至后方 40m 巷道范围构建全尺寸三维数值模型,精准还原掘进机、转载机、送风风筒等设备布局,真实复刻井下通风工况。采用结构化与非结构化混合网格划分方式,对风筒出口、掘进迎头、设备绕流区域进行网格加密,提升涡流与风速梯度捕捉精度,整体网格质量大于 0.85,满足数值计算收敛要求。

边界条件设置:采用压入式局部通风,风筒直径 0.8m,额定送风风速 0.9m/s,风筒出口距迎头 9m;巷道壁面、设备表面设置为无滑移壁面边界;风流入口为速度入口边界,巷道出口为自由出流边界;开启 RNGk- ϵ 湍流模型,考虑空气黏性与湍

流脉动影响,迭代精度、计算步长符合矿井通风仿真行业标准^[3]。

2.2 常规通风下流场紊流特征分析

数值模拟结果显示,常规经验布设通风工况下,巷道整体流场均匀性极差,紊流特征显著。迎头区域风流受风筒射流冲击折返影响,形成直径 3 ~ 5m 的大型涡流环流区,涡流内部风速低于 0.2m/s,远低于矿井通风最低风速要求,属于典型通风死角,风流置换效率极低,有害介质极易滞留积聚。

巷道前部 10 ~ 20m 范围,受掘进机机身遮挡影响,风流被迫分流绕行,机身两侧风速差异显著,靠近风筒一侧风速可达 0.8 ~ 1.0m/s,另一侧风速不足 0.3m/s,形成明显风流偏移现象,低速区域大范围覆盖作业人员呼吸带,作业环境通风质量不达标。巷道中后部风流沿程衰减、漏风叠加影响,风速持续降低,风压分布失衡,局部出现微弱回风逆流现象,污染风流无法及时排出,形成二次污染。

从湍流强度分布来看,迎头涡流区、设备绕流区湍流强度显著偏高,风流脉动剧烈,流场稳定性极差,是粉尘悬浮、瓦斯积聚的核心区域。整体仿真结果证实,传统经验通风参数布设方式存在明显缺陷,流场紊流问题突出,无法满足掘进工作面安全通风需求。

2.3 流场紊流核心影响因素分析

结合仿真控制变量分析,明确诱发局部通风流场紊流的三大核心因素。一是风筒布设参数不合理,风筒距迎头距离过大、悬挂偏心、高度不适,导致射流扩散角度失衡,迎头风流冲击折返剧烈,涡流范围扩大;二是设备遮挡扰动,掘进机、转载机等大型设备占据巷道有效通风断面,迫使风流分流、绕行、挤压,破坏风流均匀传播路径,诱发局部湍流紊流;三是通风参数匹配失衡,固定通风风速无法适配巷道沿程阻力变化,长距离掘进下风筒漏风、风压衰减严重,风流动力不足,引发风速不均、逆流滞流等问题^[4]。

3 精细化风流调控技术体系构建

基于流场紊流特征与成因机理,遵循“消涡流、均风速、稳流场、除死角”的调控思路,摒弃传统单一通风调控模式,构建参数优化、结构导流、风压匹配、动态调控于一体的立体化风流调控技术体系,全方位消除局部通风流场紊流问题。

3.1 风筒布设参数优化技术

针对风筒布设不合理引发的迎头涡流、风流偏移问题,优化风筒悬挂与布设参数。通过多组仿真对比试验,确定最优布设参数:风筒居中偏上悬挂,悬挂高度距巷道底板 2.8m,风筒中轴线与巷道中心线偏差控制在 0.2m 以内,风筒出口距迎头距离优化至 6 ~ 7m,有效缩短射流路径、降低风流折返强度,大幅缩减迎头涡流环流范围。同时规范风筒安装标准,杜绝风筒褶皱、跑偏、变形,对接头位置进行密封处理,降低沿程漏风率,保障

风流输送稳定性,从源头弱化流场紊乱诱因。

3.2 定向导流控尘稳流技术

针对掘进设备遮挡引发的风流分流紊乱、作业区通风死角问题,增设定向导流调控结构。在掘进机机身两侧、前端加装可拆卸导流板,规整风流绕行路径,均衡设备两侧风速分布,消除机身后侧低速通风死角。在风筒出口加装可调式导流器,可根据巷道工况微调风流扩散角度,弱化风流冲击折返强度,抑制迎头涡流形成,引导新鲜风流均匀覆盖迎头作业区域,实现风流有序置换,提升通风均匀性。

3.3 风压风速动态匹配调控技术

针对长距离掘进风流风压衰减、风速失衡、逆流滞流问题,采用局部通风机变频智能调控技术,替代传统固定参数通风模式。根据巷道掘进延伸长度、风筒漏风率、瓦斯粉尘浓度实时数据,动态调节通风机运行频率与供风风速,实现按需供风。短距离掘进采用低速稳压通风,避免风流冲击紊乱;长距离掘进适度提升风压风速,补偿沿程阻力损失,保障巷道全程风速均匀稳定,杜绝后部风流逆流、滞流现象,实现风流动力与巷道通风阻力精准匹配。

3.4 分区均衡通风调控技术

依据巷道不同区域流场紊乱差异化特征,实施分区精准调控。迎头涡流紊乱区以“消涡流、强置换”为核心,通过缩短风筒距离、导流稳流优化流场;作业设备遮挡区以“均风速、除死角”为核心,依托导流板规整风流路径;巷道后部回风区以“稳风压、防逆流”为核心,通过变频补压、密闭堵漏保障风流有序流动,实现全巷道流场分区均衡稳定。

4 调控方案仿真效果验证

采用相同数值模型与边界条件,对优化后的风流调控技术方案开展仿真验证,对比调控前后巷道流场分布、风速均匀性、涡流范围、湍流强度等核心指标。仿真结果表明,优化调控方案实施后,巷道整体流场紊乱现象基本消除,风流传播路径规整有序,无大范围涡流环流、风流偏移与逆流滞流问题。

迎头区域涡流基本消失,风流冲击折返强度大幅弱化,作业区风速稳定在 $0.4 \sim 0.8\text{m/s}$ 的合理区间,完全符合《煤矿安全规程》通风风速标准,通风死角彻底消除。巷道全段风速分布均匀,设备遮挡引发的局部风速失衡问题得到有效解决,风速均匀度较优化前提升 42.3%。巷道湍流强度整体降低,风流脉动显著减弱,流场稳定性大幅提升,新鲜风流可快速、均匀覆盖全巷道区域,有害气体与粉尘置换排出效率显著提高,风流调控效果优异。

5 工程应用效果分析

将本文构建的立体化风流调控技术体系应用于现场综掘工作

面,选取地质条件、巷道参数、通风设备一致的掘进巷道开展工业性对比试验,布设多点风速、瓦斯、粉尘监测站点,连续 30d 跟踪监测通风效果。工程实测表明,风流调控优化后,巷道各区域风速均匀稳定,无风速骤变、风流偏移、回风逆流等紊乱现象,迎头作业区通风置换效率显著提升。

瓦斯治理方面,迎头及作业区瓦斯浓度始终稳定在 0.02% 以下,无局部积聚超限隐患,有害气体稀释效果大幅提升;粉尘治理方面,巷道风流稳定性提升有效避免了微细粉尘悬浮滞留,工作面呼吸性粉尘浓度降幅达 38.6%,作业环境显著改善。同时,智能变频按需供风模式有效降低了通风能耗,通风设备运行更加平稳,故障率显著降低,兼顾了通风安全、环境治理与节能增效多重效益,适配长距离智能掘进工作面通风需求。

结论:

1) 矿井掘进工作面局部通风流场紊乱主要分为迎头涡流环流、风流偏移、风速骤变、回风逆流四类典型特征,设备遮挡、风筒布设不合理、通风参数匹配失衡是诱发流场紊乱的三大核心因素,流场紊乱会直接导致有害气体积聚、粉尘滞留、通风效率下降,严重制约井下安全生产。

2) 数值模拟结果表明,常规经验通风模式下巷道流场均匀性差、涡流范围大、通风死角多,风流湍流扰动剧烈,流场稳定性极差,无法满足掘进工作面安全通风需求,亟需开展风流精准调控优化。

3) 构建的参数优化、导流稳流、动态匹配、分区调控四位一体风流调控技术体系,可有效消除巷道涡流、风流偏移、逆流滞流等紊乱问题,大幅提升巷道风速均匀性与流场稳定性,从根本上解决局部通风失稳难题。

4) 仿真与工程实践验证,优化风流调控技术可使巷道风速均匀度提升 42.3%,有效改善井下通风环境,杜绝瓦斯、粉尘积聚隐患,降低通风能耗与设备故障率,可为同类矿井掘进工作面局部通风优化、流场紊乱治理提供重要的工程参考与理论支撑。

参考文献:

- [1] 王凯,张晓明.综掘巷道风流-粉尘耦合运移数值模拟[J].煤矿安全,2024,55(06):132-137.
- [2] 龚晓燕,王浩.综掘工作面混合式风流调控下的粉尘沉降研究[J].工矿自动化,2024,50(02):112-118.
- [3] 司俊鸿,王健.综掘工作面半封闭式区域联合控尘技术研究[J].煤矿安全,2025,56(03):145-150.
- [4] 王磊,李超.长距离掘进工作面局部通风智能联动调控研究[J].工矿自动化,2025,51(03):78-84.