

矿井通风系统优化设计与 开采环境改善实践探析

林永森¹, 兰红波², 侯振江³

(1. 陕西铁航教育科技集团有限公司, 陕西 西安 710018;

2. 陕西华泰矿建工程有限公司, 陕西 西安 710018;

3. 浙江兴安建设集团有限公司, 浙江 温州 325800)

摘要 在深部煤矿开采条件下, 通风系统承担着瓦斯稀释、粉尘控制、热湿调节与灾变控风等任务, 传统经验调阻与静态配风方式已难以满足高效、安全的生产要求。本文以某高瓦斯矿井东翼采区为对象, 针对采掘接续紧张、主回风段阻力偏高、局部风量不足及粉尘热害叠加问题, 构建了需风量重算、风网结构重构、关键阻力段降阻、监测解算联动和开采环境协同治理为主线的优化方案。实践结果表明, 优化后矿井总回风量由 12 840 m³/min 增至 13 690 m³/min, 矿井总阻力由 3 120 Pa 降至 2 680 Pa, 主扇效率由 71.8% 升至 79.6%, 综采工作面回风巷 CH₄ 体积分数由 0.74% 降至 0.46%, 作业点呼吸性粉尘质量浓度由 34.6 mg/m³ 降至 20.8 mg/m³, 平均作业温度下降 2.6 ℃。结果表明, 通风系统优化需与粉尘、热湿及异常诊断协同实施, 才能形成稳定、节能的环境改善效果。

关键词 矿井通风系统; 按需供风; 开采环境; 粉尘治理

中图分类号: TD724

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.025

0 引言

矿井通风系统是井下安全生产基础系统, 运行状态直接影响瓦斯稀释、粉尘扩散、温湿调节和人员作业舒适性。随着开采深度增加、采区布置复杂化和采掘节奏加快, 传统以经验调节风门、人工旬检风量和局部补偿治理为主的方式暴露出风流分配滞后、阻力控制粗放、环境指标波动大等问题。近年来, 矿井智能通风理论、实时解算和精准监测研究为通风系统由静态设计向动态优化转变提供了支撑^[1]。但从工程实施看, 单纯提高主扇能力难以同步解决局部高阻、漏风、热害和粉尘叠加问题, 必须以采区风网重构为核心, 将风量供给、阻力调控和环境改善纳入统一框架。尤其在深部高瓦斯矿井中, 风量不足与回风阻力偏高常伴随温升、湿度上升和粉尘再悬浮, 导致安全与职业健康问题叠加。因此, 通风系统优化需由单一配风计算转向面向生产全过程的综合治理, 并以有效风量稳定兑现为核心评价目标。基于此, 本文以某高瓦斯矿井东翼采区为对象, 对通风系统进行优化设计, 并结合现场治理结果分析其对开采环境的改善机制。

1 工程条件与问题辨识

1.1 矿井概况

研究对象为年产 4.50 Mt 的井工煤矿, 采用中央并列式通风, 东翼采区布置 1 个综采工作面、2 个掘进工作面 and 若干辅助硐室。采区埋深 780 m ~ 910 m, 煤层平均厚度 5.2 m, 原煤瓦斯含量 8.7 m³/t, 正常生产期间东翼采区绝对瓦斯涌出量为 28.4 m³/min。原通风系统采用主进风大巷—采区进风上山—工作面—回风上山—总回风巷串并联混合网络, 受接续调整影响, 3105 综采工作面与 3107 掘进头共用部分回风通道, 局部巷段断面缩颈、支护构件外露和风门串联设置现象突出。2025 年 4 季度测定结果显示, 东翼采区总进风量为 4 020 m³/min, 其中综采工作面实际配风 1 430 m³/min, 低于按瓦斯、温度和风速核定的需求值。

1.2 通风失衡及环境约束

现场测试表明, 采区回风上山与总回风巷交汇段阻力占东翼采区总阻力 31.7%, 成为限制风量提升的关键瓶颈。由于局部风阻高、漏风点多和调节设施位置不合理, 3105 综采工作面存在进回风压差波动大、回

作者简介: 林永森 (1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。

风巷 CH_4 体积分数高峰接近 0.80%、转载点及司机侧粉尘积聚等问题。掘进工作面表现为压入式局扇送风射流衰减快,迎头有效风速不足,导致高温高湿空气滞留。基于上述判断,优化目标确定为提升有效风量、降低关键阻力、抑制漏风短路、改善粉尘与热湿环境,并增强异常工况下的调控能力。

2 通风系统优化设计

2.1 需风量核算与风网重构

按照采区生产布局重新核算需风量时,以瓦斯涌出、同时作业人数、设备散热和最小风速要求中的最大值作为依据。综合抽采后剩余瓦斯释放量、工作面温升和断面风速约束,确定 3105 综采工作面、3107 掘进头、3111 掘进头、胶带运输巷和泵房硐室目标风量分别为 $1\,620\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $680\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $620\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $460\text{ m}^3/\text{min}$ 和 $220\text{ m}^3/\text{min}$ 。为保证配风实现,首先取消原网络中的 2 处串联调节窗,将回风上山中段 340 m 高阻巷道扩刷至 14.6 m^2 有效断面,并将 3 组双向风门改造为低阻联锁风门。为提高风量测算精度,在 6 个关键断面布置超声波全断面测风装置,并以实时风量数据校核风网解算结果,使静态设计参数与动态工况保持一致^[2]。各用风地点目标值确定后,以“减串联、增并联、缩短回风线、减小无效循环”为原则重组东翼采区网络,避免一个地点提风后挤占相邻地点有效风量,并以关键支路压降复核。

2.2 阻力控制与设备匹配

在风网重构基础上,以降低无效压降和提升主扇工况匹配度为目标开展阻力控制。通过对东翼采区 32 条分支进行阻力复算,发现单位长度阻力偏大的巷段主要集中在回风交汇区、转载点附近和局扇出风扰动区。针对这些部位分别采取顶帮整形、底鼓清挖、管线贴帮吊挂、风筒悬吊直线化和非生产期风门常闭等措施。主通风机侧引入频率分级调控策略,将高频运行方式调整为按班次和采掘组合进行 $41\text{ Hz} \sim 46\text{ Hz}$ 区间控制,使风压供给与井下实际阻力更加匹配。优化后矿井总阻力下降 14.1%,等积孔由 2.53 m^2 提高至 3.11 m^2 ,说明系统通风能力建立在降阻基础上。相关研究指出,智能通风关键在于把监测、分析、决策和执行嵌入统一流程^[3]。

2.3 监测与调控策略

考虑到深部矿井工况扰动频繁,优化设计不仅要满足正常生产期配风,还要具备偏差识别和快速纠偏能力。本文在东翼采区建立通风参数日分析制度,采集风量、风压、 CH_4 体积分数、 CO 体积分数、温度、相对湿度和设备状态等信息,通过 5 min 滚动解算获取

关键支路风量偏差率和阻力变化趋势。当系统判定某支路风量偏差持续超过 8% 时,优先局部调节;当回风巷 CH_4 体积分数与温度同步抬升且压差异常时,则触发高阻或漏风复核。结合矿井智能通风流程化建设经验,形成了监测感知、模型判断、方案推送、执行反馈和复核评价的闭环调控链条^[4]。闭环控制实施后,东翼采区关键分支风量波动幅值由 12.6% 收敛至 6.1%。

3 开采环境改善实践

3.1 粉尘与瓦斯协同治理

3107 掘进头原采用单纯压入式通风,迎头回流和司机侧滞尘明显。优化后改为长压短抽局部通风除尘方式,将压风口布置在司机前方约 1 m 处,抽尘口靠回风侧布置,并将压抽比控制在 1.30 ~ 1.35 区间,使高浓度粉尘在大范围扩散前被短抽系统及时捕集。该参数选择与综掘工作面长压短抽除尘性能研究结论一致,有利于减少司机和行人呼吸带粉尘暴露^[5]。在综采工作面,则通过降低上隅角漏风、优化采空区抽采负压和稳定回风巷风速,减少瓦斯在回风转角区滞留。现场连续 30 d 监测结果显示,综采工作面回风巷 CH_4 体积分数均值由 0.74% 降至 0.46%,司机处呼吸性粉尘质量浓度由 $34.6\text{ mg}/\text{m}^3$ 降至 $20.8\text{ mg}/\text{m}^3$,粉尘与瓦斯叠加风险减弱。

3.2 热湿环境改善与人员作业区优化

东翼采区优化前存在排水沟淤塞、回风巷积水蒸发和电机设备散热集聚等问题,使掘进头与转载点区域相对湿度长期处于 90% 以上。通过增加有效风量、清挖排水沟、对高温设备区实施导流隔热并改善回风组织,作业带空气更新速度加快。优化后综采工作面平均温度由 $31.2\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $28.6\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度由 92% 降至 84%,掘进迎头最小风速稳定在 0.34 m/s 以上,作业区热湿负荷明显缓解。

3.3 效果评估

为验证优化设计稳定性,本文对东翼采区进行了 90 d 跟踪。结果表明,优化后各主要用风地点实测风量与目标风量偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,班中人工调风次数由月均 23 次降至 8 次,瓦斯超限预警次数下降 64.7%。按月统计,3105 综采工作面风量达标率由 82.4% 提升至 96.8%,3107 掘进头风量达标率由 76.1% 提升至 95.3%。主要用风地点风量优化结果见图 1,主要技术指标见表 1。相关研究表明,异常诊断能力是决定智能通风能否由设计成果转化为企业效益的关键环节^[6]。从本次实践看,只有把异常诊断嵌入日常通风管理,持续识别局部阻力回升和漏风复发问题,优化后的低阻高效网络才能保持稳定。

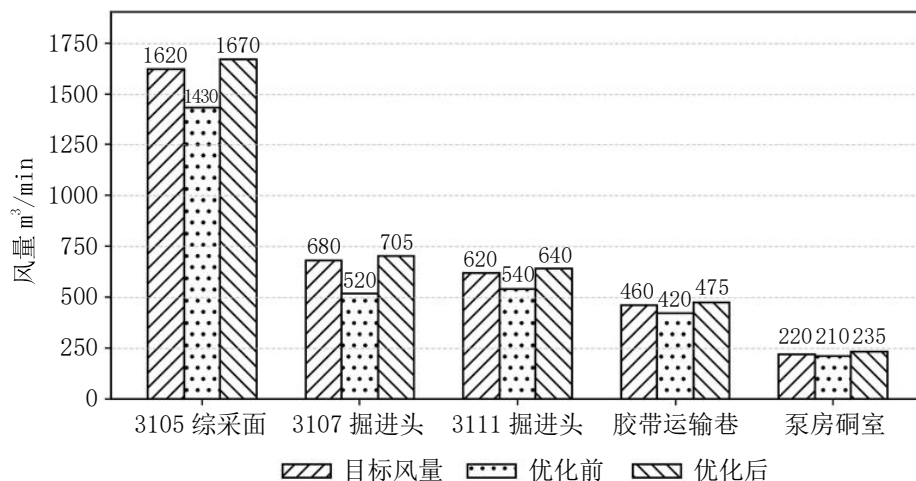


图 1 各用风地点风量优化结果

表 1 优化前后主要技术指标对比表

指标	单位	优化前	优化后	变化幅度
矿井总回风量	m ³ /min	12 840	13 690	+6.6%
矿井总阻力	Pa	3 120	2 680	-14.1%
等积孔	m ²	2.53	3.11	+22.9%
主扇效率	%	71.8	79.6	+7.8
3105 面回风巷 CH ₄ 体积分数	%	0.74	0.46	-37.8%
司机处呼吸性粉尘质量浓度	mg/m ³	34.6	20.8	-39.9%
综采面平均温度	℃	31.2	28.6	-8.3%
班中人工调风次数	次/月	23	8	-65.2%

4 经济与安全综合分析

通风系统优化的价值不仅体现在指标改善,更体现在安全冗余和运行经济性提升。依据主扇功率实测曲线和全年生产负荷折算,优化后吨煤通风电耗由 4.28 kWh/t 降至 3.91 kWh/t,按年产 4.50 Mt 计,年节电量约 1.67×10^6 kWh。由于关键高阻段得到治理,主扇长期高负荷运行时间缩短,风门冲击和局扇异常停机次数减少,设备维护工时下降。从安全角度看,系统风量冗余度提高后,采区在检修、倒面和局部通道短时受限等非稳态条件下仍能维持关键地点最低供风标准,抗扰动能力增强。

5 结束语

本文针对某高瓦斯矿井东翼采区通风失衡、阻力偏高和环境指标波动问题,构建了需风量重算、风网重构、关键降阻、监测解算联动和环境协同治理方案。实践表明,优化后矿井总阻力明显下降,主要用风地点配风更接近目标值,主扇效率、粉尘控制效果和热湿环境均改善。结果表明,矿井通风系统优化设计的

关键不在于单纯扩大风量,而在于通过结构重构和动态调控提高有效风量占比。对于深部采区,通风优化只有与瓦斯治理、粉尘控制、热湿改善和异常诊断协同推进,才能形成可持续、可复制的环境改善路径。

参考文献:

- [1] 周福宝,辛海会,魏连江,等.矿井智能通风理论与技术研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(01):313-328.
- [2] 宋涛,王建文,吴奉亮,等.基于超声波全断面测风的矿井风网实时解算方法[J].工矿自动化,2022,48(04):114-120,141.
- [3] 魏连江,周福宝,夏同强,等.矿井智能通风与灾变应急决策平台[J].中国安全科学学报,2022,32(09):158-167.
- [4] 张浪,刘彦青.矿井智能通风与关键技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(01):178-195.
- [5] 江丙友,王一凡,林汉毅,等.煤矿综掘工作面长压短抽除尘性能与尘源移动路径关系[J].煤炭学报,2024,49(07):2973-2985.
- [6] 魏连江,沐兴旺,唐琳,等.矿井通风系统异常诊断研究进展与展望[J].中国矿业,2025,34(04):116-125.