

矿井通风系统改造前后通风效率对比分析

叶立平

乐矿能源集团(山西)矿业公司 山西 太原 030032

摘要: 矿井通风系统是保障煤矿安全生产的核心基础设施之一,其运行效率直接关系到井下作业环境的安全性、职工健康以及矿井的经济效益。随着矿井开采深度增加、生产规模扩大及地质条件复杂化,原有通风系统往往难以满足日益增长的通风需求,亟需进行技术改造与优化升级。本文以某典型深部高瓦斯矿井为研究对象,系统梳理了其原有通风系统存在的主要问题,详细阐述了基于数值模拟与现场实测相结合的通风系统改造方案设计过程,并通过关键性能指标(KPIs)对改造前后的通风效率进行了全面对比分析。结果表明:改造后矿井总风量提升23.7%,有效风量率由78.4%提高至91.2%,主扇风机单位能耗下降18.5%,采掘工作面瓦斯浓度稳定控制在安全阈值以下,通风网络稳定性显著增强。本研究不仅验证了科学化、精细化通风系统改造的有效性,也为同类矿井的通风优化提供了可借鉴的技术路径与实践经验。

关键词: 矿井通风; 系统改造; 通风效率; 有效风量率; 数值模拟; 瓦斯治理

引言

煤炭作为我国能源结构的主体,在未来相当长时期内仍将发挥不可替代的作用。然而,随着浅部资源的枯竭,煤矿开采正不断向深部延伸。深部开采带来的高地温、高地压、高瓦斯涌出等“三高”问题,对矿井通风系统提出了前所未有的挑战。通风系统不仅是稀释和排出瓦斯、粉尘、有害气体的关键屏障,也是调节井下气候、保障人员生命安全的生命线。一旦通风系统失效或效率低下,极易引发瓦斯爆炸、火灾、窒息等重大安全事故。据统计,我国煤矿事故中,因通风不良导致的瓦斯事故占比长期居高不下^[1]。因此,对现有通风系统进行科学评估与适时改造,是实现煤矿本质安全、提升生产效率的必然要求。传统的通风系统改造多依赖经验判断,缺乏系统性和前瞻性,往往导致改造效果不佳,甚至造成资源浪费。近年来,随着计算流体力学(CFD)、网络解算软件及智能传感技术的发展,为矿井通风系统的精准诊断、优化设计与效能评估提供了强有力的工具。

1 矿井概况与原通风系统问题诊断

1.1 矿井基本情况

研究对象为某矿区的一座国有重点煤矿,核定生产能力3.0Mt/a,开采深度已达-850m。矿井采用立井开拓、中央并列式通风方式,主、副井进风,中央回风井回风。煤层平均厚度4.2m,属高瓦斯矿井,绝对瓦斯涌出量达45m³/min。目前布置有2个综采工作面和6个掘进工作面,生产布局复杂,通风线路长,阻力大。

1.2 原通风系统配置

原通风系统主要由2台FBCDZ-10-No30型对旋轴流式主扇风机(一用一备)构成,额定风量8000m³/min,全压3200Pa。井下设有若干调节风窗、风门及局部通风机。通风网络呈树状结构,总进风巷长度约5.2km,总回风巷长度约4.8km。

1.3 存在的主要问题

通过对近一年的通风报表、瓦斯监测数据及现场巡查记录的综合分析,发现原系统存在以下突出问题:

(1) 风量不足且分配不均:主扇实际运行风量仅7200m³/min,低于设计值。部分远距离掘进工作面风量严重不足(<300m³/min),无法满足《煤矿安全规程》最低风速要求。(2) 有效风量率偏低:经测定,矿井有效风量率仅为78.4%,大量风流在非作业区域(如废弃巷道、硐室)无效循环或漏失,造成能源浪费。(3) 通风阻力过大:主扇运行全压高达3100Pa,接近设备极限,风机长期处于高负荷状态,电耗高,故障率上升。(4) 瓦斯积聚风险高:上隅角及回风隅角瓦斯浓度频繁接近1.0%的预警值,尤其在割煤期间易出现瞬时超限。(5) 系统调控能力弱:现有风门、风窗调节精度低,无法实现动态按需供风,难以适应生产变化。上述问题严重制约了矿井安全生产与产能释放,亟需进行系统性改造。

2 通风系统改造方案设计

2.1 改造目标

本次改造旨在实现多重目标:在风量方面,总风量需提升至9000m³/min以上;在效率方面,有效风量率应达到90%以上;在能效方面,主扇单位风量能耗需降低不少于15%;在安全方面,所有采掘工作面风量必须充足,瓦

斯浓度稳定控制在0.8%以下；同时，系统应具备更高的自动化与智能化水平，以提升响应速度与管理精度。

2.2 技术路线

为确保改造方案的科学性与可行性，项目采用了“诊断—模拟—优化—实施—验证”的闭环技术路线。首先，通过部署多参数传感器网络，全面采集井下风速、风压、瓦斯浓度、温度等关键参数，构建高精度基础数据库。随后，基于实测数据建立矿井通风网络数学模型，并利用专业软件进行稳态与瞬态数值模拟，准确还原系统运行状态^[2]。在此基础上，提出多种改造方案组合，包括主扇更换、巷道优化、辅扇增设及智能调控等，并通过模拟评估其技术效果与经济性。最终，综合考虑安全性、可靠性、投资成本与长期效益，确定最优实施方案。

2.3 具体改造措施

经过多轮方案比选与专家论证，最终确定了一套综合性改造措施。在主通风设备方面，将原有FBCDZ-10-No30型风机更换为两台FBCDZ-12-No32型高效节能对旋轴流风机，并配备变频调速装置，使其能够根据井下实际需风量自动调节转速，实现按需供风与节能运行。在通风网络结构方面，对12处已废弃巷道进行彻底封堵，有效减少无效漏风；同时，对3段关键回风巷道进行断面扩刷，由原来的8m²增至12m²，显著降低局部通风阻力。针对长距离掘进工作面供风不足的问题，在相关巷道增设2台大功率对旋局部通风机，实现独立、稳定的风流供给。在智能化建设方面，部署了32套无线风速/风压传感器和18套瓦斯传感器，实现对关键节点的全覆盖监测；同时，安装智能风门与电动调节风窗，支持远程控制与自动联动^[3]。在此基础上，搭建了矿井通风智能管控平台，集成数据采集、网络实时解算、故障预警与优化决策功能，全面提升系统运行的透明度与可控性。此外，对全矿范围内的风门、密闭墙等通风设施进行标准化改造，采用新型高密封复合材料，确保整体漏风率控制在5%以内，为高效通风奠定基础。

3 改造前后通风效率对比分析

为客观评价改造效果，选取多项核心指标进行系统性对比分析。

3.1 总风量与有效风量率

表1 总风量与有效风量率

指标	改造前	改造后	变化率
主扇风量(m ³ /min)	7200	8900	+23.6%
有效风量(m ³ /min)	5645	8117	+43.8%
有效风量率(%)	78.4	91.2	+12.8个百分点

注：有效风量指实际用于采掘工作面及硐室的风量。

改造前，主扇实际运行风量为7200m³/min，有效风量为5645m³/min，有效风量率仅为78.4%。改造后，主扇风量提升至8900m³/min，有效风量增至8117m³/min，有效风量率显著提高至91.2%。这一变化表明，不仅总供风能力得到增强，更重要的是风流的利用效率大幅提升。通过封堵废弃巷道、优化风路布局及提升设施密封性，大量原本在非作业区域无效循环或漏失的风量被重新引导至采掘工作面等关键区域，实现了风量的精准投放与高效利用。

3.2 通风阻力与能耗

表2 通风阻力与能耗

指标	改造前	改造后	变化率
主扇运行全压(Pa)	3100	2750	-11.3%
主扇电机功率(kW)	1250	1100	-12.0%
单位风量能耗(kWh/10 ⁴ m ³)	173.6	141.4	-18.5%

尽管改造后总风量增加了23.6%，但主扇运行全压反而从3100Pa降至2750Pa，下降了11.3%。这一反常现象源于巷道断面扩刷和网络结构优化所带来的系统阻力显著降低。同时，主扇电机功率由1250kW降至1100kW，单位风量能耗从173.6kWh/10⁴m³下降至141.4kWh/10⁴m³，降幅达18.5%。这充分说明，高效风机与变频技术的引入，结合网络阻力的降低，共同促成了能效的跨越式提升，实现了“增风不增耗”甚至“增风降耗”的理想效果。

3.3 工作面通风质量

表3 工作面通风质量（1302综采工作面）

参数	改造前	改造后
工作面风量(m ³ /min)	1850	2400
上隅角瓦斯浓度(%)	0.75~1.05	0.45~0.70
回风流瓦斯浓度(%)	0.55~0.80	0.30~0.50
工作面平均温度(°C)	29.5	27.2

以最具代表性的1302综采工作面为例，改造前其风量仅为1850m³/min，上隅角瓦斯浓度波动于0.75%至1.05%之间，多次逼近安全上限，回风流瓦斯浓度也常处于0.55%至0.80%的高位。改造后，工作面风量提升至2400m³/min，充足的风流有效稀释并带走了涌出的瓦斯，使上隅角瓦斯浓度稳定在0.45%至0.70%的安全区间，回风流浓度也降至0.30%至0.50%。此外，工作面平均温度由29.5℃降至27.2℃，作业环境的热舒适性得到明显改善，为职工健康与生产效率提供了双重保障。

3.4 系统稳定性与可靠性

改造后的通风系统在稳定性和可靠性方面展现出显著优势。在面对突发停风或瓦斯异常涌出等扰动时，智能管控平台能够迅速识别风险并自动启动应急预案，例

如联动开启备用风机或调整风路分配,系统恢复时间较改造前缩短了60%。设备运行可靠性也大幅提升,主扇年故障次数由5次降至1次,局部通风机故障率下降45%。更重要的是,风量调节方式由过去依赖人工操作、耗时30分钟以上的低效模式,转变为系统自动调节、5分钟内完成的高效模式,极大提升了系统对生产动态变化的适应能力。

3.5 经济效益分析

本次改造总投资约2800万元。从运行效益看,年节约电量约158万kWh,按工业电价折算,年节约电费约110万元。更为重要的是,通风保障能力的提升使矿井能够稳定维持3.0Mt/a的核定产能,避免了因瓦斯超限导致的频繁停产,年增产效益约1800万元。综合计算,项目静态投资回收期仅为1.5年,经济效益十分显著,充分体现了安全投入与经济效益的正向协同。

4 讨论

4.1 改造成功的关键因素

本项目之所以取得显著成效,关键在于采用了科学、系统的方法论。首先,整个改造过程以高精度实测数据为基础,依托数值模拟进行方案预演,有效避免了传统经验主义可能导致的决策偏差。其次,项目摒弃了“头痛医头”的局部思维,将风机、巷道、调控设施视为一个有机整体,实施协同优化,从而实现了系统性能的全局提升^[4]。再次,传统通风工程与现代信息技术的深度融合,特别是智能传感、自动控制与数据平台的引入,使通风管理从“粗放”走向“精细”,从“被动”转向“主动”。最后,项目实施过程中贯穿了全生命周期管理理念,从前期诊断、方案设计、施工组织到后期验收与运维,各环节紧密衔接,确保了改造目标的顺利达成。

4.2 存在的挑战与展望

尽管本次改造成果显著,但在深部开采背景下,矿井通风仍面临新的挑战。随着开采深度持续增加,地温梯度带来的热害问题日益突出,单纯依靠增大风量已难

以满足降温需求,未来需探索通风降温与地热能综合利用相结合的新路径。此外,当前智能算法在处理超大规模、强非线性的通风网络实时优化问题时,计算效率与鲁棒性仍有提升空间。在安全层面,瓦斯、火灾、突水等多灾种耦合风险对通风系统的应急联动能力提出了更高要求。因此,未来的研究应聚焦于构建“通风-瓦斯-地压-地温”多物理场耦合模型,发展基于数字孪生技术的通风系统全息管控平台,并积极探索利用地热、光伏等新能源驱动绿色通风的新模式,以推动矿井通风技术向更智能、更绿色、更可靠的方向持续演进。

5 结语

本文通过对某深部高瓦斯矿井通风系统改造前后的对比分析,得出以下结论:原通风系统因风量不足、有效风量率低、能耗高及瓦斯风险大等问题,已严重制约矿井的安全高效生产。通过实施主扇升级、网络优化、智能调控等综合性改造措施,成功构建了一个高效、智能、可靠的新型通风系统。改造后,矿井总风量提升23.7%,有效风量率提高至91.2%,单位风量能耗下降18.5%,采掘工作面瓦斯浓度稳定可控,系统稳定性与调控能力显著增强。项目不仅大幅提升了安全保障水平,还带来了可观的经济效益,投资回收期短,具有良好的推广价值。矿井通风系统的持续优化是一项系统工程,未来应进一步深化多学科交叉融合,推动通风技术向智能化、绿色化、本质安全化方向发展。

参考文献

- [1]王志超.矿井通风系统改造方案决策与应用效果分析[J].能源与节能,2025,(08):135-137+140.
- [2]杜红玉.煤矿矿井通风系统优化改造方案研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(07):142-144.
- [3]仲依林.矿井通风系统优化改造方案研究[J].石化技术,2024,31(07):372-373.
- [4]张永庆.矿井通风系统优化改造及应用分析[J].当代化工研究,2024,(13):117-119.