

煤矿通风系统优化设计与安全生产保障研究

权 辉 李 洋

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘要: 煤矿作为我国能源体系的重要支柱,其安全生产始终是国家关注的重点。通风系统作为矿井安全生产的核心保障,直接关系到瓦斯、粉尘、高温等有害因素的控制效果,对预防瓦斯爆炸、煤尘爆炸、火灾及窒息等重大事故具有决定性作用。本文在分析当前煤矿通风系统面临的主要问题基础上,系统阐述了通风系统优化设计的关键技术路径,包括网络解算、智能调控、多源信息融合与灾害预警机制构建。同时,结合现代信息技术如物联网、大数据、人工智能等,提出了基于数字孪生与智能感知的通风系统动态优化模型。研究表明,科学合理的通风系统优化设计不仅能显著提升矿井安全水平,还能降低能耗、提高生产效率,为实现煤矿智能化、绿色化发展提供坚实支撑。

关键词: 煤矿;通风系统;优化设计;安全生产;智能调控;数字孪生

引言

煤炭在我国一次能源消费中长期占据主导地位,尽管近年来可再生能源发展迅速,但短期内煤炭仍难以被完全替代。然而,煤矿开采环境复杂、地质条件多变,加之深部开采带来的高地温、高瓦斯、高地压等问题日益突出,使得矿井安全风险持续攀升。据统计,近十年来我国煤矿重特大事故中,超过70%与通风不良或瓦斯积聚直接相关。因此,构建高效、可靠、智能的矿井通风系统,已成为保障煤矿安全生产的重中之重。传统矿井通风系统多采用静态设计方法,依赖经验公式和固定风量分配,难以适应采掘工作面动态变化、地质构造突变及突发灾害等复杂工况。随着“智慧矿山”建设的深入推进,如何将现代信息技术与通风工程深度融合,实现通风系统的实时感知、精准调控与智能优化,成为当前研究的热点与难点。本文旨在系统梳理煤矿通风系统优化设计的理论基础与技术路径,探讨其在安全生产保障中的关键作用,并提出面向未来的智能化通风系统架构,为煤矿安全高效开采提供理论支持与实践指导。

1 煤矿通风系统现状与主要问题

1.1 通风系统的基本功能

矿井通风系统承担着多重关键职能,其核心在于维持井下作业环境的安全与适宜。首先,它通过持续输送新鲜空气,有效稀释并排出甲烷、一氧化碳、硫化氢等有毒有害气体,防止其浓度达到爆炸或致死阈值。其次,合理的风流组织能够抑制煤尘飞扬并将其带出作业区域,从而降低煤尘爆炸风险和尘肺病发病率。此外,通风系统还起到调节井下温湿度的作用,尤其在深部高温矿井中,良好的通风是改善热环境、保障工人健康与作业效率的重要手段。同时,系统必须确保各作业点氧气浓度满足

人员呼吸和设备运行的基本需求。在发生火灾等突发灾变时,通过调整风流方向与风量,还可有效限制火势蔓延,为人员撤离和救援争取宝贵时间。由此可见,通风系统不仅是矿井生产的“呼吸系统”,更是安全防线的第一道屏障。

1.2 当前存在的主要问题

尽管我国煤矿通风技术已取得长足进步,但在实际应用中仍存在诸多挑战。多数矿井的通风系统设计仍沿用建矿初期的静态参数,未能随采掘布局的动态调整、煤层赋存条件的变化以及开采深度的持续增加而进行相应优化,导致部分区域出现风量不足形成瓦斯积聚隐患,而另一些区域则风量过剩造成能源浪费。监测手段方面,传统风速与瓦斯传感器布设密度较低,数据更新频率慢,难以实现对全巷道、全时段的连续覆盖,一旦发生瓦斯异常涌出或风流紊乱,系统往往无法及时预警,错失最佳干预时机^[1]。在调控能力上,现有风门、风窗、风机等设备多依赖人工或半自动操作,缺乏多设备协同联动的智能控制机制,在应对突发灾变时响应速度慢、操作风险高。能耗问题同样不容忽视,部分矿井为追求绝对安全而采取“宁多勿少”的供风策略,致使主扇长期处于高负荷运行状态,通风系统电能消耗占矿井总用电量的30%至50%,经济性较差。尤为严峻的是,随着开采深度不断向800米甚至1000米以上延伸,高地温、高瓦斯压力与高地应力耦合作用显著增强,对通风系统的降温、稳流与抗扰动能力提出了前所未有的更高要求,传统技术体系已显捉襟见肘。

2 通风系统优化设计的关键技术路径

2.1 基于网络解算的风量分配优化

矿井通风网络本质上是由巷道节点与分支构成的复

杂拓扑结构,其风流分布遵循基尔霍夫风量平衡与风压平衡定律。通过建立非线性方程组并采用Hardy-Cross法或牛顿-拉夫逊法等迭代算法,可精确求解各巷道的风量与阻力分布。在此基础上,风量分配优化的目标通常聚焦于在满足安全约束的前提下最小化系统总能耗。具体而言,主扇功率可表示为各巷道风量与其通风阻力乘积之和,通过引入线性规划或遗传算法等优化工具,可在确保各用风地点风量不低于《煤矿安全规程》规定值、瓦斯浓度严格控制在安全限值以内的前提下,求得全局最优的风量配置方案。这种基于数学模型的优化方法,摒弃了传统经验主义的粗放分配模式,实现了从“够用就行”向“精准供给”的转变,为通风系统的高效、经济运行奠定了理论基础。

2.2 智能调控与自适应调节

为应对矿井生产动态变化带来的挑战,构建一个具备“感知-决策-执行”闭环能力的智能调控系统至关重要。该系统首先依托高精度、低功耗的无线传感器网络,对井下风速、瓦斯、温度、一氧化碳等关键参数进行密集、实时采集,形成全面的环境态势感知。在此基础上,决策层利用规则引擎或机器学习模型(如长短期记忆网络LSTM、随机森林等)对风流演变趋势进行预测,并自动生成最优调控指令。最终,执行层通过电动风窗、变频风机、自动风门等智能执行机构,精准调节各分支风量^[2]。例如,在采煤工作面持续推进的过程中,系统可自动识别已采空区域并减少其供风,同时将风量动态调配至新开切眼区域,有效避免因风流短路导致的有效风量损失。这种自适应调节机制显著提升了通风系统对生产变化的响应速度与调控精度。

2.3 多源信息融合与灾害预警

单一的通风监测数据往往难以全面反映矿井安全态势。为此,亟需整合来自通风、瓦斯抽采、微震监测、人员定位等多个子系统的异构数据,构建一个综合性的安全风险评估模型。借助深度学习技术,特别是图神经网络(GNN),可以充分利用巷道网络的拓扑结构信息,对瓦斯运移路径、烟流扩散方向等进行高精度模拟与预测。这种多源信息融合的方法,不仅能够实现对瓦斯异常涌出的早期识别,还能对因风机故障或冒顶事故引发的风流逆转风险进行提前预警。在火灾等紧急情况下,系统可快速模拟烟流蔓延路径,并结合实时人员位置信息,动态规划最优避灾路线,为应急救援提供科学决策支持,从而将被动响应转化为主动防御。

2.4 节能降耗与绿色通风

在保障安全的前提下,降低通风系统能耗是实现煤

矿绿色发展的必然要求。推广主扇与局扇的变频调速技术,使其能够根据实时需风量动态调整转速,是降低无效能耗的直接手段。同时,应从源头优化通风网络结构,通过合理规划巷道布局、减少通风路径长度和局部阻力,从根本上降低系统总阻力。在气候条件允许的地区,可充分利用冬季自然风压辅助通风,进一步节约电能。此外,对于深部高温矿井,排出的热风蕴含大量余热,可通过热交换技术回收用于地面建筑供暖或生活热水,提升能源的综合利用效率^[3]。这些措施共同构成了“绿色通风”的技术体系,推动煤矿向资源节约型、环境友好型生产模式转型。

3 基于数字孪生的智能通风系统构建

3.1 数字孪生技术内涵

数字孪生技术通过在虚拟空间中构建物理系统的高保真、动态映射,实现了物理世界与数字世界的实时交互与协同进化。在煤矿通风领域,这一技术意味着可以在计算机中创建一个与真实矿井通风网络完全同步的“数字副本”。该副本不仅能够实时反映当前的风流状态,还能基于物理模型和历史数据对未来状态进行仿真推演,从而为优化决策提供强大支撑。这种“以虚控实、虚实互动”的新模式,为解决传统通风系统响应滞后、调控粗放等难题提供了全新的技术路径。

3.2 系统架构设计

为实现上述愿景,本文提出一个“四层一体”的智能通风系统架构。最底层是物理层,由主扇、局扇、各类风门风窗、传感器及执行机构等硬件设备构成,是整个系统的物理基础。其上是数据层,依托5G或工业PON等高速通信网络,实现毫秒级的全矿井数据采集与传输,并将多源异构数据汇聚至统一的数据湖中进行标准化处理。模型层是系统的核心大脑,集成了计算流体力学(CFD)仿真、通风网络解算、瓦斯运移扩散等多物理场耦合模型。最顶层的应用层则面向用户,提供三维可视化监控、智能调度指令生成、应急情景推演、能效分析报告等丰富功能,形成一个完整的智能决策支持平台。

3.3 动态优化流程

在该架构下,通风系统的动态优化形成了一个高效的闭环流程。首先,系统基于巷道的三维激光扫描点云数据和BIM模型,构建高精度的通风网络数字底座。随后,遍布井下的传感器网络每5至10秒便将最新的风流参数同步至数字孪生体,确保虚拟模型与物理实体的状态高度一致。当需要进行优化时,系统会在数字空间内快速仿真多种调控方案,预测其对全矿井风流分布及瓦斯浓度的影响。经过综合评估后,选择最优方案并将调控

指令下发至相应的物理执行设备。调控实施后,系统会再次采集实际运行数据,与仿真结果进行比对,并利用反馈信息持续修正和校准内部模型参数,从而不断提升预测与优化的准确性。这一流程实现了从“小时级”甚至“天级”的传统优化周期,向“分钟级”实时动态优化的跨越。

4 安全生产保障机制的协同构建

4.1 健全通风管理制度

技术优化的成效离不开健全的制度保障。必须严格执行《煤矿安全规程》中关于风量、风速、瓦斯浓度等各项强制性规定,确保通风系统始终在安全阈值内运行。应建立覆盖全矿井的通风设施定期巡检与预防性维护制度,及时发现并消除风门漏风、风筒破损等隐患^[4]。尤为重要,要坚决贯彻“以风定产”的基本原则,严禁任何部门或个人为追求产量而超通风能力组织生产,从源头上杜绝安全风险。

4.2 强化人员培训与应急演练

再先进的系统也离不开人的操作与维护。必须加强对通风工、瓦斯检查员等关键岗位人员的系统性培训,使其不仅掌握传统通风知识,更要熟练操作新型智能调控设备和数字孪生平台。应将应急演练常态化,每季度至少组织一次包含反风演习、瓦斯突出模拟在内的综合性应急演练,检验系统的可靠性与人员的协同能力。同时,要大力推广自救器的正确使用方法,并通过考核确保每位入井人员都熟悉所在区域的避灾路线,切实提升全员的自救互救能力。

4.3 构建“人-机-环”协同安全体系

煤矿安全是一个复杂的系统工程,不能仅依赖单一的通风系统。应将优化后的智能通风系统深度融入矿井整体的“安全风险分级管控”和“隐患排查治理”双重

预防机制之中。通过打通通风、瓦斯、地压、水害等各专业系统间的数据壁垒,构建一个覆盖“人、机、环、管”全要素的协同安全体系。这一体系能够实现从对单一风险点的被动处置,向对全矿井安全态势的主动感知、超前预警和系统性防控的根本性转变,最终形成具有高度韧性的现代化矿井安全治理格局。

5 结语

本文系统研究了煤矿通风系统优化设计与安全生产保障的关键问题与技术路径。研究表明,传统静态通风设计已难以满足现代矿井动态安全需求,亟需向智能化、自适应方向转型;基于网络解算、智能调控与多源信息融合的优化方法,可有效提升通风效率与安全性;数字孪生技术为通风系统提供了“虚实映射、实时优化”的新范式,是未来发展方向;而技术优化必须与管理制度、人员素质提升协同推进,方能构建长效安全保障机制。展望未来,随着5G、边缘计算、AI大模型等技术的成熟,煤矿通风系统将向“全域感知、自主决策、无人干预”的高级智能阶段演进。同时,应加强通风与瓦斯抽采、防灭火、冲击地压防治等系统的耦合研究,推动矿井安全从“单点防控”迈向“系统韧性”。

参考文献

- [1]薛傲.煤矿通风系统的优化设计及其在安全生产中的应用[J].自动化应用,2023,64(S1):186-188+191.
- [2]丁庆法,高峰.保障矿井安全生产的煤矿通风系统优化设计策略[J].现代职业安全,2024,(08):88-90.
- [3]郭佳佳.煤矿矿井通风系统优化设计及应用[J].凿岩机械气动工具,2026,52(02):205-207.
- [4]王建伟.煤矿井下通风系统优化设计研究[J].矿业装备,2024,(07):32-34.