

煤矿通风系统安全优化的通风网络解算技术策略研究

段智博

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏 灵武 750400

摘要：通风网络的运行稳定性直接决定煤矿井下作业安全系数，复杂井下巷道布局让通风工况具备动态多变的特征。通风网络解算作为调控通风状态的核心技术，实际应用中会受到拓扑结构、风阻参数、工况变动等多重因素干扰。本文结合通风网络结构特性与解算技术原理，梳理各类技术短板与运行制约因素，针对性搭建精细化拓扑运算、动态参数修正、耦合运算优化及自适应工况适配的改进策略，有效改善通风解算精度不足、工况适配性较差的问题，为煤矿通风系统安全优化提供技术参考。

关键词：煤矿通风系统；通风网络；拓扑结构；网络解算；参数优化

引言

煤矿井下开采规模持续扩大，巷道布局趋于立体化、复杂化，通风网络结构呈现多分支、多回路的运行特点。复杂通风结构容易引发风量分配不均、风压失衡、风流紊乱等问题，对井下通风安全造成直接影响。通风网络解算可以精准推演井下风量、风压分布状态，是保障通风系统稳定运行的关键技术手段。现阶段常规解算模式难以适配动态多变的井下工况，存在精度不足、适配性薄弱等诸多问题。完善通风网络解算技术体系，优化解算运算逻辑，能够切实提升煤矿通风系统的安全稳定性。

1 煤矿通风系统与通风网络结构特性分析

1.1 煤矿通风系统网络构成要素

煤矿通风系统网络依靠多项核心要素搭建成型，各单元协调配合，维持井下通风工况稳定。巷道作为通风网络基础载体，承担新风输送、污风排放的核心职能，不同功能巷道相互衔接，构筑贯通井下作业区域的通风通路。通风动力设备提供气流循环所需压力，调节矿井内部风压水平与风量大小，保障巷道空气有序流动。通风构筑物规范风流走向，封堵多余通风通道，抑制风流短路、外泄漏风问题，保证通风通道规整可控^[1]。风流监测构件采集风量、风压、风速等关键参数，直观反映通风系统实时运行状态。

1.2 矿井通风网络拓扑结构类型

矿井通风网络依据巷道布置形式与风流走向，可分为多种拓扑结构形式。串联结构多见于开采初期巷道布局简单的矿井，巷道首尾依次连通，形成单一通风通路。风流流动路径固定，整体结构简单，风量调控难度偏低，但单段巷道出现问题会影响整条线路通风效果。

并联结构由多条独立巷道并列布置构成，新风可分流进入不同作业巷道，污风最终汇集排出。通风覆盖范围更广，风量调配空间充足，具备更强的通风稳定性。角联结构属于复杂拓扑形式，巷道交叉穿插形成多边回路，风流流向随风压波动发生改变，运行状态存在不确定性，多出现于巷道密集的深部开采采区。

1.3 复杂巷道通风网络结构特征

深部矿井开采范围广，巷道布局层层叠加，通风网络表现出复杂立体的结构特点。井下生产巷道、备用巷道、联络巷道相互贯通，形成多分支、多回路的通风格局。巷道长度、断面规格存在明显差异，风阻参数分布不均，容易造成区域风量分配失衡。采掘工作面持续向前推进，巷道布局处于动态更新状态，通风网络结构会随开采进度持续变化。闲置巷道、封闭巷道留存的通风缺口，会诱发风流紊乱、局部涡流等问题。网络分支数量多、覆盖范围大，风流调控难度较高，整体通风状态极易受现场采掘作业干扰。

1.4 通风网络运行固有限制特性

矿井通风网络受井下空间环境与结构布局限制，存在固定的运行制约特点。网络内部风阻分布不均衡，巷道壁面变形、粉尘堆积、物料堆放等常见现场情况，都会提升局部风阻数值，打乱正常风量分配比例。采掘作业持续开展会改变巷道空间结构，破坏原有风压平衡体系，催生风流波动、局部无风等隐患。网络分支关联度高，单处巷道工况改变，会辐射影响周边大范围通风状态。井下高湿、多粉尘的环境会加速通风设备与构筑物老化，弱化通风输送能力，限制通风系统长期稳定运行，如图1所示。



图1

2 煤矿通风网络解算核心技术原理

2.1 通风网络风量分配解算原理

通风网络风量分配解算是矿井通风参数推演的核心内容，整体运算逻辑依托流体力学流动规律搭建。网络内部各风流节点遵循流量守恒规则，巷道分支汇入的风流总量与分流输出总量保持平衡。闭合通风回路内，各段巷道阻力风压相互抵消，维持回路整体风压平衡。解算流程依托风阻特性与通风动力参数，完成各巷道分支风量的自动分配^[2]。通过多层迭代计算不断修正原始数据偏差，弱化环境干扰带来的数值误差。精准输出各采区、各作业巷道的合理风量数值，为通风系统调风、配风工作提供科学的计算支撑。

2.2 巷道风阻参数解算逻辑

巷道风阻参数是决定风流输送效率的核心指标，也是通风网络解算的基础前置条件。参数计算结合巷道固有物理属性，包含巷道延展长度、有效通风断面、岩壁粗糙系数等基础指标，构建标准化计算模型。井下生产活动会改变巷道通风条件，巷道围岩变形、落地煤尘、堆积物料都会提升通风阻力。运算过程结合现场实际工况修正基础参数，弥补理论数值与井下实际的偏差。针对永久巷道、临时巷道、联络巷道区分计算标准，精准获取不同巷道的真实风阻数值，保障后续全网解算的基础精度。

2.3 通风压力梯度解算方法

通风压力梯度解算用于刻画井下风压空间分布规律，精准判别风流流动动力强弱。运算以主通风机风压输出端为基准点位，沿风流输送路径逐段测算风压衰减幅度。风流在巷道流动过程中，风压损耗与风阻、风量满足通风阻力通用公式： $h = RQ^2$ ，式中： h 为巷道通风阻力（风压损耗），Pa； R 为巷道总风阻， $N \cdot s^2/m^8$ ； Q 为巷道实际通风风量， m^3/s 。

该公式可逐段计算风流输送路径的风压衰减量，结合井下地形高程、巷道通风损耗、通风设备输出功率等

多重因素，梳理风压空间变化特征。精准定位采掘工作面、巷道交叉口、封闭段等特殊区域的风压异常点位，划分风压高低分布区间。依据梯度变化特征研判风流运行稳定性，识别局部涡流、风压失衡等隐患，为通风系统工况优化提供数据支撑。

2.4 多分支网络耦合解算机制

矿井通风网络由大量分支巷道与闭合回路交织组成，各巷道通风参数存在紧密关联。局部巷道风阻、风量出现变动，会扰动全域通风参数分布。耦合解算机制打破单一巷道独立计算的局限，整合全网所有分支的通风参数建立整体运算框架。统筹各分支风压、风阻、风量的联动关系，完成多维度参数协同推演。依托闭环迭代运算消除局部计算误差，提升全域解算结果的稳定性。精准还原复杂井下巷道的风流运行状态，适配复杂采区通风结构的解算需求，保障通风网络分析结果真实有效。

3 煤矿通风网络解算现存技术短板与制约因素

3.1 复杂拓扑网络解算适配性局限

煤矿井下开采范围持续延伸，通风网络拓扑结构愈发复杂，多回路、多交叉巷道密集分布，传统解算模式暴露明显适配短板。常规解算体系多依托规整、简单的通风模型搭建运算框架，对简单串联、并联巷道的运算适配度更高。面对角联巷道、多层交错巷道组成的复杂网络，运算框架难以全面覆盖所有分支节点的关联关系^[3]。部分隐蔽巷道、闲置分支巷道的通风参数无法完整纳入运算范围，网络结构还原完整度不足。模型适配能力的不足，会造成复杂采区通风状态推演不全面，无法精准覆盖井下全部通风工况。

3.2 动态风阻参数解算偏差问题

风阻参数是通风网络解算的核心基础，井下复杂环境会让巷道风阻处于动态变化状态。现有解算方式多采用固定参数开展运算，选取的风阻数值多为静态监测数据，无法匹配井下实时工况。巷道内壁积尘、围岩形变、设备物料堆放等现场变化，都会持续改变巷道通风断面与粗糙程度，风阻数值处于动态波动状态。静态参数运算模式无法跟进这类动态变化，参数取值与现场真实风阻存在偏差。基础参数的精准度不足，会逐层传导至全网解算结果，降低风量、风压推演数据的可靠性。

3.3 多巷道耦合干扰下解算精度缺陷

矿井多分支巷道存在紧密的参数关联，单条巷道工况变化会引发周边分支参数连锁改变。现阶段多数解算方式对巷道耦合干扰的考量不够充分，弱化分支间的相互影响作用。运算过程侧重单支路参数独立推演，对

多巷道交叉干扰、风压互相影响的耦合关系量化不足。复杂采区多条巷道参数叠加扰动后,微小误差会持续累积放大。误差累积会造成整体解算结果偏离真实通风状态,难以精准反映耦合作用下的井下风流分布特征。

3.4 变工况条件下解算适配短板

井下采掘作业持续推进,工作面位置、巷道布局、通风设备运行状态都会产生动态变动,形成多变的通风工况。现有解算技术多针对固定工况设计运算逻辑,动态调整能力薄弱。开采进度推进、临时巷道开闭、通风设备参数调整等工况变动,都会改变原有通风平衡体系。传统运算模型无法快速适配工况更迭节奏,难以实时更新解算参数与运算框架。工况变动后的通风状态推演存在滞后性,难以满足井下动态通风调控的精准计算需求。

4 煤矿通风系统优化的通风网络解算技术优化策略

4.1 通风网络拓扑精细化解算优化策略

针对复杂拓扑网络解算适配性不足的问题,可通过拓扑结构精细化处理提升解算覆盖能力。对井下所有巷道开展全域梳理统计,细化主干巷道、分支巷道、联络巷道及闲置巷道的层级划分。完整收录各类巷道节点、拐点、交汇区域的结构信息,完善通风网络基础模型框架。细化角联、多层交错巷道的逻辑关联关系,补齐传统模型缺失的隐蔽巷道结构参数^[4]。优化模型运算逻辑,强化复杂回路节点数据的收录与计算能力,提升模型对复杂井下通风格局的适配能力。精细化拓扑建模可以完整还原井下真实通风布局,缩小模型结构与现场实际布局的偏差,让解算结果更贴合复杂采区通风运行状态。

4.2 动态风阻参数精准解算优化策略

为解决静态风阻参数带来的计算偏差,可搭建动态风阻参数更新机制优化解算精度。结合井下巷道环境变化规律,建立风阻参数动态修正体系,摒弃单一固定参数取值模式。针对巷道积尘堆积、围岩变形、物料设备摆放等影响条件,设置对应参数修正系数,实时调整巷道风阻数值。依托井下常态化监测数据,持续更新各巷道断面、粗糙系数等核心指标,还原真实通风阻力状态。优化参数取值流程,缩短数据更新周期,让风阻数据适配井下动态变化的作业环境。稳定提升基础参数取值精准度,从源头降低通风解算的数据偏差。

4.3 多分支耦合通风网络解算改进策略

围绕多巷道耦合干扰引发的精度缺陷,可通过优化耦合运算逻辑完善解算体系。调整单一巷道独立运算模

式,建立全网分支联动计算框架,强化巷道之间参数关联运算能力。量化巷道交叉区域的风压干扰、风量制衡关系,完善多分支耦合运算公式,精准捕捉参数互相影响的变化规律。增设误差抑制运算模块,针对多巷道扰动产生的数值偏差进行逐级修正,控制误差累积幅度。优化迭代运算流程,提升多回路、多分支网络的数据协同运算能力。有效提升复杂通风网络解算精度,真实还原耦合作用下的井下风流分布特征。

4.4 变工况通风网络自适应解算优化策略

针对井下工况动态变化产生的适配短板,可构建自适应解算体系改善传统运算模式。优化解算模型底层逻辑,赋予模型工况识别与自主调整能力,适配采掘推进、巷道开闭、设备参数调整等场景变动。根据井下通风工况更迭状态,自动更新网络结构参数与运算边界条件,无需人工反复调整模型框架。缩短工况响应周期,弱化传统解算模式的数据滞后问题,实时匹配动态通风工况。持续跟进井下通风状态变化,输出精准有效的风量、风压解算结果,满足矿井通风动态调控的技术需求,为通风系统安全稳定运行提供技术支撑^[5]。

结束语

通风网络结构的复杂性与工况动态变化,是影响煤矿通风解算效果的核心因素。通过分析通风网络结构特征与解算技术原理,总结传统解算模式存在的各类短板,从拓扑建模、参数取值、耦合运算、工况适配四个维度完成技术优化。各项优化策略可以有效弥补传统解算技术的应用缺陷,提升复杂矿井通风网络解算的精准度与适配性,改善井下风流失衡、风量分配紊乱等常见问题,为煤矿通风系统安全管控、工况优化提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]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(8):88-90.
- [2]程军,张泉,王成,等.基于通风网络解算的矿井智能通风监控系统设计[J].煤矿机械,2025,46(1):30-34.
- [3]刘豪,林坤峰,万飞.基于神经网络软解算的矿井智能通风调节控制方法研究[J].中国设备工程,2026(12):45-47.
- [4]徐雪战,邹云龙.矿井智能通风系统架构及关键技术研究[J].工矿自动化,2026,52(2):7-15.
- [5]闫浪,沈瑞杰.安山煤矿大墩沟风井通风系统优化设计研究[J].中国煤炭工业,2026(2):60-61.