

矿井通风与瓦斯抽采协同治理模式研究

宋 磊 郭勤磊

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘要: 瓦斯灾害是制约我国煤矿安全生产的核心因素之一。传统的矿井通风与瓦斯抽采系统多采用“各自为政”的独立管理模式,难以实现对复杂瓦斯涌出动态的有效控制,存在治理效率低、资源浪费大、安全风险高等问题。本文基于系统工程理论和瓦斯赋存-运移-涌出规律,深入分析了矿井通风与瓦斯抽采之间的耦合关系,提出了“监测预警—动态调控—智能优化”三位一体的协同治理模式。该模式以实时数据驱动为核心,通过构建多源信息融合平台,实现通风参数与抽采参数的动态匹配与协同优化。研究进一步设计了协同治理的技术路径与实施框架。该模式可显著降低回流瓦斯浓度,提高抽采效率,有效保障矿井安全生产,为智能化矿山建设提供关键技术支撑。

关键词: 矿井通风; 瓦斯抽采; 协同治理; 动态调控; 智能优化

引言

矿井通风与瓦斯抽采是防治瓦斯灾害的两大核心手段。通风系统通过引入新鲜风流稀释并排出井下瓦斯,是保障作业环境安全的基础;瓦斯抽采则通过主动干预煤岩体内部瓦斯赋存状态,从源头上减少瓦斯涌出量,是治本之策。长期以来,二者在工程实践中往往被割裂管理:通风系统侧重于风量、风速等宏观参数的稳定供给,而抽采系统则聚焦于钻孔布置、负压控制等局部技术指标。这种“两张皮”式的运行模式,导致系统间缺乏有效联动,难以应对采掘扰动、地质构造变化等引起的瓦斯动态涌出,极易造成局部瓦斯超限甚至积聚,形成重大安全隐患。近年来,随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术在矿山领域的深度融合,为构建矿井通风与瓦斯抽采的协同治理体系提供了新的技术范式。协同治理强调系统整体最优而非局部最优,通过信息共享、决策联动与执行协同,实现“1+1>2”的治理效能。因此,开展矿井通风与瓦斯抽采协同治理模式研究,不仅是破解当前瓦斯防治瓶颈的关键路径,也是推动煤矿智能化、本质安全化转型的必然要求。

1 矿井通风与瓦斯抽采的耦合机理分析

1.1 瓦斯赋存与运移的基本规律

瓦斯在煤岩体中的赋存状态主要包括游离态和吸附态。在原始地应力状态下,瓦斯处于相对平衡状态。当进行采掘活动时,煤岩体应力场、裂隙场和渗流场发生剧烈扰动,导致瓦斯解吸、扩散并向采掘空间涌出。这一过程受控于煤层透气性、瓦斯压力梯度、地应力分布及采动影响范围等多重因素。特别是在断层带、褶皱区或高瓦斯含量区域,采掘扰动极易引发瓦斯异常涌出,其动态性和突发性对传统静态治理手段构成严峻挑战。理

解瓦斯从煤体内部向巷道空间迁移的全过程,是构建通风与抽采协同机制的前提。

1.2 通风系统对瓦斯涌出的影响

矿井通风系统通过建立稳定的风流网络,将工作面及巷道中的瓦斯稀释至安全浓度以下(通常<1%)。然而,通风并非被动稀释,其本身也会反作用于瓦斯运移过程。例如,通风形成的负压区会改变煤壁附近的瓦斯压力梯度,可能加速瓦斯从煤体向巷道的渗流;高速风流可增强煤壁表面的瓦斯扩散速率,尤其在破碎带或裂隙发育区域更为显著;此外,风流带来的温湿度变化还可能影响煤体对瓦斯的吸附/解吸平衡^[1]。这些效应表明,通风不仅承担稀释功能,还在一定程度上参与了瓦斯释放的物理过程,其参数设置直接影响瓦斯涌出强度与分布形态。

1.3 瓦斯抽采对通风系统的反馈作用

瓦斯抽采通过在煤层或围岩中布置钻孔,施加负压(通常为10~30kPa),主动抽取瓦斯,从而降低煤体瓦斯压力,减少向采掘空间的自然涌出量。同时,抽采过程会在煤体内部形成以抽采孔为中心的瓦斯流场,引导瓦斯流向钻孔而非工作面,从根本上削弱瓦斯源项。这种主动干预不仅提升了瓦斯治理的前瞻性,也间接影响了通风系统的设计与运行。当抽采效率高时,工作面瓦斯涌出量显著下降,可适当降低配风量,在保障安全的前提下节约通风能耗。反之,若抽采效果不佳,则需依赖更大风量进行稀释,这不仅增加电耗,还可能因风流紊乱导致瓦斯在隅角或高冒区积聚,形成新的风险点。

1.4 耦合关系的系统表征

综上所述,通风与抽采构成一个典型的“双向耦合、动态反馈”系统。通风效果直接影响瓦斯浓度分布,而

抽采强度又决定了瓦斯源项的大小。二者共同作用于矿井瓦斯场，其协同程度直接决定了瓦斯治理的整体效能。若仅强化通风而不加强抽采，则可能因瓦斯源过大而导致稀释失效；反之，若抽采不足而盲目增加风量，不仅浪费能源，还可能因风流紊乱引发瓦斯积聚。因此，必须将通风与抽采视为一个有机整体，通过参数联动、信息共享与目标协同，实现系统层面的最优控制，而非孤立追求某一子系统的性能最大化。

2 协同治理模式的构建

2.1 监测预警层：构建多源感知网络

该层是协同治理的基础，旨在实现对矿井瓦斯场、风流场、抽采场的全域、全时、全要素感知。具体而言，应在工作面、回风巷、隅角、钻场等关键位置部署高精度激光甲烷传感器，实现瓦斯浓度秒级采集；同时利用风速、风压、温湿度传感器实时获取风网状态，并对每个抽采钻孔的流量、浓度、负压进行在线监测，以评估单孔及区域抽采效果。此外，还需融合地质雷达、微震监测、采煤机位置等动态信息，预判因断层揭露或顶板垮落引发的瓦斯异常涌出风险。所有数据通过工业环网汇聚至矿井数据中心，在统一时空基准下构建“瓦斯-通风-抽采”数字孪生体，为后续调控与优化提供高保真数据支撑。

2.2 动态调控层：实现参数联动响应

基于实时监测数据，系统需建立通风与抽采的联动调控机制，实现从“被动响应”到“主动干预”的转变。当回风流瓦斯浓度接近0.8%的安全阈值时，系统应自动触发抽采系统增压指令，同时适度增加局部风量，形成双重抑制效应；更进一步，可利用时间序列模型预测未来10分钟瓦斯浓度变化趋势，提前调整抽采负压或风门开度，避免超限发生^[2]。对于多工作面矿井，还需根据各面瓦斯涌出强度动态分配总风量与抽采资源，避免“一刀切”配风造成的资源错配。该层通过PLC或DCS系统实现毫秒级指令下发，确保调控动作的及时性与准确性，从而在复杂动态环境中维持瓦斯浓度始终处于可控区间。

2.3 智能优化层：追求系统全局最优

在动态调控基础上，系统应引入智能算法对长期运行策略进行全局优化。优化目标应综合考虑安全、经济与效率，构建以“最小化瓦斯超限风险、最小化通风能耗、最大化抽采纯量”为核心的多目标函数，并嵌入风量下限、瓦斯浓度上限、设备能力、巷道阻力等实际约束条件。求解此类非线性、多变量优化问题，可采用改进粒子群算法或深度强化学习等先进方法，生成最优通风-抽采联合调度方案。该层通常按班次或日周期运行，

输出下一阶段的系统运行策略，指导风机转速、泵站负压、风门开度等参数设定，从而实现从“经验驱动”向“数据与模型双驱动”的跃升，推动瓦斯治理迈向智能化新阶段。

3 协同治理的技术路径与实施框架

3.1 技术架构

协同治理系统宜采用“云-边-端”三级技术架构，以兼顾实时性与智能性。在端侧，各类传感器与执行器（如变频风机、电动调节阀）负责完成底层数据采集与物理动作执行；在边缘侧，部署于井下的边缘计算节点承担数据预处理、异常检测与本地闭环控制任务，例如在瓦斯突增时立即启动应急通风或切断电源；在云端，地面数据中心运行数字孪生平台、智能优化引擎与可视化系统，支持远程监控、策略生成与管理决策^[3]。该架构既保障了井下控制的低时延响应，又充分发挥了云端强大的计算与存储能力，形成上下贯通、协同高效的治理体系。

3.2 关键技术

首先是多源异构数据融合技术，由于井下传感器类型多样、通信协议不一、采样频率各异，必须通过时间戳对齐、空间坐标映射、数据质量评估与置信度加权等手段，将离散、异构的数据流整合为统一、连续、高保真的矿井环境场模型。其次是高精度瓦斯涌出动态预测模型，该模型需深度融合地质勘探数据（如瓦斯含量、煤层厚度、断层分布）、采掘工程参数（如推进速度、割煤高度）以及历史瓦斯涌出序列，利用长短期记忆网络（LSTM）或时空图神经网络（ST-GNN）等先进算法，实现对未来5-30分钟瓦斯浓度变化的精准预判，为前置调控赢得宝贵时间窗口。第三是通风-抽采耦合仿真平台，该平台基于计算流体力学（CFD）模拟巷道风流，结合煤岩体渗流-扩散-解吸多物理场模型，可高保真再现不同抽采负压、风量配置下的瓦斯运移全过程，用于新策略的虚拟验证与风险推演。最后是自适应调控算法，面对矿井环境的高度非线性与时变特性，传统PID控制难以满足要求，需引入模糊逻辑、模型预测控制（MPC）或强化学习等智能控制方法，使系统具备在线学习与参数自整定能力，确保在复杂工况下仍能稳定、高效运行。

3.3 实施步骤

协同治理模式从理念到实践需遵循系统化、渐进式的实施路径。首先应开展全面的现状诊断，通过风网解算、抽采效果评价与历史事故分析，精准识别现有系统在协同性、响应速度与资源利用等方面的短板。在此基础上，制定基础设施升级改造方案，包括铺设工业环网、部署智能传感终端、对主扇与瓦斯泵站进行变频改造等，为

数据互通与设备可控奠定硬件基础。随后,开发一体化协同治理软件平台,集成数据接入、三维可视化、预警推送、策略生成与远程操控等功能模块,并构建初始联动规则库——该规则库既包含国家规程中的强制性阈值(如瓦斯浓度1.0%断电),也融入现场工程师的宝贵经验(如过断层前72小时提升抽采负压15%)。完成平台部署后,应选择1-2个典型高瓦斯工作面开展试点运行,在真实环境中验证系统稳定性与调控有效性,并通过持续收集运行数据反哺模型优化^[4]。待试点成效显著、流程成熟后,方可编制标准化实施指南,组织全矿技术人员培训,逐步推广至所有采掘区域,最终实现矿井瓦斯治理体系的整体跃升。这一过程强调“诊断—建设—验证—推广”的闭环迭代,确保技术落地扎实、成效可持续。

4 讨论与展望

4.1 创新点与优势

本文提出的协同治理模式突破了传统“通风为主、抽采为辅”的线性思维,将二者视为有机整体,具有系统性、动态性、智能性与经济性四大优势。系统性体现在从感知到决策再到执行的完整闭环;动态性表现为对瓦斯涌出变化的快速响应能力;智能性依托AI算法实现自主优化;经济性则在保障安全的同时显著降低综合能耗。这种模式不仅提升了瓦斯治理效能,也为煤矿智能化建设提供了可复用的技术范式。

4.2 存在的挑战

尽管成效显著,协同治理模式在推广应用仍面临若干挑战。首先是数据质量高度依赖传感器可靠性,一旦出现漂移或故障,将直接影响模型精度与控制效果;其次是模型泛化能力有限,不同矿井地质条件差异巨大,通用模型需大量本地化训练数据支撑;此外,人机协同机制尚不成熟,部分技术人员对智能系统存在信任障碍,如

何实现“人在环路”的高效协作仍需深入探索。

4.3 未来研究方向

未来研究可从多维度拓展协同治理内涵。一是向多灾种协同防控延伸,将瓦斯治理与防灭火、粉尘控制、水害预警等系统集成,构建矿井灾害综合防控体系;二是深化数字孪生应用,构建高保真、全要素的矿井数字孪生体,实现“虚实互动、以虚控实”的高级智能控制;三是结合5G与边缘智能技术,利用5G低时延特性实现更快速的井下闭环控制;四是探索安全与环保协同路径,将高浓度瓦斯抽采与碳捕集、利用与封存(CCUS)技术结合,助力煤矿绿色低碳转型。

5 结语

矿井通风与瓦斯抽采的协同治理是提提高瓦斯矿井本质安全水平的关键路径。本文通过深入剖析二者耦合机理,创新性地提出了“监测预警—动态调控—智能优化”三位一体协同治理模式,并设计了完整的技术实施框架。该模式能有效降低瓦斯风险、提升抽采效率、节约能源消耗,具有显著的安全、经济与社会效益。未来,随着智能矿山建设的深入推进,协同治理模式将进一步向全矿井、全灾种、全生命周期方向拓展,为我国煤炭工业高质量发展筑牢安全基石。

参考文献

- [1]夏云刚.矿井通风及瓦斯抽采技术的研究与应用[J].矿业装备,2024,(12):16-18.
- [2]李绪龙.煤矿高瓦斯矿井通风技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(20):52-54.
- [3]白志强.关于高瓦斯矿井通风安全管理的思考[J].能源与节能,2025,(09):138-140.
- [4]李彦清.矿井通风安全管理与瓦斯防治措施研究[J].煤炭新视界,2025,(01):74-75.