

Research on the Collaborative Mechanism between Gas Control and Coal Mine Safety Mining

Hanbin Wang

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036700, China

Abstract

During coal mining operations, gas occurrence conditions are complex and release patterns are highly variable, which can easily trigger major safety risks such as outbursts and explosions, and have become a critical factor restricting safe mine production. Focusing on issues including insufficient coordination between gas control and safe mining, poor system integration, and weak dynamic control capacity, the collaborative mechanism between gas control and coal mine safe mining is systematically reviewed and analyzed from the perspective of system coupling and coordinated control. By integrating gas drainage, ventilation regulation, and mining processes, multi-system coordinated operation is strengthened, and a collaborative operation system covering planning and design, process control, and dynamic evaluation is constructed. On this basis, risk classification control and hidden hazard investigation and treatment mechanisms are improved, monitoring and early warning as well as emergency response capabilities are enhanced, and safety management is promoted to shift from decentralized control to systematic coordination, thereby providing support for safe and efficient coal mining.

Keywords

gas control; coal mine safe mining; collaborative mechanism; risk management; system coupling

瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制研究

王汉斌

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西忻州 036700

摘要

煤矿开采过程中瓦斯赋存条件复杂、释放规律多变, 极易引发突出、爆炸等重大安全风险, 已成为制约矿井安全生产的重要因素。围绕瓦斯治理与安全开采之间协同不足、系统衔接不畅及动态管控能力薄弱等问题, 从系统耦合与协同控制视角出发, 对瓦斯治理与煤矿安全开采的协同机制进行梳理与分析。通过整合瓦斯抽采、通风调控与采掘工艺, 强化多系统联动运行, 构建覆盖规划设计、过程控制与动态评估的协同运行体系。在此基础上, 完善风险分级管控与隐患排查治理机制, 提升监测预警与应急响应能力, 推动安全管理由分散控制向系统协同转变, 为煤矿安全高效开采提供支撑。

关键词

瓦斯治理; 煤矿安全开采; 协同机制; 风险管控; 系统耦合

1 引言

煤矿开采活动在向深部延伸的过程中, 地质条件日趋复杂, 瓦斯压力与含量持续升高, 使矿井安全生产面临更为严峻的挑战。瓦斯作为煤层中主要的伴生气体, 其释放与运移过程受开采扰动影响显著, 极易在局部区域形成高风险积聚状态。传统以单一技术为主导的治理模式难以适应多源风险叠加的发展趋势, 治理与开采之间缺乏有效衔接, 导致部分区域存在治理滞后与风险外溢现象。随着安全生产标准不断提升, 单一系统优化已难以支撑整体安全水平的提升, 多

系统之间的协同运行成为关键路径。通过强化瓦斯治理与采掘作业的耦合关系, 推动技术体系、管理机制与过程控制的协同发展, 有助于构建更加稳定高效的矿井安全运行模式。

2 瓦斯治理与煤矿安全开采的协同发展基础

2.1 瓦斯灾害特征与煤矿开采安全风险结构

瓦斯灾害具有突发性强、影响范围广及演化过程复杂等特征, 在煤矿开采过程中表现为突出、爆炸与窒息等多类型风险叠加。随着开采深度增加, 煤层瓦斯含量可由 $8\text{m}^3/\text{t}$ 上升至 $15\text{m}^3/\text{t}$ 以上, 地应力水平提高 $20\% \sim 35\%$, 使煤岩体稳定性下降, 瓦斯释放更加剧烈。安全风险结构呈现出空间分布不均与时间演化交织的特点, 采区、掘进工作面及回采面风险差异显著。风险结构由单点控制向系统联动转变, 对安全管理提出更高要求。

【作者简介】王汉斌(1984—), 男, 中国河南鲁山人, 本科, 工程师, 从事矿井采掘工程、技术管理及现场实施研究。

2.2 瓦斯治理技术体系与安全开采工艺关系

瓦斯治理技术体系主要涵盖抽采、通风、封堵与卸压等关键技术，其运行效果与采掘工艺密切相关。抽采系统通过钻孔布置与负压控制，将煤层瓦斯浓度由原始状态的80%以上降低至30%以下，为采掘作业创造安全条件。采煤方法与开采强度直接影响瓦斯释放速率，综采工作面日产量提升至5000t以上时，瓦斯涌出量可增加40%左右，需同步调整抽采能力。通风系统通过风量配置与巷道布局控制瓦斯稀释效率，合理风速维持在1.5m/s左右可有效防止局部积聚。技术体系与工艺之间形成动态匹配关系，工艺调整带动治理参数变化，治理效果反向约束开采节奏，构成相互依存的运行格局。

2.3 协同机制构建的理论基础与现实需求

协同机制构建依托系统工程理论与风险管理理论，通过多要素耦合实现整体效能提升。煤矿生产系统由地质条件、工程技术与管理行为构成，单一环节优化难以覆盖复杂风险场景，系统协同成为提升安全水平的重要路径。现实生产中存在治理与开采衔接不紧密、信息传递滞后及资源配置不均等问题，导致局部区域风险控制效果波动明显。矿井瓦斯事故占比长期维持在25%~35%之间，表明协同水平仍有提升空间。随着智能化矿山建设推进，对协同机制提出更高要求，需要在空间布局、时间安排与技术集成方面形成闭环体系，实现风险控制与生产效率的协调统一。

3 瓦斯治理与煤矿安全开采协同运行的关键要素

3.1 瓦斯抽采系统与采掘系统的耦合关系

瓦斯抽采系统与采掘系统之间存在明显的耦合效应，抽采效果直接影响采掘安全条件，采掘活动又改变瓦斯赋存状态。合理布置抽采钻孔可将煤层瓦斯压力降低30%~50%，为工作面推进提供稳定环境。掘进速度提升至10m/d以上时，瓦斯涌出量随之增加，需要同步提高抽采负压与管网输送能力。采掘空间扩展改变瓦斯运移路径，使局部区域形成新的高浓度区，对抽采系统提出动态调整要求。两系统通过时间与空间的协同配置实现平衡运行，形成“先抽后采、边采边抽”的运行模式，保障安全与效率的同步提升。

3.2 通风系统与瓦斯控制的协同调控机制

通风系统通过风量分配与风路优化实现瓦斯稀释与输送，是瓦斯控制的重要支撑。矿井总风量通常控制在15000m³/min以上，局部工作面风量根据瓦斯涌出量进行动态调整。风流组织不合理易导致瓦斯积聚区扩大，增加爆炸风险。通过优化通风网络结构与调节设施布置，可使瓦斯浓度稳定控制在1%以下。通风系统与抽采系统之间形成协同关系，抽采降低源头浓度，通风实现空间扩散控制，两者共同构建安全环境。调控机制需要结合实时监测数据进行动态

修正，使风量配置与瓦斯变化保持一致，提高整体控制效率^[1]。

3.3 监测预警与动态管控的协同支撑体系

监测预警系统通过传感器网络与数据平台，实现对瓦斯浓度、压力及流量的实时采集。矿井监测点布设密度通常达到每100m设置1个以上，实现关键区域全覆盖。数据传输延时控制在5s以内，可快速反映异常变化。预警阈值设定在1%与1.5%等关键节点，对不同等级风险进行分级响应。动态管控体系依托监测数据，对采掘节奏与通风参数进行实时调整，使风险处于可控范围。系统通过数据分析与趋势判断，对潜在风险进行提前识别，提升安全管理的前瞻性与精准性。

4 瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制构建路径

4.1 协同规划与一体化设计机制构建

协同规划将瓦斯治理纳入矿井总体设计体系，在采区布局、巷道布置与生产接续安排中统筹考虑瓦斯因素。通过对煤层瓦斯含量、地质构造及开采强度进行综合分析，确定合理的抽采区域与时间节点，使治理措施与开采活动保持一致。设计阶段引入多方案比选机制，对不同技术路径的安全性及经济性进行评估，提高决策科学性。一体化设计强调系统之间的协调配置，使抽采、通风与采掘形成有机整体，避免局部优化带来的系统失衡问题。

4.2 过程联动与作业协同控制机制优化

过程联动机制通过将瓦斯治理措施嵌入采掘全过程，实现各环节的动态衔接。作业过程中依据实时监测数据调整采掘强度与抽采参数，使生产节奏与安全条件保持匹配。回采面推进速度控制在3~5m/d区间时，瓦斯释放与抽采能力可形成相对平衡状态。协同控制机制通过标准化操作流程与岗位责任体系，确保各类措施执行到位。现场管理结合动态检查与考核机制，提高执行力度，形成稳定可靠的运行模式。

4.3 信息融合与智能决策支撑机制完善

信息融合通过整合监测系统、生产系统与管理信息系统数据，实现多源信息的统一处理与分析。数据平台对瓦斯浓度、风量及采掘参数进行综合分析，形成可视化管理界面，提升决策效率。决策支撑机制通过模型分析与趋势预测，对风险变化进行评估，为调度指挥提供依据。系统可对异常数据进行自动识别与预警提示，缩短响应时间，提高应急处置能力^[1]。信息融合推动管理模式由经验驱动向数据驱动转变，为协同机制运行提供持续支撑。

5 瓦斯治理与煤矿安全开采协同实施保障体系

5.1 组织管理与制度体系协同保障机制

组织管理体系通过明确职责分工与层级管理结构，实现瓦斯治理与安全开采之间的协调运行。矿井设立专门的瓦斯治理机构，配备专业技术人员比例达到10%~15%，强化技术指导与现场管控能力。制度体系围绕瓦斯抽采、通风

管理及作业审批等关键环节进行系统构建,形成覆盖设计、实施与监督全过程的管理框架。岗位责任落实到具体作业单元,通过考核机制与责任追溯制度提升执行力度。制度运行过程中结合实际生产情况进行动态修订,使管理要求与现场需求保持一致,增强体系的适应性与约束力,保障协同机制稳定运行。

5.2 技术标准与操作规范协同约束机制

技术标准体系对瓦斯治理与开采作业提出明确控制指标,通过参数约束提升系统运行的规范性。抽采负压通常控制在 20kPa 以上,瓦斯浓度需稳定低于 1%,为作业提供安全边界。操作规范对钻孔施工、管网维护及通风调节等关键环节进行细化规定,减少人为操作偏差带来的风险。标准与规范之间形成相互支撑关系,使技术执行具备可操作性与一致性。现场作业通过标准化流程与作业指导书实现统一管理,设备运行与工艺控制保持稳定状态^[1]。技术约束机制通过持续监督与检查,推动各项措施有效落实,提高整体安全水平。

5.3 风险分级与隐患治理协同管控机制

风险分级管控通过对瓦斯压力、含量及涌出量进行综合评估,将矿井划分为不同风险等级区域,高风险区域瓦斯浓度接近 1% 时启动重点监控措施。隐患治理体系对排查发现的问题进行分类管理,整改时限根据风险等级设定在 24h 至 72h 范围内,提高治理效率。协同管控机制将风险识别、隐患排查与整改闭环紧密衔接,形成持续循环的管理模式。现场通过定期巡检与专项检查相结合的方式,提升隐患发现率。数据记录与分析对隐患分布规律进行总结,为优化治理措施提供依据,使风险控制更加精准有效。

5.4 监督评价与绩效考核协同驱动机制

监督评价体系通过构建覆盖全过程的考核指标体系,对瓦斯治理与安全开采协同运行效果进行量化评估。评价内容涵盖瓦斯抽采达标率、浓度控制水平及隐患整改完成率等关键指标,抽采达标率稳定在 70% 以上时可有效支撑安全生产。绩效考核与岗位责任紧密关联,将协同运行成效纳入考核权重的 30% 以上,强化执行约束力。监督机制通过日常检查与专项评估相结合,及时发现运行偏差并进行纠偏。评价结果与资源配置及奖惩机制联动,使管理行为与安全目标保持一致,推动协同机制持续优化与稳定运行。

6 瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制优化策略

6.1 全过程协同控制模式的持续优化路径

全过程协同控制模式以生产全周期为主线,将瓦斯治理措施嵌入规划设计、施工实施与运行管理各阶段。生产接

续安排与瓦斯抽采计划保持同步,抽采时间提前量达到 3 ~ 6 个月,为开采提供稳定条件。作业过程中通过实时监测与参数调整,使采掘强度与瓦斯释放保持动态平衡。控制模式通过不断优化运行流程与技术参数,提高系统适应复杂条件的能力^[4]。现场管理结合数据反馈进行持续改进,使协同控制模式在不同地质条件下保持稳定效果,推动安全与效率的协同提升。

6.2 多系统联动与资源配置优化策略

多系统联动通过整合抽采、通风与监测等系统资源,实现整体运行效率提升。资源配置根据瓦斯涌出量与采掘进度进行动态调整,抽采能力与风量供给保持匹配关系。关键设备利用率提升至 85% 以上,可有效降低运行成本并提高控制效果。系统联动通过统一调度平台实现信息共享,使各系统之间形成快速响应机制。设备布局与管网结构根据生产需求进行优化,减少能耗与运行阻力。资源优化策略强化系统之间的协同关系,使矿井运行更加高效稳定。

6.3 动态评估与反馈调节机制完善路径

动态评估机制通过对瓦斯治理效果与安全指标进行持续监测,对系统运行状态进行综合分析。关键指标包括瓦斯浓度、抽采率及通风效率,评估周期控制在 7d 至 30d 范围内,形成阶段性分析结果。反馈调节机制依据评估结果对技术参数与管理措施进行修正,使系统运行保持在安全区间。数据分析揭示风险变化趋势,为决策提供支持。调节过程通过标准流程与责任机制保障执行效果,使反馈信息能够及时转化为管理行动,推动协同机制不断完善。

7 结语

瓦斯治理与煤矿安全开采的协同运行,是保障矿井安全生产与提升资源利用效率的重要路径。通过构建多系统联动、全过程管控与动态调节的协同机制,能够有效降低瓦斯灾害风险,提升生产系统稳定性。面向复杂地质条件与高强度开采需求,持续强化技术融合与管理协同,有助于实现安全与效益的协调发展,为煤矿行业高质量运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张玉明.基于煤矿安全生产的通风瓦斯治理技术探究[J].湖北应急管理,2026,(06):18-20.
- [2] 孙成尔.高瓦斯煤矿瓦斯治理技术应用研究[J].凿岩机械气动工具,2025,51(09):213-215.
- [3] 曹杰.煤矿井下通风工程与瓦斯治理技术研究综述[J].内蒙古煤炭经济,2025,(15):49-51.
- [4] 王润武,张永强,许建国.煤矿“一通三防”安全管理评价系统研究与应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(15):106-108.