

煤层气治理创新技术应用及经济性分析

侯财旺 (乡宁县煤炭工业技工学校, 山西 临汾 041000)

侯煜洲 (山西华宁焦煤有限责任公司, 山西 临汾 041000)

摘要: 本研究以高瓦斯矿井治理体系为研究对象, 剖析现有治理模式效率低下、成本高昂的本质问题。传统方法依赖密集钻孔与通风稀释, 资源消耗大且治理效果存在瓶颈。创新技术引入精准抽采理念, 构建地质导向与动态预警相结合的新型防控体系。智能钻井装备实现瓦斯富集区定向钻进, 大幅提升单孔抽采效率。多源信息融合技术构建矿井瓦斯动态图谱, 实现风险超前辨识与干预。治理模式从事后治理转向源头防控, 工程总量显著降低。

关键词: 煤层气; 精准抽采; 动态预警; 全生命周期成本; 经济效益

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0061-03

Application and Economic Analysis of Innovative Technologies for Coalbed Methane Control

Hou Caiwang (Xiangning County Coal Industry Technical School, Linfen City Shanxi Province, 041000, China)

Hou Yuzhou (Shanxi Huaning Coking Coal Co., Ltd., Linfen City Shanxi Province 041000, China)

Abstract: This study focuses on the governance system of high-gas mines, analyzing the inherent issues of inefficiency and high costs in the existing governance models. Traditional methods rely on intensive drilling and ventilation dilution, which consume significant resources and face bottlenecks in effectiveness. Innovative technologies introduce the concept of precision extraction, establishing a new prevention and control system that combines geological guidance with dynamic early warning. Intelligent drilling equipment enables directional drilling in gas-rich zones, significantly improving single-hole extraction efficiency. Multi-source information fusion technology constructs a dynamic gas distribution map for mines, achieving advanced risk identification and intervention. The governance model shifts from post-event management to source prevention, resulting in a substantial reduction in engineering volume.

Keywords: Coalbed methane; Precision extraction; Dynamic early warning; Total lifecycle cost; Economic benefits

矿井煤层气治理是保障采矿安全生产的核心议题。传统治理方式面临地质条件复杂性与经济可行性的双重挑战。大量工程实践表明, 粗放式抽采难以匹配瓦斯逸散的非均匀特性, 导致资源投入与治理成效失衡。

现有技术体系对隐伏构造与瓦斯富集区响应迟缓, 缺乏风险超前干预机制。矿井瓦斯灾害链式演化规律要求治理关口前移, 从被动防御转向主动调控。创新技术应用需要打破地质探测与工程控制间的技术壁垒, 构建实时感知与精准执行的双向闭环。

1 煤层气治理现状问题

1.1 抽采工程与地质条件适配性不足

当前钻孔布置普遍采用均一化设计模式, 忽视煤层渗透率各向异性特征。刚性进尺指标导致低效钻孔占比过高, 大量工程资源消耗在瓦斯贫集区。钻孔轨迹控制精度有限, 难以精准贯穿构造软煤分层。钻孔群协同抽采效应未能充分发挥, 局部形成瓦斯迁移屏障。这种工程与地质脱节现象直接导致抽采浓度衰减过快, 治理周期被人为延长。

1.2 风险预警与防控措施存在时空滞后

现有监测系统多依赖点式传感器布设, 对采动应力场变化响应迟缓。瓦斯涌出动态预测模型更新频率低, 无法适应快速推进的工作面环境。报警阈值设置依赖历史统计数据, 缺乏对特殊地质环节的适应性调整。防治措施执行往往在异常显现后启动, 错过最佳干预窗口期。这种滞后性使治理体系始终处于被动应对状态, 安全保障系数难以实质性提升。

1.3 治理资源投入与效益产出失衡

传统方式依靠钻孔数量叠加提升抽采效果, 工程材料与能耗呈线性增长。密集钻孔群维护成本占据总投资较大比重, 设备利用率存在优化空间。瓦斯资源化利用渠道单一, 浓度波动影响发电机组运行稳定性。治理成本向煤炭生产环节传导, 削弱矿山整体市场竞争力。这种投入产出失衡现状制约治理技术持续升级, 形成低水平循环。

2 煤层气治理技术应用

2.1 地质透明化建模与靶区定位技术

采用三维地震与槽波联合勘探构建地质保障系

统,实现小断层精准识别。随钻测井技术实时反馈煤层厚度变化,动态调整钻孔轨迹设计。多源异构数据融合生成瓦斯富集区概率图谱,指导靶向钻孔布置,该技术将钻孔见煤率提升至新高度,有效进尺比例显著改善。地质模型迭代更新机制保障钻孔设计与地层条件持续契合,消除工程盲目性。引入机器学习算法对海量地质数据进行深度挖掘,建立构造复杂区瓦斯储运规律预测模型。智能识别系统自动标注优势渗流通道,为钻孔轨迹优化提供数据支撑。

在此基础上,数字孪生技术构建矿井地质动态镜像系统,实现钻进过程全要素可视化。高精度惯性导航系统植入钻头,厘米级定位误差确保钻孔轨迹严格遵循设计路径。岩屑地球化学分析实时判别煤层结构特性,补充地球物理探测盲区。智能决策树算法根据前方地层响应自动调整钻进参数,形成“随钻—建模—决策—验证”的闭环控制。这种技术体系将地质认知精度从巷道尺度推进至钻孔尺度,建模精度从米级提升至分米级。动态建模平台融合采掘扰动数据,预测瓦斯运移路径变化,实现靶区定位从静态向动态跨越。多学科交叉创新使地质透明化成为可能,彻底改变传统依靠经验推断的地质工作模式。该技术体系推动瓦斯治理从均布钻孔的“面覆盖”转向精准靶向的“点清除”,工程效率产生质的飞跃。

2.2 定向长钻孔替代丛式钻孔群技术

基于地质导向的定向钻进装备实现千米级钻孔精准贯穿。单个主孔配合多分支布置覆盖传统数十个钻孔区域,工程总量压缩明显。大直径钻孔形成高效流动通道,抽采负压损耗降低约四成。柔性钻具组合适应复杂地层变化,轨迹控制精度达到米级。这种集约化工程模式减少设备搬迁频次,钻孔综合利用率实现倍增。新型复合钻杆材料突破强度限制,使超长距离定向钻进成为可能。随钻测量系统实时传输地层参数,工程师可动态调整钻井液性能与推进速度。每个分支钻孔成为独立探测单元,反向丰富地质数据库。该技术体系重新定义钻井效率标准,将单孔有效控制范围扩展至传统丛式钻孔群的5倍以上,彻底改变井下工程布局形态。

2.3 采动区瓦斯动态抽采调控技术

在工作面推进方向布置前置抽采巷,构建应力释放区瓦斯捕获系统。液压支架附设集气装置自动连接抽采管网,形成移动式抽采单元。基于压力传感网络智能调节抽采参数,维持最佳气体流动状态。该技术将采空区瓦斯抽采浓度稳定在利用门槛之上,资源回收效率提升约两倍。抽采与开采工艺深度协同,实现生产全过程瓦斯管控。智能算法根据顶板垮落规律预

测瓦斯逸散路径,提前调整抽采负压分配。支架联动控制系统确保集气装置随采煤机推进自动对接,形成封闭式抽采空间。

该技术核心突破在于建立“应力场—裂隙场—瓦斯场”三场联动调控机制。在支架顶部布设柔性密闭罩,构建随采煤机推进而移动的负压抽采区。分布式光纤传感网络实时监测岩层离层发育状况,智能计算采空区瓦斯富集区动态位置。控制系统依据工作面推进速度自动调整抽采强度,在顶板周期性垮落前实施强化抽采。多通道智能调节阀组根据浓度监测数据自动分配气流量,确保高浓度瓦斯优先进入利用系统。

2.4 多场耦合智能预警平台建设

布置微震与电磁辐射联合监测网络,捕捉煤体应力异常前兆信息,人工智能算法分析瓦斯浓度时序数据,提前识别涌出突变趋势。构建采掘活动与瓦斯动态的响应模型,预警时间窗口延长至小时级。云边协同架构实现数据实时处理与指令下发,形成闭环控制回路。平台将离散监测点升级为系统防控体系,重大风险识别率突破95%。深度学习模型持续优化多参数关联规则,逐步掌握不同地质条件下瓦斯动态演化规律。数字孪生技术构建矿井虚拟映像,实现风险场景模拟与应急预案验证,该平台突破传统监测系统信息孤岛限制,形成采掘、地质、瓦斯多源信息融合分析能力,使灾害预警从单指标阈值判断升级为多场耦合综合研判。

2.5 低浓度瓦斯提效利用技术路径

研发抗波动性燃气发电机组,适应10-30%浓度区间稳定运行,热逆流氧化装置将极低浓度瓦斯转化为工业热源,能量回收链条延伸。膜分离技术浓缩瓦斯组分,提升资源利用价值梯度。智慧能源管理系统优化气电转化效率,上网电量增加约两成。这种梯级利用模式打破浓度限制壁垒,实现瓦斯资源全品位开发。新型催化氧化材料显著降低点火温度,使5%以下浓度瓦斯利用成为可能。

智能配气系统自动调配不同浓度瓦斯流向,实现能源阶梯利用最优化。余热回收装置将发电过程产生的热能转化为矿区供暖动力,形成能源循环利用。该技术体系构建覆盖全浓度范围的瓦斯资源化路径,彻底解决低浓度瓦斯排放困境。

3 创新技术经济性评估体系

3.1 全生命周期成本重构分析

创新技术改变传统成本结构,初期投入向智能装备与系统开发倾斜,地质勘探精度提升减少无效钻孔进尺,材料消耗降低约三成。自动化设备削减人工巡检频次,长期运维成本进入下降通道。智能预警系统降低事故应

急支出,风险成本得到量化控制。全周期核算显示五年内总成本可持平传统方案,后续效益持续释放。深度成本分析揭示装备智能化带来的折旧方式变化,软件系统价值随使用频次增加而提升。预防性维护体系延长设备服务年限,备件库存成本优化明显。这种成本重构使资金投入从重复消耗转向能力建设,形成持续改进的良性循环,全生命周期视角准确反映创新技术真实经济价值,避免短期投入压力的决策误区。

3.2 安全效益货币化评估方法

构建安全价值评估模型,将风险降低程度转化为经济效益,重大事故避免直接节约抢险支出与停产损失,间接维护企业市场声誉。预警系统提前干预减少局部隐患处理次数,日常安全投入更趋均衡。员工安全感提升带来工作效率增长,人力资源价值充分释放,安全效益虽难以精确计量,但构成技术选择的关键决策要素。引入保险精算原理量化事故概率下降带来的风险成本节约,建立安全投入与产出关联模型。企业品牌价值提升吸引高素质人才加入,降低招聘与培训成本。安全生产标准化评级改善获得政策支持优先权,形成隐性收益,这种货币化评估使安全效益从定性描述转为决策参数,助力管理层科学配置资源。

3.3 资源增值收益测算模型

定向抽采保障瓦斯浓度稳定在发电门槛之上,年利用量增长约五成,梯级利用技术挖掘低浓度瓦斯价值,废弃资源转化为补充收入。碳减排指标交易开辟新的收益渠道,绿色收益逐步显现。资源化利用降低通风能耗,能源成本结构得到优化。资源增值收益持续对冲治理投入,项目经济可行性显著增强。精细化测算显示,瓦斯提纯后价值提升3倍以上,部分替代液化天然气市场。碳交易市场成熟使减排量成为可交易资产,年收益可达治理投入的两成。资源综合利用模式减少外部能源采购,增强企业用能自主性。这种增值收益模型突破传统成本思维,将瓦斯治理转化为价值创造环节。

3.4 技术推广边际效益研究

首套应用承担较多研发成本沉淀,后续复制仅需核心模块适配。地质建模数据可重复调用,同类矿井勘探成本递减,智能算法模型批量部署边际成本趋近于零,规模效应明显。专业团队经验积累降低实施难度,培训周期缩短约四成。这种边际效益特征使技术推广呈现加速态势,行业整体转型成本可控。技术标准化进程促进设备通用性提升,采购成本进入下行通道。解决方案模块化设计支持按需配置,减少过度投入风险。行业知识库共享避免重复试错,最佳实践快速推广。集群效应催生专业化服务市场,进一步降低

单个矿井技术升级门槛。边际效益研究为行业协同创新提供理论依据,推动产业整体升级。

4 案例分析

某深部开采矿井应用创新技术体系重构煤层气治理模式。该矿井煤层赋存条件复杂,传统抽采效率长期在低位徘徊,技术团队首先部署高精度三维勘探系统,清晰刻画断层褶皱分布规律。根据地质模型划定四个瓦斯富集靶区,优化钻孔布置方案。采用定向钻进装备施工主干钻孔,分支轨迹精准覆盖构造发育区。抽采管网安装智能调控装置,根据浓度变化自动匹配负压等级。

采煤工作面推广液压支架联动抽采系统,采空区瓦斯捕获率提升显著,微震监测网络与瓦斯传感器形成双预警机制,成功预测三次涌出异常。建设低浓度瓦斯发电站,配套热逆流氧化装置处理极低浓度气体。实施首年钻孔工程总量减少四成,抽采浓度稳定在25%以上。发电机组运行时间延长约三成,资源化收益覆盖半数治理成本。

预警平台提前2h识别构造带瓦斯逸散风险,及时调整采掘进度避免隐患。全矿井瓦斯超限次数同比下降八成,安全投入更趋合理。该案例证明创新技术可实现安全效益与经济效益统一,为类似条件矿井提供实践范本。

5 结束语

煤层气治理创新技术推动矿山安全模式本质变革。地质透明化与精准工程控制突破传统治理瓶颈,智能预警实现风险防控关口前移。技术经济性体现在全生命周期成本优化与资源价值释放,形成良性发展循环,为能源安全战略提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 王鹏军. 突出煤层采煤工作面瓦斯治理技术研究 [J]. 能源与节能, 2025(11):171-173.
- [2] 吴龙泉, 贾秉义, 程斌, 等. 中低位厚硬砂岩水力压裂瓦斯-矿压协同治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2025-11:1-13.
- [3] 郭亚飞. 煤矿井下综采工作面瓦斯综合治理技术及其效果探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(18):40-42.
- [4] 李定启. 煤与瓦斯突出矿井瓦斯治理现状评价方法及应用 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.
- [5] 田建杰. 矿井通风瓦斯利用技术的潜力及经济性分析 [J]. 中国化工贸易, 2020(24):109,111.

作者简介:

侯财旺(1971-), 男, 汉族, 山西临汾人, 本科, 中级工程师, 主要从事的工作: 职业教育。