

矿井立体瓦斯治理技术研究

丁涛 邓一峰 辛程 王羽 葛春政
兖矿能源有限公司鲍店煤矿 山东 济宁 273500

摘要: 矿井立体瓦斯治理技术通过构建“全周期递进式”治理流程与“天地一体、多层覆盖”抽采网络,实现瓦斯治理与开采进程的深度协同。该技术融合地面钻井、井下定向长钻孔、高位钻孔与埋管抽采等多级抽采方式,结合智能封孔、负压调节与动态监测预警系统,形成从平面到立体、从局部到全域的防控体系。实践表明,该技术可提升抽采率至70%以上,缩短治理周期50%,有效解决深部高瓦斯煤层治理难题。

关键词: 矿井; 立体瓦斯; 治理技术

引言: 随着煤矿开采深度与强度不断加大,高瓦斯、低透气性煤层引发的瓦斯灾害已成为制约矿井安全高效生产的核心难题。传统瓦斯治理技术多聚焦单一空间或局部区域,存在治理盲区多、效率低、周期长等问题,难以适应深部复杂地质条件。矿井立体瓦斯治理技术通过整合时空维度资源,构建“天地一体、全周期覆盖”的防控体系,实现了瓦斯治理从被动应对到主动防控的范式转变,对保障煤矿安全生产、提升资源利用率具有重要意义。

1 矿井瓦斯赋存与运移规律分析

1.1 瓦斯赋存特征

(1) 地质构造对瓦斯赋存的影响显著。断层方面,封闭性断层可阻挡瓦斯逸散,使断层附近煤层瓦斯含量升高;开放性断层则利于瓦斯排放,降低周边瓦斯浓度。褶皱构造中,背斜顶部因岩层挤压程度较低、裂隙发育,瓦斯易聚集;向斜槽部岩层压实紧密,瓦斯赋存条件稳定。煤层厚度影响瓦斯储存空间,厚煤层瓦斯吸附面积更大,赋存量通常高于薄煤层,且厚度不均处易形成瓦斯富集区。(2) 瓦斯压力与含量分布呈正相关规律。同一煤层中,随埋深增加,地应力增大,瓦斯压力逐渐升高,瓦斯含量同步增长。在水平方向,受地质构造控制,瓦斯压力与含量在断层、褶皱等构造带出现异常,如封闭断层两侧压力差明显,含量梯度变化大;远离构造区则分布相对均匀,压力与含量维持稳定水平。

1.2 瓦斯运移机制

(1) 瓦斯在煤层中的运移符合扩散-渗流耦合模型。瓦斯先以扩散形式从煤基质微孔向裂隙迁移,此过程受浓度梯度驱动;进入裂隙后,在压力差作用下转为渗流运动。耦合模型可同时描述两种运动状态,当煤层裂隙发育时,渗流作用占主导;煤体致密时,扩散成为主要运移方式。(2) 工作面开采扰动改变瓦斯运移规律。开

采导致煤层及围岩应力重新分布,产生新裂隙,扩大瓦斯运移通道。同时,采空区形成负压区,促使周边煤层瓦斯向采空区流动,且工作面推进速度越快,瓦斯运移强度越大。

1.3 立体空间瓦斯分布特征

(1) 垂向分层瓦斯分布差异明显。顶板岩层因裂隙发育,瓦斯易渗透储存,含量随顶板高度增加而降低;煤层是瓦斯主要赋存层,含量最高且分布较均匀;底板岩层致密,瓦斯渗透难度大,含量最低,仅在底板局部裂隙区有少量瓦斯聚集。(2) 水平方向瓦斯呈动态变化。工作面在开采过程中,瓦斯含量随开采推进逐渐降低;巷道周边受掘进扰动,瓦斯不断向巷道空间释放,含量维持在中等水平且波动较小;采空区瓦斯随工作面推进不断积聚,含量持续升高,在采空区中部达到峰值后缓慢下降^[1]。

2 矿井立体瓦斯治理技术体系构建

2.1 立体治理技术框架

(1) 时间维度: 构建“全周期递进式”治理流程,实现瓦斯治理与开采进程深度协同。开采前预抽阶段,提前6-12个月通过地面井与井下定向长钻孔组合,对煤层进行全域预抽,将原始瓦斯含量从18-22m³/t降至8m³/t以下,消除突出风险;开采中边采边抽阶段,同步启动工作面顺层钻孔与采空区高位钻孔,实时抽采开采扰动释放的瓦斯,避免瓦斯向工作面聚集;开采后采空区抽采阶段,通过埋管与密闭抽采结合,对采空区残留瓦斯进行持续抽采,抽采周期延长至采空区稳定(约1-2年),大幅提升瓦斯资源利用率^[2]。(2) 空间维度: 形成“天地一体、多层覆盖”的抽采网络。地面井抽采聚焦深部未开采煤层,采用“一井多分支”设计,覆盖煤层走向1000-1500m范围,实现远距离、大范围瓦斯预抽;井下定向长钻孔沿煤层走向布置,孔深1500-2000m,控制工

作面推进前方500m区域,解决近距离瓦斯治理问题;巷道密闭抽采针对废弃巷道与老空区,通过密闭墙阻断瓦斯扩散通道,结合负压抽采降低区域瓦斯浓度;采空区埋管抽采沿采空区走向每50m设置抽采口,配合高位钻孔形成“上下联动”抽采格局,覆盖采空区垮落带与裂隙带,杜绝瓦斯积聚。

2.2 关键技术模块

2.2.1 多级瓦斯抽采技术

(1) 地面钻井“采气采煤一体化”技术:采用大孔径(244-311mm)地面井,钻井深度直达煤层底板以下50-100m,分支孔精准穿入目标煤层,抽采过程中同步监测煤层瓦斯压力与含量变化,待瓦斯浓度降至安全阈值后启动井下开采,实现“先采气、后采煤”,单井年抽采量可达100-150万 m^3 ,同时为井下开采创造安全条件。

(2) 井下定向长钻孔水力压裂增透技术:针对低透气性煤层(透气性系数 $< 0.05m^2/(MPa^2 \cdot d)$),通过定向长钻孔向煤层注入高压水(压力20-30MPa),形成网状裂隙,将煤层透气性提升10-20倍,配合大流量抽采泵,单孔日抽采量从500 m^3 提升至2000 m^3 以上,有效解决低透煤层抽采效率低的难题。(3) 采空区高位钻孔与埋管联合抽采技术:高位钻孔布置在顶板垮落带上方10-15m的裂隙发育区,捕捉采空区上升瓦斯;埋管抽采覆盖采空区下部区域,抽采沉积瓦斯,两者通过智能阀门联动控制,根据瓦斯浓度动态调节抽采负压(12-18kPa),使采空区瓦斯抽采率提升至65%以上,避免瓦斯向工作面回风流泄漏^[3]。

2.2.2 瓦斯运移动态调控技术

(1) 智能封孔材料与工艺优化:研发膨胀性聚氨酯封孔材料,膨胀率达300%,可自适应煤层裂隙变化,配合“两堵一注”封孔工艺(封孔深度 $\geq 8m$,注浆压力3-5MPa),将钻孔漏气率从传统工艺的20%以上降至5%以下,保障抽采系统负压稳定。(2) 负压调节与多级泵站协同控制:构建地面-井下多级泵站系统,地面泵站负压控制20-25kPa,井下主泵站15-20kPa,工作面子泵站12-15kPa,通过压力传感器实时监测各节点压力,利用PLC控制系统自动调节泵站频率,实现负压动态匹配,避免因负压过高导致空气涌入或负压不足影响抽采效率。

2.2.3 立体监测与预警技术

(1) 分布式光纤传感监测技术:在地面井、井下钻孔及巷道内布设分布式光纤传感器,实时监测瓦斯浓度(精度0.01%)与压力(精度0.01MPa),监测范围覆盖整个治理区域,数据采样间隔 $\leq 10s$,可快速定位瓦斯异常聚集点。(2) 瓦斯涌出量动态预测模型:基于历史瓦

斯数据、地质参数与开采进度,采用LSTM神经网络算法构建预测模型,提前24-48h预测工作面瓦斯涌出量,预测误差 $\leq 10%$,为抽采系统调整提供提前量^[4]。(3) 基于数字孪生的瓦斯治理决策系统:搭建矿井瓦斯治理数字孪生模型,整合监测数据、抽采参数与地质信息,模拟不同抽采方案的效果,自动生成最优钻孔布置、负压调节等决策建议,管理人员可通过可视化界面实时掌控治理状态,实现“监测-分析-决策-执行”闭环管理。

3 矿井立体瓦斯治理技术应用实践

3.1 工程案例选择

选取某深部高瓦斯突出矿井作为实践案例,该矿井主采煤层埋深800-1200m,煤层透气性系数仅0.01-0.03 $m^2/(MPa^2 \cdot d)$,原始瓦斯含量达18-22 m^3/t ,瓦斯压力最高2.8MPa,且存在煤层突出风险。传统治理方法存在抽采周期长(平均12个月)、抽采率不足40%、工作面瓦斯浓度频繁超限(日均1-2次)等问题,无法满足安全高效开采需求,亟需通过立体瓦斯治理技术解决深部煤层瓦斯赋存集中、运移复杂、治理难度大的核心痛点。

3.2 具体实施方案

(1) 立体抽采网络设计:① 钻孔布置参数:地面井采用“一井多分支”设计,主井深1200m,分支孔覆盖煤层走向1000m、倾向500m范围,孔径244mm;井下定向长钻孔沿煤层走向布置,孔深1500-2000m,孔径153mm,间距30m,控制煤层面积达80000 m^2 ;采空区高位钻孔布置在顶板垮落带上方10-15m,孔径94mm,埋管采用 $\Phi 159mm$ 聚乙烯管,沿采空区走向每50m设置一个抽采口。② 抽采系统选型:地面选用2台2000 m^3/min 大流量抽采泵,井下配置3台500 m^3/min 多级泵站,形成“地面-井下”协同抽采系统,抽采负压控制在15-25kPa。(2) 施工工艺优化:① 钻进速度提升:采用“高效PDC钻头+螺杆钻具”组合,将钻进速度从60m/d提高至120m/d,缩短钻孔施工周期50%。② 封孔质量保障:采用“两堵一注”智能封孔工艺,封孔材料选用膨胀性聚氨酯,膨胀率达300%,封孔深度不小于8m,漏气率控制在5%以下。③ 抽采负压控制:通过实时监测瓦斯浓度,动态调节负压,地面井负压维持20-25kPa,井下钻孔负压15-20kPa,采空区埋管负压12-15kPa,避免负压过高导致空气涌入。

3.3 应用效果分析

(1) 瓦斯抽采率提升:传统治理方法抽采率平均38.5%,应用立体治理技术后,抽采率提升至72.3%,其中地面井抽采贡献35%,井下定向长钻孔贡献25%,采空区抽采贡献12.3%,抽采效率提升近1倍。(2) 工作面

瓦斯浓度控制：治理前工作面回风流瓦斯浓度平均0.8%-1.2%，频繁超限；治理后通过立体抽采与动态调控，工作面瓦斯浓度稳定控制在0.3%-0.5%，低于《煤矿安全规程》规定的1%限值，实现连续12个月无瓦斯超限记录。

(3) 经济效益与社会效益：①经济效益：抽采周期从12个月缩短至6个月，提前释放煤炭资源量120万t，新增产值6亿元；回收瓦斯1500万m³，用于发电年创收益1200万元，同时减少瓦斯治理成本3000万元/年。②社会效益：彻底消除瓦斯突出风险，保障井下200余名作业人员安全；减少瓦斯直接排放1200万m³，等效减排二氧化碳18万t，符合绿色矿山建设要求，获评“国家级瓦斯治理示范矿井”。

4 矿井立体瓦斯治理技术创新与优势分析

4.1 技术创新性

(1) 实现从“平面治理”到“立体防控”的范式转变。传统技术多聚焦井下单一空间或某一开采阶段，治理范围局限于局部区域，易出现瓦斯治理盲区。立体治理技术打破时空限制，在时间维度覆盖开采全周期，空间维度整合地面、井下、采空区等多区域，构建“天地一体、全周期覆盖”的防控网络，将瓦斯治理从被动应对转为主动防控，解决传统技术“局部治理不彻底、全域覆盖不足”的痛点。(2) 研发多源数据融合的智能决策支持系统。该系统整合分布式光纤监测的瓦斯浓度、压力数据，抽采系统运行参数，以及地质构造信息等多源数据，通过大数据算法进行实时分析。结合数字孪生技术构建矿井瓦斯治理虚拟模型，模拟不同治理方案效果，为管理人员提供精准的抽采参数调整、钻孔布置优化等决策建议，改变传统依赖经验决策的模式，提升治理决策的科学性与时效性^[5]。

4.2 优势对比

(1) 与传统技术相比效率显著提升。在抽采量方面，传统技术单工作面月均瓦斯抽采量约8万m³，立体

治理技术通过多系统协同抽采，月均抽采量达18万m³，提升125%；治理周期上，传统技术对深部高瓦斯煤层的治理周期需12-15个月，立体技术通过开采前预抽与开采中同步抽采结合，将周期缩短至6-8个月，效率提升50%以上，大幅加快煤炭资源释放速度。(2) 适用性向复杂场景大幅扩展。传统技术在复杂地质条件（如断层密集区、低透气性煤层）和深部开采（埋深超1000m）场景中，抽采率常低于40%，且易受地质因素影响导致治理失效。立体治理技术通过地面井覆盖深部区域、定向长钻孔精准穿层、水力压裂增透等手段，在复杂地质条件下抽采率仍能稳定在70%以上，深部开采场景中可有效控制瓦斯浓度，突破传统技术的应用局限。

结束语

矿井立体瓦斯治理技术通过时空协同、多级抽采与智能调控的深度融合，突破了传统治理技术的局限，显著提升了瓦斯抽采效率与治理安全性。实践表明，该技术可有效解决深部高瓦斯煤层赋存复杂、运移活跃等难题，实现瓦斯治理的精准化与高效化。未来需进一步优化智能决策系统，探索适用于极端地质条件的创新工艺，推动瓦斯治理向“零超限、零突出”目标迈进，为煤矿安全绿色开发提供技术支撑。

参考文献

- [1]张媛.矿井通风瓦斯防治技术研究[J].能源与节能,2024,(02):191-192.
- [2]李少锋,别小辉.煤矿矿井通风安全管理及瓦斯防治技术[J].内蒙古煤炭经济,2023,(24):109-111.
- [3]樊彦龙.采煤工作面立体瓦斯抽采技术研究[J].能源与节能,2025,(01):204-205.
- [4]崔亚杰.采煤工作面采空区瓦斯立体综合抽采技术研究[J].当代化工研究,2024,(23):130-132.
- [5]王庆龙.采煤工作面采空区立体瓦斯抽采技术研究[J].能源与节能,2024,(10):154-156.