

提高低透气性煤层瓦斯抽采效率技术措施实践

周晓磊

郑州煤电股份有限公司芦沟煤矿 河南 郑州 452370

摘要: 针对低透气性煤层渗透率低、瓦斯吸附性强、抽采衰减快、治理难度大的技术难题,本文剖析煤层赋存特征与抽采低效机理,梳理地质、工艺、设备三大核心影响因素。集成水力压裂、CO₂相变致裂组合增透技术,优化钻孔布孔、封孔及分阶段负压调控工艺,配套智能化监测手段开展现场实践。工程应用表明,该技术体系可大幅提升瓦斯抽采浓度与纯量,缩短抽采周期,有效降低瓦斯含量与压力,兼具显著的安全与经济效益,适配性与推广价值突出。

关键词: 低透气性煤层; 瓦斯抽采; 增透技术; 工程实践应用

引言: 低透气性煤层广泛存在于各大矿区,其孔裂隙连通性差、瓦斯解吸滞后、地应力抑制渗透的特点,导致瓦斯抽采效率极低,抽采周期长且治理效果差,严重制约煤矿安全生产与高效开采。传统的单一抽采工艺难以适配复杂低透气煤层赋存条件,存在系统漏气严重、抽采衰减快、工程量大等诸多弊端。为破解低透气煤层瓦斯治理瓶颈,本文结合矿井工程实际,探究高效抽采技术体系,通过技术集成与工艺优化,实现瓦斯抽采提质增效,为同类矿井瓦斯治理提供技术参考。

1 低透气性煤层瓦斯抽采低效机理及影响因素分析

1.1 低透气性煤层基本赋存特征

(1) 煤层孔隙裂隙发育规律与连通性特征。低透气性煤层通常经历强烈构造作用,原生孔裂隙系统遭受挤压破坏,孔隙率普遍低于5%,裂隙开度小且连通性差,多以孤立孔和闭合裂隙为主,瓦斯渗流通道严重受限。(2) 煤体吸附解吸特性与瓦斯运移规律。该类型煤层对瓦斯具有较强的吸附亲和力,吸附态瓦斯占比高达80%~95%,且解吸滞后效应显著,解吸速率远低于游离瓦斯迁移速率,导致瓦斯释放呈现“初期缓释、后期衰减”的非稳态特征。(3) 地应力对煤层渗透率的抑制作用。高地应力环境下,有效应力增大使煤体骨架压缩变形,裂隙开度进一步收窄甚至闭合,渗透率随应力增加呈指数衰减,实测渗透率常低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,难以满足经济抽采要求^[1]。

1.2 瓦斯抽采效率偏低核心机理

(1) 原生渗流通道狭窄导致瓦斯迁移速率慢。低透气性煤层有效渗流孔径多在纳米至微米级,瓦斯渗流需克服极大流动阻力,达西渗透率极低,抽采影响范围通

常不超过钻孔周边3~5m,严重制约单孔抽采量。(2) 高吸附性导致瓦斯解吸滞后、抽采衰减快。抽采初期游离瓦斯快速排出后,吸附瓦斯因解吸速率慢而无法及时补给,导致抽采浓度和流量在抽采7~15天后即出现急剧衰减,后期抽采浓度往往降至30%以下,有效抽采周期大幅缩短。(3) 钻孔施工扰动导致裂隙闭合、渗透率降低。钻孔卸压引发应力重分布,钻孔周围形成塑性区,煤体发生蠕变变形,原生裂隙被压缩闭合,加之钻屑堵塞孔周裂隙,造成钻孔服役期内渗透率持续劣化,抽采效果每况愈下。

1.3 影响抽采效率的主要因素

(1) 地质因素: 煤层厚度、瓦斯压力、地应力协同决定抽采基础条件。厚煤层储量足但解吸路径长,薄煤层储集空间有限;高瓦斯压力提供驱动势能,但高地应力对渗透率的抑制常占主导。(2) 工艺因素: 钻孔参数、封孔质量、抽采负压设置。钻孔间距、孔径及布孔方位影响卸压增透范围与抽采重叠效应;封孔不严致空气混入稀释浓度;负压过低驱动力不足,易致孔周煤体失稳,需优化匹配。(3) 设备因素: 抽采泵负压波动、管路接头漏气及积水积渣堵塞,直接削弱孔底有效负压,造成系统效率下降,是制约长周期连续抽采的关键设备层面因素。

2 低透气性煤层瓦斯高效抽采关键技术措施

2.1 煤层增透改性技术

(1) 水力割缝与高压水力压裂。水力割缝利用高压水射流切割煤体形成径向缝槽(深2~5m),卸除应力集中并沟通原生裂隙。高压水力压裂通过注液起裂扩展人工裂隙。先割缝后压裂可降低起裂压力、扩大增

透范围,渗透率提高 2~4 个数量级,单孔抽采纯量提升 3~8 倍。(2)深孔预裂爆破与 CO₂ 相变致裂。深孔预裂爆破利用爆生气体冲击煤体,形成的裂隙区半径约为钻孔直径的 10~20 倍,实现大范围卸压增透。CO₂ 相变致裂利用液态 CO₂ 快速相变释放 50~100MPa 高压气体,致裂半径 5~15m,无明火、无有毒气体,安全性优于炸药^[2]。(3)机械扩孔裂隙拓展。扩孔器将钻孔直径由 $\phi 75\sim 113\text{mm}$ 扩至 $\phi 300\sim 500\text{mm}$,剪切挤压产生次生裂隙,增大卸压范围和暴露面积。关键参数:扩孔比 1.5~3.0、进尺速度 0.5~1.0m/min、扩孔间距 5~8m,合理匹配可使单孔抽采量提升 50%~150%。

2.2 瓦斯抽采工艺优化技术

(1)定向长钻孔精准布孔技术与间距优化设计。采用随钻测量技术实时调控钻孔轨迹,单孔深度可达 800~1500m。布孔间距综合考虑渗透率、抽采半径和时间耦合关系,最优间距取 5~15m,有效覆盖面积较常规布孔提升 2~4 倍。(2)高效密封封孔工艺,解决钻孔漏气问题。采用“两堵一注”带压注浆工艺,封孔深度不少于 15~20m,注浆材料选用膨胀水泥砂浆或聚氨酯,凝固体积膨胀充填孔周裂隙,气密性达 1.0MPa 以上,孔口抽采浓度较常规封孔提高 10~25 个百分点^[3]。(3)分阶段负压调控、间歇式抽采工艺优化。初期采用 10~15kPa 低负压防止孔周失稳,中期提高至 15~25kPa 增强驱动力,后期切换间歇式抽采(抽采 3~5 天、停抽 1~2 天),利用停抽期间压力恢复促进解吸补给,有效抽采周期延长 20%~40%。

2.3 辅助强化抽采技术

(1)注气驱替强化瓦斯解吸与运移技术。向煤层注入 CO₂ 或 N₂,利用竞争吸附置换 CH₄ (CO₂ 吸附能力为 CH₄ 的 2~10 倍),同时增加孔隙压力驱动解吸瓦斯向钻孔运移,注气压力 2~6MPa,注采比 0.3~0.5 时效果最优。(2)保护层卸压协同抽采技术应用。开采邻近薄煤层作为保护层,被保护层受采动大幅卸压,渗透率提高 2~3 个数量级,配合穿层钻孔拦截抽采,卸压抽采率可达 70% 以上,是区域瓦斯治理最有效手段之一。(3)智能化监测调控辅助抽采技术。在管网关键节点部署浓度、流量、负压等传感器,数据实时传输至智能平台,系统自动识别异常并预警,自适应调节单孔负压和启停间歇抽采,实现远程精准管控,可显著提升系统运行可靠性^[4]。

3 工程实践应用与效果分析

3.1 试验矿井工程概况

(1)试验工作面地质与瓦斯赋存条件。试验矿井位于某矿区三采区,主采二₁煤层,平均厚度 5.8m,倾角 8°~15°,埋深 420~580m。煤层实测孔隙率 4.2%~5.1%,渗透率 $0.05\times 10^{-3}\sim 0.12\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属典型低透气性煤层。煤层原始瓦斯压力 1.85~2.45MPa,瓦斯含量 14.6~18.3m³/t,具有强吸附特性,吸附常数 a 值为 32.5~38.7m³/t,瓦斯灾害风险等级高。(2)原有瓦斯抽采工艺及存在的问题。本煤层采用顺层钻孔抽采工艺,钻孔直径 $\phi 94\text{mm}$,布孔间距 8m,采用水泥浆封孔。实际运行中暴露出三大问题:一是抽采浓度衰减迅速,初始浓度 65%~80%,抽采 15 天后降至 25%~35%;二是单孔抽采纯量仅 0.02~0.05m³/min,有效抽采半径不足 3m,单孔达标抽采周期长达 180~240 天;三是封孔气密性差,孔口负压损失达 30%~40%,严重制约整体抽采效率。(3)现场试验设备与监测系统布置。配套装备包括 BZW-200 型高压注水泵(额定压力 45MPa、流量 80L/min)、ZDY-6000S 型定向钻机、MZ-120 型机械扩孔器、CO₂ 致裂成套设备及 KJ-10 型在线监测系统。在工作面运输巷及回风巷各布置 5 个监测分站,实现单孔瓦斯浓度、流量、负压、温度等参数实时采集,数据采集频率每 10 秒一次,形成覆盖试验区全过程的动态监测网络。

3.2 关键技术现场实施方案

(1)增透技术参数现场适配与施工流程。确定“水力压裂+CO₂ 致裂”组合增透工艺路线。水力压裂单孔注水量 120~180m³,注液压力逐步提升至 28~35MPa,稳压时间不少于 60min;压裂完成后间隔 72h 实施 CO₂ 致裂,每孔装液量 3~5t,致裂影响半径预期达 8~12m。施工流程依次为:地质雷达探测裂隙发育方向→设计钻孔轨迹→施工 $\phi 113\text{mm}$ 导向孔→水力压裂→CO₂ 相变致裂→机械扩孔至 $\phi 300\text{mm}$ →下筛管护孔^[5]。(2)优化抽采工艺现场落地措施。钻孔间距由原 8m 扩大优化至 12m,采用“两堵一注”带压封孔工艺,封孔深度 22m,封孔压力 1.5MPa,膨胀水泥砂浆按水灰比 0.5:1 配制。抽采负压实施三阶段调控:第 1~10 天控制为 10kPa,第 11~40 天调至 18kPa,40 天后切换间歇抽采模式(抽采 4 天、停抽 2 天循环),各阶段转换以在线监测数据为决策依据。(3)施工质量管控与安全保障措施。建立“一孔一档”全程质量追溯制度,每孔施工配备视频监控记录。安全管控方面严格执行“四位一体”防突措施,水力压裂期间设置 300m 安全警戒范围,CO₂ 致裂作业配置专用防静电起爆器及泄漏报警装置,注浆作业全程携带便携式瓦斯检测仪,确保各工序安全可控。

3.3 抽采效果监测与对比分析

(1) 瓦斯抽采浓度、纯流量变化对比。优化后单孔初始抽采浓度达 72%~88%，抽采 60 天后仍维持在 45%~55%，较原工艺同期的 25%~35% 提升约 20 个百分点。单孔抽采纯量由原 0.02~0.05m³/min 提升至 0.18~0.35m³/min，增幅达 3~6 倍，且浓度衰减速率由原平均每日下降 3~5 个百分点减缓至每日下降 0.5~1.0 个百分点。(2) 有效抽采半径、抽采达标时长对比。经现场示踪气体测试验证，优化后有效抽采半径由原不足 3m 扩展至 8~11m，达标抽采时长由原 180~240 天缩短至 75~100 天，抽采达标周期缩短 60% 以上，单孔控制煤量由原不足 1500t 增至 8000~12000t，钻孔工程总量节省约 65%。(3) 煤层残余瓦斯含量、压力下降效果分析。抽采达标后，试验区煤层残余瓦斯含量由原 14.6~18.3m³/t 降至 5.2~6.8m³/t，降幅达 63%~68%；残余瓦斯压力由原 1.85~2.45MPa 降至 0.25~0.45MPa，降幅达 82%~86%，均低于《防治煤与瓦斯突出细则》规定的临界值，消突效果显著。

3.4 技术应用效益分析

(1) 安全效益：瓦斯灾害防控能力提升效果。通过组合增透与工艺优化，试验区预抽达标后未发生瓦斯超限事件，工作面回采期间回风流瓦斯浓度稳定在 0.15%~0.35%，较原工艺回采期间的 0.5%~0.8% 显著降低，瓦斯突出危险性基本消除，为安全回采提供了可靠保障。(2) 经济效益：抽采周期缩短、生产成本降低成效。抽采达标周期缩短 105~140 天，减少抽采设备运行及人工维护成本约 220 万元；钻孔工程量减少 65%，节约钻探及材料费用约 380 万元；工作面提前投产带来的间接经济效益约 1600 万元，综合经济效益显

著。(3) 技术推广应用价值与适用条件。该技术体系适用于埋深 500m 以内、瓦斯压力 2.0~4.0MPa、渗透率 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低透气性煤层，对于构造复杂区或松软低透煤层需进一步优化压裂参数并配套护孔筛管工艺。技术成果已在本矿区相邻工作面及周边类似矿井逐步推广应用，具有较好的区域适配性和推广前景。

结束语

本文构建的组合增透、工艺优化、智能辅助的一体化瓦斯抽采技术体系，有效解决了低透气性煤层抽采低效难题，经现场实践验证，可大幅提升瓦斯抽采效果，缩短治理周期，消除瓦斯突出风险，同时降低开采成本、提升矿井产能。该技术体系明确了适用煤层条件，技术成熟、安全可靠，可广泛应用于同类低透煤层矿井。后续可针对构造复杂松软煤层优化参数，进一步拓展技术应用场景，完善区域瓦斯治理技术体系。

参考文献

- [1] 林柏泉, 施宇, 刘厅, 等. 热烟气强化增透煤储层及驱替瓦斯效果分析 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(11): 4877-4896.
- [2] 周玉军, 李振华, 李嘉诚. 低透气性坚硬煤层联合卸压增透关键技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 81-90.
- [3] 刘勇, 张汶定, 陈长江, 等. 松软煤层无水化增透理论及技术发展趋势 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(04): 2123-2146.
- [4] 刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(02): 217-231.
- [5] 李毛, 范新川, 符辉. 低渗煤层胶囊二氧化碳相变致裂增透技术及应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(05): 46-53.