

煤矿水力压裂岩层控制技术及应用

曹 盟 薛高强

陕西省煤层气开发利用有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要：本文围绕煤矿水力压裂岩层控制技术展开研究，阐述其核心原理、岩层力学特性及裂缝扩展规律，构建井下、地面及井上下协同三类压裂技术体系，明确施工装备、流程及质量控制要点。结合彬长矿区孟村煤矿工程实例，验证该技术在深部强冲击倾向性煤层中的应用效果，结果表明其能有效卸压围岩、降低冲击地压风险、提升开采安全性与经济性，为同类煤矿岩层控制提供理论支撑与实践借鉴。

关键词：煤矿；水力压裂岩层；控制技术；应用

引言：随着煤矿开采深度不断增加，深部煤层面临高应力、强扰动等复杂地质条件，冲击地压、巷道围岩大变形等问题日益突出，传统岩层控制技术已难以满足安全生产需求。水力压裂作为一种高效的岩层改造与卸压技术，在煤矿岩层控制中应用广泛。本文系统梳理该技术的基础理论与技术体系，结合工程实例分析其应用效果，旨在完善技术应用路径，为煤矿安全高效开采提供可靠的岩层控制解决方案。

1 煤矿水力压裂岩层控制技术基础理论

1.1 水力压裂核心原理

(1) 力学机理：通过高压流体向岩层注入，克服岩体抗拉强度与地应力，产生人工裂缝，实现“岩层结构改造—岩层能量释放—围岩应力调控”的核心目标，弱化岩层强度并实现围岩卸压，有效缓解煤矿井下岩层应力集中问题，为安全生产提供力学保障。(2) 流体传输机理：明确压裂液在裂缝内的流动、渗透规律，厘清裂缝扩展与压裂液黏度、排量等参数的关联关系，掌握压

裂液在不同岩层中的滤失特性，为压裂施工参数的科学设计提供坚实理论依据，确保压裂效果达标。

1.2 煤矿岩层基本力学特性

(1) 岩层物理力学参数：结合室内试验与现场实测数据，明确煤层、顶板岩层的抗压强度、抗拉强度、弹性模量等核心参数，例如深部煤层抗拉强度通常为1.2-3.5MPa，弹性模量为15-35GPa，这些基础参数是压裂压力、排量等关键参数设计的核心依据。(2) 岩层应力分布特征：系统分析煤矿井下地应力（垂直应力、水平应力）的分布规律，明确应力集中区域的分布特点，探究压裂施工对围岩应力场的调控作用，为精准选择压裂区域、优化压裂方案提供支撑^[1]。

1.3 水力压裂裂缝扩展规律

(1) 裂缝扩展形态与特征：通过数值模拟与实验室试验，明确裂缝呈现单向扩展、双向扩展及网络状扩展三种形态，阐述不同形态的形成条件与适用场景，结合图表展示。

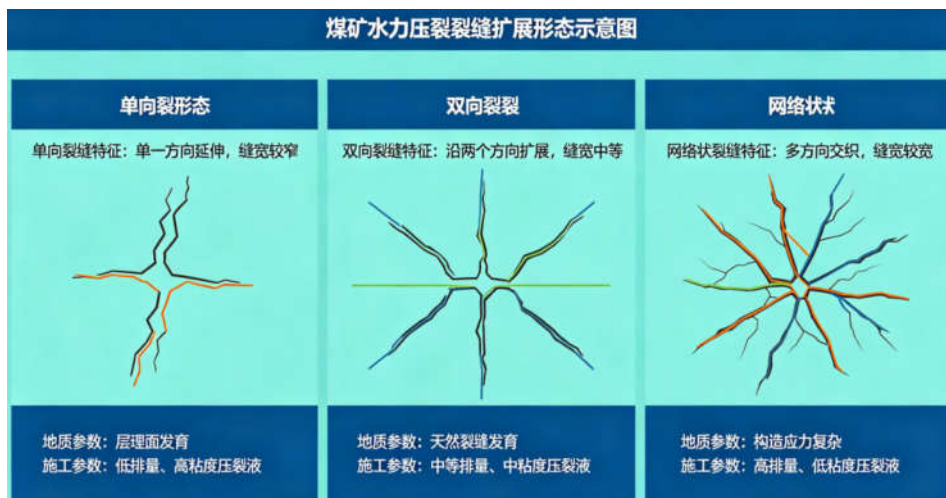


图1 煤矿水力压裂裂缝扩展形态示意图

(2) 裂缝扩展影响规律: 分析各关键因素对裂缝长度、宽度、延伸深度的影响, 例如施工压力每提升10MPa, 裂缝延伸深度平均增加1.2-1.8m, 量化各因素影响程度, 为压裂施工参数优化提供精准依据。

2 煤矿水力压裂岩层控制技术体系与施工工艺

2.1 水力压裂技术分类及特点

(1) 井下压裂技术: 包括局部压裂与区域压裂, 适配不同井下岩层控制场景。局部压裂采用短钻孔, 针对性弱化工作面顶板, 操作便捷、成本低, 适用于初次放顶和巷道卸压; 区域压裂通过定向长钻孔实现工作面全覆盖压裂, 能有效控制强矿压, 施工灵活、针对性强, 适配井下复杂狭小空间, 广泛应用于常规岩层控制。

(2) 地面压裂技术: 依托地面钻井设备, 对煤矿高位岩层进行大规模改造, 形成“区域先行、源头治理”的新范式。其压裂范围广、效果持久, 可从源头缓解深部煤层冲击压力, 但前期设备与钻井投入大、技术门槛高, 主要适用于深部强冲击倾向性煤层的大规模岩层控制^[2]。

(3) 井上下协同压裂技术: 整合井下压裂的灵活性与地面压裂的大范围优势, 构建“地面+井下”协同治理网络。例如彬长矿区孟村煤矿采用“60+40+20”三段压裂模式, 地面压裂控制高位岩层, 井下压裂处理中低位“压裂弱区”, 形成全方位改造体系, 实现冲击地压精准防治, 适配复杂地质条件, 提升治理效果与安全性。

2.2 核心施工装备及技术参数

(1) 压裂泵组: 作为水力压裂施工的核心装备, 直接决定压裂效果与施工安全性, 分为井下与地面两种类型。其中井下压裂泵最大流量可达5.0m³/min, 额定压力不低于35MPa, 能够满足井下局部与区域压裂的压力、排量需求; 地面压裂泵组额定压力可达70-100MPa, 适配地面大规模压裂的高压需求。同时配套高压管汇、井口装置、安全阀等设备, 形成完整的压裂动力系统, 有效保障施工过程的稳定性与安全性。(2) 辅助装备: 涵盖工具串、切槽(缝)装置、射孔装置及监测系统等, 是保障施工顺利开展与效果监测的关键。其中射孔装置孔径控制在10-15mm, 确保射孔效果, 为压裂液注入、裂缝扩展提供通道; 监测系统可实现微震、应力、岩层变形等多参数实时监测, 采样频率不低于1次/分钟, 能够实时捕捉施工过程中岩层与设备的运行状态, 为施工过程调控、参数优化与效果评价提供精准的数据支撑^[3]。

2.3 标准化施工工艺流程

(1) 施工前期准备: 是保障施工质量与安全的基础, 主要包括三项核心工作。一是钻孔施工, 孔径控制在89-113mm, 孔深根据岩层控制范围合理确定, 通常为

50-200m, 确保钻孔精准抵达目标岩层; 二是压裂液配置, 以胍胶类压裂液为主, 黏度控制在50-100mPa·s, 保障压裂液的携砂能力与渗透效果; 三是装备调试与安全检查, 对压裂泵组、辅助装备及安全设施进行全面调试, 排查安全隐患, 确保各项施工条件全部达标后启动施工。(2) 现场施工操作: 严格遵循标准化流程分步开展, 流程为“钻孔定位→射孔→压裂液注入→加砂支撑→停泵返排”。施工过程中精准控制各项参数, 施工压力稳定在25-40MPa, 排量控制在2-5m³/min, 加砂比逐步提升至20%-30%, 避免砂比过高导致堵塞或过低影响裂缝支撑效果, 同时全程监测参数变化, 确保裂缝按设计方向扩展, 避免裂缝闭合^[4]。(3) 施工后整理: 施工结束后及时开展收尾工作, 清理施工场地、回收各类施工装备, 对压裂钻孔进行封堵处理, 防止井下渗水、漏气等问题。同时详细记录施工全过程数据, 包括施工压力、排量、砂比、施工时间等, 整理归档后为后续压裂效果评价、参数优化及同类工程施工提供参考依据。

2.4 施工质量控制要点

(1) 钻孔质量控制: 钻孔质量直接影响裂缝扩展效果, 核心控制两项指标, 确保钻孔垂直度误差不超过1%, 孔位偏差不大于50cm, 施工过程中全程监测钻孔精度, 及时调整钻孔角度与位置, 避免因钻孔偏差导致裂缝扩展偏离目标岩层, 影响压裂效果。(2) 压裂参数控制: 实时监测施工压力、排量、砂比等核心参数, 建立参数动态调控机制, 及时应对参数波动问题。例如当施工压力骤降时, 需立即停泵检查, 排查管路漏液、钻孔窜漏等隐患, 整改完成后再恢复施工; 当砂比过高出现堵塞迹象时, 及时降低砂比, 确保施工顺利推进, 避免裂缝扩展异常。(3) 安全控制: 坚守安全施工底线, 施工区域设置明显警戒标识, 严禁无关人员进入; 配备齐全防喷、防漏、防爆等安全装备, 定期检查维护; 所有操作人员必须持证上岗, 严格遵守施工操作规程, 防范高压流体泄漏、设备故障、人员误操作等安全隐患, 确保施工全过程安全无事故^[5]。

3 煤矿水力压裂岩层控制技术工程应用实例

3.1 工程概况

(1) 矿井基本条件: 选取彬长矿区孟村煤矿401104工作面作为应用实例, 该矿井主采4#煤层, 平均埋深达730米, 属于典型的强冲击倾向性煤层。工作面回采过程中面临“高应力、高瓦斯、高水压、强扰动”的复杂地质条件, 冲击地压发生风险较高, 巷道围岩变形量较大, 传统岩层控制技术难以满足安全生产需求, 治理效果不佳, 亟需采用水力压裂岩层控制技术进行针对性治

理, 破解开采过程中的岩层控制难题。(2) 岩层控制需求: 结合矿井实际地质条件与开采痛点, 明确核心控制需求的核心是实现巷道围岩卸压, 降低冲击地压发生率, 有效控制工作面周期来压强度, 减少巷道围岩变形, 提升巷道整体稳定性, 从而保障工作面安全、高效回采, 同时在确保治理效果的前提下, 合理降低灾害治理成本, 实现安全与效益的双重提升。

3.2 压裂方案设计

(1) 技术选型: 结合孟村煤矿401104工作面的地质条件与控制需求, 选用井上下协同压裂技术, 实施“60+40+20”上中下三段水力压裂模式。具体而言, 通过对煤层顶板上方60米、40米区域实施地面双台阶水平井压裂, 实现高位岩层的大规模改造; 针对401104回风巷煤柱侧上方20米的“压裂弱区”, 采用井下定向长钻孔水力精准压裂, 补齐治理短板, 最终形成“地面+井下”全方位、多层次的协同治理网络, 确保岩层控制全覆盖、无死角。(2) 参数设计: 结合矿井地质勘察数据与岩层力学特性, 科学确定各项压裂参数。其中, 压裂钻孔深度控制在60-120m, 孔径为108mm; 施工压力稳定在30-35MPa, 排量控制在3-4m³/min; 砂比设定为20%-25%, 保障裂缝支撑效果; 压裂液选用胍胶类压裂液, 黏度控制在60-80mPa·s, 确保压裂液具备良好的携砂能力与渗透性能, 助力裂缝有效扩展并实现稳定支撑, 满足岩层卸压与控制需求。

3.3 现场施工与监测

(1) 现场施工过程: 严格按照前文所述的标准化施工工艺流程, 有序完成钻孔、射孔、压裂液注入、加砂支撑、停泵返排及施工后整理等各项操作。本次施工累计完成压裂钻孔32个, 总施工时长18天, 施工过程中安排专业人员实时监测施工压力、排量、砂比等核心参数, 及时排查安全隐患、调整施工参数, 确保施工质量与施工安全, 全程未发生任何安全事故与隐患。(2) 监测方案与数据: 采用微震监测、应力监测、巷道变形监测三种协同监测方式, 监测周期为压裂后3个月, 全面跟踪压裂效果, 监测结果如下表所示:

表1 孟村煤矿401104工作面压裂前后监测数据对比表

监测项目	压裂前数据	压裂后数据	改善幅度/提升情况
侧帮应力集中系数	1.8	1.4	22.2%
微震10 ³ 焦耳以下能级事件占比	62%	85%	提升23个百分点
巷道最大变形量	180mm	80mm	55.6%
百米钻孔瓦斯抽采纯量	0.8m ³ /min	3.5m ³ /min	提升337.5%

上述监测数据为压裂效果评价提供了精准的数据支撑。

3.4 应用效果评价

(1) 安全效果: 压裂治理后, 401104工作面冲击地压发生率降至0, 微震高能级事件显著减少, 巷道围岩稳定性大幅提升, 回采过程中未发生巷道坍塌、煤壁片帮等安全事故, 有效化解了冲击地压风险, 为工作面人员与设备安全提供了坚实保障, 圆满实现了安全治理目标。(2) 经济效果: 压裂技术的应用大幅缩减了传统灾害治理工程, 其中减少大直径卸压工程1.2万米、顶板爆破卸压工程3.5万米, 直接缩减施工费用757万元; 巷道维护量同比缩减1200米, 减少注浆450余吨, 节省维修费用支出742万元, 累计减少灾害治理费用支出1499万元。同时, 401104回风临空巷道单进水平相比反掘提高80%, 显著提升了开采效率, 经济收益与施工效率双重提升, 经济效果十分显著。(3) 技术效果: 压裂后, 工作面围岩应力分布更加均匀, 应力集中程度显著降低, 工作面周期来压步距控制在合理范围, 岩层变形量大幅减小, 各项指标均达到设计要求。此次应用成功验证了水力压裂技术在深部强冲击倾向性煤层中的适用性与有效性, 为同类矿井的岩层控制提供了可借鉴的技术经验。

结束语

煤矿水力压裂岩层控制技术是破解深部煤矿开采岩层控制难题的关键技术, 兼具安全性与经济性。本文全面总结其理论基础、技术体系及施工要点, 工程实例充分验证了该技术在卸压围岩、防控冲击地压等方面的显著成效。未来需结合智能化发展趋势, 优化施工参数与监测技术, 推动该技术向精准化、高效化升级, 为煤矿行业高质量、安全化开采提供更有力的技术保障。

参考文献

- [1]董立伟,马勇,白梅.水力喷射压裂技术在深层水平井的应用[J].石油知识,2023,13(1):53-55.
- [2]赵中伟.水力喷射压裂技术在文南油田的应用[J].内蒙古石油化工,2022,8(23):135-137.
- [3]张振兴,刘斯佳.水力喷射压裂技术在七棵树油田的应用[J].内蒙古石油化工,2023,20(5):106-108.
- [4]吴信波.水力喷射压裂技术在煤层气开发中的应用研究[J].工艺技术,2022,10(22):180-183.
- [5]张欣印.水力喷射压裂技术原理及应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,34(8):146-149.