

煤矿水力压裂岩层控制技术及应用

王爱明

陕西省煤层气开发利用有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要：煤矿水力压裂岩层控制技术基于流体动力学原理，高压水射流破碎岩层构建裂缝网络，改善煤层透气性并调控岩层应力分布。本文围绕该技术，融合岩石力学流体力学断裂力学理论，明确其核心在于精准控制裂缝扩展方向与范围，并结合地质条件动态优化压裂参数。其应用场景涵盖深部开采岩层稳定性维护、瓦斯抽采效率提升及采空区顶板管理优化，通过理论创新与技术实践，为煤矿安全高效开采提供关键技术支撑，推动煤炭资源绿色开发与可持续发展。

关键词：煤矿水力压裂；岩层控制技术；应用与发展

引言：随着煤矿开采深度增加，深部高应力环境对岩层控制提出严峻挑战。水力压裂技术通过定向改造岩体结构，有效缓解岩层应力集中风险，成为保障深部煤炭资源安全高效开发的核心手段。该技术依托多学科理论交叉，结合实时监测与智能调控，在复杂地质条件下实现岩层稳定性与压裂效果的双赢，为煤矿绿色开采与可持续发展注入新动能。

1 煤矿水力压裂岩层控制技术基础理论

煤矿水力压裂岩层控制技术以流体动力学为基础，通过高压水射流破碎岩层，形成裂缝网络以改善煤层透气性。该技术核心在于精准控制裂缝扩展方向与范围，避免过度破坏岩层结构，确保巷道稳定性。其理论体系涵盖岩石力学、流体力学及断裂力学等多学科交叉，需综合考虑地质条件、应力场分布及压裂参数匹配。（1）岩层裂缝扩展机制研究：基于微震监测与数值模拟，分析不同岩性条件下裂缝萌生、延伸及交汇规律，为优化压裂工艺参数提供理论支撑；该机制揭示了裂缝形态与压裂压力、排量的内在关联，指导现场作业中压力梯度与排量的动态调整。（2）多场耦合效应分析：聚焦温度场、渗流场及应力场的相互作用，建立三维耦合模型模拟压裂过程中岩层变形、流体运移及热量传递的协同效应；通过模型验证，明确了多场耦合对裂缝扩展路径及岩层稳定性的影响规律，为复杂地质条件下压裂方案设计提供科学依据。（3）智能监测与反馈系统开发：集成光纤传感、声波检测及人工智能算法，构建实时监测与反馈平台；该系统可动态捕捉压裂过程中的微小变形、应力变化及流体分布，结合机器学习模型实现压裂参数的智能优化，提升作业效率与安全性^[1]。技术实施需严格遵循岩层控制原则，通过精细化参数调控与动态监测，

实现岩层稳定性与压裂效果的双赢，为煤矿安全高效开采提供关键技术支撑。

2 煤矿水力压裂岩层控制技术要点

2.1 压裂参数设计与岩层适配控制

压裂参数设计与岩层适配控制通过优化压力、排量等参数，实现岩层裂缝的有效扩展与稳定控制。该技术需结合地质条件与岩层特性，动态调整参数以匹配不同岩层的力学响应特征。（1）压力梯度动态调整：基于实时微震监测数据，在压裂过程中逐步提升压力梯度，如从初始 15MPa 逐步增至 35MPa，确保裂缝在目标岩层内延伸，避免穿透含水层或断层带，提升作业安全性。（2）排量与岩层渗透率匹配：通过实验室测试确定不同岩层的最佳排量范围，例如砂岩层需维持 8-12m³/min 排量以形成有效裂缝网络，而页岩层则需控制在 5-8m³/min，防止过度破碎导致岩层失稳。（3）多参数协同优化：结合数值模拟与现场试验，综合评估压力、排量、时间等参数对裂缝形态的影响；某矿区实践显示，当压裂压力控制在 30-40MPa 时，裂缝长度可达 50-80m，且岩层稳定性显著提升，有效支撑巷道开采需求。技术实施需注重参数精准调控与动态反馈，通过科学设计实现岩层控制与压裂效果的双赢，为煤矿安全高效开采提供关键支撑。

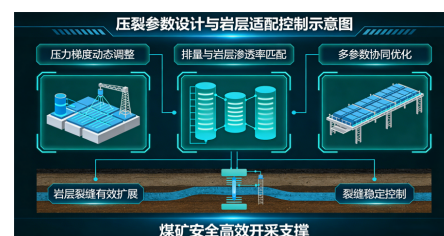


图 1 压裂参数设计与岩层适配控制

2.2 压裂钻孔布置与岩层破裂导向控制

压裂钻孔布置需结合岩层应力分布特征,结合前期地质勘探实测数据,通过科学规划钻孔位置与角度,实现破裂方向的精准导向。该技术核心在于利用钻孔排列引导裂缝沿预定路径扩展,避免无序破裂导致的岩层失稳风险。(1) 钻孔间距优化策略:根据岩层硬度与应力条件,动态调整钻孔间距,例如在硬岩层中采用 3-5 米间距,软岩层则扩大至 5-8 米,确保裂缝网络均匀分布且不产生应力集中区域。(2) 破裂导向监测技术:采用声波探测与光纤传感技术,实时监测裂缝扩展方向与速度;通过数据分析调整钻孔参数,精准把控裂缝发育状态,使裂缝沿设计轨迹延伸,提升岩层控制效果。(3) 多角度钻孔协同布置:结合水平孔、倾斜孔与垂直孔组合布置,形成三维导向网络;该方式可有效控制裂缝在水平与垂直方向的扩展范围,增强岩层整体稳定性^[2]。技术实施需注重钻孔参数与岩层特性的动态匹配,贴合井下实际工况,通过精准布置与导向控制,实现岩层破裂路径的精确调控,为煤矿安全开采提供可靠保障。

2.3 压裂过程岩层裂隙扩展控制

压裂过程岩层裂隙扩展控制通过动态监测与参数调整,实现裂隙扩展路径与范围的精准调控。该技术需结合岩层应力特征与压裂参数,确保裂隙扩展方向与速度符合设计要求,避免无序破裂导致的岩层失稳。(1) 裂隙扩展速度动态监测:采用高速摄像与声波探测技术,实时捕捉裂隙扩展速度,例如当压裂压力达到 30MPa 时,裂隙扩展速度可达 6m/min,需及时调整压力梯度以避免过度扩展,保障岩层稳定性。(2) 多尺度裂隙网络构建:通过控制压裂参数,形成从微米级到米级的裂隙网络;这种网络可提升岩层透气性与渗透性,同时保持岩层整体结构完整,减少局部失稳风险。(3) 裂隙扩展方向智能导向:结合地质应力场分析与数值模拟,优化钻孔布置与压裂参数,使裂隙沿最大主应力方向扩展;该方式可减少无序破裂,提升裂隙扩展效率与岩层控制效果。技术实施需注重参数动态调整与实时监测,通过科学控制实现裂隙扩展路径的精确调控,为煤矿安全高效开采提供可靠支撑。

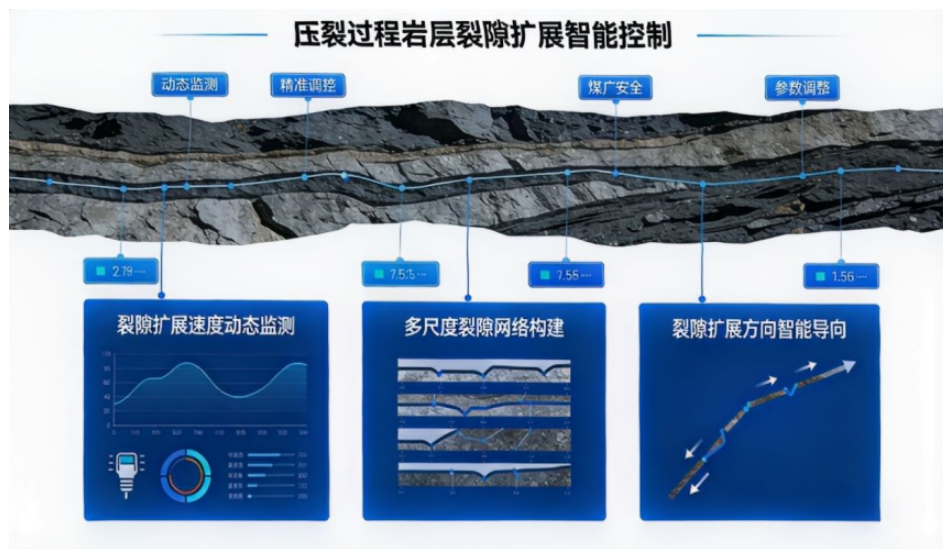


图 2 压裂过程岩层裂隙扩展控制

2.4 施工全过程岩层稳定性管控

施工全过程岩层稳定性管控通过动态监测与多参数协同控制,结合现场超前勘察数据支撑,确保岩层在压裂各阶段保持稳定状态。该技术需结合地质条件与施工参数,实现岩层应力与变形的精准调控,预判潜在围岩扰动隐患,避免局部失稳风险。(1) 施工阶段稳定性分级评估:根据压裂作业的不同阶段,如钻孔、压裂、保

压等,动态评估岩层稳定性,例如在压裂初期阶段,岩层稳定性需维持在 0.9 以上,确保作业安全进行。(2) 多参数协同控制策略:结合压力、排量、时间等参数,实现岩层稳定性的精准调控;通过优化参数组合,减少岩层应力波动,提升整体稳定性与压裂效果。(3) 实时监测与反馈机制:采用光纤传感与声波探测技术,实时监测岩层变形与应力变化。结合数据分析,及时调整

施工参数,确保岩层稳定性符合设计要求,保障作业安全^[3]。技术实施需注重全过程动态管控,通过科学评估与精准调控,实现岩层稳定性的有效提升,为煤矿安全高效开采提供可靠保障。

3 煤矿水力压裂岩层控制技术应用与发展

3.1 煤矿水力压裂岩层控制技术应用场景

深部开采作业中,岩层控制是应对井下复杂工况、保障安全与效率的关键环节。水力压裂技术依托成熟施工工艺精准调控岩层应力分布,有效缓解深部高应力环境带来的安全隐患风险,为煤炭资源高效回采提供稳固技术支撑。(1)复杂地质条件适应性:在断层、褶曲等地质构造发育区域,水力压裂可定向改造岩体结构,增强岩层整体稳定性,降低冒顶、片帮等事故发生概率。(2)瓦斯抽采效率提升:通过压裂裂隙网络扩展,可显著增加瓦斯解吸通道,提高抽采浓度与抽采率,为煤矿安全生产提供双重保障。(3)采空区顶板管理优化:针对采空区顶板垮落不充分问题,水力压裂可主动诱导顶板断裂,形成规则垮落带,减少地表沉陷风险。该技术通过多场景应用验证,逐步形成从理论到实践的完整技术体系,为煤矿绿色开采与可持续发展注入新动能。

3.2 应用过程中技术优化路径

应用过程中技术优化路径依托现场地质实测数据支撑,通过持续改进与创新,提升水力压裂岩层控制技术的效率与安全性;该路径需结合实际作业需求,动态调整技术方案适配井下复杂工况,灵活应对各类差异化地质条件。(1)参数动态调整机制:根据实时监测数据,动态调整压裂参数如压力、排量等,例如在硬岩层中提升压力至 40MPa,软岩层则降低至 25MPa,以实现裂隙扩展的精准控制。(2)多技术融合创新:结合数值模拟与人工智能技术,优化压裂方案设计。通过模拟预测裂隙扩展路径,结合 AI 算法实现参数智能优化,提升技术可靠性。(3)施工过程智能化升级:引入智能监测与反馈系统,实现施工过程自动化控制;该系统可实时调整参数,减少人为干预,提升作业安全性与效率^[4]。技术优化路径需注重持续创新与动态调整,通过科学改进实现技术效果的有效提升,保障煤矿开采安全高效进行。

3.3 技术应用效果综合评价

现场应用后的岩层控制效果可结合井下定点监测数据,通过多项实测指标完成量化评估,直观反映水力压裂技术对井下围岩稳定性的改善作用与实际应用价值。(1)围岩变形管控:顶板下沉实测数值明显回落,常规开采区段平均下沉量可达 26mm,应用压裂技术后稳定控制在 11mm 以内,巷帮收敛变形幅度缩减超五成,围岩整体受力状态趋于均衡。(2)裂隙发育优化:岩层

内部有效导流裂隙占比稳步提升,原生杂乱裂隙占比持续下降,裂隙延展均匀度提升近四成,岩体破碎无序的状态得到有效改善。(3)透气性能提升:岩层孔隙连通范围不断扩大,内部气体疏导效率稳步增长,有害气体局部集聚的问题大幅缓解,井下围岩内部应力释放更为充分。各类实测数据相互印证,能清晰体现该技术在岩层应力释放与岩体结构优化方面的实际价值,筑牢井下安全防护底线,持续保障采掘作业岩层整体稳定可控。

3.4 技术应用前景展望

随着开采深度持续加大与井下地质工况日趋复杂化,水力压裂岩层控制技术展现出广阔长远的应用潜力与升级拓展空间。该技术通过持续优化压裂参数与工艺流程,逐步突破传统岩层控制瓶颈,为深部煤炭资源安全高效开发提供坚实可靠的技术保障。(1)智能化压裂系统开发:结合地质探测数据与数值模拟技术,构建动态压裂参数调整模型,实现压裂过程的实时监测与精准调控,提升作业效率与安全性。(2)环保型压裂材料研发:聚焦低污染、可降解的压裂液配方,减少对地下水资源及岩层生态的长期影响,推动绿色开采技术发展。(3)多场景协同应用拓展:在煤岩耦合控制、巷道围岩加固等领域探索技术融合路径,形成覆盖开采全周期的岩层控制解决方案,增强技术综合效益^[5]。技术前景的拓展需依托持续的技术创新与跨学科合作,逐步完善适配深井作业的成套工艺,构建适应复杂地质环境的技术体系,为煤炭行业可持续发展注入持久动力。

结束语:未来,水力压裂岩层控制技术将持续向智能化、环保化、多场景协同方向发展。通过构建动态压裂参数调整模型实现精准调控,研发低污染可降解压裂液推动绿色开采,拓展煤岩耦合控制、巷道围岩加固等跨领域应用,形成覆盖开采全周期的岩层控制解决方案。持续的技术创新与跨学科合作将突破传统岩层控制瓶颈,为深部煤炭资源安全高效开发提供持久技术保障,助力煤炭行业可持续发展。

参考文献

- [1] 全嘉伟.煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J].石油石化物资采购,2025(17):73-75.
- [2] 任文永,王凯.煤矿坚硬顶板水力压裂卸压控制技术[J].石化技术,2025,32(3):377-378.
- [3] 王华.干河煤矿 D 工作面水力压裂切顶技术应用[J].江西煤炭科技,2025(1):82-85.
- [4] 许新星.鑫顺煤矿坚硬顶板定向水力压裂技术应用研究[J].西部探矿工程,2025,37(12):142-145.
- [5] 刘亚运.坚硬顶板岩层定向长钻孔水力压裂技术应用研究[J].山西冶金,2025,48(8):247-249.