

水平井定向水力压裂施工参数优化研究

马 鑫

陕西省煤层气开发利用有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要：井下定向钻水力压裂是煤矿顶板卸压、防控冲击地压、优化围岩应力分布的核心关键技术，科学合理的施工参数配置是保障顶板卸压效果、提升围岩稳定性、规避矿井灾害风险的关键，参数选型与配比直接决定压裂卸压工程的施工质量与应用成效。本文首先阐述井下定向钻水力压裂用于煤矿顶板卸压的技术原理，系统分析各类核心施工参数对顶板卸压效果的影响机制，重点探究压裂液性能、施工压力与排量、定向钻孔布置、钻孔参数、顶板层位施工布局等关键参数的作用规律。针对性提出适配煤矿顶板卸压工程的参数优化措施：结合顶板岩层物性、应力分布及地质条件开展个性化参数匹配设计；构建多参数协同耦合的施工参数优化体系；建立从钻孔施工、压裂作业到后期效果监测的全施工周期动态调控机制；完善顶板卸压专项参数优化评价体系，依托量化监测指标构建综合评分模型，精准筛选最优施工参数组合，为煤矿顶板定向钻水力压裂卸压工程提供标准化、可量化、可复制的现场施工参数参考^[1]，有效提升矿井顶板灾害防控水平。

关键词：定向水力压裂；压裂施工；参数优化

引言

井下定向钻水力压裂是提升煤矿顶板卸压治理效果、防控冲击地压灾害的重要技术，其重点在于精确把控顶板岩层裂缝的起裂和扩展。但是施工参数包括流体性能、施工动态指标、定向钻孔参数以及钻孔布置等多个方面，各参数之间的耦合效应复杂，对顶板卸压压裂成效影响明显。目前煤矿顶板水力压裂参数优化面临通用性佳、工程适配性欠佳、效果评价单一等状况。在此基础上，本文深入分析核心参数的影响机制，提出基于顶板岩层物性的个性化匹配、多参数协同耦合、全周期动态调整以及多方面评估等优化方案，为煤矿顶板卸压高效施工提供理论根据。

1 水平井定向水力压裂技术原理

井下定向钻水力压裂是基于巷道顶板地应力分布特性和定向控制手段对顶板岩层进行卸压改造的工艺方法。其主要原理是通过人工干预调控顶板裂缝的起裂位置与扩展走向，促使压裂裂缝沿预设方位定向延展，形成形态规整、分布均匀、贯通性好的人工裂缝卸压网络。施工过程中通过顶板定向钻孔开展精准钻孔作业，在钻孔周边形成定向应力集中带，高压压裂液将优先沿该薄弱区域诱发顶板岩层起裂^[1]。工艺采用分段分层压裂技术，将顶板目标压裂区域划分为多个独立作业区间，逐段开展定向大幅提升顶板岩层卸压改造的均匀性。该技术适用于地应力复杂、原生裂隙发育、顶板坚硬致密、岩层非均质性强的矿井巷道顶板条件，能够在

有限的施工范围内形成高效贯通的裂缝网络，显著提升顶板卸压、防冲控灾效果。

2 核心施工参数对压裂效果的影响机理分析

2.1 压裂压力参数影响机理

压裂压力是井下定向钻水力压裂施工的核心动态参数，直接决定顶板岩层裂缝的起裂、扩展、贯通全过程，是调控顶板卸压范围、裂缝发育形态及应力释放效果的关键指标，压力参数的合理匹配是保障煤矿顶板卸压工程质量的核心前提^[2]。在定向压裂施工过程中，压裂压力的大小、升压速率、稳压时长等动态指标，与顶板岩层抗拉强度、地应力大小、原生裂隙发育状态相互耦合，形成差异化的压裂卸压效果，直接影响人工裂缝网络的成型质量与围岩应力调控成效。

压裂压力的核心作用机理为力学破岩与应力调控双重机制。当施工压力低于顶板岩层起裂压力时，高压压裂液仅能渗入顶板微小原生孔隙与裂隙内部，当施工压力精准匹配顶板岩层起裂压力时，钻孔周边定向应力集中带率先发生张拉破坏，诱发裂缝定向起裂，此时裂缝起裂位置可控、起裂形态规整，能够严格按照预设方向发育，为后续裂缝定向延展奠定基础，可实现精准、定向的局部顶板卸压，适配小范围应力集中治理工况。

当施工压力持续升高并超过岩层起裂压力，裂缝进入快速扩展阶段，高压流体持续楔入裂缝内部，克服岩层围压与裂隙面摩擦阻力，推动裂缝沿最优卸压

方向持续延伸、拓宽,逐步贯通顶板多层位裂隙,形成连续贯通的裂缝卸压通道,但压裂压力并非越高越好,若施工压力过大、远超顶板岩层极限抗压强度,不仅会导致压裂液流失、施工能耗增加,还易造成顶板局部过度破碎、围岩整体性受损,埋下顶板垮落、片帮等安全隐患。

同时,压裂压力的动态变化特征对卸压效果影响显著。升压速率过快会导致岩层瞬时受力激增,易产生突发性无序裂缝,定向控制精度大幅降低;合理的稳压时长可保障裂缝充分延展、贯通,形成稳定的裂缝网络,提升应力释放的充分性;稳压时间不足则裂缝发育不彻底,卸压不充分,后期易出现应力二次积聚问题。综上,压裂压力参数通过控制裂缝起裂有效性、扩展规整度^[3]、贯通范围三大核心要素,主导顶板水力压裂卸压成效,是实现煤矿顶板精准卸压、可控卸压的关键调控参数。

2.2 施工动态参数影响机理

受顶板复杂地应力环境与原生裂隙发育特征影响,压裂裂缝极易偏离预设延伸轨迹,出现裂缝弯曲、分支增多等问题,导致定向控制效果失效,同时有效裂缝延伸长度不足,顶板卸压改造范围受限,难以实现全域应力释放。施工排量是调控裂缝扩展形态与卸压范围的核心动态参数,若施工排量过低,流体驱动能量不足,裂缝延展动力匮乏,难以形成贯通性卸压通道;当排量过高时,高压流体冲击能量会突破顶板定向控制边界,诱发裂缝无序分叉、过度延展,缝间复杂应力叠加造成局部顶板区域重复改造、部分关键应力集中区未有效贯通,卸压均匀性大幅降低。同时高排量易引发井下压裂液流动紊乱、局部砂堵、泵压剧烈波动等工程问题,显著提升现场施工风险与顶板失稳隐患。

2.3 定向钻孔参数影响机理

定向钻孔是控制顶板裂缝起裂位置、起裂方向的前置关键工序,钻孔角度、钻孔深度、钻孔孔径与孔密等参数直接决定初始裂缝发育形态,对顶板定向卸压效果起到基础性控制作用。钻孔角度直接影响岩层起裂方位,当孔眼朝向与顶板最大主应力方向一致时,钻孔周边应力集中沿预设方向集中分布^[4],岩层起裂阻力最小,裂缝可沿设计轨迹稳定延伸,定向卸压精度最高;若钻孔角度出现偏差,孔密决定单段顶板压裂的起裂点数与改造密度,孔密过低时,有效起裂点位不足,裂缝数量少、卸压覆盖范围有限,顶板应力释放不彻底;孔密过高时,相邻孔眼间距过小,孔间应力场相互叠加干

扰,各起裂点裂缝扩展相互制约、彼此阻碍,导致裂缝延伸长度不足、发育不规整,整体卸压质量大幅下降。

3 水平井定向水力压裂施工参数优化策略

3.1 压裂施工设备精准选型优化

煤矿井下巷道空间有限、通风与安全管控标准严苛,且顶板卸压压裂施工具有高压、定向、分段作业的特点,传统压裂设备体积庞大、适配性差、防爆性能不足,难以适配井下施工工况,设备选型的合理性直接决定施工压力稳定性、裂缝定向控制精度及现场施工安全。因此,需结合井下施工环境与顶板卸压工程需求,开展专项设备选型优化,兼顾防爆性、便携性、高压稳定性与参数可调性。

在核心加压设备选型方面,优先选用矿用防爆型高压变频压裂泵组,摒弃传统恒压泵设备。变频压裂泵可实现排量、压力的无级微调,保障高压状态下设备运行稳定,杜绝泵压突变、停机泄压导致的裂缝提前闭合问题;针对浅部破碎顶板,选用小排量、高精度可调泵组,实现低压精准卸压,防止过度压裂引发顶板围岩失稳。

在定向控制与辅助设备选型方面,配套选用矿用精准定向钻孔器,根据前期钻孔参数机理分析结果,匹配不同孔径、孔深的可调节钻孔装置,管路系统选用耐高压、抗磨损、防爆型矿用高压管路,降低高排量压裂过程中管路摩阻与流体损耗,避免管路渗漏、爆管等安全事故,保障施工参数输出的稳定性与准确性。所有设备均满足煤矿井下防爆、防尘、防潮标准,适配井下复杂作业环境,从硬件层面保障压裂参数精准落地。

3.2 因地适配的压裂液配比优化

压裂液是水力压裂的核心介质,其黏度、流动性、滤失性、破胶性及携砂能力直接影响裂缝起裂扩展、支撑剂铺置效果与顶板卸压稳定性,固化单一的压裂液配比无法适配不同顶板岩层的物性差异。针对煤矿顶板砂岩、泥岩、复合型岩层等不同地质条件,结合地应力大小、裂隙发育程度,开展差异化、个性化压裂液配比优化,实现地层物性与压裂液性能的精准匹配。

对于坚硬致密、完整性好、地应力高的顶板岩层,此类岩层起裂压力高、原生裂隙少,需采用高黏度、高携砂性、低滤失的压裂液配比体系。通过合理添加助剂提升压裂液黏度,增强裂缝拓展能力,保障高压下裂缝充分延伸、拓宽,避免压裂液快速滤失导致的裂缝发育不充分问题,同时保证支撑剂均匀铺置,有效维持裂缝长期贯通状态,提升高应力顶板卸压的持续性。

对于裂隙发育、岩层破碎、完整性较差的软弱顶板,此类岩层易出现裂缝无序扩散、顶板破碎失稳等问题,需采用低黏度、高流动性的轻量化压裂液配比,贯通微小裂隙网络,实现均匀卸压;减少液体滞留对顶板岩层的软化侵蚀,规避围岩遇水弱化、片帮失稳的风险。

对于多层位、非均质复合型顶板,根据不同层位岩层硬度、裂隙发育情况,动态调整压裂液黏度、助剂含量与砂比参数。杜绝配比失衡导致的携砂不足、砂堵、流体失效等问题,兼顾裂缝扩展效果与顶板围岩稳定性,适配复杂顶板地质条件的卸压需求。

3.3 全施工周期动态参数调控机制构建

井下定向钻水力压裂施工是多参数耦合、动态变化的复杂过程,传统静态固定参数施工模式无法适配裂缝实时发育变化,易出现参数匹配失衡、卸压不均、施工风险高等问题。基于压力、排量、钻孔、钻孔布局等核心参数的耦合作用机理,构建涵盖施工前期准备、中期压裂作业、后期稳压闭合的全周期动态参数调控机制,实现参数实时监测、动态调整、闭环优化。

施工前期精准预调阶段:基于顶板地质勘察数据,精准识别目标卸压层位的岩层强度、地应力大小、原生裂隙分布特征,结合施工钻孔布局、钻孔参数,预设初始施工压力、升压速率、施工排量、砂比及加砂规模等基础参数。通过数值模拟预判裂缝发育轨迹与卸压范围,对多参数进行初步协同匹配,规避参数适配性差、裂缝定向失控等前置问题,制定个性化施工参数方案。

施工中期动态调控阶段:依托井下实时监测设备,全程采集泵压、排量、流量、裂缝扩展状态等实时数据,建立参数动态反馈调控体系。在裂缝起裂阶段,低速稳压升压,精准匹配岩层起裂压力^[5],保证裂缝定向起裂,杜绝升压过快引发的无序分支缝;在裂缝扩展阶段,根据实时压力变化动态调整排量与砂比,压力偏高时适度提升排量、优化携砂性能,保障裂缝稳定延伸,压力偏低时降低排量、稳压保缝,避免裂缝过度延展、岩层破碎;针对多段、多簇压裂施工,实时结合缝间应力干扰状态,动态调整段间距、簇间距施工节奏,避免

缝间叠加干扰与重复改造。

施工后期稳压优化阶段:压裂作业完成后,设置合理的稳压时长,保障裂缝充分贯通、支撑剂均匀铺置,避免瞬时泄压导致的裂缝快速闭合、卸压失效。形成“勘察预设—实时监测—动态调控—效果复盘—迭代优化”的全周期闭环调控体系。

此外,建立多参数协同耦合调控准则,统筹压力、排量、砂比、钻孔、钻孔布局等核心参数的制约关系,摒弃单一参数调控模式,实现各参数联动匹配。通过全周期动态调控机制,彻底解决传统固定参数施工通用性强、适配性差的弊端,大幅提升煤矿顶板定向水力压裂卸压的精准度、均匀性与安全性,为井下顶板卸压工程标准化施工提供技术支撑。

结语

综上所述,井下定向钻水力压裂施工参数的优化对于井下顶板卸压工程有着重大意义。经分析核心施工参数对压裂成效的作用机制,搭建多参数协同耦合体系、确立全施工周期动态调控机制以及健全多方面的参数优化评价体系等优化措施,这些策略从不同方面着手,彼此协作可有效应对参数适配性差、改造成效差异明显等状况,确保定向裂缝根据设计形态延展。

参考文献

- [1] 马维亮. 沿空留巷顶板定向水力压裂技术与瓦斯治理协同应用 [J]. 煤炭与化工, 2026, 49(6): 102-106.
- [2] 曹剑, 蔡谊军. 煤矿定向长钻孔水力压裂防冲技术研究 [J]. 陕西煤炭, 2026, 45(5): 56-60.
- [3] 汪隆靖. 工作面初采定向钻孔分段水力压裂放顶技术研究 [J]. 煤炭与化工, 2025, 48(11): 54-57.
- [4] 徐宁. 余吾煤业公司 S5207 工作面定向长钻孔水力压裂弱化顶板技术研究 [J]. 当代化工研究, 2025, (22): 147-149. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.22.048.
- [5] 李宇, 刘建宇, 单海浪, 等. 上湾煤矿坚硬顶板分段水力压裂弱化技术的应用及其效果评价 [J]. 中国矿业, 2025, 34(S2): 415-420.