

郝赛男,舒龙勇,凡永鹏,等.定向长钻孔分段压裂促抽效果影响因素分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(4):392-398.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260024
Hao Sainan,Shu Longyong,Fan Yongpeng,et al.Analysis of influencing factors on the performance of directional long-borehole staged fracturing for enhanced gas drainage[J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2026,45(4):392-398.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260024

定向长钻孔分段压裂促抽效果影响因素分析

郝赛男¹,舒龙勇²,凡永鹏²,黄戈^{1*},白刚¹,王鹤²,李利³

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 葫芦岛 125105;2. 煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;
3. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083)

摘 要:为了解定向长钻孔分段压裂瓦斯促抽工程中多钻孔压裂相互影响不明确、压裂工艺优选缺乏依据等问题,采用PFC离散元数值模拟平台,开展不同压裂工艺条件下多定向钻孔分段压裂裂缝扩展规律研究,明确影响定向长钻孔分段压裂促抽效果的控制因素,并开展工程应用验证。研究表明:多定向长钻孔分段压裂时,适当增大钻孔间距可有效扩大裂缝的空间扩展范围;压裂段采用交错式布置更利于裂缝扩展,可显著提升裂缝长度与增透效果;采用先压两边钻孔、后压中间钻孔的注压顺序,产生的裂缝数目及促抽效果均优于其他注压顺序。基于数值模拟结果与工程实践经验,确定了定向长钻孔分段压裂促抽工程的最优压裂工艺,为水力压裂技术提高煤层透气性、提升瓦斯治理效率提供理论支撑与技术方案。

关键词:水力压裂;定向长钻孔;分段压裂;裂缝扩展;颗粒流模拟

中图分类号:X936

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)04-0392-07

Analysis of influencing factors on the performance of directional long-borehole staged fracturing for enhanced gas drainage

Hao Sainan¹, Shu Longyong², Fan Yongpeng², Huang Ge^{1*}, Bai Gang¹, Wang He², Li Li³

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;3. School of Emergency management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To clarify the mutual influence among multiple borehole fracturing in the directional long-borehole segmented fracturing gas drainage project and provide a robust basis for optimization, this study investigate the fracture propagation patterns using the PFC discrete element numerical simulation. The controlling factors affecting the drainage promotion effect of this technique were systematically analyzed and validated through engineering applications. The research results indicate that appropriately increasing the borehole spacing during multi-directional long-borehole segmented fracturing can effectively promote the expansion of fracture propagation; employing a staggered arrangement of fracturing sections is more conducive to fracture propagation, significantly enhancing the influence range and permeability improvement effect; and the injection and fracturing sequence of first fracturing the boreholes on both sides and finally the middle borehole yields better fracture numbers and drainage promotion effects compared to other injection and fracturing sequences. Combining numerical simulation results with practical engineering experience, the optimal fracturing technique for the directional long-borehole segmented fracturing gas drainage project was determined. This provides theoretical support and technical solutions for enhancing coal seam permeability and improving gas control efficiency through hydraulic fracturing technology.

收稿日期:2026-01-14 修回日期:2026-02-26 接受日期:2026-03-05 责任编辑:张雯

基金项目:国家重点研发课题资助项目(2023YFC3009004);国家自然科学基金项目(52304225;52304224;52204217)

作者简介:郝赛男(1999-),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事安全科学与瓦斯灾害防治方面的研究。E-mail:1902028482@qq.com

通信作者:黄戈(1988-),男,河北廊坊人,博士,讲师,主要从事煤矿火灾防治、瓦斯防治方面的研究。E-mail:429531305@qq.com

Keywords: hydraulic fracturing; directional long-borehole; staged fracturing; crack propagation; particle flow simulation

0 引言

中国煤层透气性普遍偏小,且随着开采深度的持续增加,煤层透气性逐步减小,常规瓦斯抽采方法已难以发挥有效的瓦斯治理作用。水力压裂增透技术因其工艺简单、经济实用等特点,已广泛应用于煤矿开采。近年来,随着定向钻技术和分段压裂技术的不断进步,钻孔分段压裂技术在高瓦斯矿井和冲击地压矿井中得到规模化应用。特别是定向长钻孔分段压裂瓦斯促抽技术,凭借瓦斯治理超前性、区域性覆盖等优势,已成为矿井瓦斯超前治理的关键技术选择。如何提高定向钻孔分段压裂效果,保证抽采效率,降低工程成本,是煤矿瓦斯治理领域的研究热点。

为提升定向钻孔分段压裂的瓦斯抽采效率,学者围绕定向长钻孔压裂效果的影响因素展开了系列研究。在地质条件的影响因素方面,现有研究已明确地应力是控制压裂效果的核心因素^[1-3]。煤储层天然裂隙^[4]、煤岩力学特性^[5]等显著影响水力压裂裂缝的起裂、延伸与扩展形态,相关研究为后续压裂工艺优化提供了基础地质依据^[6-8]。定向长钻孔压裂作为有效增透措施,在煤岩、煤层顶板、水平井和煤层增透促抽中应用广泛^[9-11]。在压裂参数和工艺对定向长钻孔压裂瓦斯促抽效果影响方面,已有研究多聚焦单孔工况^[12-13]。胡千庭等^[14]建立单孔分段压裂渗流诱导应力理论模型,定量分析原始水平主应力差、泵注排量和分段间距对渗流诱导应力的影响,并以此优化压裂措施。孙四清等^[15-17]研发了不动管柱裸眼分段压裂和定向长钻孔裸眼拖动式分段压裂工艺技术,实现了煤矿井下长钻孔区域均匀精准压裂改造。李国栋等^[18]开发了适合中等偏硬低透煤层裸眼钻孔高压稳定封孔装备,煤层瓦斯日抽采纯量提高了12.70倍,百米钻孔瓦斯抽采量提高了2.67倍,压裂最大影响半径达到38 m,平均超过30 m,瓦斯抽采效率提升显著。冯仁俊^[19]对比分析了分层单一水力压裂和多煤层综合连续水力压裂工艺,明确了不同压裂方式的有效增透范围。

目前,多钻孔作用下压裂工艺对压裂效果的影响机制、裂缝扩展规律及最优工艺方案鲜有研究,制约了多钻孔分段压裂技术的增透效率提升

与工程推广。基于此,作者采用离散元颗粒流数值模拟平台PFC,揭示多个定向钻孔多段水力压裂裂缝扩展规律,优化不同压裂工艺条件下多定向钻孔水力压裂方案,并开展现场工程应用,旨在明确多钻孔压裂促抽效果的关键影响因素,提高多钻孔分段压裂增透效率,保障煤矿安全开采。

1 颗粒流(PFC)模型参数标定

1.1 细观参数标定

PFC模拟软件无法直接输入宏观力学参数开展计算,为保证数值模拟能够准确反映煤体真实力学特征,需要根据煤样相关力学参数,按照细观参数和宏观参数的对应规律标定参数。通过室内单轴压缩试验测出宏观力学参数,多次修改模拟试样的细观参数并开展模拟试验,直至模拟结果与试验结果的误差小于5%,使用此时的标定数据进行水力压裂数值模拟。

参照单轴压缩试验条件进行模拟,建立PFC单轴试验离散元模型,煤样试件模型尺寸设置与实际煤样试件相同,直径为50 mm,长度为100 mm;在上下边界设置加载板,以0.15 mm/min的加载速率向煤样施加压力,同时监测上下运动边界的轴向应力与轴向应变。试验结束后,计算模型的宏观力学特征,并与实验室完整煤样特性对比验证。

开展单轴压缩模拟试验,通过反复调整模型细观参数,与物理试验结果校准,最终得到1组细观参数用于后续模拟分析,见表1。二维单轴压缩试验细观参数标定结果与实验室完整煤样物理力学测试结果对比见图1,模拟产生的裂缝形态与实际情况相近。单轴压缩试验模拟与实际应力-应变曲线见图2。

表1 细观力学参数标定

Tab.1 Calibration of mesoscale mechanical parameters

参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.4
最大最小颗粒半径比	1.5
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 650
颗粒摩擦系数	0.6
孔隙率	0.08
平行黏接半径因子	1.0
平行黏接模量	1.0

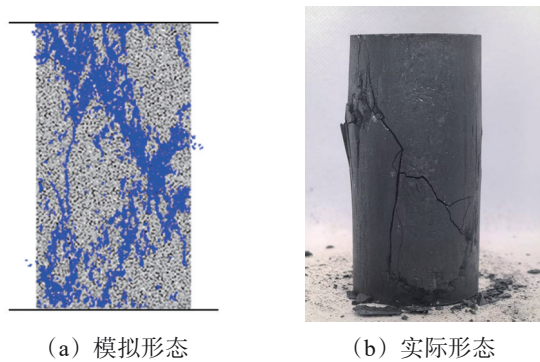


图1 试件单轴压缩形态

Fig.1 Specimen uniaxial compression form

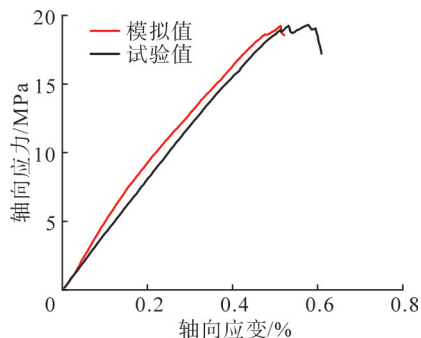


图2 单轴压缩试验轴线应力-应变曲线

Fig.2 Axial stress-strain curve of uniaxial compression test

数值模拟的单轴抗压强度为 18.96 MPa, 与实际室内试验均值 19.16 MPa 高度吻合, 模拟值较试验值低 1.05%。弹性模量取应力-应变曲线 30%~70% 峰值强度区间的割线模量。数值模拟与室内试验的弹性模量分别为 3.739 GPa 和 3.750 GPa, 模拟值较试验值降低 0.29%, 表明标定结果满足数值模拟的参数取值要求。

1.2 模型构建

以西部矿区某矿 403109 综放工作面定向长钻孔分段压裂瓦斯治理为研究背景, 建立煤层二维水力压裂模型, 见图 3。模型尺寸为 2 200 mm×5 000 mm, 设置刚性约束边界并施加初始地应力场。

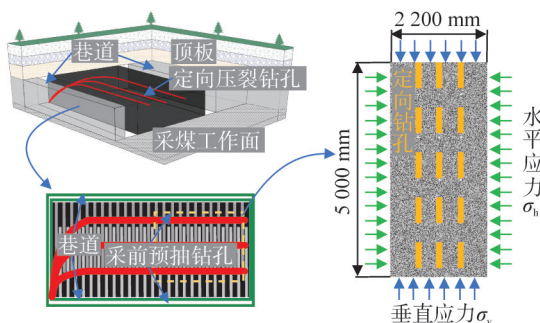


图3 定向长钻孔水力压裂数值模型

Fig.3 Numerical model of directional long borehole hydraulic fracturing

1.3 模拟方案

为研究压裂段数等压裂参数对水力压裂裂缝扩展的影响, 采用控制变量法探究多钻孔压裂工艺对水力压裂裂缝扩展的影响。重点分析定向钻孔间距、压裂段布置形式, 以及定向钻孔注压顺序的影响, 其中钻孔间距 L 分别设为 400 mm、450 mm、500 mm、550 mm, 压裂段布置形式分为平行式布置与交错式布置, 注压顺序分别设为顺序压裂、交错式 1 压裂、交错式 2 压裂, 通过单一变量控制逐一分析各因素作用规律。

2 多钻孔压裂工艺对裂缝网络影响

2.1 定向钻孔不同钻孔间距对裂缝扩展的影响

为研究多定向钻孔分段压裂过程中的应力互馈效应与水力裂缝耦合扩展规律, 开展定向钻孔不同间距水力压裂数值模拟, 不同间距水力裂缝发育扩展形态见图 4。

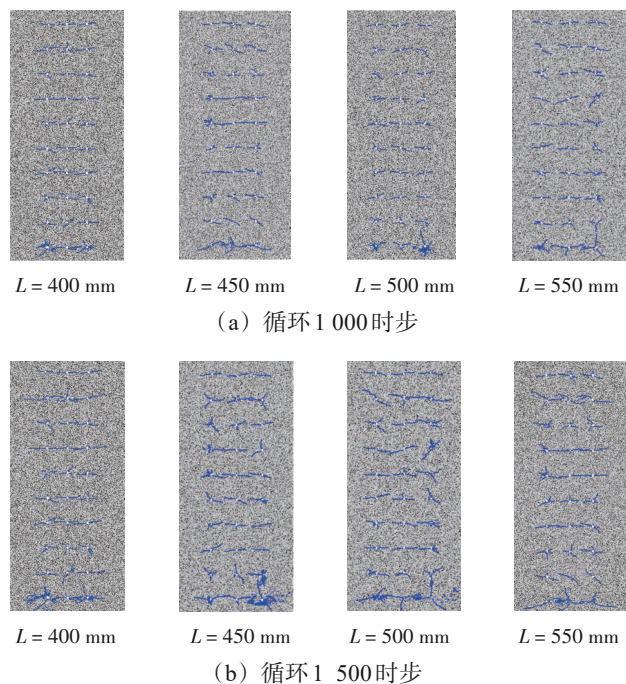


图4 不同间距定向钻孔水力裂缝发育扩展形态

Fig.4 Development and expansion morphology of hydraulic fractures under different spacing conditions of directional drilling

在水力压裂过程中, 定向钻孔群各钻孔压裂段主裂缝沿最大水平主应力方向近似水平延展, 并伴随少量次生裂缝。不同间距水力裂缝数量及裂缝长度见图 5。随着钻孔间距的增大, 裂缝数量和裂缝长度均呈增大趋势。在循环 1 500 时步条件下, 钻孔间距由 400 mm 增至 550 mm 时, 裂缝总数增

加388条,裂缝长度由1 600.08 mm扩展至2 000.1 mm,增幅约25%。此外,钻孔间距的增加延长了3个钻孔间裂缝扩展贯通所需的时间。

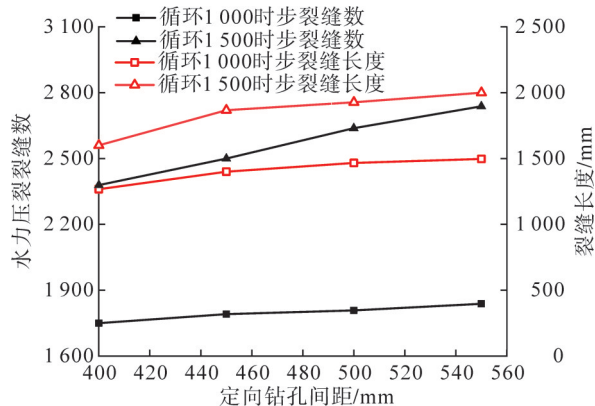


图5 不同间距水力裂缝数及裂缝长度

Fig.5 Number and impact range of hydraulic fractures under different spacing

由图4和图5可以看出,当钻孔间距较小时,各压裂段以主裂缝扩展为主,次生裂缝较少。随着间距增大,次生裂缝数量显著增加。在1 000时步和1 500时步区间,随着间距增大,多钻孔系统产生的裂缝总数缓慢上升,裂缝长度也相应增大。主要原因是较大间距减弱了钻孔间的应力干扰,使裂缝得以沿最大主应力方向更充分地扩展。

综上,若钻孔间距设置过小,相邻钻孔裂缝将过早贯通,应力阴影效应显著,裂缝扩展路径受相邻裂缝应力场干扰,易偏离预设方向。同时,能量分散将限制单个裂缝的延伸长度,形成短而密的裂缝形态,从而降低整体压裂效果。反之,若间距过大,裂缝网络难以有效连通,形成未改造的瓦斯滞留区,瓦斯运移路径增长、流动阻力增大,进而影响抽采效率。此外,在实际工程中,钻孔间距直接决定了煤层中可布置的钻孔数量,过多的钻孔将导致施工成本显著上升。因此,综合考虑裂缝扩展效果与工程经济性,确定模型的合理钻孔间距为500 mm。

2.2 钻孔空间布局对裂缝扩展路径的影响

在定向钻孔不同布置形式水力压裂模拟中,平行式布置共设置30个压裂段,各段沿定向钻孔呈水平矩形阵列分布,相邻钻孔间压裂段一一对应,钻孔间距为500 mm。交错式布置中,中间钻孔的压裂段相对于两侧钻孔垂直向下偏移250 mm,各钻孔间距仍保持500 mm,具体布置方式见图3。

不同布置形式下水力裂缝的扩展形态见图6。在平行式布置中,当水力压裂模拟进行至1 000时步时,各钻孔压裂段的主裂缝主要沿最大水平主

应力方向扩展。随着压裂的推进,不同压裂段周围的裂缝扩展行为出现分化,3个定向钻孔的末端压裂段所产生的次生裂缝数量更多,复杂度更高。钻孔间应力相互作用显著,中间钻孔压裂段受两侧钻孔应力干扰,其次生裂缝数量明显增多,压裂效果更为突出。

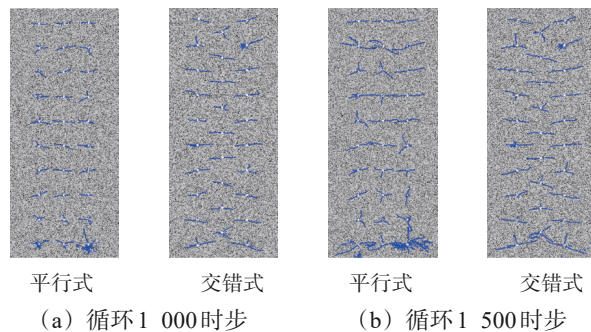


图6 定向钻孔不同布置形式下裂缝发育扩展形态

Fig.6 Development and expansion of cracks under different arrangements of directional drilling

交错式布置中,直至1 500时步各钻孔裂缝仍未交汇贯通,仅少数压裂段裂缝沿最大主应力方向扩展,多数裂缝扩展路径发生一定偏移。这一现象可归因于交错布置所引起的应力场叠加与相互干扰,削弱了单一主应力场对裂缝扩展的主导作用,从而促使裂缝方向产生偏转。此外,由于两侧钻孔受中间钻孔应力影响较小,其压裂段所形成裂缝的有效扩展半径较平行式布置更长。然而,正因各钻孔压裂核心区相对独立、相互作用较弱,交错式布置所产生的裂缝总数相对较少。

从整体扩展效果来看,平行式布置中裂缝数量的增长速率均高于交错式布置。在循环1 000时步时,平行式布置的裂缝总数为1 708条,大于交错式的1 610条;其裂缝长度仅为1 271.14 mm,低于交错式布置的裂缝长度(1 613.37 mm)。由图6可以看出,交错式布置的裂缝覆盖范围更广,而平行式布置因存在明显的应力阴影效应和未充分改造区域,尽管裂缝数量较多,其有效裂缝长度仍偏小。至1 500时步时,平行式布置的裂缝长度增加至1 857.82 mm,交错式布置则达到1 955.60 mm,煤层增透范围进一步扩展。综上,在定向钻孔压裂段交错式布置条件下,水力压裂所形成的裂缝网络覆盖范围更广,煤体增透效果更优,因此将交错式确定为推荐的压裂段布置形式。

2.3 注压顺序对裂缝网络构型的影响

为研究多定向钻孔注压顺序对水力裂缝网络扩展行为的影响,设计3种压裂方案(顺序式、交错式1、交错式2)。每种方案均包含10个压裂段,

压裂段间距设为 500 mm。注压顺序如下：顺序式压裂方案中，第一列钻孔优先压裂，第二列次之，第三列最后；交错式 1 方案为第一列先压，第三列随后，第二列最后；交错式 2 方案则为第二列先压，第三列随后，第一列最后。

不同压裂方案下裂缝发育及扩展演化过程见图 7。各方案所形成的裂缝网络整体形态无显著差异。采用交错式 1 注压顺序时，裂缝发育范围更广，且裂缝生成数多于另外 2 种方案。

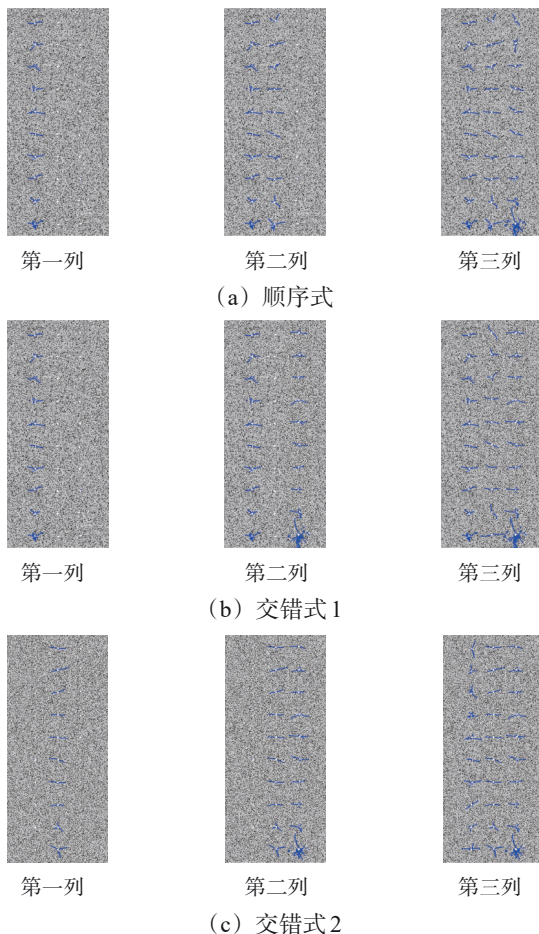


图 7 不同注压顺序下裂缝发育扩展形态

Fig.7 Fracture development and expansion morphology under different injection pressure sequences

不同注压顺序下水力压裂裂缝数见图 8。先两侧后中间的交错式 1 方案产生的裂缝数最多，达 2 284 条，而先中间后两侧的顺序压裂方案裂缝数最少，组间存在显著统计学差异，其中交错式 1 方案表现出显著优势。在力学机制上，若中间钻孔先压裂，形成的裂缝会改变周边应力场，产生应力遮挡效应抑制后续裂缝发育；而先两侧后中间的顺序可优先解除边界约束，利用自由面效应降低中间区域起裂压力，削弱应力阴影的抑制作用，提升裂缝起裂与扩展效率。综上，先两侧后中间

的交错式 1 施工工艺在裂缝生成能力上具有显著优越性，可更高效地提升煤体压裂改造效果。

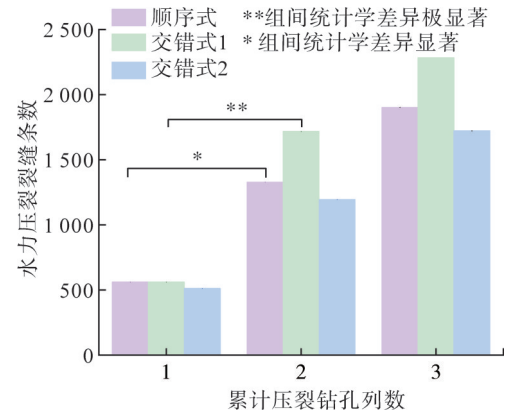


图 8 不同注压顺序下水力压裂裂缝条数

Fig.8 Number of hydraulic fracturing fractures under different injection pressure sequences

为明确钻孔间距、压裂段布置形式、注压顺序对水力压裂裂缝发育的影响优先级，以裂缝扩展长度为评价指标进行对比分析。钻孔间距由 400 mm 增至 550 mm 时，裂缝长度由 1 600.08 mm 增至 2 000.10 mm，增长率约 25%；压裂段布置由平行式优化为交错式时，裂缝长度由 1 857.82 mm 增至 1 955.60 mm，增长率约 5.26%；不同注压顺序下裂缝扩展长度基本一致。综合对比可知，3 种因素对裂缝发育影响程度由大到小为钻孔间距、压裂段布置形式、注压顺序。

3 工程应用

对西部矿区某矿 403109 工作面定向长钻孔压裂参数及工艺进行优化。该工作面可采面积为 $5.148 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，可采长度为 2 340 m，倾向长度为 220 m，工作面范围煤层厚度为 22.9 m。该煤层上分层可采煤层平均厚度为 17 m，工作面每向前推进 1 m，产生落煤 3 740 m^3 ，瓦斯绝对涌出量为 27.49 m^3/min ，为保证回采工作面上隅角瓦斯不超限，需进行瓦斯预抽。现阶段工作面采用定向长钻孔群和普通钻孔相结合方式进行瓦斯抽采，定向长钻孔主要负责煤层上分层的瓦斯超前预抽。

3.1 定向长钻孔分段压裂促抽工程应用工艺优选

根据 403109 工作面地质条件及优选的压裂工艺，在 403109 回风巷采煤侧钻场内布置 3 个钻孔，孔深 560~600 m。1#钻孔距巷帮 60 m，2#钻孔距巷帮 110 m，3#钻孔距巷帮 160 m，孔间距 50 m。钻孔层位与巷道走向保持一致，垂直高度位于煤层顶板下方 3 m，使用 ZDY20000LD 型煤矿用履带式全液压定向钻机施工。定向长钻孔布置及钻孔分段压裂位置见图 9。

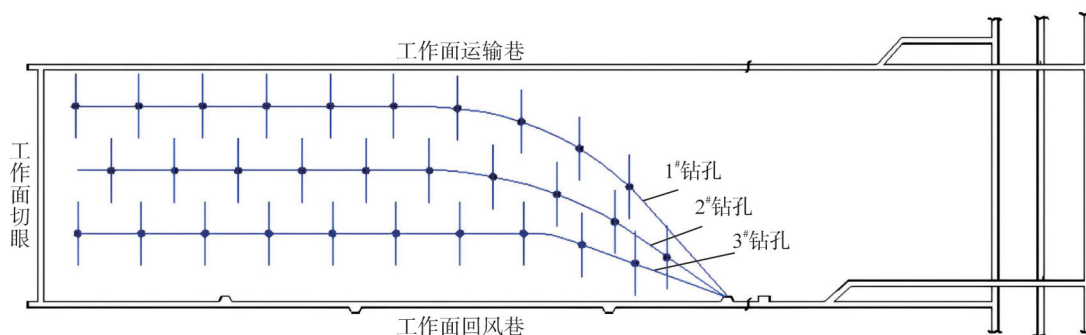


图9 定向长钻孔分段压裂位置示意

Fig.9 Schematic of segmented fracturing positions for directional long boreholes

小尺度模型与现场实际工程存在一定尺度差异,本文结论更侧重于规律揭示与机理阐释,而非直接进行尺寸外推。相关研究结果可为现场50 m间距定向长钻孔压裂设计提供理论依据与技术参考,在实际工程应用中仍需结合具体地质条件、煤岩力学参数与施工工艺进行调整。

(1) 多定向长钻孔间距优选

钻孔间距过小易引发孔间压裂干扰,形成短而密的裂缝,降低压裂效果;间距过大则会产生瓦斯空白带,削弱抽采效能。基于前文3个定向钻孔压裂缝网扩展规律分析,确定403109工作面合理钻孔间距为50 m。

(2) 多定向长钻孔压裂段布置形式优选

平行式分段压裂裂缝数量增幅更大,但交错式布置的裂缝长度更具优势,可有效填补夹层盲区、形成连续网状裂缝,实现瓦斯抽采全煤层覆盖。因此,采用交错式布置,通过错位分段消除段间空隙,可充分扩展裂缝、提升煤层透气性。

(3) 多定向长钻孔注压顺序优选

由前文研究结果可知,先两侧后中间(先压1#、3#钻孔,后压2#钻孔)的注压顺序,可使两侧钻孔裂缝在独立应力环境中扩展,避免应力集中,生成更多裂缝、扩大扩展范围,为最优注压方案。

本文提出的50 m钻孔间距、交错式布置及先两侧后中间的注压顺序,是基于403109工作面地质条件的优化施工方案,其适用性受煤体性质、钻孔轨迹、构造发育等因素影响,实际工程中可结合现场条件微调参数。但该参数组合对裂缝发育与瓦斯抽采效果的影响具有普遍参考价值,可为同类工程提供设计依据。

3.2 定向长钻孔分段压裂促抽工程应用效果分析

监测期内,1#钻孔瓦斯平均抽采浓度为18.80%(体积分数),钻孔瓦斯平均抽采纯量为

0.016 m³/min;2#钻孔瓦斯平均抽采浓度为26.60%,钻孔瓦斯平均抽采纯量为0.062 m³/min;3#钻孔瓦斯平均抽采浓度为16.21%,钻孔瓦斯平均抽采纯量为0.012 m³/min。相比普通钻孔,压裂钻孔瓦斯抽采浓度提高了3.39~5.56倍,瓦斯抽采纯量提高了4.00~8.83倍。除实施水力压裂措施外,压裂钻孔与常规瓦斯抽采钻孔的直径、深度、封孔工艺及抽采负压等关键参数保持一致。受巷道采掘影响,靠近巷道煤壁的定向钻孔周围瓦斯发生卸压,扩散至周围煤壁内,所以1#钻孔和3#钻孔抽采效果较差,2#钻孔抽采纯量较高。

4 结论

(1) 多定向长钻孔分段压裂时,适当增大钻孔间距可有效促进裂缝扩展范围的扩大。布孔方式优先选用压裂段交错式,相较于平行式,其更易形成广覆盖裂缝网络,提升煤体增透效果。注压顺序采用“先两侧、后中间”的方式可诱导产生更为密集的裂缝系统,其压裂效果显著优于其他顺序方案。

(2) 403109工作面每个定向长钻孔设定10个压裂段,各钻孔间距为50 m,压裂段布置形式采用交错式布置,以1#、3#、2#的顺序进行水力压裂。工程实践表明:与普通钻孔相比,采用定向长钻孔分段压裂后,钻孔瓦斯抽采浓度提升至3.39~5.56倍,瓦斯抽采纯量提高至4.00~8.83倍。需要说明的是,鉴于地质条件的差异性,该技术方案在具体应用时需根据现场实际工况进行适应性修正。

参考文献(References):

- [1] 胡千庭,刘继川,李全贵,等.煤层顶板分段水力压裂应力及裂缝演化试验研究[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1084-1095,1202.
Hu Qianting, Liu Jichuan, Li Quanguai, et al. Study on stress and fracture evolution of sectional hydraulic fracturing of coal seam roof [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52

- (6):1084-1095,1202.
- [2] 郭茂生,姬长发,刘宗鑫,等. 青海共和盆地干热岩热储层人工水力致裂裂缝扩展规律[J]. 西安科技大学学报,2023,43(3):514-522.
Guo Maosheng, Ji Changfa, Liu Zongxin, et al. Artificial hydraulic fracture propagation law of hot dry rock reservoir in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(3):514-522.
- [3] 吕帅锋,王生维,刘洪太,等. 煤储层天然裂隙系统对水力压裂裂缝扩展形态的影响分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2590-2601.
Lyu Shuaifeng, Wang Shengwei, Liu Hongtai, et al. Analysis of the influence of natural fracture system on hydraulic fracture propagation morphology in coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2590-2601.
- [4] Zhang J F, Sun S Q, Li S G, et al. Research and engineering practice of high-efficiency gas extraction technology by hydraulic fracturing: a case study of Huanglong Coalfield in China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(10): 1012.
- [5] 时培涛,闫浩,张吉雄,等. 采动应力干扰下分段压裂裂缝竞争扩展规律及诱导应力场演化机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2026,43(1):173-187.
Shi Peitao, Yan Hao, Zhang Jixiong, et al. Fracture competition propagation patterns and induced stress field evolution mechanisms during staged fracturing with mining-induced stress disturbance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2026,43(1):173-187.
- [6] 贾秉义,陈冬冬,吴杰,等. 煤矿井下顶板梳状长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采实践[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 70-76.
Jia Bingyi, Chen Dongdong, Wu Jie, et al. Practice of enhanced gas extraction by staged fracturing with comb-shaped long hole in coal mine roof[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(2):70-76.
- [7] 王建利,陈冬冬,贾秉义. 韩城矿区碎软煤层顶板梳状孔水力压裂瓦斯抽采工程实践[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 17-21.
Wang Jianli, Chen Dongdong, Jia Bingyi. Practice of gas drainage by hydraulic fracturing of roof pectination boreholes in broken soft coal seam in Hancheng mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 17-21.
- [8] 石欣雨,文国军,白江浩,等. 煤岩水力压裂裂缝扩展物理模拟实验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1145-1151.
Shi Xinyu, Wen Guojun, Bai Jianghao, et al. A physical simulation experiment on fracture propagation of coal petrography in hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society,2016, 41(5): 1145-1151.
- [9] 杨俊哲,郑凯歌,王振荣,等. 坚硬顶板动力灾害超前弱化治理技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3371-3379.
Yang Junzhe, Zheng Kaige, Wang Zhenrong, et al. Technology of weakening and danger-breaking dynamic disasters by hard roof[J]. Journal of China Coal Society,2020, 45(10): 3371-3379.
- [10] 牛同会. 分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 50-59.
Niu Tonghui. Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology,2022,50(8): 50-59.
- [11] 康红普,冯彦军,张震,等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 31-44.
Kang Hongpu, Feng Yanjun, Zhang Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology,2023, 51(1): 31-44.
- [12] 蒲春生,郑恒,杨兆平,等. 水平井分段体积压裂复杂裂缝形成机制研究现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1734-1743.
Pu Chunsheng, Zheng Heng, Yang Zhaoping, et al. Research status and development trend of the formation mechanism of complex fractures by staged volume fracturing in horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica,2020, 41(12): 1734-1743.
- [13] 梁顺,张渊,落弘业,等. 多孔水力压裂缝网耦合扩展规律及硬岩巷道快掘工艺优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 807-822.
Liang Shun, Zhang Yuan, Luo Hongye, et al. Study on the coupling propagation laws of multi-borehole hydraulic fracturing networks and the process optimization for rapid excavation in hard rock roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2025, 42(4): 807-822.
- [14] 胡千庭,刘继川,李全贵,等. 煤层分段水力压裂渗流诱导应力场的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 761-769.
Hu Qianting, Liu Jichuan, Li Quanguai, et al. Numerical simulation of seepage induced stress field in sectional hydraulic fracturing of coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(4): 761-769.
- [15] 孙四清,李文博,张俭,等. 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 1-15.
Sun Siqing, Li Wenbo, Zhang Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2022, 50(8): 1-15.
- [16] 孙四清,张群,闫志铭,等. 碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2337-2344.
Sun Siqing, Zhang Qun, Yan Zhiming, et al. Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(9):2337-2344.
- [17] 孙四清,张群,龙威成,等. 煤矿井下长钻孔煤层瓦斯含量精准测试技术及装置[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 1-5.
Sun Siqing, Zhang Qun, Long Weicheng, et al. Accurate test technology and device for coal seam gas content in long boreholes in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration,2019, 47(4): 1-5.
- [18] 李国栋,郑凯歌,陈冬冬. 赵固二矿本煤层定向长钻孔水力压裂增透技术研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(7): 53-57.
Li Guodong, Zheng Kaige, Chen Dongdong. Study on permeability enhancement technology through overall hydraulic fracturing of long directional hole in zhaogu No. 2 coal mine mining coal seam[J]. Coal Engineering, 2019, 51(7): 53-57.
- [19] 冯仁俊. 煤层群分层水力压裂与多层综合压裂增透效果对比研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(12): 21-28.
Feng Renjun. Comparative study on permeability enhancement effect of separate-layer fracturing and multi-layers comprehensive fracturing in coal seam group[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(12): 21-28.