



煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用

康红普 冯彦军 张震 赵凯凯 王鹏

引用本文：

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. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术

High efficiency gas drainage technology of hydraulic fracturing with directional long drilling in underground coal mine
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/100da6c3-a65e-4274-9fe9-502c6c1e88b7>

井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践

Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fbd1006f-bb80-476d-bb12-22c188a6a9f4>

顶板定向钻孔水压致裂工作面强矿压控制试验研究

Experimental study on controlling strong strata behavior in mining face by cracking roof with directional hole hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 57–62 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/830bfec0-382a-4e99-b2d9-835da25b312e>

碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用

Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 91–100 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/204a7b71-ca79-44e7-8801-b7e71f5238be>

分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究

Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 50–59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0776b09b-df68-43fc-9911-6c9b63865d6b>

煤矿井下智能压裂泵系统研究

Research on intelligent fracturing pump system in coal mine
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 264–269 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fd2ba286-8975-44b9-8add-42676b678d41>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

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.

煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用

康红普^{1,2}, 冯彦军^{1,2}, 张震^{1,2}, 赵凯凯^{1,2,3}, 王鹏^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 水力压裂技术在煤矿坚硬、完整顶板岩层弱化及高应力巷道卸压方面得到越来越广泛的应用。以陕西曹家滩煤矿特厚煤层综放开采工作面、特厚稳定顶板岩层为工程背景, 开展了顶板岩层地力学测试、可压性试验, 水力裂缝扩展理论分析及三维数值模拟, 提出井下工作面定向钻孔区域水力压裂顶板层位、压裂钻孔布置与参数确定方法及压裂工艺。在井下进行了工业性试验和系统的地面微震实时监测, 获得了顶板水力压裂裂缝空间展布特征。同时, 进行了液压支架工作阻力, 工作面周期来压步距及持续距离, 来压动载系数及顶板岩层破断能量监测与分析, 综合评价了水力压裂效果。初步建立了集压裂层位确定与参数设计, 井下定向钻孔压裂工艺与装备, 水力裂缝空间展布监测与压裂效果综合评价为一体的煤矿井下定向钻孔水力压裂成套技术。井下试验结果表明: 在曹家滩煤矿井下地应力状态下(最小主应力为垂直应力), 水力裂缝以水平裂缝为主, 沿钻孔两侧扩展平均距离为80 m左右, 有效弱化了工作面范围内上覆坚硬、完整顶板, 实现了区域顶板改造。压裂区域工作面强矿压显现显著减弱, 确保了工作面安全生产。最后, 分析了水力压裂存在的问题, 展望了技术发展方向。

关键词: 煤矿井下; 区域水力压裂; 岩层控制; 定向钻孔; 压裂层位; 压裂参数设计

中图分类号: TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)01-0031-14

Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application

KANG Hongpu^{1,2}, FENG Yanjun^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, ZHAO Kaikai^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The application of hydraulic fracturing technology on rock fracturing for hard and complete roof, and destressing for roadways with high stresses is increasingly widespread. Based on a top coal caving working face with extra-thick coal seam and complete roof layers in the Caojiatan coal mine in Shaanxi Province, the roof rock geomechanical measurements, compressibility tests, theory of hydraulic fracture propagation, and 3D numerical simulation were carried out, and the determination approaches for fracturing rock horizon above a working face, fracturing borehole layout and parameters, and fracturing technology were put forward. The underground industrial trial and a comprehensive surface microseismic monitoring with actual time were conducted, and the spatial distribution characteristics of hydraulic fractures in roof were obtained. Meanwhile, shield resistance, periodic weighting step distance and duration distance, weighting dynamic load coefficient, and roof breaking energy were monitored and analyzed, and the hydraulic fracturing effect was synthetically evaluated. A complete set of technology for hydraulic fracturing with directional boreholes in underground coal mines were preliminarily established, which includes determination of fracturing rock horizon and parameter design, fracturing technology and equipment with directional boreholes, monitoring of hydraulic fracture spatial distribution, and comprehensive evaluation of hydraulic fracturing effect. The underground

收稿日期: 2022-11-22 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2004

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603003); 天地科技开采设计事业部创新基金重点资助项目(TDKC-2022-ZD-02)

作者简介: 康红普(1965—), 男, 山西五台人, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师。E-mail: kanghp@163.com

trial pointed out that: on the in-situ stress regime in the Caojiatan coal mine, that is the minimum principal stress is vertical stress, the hydraulic fractures were mainly horizontal fractures with a propagation distance of about 80 m on both sides of boreholes, the hard and complete roofs above the working face were effectively weakened, and regional roof reconstruction was achieved. The intensive ground pressure appearance of the working face was obviously reduced in the fracturing area, and production safety was ensured. Finally, the existing issues associated with hydraulic fracturing were discussed, and technical developments were envisaged.

Key words: underground coal mines; regional hydraulic fracturing; strata control; directional borehole; rock fracturing horizon; fracturing parameter design

0 引言

水力压裂技术作为坚硬顶板弱化、围岩卸压的有效方法,在采煤工作面岩层控制、高应力与强采动巷道围岩控制及冲击地压防治中得到越来越广泛的应用^[1-3]。近年来,很多学者开展了水力压裂理论、实验室试验、数值模拟、井上下监测与压裂效果评价等研究工作。在水力压裂裂缝扩展规律及影响因素,水力压裂岩层弱化和围岩卸压机理,水力压裂方法选择与参数设计,水力压裂工艺与设备及监测仪器与压裂效果分析等方面,取得大量研究成果^[4-8],并在井下应用中获得较好效果。

按水力压裂装备地点可分为地面压裂和井下压裂。前者压裂设备放置在地面,从地面打钻孔至目标岩层进行压裂;后者压裂设备放置在井下巷道或硐室中,向目标岩层打孔并压裂。地面压裂按钻孔布置可分为垂直钻孔和水平钻孔压裂,后者先从地面打垂直钻孔,然后造斜进入目标岩层,在目标岩层中钻进长水平孔进行压裂。地面压裂设备功率大、压裂泵组的流量大、压力高,加之钻孔中一般进行射孔,裂纹扩展距离长,压裂覆盖范围大,可对整个采煤工作面甚至采区上方岩层进行压裂。大同矿区、彬长矿区及榆林中煤能源大海则煤矿等采用地面水力压裂方法,弱化煤层上方坚硬完整顶板岩层,使其采后易于垮落,显著减小了采煤工作强矿压^[9],对回采巷道的维护也非常有利。地面压裂适合压裂工作面上方高位坚硬顶板。地面压裂的主要缺点是设备昂贵、地面场地大且需要配套交通、运输设施。

井下压裂按钻孔方式与压裂规模可分为井下局部压裂和区域压裂。井下局部水力压裂是应用最早、使用面最广的压裂方式。一般在区段平巷或开切眼采用普通钻机向要压裂的岩层钻进直孔,钻孔深度多为20~50 m。为了产生定向裂缝,可采用切槽钻头或高压水射流在钻孔中形成槽或缝^[10],诱导裂缝沿切槽或缝的方向扩展。由于钻孔深度比较小,所以采用的钻进与压裂设备重量轻、体积小、灵活方便。在采煤工作面,应用最多的是工作面初次放顶,在开

切眼顶板布置钻孔,压裂上部坚硬完整岩层,使工作面初采期间顶板能及时垮落,减小初次来压步距^[11-12];钻孔也可在区段平巷中向工作面顶板实施,弱化或切断工作面后方、侧向悬顶,减轻工作面矿压显现。

对于巷道水力压裂卸压,按钻孔施工地点可分为本巷压裂与邻巷压裂。本巷压裂用于减少本工作面开采对区段平巷的采动影响。在区段平巷受到工作面采动影响之前,以与两巷轴线呈一定角度的方向布置倾斜钻孔至顶板目标岩层进行压裂,使工作面采过后顶板能及时垮落,减小工作面超前支承压力大小与影响范围,从而降低两巷变形^[13]。邻巷压裂是在被保护巷道的相邻巷道中布置钻孔进行压裂,一般用于复用巷道^[14]。不论是采煤工作面还是巷道,井下局部压裂由于钻孔浅、压裂岩层低,压裂范围小,有时卸压效果不能满足要求。

为了解决地面压裂与井下局部压裂存在的问题,提出井下区域水力压裂方法。其核心是在井下巷道或专门的钻场中,采用定向钻机向工作面或巷道上方目标岩层钻进长水平钻孔,钻孔长度可达500~1 000 m,进行分段压裂,压裂范围可覆盖整个工作面甚至更大^[15],起到类似地面长水平孔压裂的作用。与地面压裂相比,井下区域压裂具有不需要地面场地、设备体积较小、钻孔工程量少等优势,是煤矿水力压裂的发展方向。

井下区域水力压裂法与传统的顶板深孔爆破相比也具有明显优势:可形成连续不断的弱化带,覆盖范围大;施工的安全性好,不像爆破法对巷道产生强烈的震动,产生有害气体。主要缺点是定向钻孔的费用较高。

中煤科工开采研究院有限公司根据我国煤层顶板岩层的特点,开发了煤矿井下区域水力压裂成套技术与装备,并在多个煤矿得到成功应用。笔者以陕煤集团曹家滩煤矿122108工作面为工程背景,开展井下区域水力压裂技术研究与应用。介绍水力裂缝扩展规律、关键压裂层位选择、压裂参数与方案确定、压裂工艺与仪器装备、微地震实时监测、综合指标效果评价等内容,最后提出水力压裂技术发展方向。

1 试验点地质与生产条件及现场测试

1.1 地质与生产条件

陕西陕煤曹家滩煤矿位于榆神矿区,设计生产能力为1.5 Mt/a。122108工作面开采2⁻²煤层,埋深255~338 m,可采厚度8.08~12.36 m,平均11.22 m,属于特厚煤层、特厚稳定顶板岩层工作面条件。采用综放开采方法,割煤高度6 m,放煤高度4 m。工作面液压支架(基本架)参数:支架高度3 400~6 300 mm,工作阻力21 000 kN。

2⁻²煤层顶板岩层分布如图1所示。顶板岩性为细粒砂岩、中粒砂岩、砂质泥岩及粉砂岩,其中细粒砂岩、中粒砂岩层理不发育,较坚硬。砂质泥岩、粉砂岩较软。煤层顶板0~43 m、60~120 m存在厚硬岩层。

柱状	岩性	厚度/m
.....	细粒砂岩	18.2
.....	粉砂岩	3.5
.....	细粒砂岩	
.....	细粒砂岩	12.8
.....	中粒砂岩	14.7
.....	细粒砂岩	10.8
.....	粉砂岩	16.9
.....	砂岩泥岩	
.....	细粒砂岩	12.7
.....	中粒砂岩	22.8
.....	细粒砂岩	7.6
.....	煤层	10

图1 曹家滩煤矿2⁻²煤层顶板岩层分布

Fig.1 Roof strata distribution of coal seam 2⁻² in Caojitan Coal Mine

坚硬顶板岩层导致122108工作面开采时矿压显现强烈。虽然工作面初采时采用了爆破放顶,但初次来压步距仍达156 m,初次来压强烈。工作面推采至3 530.8~3 547.5 m,发生一次强来压现象。工作面整体来压范围为20~125号支架,来压期间支架安全阀开启比例为42.8%,周期来压步距29.3 m,持续长度16.7 m,平均动载系数1.61,最大动载系数1.73,支架工作阻力急剧升高,立柱压力急剧升高至

50 MPa,工作面采高急剧下降1.8~2.0 m,下沉速度为0.15 m/h。造成支架立柱、平衡油缸大量损坏,导致工作面无法正常生产。

为了解决特厚煤层特厚坚硬顶板工作面强矿压问题,开展了井下区域定向水平钻孔区域压裂技术研究与试验。首先进行了试验地点地应力测量、顶板岩层强度测试及可压性试验。

1.2 顶板岩层地质力学测试

采用小孔径水压致裂地应力测量装置,在122108辅助运输巷顶板中进行了2个测点的地应力测量。第一测点最大水平主应力 σ_h 为24.9 MPa,最小水平主应力 σ_h 为13.4 MPa,垂直应力 σ_v 为8.1 MPa,地应力场属于 $\sigma_h > \sigma_h > \sigma_v$ 类型,水平应力占明显优势。第二测点最大水平主应力21.9 MPa,最小水平主应力12.1 MPa,垂直应力7.8 MPa。第二测点地应力值均略小于第一测点,地应力场类型一致。

采用电子钻孔窥视仪对顶板岩层结构进行了观察。钻孔直径75 mm,长度100 m,与水平面成65°。钻孔窥视结果表明:顶板岩层在12.0、13.8~16.0、30.0~31.4、33.2、34.8、38.5、53.2、60.2 m等位置存在明显的裂隙,其余位置岩层较完整。定向压裂孔布置层位应选择完整岩层,避开上述含裂隙层位。

采用小孔径钻孔触探法测定顶板岩层抗压强度,岩层抗压强度测试结果如图2所示。测试钻孔深度为60 m,其中孔口附近为煤层,抗压强度大多在20~30 MPa;之后强度不断增加,到10 m后趋于稳定,但一些位置也出现明显的波动。10 m以上顶板岩层抗压强度平均为52 MPa,其中在30、36、43、55 m的位置上出现超过60 MPa的坚硬岩层。

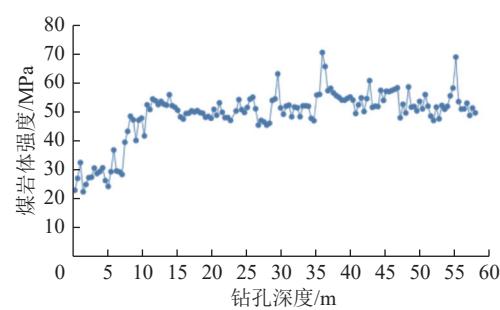


图2 顶板岩层抗压强度分布

Fig.2 Compressive strength distribution of roof rock layers

1.3 顶板岩层可压性试验

为了评价顶板岩层的可压性,在122108辅助运输巷向顶板钻孔进行了小型压裂测试。钻孔直径95 mm,仰角76°,钻孔深度100 m。压裂泵站压力为62 MPa,排量为90 L/min。

典型的压裂曲线如图3所示。压裂过程中水压增加比较快且压力平稳,水压变化范围为18.8~24.2 MPa,特别是在87、51~57、41~48、29~33、24 m等位置可压性很好。

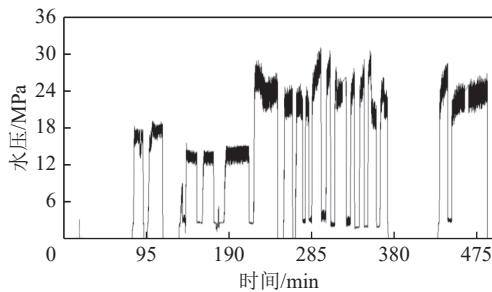


图3 顶板岩层水力压裂曲线

Fig.3 Hydraulic fracturing curve of roof rock layers

2 岩层水力压裂裂缝扩展规律分析

2.1 岩层水力裂缝扩展影响因素

岩层中水力裂缝扩展涉及岩石变形、裂缝流体流动及断裂扩展等多场耦合复杂力学问题。影响水力裂缝扩展的关键因素包括:岩石力学性质、地应力状态、天然裂缝以及施工参数等^[16]。文献[17]总结了地质和工程因素下水力裂缝的扩展形态和规律(表1)。地应力是影响裂缝扩展形态的主要地质因素,而层理及天然裂缝等弱面则是决定能否形成缝网的关键地质因素,合理的压裂施工参数能够引导裂缝充分扩展。

2.2 岩石水力裂缝扩展类型与模型

根据水平孔压裂起裂位置可将起裂方式分为3类^[18]:岩石基质体的张性起裂、天然裂缝的张拉起裂及天然裂缝的剪切破坏起裂。根据天然裂缝是否开

启将水力裂缝和天然裂缝的交互作用分为5类:剪切天然裂缝后穿过,直接穿过天然裂缝,从天然裂缝一端穿过,同时从天然裂缝两端穿过,从某一弱面穿过。

水压裂缝的几何形态(长、宽、高)是水力压裂设计的关键,已经提出多种水力压裂模型描述裂缝的几何形态与延伸规律^[19]。水力裂缝扩展模型经历了从二维度到三维,从单一裂缝、多条裂缝到裂缝网络的发展过程。二维模型假设缝高恒定,包括KGD和PKN模型,适用于裂缝纵向扩展受到限制的情况。拟三维模型可以模拟裂缝高度和长度方向共同扩展,但是裂缝形状和方位是固定的。平面三维模型则利用三维固体力学模型进行岩石变形计算,更加准确。所有平面模型均忽略了裂缝复杂形态,无法处理裂缝面偏转问题。适应于应力差较大、天然裂缝不发育的岩层。全三维模型考虑岩石的三维变形和裂缝内部流体的二维流动,能够模拟水力裂缝的空间扭转。复杂裂缝模型考虑了多簇裂缝扩展和天然裂缝的影响,其难点在于天然裂缝的地质描述和水力裂缝与天然裂缝的相交准则。

实际岩层压裂工程中,裂缝处于复杂应力场下,裂缝尖端附近的应力场不是单纯的I型、II型或III型,I-II复合型裂缝是最主要裂缝形式。复合型裂缝一般不按照原方向扩展,针对I-II复合型裂纹建立了多种断裂准则,预测裂缝扩展角与断裂条件,主要包括:最大周向应力理论、应变能密度因子理论、最大能量释放率理论等。

上述理论分析为122108工作面顶板岩层压裂提供了理论指导。如实测地应力场类型为 $\sigma_h > \sigma_v > \sigma_v$ 型,属于逆断层应力状态,在这种状态下会产生水平裂缝。

表1 水力裂缝扩展影响因素汇总^[17]

Table 1 Influence factors of hydraulic fracture propagation^[17]

类别	亚类	裂缝扩展规律
岩石力学性质	脆度	综合脆性指数IB>50,容易产生复杂缝网;IB<50,倾向于产生单一裂缝
	K_{IC}	断裂韧性越小,裂缝越容易扩展
	$K_{ICV}-K_{ICH}$	差值越大,越倾向于沿水平方向扩展;差值越小,越倾向于产生复杂裂缝网
	K_{IC} 层间差异	水力裂缝不易穿透高断裂韧性的相邻岩层
地应力	地应力模式	正断层和滑移断层应力状态下压裂产生垂直缝;逆断层应力状态下产生水平裂缝
	水平地应力差异系数	<0.3,形成复杂缝网;0.3~0.5,在较高压力下可以形成复杂缝网;>0.5,单一裂缝
	层间最小水平应力差	0~4,裂缝可以穿过隔层;4~8,部分穿过隔层;>8无法穿过隔层
层理	层理面强度	低(<0.1),无法穿过层理,产生T形缝;中(0.1~0.2),产生伴随层理面滑移的钝化缝;高(>0.3),产生穿透层理的穿层缝
	逼近角	<45°~60°,水力裂缝沿天然裂缝扩展;>60°~75°,应力差<4 MPa,沿天然裂缝扩展;
天然裂缝	开度与渗透率	>60°~75°,应力差>4 MPa,穿透天然裂缝

3 岩层水力压裂裂缝扩展数值模拟

采用三维水力压裂数值模拟(XSite)^[20]开展顶板岩层水力裂缝三维扩展分析。

3.1 钻孔周围水力压裂裂缝三维扩展特征

基于122108工作面实测地应力数据(2个测点平均值),设置钻孔压裂三维数值模型,考察钻孔方位和地应力场对钻孔周边水力裂缝三维形态与空间展布的影响。模型尺寸为1 m×1 m×1 m,在模型中

心设置钻孔,钻孔长度为0.4 m,半径为0.05 m。3个模型钻孔倾角分别设置为0°、45°、90°,模型采用岩石力学参数如下,模拟结果如图4所示。

泊松比ν	0.221
弹性模量E/GPa	59.5
抗拉强度σ _t /MPa	6.6
断裂韧度K _{IC} /(MPa·m ^{1/2})	0.2

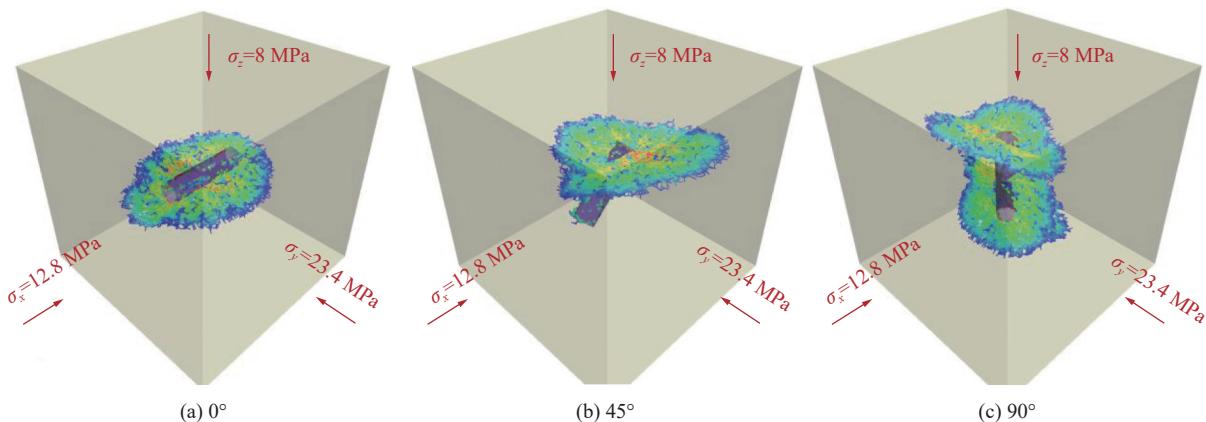


图4 不同钻孔倾角下水力裂缝三维扩展形态

Fig.4 Propagation of hydraulic fracture with different inclination angle of borehole

1)钻孔倾角为0°时,在最小主应力法平面与钻孔相交线附近产生微裂缝,微裂缝逐渐汇聚并在钻孔两侧形成破裂线。裂缝以钻孔为中心向四周扩展,最终形成了较为平直的水平裂缝,裂缝形态近似为椭圆状。

2)钻孔倾角为45°时,并未沿着孔身全长形成破裂线,而在不同位置产生有效微裂纹并汇聚成为宏观裂缝。裂缝从钻孔中部起裂后向水平面转向,并与孔口处的水平裂缝连接成整体裂缝,远离钻孔后裂缝趋向于水平面扩展。

3)钻孔倾角为90°时,在孔口和孔身处形成了方向不同的宏观裂缝,在中间主应力法平面与钻孔相交线附近产生微裂缝并沿钻孔全长形成破裂线,孔身发育的宏观裂缝为垂直缝且平行于最大主应力方向,孔口处裂缝则趋向于水平面扩展。

对比3个模型可见,在远场应力与孔内水压的作用下钻孔产生微破裂,钻孔方位改变导致孔壁应力变化,因此裂缝在钻孔不同位置处起裂,微裂缝不断汇聚成为宏观裂缝,在此过程中裂缝发生空间转向,并趋向于垂直最小主应力。

以钻孔倾角45°模型为对照模型,改变最小主应力方向,设置3种地应力场:σ_y=8 MPa;σ_z=8 MPa;

σ_x=8 MPa,其他参数不变。研究地应力场对裂缝空间展布的影响规律。如图5所示,图5a中裂缝近似为垂直缝,形态接近椭圆状,并未发现显著扭转;图5b中宏观裂缝趋向水平扩展;图5c中在孔口处的裂纹发育更为充分,成为优势分支。孔身处裂缝扩展相对受限,并趋向于σ_x法平面偏转。对比3个模型可见,应力场改变引起孔壁应力状态变化,裂缝在钻孔不同位置处起裂,但最终汇聚形成的宏观裂缝趋向垂直于最小主应力方向。

3.2 复合岩层水力裂缝穿层扩展特征

建立复合岩层水力压裂模型,模型尺寸为5 m×5 m×5 m,在模型中心预制裂缝辅助起裂,忽略起裂点附近裂纹扭曲。为研究层间岩性差异影响规律,在图6所示模型中,上中下三层弹性模量E分别设置为60、20、6 GPa。模拟结果显示裂纹以起裂点为中心向四周扩展,裂纹平面垂直于x方向(σ_x为最小主应力)。当裂纹进入高弹性模量岩层,形成较大面积的破裂面,裂纹扩展优势明显,测量得裂纹向上穿层最大深度1.45 m。在低弹性模量岩层中裂纹尺度相对较小,向下穿层最大深度为0.2 m。高弹性模量岩层促使水力裂纹穿层扩展,而低模量岩层不利于裂纹穿层扩展。

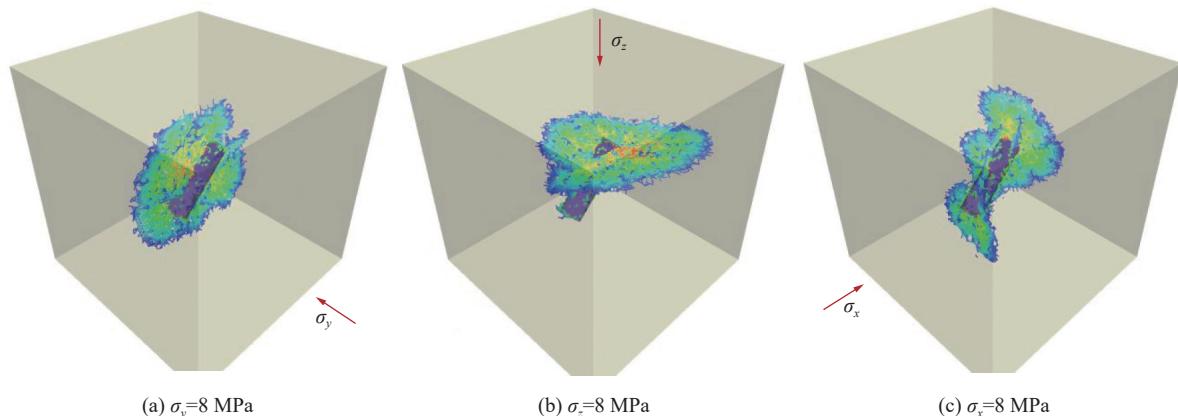


图 5 不同应力场下裂缝三维扩展形态

Fig.5 Propagation of hydraulic fracture with different stress fields

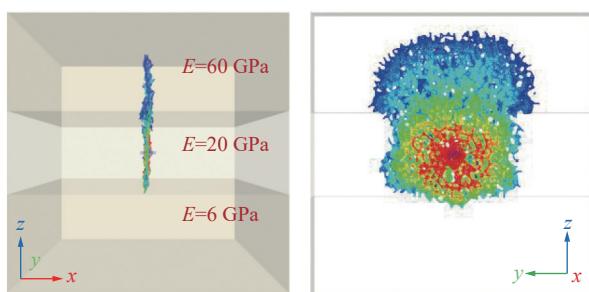


图 6 不同弹性模量岩层中裂缝穿层扩展特征

Fig.6 Propagation of hydraulic fractures in strata with different Young's modulus

图 7 所示模型, 上中下三层断裂韧度分别设置为 $2, 1, 0.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 裂缝呈非均匀扩展趋势, 在低断裂韧度岩层中扩展优势明显, 测得向上穿层最大深度 0.23 m, 向下穿层最大深度为 1.05 m。

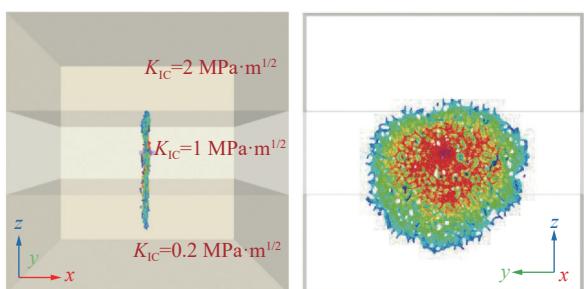


图 7 不同断裂韧度岩层中裂缝穿层扩展特征

Fig.7 Propagation of hydraulic fractures in strata with different fracture toughness

为探究层间应力差异影响规律,图8所示模型上中下三层最小水平应力 σ_x 分别设置为6、8、10 MPa,其他应力相同($\sigma_z=12.8$ MPa, $\sigma_y=23.4$ MPa)。测得向上穿层最大深度1.05 m,向下穿层最大深度为0.24 m,低应力岩层中裂隙扩展优势显著。

为探究岩体结构面影响规律,在模型中设置 2

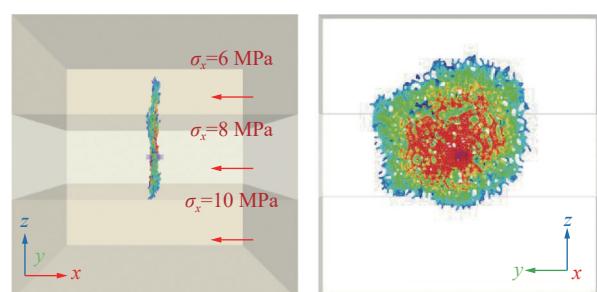


图 8 不同水平最小主应力岩层中裂缝穿层扩展特征

Fig.8 Propagation of hydraulic fractures in strata with different minimum principal stress

个水平矩形结构面,尺寸为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$,结构面力学参数取自文献[21],应力场设置为 $\sigma_x = 8\text{ MPa}$, $\sigma_y = 12.8\text{ MPa}$, $\sigma_z = 23.4\text{ MPa}$ 。图9展示了2种压裂液黏度下裂缝扩展过程,清水(黏度 $1\text{ mPa}\cdot\text{s}$)压裂时,裂缝初始呈椭圆形态沿垂向扩展,当遭遇上下两侧的结构面后垂向扩展终止,裂缝被限制在两侧结构面之间。随着压裂进行,裂缝在横向继续扩展,未能直接穿越结构面,裂缝横向扩展超过结构面尺寸后,呈现沿原方向继续绕道扩展的趋势。采用较高黏度($15\text{ mPa}\cdot\text{s}$)压裂液,发现水力裂缝从结构面中部直接穿越。软弱结构面张开和剪切活化导致水力裂缝缝内水压损失及缝尖钝化,阻碍水力裂缝穿层扩展。提高液体黏度有助于压力传导进而促进裂缝穿层扩展。有限尺寸结构面仅在局部范围内阻碍水力裂缝扩展,并未改变裂缝的主要扩展方位,通过改变施工参数可以有效控制裂缝穿层扩展。

3.3 工程尺度水力裂缝扩展分析

基于 122108 工作面底板岩层条件, 建立工程尺度数值模型, 忽略天然裂缝的影响, 分析顶板细砂岩水力压裂裂缝空间方位及尺度。图 10 所示模型尺

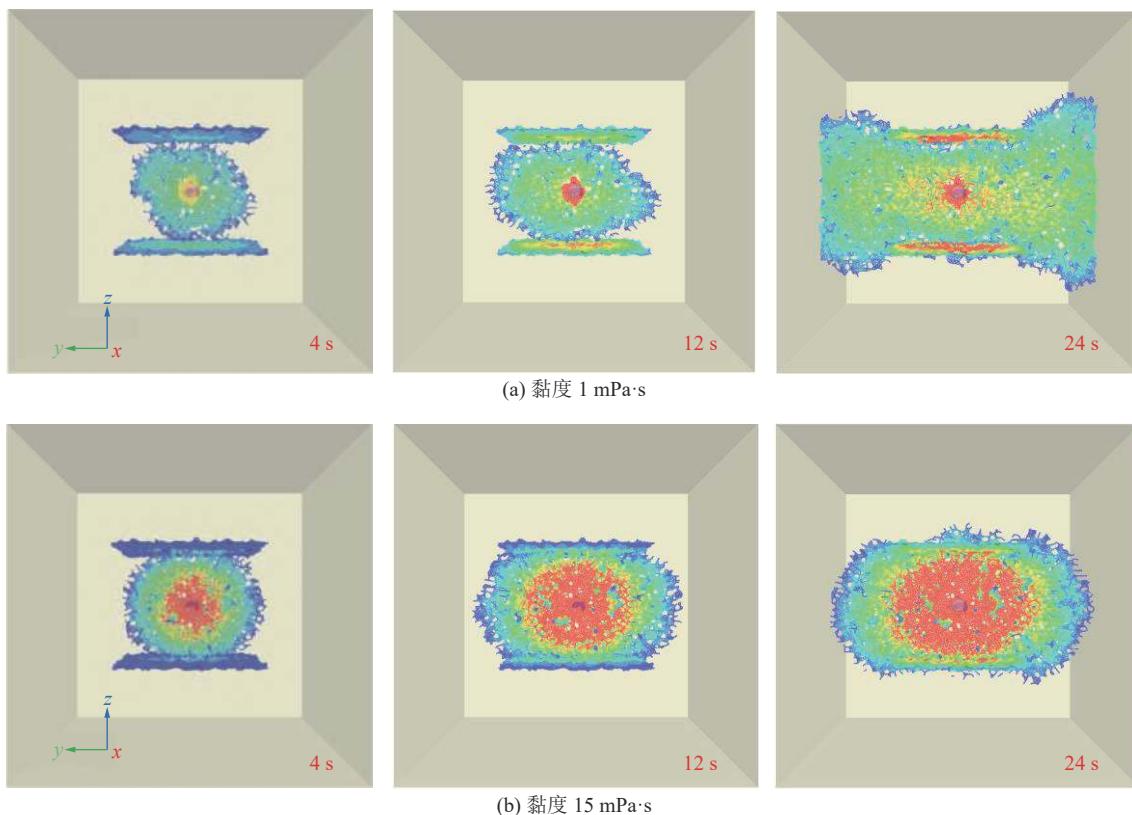


图 9 结构面赋存条件下裂缝三维扩展特征

Fig.9 Propagation of hydraulic fractures in strata under presence of structural plane

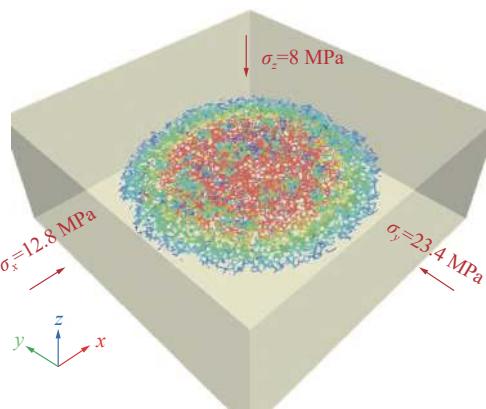


图 10 工程尺度水力压裂数值模型

Fig.10 Numerical modeling of large-scale hydraulic fracturing

寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, 展示裂缝为流量 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 、压裂 90 min 后的结果。压裂形成的宏观裂缝近似椭圆状, 以起裂点为中心沿着水平面向四周展布。在水平方向扩展较大距离而在垂直方向未见显著扩展。在此种应力条件下, 主裂缝为水平裂缝并对顶板岩层进行有效分层改造。**图 11** 展示了宏观裂缝在 x 方向扩展距离和裂缝扩展面积, $0\sim 15 \text{ min}$ 裂缝扩展距离快速增加, $15\sim 90 \text{ min}$ 裂缝扩展距离增速减缓, 裂缝扩展面积近似呈直线增长。在 15 、 60 、 90 min 时裂缝扩展距离分别为 46.1 、 70.0 、 78.2 m , 裂缝扩展

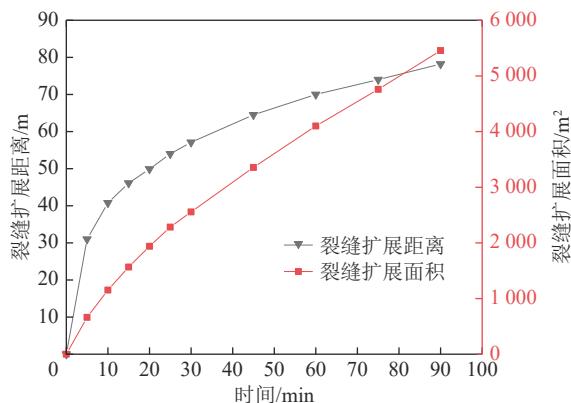


图 11 工程尺度水力压裂数值模型裂缝扩展尺寸

Fig.11 Feature size simulated by numerical model of large-scale fracturing

面积分别为 1566 、 4100 、 5455 m^2 。

模型未考虑天然裂缝分布、岩体非均质性、非连续、各向异性以及应力场变化等因素的影响。设置数值模型需判别主次影响因素, 根据反馈数据校正模型, 为工程设计提供更具价值的参考, 是未来发展方向。

4 井下水力压裂试验

井下定向钻孔水力压裂试验包括压裂层位选择、水力压裂技术参数、压裂装备与仪器、技工工艺及缝

网监测及效果评价等内容。

4.1 水力压裂层位选择

122108工作面出现强矿压、液压支架损坏的核心原因是工作面上部存在多层完整坚硬岩层，煤层采过后顶板不能及时垮落。另外，开采煤层厚度大、产量高也是一个重要原因。因此，确定合理的压裂层位非常关键。

基于上述顶板岩层钻孔结构观察、岩层强度原位测量、地应力测量及岩层可压性试验结果，结合钻孔柱状、工作面矿压显现特征、采高及经济性原则，综合确定压裂层位为顶板以上10、23、38m。

4.2 水力压裂参数设计

水力压裂参数包括定向孔布置、泵注排量、泵注液量、压裂间隔及压裂时长等。技术参数确定依据有地应力、岩石力学参数、渗透率、孔隙率及压裂液性能等，确定压裂参数的方法有理论计算、数值模拟及经验类比法等。

基于上述的理论研究、数值模拟及已有的经验，提出122108工作面顶板岩层压裂参数设计。压裂钻孔布置如图12所示。压裂工程分两期，每期沿工作面走向500m，共1000m。顶板岩层中共布置3排钻孔，分别位于顶板以上10、23、38m层位，每排钻孔数量分别为6、5、6。

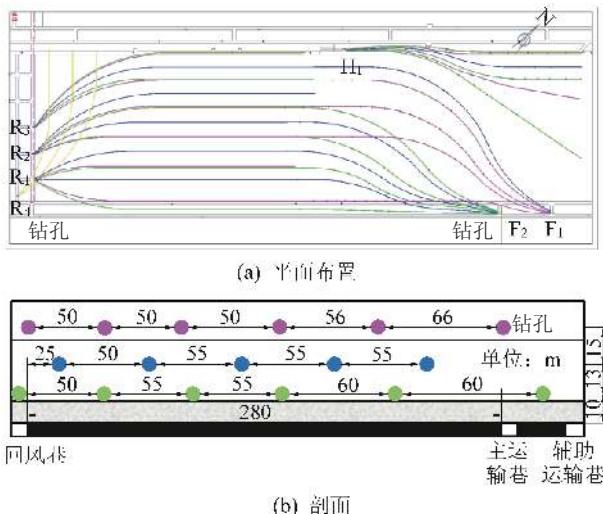


图12 曹家滩煤矿井下区域水力压裂钻孔布置

Fig.12 Borehole layout of regional hydraulic fracturing in Caojitan Coal Mines

4.3 水力压裂工艺

水力压裂工艺如图13所示。钻孔和压裂地点位于回撤通道、区段平巷的钻场中，定向钻孔深度为500~800m。采用跨式封隔器封闭压裂段、后退式分段压裂工艺。

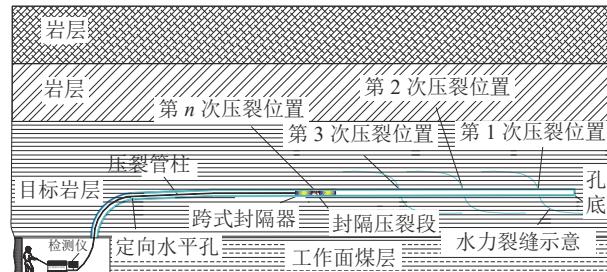


图13 井下定向钻孔分段水力压裂工艺示意

Fig.13 Staged hydraulic fracturing of directional drilling of roof strata in underground coal mine

采用的主要设备包括履带式全液压定向钻机、井下专用大流量压裂泵组、压裂工具串、工况监测、安全监控仪器等。

在井下压裂过程中，实时监测了压力和流量变化，典型压裂曲如图14所示。压裂层位为23m，压力变化范围为17.7~26.8 MPa。裂缝扩展压力平稳，排量为63.3~67 m³/h，压裂时长平均50 min，压裂间隔为20~25 m，根据周期来压步距确定。压裂总时长为334.3 h，注入水量共计18 793 m³。

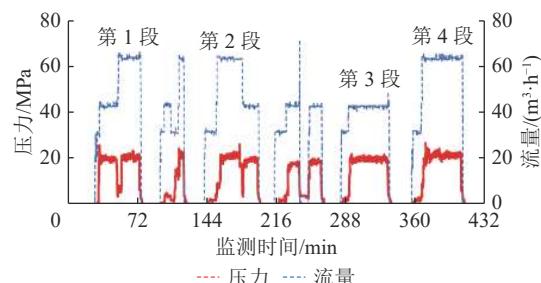


图14 122108工作面定向钻孔水力压裂典型曲线

Fig.14 Typical hydraulic pressure curve of directional drilling hydraulic fracturing in No.122108 working face

5 水力压裂效果分析

5.1 水力压裂缝网布分析

水力裂缝展布是决定与评价压裂效果的核心，因此，水力裂缝监测非常重要。微震监测是定量评估水力压裂效果的主要方法，可分析水力裂缝带的长度、宽度、高度和方位等空间发育特征及影响范围。微震监测主要有地面监测和井下监测2种方式。井下监测数据质量高但监测范围小、成本高、操作复杂。地面监测施工简单、监测范围大、成本低，但数据质量较差、垂向定位误差较大。国内外学者已经验证地面微震监测可以接收到可靠的水力压裂诱发的信号^[22-23]，并进行了地面和井下监测对较强微震定位的详细对比^[24]，结果证明地面监测与井中监测具有

相同的定位精度。地面监测定位精度通常在横向优于井中监测定位精度,而井中监测定位精度则通常在纵向上优于地面监测定位精度。

本次微震监测采用地面监测方式,使用三分量检波器,观测系统如图 15 所示。微震监测工区范围位于北纬 38.619° ~ 38.626° ,东经 109.884° ~ 109.899° ,图 15 中红色矩形为井下工作面压裂区域投影。



图 15 地面微震台站分布

Fig.15 Distribution of ground microseismic stations

图 16a 显示观测系统中地震台站的坐标为大地坐标,海拔高度在 +1 305~+1 325 m。图 16b 显示的是本次监测中使用的速度模型,是基于声波测井资料曲线获得纵波速度之后插值得到的一个层状速度模型,横波速度采用 $1/\sqrt{3}$ 倍纵波速度进行转换。

图 17 为 122108 工作面水力压裂微震监测的三分量数据(2021-09-13T11:54:00-11:55:00, 1 min 的监测数据)。其中有 15 道三分量数据,每一道显示 3 个分量的数据 Z、N、E,其中分别对应绿色、红色、蓝色曲线,其中 Z 分量上主要接收 P 波能量,N 和 E 分量上主要以 S 波能量为主,经过处理可以明显地看到有效微震事件。

通过向量扫描法(VS)^[25-26]对 122108 工作面顶板内的数十个钻孔压裂微震监测数据进行处理,确认可能的压裂开裂破裂释放的地震波能量释放的空间位置;进一步确认开裂后的缝网走势和最后的基本分布形态;最后对数十个定向孔的压裂缝网总的压裂效果予以判断,获得了压裂过程中岩石破裂产生的微震事件。水力裂缝定位结果如图 18 所示,显示 10、23、38 m 三个层位水力裂缝分布,云图表示水力缝网分布,不同颜色云图代表不同位置压裂产生的缝网。122108 工作面顶板岩层在压裂过程中产生大量微震事件,裂缝覆盖了目标区域,高度方向的扩展平均约 8 m。

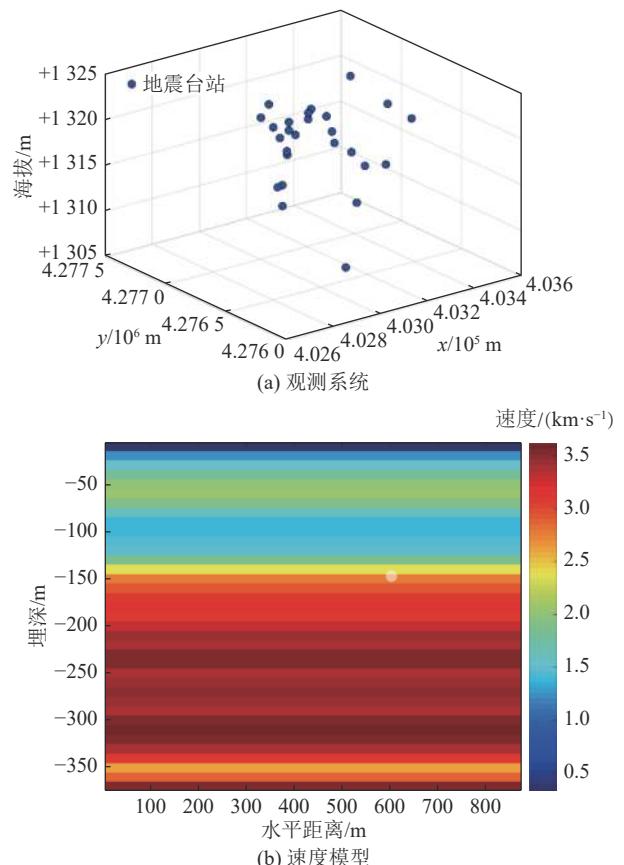


图 16 曹家滩煤矿微震监测观测系统和速度模型

Fig.16 Geometry of microseismic monitoring of Caojiatan Coal Mine and velocity model

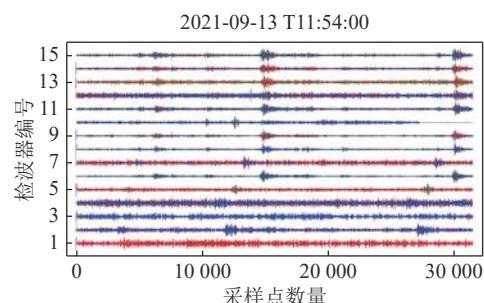


图 17 三分量微震监测数据

Fig.17 Three-component microseismic monitoring data

图 19 为 5 个钻孔压裂产生的缝网效果,可知缝网在空间的扩展以水平为主,其中 H1-1、2、3、4、5 分别代表 5 个钻进轨迹,色标代表信噪比。

F1-1 孔压裂缝网的定位结果如图 20 所示,图 20a 为俯视图,图 20b 为侧视图。该孔共压裂 12 段。图中黄色线为井轨迹,不同颜色对应不同位置压裂形成的缝网。压裂钻孔水平段长度为 218 m。形成的缝网分布于钻孔两翼,钻孔两翼破裂平均长度约 80 m, 裂缝呈水平状。

F1-1 钻孔第七段压裂缝网的平面图、纵剖面图如图 21 所示,黑线代表井轨迹,白线代表裂缝走向,

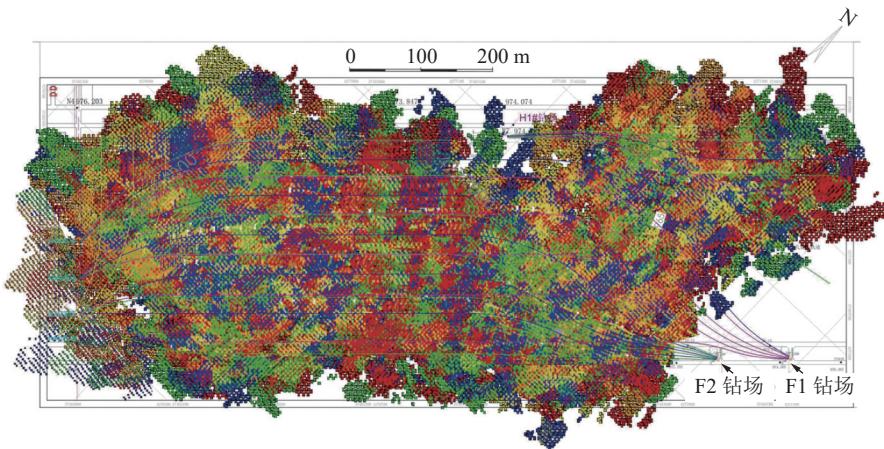


图 18 122108 工作面定向孔水力压裂的裂缝分布

Fig.18 Fracture distribution map of No.122108 working face directional hole hydraulic fracturing

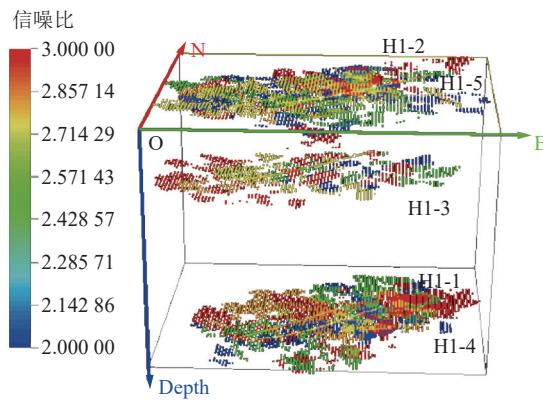
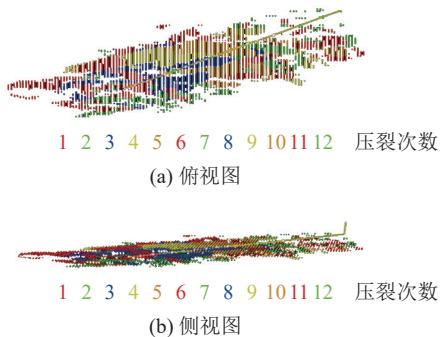
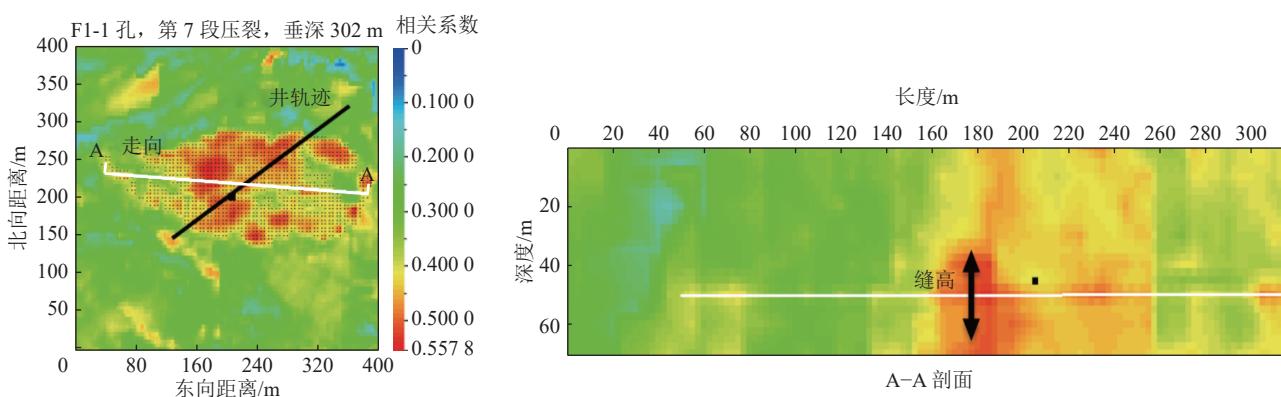


图 19 H1 钻场的 5 个钻孔压裂效果

Fig.19 Fracturing effect of 5 drill holes in H1 drilling field

图 20 F1-1 井压裂微地震定位结果
Fig.20 Microseismic locating results of hydraulic fracturing of well F1-1图 21 F1-1 井第七段水力压裂微地震定位结果
Fig.21 Microseismic locating results of hydraulic fracturing of well F1-1 stage 7

长度代表裂缝长度。裂缝扩展表现为多条子裂缝组成的缝网, 主要为水平缝, 沿垂直于最小主应力方向扩展。缝网的具体参数为: 走向 NE95°, 近乎水平缝, 长度约 340 m, 宽度 110 m, 高度 10~20 m, 面积约 $3.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。定位的结果可以从一定程度上确定裂缝扩展的范围, 但有些能量团不聚焦, 是否为压裂产

生的微震事件还需要进一步验证。F1-1 钻孔 12 段全部压裂缝网几何尺寸见表 2。裂缝主走向的平均值为 NE92°, 平均缝长 293 m, 平均缝宽 78 m。图 22a 是统计的裂缝走向, 在玫瑰图中可以看出裂缝基本上呈水平状, 由于最小主应力为垂直应力, 水平缝更容易扩展。

表 2 F1-1 井各段缝网空间分布

Table 2 Spatial distribution of fracture mesh in each section of Well F1-1

压裂段	主走向NE/(°)	长度/m	宽度/m	裂缝面积/ 10^4m^2
1	95	290	50	1.4
2	85	285	50	1.4
3	70	300	80	2.4
4	—	—	—	—
5	95	300	90	2.7
6	105	310	80	2.5
7	95	340	110	3.7
8	95	280	70	2.0
9	100	300	90	2.7
10	80	270	90	2.5
11	100	340	90	3.1
12	95	210	60	1.3

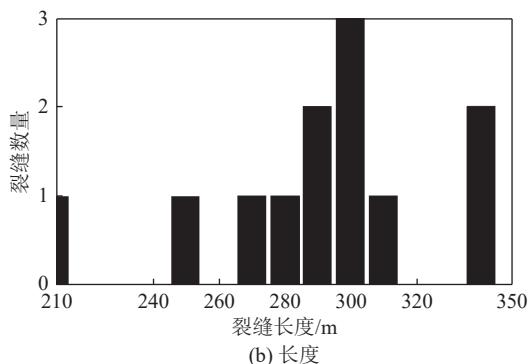
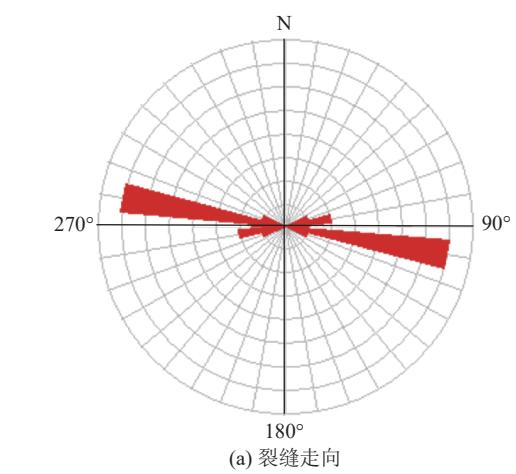


图 22 裂缝参数统计

Fig.22 Fracture parameter statistics

5.2 水力压裂效果综合评价

除采用上述的地面微震监测系统监测水力裂缝的展布情况外, 监测顶板岩层压裂前后工作面矿压显现变化, 是综合评价水力压裂效果的有效方法。为此, 采用工作面矿压监测预警平台、钻孔应力计、

井下微震监测系统等仪器^[27-29], 监测了工作面周期来压、支架工作阻力及动载系数、超前支承压力、顶板下沉及采高变化等参数。

统计 122108 工作面推进度 4 000~5 981 m 共计 106 次周期来压, 其中: 压裂前区域 4 000~5 000 m, 共 55 次, 压裂区域 5 000~5 981 m, 共 51 次。从压裂前后 5 个指标周期来压步距、来压持续距离、来压动载系数、顶板破断, 分别对比分析压裂效果。

对比压裂前后周期来压步距情况, 如图 23 所示, 压裂后工作面周期来压步距呈现明显降低的趋势, 主要分布在 25 m 以下, 未出现强矿压显现情况, 25 m 以上的周期来压步距占比由压裂前的 18.18% 降至 5.8%, 降幅 12.38%; 最大周期来压步距由 64 m 降至 35 m, 降幅 45%。由图 23b 可知, 工作面周期来压持续距离由 11.5 m 降至 8.4 m, 减少 3.1 m, 降幅为 27%, 来压持续 15 m 以上的周期来压比例由 15.09% 下降为 3.92%, 降幅 11.17%, 工作面长时间持续来压现象明显降低。

如图 24 所示, 工作面周期来压平均动载系数由 1.33~1.66 降至 1.19~1.46, 1.4 以上的比例由 92.73% 降至 9.8%, 1.5 以上的强劲载来压比例由 12.73% 降至 0。如图 25 所示, 工作面整体液压支架不保压率由 3.5%~28.2% 降至 0.7%~10%, 不保压率均值由

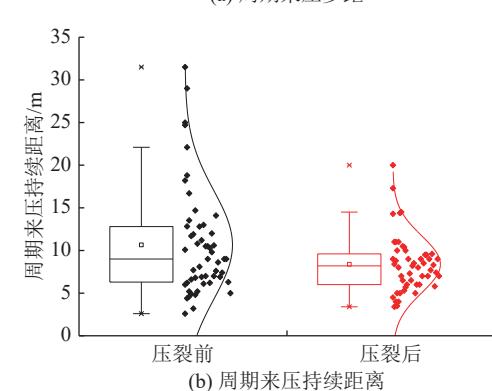
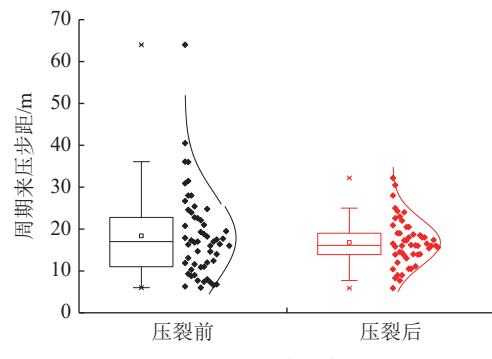


图 23 压裂前后周期来压步距与持续距离统计对比

Fig.23 Statistical comparison of periodic weighting step and duration distance before and after fracturing

16.1%降至4.4%，降幅11.5%。进入压裂区后，122108工作面支架不保压率显著降低，工作面来压强度的降低使工作面支架工作状态得到显著改善。

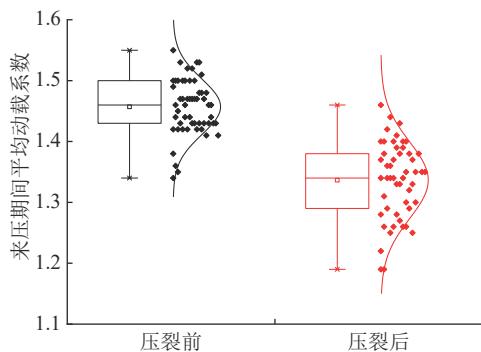


图24 压裂前后周期来压动载系数统计对比

Fig.24 Comparison of dynamic loading coefficient of periodic weighting before and after fracturing

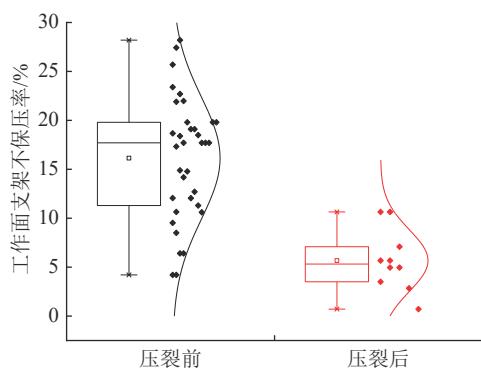


图25 压裂前后支架不保压率统计对比

Fig.25 Comparison of ratio of hydraulic support not maintain pressure before and after fracturing

井下微震监测数据表明：相同推进度下，压裂后微震事件由1400个降至683个，总能量由 9.36×10^6 J降至 2.83×10^6 J，微震事件总个数下降了51.21%，微震事件总能量下降69.76%， 10^3 J和 10^4 J以上微震事件数量分别下降了25.28%和54.02%。

综上所述，工作面多指标监测结果显示，压裂区域矿压显现得到显著改善，井下定向钻孔区域水力压裂能够有效弱化顶板完整坚硬岩层，工作面回采过程中，顶板特厚稳定岩层能够及时垮落，避免了大面积岩层垮落，改善了工作面围岩应力环境，液压支架工况良好，确保了工作面安全生产。

6 结论与展望

1) 水力压裂技术是工作面坚硬完整顶板弱化、高应力巷道围岩卸压的有效方法。水力压裂分地面压裂、井下区域压裂及局部压裂，其中井下定向钻孔区域水力压裂技术是弱化工作面顶板岩层，解决工

作面强矿压的有效手段。

2) 陕西曹家滩煤矿采煤工作面矿压显现强烈的主要原因是顶板赋存多个厚硬稳定岩层，且为特厚煤层开采，工作面开采强度大。采用井下区域水力压裂技术改造顶板岩层结构，使其开采后能及时垮落是有效途径。

3) 宏观水力裂缝扩展方位受控于地应力场，裂缝近似以垂直于最小主应力的平面椭圆状展布。钻孔方位、地层岩性、结构面等仅在局部范围影响裂缝扩展，造成裂缝不规则形态和局部复杂路径。高弹性模量、低断裂韧度和低水平应力有利于水力裂缝穿层扩展。软弱结构面张开和剪切活化导致水力裂缝缝内水压损失及缝尖钝化，阻碍水力裂缝穿层扩展。

4) 基于井下测试与试验、水力裂缝扩展理论分析及数值模拟研究，提出曹家滩煤矿工作面顶板压裂层位选择、参数设计方法，开发出压裂工艺与装备，及地面微震监测、工作面矿压显现监测的压裂效果评价技术，初步建立了井下定向钻孔水力压裂成套技术。

5) 井下试验表明：在曹家滩煤矿井下地应力状态下（最小主应力为垂直应力），水力裂缝以水平裂缝为主，沿钻孔两侧扩展距离为80 m左右。压裂后，工作面周期来压步距、周期来压持续距离、周期来压平均动载系数、液压支架不保压率等显著减少，微震事件总数量和总能量分别下降50%以上和近70%。水力压裂有效改造了特厚坚硬、稳定顶板岩层结构，显著减轻了工作面矿压显现程度，确保了工作面安全生产。

尽管井下定向钻孔水力压裂技术已初步形成，但还存在很多技术问题，需要继续深入研究。

1) 继续深入开展煤矿井下压裂过程中岩石力学行为与水力裂缝扩展的基础理论研究。包括不同地应力场下岩层裂缝网络形成机制与控制方法；应力场、渗流场、天然裂隙耦合作用下裂缝扩展特征；多场耦合条件下三维裂缝网络力学模型；水力缝网岩层结构改造对围岩应力场的影响规律等，为水力压裂设计提供可靠的理论基础。

2) 研发煤矿岩层压裂液体系。压裂液是造缝介质，其性能是缝网展布形态的决定性因素。基于煤矿岩层特性，研发环保型超低滤失压裂液，对不同压裂液的泵注顺序、泵注体积、黏度及排量等参数进行深入研究；对不同岩性、不同黏土含量和不同水敏矿物组成岩层的水化作用进行深入研究，确定适用于煤矿地层的压裂液体系。

3) 不断改进和完善井下水力压裂技术、工艺及装备,增大井下压裂泵组的流量与压力,提高压裂效果。引进油气行业先进技术,包括:暂堵转向压裂技术、定向深孔全程固孔水力射孔压裂技术等,解决压裂技术难题。

4) 研发井下岩层关键参数随钻实时测量技术与装备,为动态、实时调整压裂层位与参数提供手段。改进、完善及研发新的水力裂缝地面、井下长期实时监测技术与仪器,实现裂缝的精准定位与实时、动态捕捉。进一步深入研究水力压裂效果综合评估方法,提高评价的科学性、合理性与可靠性。

5) 构建集地质参数随钻测量、压裂层位确定与参数设计、压裂液体系、多样化压裂工艺、自动化与智能化压裂设备、裂缝扩展实时监测与可视化平台、压裂效果多指标综合评价方法的一体化煤矿井下水力压裂技术体系,为煤矿岩层控制提供精准、有效的技术手段。

参考文献(References):

- [1] 康红普,冯彦军.煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J].*煤炭科学技术*,2017,45(1):1-9.
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 1-9.
- [2] 康红普,姜鹏飞,冯彦军,等.煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J].*煤炭科学技术*,2022,50(6):1-15.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, et al. Destressing technology for rock around coal mine roadways and its application [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 1-15.
- [3] KANG Hongpu, LYU Huawen, GAO Fuqiang, et al. Understanding mechanisms of destressing mining-induced stresses using hydraulic fracturing[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 196: 19-28.
- [4] 冯彦军,康红普.定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J].*岩石力学与工程学报*,2012,31(6):1148-1155.
FENG Yanjun, KANG Hongpu. Test on hard and stable roof control by means of direction hydraulic fracturing in coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1148-1155.
- [5] 赵凯凯.坚硬顶板区域水力压裂裂缝三维扩展机理研究[D].北京:煤炭科学研究院,2021.
ZHAO Kaikai. Three-dimensional propagation of hydraulic fracture from regional fracturing in hard roof[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [6] ZHAO Kaikai, STEAD Doug, KANG Hongpu, et al. Investigating the interaction of hydraulic fracture with pre-existing joints based on lattice spring modeling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 122: 103534.
- [7] 程利兴.千米深井巷道围岩水力压裂应力转移机理研究及应用[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
CHENG Lixing. Research and application of hydraulic fracturing stress transfer mechanism in surrounding rock of kilometer deep mine roadway[D]. Beijing: Beijing University of Mining & Technology- Beijing, 2021.
- [8] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等.坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(12):2954-2970.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [9] 于斌,高瑞,夏彬伟,等.大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J].*煤炭学报*,2021,46(3):800-811.
YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 800-811.
- [10] 夏永学,陆闯,杨光宇,等.坚硬顶板孔内磨砂射流轴向切缝及压裂试验研究[J].*采矿与岩层控制工程学报*,2020,2(3):033522.
XIA Yongxue, LU Chuang, YANG Guangyu, et al. Experimental study on axial fracture cutting and fracturing of abrasive jet in boreholes within hard rock roofs[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(3): 033522.
- [11] 张晓.综采工作面水力压裂初次放顶技术研究[J].*煤炭科学技术*,2017,45(7):23-26.
ZHANG Xiao. Study on hydraulic fracturing technology in initial caving of fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 23-26.
- [12] 冯彦军,周瑜苍,刘勇,等.[J].水力压裂在酸刺沟煤矿初次放顶中的应用[J].*煤矿开采*,2016(5):75-78.
FENG Yanjun, ZHOU Yucang, LIU Yong, et al. Application of hydraulic fracturing in first roof caving of suancigou coal mine[J]. *Coal Mining Technology*, 2016(5): 75-78.
- [13] 李中伟,薛旭辉,郝登云.干河煤矿卸支耦合动压巷道围岩控制技术研究[J].*煤炭工程*,2019,51(11):51-54.
LI Zhongwei, XUE Xuhui, HAO Dengyun. Surrounding rock control technology of pressure relief and support coupling dynamic pressure roadway in Ganhe Coal Mine[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(11): 51-54.
- [14] 吴拥政,康红普.煤柱留巷定向水力压裂卸压机理及试验[J].*煤炭学报*,2017,42(5):1130-1137.
WU Yongzheng, KANG Hongpu. Pressure relief mechanism and experiment of directional hydraulic fracturing in reused coal pillar roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1130-1137.
- [15] 杨俊哲,王振荣,吕情绪,等.坚硬顶板超前区域治理技术在神东布尔台煤矿的应用[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(2):17-23.
YANG Junzhe, WANG Zhenrong, LYU Qingxu, et al. Application of advanced regional treatment technology of hard roof in Buertai Coal Mine of Shendong Coal Group[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 17-23.
- [16] 刘曰武,高大鹏,李奇,等.页岩气开采中的若干力学前沿问题[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(12):2954-2970.

- 题[J].*力学进展*,2019,49:201901.
- LIU Yuewu, GAO Dapeng, LI Qi, et al. Mechanical frontiers in shale-gas development[J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 201901.
- [17] 史 璞,林伯韬.页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨[J].*石油科学通报*,2021,6(1):92–113.
SHI Can, LIN Botao. Principles and influencing factors for shale formations[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(1): 92–113.
- [18] 侯振坤,程汉列,海金龙,等.页岩水力压裂裂缝起裂和扩展断裂力学模型[J].*长江科学院院报*,2020,37(5):99–107.
HOU Zhenkun, CHENG Hanlie, HAI Jinlong, et al. Fracture mechanics model of the initiation and growth of hydraulic fissures[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(5): 99–107.
- [19] 张士诚,陈 铭,马新仿,等.水力压裂设计模型研究进展与发展方向[J].*新疆石油天然气*,2021,17(3):67–73.
ZHANG Shicheng, CHEN Ming, MA Xinfang, et al. Research progress and development direction of hydro fracturing design models[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2021, 17(3): 67–73.
- [20] 赵凯凯,张 镇,李文洲,等.基于XSite的钻孔起裂水力裂缝三维扩展研究[J].*岩土工程学报*,2021,43(8):1483–1491.
ZHAO Kaikai, ZHANG Zhen, LI Wenzhou, et al. Three-dimensional simulation of hydraulic fracture from a borehole using XSsite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1483–1491.
- [21] HENG Shuai, LI Xianzhong, LIU Xiao, et al. Experimental study on the mechanical properties of bedding planes in shale[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 76: 103161.
- [22] 范拥军.地面微地震水力压裂监测可行性分析[J].*物探与化探*,2015,39(2):341–345.
RUI Yongjun. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(2): 341–345.
- [23] CHAMBERS K, KENDALL J M, BRANDSBERG-DAHL S, et al. Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity[J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58(5): 821–830.
- [24] EISNER L, HULSEY B J, DUNCAN P, et al. Comparison of surface and borehole locations of induced seismicity[J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58(5): 809–820.
- [25] 梁北援,冷传波.微破裂向量扫描原理的研发进展[J].*地球物理学进展*,2016,31(4):1620–1627.
LIANG Beiyuan, LENG Chuanbo. Development of vector scanning for microseismic[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1620–1627.
- [26] 王维波,周瑶琪,春 兰.地面微地震监测SET震源定位特性研究[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2012,36(5):45–50.
WANG Weibo, ZHOU Yaoqi, CHUN Lan. Characteristics of source localization by seismic emission tomography for surface based on microseismic monitoring[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2012, 36(5): 45–50.
- [27] 李晓斌,杨振威,赵秋芳,等.微地震双差定位成像技术及煤层水力压裂的应用[J].*煤炭学报*,2019,44(S1):205–213.
LI Xiaobin, YANG Zhenwei, ZHAO Qifang, et al. Hydraulic fracture in coalbed methane drilling using microseism double-difference tomography method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 205–213.
- [28] 闫江平,庞长庆,段建华,等.煤矿井下水力压裂范围微震监测技术及其影响因素[J].*煤田地质与勘探*,2019,47(S1):92–97.
YAN Jiangping, PANG Zhangqing, DUAN Jianhua, et al. Microseismic monitoring of underground hydraulic fracturing range in coal seam and analysis of influencing factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(S1): 92–97.
- [29] 李 楠,王恩元,GE Mao-chen.微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J].*煤炭学报*,2017,42(S1):83–96.
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: present status and future prospects[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 83–96.