

文章编号:1671-251X(2020)08-0058-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020060081

煤柱留巷水力压裂参数对卸压效果的影响

张镇^{1,2,3,4}



扫码移动阅读

- (1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013;
2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013;
3. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013;
4. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

摘要:针对煤柱留巷围岩变形控制采用的水力压裂卸压技术,为确定水力压裂参数,以山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司长平煤矿43122煤柱留巷为研究对象,利用平面离散元 UDEC 软件对水力压裂钻孔压裂次数和压裂位置对卸压效果的影响进行了数值模拟。结果表明:压裂分段长度越大,相应压裂次数越少,水力压裂对顶板的弱化效果越差,压裂分段长度以不超过 4 m 为宜;压裂钻孔位于下区段工作面煤柱侧时会引起煤柱应力升高,压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧和煤柱上方时均能实现煤柱应力降低,其中压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧时卸压效果最明显。根据数值模拟结果确定的水力压裂参数进行了现场试验,结果表明,采用水力压裂卸压后,煤柱留巷围岩变形稳定期较未压裂时缩短 33.3%,煤柱留巷顶底板移近量和两帮移近量较未压裂时分别降低 63.5%和 45.5%,煤柱留巷围岩变形量显著减小。

关键词:煤柱留巷;水力压裂;围岩变形;卸压;压裂次数;压裂位置
中图分类号:TD322.5 文献标志码:A

Influence of hydraulic fracturing parameters of reused coal pillar roadway on pressure relief effect

ZHANG Zhen^{1,2,3,4}

- (1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and
- Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
3. China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China;
4. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: Hydraulic fracturing pressure relief technology is used to control surrounding rock deformation of reused coal pillar roadway. In order to determine parameters of hydraulic fracturing, 43122 reused coal pillar roadway of Changping Coal Mine of Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd. was taken as research object, influence of fracturing times and fracturing positions on pressure relief effect were numerically simulated by use of plane discrete element UDEC software. The results show that the longer the fracturing segment length is, the less the corresponding fracturing times will be, and the weaker the effect of hydraulic fracturing on roof will be. Fracturing segment length should not exceed 4 m. Fracturing borehole will increase stress of coal pillar when it is located at coal pillar side of lower section working face, and reduce stress of coal pillar when it is located at goaf side of upper section working face and above the coal pillar, and pressure relief effect is the most obvious when fracturing borehole is located

收稿日期:2020-06-29;修回日期:2020-08-08;责任编辑:盛男。
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51774186);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金面上项目(2018MS021);天地科技开采设计事业部科技创新基金项目(KJ-2018-TDKCZL-12)。
作者简介:张镇(1980—),男,山东齐河人,副研究员,博士,主要从事巷道矿压理论与围岩控制方面的研究工作,E-mail:ccrizhen@126.com。
引用格式:张镇.煤柱留巷水力压裂参数对卸压效果的影响[J].工矿自动化,2020,46(8):58-63.
ZHANG Zhen. Influence of hydraulic fracturing parameters of reused coal pillar roadway on pressure relief effect[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 58-63.

at goaf side of upper section working face. The hydraulic fracturing parameters determined by numerical simulation results were tested in field, the results show that after hydraulic fracturing is used for pressure relief, deformation stability period of surrounding rock of reused coal pillar roadway is 33.3% shorter than that of non-fractured roadway, and displacement of roof and floor and two side walls of reused coal pillar roadway is 63.5% and 45.5% lower than that of non-fractured roadway, which indicates deformation of surrounding rock of reused coal pillar roadway decreased significantly.

Key words: reused coal pillar roadway; hydraulic fracturing; deformation of surrounding rock; pressure relief; fracturing times; fracturing position

0 引言

煤柱留巷要经受相邻工作面和本工作面二次采动影响,强烈动压影响下煤柱留巷变形控制是一大难题。随着高预应力、高强度锚杆支护技术的应用^[1-2],极大程度上提高了煤柱留巷的支护强度^[3-6],但单纯采用支护法难以有效控制复杂巷道围岩变形,还需要同时对巷道围岩进行卸压以降低动压影响。水力压裂卸压技术通过切断临空巷道上部悬顶,在巷道周边形成弱化带,从而实现过高动载转移,达到减小围岩变形与破坏的效果^[7-8],该技术以安全性高、弱化范围大等优势得到广泛应用。康红普等^[9-10]分析了煤矿井下定向水力压裂弱化围岩的机理,开发了煤矿井下小孔径水力压裂技术与装备,并在多个矿区进行了推广应用。黄炳香等^[11-13]通过真三轴水力压裂试验研究了围岩主应力差、排量、层面与原生裂隙对水压裂缝扩展的影响规律,提出了坚硬顶板水力压裂定向裂纹控制技术,解决了坚硬顶板的弱化问题。吴拥政等^[14]通过煤矿砂岩真三轴定向水力压裂试验分析了压裂裂纹的扩展规律,并引入了定向偏转距概念(预制切槽处裂缝沿其方向定向扩展不发生偏转的距离)来表征定向压裂效果,分析了水平应力差对定向偏转距的影响。冯彦军等^[15-17]分析了不同地应力大小、方向和类型条件下水力压裂裂纹的起裂与扩展规律。徐成等^[18]研究了压裂注水泵流量对纵向切槽水力压裂裂缝偏转的影响规律。前人对水力压裂卸压机理、裂纹扩展与控制 and 相应装备工艺进行了大量研究,但有关水力压裂参数对卸压效果影响的研究较少。本文采用数值模拟及现场试验的方法,分析了水力压裂钻孔压裂次数、压裂位置对卸压效果的影响,为水力压裂卸压技术的应用提供参考依据。

1 研究背景

山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司长平煤矿 4312 工作面埋深为 420 m,倾斜长度为 220 m。该工作面采用三巷布置方式,如图 1 所示。43121

进风巷、43123 进风巷为一次使用巷道;43122 回风巷为煤柱留巷巷道,煤柱宽度为 45 m;43121 进风巷与 43122 回风巷均为矩形巷道(宽 5.0 m、高 3.9 m),沿煤层顶板布置,采用高强锚网索联合支护形式。4312 工作面回采结束后,43122 回风巷需继续为 4310 工作面服务。

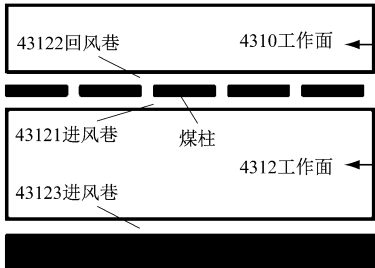


图 1 工作面巷道布置

Fig. 1 Roadway layout of working face

工作面煤层平均厚度为 5.52 m,平均单轴抗压强度为 14.57 MPa;直接顶为泥岩,平均厚度为 3.82 m,平均单轴抗压强度为 21.93 MPa;基本顶为中粒砂岩,平均厚度为 10.64 m,平均单轴抗压强度为 34.42 MPa。基本顶厚度大、完整性好,工作面回采后基本顶不易垮落,容易在采空区煤柱侧形成大面积悬顶,对煤柱产生较大动载影响,致使煤柱应力升高,煤柱留巷出现大变形。

2 数值模拟

2.1 模型建立

采用平面离散元 UDEC 软件建立二维数值模拟模型,如图 2 所示。模型尺寸为 600 m×440.5 m (长×高),模型底边固定水平和垂直位移,侧边固定

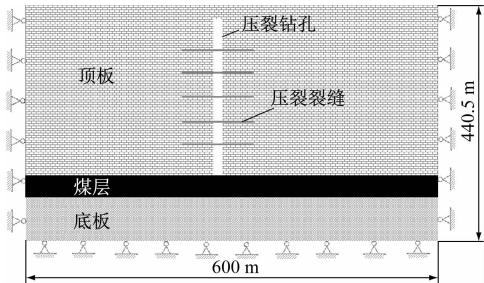


图 2 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model

水平位移,顶部为地表。水力压裂裂缝垂直于钻孔轴线并向两侧延展,裂缝长度为 10 m,沿水力压裂钻孔对称分布。

岩层参数见表 1。水力压裂裂缝参数:法向刚度为 30 GPa/m;剪切刚度为 12 GPa/m;内摩擦角为 20°,黏聚力和抗拉强度均为 0。

表 1 岩层参数
Table 1 Rock strata parameters

岩层	厚度/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	法向刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	剪切刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
顶板砂质泥岩	6.1	2 300	2.0	0.26	9.6	1.9	0.9	34	0.032
顶板中粒砂岩	10.6	2 600	20.0	0.25	96.0	19.2	1.8	36	0.800
顶板泥岩	3.8	2 500	7.0	0.26	33.6	6.7	0.2	31	0.012
煤层	5.5	1 400	1.4	0.28	6.7	1.3	0.1	30	0.004
底板泥岩	20.0	2 560	9.3	0.27	44.6	8.9	0.9	34	0.032
上覆岩层	394.5	2 000	3.7	0.25	17.8	3.6	0.5	33	0.420

2.2 压裂次数对卸压效果的影响

对于厚硬煤层顶板,为充分破坏顶板的完整性,可在同一压裂钻孔内实施分段多次压裂,如图 3 所示。压裂分段长度 D 即相邻压裂段的间隔长度,用来表征压裂次数。压裂分段长度长,表明压裂次数少;压裂分段长度短,表明压裂次数多。压裂次数太少则弱化不充分,难以达到较好的卸压效果;压裂次数过多会增加施工工作量,还可能出现压裂裂缝互相串通造成的压裂裂纹扩散不良。结合工程经验,模拟选用的压裂分段长度分别为 2,4,8 m。

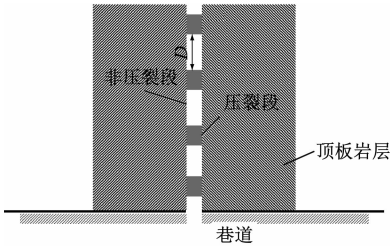


图 3 钻孔分段压裂
Fig. 3 Staged fracturing of borehole

4312 回采工作面向压裂钻孔方向推进过程中,不同压裂分段长度下压裂区围岩支承应力变化如图 4 所示。当压裂钻孔位于回采工作面前方时,距工作面距离为正;当压裂钻孔位于回采工作面后方时,距工作面距离为负。

从图 4 可看出,压裂区围岩支承应力在回采工作面前方 50~60 m 时达到峰值,随着回采工作面继续向前推进,压裂区围岩支承应力平稳下降,回采工作面推进至压裂钻孔位置时,压裂区围岩支承应力迅速下降;当压裂分段长度分别为 2,4 m 时,压裂区围岩支承应力峰值均较无压裂时稍有降低,降低幅度分别为 3.02% 和 1.20%;当压裂分段长度为 8 m 时,压裂区围岩支承应力峰值较无压裂时稍有升高,升高幅度为 1.85%。当压裂分段长度较小

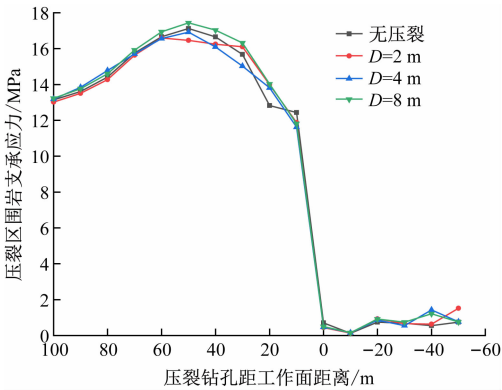


图 4 不同压裂分段长度下压裂区围岩支承应力变化曲线
Fig. 4 Variation curves of abutment stress of surrounding rock in fractured zone under different fracturing segment lengths

时,相应压裂次数较多,在围岩中产生的裂隙较多;当压裂分段长度较大时,相应压裂次数较少,在围岩中造成的裂隙互不贯通,由此形成的裂隙围岩可能形成某种结构,导致压裂区围岩支承应力比无压裂时略有增加。因此,为提高水力压裂弱化顶板的效果,压裂分段长度不宜过大,以不超过 4 m 为宜。

2.3 压裂钻孔位置对卸压效果的影响

煤柱留巷水力压裂卸压作业一般在回采巷道进行,可选压裂钻孔位置为上区段工作面采空区侧、煤柱上方和下区段工作面煤柱侧,如图 5 所示。

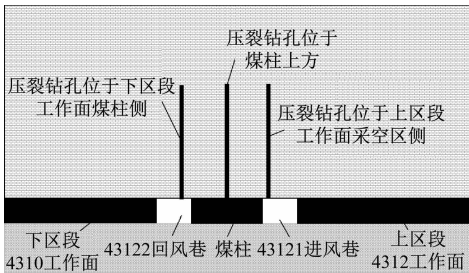


图 5 压裂钻孔位置
Fig. 5 Fracturing borehole locations

设置压裂分段长度为 2 m。上区段工作面回采后,不同压裂钻孔位置下煤柱应力变化如图 6 所示。距上区段工作面采空区距离为 0~45 m 处为煤柱、45~50 m 处为 43122 回风巷;远离上区段工作面采空区方向为正,反之为负。

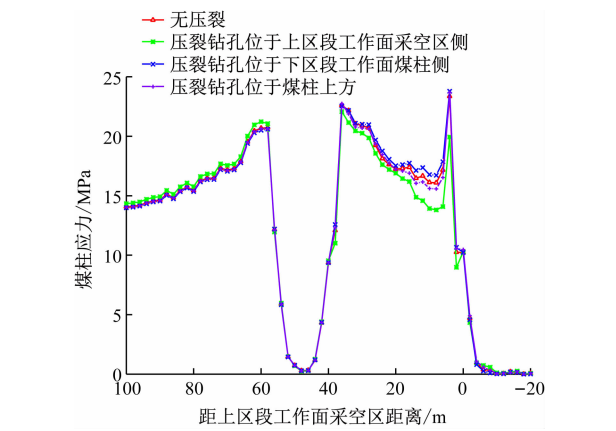


图 6 不同压裂钻孔位置下煤柱应力变化曲线
Fig. 6 Variation curves of coal pillar stress under different fracturing borehole locations

从图 6 可看出,压裂钻孔位于下区段工作面煤柱侧时,压裂后煤柱应力较无压裂时升高,升高幅度最大为 4.1%;压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧和煤柱上方时,压裂后煤柱应力较无压裂时均有所降低,其中压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧时煤柱应力降低幅度最大,达 14.6%。

3 现场试验

3.1 水力压裂卸压方案

水力压裂卸压作业地点选择在上区段 4312 工作面采空区侧 43121 进风巷,水力压裂卸压试验段长度为 320 m。压裂钻孔布置在巷道顶板,采用深浅双排孔布置方式,如图 7 所示。深孔距煤柱帮 1 m,孔径为 56 mm,孔深为 60 m,钻孔轴向水平投影与巷道走向夹角为 5°,钻孔倾角为 70°;浅孔开孔在巷道顶角煤柱帮向顶板内施工,孔径为 56 mm,孔深为 16 m,钻孔轴向水平投影与巷道走向垂直,钻孔倾角为 70°。深孔间距、浅孔间距均为 10 m,深孔与浅孔交错布置,交错距离为 5 m。

采用 3ZSB80/62-90 型煤矿专用高压注水泵,额定注水压力为 62 MPa,压裂分段长度为 2~3 m,根据现场条件适当调节,每段压裂 30 min。水力压裂施工工艺流程参考文献[4],本文不再赘述。

3.2 卸压效果

在煤柱留巷 43122 回风巷压裂试验段和非压裂试验段分别布置巷道表面位移测站,对 4312 工作面煤柱留巷顶底板移近量和两帮移近量进行监测,结果如图 8 所示。当测站超前工作面时,距工作面距

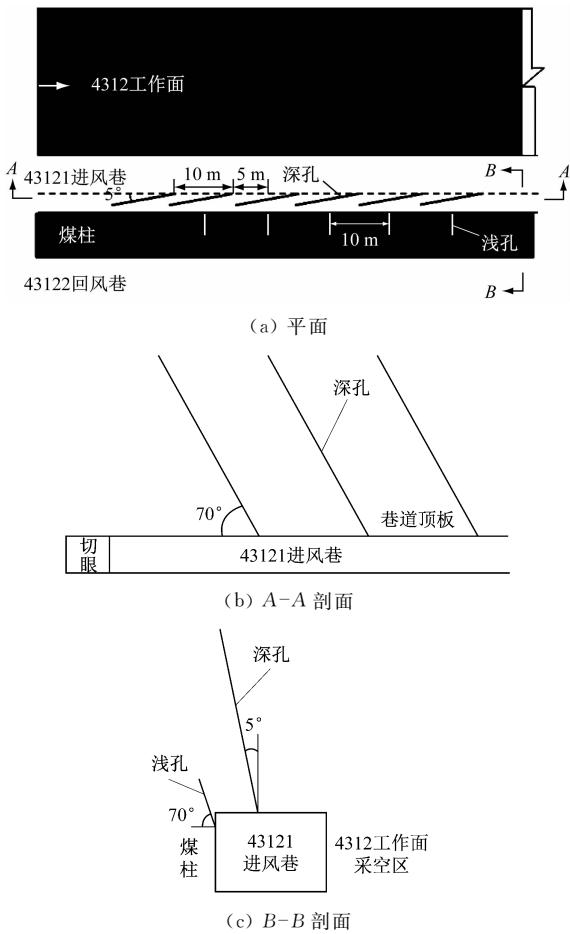


图 7 水力压裂钻孔布置
Fig. 7 Layout of hydraulic fracturing boreholes

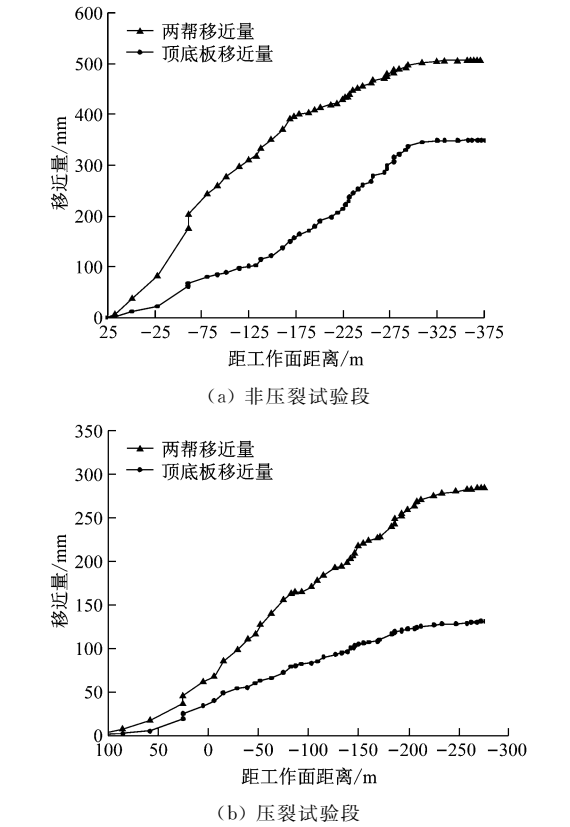


图 8 巷道表面位移监测曲线
Fig. 8 Roadway surface displacement monitoring curves

离为正;当测站滞后工作面时,距工作面距离为负。

从图 8 可看出,非压裂试验段与压裂试验段巷道表面变形均以两帮移近为主,且工作面后方巷道变形急剧增加;非压裂试验段巷道变形在工作面后方 300 m 处趋于稳定,顶底板移近量为 348 mm,两帮移近量为 505 mm;压裂试验段巷道变形在工作面后方 200 m 处趋于稳定,顶底板移近量为 127 mm,两帮移近量为 275 mm;与非压裂试验段巷道相比,压裂试验段巷道变形稳定期缩短 33.3%,顶底板移近量减少 63.5%,两帮移近量减少 45.5%。

4 结论

(1) 压裂分段长度越大,相应压裂次数越少,对顶板的弱化效果越差,压裂分段长度以不超过 4 m 为宜。

(2) 压裂钻孔位于下区段工作面煤柱侧时,会引起煤柱应力升高,不利于煤柱留巷的围岩变形控制;压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧和煤柱上方时,均能实现煤柱应力降低,有利于煤柱留巷的围岩变形控制,其中压裂钻孔位于上区段工作面采空区侧时煤柱应力降低幅度可达 14.6%,卸压效果最明显。

(3) 现场试验结果表明,采用水力压裂卸压后,煤柱留巷围岩变形稳定期较未压裂时缩短 33.3%,煤柱留巷顶底板移近量和两帮移近量较未压裂时分别降低 63.5%和 45.5%,煤柱留巷围岩变形量显著减小。

参考文献(References):

[1] 康红普,姜鹏飞,黄炳香,等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报,2020,45(3):845-864.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3):845-864.

[2] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):7-39.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China [J]. Journal of Mining and

Strata Control Engineering,2019,1(2):7-39.

[3] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45 (6): 1071-1081.

[4] 康红普,范明建,高富强,等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2227-2241.
KANG Hongpu, FAN Mingjian, GAO Fuqiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than 1 000 meters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (11): 2227-2241.

[5] 康红普,王金华,林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1809-1814.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Study and applications of roadway support techniques for coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35 (11): 1809-1814.

[6] 康红普,林健,吴拥政. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1153-1159.
KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34 (9): 1153-1159.

[7] 吴拥政. 回采工作面双巷布置留巷定向水力压裂卸压机理研究及应用 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
WU Yongzheng. Study on de-stressing mechanism of directional hydraulic fracturing to control deformation of reused roadway in longwall mining with two gateroad layout and its onsite practices [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 黄炳香,王友壮. 顶板钻孔割缝导向水压裂缝扩展的现场试验[J]. 煤炭学报,2015,40(9):2002-2008.

HUANG Bingxiang, WANG Youzhuang. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(9):2002-2008.

[13] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):167-173.

HUANG Bingxiang, CHENG Qingying, LIU Changyou,et al. Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2011,28(2):167-173.

[14] 吴拥政,杨建威. 煤矿砂岩横向切槽真三轴定向水力压裂试验[J]. 煤炭学报,2020,45(3):927-935.

WU Yongzheng, YANG Jianwei. True tri-axial directional hydraulic fracturing test on sandstone with transverse grooves in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3):927-935.

[15] 冯彦军,康红普. 水力压裂起裂与扩展分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊 2):3169-3179.

FENG Yanjun,KANG Hongpu. Hydraulic fracturing initiation and propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (S2): 3169-3179.

[16] 冯彦军. 煤矿坚硬难垮顶板水力压裂裂缝扩展机理研究及应用[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2013.

FENG Yanjun. Fracture propagation of hydraulic fracturing and its application to hard and stable roof management in coal mine [D]. Beijing: China Coal Research Institute,2013.

[17] 冯彦军,康红普. 受压脆性岩石 I - II 型复合裂纹水力压裂研究[J]. 煤炭学报,2013,38(2):226-232.

FENG Yanjun,KANG Hongpu. The initiation of I - II mixed mode crack subjected to hydraulic pressure in brittle rock under compression[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(2):226-232.

[18] 徐成,林健,王洋,等. 泵流量对纵向切槽水力压裂裂缝偏转的影响规律研究[J]. 煤矿开采,2019,24(1):11-15.

XU Cheng,LIN Jian,WANG Yang,et al. Influence of pump flow to fracture gauche of hydraulic fracturing with cutting along bore direction [J]. Coal Mining Technology,2019,24(1):11-15.