



推荐阅读:

[我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考](#)

[我国大采高综采技术及围岩控制研究现状](#)

[保水采煤研究 30 年回顾与展望](#)

[煤矿“短充长采”科学开采模式研究](#)

[西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势](#)

[基于保水采煤的煤炭开采带与泉带错位规划问题](#)

[煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望](#)

[基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究](#)

[软弱厚煤层沿顶掘进并沿底回采技术研究](#)

[松散煤岩组合体不均匀破坏试验研究](#)

[采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究](#)

[坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究](#)

[基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究](#)

[大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响](#)

[岩层移动理论与力学模型及其展望](#)

[我国水体下保水采煤技术研究进展](#)

[层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望](#)

[特大断面冲击地压巷道破坏机理及控制技术研究](#)

[动压影响下的软岩巷道加固治理技术研究](#)

[弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术研究](#)

采矿科学与工程



移动扫码阅读

司瑞江,李飞鹏,赵璐璐,等.区段大煤柱水力压裂切顶护巷技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):282-287. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.030

SI Ruijiang, LI Feipeng, ZHAO Lulu, et al. Research on hydraulic fracturing roof cutting and roadway protection technology with wide sublevel coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 282-287. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.030

区段大煤柱水力压裂切顶护巷技术研究

司瑞江,李飞鹏,赵璐璐,许利军,冯恒星

(山西晋煤集团赵庄煤业有限责任公司,山西 长治 046605)

摘 要:针对工作面回采过程中沿空留巷围岩应力高、蠕变变形大的难题,以赵庄矿井 1309 工作面为研究背景,用理论计算的方法开展了沿空留巷区域围岩结构力学分析,并提出了适用于该矿井的顶板双向水力压裂护巷工艺和效果检测方法。研究表明:13092 巷道变形程度由煤体单轴抗压强度、煤层埋深、顶板岩梁强度共同决定,在以上因素的叠加作用下采空区侧向顶板挤压煤柱,煤柱塑性区范围扩大,侧向应力向煤柱深部转移,顶板断裂前煤柱内弹塑性过渡区域垂直应力达到最大值,受侧向应力峰值影响 13092 巷道发生强烈蠕变变形,巷道断面维护困难;通过在 13091 巷道布置双向水力压裂孔,提前弱化顶板,破坏其应力传递和能量积聚的条件,有效地进行了人为断裂线的预制,并改善断裂线在煤柱上方的倾向位置,减缓了煤柱受挤压程度;在巷道上方施工的水力压裂孔能够有效促使关键岩块 B 回转下沉,减小了 1309 工作面侧向悬顶的长度,垮落的关键岩块 B 能够较好地对高位岩层形成支承作用;在施工水力压裂孔后相应区域巷道变形量缩小 40%,煤柱边界区域微震事件数和微震能量值均有大幅度减小,保证了沿空巷道在回采期间的围岩稳定性。该研究成果探索了顶板水力压裂护巷在晋煤矿区应用的可行性,并为类似矿井条件下开展压裂工艺提供了工程指导。

关键词:切顶护巷;区段大煤柱;水力压裂;围岩应力;沿空留巷

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)07-0282-06

Research on hydraulic fracturing roof cutting and roadway protection technology with wide sublevel coal pillar

SI Ruijiang, LI Feipeng, ZHAO Lulu, XU Lijun, FENG Hengxing

(Zhaozhuang Mining Limited Liability Company, Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group, Changzhi 046605, China)

Abstract: In view of the difficult problems of high stress and large creep deformation of the surrounding rock in the gob side entry during the mining process of the working face, the mechanical analysis of the surrounding rock structure along the remaining roadway was carried out using the theoretical calculation method with the No.1309 working face of Zhaozhuang mine as the research background and put forward the two-way hydraulic fracturing technology and effect detection method for the roof of the mine. The research results show that the deformation degree of the No.13092 roadway is determined by the uniaxial compressive strength of the coal body, the burial depth of coal seam and the strength of roof rock beam. Under the superimposition of the above factors, the lateral roof of the gob squeeze the coal pillar, resulting in the expansion of the plastic area within the coal pillar and the transfer of the side stress to the deep part of the coal pillar. Before the roof fracture, the vertical stress of the elastic-plastic interface area in the coal pillar reaches the maximum value, and the strong creep deformation of the roadway No.13092 is affected by the peak of the lateral stress, which makes the maintenance of the roadway section difficult; By arranging two-way hydraulic fracturing holes in No.13091 roadway, the integrity of roof are weakened in advance, and the conditions of stress transmission and energy accumulation are destroyed. It effectively prefabricates the artificial fracture line, improves the tend-

收稿日期:2020-02-11;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804209);国家自然科学基金资助项目(51974326)

作者简介:司瑞江(1977—),男,山西晋城人,高级工程师。Tel:0356-3600626, E-mail:siruijiang1977@126.com

ency of the fault line above the coal pillar, and slows down the degree of coal pillar extrusion; In addition, the hydraulic fracturing hole constructed above the roadway can effectively promote the rotation and subsidence of key rock block B, reducing the length of lateral overhang of the No.1309 working face, and the collapse of key rock block B can better form the supporting effect on the high-level rock stratum; After the construction of hydraulic fracturing hole, the tunnel deformation in the corresponding area is reduced by 40%, and the number of microseismic events and microseismic energy values in the boundary area of coal pillar are greatly reduced, ensuring the stability of surrounding rock during the mining of the roadway. The research results explored the feasibility of roof hydraulic fracturing roadway in Shanxi coal mine area, and provided engineering guidance for fracturing technology under similar mine conditions.

Key words: roof cutting to protecting roadway; wide sublevel coal pillar; hydraulic fracturing; surrounding rock stress; gob side entry driven

0 引言

留设煤柱一直是煤矿中传统的护巷方法,依据矿井受通风、防灭火、矿压的影响,煤柱留设宽度各不相同^[1-3];高瓦斯矿井留设大煤柱虽能有效抑制采空区瓦斯等有害气体向下一个工作面运移,但未能充分利用上工作面侧向卸压区,沿空巷道将受本工作面和下工作面两次采动超前应力的影响,同时还承受侧向采动应力的影响^[4-6],导致沿空巷道出现强烈蠕变变形现象,巷道变形大、扩修任务重、巷道维护费用高、影响正常生产。针对具体矿井的特定煤层,受赋存条件和煤层及顶底板力学特性影响,只能通过后期开展相应工序改善沿空巷道矿压显现程度,弱化沿空巷道变形^[7-9],以实现减弱动载与工作面上部静载的叠加效应,降低冲击危险。而针对高瓦斯矿井软煤、坚硬顶板、大埋深、宽煤柱条件下沿空巷道变形机理及防治措施鲜有研究,因此笔者以晋煤集团赵庄煤业 1309 工作面区段煤柱为背景,在分析顶板断裂结构与煤柱应力关联性的基础上^[10-12],针对矿井瓦斯涌出量大、瓦斯浓度高地质条件特点,同时考虑到顶板爆破与工作面回采存在交叉作业,提出区段大煤柱顶板水力压裂护巷工艺。

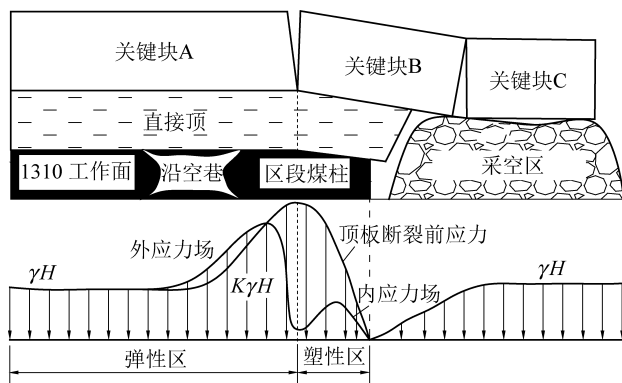
1 沿空留巷围岩结构力学分析

针对长壁回采工作面,运用屈服线分析法推断顶板屈服破坏线。在回采初期顶板将形成“O-X”断裂,在工作面后续回采过程中,工作面前方及侧向将形成内应力场和外应力场,工作面侧向顶板结构和垂直应力分布如图 1 所示。

煤层在受载过程中产生塑性区,而内应力场通常分布于该区域内^[13],在考虑煤层压缩的条件下,塑性区各点的垂直应力表达式为

$$\sigma_y = \left(\sigma_e + \frac{C}{f} \right) \left(1 + \frac{\alpha x}{h - \alpha x} \right)^{\frac{2\gamma}{\alpha}} \quad (1)$$

式中: σ_y 为塑性区各点垂直应力; σ_e 为煤层单向抗压强度; C 为煤层与顶底板间的黏聚力; f 为煤体坚固性系数; h 为煤层的开采厚度; α 为煤层压缩角; x 为深入



K —应力集中系数; γ —上覆岩层平均容重; H —埋深

图 1 回采工作面侧向的应力分布

Fig.1 Lateral stress distribution of working face

煤壁距离; x_0 为支承压力最大值深入煤壁距离。

采空区边界顶板断裂前,在弹塑性区交界处的支承压力达到最大值,即当 $x = x_0$ 时,

$$\sigma_y = K_{\max} \gamma H \quad (2)$$

其中: K_{\max} 为煤层最大应力集中系数。将此条件代入式(1)即可求得塑性区范围 x_0 的表达式为

$$x_0 = \frac{h}{\alpha} (1 - a_k^{-\frac{2\gamma}{\alpha}}) \quad (3)$$

其中: a_k 为最大支承压力与煤层强度条件间的关系系数,其表达式为

$$a_k = \frac{K_{\max} \gamma H}{\sigma_e + \frac{C}{f}} \quad (4)$$

可以看出,埋深 H 及最大应力集中系数 K_{\max} 越大,则塑性区范围越大。 σ_e 越小, x_0 越大。

综合以上分析可得,在一定采深和既定煤层条件下,塑性区范围与煤层开采厚度 h 成正比。内应力场的具体界限由岩梁强度和断裂所必需的锚固力决定,岩梁质量越大,强度越高,断裂所必需的锚固力越大,塑性区范围越大。侧向顶板断裂前将在煤柱弹塑性区交界位置形成侧向峰值应力,且在该阶段沿空巷道受侧向应力的影响,将产生大变形,巷道断面收缩;因此为缓解沿空巷道变形,应在回采巷道开展切顶护巷工艺,旨在通过减小塑性区宽度^[14-15],弱化侧向采动应力向沿空巷道转移,改善

沿空巷道的应力环境。

2 1309 工作面侧向矿压显现情况

2.1 1309 工作面基本概况

1309 工作面开采 3 号煤层,煤层平均厚度为 4.93 m,工作面走向长度为 2 753 m,倾向长度为 219 m,埋深 700 m 左右,1309 工作面布置如图 2 所示。由煤炭科学技术研究院有限公司测定的物理力学参数报告显示 3 号煤层单轴抗压强度为 8.488 MPa,顶板中存在单轴抗压强度大于 60 MPa 的粉砂岩。

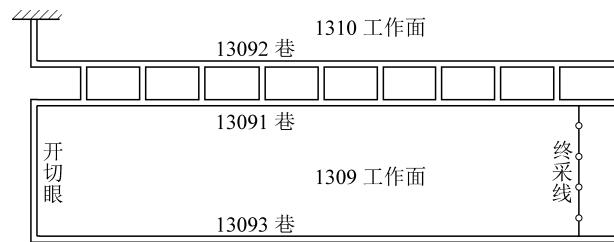


图 2 1309 工作面布置

Fig.2 No.1309 working face layout

由煤层、顶板的赋存条件和物理力学参数可得,煤层强度 σ_c 小,顶板坚硬不易垮断,且煤层埋深 H 大,煤层采厚 h 大。结合式(3)和式(4)可知,煤层及顶板属性导致图 1 中塑性区范围 x_0 大,促使 1309 工作面采空区边界采动应力向 13092 巷转移,不利于该巷道断面维护;即采空区外侧应力场分布范围在基本顶断裂前达到最大,断裂完成后基本顶压力向内应力场转移,压力高峰值将降低;同时在基本顶岩梁断裂前,压力在断裂线附近的集中,导致本巷道和沿空巷道均出现大变形;赵庄矿区段煤柱留设宽度为 55 m,煤柱宽度大,其内部将存在弹性核区,将对采场附近顶板产生强有力支承,而悬空顶板进一步挤压煤柱,侧向应力不断向沿空巷道方向积聚,导致 13092 巷出现大变形现象。

2.2 1309 工作面回采过程中矿压显现情况

13092 巷在 1309 工作面回采过程中作为本工作面辅助运输巷,在 1310 工作面回采过程中作为该工作面回风巷,其断面的维护对后期的通风、行人、运输等至关重要。在 13092 巷 13 号联络巷采用十字布点法设置 1 号巷道变形监测点,1309 工作面回采初期受侧向采动应力影响,13092 巷出现了蠕变大变形,1 号测点巷道变形统计如图 3 所示,测点位置顶底板移近量约 2 m,两帮移近量约 1.5 m。工作面相对测点 -50~200 m,13092 巷产生剧烈变形,原因为煤柱区域顶板未能及时垮落,悬顶受上覆岩层载荷作用,对煤柱进行挤压,导致沿空巷道变形较为剧烈。伴随工作面持续回采顶板沿侧向断裂线断裂

后,断裂顶板在煤柱边缘侧形成搭接结构,减轻煤柱受载荷程度,沿空巷道变形减缓。

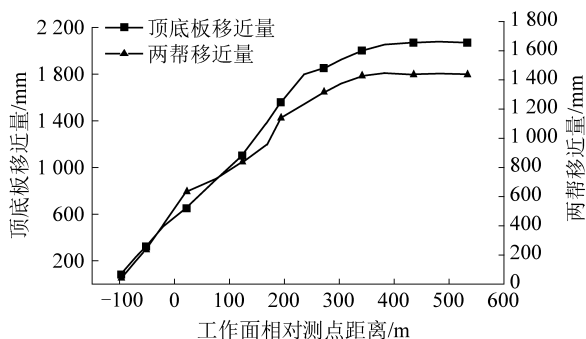


图 3 13092 巷 1 号测站围岩变形量

Fig.3 Surrounding rock deformation of No.1 surveying station in No.13092 roadway

利用 KJ768 微震监测系统对区段煤柱侧顶板局部破裂进行了定位,可看出在煤柱区域顶板范围内存在大量微震事件(图 4),表明该区域顶板破裂活动较为密集;在微震事件能量上则表现为:每天微震事件能量较大值处于 50~60 kJ,绝大部分微震事件能量处于 25~35 kJ,表明顶板断裂过程通常释放大能量,对工作面的通风行人造成了重大隐患,对 1310 工作面后续回采产生了制约。

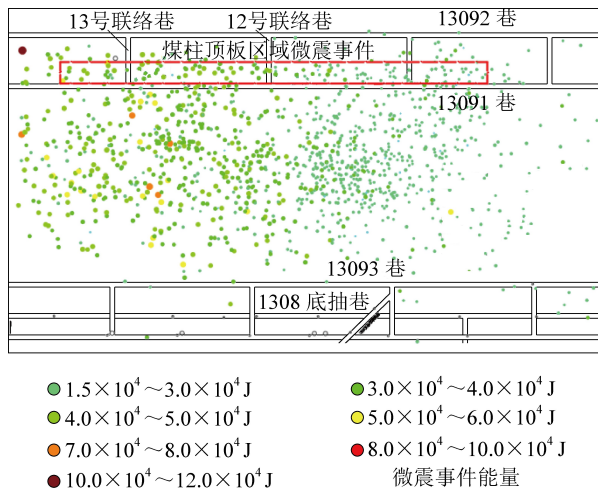


图 4 未施工顶板水力压裂区段微震定位

Fig.4 Microseismic location plan of hydraulic fracturing section of unconstructed roof

3 13091 巷顶板水力压裂孔施工设计

为有效改善 1309 工作面采空区侧顶板覆岩结构,缩减塑性区发育范围,缓解煤柱承受的压力,进而减缓 13092 巷巷道变形,因此在 13091 巷 10 号联络巷至 7 号联络巷区域布置钻孔,以破坏区段煤柱侧顶板的完整性,沿煤层走向方向在顶板内预制断裂线,该断裂线位置处于内外应力场边界上,在工作面回采后,利用基本顶来压作用,促使顶板水力裂隙

逐步发育、贯通,促使关键块 B(图 1) 尽快形成,并搭接在采空区内矸石上,减缓侧向峰值应力向沿空巷道转移,减弱 13092 巷变形。

3.1 顶板水力压裂裂纹扩展

13091 巷顶板水力压裂首先采用定向刀具进行预制裂隙,目的是在顶板岩层中预制楔形尖端,为后续高压注水形成应力集中区域创造条件,预割横缝如图 5 所示。在高压注液过程中预割横缝楔形尖端位置处形成高度应力集中,顶板裂隙逐步扩展,并与相邻钻孔水力压裂钻孔裂隙贯通,为后期顶板在采动应力下顺利垮落创造条件,裂隙扩展如图 6 所示。

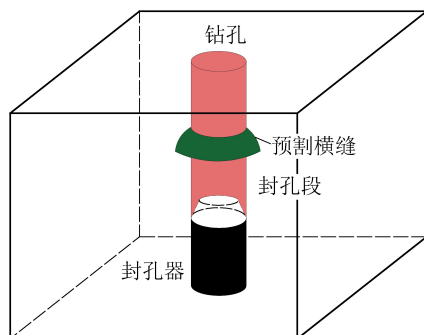


图 5 顶板预割横缝示意

Fig.5 Diagram of pre-cut cross seam on roof

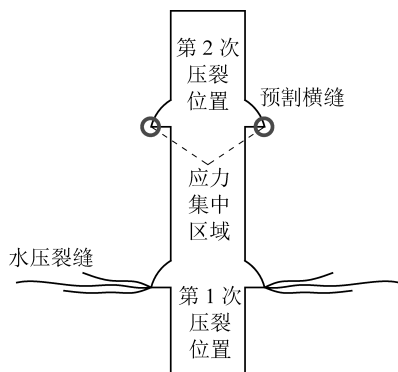


图 6 裂隙扩展示意

Fig.6 Fissure expansion diagram

3.2 压裂参数设计

由于岩体断裂韧度参数的不确定性,所需注水压力可根据岩体抗拉强度极限值确定,定向裂缝在如下压力条件下产生:

$$P = 1.3(P_z^* + R_t) \quad (5)$$

式中: P_z^* 为岩体应力,受深度、所处煤层及邻近煤层的开采历史、开采地质条件等的影响,一般以自重应力计算; R_t 为岩石极限抗拉强度; P 为裂隙扩展所需要的压力。

1309 工作面埋深 700 m 左右, P_z^* 取 17.5 MPa,根据力学参数报告砂岩极限抗拉强度 R_t 取 3.93 MPa,则通过计算得到该岩层所需注水压力为

27.86 MPa,实际施工中注液压力达到 30 MPa。

晋煤集团类似矿井顶板水力压裂有效半径为 5~8 m,因此在赵庄煤业 13091 巷每 15 m 布置 1 排钻孔,每排布置 2 个钻孔,其中单次压裂孔和双压裂孔各 1 个,钻孔直径为 48 mm,压裂孔布置如图 7 所示,其中单次压裂孔垂直于煤柱,致裂顶板上方的中细砂岩,考虑到煤层强度较低、顶板硬度高、埋深大等客观条件,钻孔终孔位置设计需避免由终孔位置过浅导致煤柱对顶板的支撑力不足诱发 13091 巷变形,同时为回避由终孔位置过深导致的不能有效实现 1309 工作面采空区边界顶板的回转、下沉和触矸,因此单次压裂钻孔水平方向延伸至煤帮以里 11 m;该类钻孔旨在通过高压水的作用在顶板范围内形成连贯裂隙,在工作面回采期间利用采动应力促使预制裂隙不断发育,形成工作面侧向断裂线(图 8),减小采空区顶板对煤柱的挤压作用,促使关键块 B 的回转下沉;双压裂孔方位角平行于巷道,压裂巷道上方中细砂岩和中砂岩,旨在回采结束后促使巷道上方顶板尽快下沉,并进一步促进关键岩块回转、下沉,同时减少采空区侧向悬顶,弱化煤柱受挤压的程度,最终减缓 13092 巷变形,实现切顶护巷的目的。

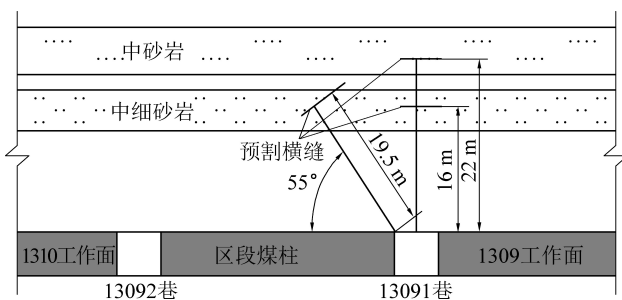


图 7 压裂孔布置示意

Fig.7 Schematic diagram of fracturing hole arrangement

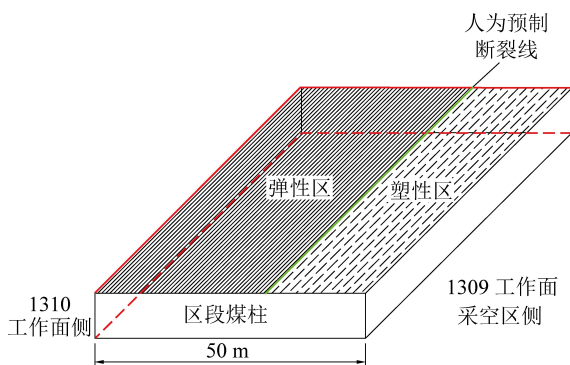


图 8 煤柱弹塑性区分布示意

Fig.8 Schematic diagram of elastic-plastic distribution of coal pillars

4 巷道顶板水力压裂效果分析

为有效分析顶板水力压裂效果对沿空巷道断面的维护情况,在13092巷8号联络巷设置2号巷道变形监测点,巷道变形监测曲线如图9所示。水力压裂区段煤柱侧微震事件定位如图10所示。

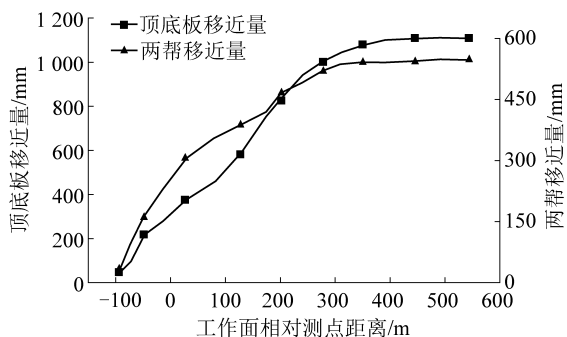


图9 水力压裂区域变形监测点巷道变形量

Fig.9 Deformation of roadway at deformation monitoring point in hydraulic fracturing area

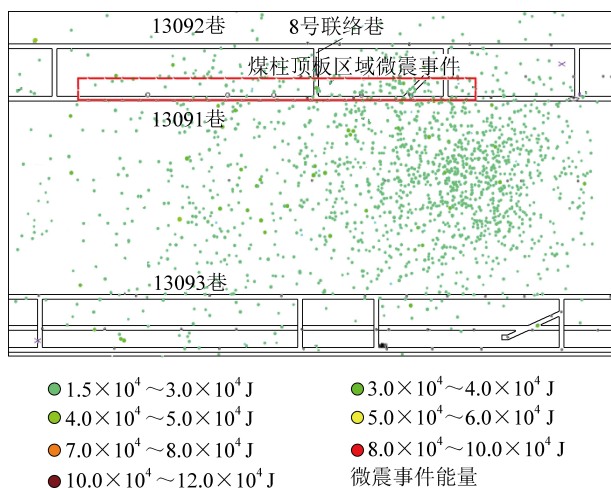


图10 水力压裂区段微震事件定位

Fig.10 Microseismic event location of hydraulic fracturing section

通过图9可以看出沿空巷道变形量大幅减小,巷道变形较大的阶段主要集中在相对工作面-50~173 m位置,顶底板移近量由2 m缩减到1.1 m左右,两帮移近量由1.5 m缩减到0.55 m左右,有效减少了巷道断面变形。通过图10可看出顶板施工水力压裂后,煤柱边缘侧产生预制裂隙,在工作面回采前后,顶板沿预制裂隙发育,避免煤柱上方顶板能量聚集,而在微震事件中则表现为事件数减少;同时每天微震事件能量最大值处于50 kJ以下,绝大部分微震事件能量处于20~25 kJ,表明水力压裂孔的施工能够有效地避免煤柱上覆顶板断裂跨度大、断裂释放能量多。通过分析煤柱区域顶板断裂位置、微

震定位密集程度和施工区域巷道围岩变形量可得,在13091巷施工的顶板水力压裂切顶护巷工艺取得了较好的应用效果。

5 结论

1)13092巷变形剧烈的原因为3号煤层顶板厚且强度高、煤层软、埋深大,在以上因素的叠加下,采空区侧向顶板挤压煤柱,致使煤柱范围内塑性区范围大,在顶板断裂前煤柱弹塑性交接区域应力达到最大值,13092巷受侧向采动应力的影响,发生强烈蠕变变形,导致巷道断面维护困难。

2)通过在13091巷施工顶板水力压裂孔,有效地进行人为断裂线的预制,并通过改善断裂线位置,减缓了煤柱受挤压程度,同时在巷道上方施工的水力压裂孔能够有效促使关键岩块B的回转下沉,同时减小了1309工作面侧向悬顶的长度。

3)通过双向水力压裂孔的施工有效改善了13092巷围岩应力分布,通过巷道变形量监测和煤柱区域顶板微震事件和能量特征分析,验证了切顶护巷的应用效果,并为晋城矿区类似矿井切顶护巷施工提供了工程指导。

参考文献(References):

- [1] 查文华,李雪,华心祝,等.基本顶断裂位置对窄煤柱护巷的影响及应用[J].煤炭学报,2014,39(S2):332-338.
ZHA Wenhua, LI Xue, HUA Xinzhong, et al. Impact and application on narrow coal pillar for roadway protecting from fracture position of upper roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 332-338.
- [2] 殷帅峰,程根银,何富连,等.基于基本顶断裂位置的综放窄煤柱煤巷非对称支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3162-3174.
YIN Shuaifeng, CHENG Genyin, HE Fulian, et al. An asymmetric support technique for fully-mechanized coal roadway nearby narrow pillar based on the fracture position analysis in basic roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3162-3174.
- [3] 侯朝炯,马念杰.煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨[J].煤炭学报,1989,14(4):21-29.
HOU Chaojiong, MA Nianjie. Stress in in-seam roadway sides and limit equilibrium zone[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(4): 21-29.
- [4] 刘具,何瑞敏,杨朋,等.深部沿空留巷顶板变形破坏规律及其控制研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):142-148.
LIU Ju, HE Ruimin, YANG Peng, et al. Research on deformation and failure law and control of roof in deep gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 142-148.
- [5] 钱鸣高,李鸿昌.采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J].煤炭学报,1982,7(2):1-12.

- QIAN Minggao, LI Hongchang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 1982, 7(2): 1-12.
- [6] 姜福兴, 宋振骐, 宋 扬. 基本顶的基本结构形式[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 366-379.
- JIANG Fuxing, SONG Zhenqi, SONG Yang. Basic structures of main roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 366-379.
- [7] 崔 峰, 刘星合. 综采工作面水力压裂顶板控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 172-176.
- CUI Feng, LIU Xinghe. Research on control technology of hydraulic fracturing roof in fully-mechanized mining face [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 172-176.
- [8] 姜 许, 陈 勉, 张广清, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1321-1326.
- JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guangqing, *et al.* Impact of oriented perforation on hydraulic fracture initiation and propagation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1321-1326.
- [9] 何 江, 窦林名, 巩思园, 等. 倾斜薄煤层切顶巷预裂顶板防治冲击矿压技术研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1347-1352.
- HE Jiang, DOU Linming, GONG Siyuan, *et al.* Research on rock burst prevention technology of roof-cutting roadway in inclined thin coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1347-1352.
- [10] 朱 珍, 张科学, 袁红平. 切顶卸压沿空留巷碎石巷帮控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 25-32.
- ZHU Zhen, ZHANG Kexue, YUAN Hongping. Control technology and its application of roadway side wall formed by gangue in gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 25-32.
- [11] 谢承煜, 罗周全, 贾 楠, 等. 缓斜极厚矿体开采安全切顶厚度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 278-284.
- XIE Chengyu, LUO Zhouquan, JIA Nan, *et al.* Safety roof cutting thickness in mining gently inclined and extremely thick ore body [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 278-284.
- [12] 付玉平, 宋选民, 邢平伟, 等. 大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1027-1031.
- FU Yuping, SONG Xuanmin, XING Pingwei, *et al.* Stability analysis on main roof key block in large mining height workface [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1027-1031.
- [13] 宋振骐. 实用矿山压力与控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1986.
- [14] 王红胜. 沿空巷道窄帮蠕变特性及其稳定性控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [15] 石 崇, 杨文坤, 沈俊良, 等. 动压巷道区段煤柱合理留设宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 108-114.
- SHI Chong, YANG Wenkun, SHEN Junliang, *et al.* Study on reasonable width of coal pillar in dynamic pressure roadway [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 108-114.