



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](#)



移动扫码阅读

陈金宇.沿空留巷围岩卸压支护协同控制技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):44-49. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.004

CHEN Jinyu.Research on collaborative control technology for surrounding rock pressure relief and support of gob-side entry[J].Coal Science and Technology,2020,48(8):44-49. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.004

沿空留巷围岩卸压支护协同控制技术研究

陈金宇^{1,2,3}

(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.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013)

摘要:为解决沿空巷道受相邻采空区未断裂基本顶形成的悬臂梁支承压力影响的问题,采用水力压裂顶板卸压的方法,对采空区基本顶提前压裂,尽量减少相邻采空区基本顶形成悬臂梁结构,从而降低和转移沿空巷道顶板所受支撑压力的强度。在此基础上采用柔模袋充填混凝土在沿空巷道和采空区间做人工墙,对充填混凝土进行井下强度测试,同时对沿空巷道顶板以及所做的人工墙进行强力锚网支护,使其最大限度恢复到三向应力状态,提高其抗载能力。通过现场人工墙压应力和顶底板移近量监测对比表明:进行水力压裂卸压后,人工墙承受沿空巷道顶板最大压应力为 21 MPa,比未进行水力压裂卸压区域所受压应力降低了 36.4%;沿空巷道顶底板移近量为 320 mm,降低了 46.5%。水力压裂卸压后,极大改善了 3109 辅助进风巷的应力环境,降低了沿空巷道顶底板移近量,保证了沿空巷道的安全使用,有效的缓解采掘紧张的局面。

关键词:沿空留巷;水力压裂;卸压支护协同控制;柔模人工墙;强力锚网支护;人工墙压应力

中图分类号:TD322 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)08-0044-06

Research on collaborative control technology for surrounding rock pressure relief and support of gob-side entry

CHEN Jinyu^{1,2,3}

(1.CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to solve the problem of the support pressure of the cantilever beam formed by the unbroken main roof in the adjacent gob, the hydraulic fracturing roof pressure relief method is adopted to pre-fracture the main roof in the gob and minimize the adjacent mining. The canopy structure is basically formed in the roof of the gob, there by reducing and transferring the strength of the supporting pressure on the roof of the gob-side entry. On this basis, the soft film bag filling concrete is used as a artificial wall in the gob-side entry and gob section, and the underground strength test of the filled concrete is carried out. At the same time, the roof of the gob-side entry and the artificial wall are strongly anchored and supported by the mesh to make it recover to three-dimensional stress state to the maximum extent and improve their load resistance. The comparison between the pressure stress of the artificial wall and the displacement of the roof and floor shows that after hydraulic fracturing and decompression, the maximum compressive stress of of the roof of the roadway is 21 MPa, which is 36.4% lower than the area without hydraulic fracturing and pressure relief; the displacement of the roof and floor in the gob-side entry is 320 mm, which is reduced by 46.5%. After hydraulic fracturing and pressure relief, the stress environment of No.3109 auxiliary air intake roadway has been greatly improved, the displacement of the roof and floor of the gob-side entry has been reduced, the safe use of the gob-side entry has been ensured, and the tension of mining has been effectively relieved.

Key words: gob-side entry retaining; hydraulic fracturing; pressure relief and support coordination control; flexible membrane artificial wall; strong anchor mesh support; artificial wall compressive stress

收稿日期:2020-01-23;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603004)

作者简介:陈金宇(1982—),男,江苏响水人,副研究员。E-mail:dayu5000@163.com

0 引言

近年来,随着开采工作面机械化程度越来越高,开采速度的不断提升,但同时矿井下地质条件也越来越复杂,极易造成采掘衔接紧张,沿空留巷技术成为解决这个难题的有效办法,即采用上个工作面的回采巷道进行无煤柱留巷,继续为下个工作面服务。此时巷道除受到本工作面滞后及侧向支撑压力影响,还要受到下个工作面回采的动压的剧烈影响,巷道支护十分困难。究其原因,主要是巷道处于工作面回采后的采空区基本顶无法及时断裂垮落,形成悬臂梁结构,是采空区基本顶的垂直应力大量转移到沿空留巷的顶板,使巷道围岩处于不稳定的高应力状态下,持续不断发生变形乃至破坏^[1-3]。目前沿空留巷技术、材料、工艺已经在很多煤矿进行了应用。根据沿空留巷的生产地质条件,可以采取砌砖、钢管混凝土、矸石配高水材料充填、柔模袋充填混凝土等方法,但沿空留巷的使用情况并不好,常在很短时间,发生剧烈变形收缩,甚至完全闭合,这就失去了留巷的意义^[4-6]。

目前水力压裂技术在煤矿主要是处理工作面初采垮落距较大的问题。冯彦军等^[7]在晋煤王台铺煤矿采用定向水力压裂技术处理坚硬顶板难垮问题。首先采用切槽钻头在岩体较为完整段预制横向切槽,然后使用跨式膨胀型封隔器进行分段封孔,对坚硬顶板同一钻孔进行多次压裂,从而有效弱化顶板。文献^[8-9]采用岩石的三轴压缩试验研究高压水在岩体中的运动状况,并通过现场对其进行了验证。由康红普^[11]提出的“强力支理论”和何满潮^[9]提出的“先让(卸)后支,能量释放”理论也逐渐的归化统一。鉴于此,笔者拟在远场卸压、近场强支协同控制巷道围岩方面开展研究,旨在解决沿空留巷、动压巷道等围岩控制问题。

1 试验巷道生产地质条件

1.1 巷道布置

新元煤矿 3109 工作面采用综合机械化采煤,工作面东部为尚未开采的 3110 工作面,西部为 3108 采空区,北部为东区运输大巷,南部为西窑村保护煤柱。3109 工作面走向长度 1 464 m,倾向长度 210 m,辅助进风巷和回风巷之间煤柱为 40 m,巷道净断面 18.72 m²,平均埋深 498 m。为解决采掘衔接紧张以及瓦斯排放问题,新元矿 3109 工作面辅助进风巷采取沿空留巷,为 3110 工作面服务,巷道布置如图 1 所示。为保证 3109 辅助进风巷沿空留巷的安

全稳定性,减小巷道后期变形程度,减小巷道返修和补强支护强度,首先在新元煤矿 3109 辅助进风巷采用水力压裂技术对顶板岩层进行压裂卸压,尽量减少 3109 采空区基本顶悬顶,以此降低和转移工作面上覆岩层储存的高应力,改善 3109 辅助进风巷的应力环境,降低巷道维护难度。在此基础上,采用柔模袋混凝土充填人工墙结合高强锚网支护,保证留巷的稳定性。

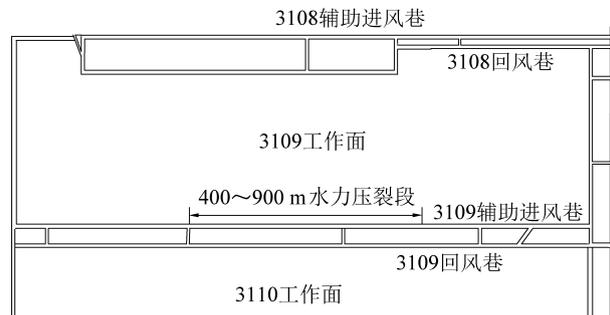


图 1 3109 工作面回采巷道平面布置

Fig. 1 Layout plan of entry in No. 3109 working face

1.2 煤层赋存特征及顶底板岩性

新元煤矿 3 号煤层以亮煤为主,结构简单且赋存较为稳定,内生裂隙发育。3 号煤层中一般含 1~2 层泥质夹矸,厚度一般为 0.02~0.05 m。煤层顶板受古河床冲蚀及受沉积环境影响,存在煤层变薄现象。煤层倾角一般为 2°~8°,平均 5°,煤层厚度 2.00~3.30 m,平均 2.75 m。煤层上部存在高岭石泥岩伪顶,厚度约为 0.25 m;直接顶为厚 2.70 m 左右的黑色砂质泥岩;基本顶为厚 6.30 m 左右的中粒砂岩,局部含粉砂岩条带。直接底为厚 3.70 m 的黑色含植物化石的砂质泥岩;基本底为厚 18.95 m 中粒砂岩,局部含粉炭质条带。3 号煤层地质柱状如图 2 所示。

根据现场地质力学测试得出最大水平主应力 $\sigma_H = 16.03$ MPa,最小水平主应力 $\sigma_h = 10.19$ MPa,垂直主应力 $\sigma_v = 14.12$ MPa,中粒砂岩强度平均值为 82.24 MPa,砂质泥岩强度平均值为 58.38 MPa。

2 3109 辅助进风巷沿空留巷卸-支设计

2.1 水力压裂卸压方案设计

1) 压裂钻孔布置。水力压裂工作与工作面正常生产不能互相干扰,压裂钻孔应超前工作面布置。钻孔参数应根据顶板岩层的岩性、厚度、结构完整性等来确定。根据 3 号煤顶板综合柱状图 2 可知,压裂区域主要是顶板较为完整的泥岩和中粒砂岩。在 3109 辅助进风巷顶板采用地质钻机打孔,钻孔直径 56 mm。根据现场施工环境,确定在距采空区侧帮

岩层	厚度/m	柱状	岩性描述
	最大~最小 平均		
砂质泥岩	$\frac{5.90 \sim 3.80}{4.95}$		灰黑色粉砂质泥岩, 中部夹有细砂岩
砂质泥岩	$\frac{6.40 \sim 3.60}{5.00}$		灰黑色粉砂质泥岩, 上部含砂量较小, 下部富含植物化石, 下部含砂量较大
中、粗粒砂岩	$\frac{14.60 \sim 0.70}{5.74}$		灰白色中粒及粗粒砂岩, 其成分以石英为主, 含黑色矿物, 有时变为细粒砂岩、粉砂岩或粉砂质泥岩, 稳定性差; 该层裂隙发育, 局部富含砂岩裂隙水
砂质泥岩	$\frac{4.02 \sim 2.08}{2.46}$		灰色粉砂质泥岩, 上部为泥岩, 并含有植物化石碎片
1煤	$\frac{0.35 \sim 0}{0.22}$		1煤, 本层厚度较小, 变化较大, 很不稳定, 无开采价值
砂质泥岩	$\frac{5.30 \sim 3.60}{3.78}$		灰黑色粉砂质泥岩, 中部夹有细砂岩
2煤	$\frac{1.24 \sim 0}{0.40}$		2煤, 厚度极不稳定, 局部地区达到可采厚度, 但范围较小, 无开采价值
砂质泥岩	$\frac{4.15 \sim 0.80}{2.96}$		灰黑色粉砂质泥岩, 上部含砂量较小, 顶部富含植物化石, 下部含砂量较大
中粒砂岩	$\frac{16.53 \sim 0.50}{6.30}$		灰白色中粒砂岩, 局部富含裂隙水; 有时相变为砂质泥岩与细砂岩互层
砂质泥岩	$\frac{5.62 \sim 0}{2.70}$		深灰色粉砂质泥岩, 并含有植物化石, 有时呈细粒砂岩与粉砂质泥岩互层
3煤	$\frac{4.08 \sim 0.40}{2.75}$		3煤, 大部分均稳定可采(除西部边界, 煤层由西向东由薄变厚)

图2 3号煤层地质柱状

Fig.2 No.3 coal seam geological histogram

1.0 m 顶板打孔, 钻孔投影与巷道轴线方向夹角 15° , 与底板仰角为 50° 。根据顶板较完整坚硬的岩层位置, 确定压裂垂深为 34.5 m, 则压裂钻孔长度为 45.0 m, 孔间距为 8.0 m。为了保证压裂过程中巷道顶板安全, 顶板 0~9.0 m 垂深为沿空留巷顶板支护范围, 不进行压裂, 则钻孔压裂深度为 11.7~45.0 m, 每隔 3.0 m 压裂一次, 可根据顶板岩层的完整性和强度, 适当调整, 每孔压裂 11 次左右, 每次保压不少于 30 min。水力压裂卸压钻孔布置如图 3 所示。

2) 压裂参数。根据压裂区域岩层最大、最小主应力及岩层抗拉强度, 可计算裂缝起裂压力:

$$P_b = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + \sigma_t \quad (1)$$

根据 3109 辅助运输巷地质力学参数及岩体强度测试结果: 最小水平主应力 $\sigma_{\min} = 10.19$ MPa, 最大水平主应力 $\sigma_{\max} = 16.03$ MPa, σ_t 为岩石的抗拉强度, 计算可得最低起缝压裂达到 23 MPa。考虑到水柱压升的高度、压力在较长管路传输中的损失、裂纹穿层扩展中的各种压力损失, 需要一定的其压力损失系数, 结合现场经验, 最终确定需要高压注水泵的压力为 40 MPa 以上, 注水泵流量为 70 L/min 以上^[12-13]。

3) 施工工艺。①首先使用煤矿防爆地质钻机, 直径为 56 mm 的钻头按照钻孔设计参数进行打孔, 控制好钻孔的角度, 尽量使一排钻孔的压裂裂纹能够勾连贯通, 有利于悬顶的断裂; ②打设压裂钻孔后, 要立即用水冲洗钻孔内壁; ③打孔过程中尽量降

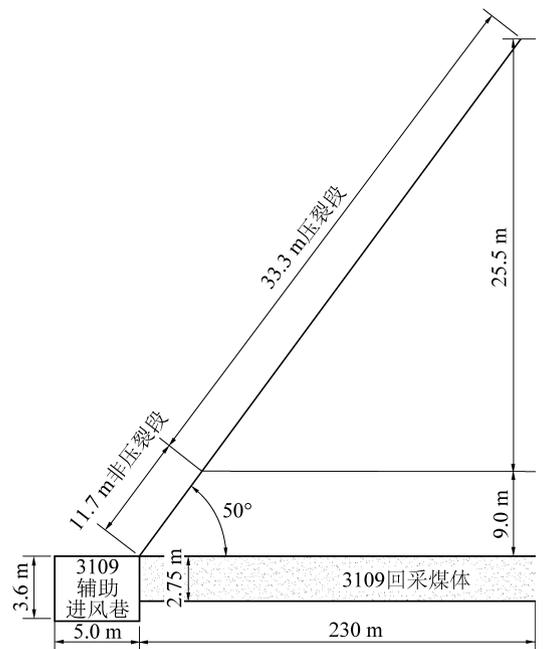


图3 水力压裂卸压钻孔布置

Fig.3 Layout of hydraulic fracturing borehole

低钻进速度, 减小钻机推力, 使完成的钻孔成一条直线, 这样有利于后期封孔器的顺利推入; ④采用注水钢管将封孔器慢慢推入钻孔里, 并到达压裂位置; 然后, 连接手动泵和胶管, 对封孔器进行加压膨胀, 从而达到对压裂段两侧封隔的目的, 封孔系统如图 4a 所示; ⑤最后, 连接高压注水泵、高压胶管、水压仪和注水钢管, 封孔器对封隔压裂段进行注水压裂, 压裂系统如图 4b 所示^[14-15]。

压裂过程中, 要有专人密切注意顶板变化、压力

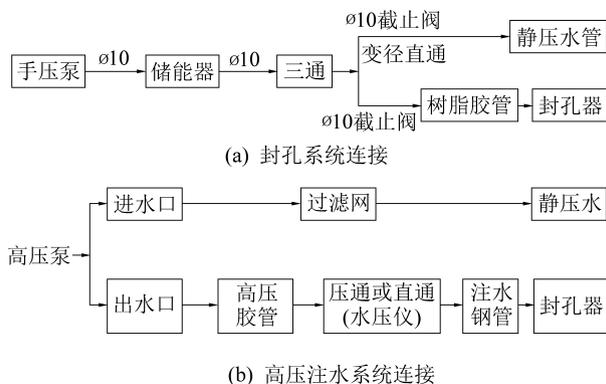


图4 压裂封孔及高压注水连接系统流程

Fig.4 Connection of sealing and high pressure water injection system

表的读数、巷道淋水情况,若有异常,应立即停泵,情况严重时,人员也立即撤离,或由外向内支设加强支柱或其他顶板防护措施。

2.2 柔模袋混凝土人工墙与强力锚索支护设计

随着水力卸压及工作面的向前推进,紧跟着对沿空巷道顶板补强,然后在沿空巷道与采空区之间采用柔模袋充填混凝土做人工墙,配以强力锚网支护。借助对拉锚杆的约束作用使柔模混凝土人工墙处于三向受压状态,使其具有更高的抗压强度和抗变形能力,从而大幅提高柔模混凝土人工墙结构的承载能力^[11-12]。

1) 顶板加强支护设计方案。3109 辅助进风巷净宽 5.2 m,净高 3.6 m,净断面 17.4 m²,设计采用锚索梁加强支护。设计方案如图 5 所示。

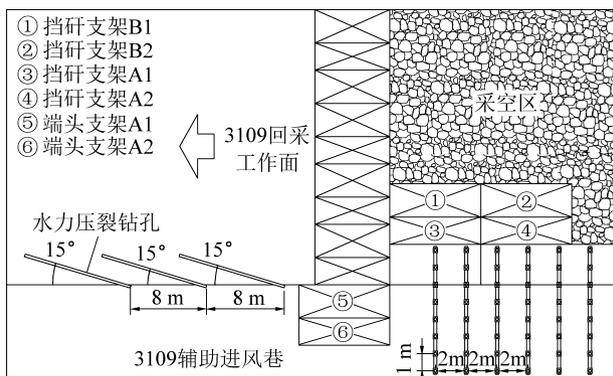


图5 水力卸压钻孔布置及沿空留巷顶板强力支护布置

Fig.5 Layout of hydraulic pressure relief drilling and roof strong support of gob-side entry

巷道顶板设计每排布置 8 根锚杆,间排距 1 000 mm×2 000 mm,最左边锚索距离帮 200 mm,全部垂直打设。采用直径 22 mm,长度 7 300 mm 锚索,外露长度为 300 mm;锚索托板采用强度与索体匹配的规格为 300 mm×300 mm×14 mm 的拱形托板。钢筋托梁采用直径为 14 mm 的钢筋焊接,托梁宽度为

220 mm,长度为 3 500 mm,每排 2 根。每根锚索用 1 支 K2335 与 2 支 Z2360 树脂药卷进行锚固,顶板锚索初始预紧力不小于 300 kN。

2) 浇筑人工墙加强支护。根据已有的工程经验及计算,充填材料选择采用 C30 混凝土,具体材料配比见表 1,强度曲线如图 6 所示^[16-17]。

表1 C30 泵注混凝土配比

Table 1 Proportion of C30 pump concrete

混凝土成分	胶凝材料	水	骨料	
混凝土基料	水泥(425)	水	石子	砂子
1 m ³ 混凝土基料质量/kg	560	230	800	760

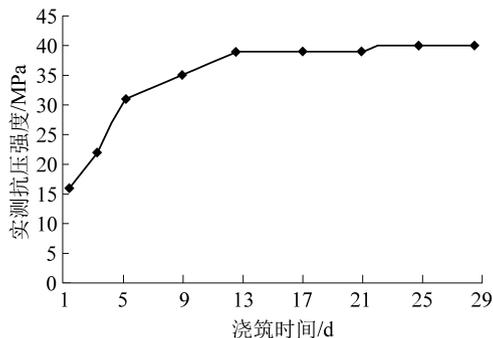


图6 井下实测 C30 混凝土强度变化曲线

Fig.6 Variation curve of C30 concrete strength measured underground

混凝土材料充填至柔模袋凝固后,采用钢筋网、对拉锚杆以及钢护板对其施加表面约束,提高整体的强度。3109 辅助进风巷高度在 3.6 m 左右,考虑 300 mm 的接顶富余量,柔模袋设计规格:长×高×厚=3.0 m×3.9 m×2.0 m,设有锚栓孔、泵注口、瓦斯抽采孔。在柔模袋支护墙体内预置锚杆,两端分别配置托盘及螺母,间排距为 1 000 mm×1 000 mm。锚杆规格采用 $\phi 22$ mm×2 200 mm,两端螺纹长度分别为 100 mm。钢筋托采用直径为 14 mm 钢筋焊接,托梁宽度为 110 mm,长度为 3 400 mm。钢筋网采用 $\phi 6.5$ mm 的钢筋焊接而成,网孔规格为 50 mm×50 mm,网片尺寸为 3.4 m×1.2 m。锚杆托板采用与杆体强度匹配的 150 mm×150 mm×10 mm 高强度拱形托板。锚杆间排距 1 000 mm×1 000 mm,采用两端预紧对拉方式,初期锚杆预紧力矩不小于 300 N·m。柔模混凝土注入口直径为 230 mm,泵注口上边缘距柔模顶部 500 mm^[18-19],人工墙支护结构布置如图 7 所示。

3 柔模人工墙应力及巷道位移监测

3109 辅助进风巷从 0~400 m 未卸压进行留巷,从 400~900 m 段进行水力压裂卸压后留巷,具体压

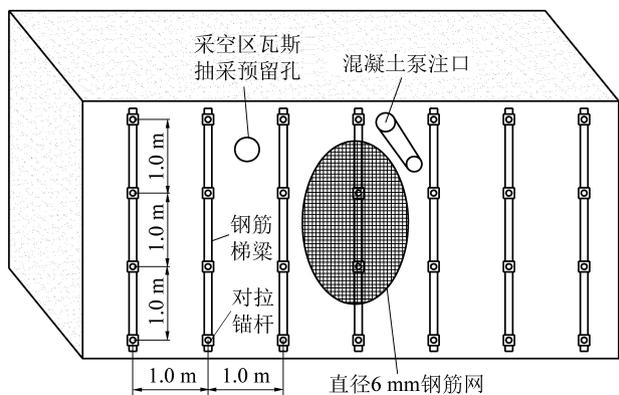


图7 3109工作面沿空留巷柔模人工墙支护结构布置

Fig.7 Layout of soft membrane artificial wall support structure in No.3109 working face

裂位置如图1所示。在3109辅助进风巷留巷段0~400 m和400~900 m分别设立监测站,对比分析是否进行水力压裂卸压时顶板对柔模人工墙的压应力如图8所示,顶底板移近量如图9所示。

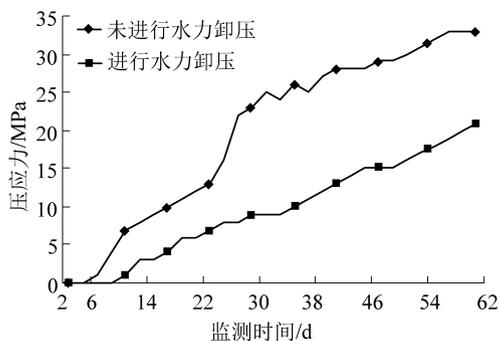


图8 柔模混凝土人工墙压应力监测曲线

Fig.8 Pressure monitoring curves of flexible membrane concrete artificial wall

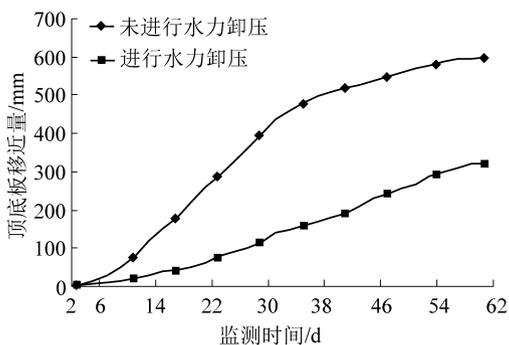


图9 沿空巷道顶底板移近量观测曲线

Fig.9 Observation curves of roof and floor deformation in of gob-side entry

从图8~9可以看出,观测60 d后,未卸压时留巷人工墙承受最大压应力为33 MPa,顶底板最大移近量为598 mm;进行水力卸压后留巷人工墙承受最大压应力为21 MPa,降低了36.4%;顶底板最大移近量为320 mm,降低了46.5%,且基本稳定,说明柔

模混凝土人工墙和沿空巷道顶板在强力锚网支护下,恢复三向应力状态,承载能力得到极大的提高。

4 结 论

1)通过对沿空留巷采空区侧基本顶进行水力压裂,能够有效压裂采空区基本顶悬顶,同时激活岩层原生的层理和节理,在高采动应力作用下,产生滑动变形,有效改善沿空巷道的应力环境。

2)采用柔模袋充填混凝土浇筑采空区侧的人工墙,结合强力锚网加强支护,使沿空巷道的顶板和所做人工墙尽量恢复三向受力状态,提高了其抗载能力。

3)沿空留巷围岩采用水力卸压结合强力锚网协同控制,从巷道的应力环境、支护强度两方面入手控制巷道的变形。现场监测结果表明,进行水力压裂卸压后,柔模人工墙承受顶板最大压应力为21 MPa,降低36.4%;顶底板最大移近量为320 mm,降低46.5%。

致谢:在现场实施、监测、分析过程中得到了新元煤炭有限责任公司荆保平高级工程师、中煤科工开采研究院有限公司冯彦军博士的帮助和支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

- [1] 华心祝.我国沿空留巷支护技术及发展现状[J].煤炭科学技术,2006,34(12):78-81.
HUA Xinzhu. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 78-81.
- [2] 康红普,朱泽虎,王兴库,等.综采工作面过上山原位留巷技术研究[J].煤炭学报,2002,27(5):458-461.
KANG Hongpu, ZHU Zehu, WANG Xingku, et al. Study of retaining roadway on original site in goaf after coal mining face crossing rise [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 458-461.
- [3] 尹希文.我国大采高综采技术及围岩控制研究现状[J].煤炭科学技术,2019,47(8):37-45.
YIN Xiwen. Research status of strata control and large mining height fully-mechanized mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 37-45.
- [4] 李化敏.沿空留巷顶板岩层控制设计[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):651-654.
LI Huamin. Control design of roof rocks for gob-side entry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 651-654.
- [5] 左建平,孙运江,文金浩,等.岩层移动理论与力学模型及其展望[J].煤炭科学技术,2018,46(1):1-11,87.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WEN Jinhao, et al. Theoretical and

- mechanical models of rock strata movement and their prospects[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 1-11, 87.
- [6] 朱卫兵,于斌.大空间采场远场关键层破碎形式及其对矿压显现的影响[J].煤炭科学技术, 2018, 46(1):99-104.
ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large space stope[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99-104.
- [7] 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 directional hydraulic fracturing in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1148-1155.
- [8] 高晓进.综放工作面难放顶煤架间定向水力压裂技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院, 2017.
- [9] 何满潮,陈上元,郭志魁,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报, 2017, 46(5):959-969.
HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. Journal of China University of Mining Technology, 2017, 46(5): 959-969.
- [10] 陈金宇,李文洲.孤岛工作面动压回采巷道水力切顶护巷技术[J].煤矿安全, 2016, 47(12):129-132.
CHEN Jinyu, LI Wenzhou. Technology of hydraulic cutting roof and protecting roadway in dynamic pressure mining gateway of isolated island working face[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(12): 129-132.
- [11] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(4):649-664.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649-664.
- [12] 闫少宏,宁宇,康立军,等.用水力压裂处理坚硬顶板的机理及实验研究[J].煤炭学报, 2000, 25(1):32-35.
YAN Shaohong, NING Yu, KANG Lijun, et al. The mechanism of hydro-breakage to control hard roof and its test study[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 32-35.
- [13] 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.
- [14] 唐满元.五阳煤矿7609工作面运输巷水压预裂卸压技术研究[J].能源技术与管理, 2019(4):45-47.
TANG Manyuan. Study on presplitting technology of water pressure in transportation roadway of 7609 working face in Wuyang Coal Mine[J]. Energy Technology and Management, 2019(4): 45-47.
- [15] 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.
- [16] 康红普,王金华,林健.高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J].煤炭学报, 2007, 32(12):1233-1238.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. High prestress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [17] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报, 2004, 33(2):183-186.
BAI Jianbiao, ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, et al. Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 183-186.
- [18] 华心祝,马俊枫,许庭教.锚杆支护巷道巷旁锚索加强支护沿空留巷围岩控制机制研究应用[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(12):2107-2112.
HUA Xinzhu, MA Junfeng, XU Tingjiao. Study on controlling mechanism of surrounding rock of gob-side entry with combination of roadside reinforced cable supporting and roadway bolt supporting and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2107-2112.
- [19] 康红普,牛多龙,张镇,等.深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(10):1977-1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.