

刘润,李臣,邹艳玲,等.末采期回撤通道围岩破坏机理及稳定性控制[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(2):6-12. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.002

LIU R, LI C, ZOU Y L, et al. Failure Mechanism and Stability Control of Surrounding Rock of Equipment Withdrawal Channel During Final Mining[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(2): 6-12. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.002

末采期回撤通道围岩破坏机理及稳定性控制

刘润¹, 李臣^{2,3*}, 邹艳玲², 李晓龙², 杨瑞刚¹

(1. 神华包头能源有限责任公司 万利一矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083;
3. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要:针对万利一矿 3-1 煤层回撤通道末采期间矿压显现剧烈的问题,通过现场监测、数值模拟、理论分析等方法,研究工作面前方应力分布、非等压巷道塑性区分布、末采期间巷道围岩破坏特征和区域应力场矢量分布规律.研究表明:万利一矿工作面前方 20 m 为受支承压力剧烈影响导致的高偏应力场范围,在此高偏应力环境下,巷道易发生蝶形失稳;末采期间,工作面前方煤柱内应力由双峰非对称分布向单峰对称分布转化,回撤通道间的煤柱应力始终处于双峰非对称分布,但辅回撤通道的区域应力场极值较小,有利于巷道的稳定;末采期间,回撤通道在间断变化的复杂移动支承压力的作用下逐渐塑性失稳,但在保护煤柱作用下,辅回撤通道的围岩应力分布模式未变,塑性区蝶形扩展有限.基于此,提出针对性的锚杆索联合支护配合末采期加强支护的围岩稳定性控制技术,现场应用有效地控制了围岩失稳,效果良好.

关键词: 回撤通道; 应力分布; 塑性区演化; 加强支护

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2022)02-0006-07

Failure Mechanism and Stability Control of Surrounding Rock of Equipment Withdrawal Channel During Final Mining

LIU Run¹, LI Chen^{2,3}, ZOU Yanling², LI Xiaolong², YANG Ruigang¹

(1. Wanli No.1 Mine, Shenhua Baotou Energy Co., Ltd., Ordos 017000, China;
2. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd. of CCTEG, Wuhan 430064, China)

Abstract: During the final mining of working face in 3-1 coal in Wanli No. 1 mine, the strata behaviors of the equipment withdrawal channel (EWC) is severe. The stress distribution in front of the working face, the plastic zone distribution characteristics of non-isobaric roadway, the failure characteristics of surrounding rock and the vector distribution of regional stress field during the final mining are studied by means of field monitoring, numerical simulation and theoretical analysis. The research shows that: The 20 m in front of the working face of the Wanli No.1 mine is the range of high deviant stress field caused by the severe influence of abutment pressure. Under such high deviator stress, the roadway is prone to butterfly instability. During the final mining, the internal stress of the coal pillar in front of the working face is transformed from bimodal asymmetry to bimodal asymmetric distribution to unimodal symmetric distribution. The stress in the coal pillar is always in the bimodal asymmetry

收稿日期: 2020-09-08

修改日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004289); 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M700427)

* 通信作者, E-mail: leesin0225@163.com

distribution between the main EWC, but the extreme value of the stress field in the area of the auxiliary EWC is small, which is beneficial to the stability of the roadway. During the final mining period, the main EWC gradually becomes plastic unstable under the action of complex moving abutment pressure with continuous changes, but the surrounding rock stress distribution mode of the auxiliary EWC does not change under the action of protecting coal pillar, and the butterfly shape expansion of the plastic zone is limited.

Keywords: equipment withdrawal channel; stress distribution; evolution of plastic zone; strengthen supporting

预掘双回撤通道技术是指在工作面停采线处沿倾向方向采掘 2 条巷道,靠近工作面的称为主回撤通道,靠近外侧实体煤的称为辅回撤通道,主回撤通道、辅回撤通道、联络巷及贯通后的工作面共同形成回撤空间^[1],如图 1 所示.采用预掘双回撤通道技术可以在工作面回采结束后快速地将生产设备,缩短搬家周期,缓解工作面接替紧张^[2].

由于工作面推进至贯通主回撤通道后才能进行设备回撤,因此,末采期间工作面之间的煤柱是动态变化的,即回撤通道可视为特殊的采动巷道.采动巷道围岩应力不再均匀对称分布,导致采动巷道围岩塑性区的形态尺寸发生变异^[3].马念杰等^[3-6]开创性地提出采动双向非均匀应力场下采动巷道蝶形塑性区理论;袁超等^[7-8]分析采动非等压应力场下蝶形塑性区的偏转特性,揭示了采动巷道围岩非对称变形机理,并针对性地提出围岩稳定性控制技术方案;李臣等^[9]通过分析工作面侧方区域应力场的矢量分布特征及对应条件下的围岩塑性区形态规律,发现留巷围岩大变形是采动高偏应力作用下围岩塑性区的蝶化趋势所致;刘洪涛等^[10-11]系统研究了 20 m 煤柱持续采动作用下巷道应力动态分布特征及其围岩塑性区全时空演化规律,用蝶形塑性区解释采动巷道破坏发育趋势.在巷道围岩控制方面,杨仁树等^[12-13]基于顶板断裂空间位置与周期来压对回撤通道的影响确定合理的回撤通道位置,在“顶帮协同控制”的原则下,实施顶板全锚索、煤帮锚网索联合支护方案,确保了围岩的稳定;李杰等^[14-15]针对上湾矿 8.8 m 超大采高工作面周期来压步距短,矿压显现剧烈的问题,提出回撤通道煤壁侧向施压改善围岩抵抗变形的原则进行超大断面主回撤通道联合支护新技术,提高了围岩稳定性;余伟健等^[16-17]总结了强采动巷道围岩剧烈破坏的特征,并分析了不同侧向应力系数时巷道顶底板和两帮变形的差异化响应过程,对强矿压巷道的围岩控制方案提供了思路.

现有研究多关于固定煤柱尺寸的采动巷道,虽然回撤通道可视为特殊的采动巷道,但在末采期间贯通前,工作面不断推进的过程中,煤柱尺寸的动态变化对围岩的扰动与采动巷道仍有较大影响.因此,本文将结合万利一矿的实际地质概况,利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件研究回撤通道采动围岩动态应力-塑性区演化,研究结果可为类似条件下的回撤通道围岩控制提供技术支持.

1 工程概况

万利一矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜煤田,该矿现主采 3-1 煤层的平均厚度为 4.5 m,平均埋深为 120 m,煤层赋存稳定但顶板结构较为复杂,煤层顶底板均为粉砂岩,直接顶平均厚度 4 m,直接底平均厚度 3.8 m,其中直接顶含有 1~2 层泥岩夹矸.

3-1 煤 3 盘区各工作面长度均为 300 m,采用预掘双回撤通道的布置方式.根据设备尺寸设计主回撤通道的尺寸为 5.2 m×4.0 m,辅回撤通道尺寸为 5.0 m×3.8 m.自 31301 工作面~31304 工作面回撤期间多次出现漏矸灾害,严重影响设备的正常回撤,如图 2 所示.

2 采动围岩破坏机理分析

FLAC^{3D} 能够进行土质、岩石和其他材料的三维结构受力特性模拟和塑性流动分析,因此,建立 FLAC^{3D}

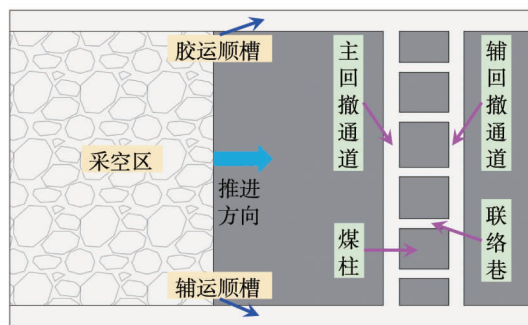


图 1 预掘双回撤通道技术



图 2 贯通后工作面漏矸照片

采动数值模型.模型尺寸长×宽×高为800 m×700 m×230 m,固定四周及底部边界,采用ini初始应力赋值后进行自重梯度自主平衡,测压系数 λ 取1.2,采用Mohr-Coulomb准则,模型示意图如图3所示,各岩层力学参数如表1所示.

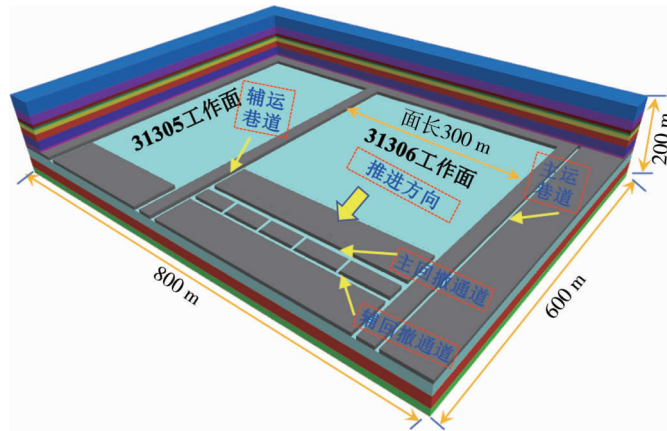


图3 数值模拟立体模型

表1 各岩层岩性及岩石力学参数

岩层	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
细砂岩	2 600	4.5	2.8	33	2.6	2.11
砂质泥岩	2 400	3.8	1.8	29	1.3	1.26
2-2 中煤层	1 500	3.5	1.6	32	1.5	0.92
中砂岩	2 600	3.9	1.9	31	1.4	1.35
粉砂岩	2 200	2.7	1.7	30	1.2	1.06
3-1 煤层	1 500	3.5	1.6	29	1.6	1.12
砂质泥岩	2 400	3.8	1.8	28	1.3	1.01
粗砂岩	2 600	4.9	3.5	32	1.8	1.35

2.1 采动区域应力场矢量特征

工作面回采后,采空区四周的应力场重新分布,采空区周边在高支撑压力的影响下,垂直应力、水平应力以及侧压系数均发生不同程度的调整^[18-20].运用FLAC^{3D}大型采动模型,仅开挖工作面时提取工作面中部超前90 m的应力,如图4所示.

由图4可知:垂直应力在工作面煤壁前方5 m范围内急剧增大,峰值达到13.92 MPa(原岩垂直应力的4.6倍),在工作面煤壁前方5~15 m范围内垂直应力快速减小,在工作面煤壁前方20 m后垂直应力缓慢减小并逐渐趋向于原岩应力;水平应力在工作面煤壁前方5 m也快速增加随后缓慢减小,在工作面煤壁前方20 m后水平应力的减小趋势更加缓慢,最后趋向于原岩应力.因此,支撑压力对垂直应力和水平应力的非均匀叠加导致采空区一定范围内测压系数 λ 的动态调整,即工作面超前5 m范围内 λ 迅速由0增加到0.6,工作面超前15 m后 λ 逐渐接近线性增加,最终趋于原岩应力时的1.2倍.由于工作面前方支撑压力系数 K 可达到3~5,导致工作面前方一定范围内形成了高偏应力区.

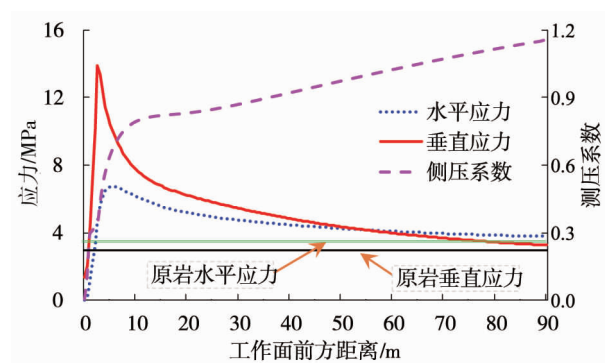


图4 工作面超前应力分布规律

2.2 非均匀应力场塑型区边界形态

以采动非均匀应力环境为基础,马念杰等^[3,21-22]运用弹性力学理论,采用Mohr-Coulomb准则,获得了双向非等压条件下巷道围岩塑性边界 R_0 关于 θ 的隐性方程:

$$9(1-\lambda)^2\left(\frac{a}{R_0}\right)^8 - [12(1-\lambda)^2 + 6(1-\lambda^2)\cos 2(\theta-\alpha)]\left(\frac{a}{R_0}\right)^6 + \{2(1-\lambda)^2[\cos^2 2(\theta-\alpha)(5-2\sin^2\varphi) -$$

$$\sin^2 2(\theta - \alpha)] + (1 + \lambda)^2 + 4(1 - \lambda^2) \cos 2(\theta - \alpha) \left\{ \left(\frac{a}{R_0} \right)^4 - [4(1 - \lambda)^2 \cos 4(\theta - \alpha) + 2(1 - \lambda^2) \cos 2(\theta - \alpha)] (1 - 2 \sin^2 \varphi) - \frac{4}{P} (1 - \lambda) \cos 2(\theta - \alpha) \sin 2\varphi C \right\} \left(\frac{a}{R_0} \right)^2 (1 - \lambda)^2 - \sin^2 \varphi \left(1 + \lambda + \frac{2C \cos \varphi}{\gamma H \sin \varphi} \right)^2 = 0. \quad (1)$$

式中: a 为巷道半径; θ 为任一点的极坐标; α 为最大主应力与垂直方向的夹角; P 为主应力; C 为围岩内聚力; φ 为围岩内摩擦角; γ 为岩石容重; H 为煤层埋深.

利用 Visual Basic 对式(1)进行可视化编程,并利用 FLAC^{3D}对同等围岩参数($P=20$ MPa, $a=2.0$ m, $C=3$ MPa, $\varphi=20^\circ$)进行模拟计算,理论计算结果与数值模拟计算结果基本吻合^[23],计算结果如图 5 所示.

由图 5 可知:圆形巷道在双向等压至高偏应力场动态调整的过程中,巷道塑性区由圆形调整为椭圆形并最终演化为蝶形;此外,巷道塑性区成蝶形后的最大塑性区边界,即蝶叶始终处于最大主应力和最小主应力的角平分线位置.

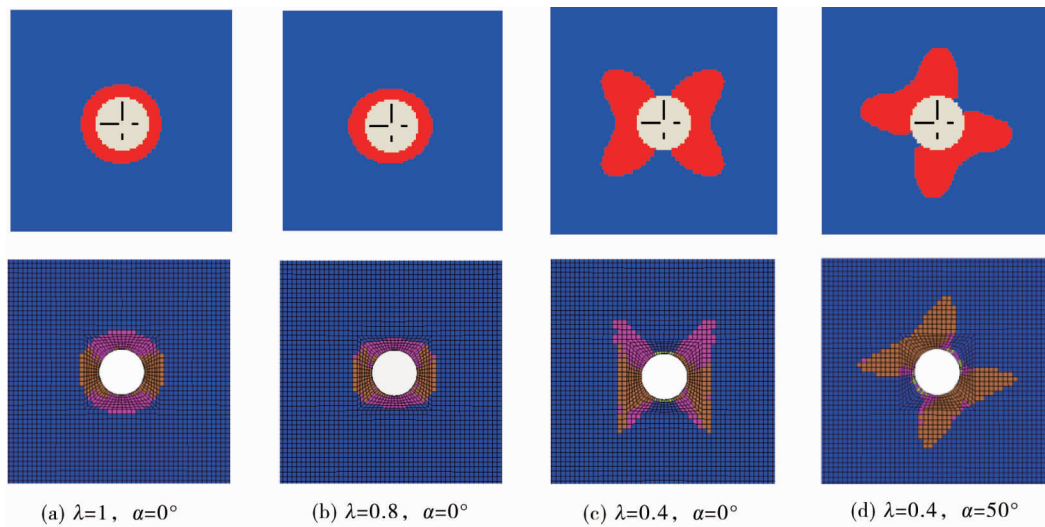


图 5 不同应力条件下巷道围岩塑性区计算结果

由此可知:在末采期间随着工作面的不断推进,2 个回撤通道的围岩塑性区将一直处于动态演化状态,但由于受采动影响的应力叠加程度不同,导致演化过程并不同步.因此,了解末采阶段回撤通道区域的应力场分布规律与围岩塑性破坏演化特征,对于提出围岩稳定性控制技术方案尤为重要.

3 回撤通道围岩破坏机理

工作面超前应力分布规律显示工作面前方 20 m 范围内为采动应力剧烈影响范围,现场工程经验也显示末采距贯通 20 m 时矿压显现逐渐加强.因此,这里主要研究工作面距贯通 20 m 至贯通期间的应力与塑性区分布情况.

3.1 末采期间采动应力场分布特征

分别提取末采期间距离贯通 20, 10, 5, 0 m 时工作面中部前方至辅回撤通道煤体 5 m 区间内的垂直应力,获得末采期间回撤通道区域的应力场分布特征如图 6 所示.由图 6 可知:工作面距贯通 20 m 时,工作面前方煤柱和回采通道间煤柱内的应力都具有明显的双峰非对称分布特征;工作面距贯通 10 m 时,工作面前方煤柱的应力在强采动及掘巷双重动压的作用下趋于双峰对称分布,煤柱内的应力值急剧增加,回撤通道间煤柱的双峰非对称性加强,此时,工作面前方煤柱具有冲击失稳或高应力蠕变失稳的可能性;工作面距贯通 5 m 时,工作面前方煤柱在高应力作用下处于岩体破坏后的残余强度,因此,煤柱应力为单峰分布对称,应

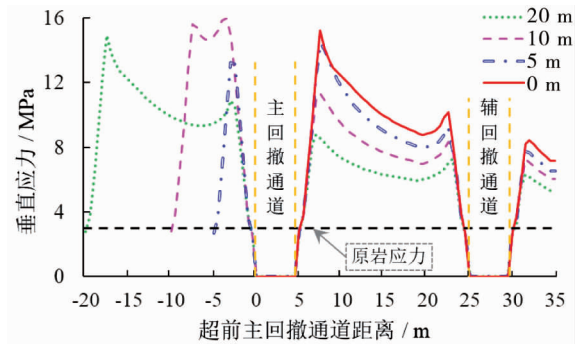


图 6 末采期间超前应力分布

力峰值减小,回采通道间煤柱应力继续增加,非对称性更加明显;贯通后,回撤通道间煤柱应力达到最大,非对称性达到极限状态,煤柱应力的最大值始终位于煤柱内靠近主回撤通道一侧。

基于以上分析,未采期间主回撤通道处于围岩急剧加载和卸载的复杂应力环境之中,应加强主回撤副帮的支护,防止围岩长时间在高叠加应力作用下的片帮失稳。

3.2 回撤通道塑性区演化规律

回撤通道在未受采动影响时,由于原岩应力对称分布,所以巷道塑性区对称分布,巷道帮部塑性区最大仅为1 m,顶板和底板的塑性区分别为2.5和1.5 m,如图7所示。

未采期间,受应力动态调整的影响,巷道塑性区演化规律如图8所示。由图8可知:当工作面距贯通20 m时,受到非均匀应力场的影响,导致巷道围岩塑性区呈现非对称性扩展,局部塑性区甚至扩展3~4倍;当工作面距贯通10 m时,工作面前方塑性区与主回撤通道塑性区局部贯通,这与现场工作面距贯通10 m左右时,主回撤通道正帮变形破坏严重的工程实际相符,辅回撤通道围岩塑性破坏的深度不变但塑性区面积仍在增加;当工作面距贯通5 m时,工作面前方的煤柱完全进入塑性状态,主回撤通道副帮塑性区增加至3 m,而辅回撤通道围岩塑性区变化微小;当工作面与主回撤通道贯通时,主回撤通道的顶板完全为塑性区,这也是回撤期间主回撤通道易发生漏顶、冒顶事故的主要原因,而辅回撤通道仅帮部偏底板存在较大塑性区。

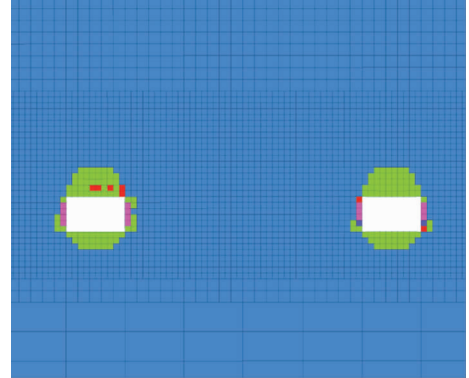


图7 掘进期主辅回撤通道塑性区

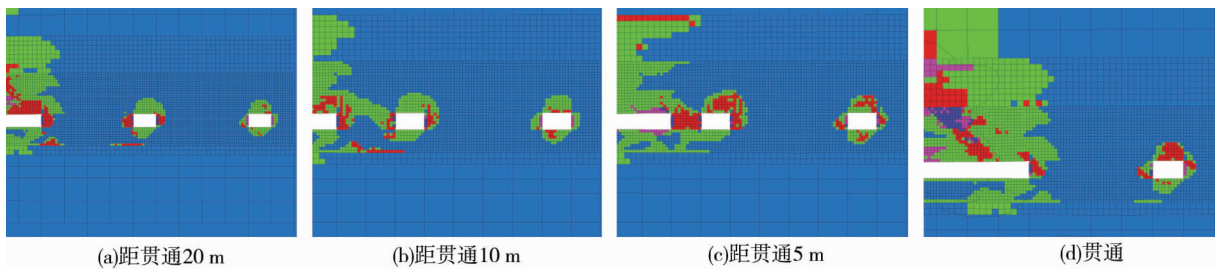


图8 未采期间回撤通道塑性区演化

由此可知:未采期间,辅回撤通道在20 m保护煤柱的作用下,区域应力场变化不大,巷道围岩塑性区仅面积略微增加但深度无变化,但主回撤通道受到剧烈的移动支承压力的影响,围岩塑性区始终在扩张,并最终完全处于大范围塑性区内。因此,主回撤通道在未采期间应适当加强支护维护围岩稳定性,防止冒顶、片帮事故的发生,而辅回撤通道考虑服务周期和围岩破坏情况,一次锚索强支护能够满足巷道安全使用。

4 围岩稳定性控制方案与现场实践

4.1 围岩控制方案

4.1.1 初始支护设计

主回撤通道顶板为 $\Phi 17.8 \text{ mm} \times 8\ 000 \text{ mm}$ 锚索,“3-3”布置,每排6根 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2\ 100 \text{ mm}$ 锚杆;正帮为2根 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2\ 000 \text{ mm}$ 玻璃钢锚杆;副帮为3根 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2\ 000 \text{ mm}$ 圆钢锚杆。辅回撤通道顶板为 $\Phi 17.8 \text{ mm} \times 6\ 500 \text{ mm}$ 锚索,“2-2”布置,每排6根 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2\ 100 \text{ mm}$ 锚杆;帮部3根 $\Phi 16 \text{ mm} \times 1\ 800 \text{ mm}$ 圆钢锚杆。锚杆锚索支护排距均为1 000 mm,支护断面如图9所示。

4.1.2 支护补强方案

回撤通道由于其特殊性,自受强采动影响至报废的周期一般小于1个月,结合数值模拟结果和工程经验,显示辅回撤通道一次强支护即可满足使用要求。主回撤通道未采期间围岩破坏严重,因此,在受工作面强采动前,在顶板两排锚索之间补打一排高强度大延伸率锚索($\Phi 28.6 \text{ mm} \times 8\ 000 \text{ mm}$)协调变形维护顶板稳定性;副帮补强 $\Phi 17.8 \text{ mm} \times 5\ 000 \text{ mm}$ 锚索,“3-2-3”布置排距1 000 mm,防止塑性区围岩在高应力下的

片帮,如图 10 所示.

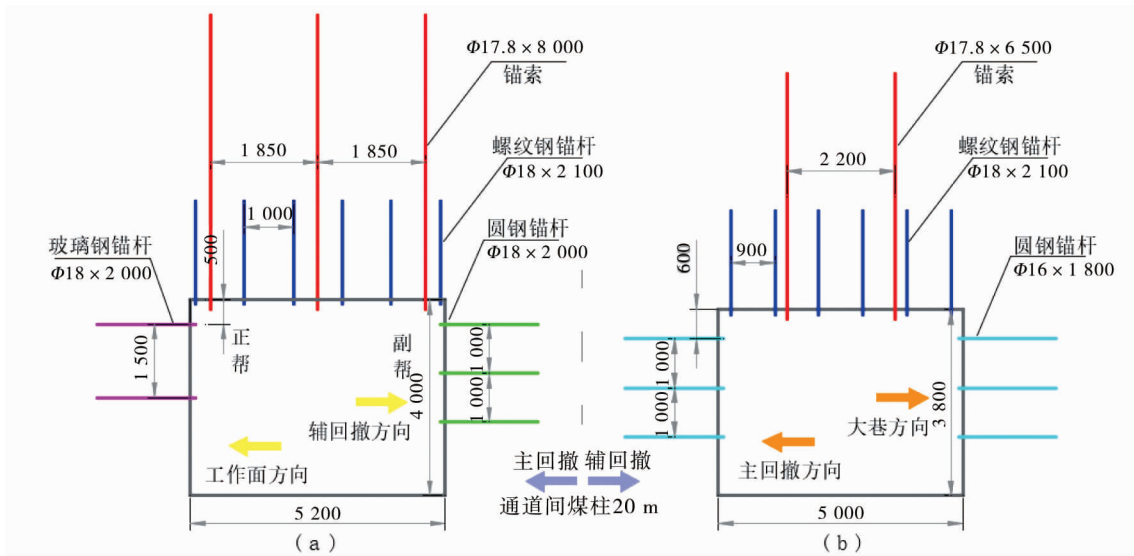


图 9 回撤通道支护断面(单位:mm)

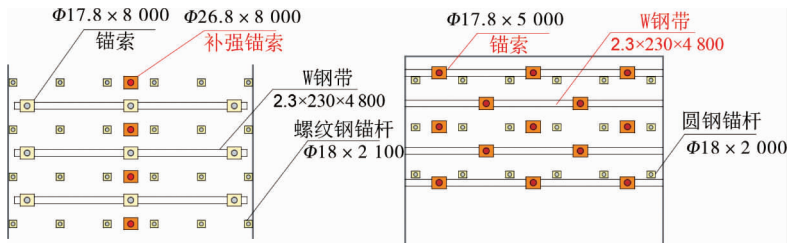


图 10 补强支护平面(单位:mm)

4.1.3 垛式支架加强支护

为防止老顶在不利的位臵断裂导致回撤通道围岩变形的破坏加剧,采用垛式支架加强支护以保证回撤通道的围岩稳定.在主回撤通道内并排布置 2 排工作阻力为 18 000 kN 的垛式,每排 61 架,5 个联络巷中布置 2 个垛式支架,共 132 架,其布置如图 11 所示.

4.2 工程现场实践

主回撤通道末采期间的帮部移近量如图 12 所示.由图 12 可知:末采期间的主回撤通道的变形可分为稳定期、缓慢变形期和剧烈变形期,分别对应工作面距离贯通 35 m 以上(各测点变形量为 3~6 mm)、工作面距离贯通 35~10 m(各测点变形量为 12~51 mm)和工作面距离贯通 10 m 以内(各测点变形量为 56~173 mm).总体而言,主回撤通道末采期间的围岩稳定性较好,后期设备回撤期间未发生漏顶现象,回撤工程顺利.



图 11 主回撤通道垛式支架布置

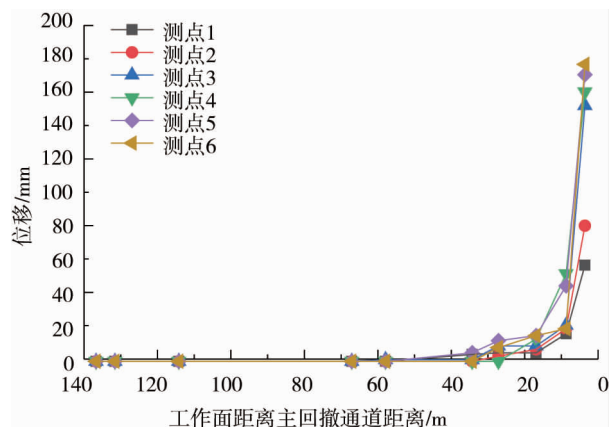


图 12 巷帮移近量

5 结论

1) 万利一矿末采期间超前工作面的剧烈应力扰动范围为 20 m, 在此范围内, 垂直应力叠加至原岩应力的 4.6 倍, 理论分析了巷道围岩在不同程度的非等压叠加应力场作用下, 围岩塑性区蝶形扩展的动态演化过程。

2) 末采期间工作面前方的应力逐渐由双峰非对称分布向双峰对称分布转变并最终演化为单峰对称分布, 煤柱间的应力双峰非对称趋势越来越明显; 末采期间回撤通道塑性区最终演化为蝶形, 贯通后主回撤通道处于采空区塑性范围内而趋于失稳, 辅回撤通道蝶形扩展较小, 在一次锚索支护条件下可以维持巷道稳定。

3) 结合回撤通道的使用特点、服务时间、以往工程经验及末采期间应力分布与塑性区演化, 提出针对锚杆索联合支护方案+主回撤通道锚索补强+垛式支架加强支护的围岩控制方案, 将此方案进行现场应用后, 围岩的稳定性得到控制, 设备回撤期间巷道未发生冒顶、片帮事故。

参考文献:

- [1] 王博楠. 回撤通道围岩变形破坏机理及其控制技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [2] 吕华文. 预掘回撤通道稳定性机理分析及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(s1): 50-56.
- [3] 马念杰, 郭晓菲, 赵志强, 等. 均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2679-2688.
- [4] 王卫军, 袁超, 余伟健, 等. 深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2921-2931.
- [5] 赵志强, 马念杰, 刘洪涛, 等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.
- [6] Jia H, Wang L, Fan K, et al. Control Technology of Soft Rock Floor in Mining Roadway with Coal Pillar Protection: A case study[J]. Energies, 2019, 12(15): 1-21.
- [7] 袁超, 张建国, 王卫军, 等. 基于塑性区分布形态的软弱破碎巷道围岩控制原理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 451-460.
- [8] 张廷伟, 谭文慧, 范磊, 等. 平顶山矿区深部巷道围岩蝶形破坏机理及控制对策[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 10-17.
- [9] 李臣, 霍天宏, 吴峥, 等. 动压巷道顶板非均匀剧烈变形机理及其稳定性控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1317-1327.
- [10] 刘洪涛, 吴祥业, 镐振, 等. 双巷布置工作面留巷塑性区演化规律及稳定控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 689-697.
- [11] 姚琦, 冯涛, 王卫军, 等. 基于巷道围岩塑性区形态变化的变形破坏机理及支护[J]. 矿业工程研究, 2017, 32(2): 37-44.
- [12] 杨仁树, 李永亮, 朱晔, 等. 特殊条件下大采高工作面回撤通道稳定性控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 10-15.
- [13] 王宇, 涂敏, 付宝杰, 等. 深井侧向采动应力分布规律及沿空巷道支护[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 40-47.
- [14] 李杰, 王军, 曹建云. 8.8 m 采高工作面主回撤通道顶板支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(s2): 185-187.
- [15] 郭良林, 周大伟, 张德民, 等. 采动影响下巷道围岩变形破坏规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 42-49.
- [16] Yu W, Pan B, Zhang F, et al. Deformation characteristics and determination of optimum supporting time of alteration rock mass in deep mine[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4921-4932.
- [17] 郑建伟, 鞠文君, 孙晓冬, 等. 巷道变形差异化响应特征及支护设计分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 13-20.
- [18] Li C, Wu Z, Zhang W, et al. A case study on asymmetric deformation mechanism of the reserved roadway under mining influences and its control techniques[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 22(5): 449-460.
- [19] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [20] 郭晓菲, 郭林峰, 马念杰, 等. 巷道围岩蝶形破坏理论的适用性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 646-653.
- [21] 赵志强. 大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [22] 袁越, 王卫军, 袁超, 等. 深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2940-2950.
- [23] Guo X, Zhao Z, Gao X, et al. Analytical solutions for characteristic radii of circular roadway surrounding rock plastic zone and their application[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 263-272.