



大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化

潘坤 鞠文君 王俊超 贾后省 侯彪 王银伟 张志明

引用本文：

潘坤, 鞠文君, 王俊超, 等. 大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 12–22.

PAN Kun, JU Wenjun, WANG Junchao. Optimization of cross-sectional shape and support parameters of headgate in fully mechanized coal seam with large dip angle and close distance[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 12–22.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部近距离下位煤层回采巷道围岩变形控制

Deformation control of surrounding rocks of mining roadway in deep and close lower coal seam

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 76–81 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/de839a88-1f4c-481d-9fad-9abdb61b5ed1>

近距离煤层错层位巷道布置方式及围岩控制技术研究

Study on the layout of staggered roadway and surrounding rock control technology for extremely close coal seams

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 88–95 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/83f316a6-8928-4cce-b93a-5de59f9352b2>

近距离煤层下行采动应力场分布规律与巷道合理位置研究

Research on the distribution law of downward mining stress field in close-distance coal seam and reasonable location of the roadway

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 1–10 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1554>

近距离采空区下大断面开切眼支护工艺优化研究

Study on optimization of supporting technology for large cross-section open-off cut under contiguous gob

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 20–28 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/18de8ef6-d359-4295-9070-2a7d503fedda>

近距离煤层强扰动巷道布置与支护技术研究

Study on layout and support technology of strongly disturbed roadway in contiguous coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a4e2b1fc-bbdc-49c7-9416-3508e06d8d0e>

大倾角特厚煤层半煤岩巷道失稳地质动力条件及支护优化

Geo-dynamic conditions instability and support optimization of semi coal-rock roadway in large inclined and extra thick coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 20–29 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/39442bf7-f3e7-4ed3-bb40-03bd15ab61cf>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

潘 坤, 鞠文君, 王俊超, 等. 大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 12-22.

PAN Kun, JU Wenjun, WANG Junchao, et al. Optimization of cross-sectional shape and support parameters of headgate in fully mechanized coal seam with large dip angle and close distance[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 12-22.

大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化

潘 坤^{1,2,3}, 鞠文君^{1,2,3}, 王俊超⁴, 贾后省⁵, 侯彪^{1,2,3}, 王银伟¹, 张志明⁵

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学研究院 开采研究分院, 北京 100013; 3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 4. 四川川煤华荣能源有限责任公司代池坝煤矿, 四川广元 628200; 5. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454003)

摘要: 针对大倾角近距离煤层巷道在多次剧烈采动作用下, 巷道围岩频繁出现非对称变形破坏致使围岩控制困难的问题, 以代池坝煤矿31233运输巷为工程背景, 通过理论分析、数值模拟、现场监测等综合研究方法, 研究了大倾角近距离煤层开采下3种断面形状巷道围岩变形破坏机理, 进一步确定并优化了最佳非对称屋顶形巷道断面形状。研究结果表明: 在大倾角近距离煤层剧烈采动情况下, 无论巷道断面形状如何变化, 其围岩破坏形态均呈现为最大破坏深度位置朝向顶板, 且由于靠近上层工作面区域内塑性区扩展应力敏感性较强, 导致该区域塑性区范围和深度达到最大, 但3种断面形状巷道整体围岩破坏规律和塑性区分布范围有着明显差别; 与拱形巷道、斜顶直角梯形巷道不同的是, 非对称屋顶形巷道可根据巷道围岩条件变化来改变左帮、右帮高度以及左坡顶、右坡顶角度, 使得巷道围岩整体应力分布趋于合理化, 提升围岩破坏可控性的同时提高了巷道断面利用率。据此, 提出了基于巷道围岩塑性区分布的非均匀控制方法, 并进行了现场工程应用, 优化断面形状前后技术经济指标对比结果表明非均匀支护方式对控制围岩变形效果明显, 研究结果可为同类型大倾角近距离煤层巷道断面形状选择与支护设计优化提供有效科学依据。

关键词: 大倾角; 近距离煤层; 回采巷道; 巷道断面形状; 巷道支护

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)12-0012-11

Optimization of cross-sectional shape and support parameters of headgate in fully mechanized coal seam with large dip angle and close distance

PAN Kun^{1,2,3}, JU Wenjun^{1,2,3}, WANG Junchao⁴, JIA Housheng⁵, HOU Biao^{1,2,3}, WANG Yinwei¹, ZHANG Zhiming⁵
(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Daichiba Mine of Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd., Guangyuan 628200, China; 5. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the asymmetric deformation and failure of surrounding rock frequently occur, making it difficult to control the surrounding rock under the conditions of multiple intense mining actions in the coal seam with large dip angle and close distance. Taking the headgate 31233 in Daichiba Coal Mine as the engineering background, the mechanism of surrounding rock deformation and failure in roadways with three cross-sectional shapes under the coal seam with large dip angle and close distance was studied through theoretical analysis, numerical simulation, and on-site monitoring. The optimal asymmetric roof shaped roadway cross-sectional shape was further determined and optimized. The research results indicate that under the conditions of intense mining of steeply inclined coal seams, regardless of how the roadway cross-section changes, the form of surrounding rock failure always exhibits the maximum depth of failure towards the roof, and due to the strong stress sensitivity of the plastic zone near the upper working face area, the range and depth of the plastic zone reach a maximum. However, there are significant differences in the overall failure patterns and distribution ranges of the

收稿日期: 2023-11-29 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2023-1801

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2022-2-TD-MS013); 河南省高校科技创新人才资助项目(22HASTIT010); 中原英才计划—中原青年拔尖人才资助项目(豫组通[2021]44号)

作者简介: 潘 坤(1993—), 男, 河南信阳人, 博士研究生。E-mail: pankun2018@126.com

plastic zone among the three cross-sectional shapes. In contrast to arch roadway and inclined roof right trapezoidal roadway, the asymmetric roof shaped roadway can adjust the height of the left and right sides as well as the angles of the left and right slope tops in response to changes in surrounding rock conditions. This adjustment leads to a more rational overall stress distribution within the surrounding rock of the roadway, enhances the controllability of rock failure, and improves the utilization rate of the roadway cross-section. Based on the distribution of the plastic zone in the surrounding rock, an uneven control method is proposed, and engineering applications are conducted. The comparison of technical and economic indicators before and after optimizing the cross-section shape indicates that the uneven support method significantly improves the control over surrounding rock deformation. The research results provide an effective scientific basis for the selection of cross-sectional shapes and the optimization of support designs for similar roadways in the coal seam with large dip angle and close distance.

Key words: large dip angle; close distance coal seams; mining roadway; shape of roadway cross-section; roadway support

0 引言

随着煤炭开采强度的增加,矿井开采已由简单开采条件转入复杂开采条件,大倾角近距离煤层开采情况时常出现。由于间距较小,上层煤层回采后,下层煤层多处于采空区及煤柱下方,受遗留煤柱传递应力影响,下位煤层顶板应力会形成分布不均且差异较大的复杂应力场^[1-4]。此时采用常规的巷道断面形状和均匀支护方式不适应大倾角近距离煤层巷道,致使围岩发生非对称变形破坏,进而引发巷道围岩整体失稳^[5-6]。

众多学者从煤层群开采层间距、层间岩性变化以及大倾角等条件下巷道围岩破坏规律以及围岩控制技术层面展开了大量研究。张忠温等^[7]、李桂臣等^[8]针对近距离煤层下位巷支护方式展开研究,提出根据煤层距的不同,采用不同锚杆锚索组合方式进行支护。于洋等^[9]针对极近距离煤层下位巷道围岩维护困难,提出了三维联合控顶技术,即水力膨胀锚杆全长锚固和顶板超前插管法,并依据力学计算和现场测试结果确定了关键参数。王龙飞等^[10]根据巷道层间距变化,基于“分区支护、分源控制”原则,提出了以锚杆锚索支护为主,U型棚支护为辅的联合支护技术。张春雷等^[11]应用关键层理论对其层间结构进行了分类,得出亚关键层的位置、层数对覆岩裂隙的动态发育和分布规律,而岩性和厚度相同的两亚关键层对层间裂隙发育有抑制作用。LI等^[12]、XIAO等^[13]和GAO等^[14]发现大倾角煤层巷道顶板失稳形状具有非对称破坏特征,破坏位置首先出现在顶板中部或中上部,两帮失稳主要表现为三角形裂缝的剪切滑移,且两帮上角部破损严重,据此提出应提供足够预应力、加强对关键部位的控制,建议采用锚网索联合支护方式。王红伟等^[15]针对大倾角煤层断层带回采巷道受动载影响易出现冒顶、片帮等支护难题,提出“锚网喷+刚柔支架”的组合支护技术。

与此同时,许多学者通过优化改变巷道断面形状来转移和弱化围岩局部应力集中程度,以此实现对巷道围岩变形破坏控制。ARGÜELLES-FRAGA等^[16]、GHOTBI等^[17]和LU等^[18]研究了巷道断面形状对回采巷道稳定性的影响,发现拱形巷道围岩稳定性要远大于矩形巷道,对于大倾角煤层建议回采巷道多采用异形断面。曹树刚等^[19]分析了不同类型断面巷道的围岩塑性区及应力非对称分布特征,确定了最佳巷道断面形状,建议采用“锚网+钢带+锚索”的支护形式。

笔者以代池坝31233运输巷为工程背景,研究了大倾角近距离煤层不同断面形状巷道围岩变形破坏机理,确定了最优巷道断面形状,提出了基于巷道围岩塑性区分布的非均匀控制方法,并进行了现场实践,结果表明优化断面形状后的非均匀支护方式对围岩变形控制效果明显,这为大倾角近距离煤层巷道围岩控制提供了新的理论依据和技术借鉴。

1 工程背景

代池坝煤矿目前主采12号煤,在此范围内12号煤层分为2层,上层12-1号煤层厚度为0.41 m,12-2号煤层厚度为0.63 m;31233工作面埋深520 m左右,工作面走向长度770 m,煤层总厚1.95 m,纯煤厚度1.04 m,中间夹一层平均厚度约为0.40 m的夹矸,煤层倾角45°~56°,平均倾角50°。与上部11号煤层的平均距离仅有5.3 m,属于典型的大倾角近距离煤层。巷道伪顶为灰黑色薄层状泥岩含煤屑,直接顶为灰黑色中厚层状泥质粉砂岩含煤屑,直接底为灰黑色中厚层状泥质粉砂岩,31233运输巷岩层结构钻孔柱状图如图1所示。

31233运输巷布置在12号煤层中,31233工作面上部为31133工作面采空区,31133回采工作面回采完毕时间已超过1 a,其工作面采空区上覆岩层基本稳定,即对31233回采巷道影响有限,31233工作

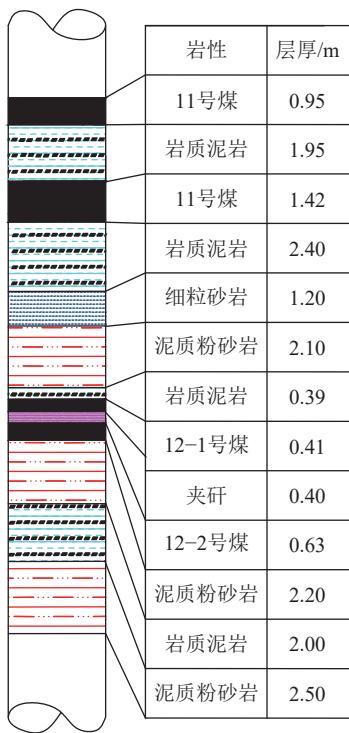


图1 代池坝矿31233运输巷岩层结构钻孔柱状

Fig.1 Borehole column diagram of rock structure of headgate 31233 in Daichiba Coal Mine

面回采巷道开始掘进时,31133下方第2个31135回采工作面约有200 m的距离未进行回采,31233工作面与31133工作面、31135工作面位置关系如图2所示。

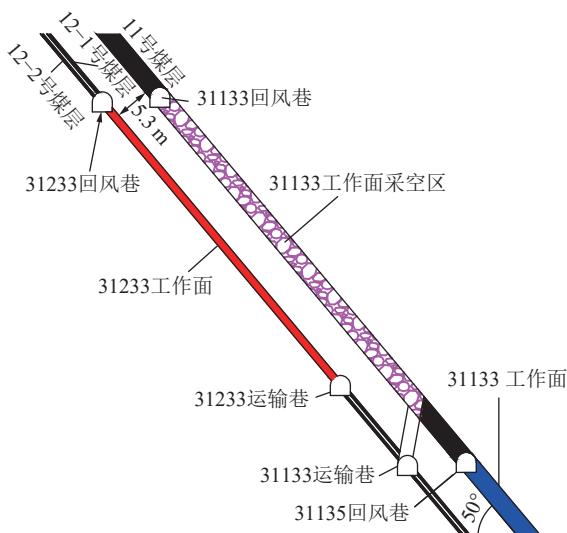


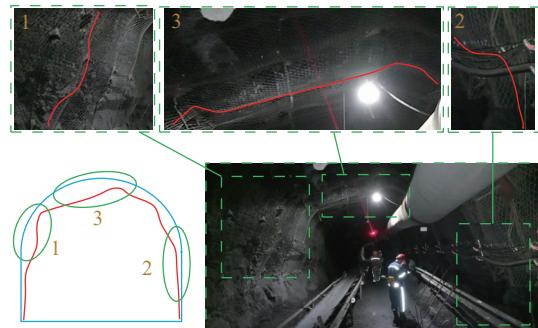
图2 31233工作面与31133工作面、31135工作面空间分布
Fig.2 Space distribution between 31233 working face, 31133 working face, and 31135 working face

2 巷道围岩破坏特征及影响因素

2.1 巷道围岩变形破坏特征

大倾角煤层回采巷道由于煤岩层倾角大,使得

岩石重力方向与岩石层理面方向之间的夹角变小,法向分力减小,切向分力增大造成其顶板垮落、围岩变形以及巷道破坏特征与缓斜煤层有着明显不同^[20-22],31233运输巷变形如图3所示。



注:图中1、2、3分别指代31233运输巷不同的变形位置。

图3 31233运输巷非对称变形

Fig.3 Asymmetric deformation of the haulage roadway 31233

31233运输巷作为大倾角煤岩互层巷道主要表现以下3个特征:①巷道顶板出现明显的变形破坏,顶板最大下沉量为202 mm;②左侧煤柱帮肩角位置处表层松散,局部层状片落;③右侧采煤帮完整性较左侧煤柱帮好。

2.2 巷道围岩变形破坏影响因素

现场调研、巷道围岩物理力学参数测试结果表明,31233运输巷断面形状不合适、顶板复合结构特征明显,且各分层强度较低、受多次动压影响增加了巷道维护难度,并最终导致巷道围岩非对称变形破坏,具体分析如下:

1)巷道断面形状不合适。在大倾角煤层开采条件下,由于巷道为拱形断面,巷道两帮开始承担更多顶板岩层质量,应力集中现象更为明显,塑性破坏区深度也会进一步增大,同时巷道顶板位置处塑性区与上层工作面采空区下方塑性区扩展有进一步联通趋势,致使巷道围岩稳定难以维护。

2)顶板复合结构特征明显,且各分层强度较低。12号煤强度较低、裂隙发育明显,且12号煤层周边以泥质岩体为主,煤层顶板自下而上依次为:炭质泥岩、泥质粉砂岩、细粒砂岩、炭质泥岩,完整性差,在多次采动作用下易产生离层、破碎。且31233运输巷顶板左侧为破碎、低强度煤体,顶煤很难形成稳定结构,多次动压扰动后易诱发离层或局部冒顶。

3)重复采动影响。一次采动为上位31133工作面采空区周边造成的应力重新分布,二次采动为邻近31135工作面回采出现的“采掘交锋”(超前支承压力叠加)的现象,形成的超前支承压力与侧方支承压力对该巷道的动态影响,三次采动为31233本工

作面回采形成的超前支承压力对该巷道的影响。因此重复采动作用是围岩的变形破坏的关键影响因素。

3 不同巷道断面形状围岩破坏机理

3.1 不同巷道断面形状力学分析

由张进鹏等^[23]的研究可知,在急倾斜煤层中,采用矩形巷道时围岩应力集中程度大,变形量大,不适用于深井大倾角煤岩层巷道。川煤集团下属矿井煤层赋存条件复杂,大倾角煤层所占比例较大,应用的巷道断面类型主要有拱形巷道、斜顶直角梯形巷道和非对称屋顶形巷道^[19],下面通过力学分析探究3种巷道断面形状的适用性。由于受采动影响后,巷道顶板所受的荷载形式有多种可能,为阐述一般规律,选择简化成均布载荷,以模拟受采动前巷道受力情况。

3.1.1 拱形巷道顶板受力分析

巷道顶板边界为圆弧线,假设巷道上覆岩层在岩层自重作用下,其垂直应力 q 均匀分布,则拱形巷道顶部位置处受到的水平应力为 T_1 ,拱脚位置处受到的垂直压力为 F_1 ,巷道顶部受力状态如图4所示。

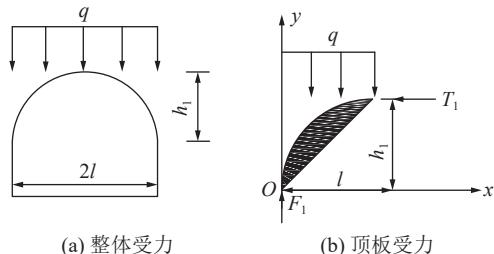


图4 拱形巷道受力状态

Fig.4 Stress state of arch roadway

根据力系平衡原理,可得如下关系^[23]:

$$\begin{cases} F_1 - ql = 0 \\ T_1 h_1 - \int_0^1 x q dx = 0 \end{cases} \quad (1)$$

整理式(1)可得:

$$\begin{cases} F_1 = ql \\ T_1 = \frac{ql^2}{2h_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: l 为巷道宽度的一半, m; h_1 为巷道拱高, m; q 为垂直应力, $q = \gamma H$, MPa; H 为巷道顶板埋深, m; γ 为上覆岩层容重, kN/m³。

3.1.2 斜顶直角梯形巷道受力分析

巷道顶板边界为斜直线,假设巷道上覆岩层垂直应力 q 均匀分布,则顶板右角位置处受到的垂直

压力为 F_2 ,顶板左角位置处受到的层间剪切应力为 P_2 ,该剪切应力在水平方向的分量为 T_2 ,在竖直方向的分量为 R_2 ,巷道顶部的受力状态如图5所示。

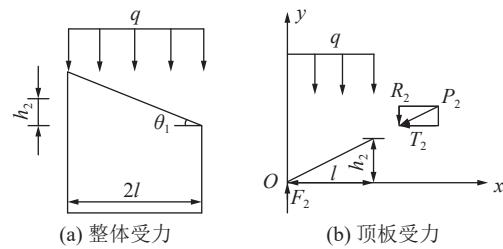


图5 斜顶直角梯形巷道受力状态

Fig.5 Stress state of inclined roof right trapezoidal roadway

根据力系平衡原理,可得如下关系^[23]:

$$\begin{cases} F_2 = ql + R_2 \\ T_2 h_2 - \int_0^1 x q dx = 0 \\ P_2^2 = T_2^2 + R_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

整理式(3)可得:

$$\begin{cases} T_2 = \frac{ql^2}{2h_2} \\ F_2 = ql + \frac{ql^2 \tan \theta_1}{2h_2} \\ P_2 = \frac{ql^2 \sqrt{1 + \tan^2 \theta_1}}{2h_2} \end{cases} \quad (4)$$

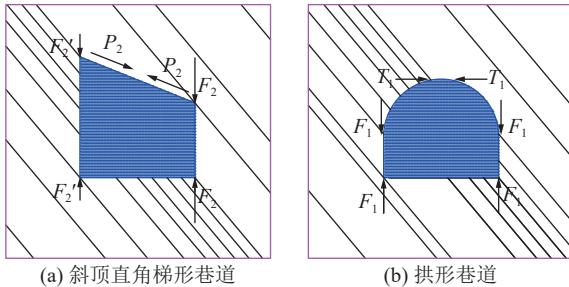
式中: θ_1 为巷道顶板倾斜角, (°); h_2 为巷道顶板中心点位置到下帮顶点位置的距离, $h_2 = l \tan \theta_1$, 当 $\theta_1 = 22^\circ$ 时(即当前斜顶角度), $h_2 = 0.404l$, m。

对比式(4)与式(2)可见 $F_2 > F_1$, $P_2 > T_1$, 此时巷道顶板中心处的表面压力值减小,巷道拱脚位置处的垂直压力值增大。由式(4)进一步分析可知,随着顶板倾角的增大, P_2 减小,而 F_2 的增加与顶板水平压力和顶板倾角均有关,即水平压力越大值越大、顶板倾角越大,垂直压力增加越大。

为了便于分析不同形状巷道围岩内压力分布,用箭头表示压力值。箭头方向代表应力方向,线段越长,应力越大^[23]。拱形巷道与斜顶直角梯形巷道围岩应力对比如图6所示。

由图6可以看出,在同一埋深位置处,由于巷道顶板抬升,斜顶直角梯形顶板应力大于拱形巷道顶板应力,且斜顶直角梯形巷道左帮应力减小,右帮应力增大。在倾斜岩层条件下,由于倾斜层理面光滑,且在重力场作用下,斜顶直角梯形巷道左帮煤岩块更容易向巷道内侧滑动,而此时巷道左帮一侧临空,自由面无约束力,煤岩块会滑落而导致煤岩体破坏。

而右帮煤岩块虽倾斜层理面光滑,但在重力场作用下,其向巷道内侧滑移的趋势减小,进而使滑移岩块转向破坏变形而不滑落,其承载能力得到提升,但右侧巷帮塑性破坏深度会进一步增大。



注: F_2' 为顶板左角位置处受到的垂直压力。

图 6 斜顶直角梯形巷道与拱形巷道围岩受力对比

Fig.6 Comparison of surrounding rock forces in inclined roof right trapezoidal roadway and arch roadway

因此,斜顶直角梯形巷道对两帮变形的控制效果优于拱形巷道,但是斜顶直角梯形巷道顶板比拱形巷道顶板更容易破坏。另外,斜顶直角梯形巷道左帮较高,不利于安全作业,且巷道断面利用率低,使得斜顶直角梯形巷道的应用受到一定限制。

3.1.3 非对称屋顶形巷道受力分析

确定巷道断面形状,除了要考虑围岩性质,还要考虑巷道顶板结构完整性、掘进施工工艺等^[19]。考虑到斜顶直角梯形巷道对两帮变形的控制效果优于拱形巷道的控制效果,但斜顶直角梯形巷道在巷道尖角处成型上存在施工困难,拱形巷道顶板承载能力虽然较强,但是施工工艺复杂且破坏了顶板结构完整性,在倾斜岩层状态下,若顶板岩层强度较低极易发生垮冒现象。非对称屋顶形巷道由于不存在巷道尖角,因而在巷道成型上不存在施工困难,因此采用非对称屋顶形巷道成为大倾角煤层回采巷道的另一选择。

巷道顶板边界为非对称坡顶,假设巷道上覆岩层垂直应力 q 均匀分布,则左坡顶顶板左角位置处受到的垂直压力为 F_3 ,其右角位置处受到的层间剪切应力为 P_3 ,该剪切应力在水平方向的分量为 T_3 ,在竖直方向的分量为 R_3 ;同理右坡顶顶板右角位置处受到的垂直压力为 F_4 ,其左角位置处受到的层间剪切应力为 P_4 ,该剪切应力在水平方向的分量为 T_4 ,在竖直方向的分量为 R_4 ;巷道顶部的受力状态如图 7 所示。

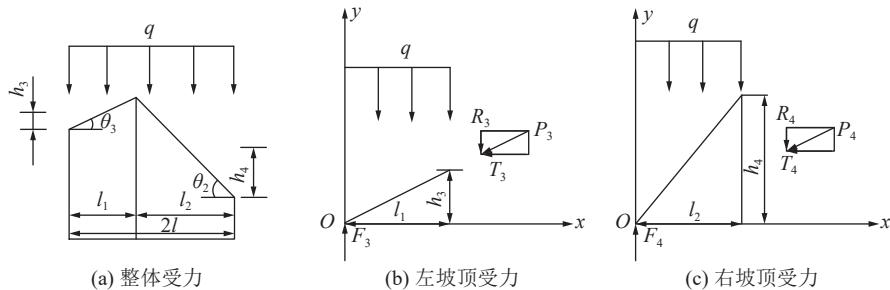


图 7 非对称屋顶形巷道受力状态分析

Fig.7 Analysis of stress state of asymmetric roof shaped roadway

顶板左侧根据力系平衡原理,可得如下关系^[23]:

$$\begin{cases} F_3 = ql_1 + R_3 \\ T_3 h_3 - \int_0^1 x q dx = 0 \\ P_3^2 = T_3^2 + R_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

整理式(5)可得:

$$\begin{cases} T_3 = \frac{ql_1^2}{2h_3} \\ F_3 = ql_1 + \frac{ql_1^2 \tan \theta_3}{2h_3} \\ P_3 = \frac{ql_1^2 \sqrt{1 + \tan^2 \theta_3}}{2h_3} \end{cases} \quad (6)$$

式中: l_1 为左坡顶水平宽度, m; θ_3 为巷道左坡顶倾斜角, (°); h_3 为左坡顶中心点到下帮顶点的距离,

$h_3 = l_1 \tan \theta_3$, 当 $\theta_3=25^\circ$ 时 (即当前左坡顶角度), $h_3 = 0.4663l_1$, m。

同理,顶板右侧可得如下关系^[23]:

$$\begin{cases} F_4 = ql_2 + R_4 \\ T_4 h_4 - \int_0^1 x q dx = 0 \\ P_4^2 = T_4^2 + R_4^2 \end{cases} \quad (7)$$

整理式(7)可得:

$$\begin{cases} T_4 = \frac{ql_2^2}{2h_4} \\ F_4 = ql_2 + \frac{ql_2^2 \tan \theta_4}{2h_4} \\ P_4 = \frac{ql_2^2 \sqrt{1 + \tan^2 \theta_4}}{2h_4} \end{cases} \quad (8)$$

式中: l_2 为右坡顶水平宽度, m; θ_4 为巷道右坡顶倾斜角度, ($^{\circ}$); h_4 为右坡顶中心点到下帮顶点的距离, $h_4 = l_2 \tan \theta_4$, 当 $\theta_4=50^{\circ}$ 时 (即当前岩层倾角), $h_4 = 1.192l_2$, m。

通过对式(8)、式(6)与式(4)可见, 非对称屋顶形巷道两帮的受力状况与斜顶直角梯形两帮受力状况相似, 在倾斜岩层条件下, 由于倾斜层理面光滑, 且在重力场作用下, 巷道左帮煤岩块更容易向巷道内侧滑动, 而巷道左帮一侧临空, 自由面无约束力, 煤岩块会滑落而导致煤岩体破坏, 此时抬升左帮高度减小其受力, 增加左帮稳定性; 右帮煤岩块虽倾斜层理面光滑, 但在重力场作用下, 其向巷道内侧滑移的趋势减小, 进而使滑移岩块转向破坏变形而不滑落, 塑性破坏深度会增加, 但其承载能力得到提升; 同时左坡顶与右坡顶交界处由于位置的抬高, 其受力较两帮小, 也有利于巷道围岩稳定, 特别是在巷道断面形状为斜顶直角梯形时, 左帮高度随断面与煤层倾角增大而增大, 挖进成巷与支护愈加困难, 非对称屋顶形巷道的优点主要在于左坡顶可降低左帮高度, 从而降低掘进成巷与支护困难。因此非对称屋顶形巷道可以满足安全生产需要。

3.2 不同巷道断面形状围岩破坏数值模拟

3.2.1 数值模型建立

为进一步研究大倾角近距离煤层不同巷道断面在采动应力环境下围岩破坏特征, 根据图 1, 采用有限元 FLAC^{3D} 数值模拟软件, 建立了大倾角煤层采动巷道数值模型, 模型尺寸为 55 m×2 m×50 m (长×宽×高), 31233 运输巷周边范围内的网格进行加密处理, 巷道断面形状为房式异形的数值模型如图 8 所示。

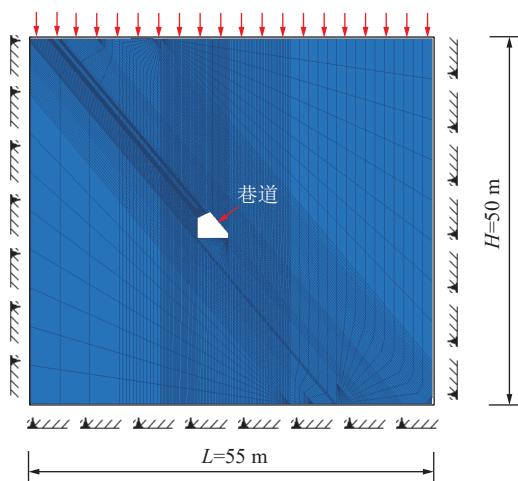


图 8 数值模型

Fig.8 Numerical model

加载时, 模型上边界施加 13.0 MPa 的垂直应力以模拟上覆岩层的自重, 模型四周和底部为固定约束, 模拟采用基于弹塑性理论的摩尔-库仑准则。巷道周边围岩性质采用的实际煤层巷道顶底板力学参数(表 1)。

表 1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock

| 岩性 | 密度/ (kg·m ⁻³) | 体积模量/ GPa | 剪切模量/ GPa | 黏聚力/ MPa | 内摩擦角/ ($^{\circ}$) |
|--------|------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------------------|
| 11号煤 | 1 880 | 2.51 | 3.34 | 3.9 | 28 |
| 炭质泥岩 | 1 940 | 2.65 | 3.40 | 4.2 | 30 |
| 11号煤 | 1 880 | 2.51 | 3.34 | 3.9 | 28 |
| 泥质粉砂岩 | 2 140 | 2.88 | 3.41 | 5.2 | 33 |
| 细粒砂岩 | 2 900 | 3.34 | 4.52 | 8.0 | 41 |
| 泥质粉砂岩 | 2 140 | 2.88 | 3.41 | 5.2 | 33 |
| 炭质泥岩 | 1 940 | 2.65 | 3.40 | 4.2 | 30 |
| 12-1号煤 | 1 880 | 2.51 | 3.34 | 3.9 | 28 |
| 夹矸 | 2 330 | 3.05 | 4.39 | 6.2 | 35 |
| 12-2号煤 | 1 880 | 2.51 | 3.34 | 3.9 | 28 |
| 泥质粉砂岩 | 2 140 | 2.88 | 3.41 | 5.2 | 33 |
| 炭质泥岩 | 1 940 | 2.65 | 3.40 | 4.2 | 30 |

由于当前主采的 12 号煤层与 11 号煤层属于近距离煤层开采, 且受到多次采动影响, 使得 31233 运输巷周边应力环境变得较为复杂, 在邻近工作面采动应力与上层工作面遗留煤柱残余支承压力的叠加影响下, 此时若 31233 运输巷处于上层工作面遗留煤柱应力影响区域则会出现较大程度的支承压力集中现象, 应力增高系数一般可达到 2.0~3.0, 31233 运输巷支承压力集中时, 水平方向的应力也必然会出现一定程度的增加, 因此, 主应力比取 1.2~3.0。支承压力集中本质上是由于基本顶岩层破断、回转导致的, 因此, 煤柱周边围岩主应力比升高的同时, 其围岩周边应力中的最大主应力的方向也将发生一定程度的偏转, 偏转角度可达 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ^[24-27]。31233 运输巷处于上层工作面遗留煤柱应力影响区域, 因此其巷道围岩应力环境也具备同样的特征。为简化模拟试验过程并阐述一般规律, 选取 31233 运输巷回采过程中围岩 3 对双向压力比值与应力方向偏转角度来进行模拟, 其中最大主应力与最小主应力的比值用 η 表示, 主应力偏转角度用 α 表示。

3.2.2 数值模拟结果分析

不同应力条件下3种巷道断面形状围岩塑性区分布数值模拟结果显示,巷道围岩塑性区范围随着主应力大小和比值的升高逐渐出现非均匀扩展趋势,如图9所示。

当主应力比为1.2,主应力偏转角度为15°时,3种断面形状巷道的围岩塑性区形成与扩展是基本符合其巷道断面受力特点,此时拱形巷道顶板塑性区最小,斜顶直角梯形巷道左帮塑性区较拱形巷道与非对称屋顶形巷道的小,但由于靠近上层工作面采空区导致3种断面形状巷道右帮塑性区都有了扩展的趋势,如图9a、图9d和图9g所示。

当采动影响进一步加剧,主应力比达到3.0,主应力偏转角度达到45°时,3种巷道断面形状的围岩塑性区均进一步恶化,拱形巷道顶板塑性区与右侧帮部塑性区在靠近上层工作面区域处形成了贯通;

斜顶直角梯形巷道顶板右肩角处塑性区在靠近上层工作面区域扩展中由于坚硬岩层细粒砂岩的阻隔出现了隔层扩展现象;非对称屋顶形巷道顶板塑性区范围虽有扩大,但塑性区范围较其他2种巷道顶板塑性区小,靠近上层工作面区域的斜帮塑性区范围有进一步扩展趋势,如图9b—图9c、图9e—图9f和图9h—图9i所示。

由于当前主采的12号煤层与11号煤层属于近距离煤层开采,无论巷道断面如何变化,其巷道围岩破坏形态均呈现为最大破坏深度位置朝向顶板,同时由于靠近上层工作面区域塑性区扩展应力敏感性较强,塑性区范围和深度达到最大,但整体围岩破坏规律和分布范围有着明显差别。

综合上述数值模拟结果分析,在大倾角近距离煤层开采条件下,当采动影响较小时,比较3种巷道顶板以及靠近上层工作面区域塑性区范围和深度,

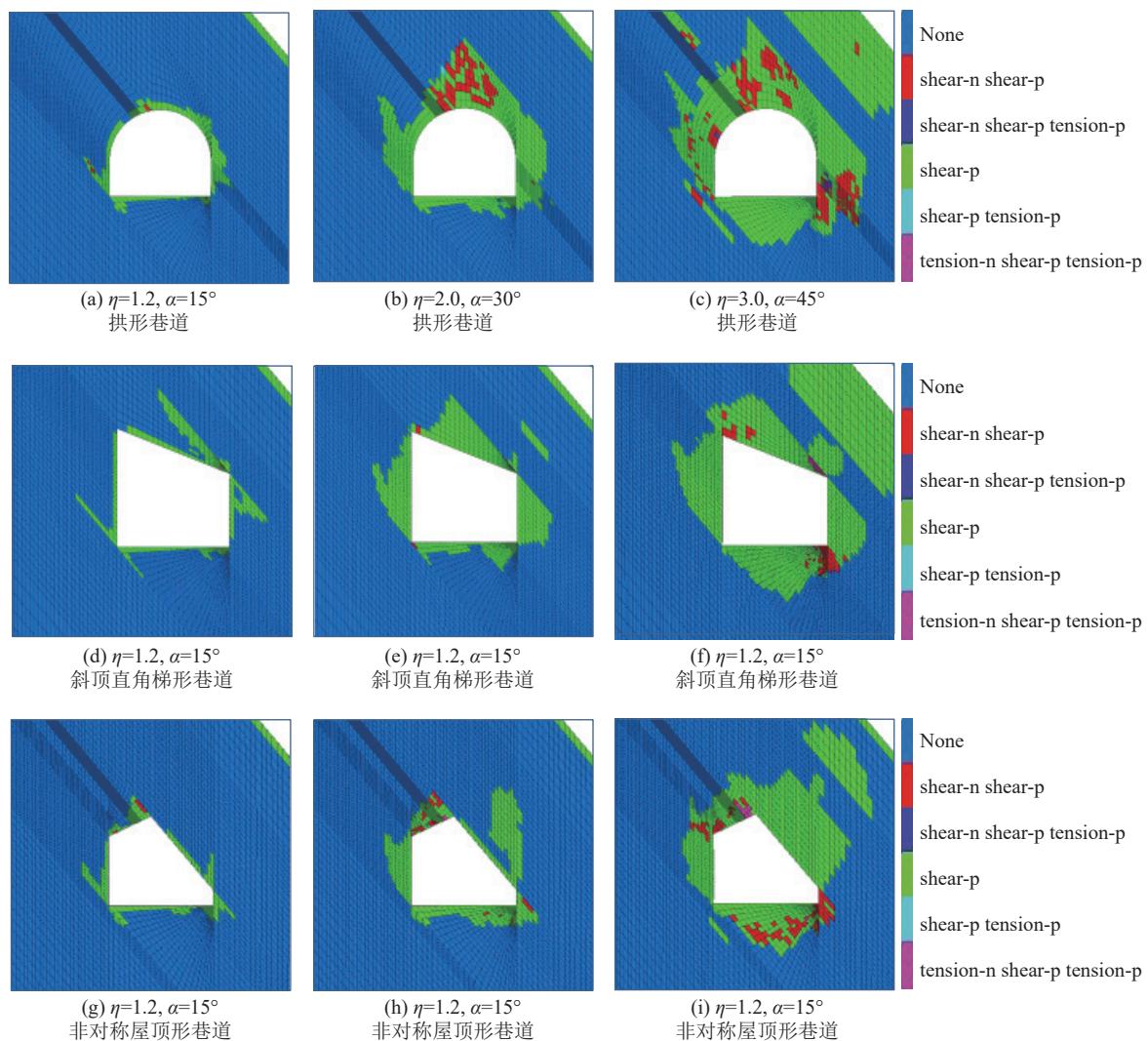


图9 不同应力条件下3种巷道断面形状围岩塑性区分布

Fig.9 Distribution of plastic zones in surrounding rock of three different roadway cross-section shapes under different stress conditions

非对称屋顶形巷道最适合留用,斜顶直角梯形巷道次之,拱形巷道最差;当采动影响十分剧烈时,巷道围岩破坏形态均呈现为最大破坏深度位置朝向顶板,同时靠近上层工作面区域塑性区范围和深度达到最大,且都呈现出顶底板塑性区大于两帮塑性区。此时不论何种巷道断面形状围岩控制均十分困难,但非对称屋顶形巷道可根据巷道围岩条件变化来改变左帮、右帮高度来改善两帮受力增加帮部稳定性;若遇到软煤更难留住时,可改变左坡顶角度使其垂直于煤层顶板,有效解决非对称屋顶形巷道上方三角区问题,改变右坡顶角度使其沿着煤岩层交界处,可保持顶板岩层完整性,从而保证掘进成巷。

通过模拟优化后的非对称屋顶形巷道(即改变左帮、右帮高度以及左坡顶、右坡顶角度)在不同应

力环境下围岩塑性区分布特征,如图10所示。当主应力比由1.2增加至2.0,主应力偏转角度由15°增加至30°时,优化后的非对称屋顶形巷道围岩塑性区分布规律依旧和原非对称屋顶形巷道围岩塑性区分布规律保持一致,但塑性区范围较原非对称屋顶形巷道塑性区范围有所减小。当采动影响进一步加剧,主应力比达到3.0,主应力偏转角度达到45°时,优化后的非对称屋顶形巷道围岩塑性区分布有了明显变化,由于非对称屋顶形巷道增加了左右帮部高度,导致帮部塑性区范围和深度稍微有所增加,但随着左坡顶和右坡顶长度减小,该区域塑性区范围及深度都有明显减小。

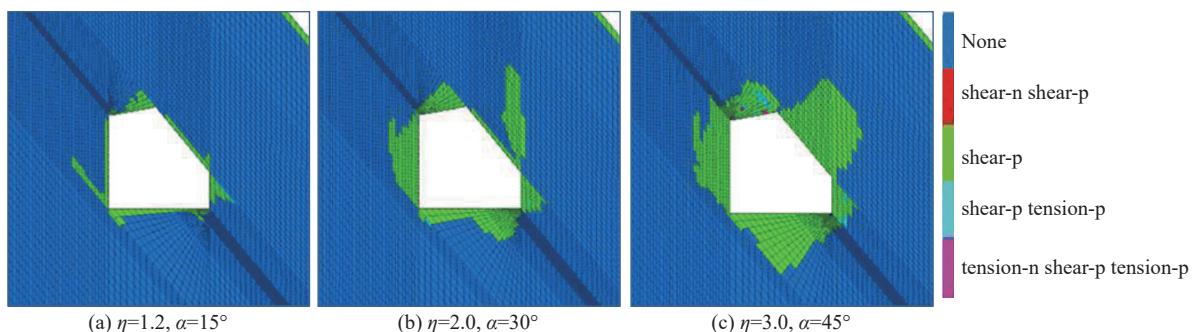


图10 优化后非对称屋顶形巷道围岩塑性区分布

Fig.10 Optimizing distribution of plastic zone in surrounding rock of asymmetric roof shaped roadway with optimized

因此,在采动影响剧烈时,非对称屋顶形巷道可改变左帮、右帮高度以及左坡顶角度来改善受力状态,此时右坡顶边长减小,使其沿着煤岩交界处可以达到遏制沿煤层理方向的塑性扩展,弱化上位采空区的影响,减小塑性破坏范围和增加断面利用率的目的。

4 巷道围岩支护优化对策与现场试验

4.1 巷道围岩支护优化对策

巷道围岩稳定性控制关键是遏制其围岩塑性区的扩展,在大倾角煤层多次采动影响条件下,巷道围岩塑性破坏形态呈现非均匀特征,以塑性区扩展为主线进行针对性控制,同时也应注重被动支护的及时性,因此巷道围岩支护优化需要做到:

1)锚杆(索)支护应根据巷道围岩塑性区分布规律进行非均匀布置,确保将锚杆(索)精准锚固于深部未发生破坏岩层,以实现对塑性破坏围岩的提供持续有效控制。

2)锚杆(索)锚固层位应根据未发生破坏的坚硬岩层位置综合确定,右坡顶一侧锚索应避开上位采空区形成的底板破坏区,锚杆优先选择锚固于右坡顶侧煤层顶板中位坚硬岩层中。

3)现有技术条件可提供的支护力一般不能阻止坚硬岩层破断,锚杆(索)需具备一定的延伸性能或长度以适应顶板整体破裂所引起的变形,同时大倾角煤岩层在开采扰动下极易发生层位错动,对锚杆(索)构成剪切作用,因此需要增加锚杆(索)抗剪能力。

4)掘进期间针对构造带、应力异常带、倾角突变区、采掘交锋区等异常区域,其巷道围岩变形破坏规律不同于正常区域,有可能出现巷道围岩破碎程度加剧、锚杆(索)锚固力低下,可采用围岩注浆加固技术,增加锚杆和锚索密度。对于顶板破碎及易漏冒区域,可采用超前管棚支护,管棚孔打设深度为3~5倍的锚杆排距为宜。

5)回采期间巷道超前支护距离不低于20 m,采

用单体液压支柱进行加强支护,柱距可视巷道变形情况调整,如遇巷道底板松软时,支柱需加柱鞋;发生底鼓、煤壁片帮时,必要时采用金属支架加固支护等。

4.2 现场试验

根据大倾角煤层多次采动影响巷道围岩塑性区扩展分布特征以及巷道围岩支护优化对策,对代池坝31233运输巷进行了巷道支护参数优化设计(图11)。设计巷道左坡顶长1.8 m,左帮帮高2.9 m,右坡顶长3.4 m,右帮帮高0.4 m,底板宽度4.0 m。设计采用锚杆(索)联合支护,锚杆规格为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 2400 \text{ mm}$,间排距为1 000/2 000 mm×1 000 mm;左坡顶锚索规格为 $\varnothing 21.6 \text{ mm} \times 7000 \text{ mm}$,间排距为1 600 mm×1 000 mm;右坡顶锚索规格为 $\varnothing 21.6 \text{ mm} \times 4000 \text{ mm}$,每排1根,布置于2根锚杆中间,排距1 000 mm。

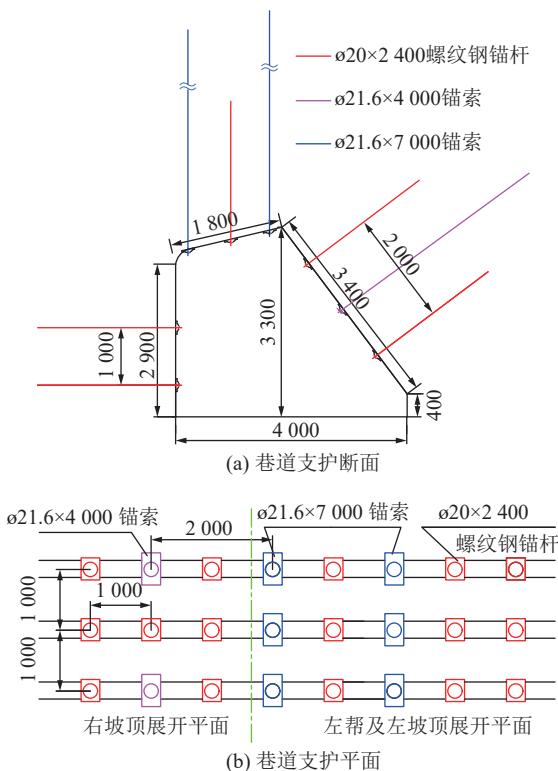


图11 优化断面形状后非均匀支护参数设计
Fig.11 Design of non-uniform support parameters after optimizing cross-sectional shape

由表2和表3可以看出,依据优化断面形状后巷道围岩塑性区分布规律对巷道进行了非均匀支护,巷道围岩变形量明显减少,每天掘进量较之前有所增加,同时每百米锚杆、锚索用量也较之前明显减少,且巷道维修量也有一定程度的降低。各项数据表明优化断面形状后的非均匀支护方式对控制围岩变形效果明显。

表2 优化断面形状前后技术经济指标对比
Table 2 Comparison of technical and economic indicators before and after optimizing cross-sectional shape

| 阶段 | 左帮变 形量/ mm | 左坡顶 变 形量/ mm | 右坡顶 变 形量/ mm | 巷道日 掘进量/ m | 每百米 锚杆用 量/根 | 每百米 锚索用 量/根 | 200 m 巷道维 修量/m |
|-----|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 优化前 | 164 | 202 | 139 | 5.2 | 1 100 | 325 | 114 |
| 优化后 | 121 | 120 | 112 | 6.0 | 570 | 260 | 75 |

表3 优化断面形状前后技术经济指标变化率
Table 3 Change rate of technical and economic indicators before and after optimizing cross-sectional shape

| 指标 | 左帮 变形量 | 左坡 顶变 形量 | 右坡 顶变 形量 | 巷道 日掘 进量 | 每百米 锚杆 用量 | 每百米 锚索 用量 | 200 m 巷道 维修量 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 变化率/% | 26 | 41 | 19 | 15 | 48 | 20 | 34 |

5 结 论

1)原设计的31233运输巷拱形巷道断面形状不合适、顶板复合结构特征明显,且各分层强度较低、受多次动压影响等特点,是诱发巷道围岩非对称变形破坏重要因素。

2)不同巷道断面形状力学分析表明,斜顶直角梯形巷道对两帮变形的控制效果优于拱形巷道,拱形巷道顶板承载能力优于斜顶直角梯形巷道,但考虑到围岩性质、巷道顶板结构完整性、掘进施工工艺等,非对称屋顶形巷道成为大倾角煤层回采巷道的更优或更佳断面。

3)不同巷道断面形状围岩破坏数值模拟分析表明,采动影响较小时,比较3种巷道顶板以及靠近上层工作面区域塑性区范围和深度,非对称屋顶形巷道最佳;采动影响剧烈时,非对称屋顶形巷道可根据巷道围岩条件变化来改变左帮、右帮高度以及左坡顶、右坡顶角度来改善围岩变形破坏程度。

4)依据大倾角煤层采动影响下巷道围岩塑性区扩展分布特征,对31233运输巷进行了非均匀支护优化设计。与优化断面形状前支护相比,巷道顶板及帮部变形量明显减小,同时大大节省了支护材料,加快了巷道掘进速度,结果表明非均匀支护方式对控制围岩变形效果明显。

5)综合考虑上述3种巷道优缺点,非对称圆弧拱形巷道在当前开采条件下更具有优势,可作为下一步研究的重点,进而指导现场巷道断面选择。

参考文献(References):

- [1] 何富连,吕凯,许旭辉,等.近距离煤层综放末采关键块体回转机制及其应用[J].岩石力学与工程学报,2023,42(8):1832-1846.

- HE Fulian, LYU Kai, XU Xuhui, et al. Rotation mechanism of key blocks during end-mining period of fully mechanized caving in close distance coal seams and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1832–1846.
- [2] 杨科,孔祥勇,陆伟,等.近距离采空区下大倾角厚煤层开采矿压显现规律研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4278–4285.
- YANG Ke, KONG Xiangyong, LU Wei, et al. Study of strata pressure behaviors with longwall mining in large inclination and thick coal seam under closed distance mined gob[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4278–4285.
- [3] 张炜,张东升,陈建本,等.极近距离煤层回采巷道合理位置确定[J].中国矿业大学学报,2012,41(2): 182–188.
- ZHANG Wei, ZHANG Dongsheng, CHEN Jianben, et al. Determining the optimum gateway location for extremely close coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 182–188.
- [4] 池小楼,杨科,付强,等.大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板力学行为与稳定控制[J].煤炭科学技术,2023,51(6): 1–10.
- CHI Xiaolou, YANG Ke, FU Qiang, et al. Mechanical behavior and stability control of regenerated roof in long wall stratified mining of thick steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 1–10.
- [5] 王智民,梁运培,邹全乐,等.多重采动下大倾角上覆煤岩移动及地面井变形规律[J].煤炭科学技术,2023,51(4): 47–55.
- WANG Zhimin, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, et al. Movement of overlying rock and deformation law of surface well under multiple mining with large dip angle[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 47–55.
- [6] 伍永平,郎丁,黄东风,等.我国大倾角煤层开采技术变革与展望[J].煤炭科学技术,2024,52(1): 25–51.
- WU Yongping, LANG Ding, YUN Dongfeng, et al. Reform and prospects of mining technology for large inclined coal seam in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 25–51.
- [7] 张忠温,吴吉南,范明建,等.近距离煤层采空区下巷道支护技术研究与应用[J].煤炭工程,2015,47(2): 37–40.
- ZHANG Zhongwen, WU Jinan, FAN Mingjian, et al. Research on roadway support technology under goaf of close coal seam[J]. Coal Engineering, 2015, 47(2): 37–40.
- [8] 李桂臣,杨森,孙元田,等.复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(6): 29–45.
- LI Guichen, YANG Sen, SUN Yuantian, et al. Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 29–45.
- [9] 于洋,神文龙,高杰.极近距离煤层下位巷道变形机理及控制[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1): 49–55.
- YU Yang, SHEN Wenlong, GAO Jie. Deformation mechanism and control of lower seam roadway of contiguous seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 49–55.
- [10] 王龙飞,常泽超,杨战标,等.深井近距离煤层群采空区下回采巷道联合支护技术[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4): 686–692.
- WANG Longfei, CHANG Zechao, YANG Zhanbiao, et al. Combined support technology of roadway under mined gob of ultra-distance seams in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 686–692.
- [11] 张春雷,李占平,康强.近距煤层群不同层间岩层结构下围岩裂隙演化规律[J].煤矿安全,2018,49(9): 91–95.
- ZHANG Chunlei, LI Zhanping, KANG Qiang. Fracture evolution laws of surrounding rock under different strata rock structures in short distance coal seam group[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 91–95.
- [12] LI X F, CHENG G H, LI X Q, et al. A study of soft rock roadway coupling support in xiajing coal mine[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 812–817.
- [13] XIAO T Q, WANG X Y, ZHANG Z G. Stability control of surrounding rocks for a coal roadway in a deep tectonic region[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 171–176.
- [14] GAO F Q, STEAD D, KANG H P. Simulation of roof shear failure in coal mine roadways using an innovative UDEC Trigon approach[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 33–41.
- [15] 王红伟,宋远洋,焦建强,等.大倾角煤层断层带回采巷道动载失稳机理[J].采矿与安全工程学报,2022,39(5): 971–980, 991.
- WANG Hongwei, SONG Yuanyang, JIAO Jianqiang, et al. Failure mechanism of roadway under dynamic load in fault zone of steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 971–980, 991.
- [16] ARGÜELLES-FRAGA R, ORDÓÑEZ C, GARCÍA-CORTÉS S, et al. Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning[J]. Automation in Construction, 2013, 31: 1–9.
- [17] GHOTBI RAVANDI E, RAHMANNEJAD R. Wall displacement prediction of circular, D shaped and modified horseshoe tunnels in non-hydrostatic stress fields[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 34: 54–60.
- [18] LU A Z, CHEN H Y, QIN Y, et al. Shape optimisation of the support section of a tunnel at great depths[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 190–197.
- [19] 曹树刚,王帅,王寿全,等.大倾角煤层回采巷道断面适应性[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(3): 436–441.
- CAO Shugang, WANG Shuai, WANG Shouquan, et al. Adaptability of roadway section shape in deep inclined seam[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(3): 436–441.
- [20] WANG M, GUO G L, WANG X Y, et al. Floor heave characteristics and control technology of the roadway driven in deep inclined-strata[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(2): 267–273.
- [21] TAO Z G, ZHU C, ZHENG X H, et al. Failure mechanisms of soft rock roadways in steeply inclined layered rock formations[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2018, 9(1): 1186–1206.
- [22] LIANG Z Z, SONG W C, LIU W T. Theoretical models for simulating the failure range and stability of inclined floor strata in

- duced by mining and hydraulic pressure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104382.
- [23] 张进鹏, 刘立民, 刘传孝, 等. 深部大倾角煤岩层巷道断面形状与耦合支护[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4074-4087.
ZHANG Jinpeng, LIU Limin, LIU Chuanxiao, et al. Cross-section shape and coupling support of deep and large-inclined coal and rock roadway[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(11): 4074-4087.
- [24] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [25] 贾后省, 李国盛, 王路瑶, 等. 采动巷道应力场环境特征与冒顶机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 707-714.
JIA Housheng, LI Guosheng, WANG Luyao, et al. Characteristics of stress-field environment and roof falling mechanism of mining influenced roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(4): 707-714.
- [26] 赵洪宝, 程辉, 吉东亮, 等. 近距离煤层回采巷道非对称性破坏机理与演化规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1029-1040, 1050.
ZHAO Hongbao, CHENG Hui, JI Dongliang, et al. Study of the mechanism and evolution law of unsymmetrical failure of the mining roadway in close distance coal seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(6): 1029-1040, 1050.
- [27] 贾后省, 王璐瑶, 刘少伟, 等. 综放工作面煤柱巷道软岩底板非对称底臌机理与控制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1030-1040.
JIA Housheng, WANG Luyao, LIU Shaowei, et al. Mechanism and control strategy of asymmetrical floor heave of coal pillar roadway in fully mechanized caving face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1030-1040.