

# 断层影响下深部巷道交叉点围岩破坏特征及支护

王希之<sup>1</sup>,朱永建<sup>1,2\*</sup>,王平<sup>1,2,3</sup>,任恒<sup>1</sup>,李鹏<sup>1</sup>,张玉群<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411100;

2.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为了研究断层对巷道交叉点围岩破坏及位移的影响,根据巷道塑性区半径及周边位移公式得出深部巷道围岩变形破坏的影响因素,如高地应力、围岩强度、断层破碎带等,运用FLAC<sup>3D</sup>模拟巷道交叉点周边应力场分布,发现应力场在巷道穿越断层时受到破碎围岩的影响而产生不连续现象,同时断层构造导致围岩破碎,使底板岩层强度变弱,底鼓问题更加突出.设计了4种不同的支护方案,结合巷道塑性区半径对不同长度的锚杆及有无U型棚架的支护效果进行比较分析.研究分析及模拟结果表明:巷道穿越断层时底板变形量大于顶板变形量;锚杆长度大于塑性区半径时锚固效果较好;锚网索喷+36U型棚支护方案能有效改善巷道变形.

**关键词:**穿断层巷道;巷道交叉点;底鼓;锚网索喷支护

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)02-0019-07

## Failure Characteristics and Support of Surrounding Rock of Deep Intersection Roadway Under the Fault

WANG Xizhi<sup>1</sup>, ZHU Yongjian<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2,3</sup>, REN Heng<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Yuqun<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of

Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the influence of faults on the damage and displacement of the surrounding rock of the intersection roadway, through theoretical analysis, and using the roadway plastic zone radius and the surrounding displacement formula, the influencing factors of the deformation and failure of the deep roadway surrounding rock are obtained, including high ground stress, surrounding rock strength, fault fracture Belt. FLAC<sup>3D</sup> is used to simulate the stress field distribution around the roadway and analyze the relation between the floor heave of the roadway and the stress field. Four different support schemes are designed, combined with the radius of the plastic zone of the roadway, the support effects of bolts of different lengths and with or without U-shaped scaffolding are compared and analyzed. Research analysis and simulation results show that when the roadway crosses a fault, the deformation of the floor is greater than that of the roof; the anchoring effect is better if the length of the bolt is longer than the radius of the plastic zone; the anchoring, mesh, cable and shotcrete

收稿日期:2020-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774130;51804114);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51804114);南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室科研启动基金资助项目(969-E51770)

\*通信作者, E-mail: yjzhu@hust.edu.cn

36U-shaped shed can effectively improve the deformation of the roadway.

**Keywords:** roadway through fault; intersection roadway; bottom drum; bolt-mesh-cable support

随着我国对煤炭资源需求的增加及浅部煤炭资源逐渐开采至枯竭,未来10年我国多数地区煤矿将全面进入深部开采<sup>[1,2]</sup>.深部煤矿数量及其产能所占的比例会越来越大,随着开采深度的增加,开采难度也将不断提高.深部煤炭资源的开采过程中地应力一般以垂直应力为主,但在地质构造复杂的矿区仍可能以构造应力为主.煤岩体的破碎性质在高地应力的作用下会发生显著变化,高地温对深部岩体的性质也会产生影响,随之升高的岩溶水压则会导致深井突水事故频发,因此深部开采的地质条件、岩体性质、致灾机理都明显不同于浅部煤矿<sup>[3-8]</sup>.

地下断层也增加了深部开采的难度,它影响了岩体的移动规律,改变了岩层的应力分布,使断层附近的巷道变形规律更加复杂.近年来,国内外许多学者对断层影响下的巷道围岩变形破坏进行了大量研究.陈晓祥<sup>[9]</sup>认为在断层构造中的巷道围岩变形在大断面效应、断层构造应力、地应力的作用下,表现为巷道围岩松散破碎,巷道变形以底鼓现象最为突出;勾攀峰<sup>[10]</sup>通过相似模拟试验得出在断层影响区域的垂直方向上,顶板岩层的沉降量不相同,从而产生离层,顶板岩层特别是顶板下岩层向断层方向的沉降量明显变大;康红普<sup>[11]</sup>认为巷道埋深、采动影响程度、围岩性质、底板软岩层厚度等决定了底板岩层的破坏深度,而底板岩层的破坏深度直接影响着底鼓量;侯朝炯<sup>[12]</sup>针对深部开采存在的“三高(高地应力、高地温、高岩溶水压)一扰动(强烈开采扰动)”问题,发现了巷道底鼓的两点(零位移点、零应变点)三区(拉应变上升区、拉应变压缩区、压应变压缩区)的分布规律,提出了底板锚杆和注浆孔深度应深入底板岩层零点位移以下的原则;王军<sup>[13]</sup>用单因素变量法模拟底板零位移标线深度 $h_s$ 的变化,结果表明底板零位移标线深度 $h_s$ 与底板支护力 $\sigma$ 的关系符合对数函数 $h_s = f(\sigma) = -3.637 \ln \sigma$ ,与底板岩层强度 $\sigma_c$ 的关系符合幂函数 $h_s = f(\sigma_c) = 32.424 1 \sigma_c^{-0.569}$ ,与巷道埋深 $H$ 的关系符合线性函数 $h_s = f(H) = 0.003 8H + 3.641 1$ ,与巷道半径 $R$ 的关系符合对数函数 $h_s = f(R) = 14.262 \ln R - 6.108$ ;顾世超<sup>[14]</sup>认为在支护不充分的情况下,破碎围岩普遍会产生水平方向的位移,岩体会沿弱面发生相对滑移,沿特定方向产生新的剪切破坏面,并且沿新的剪切破坏面继续发生相对位移.姜耀东<sup>[15]</sup>研究了深部开采中巷道底鼓严重的问题,提出巷道底鼓实际上就是巷道底板在已经破坏的情况下的再变形和再稳定,并认为深部巷道围岩的破坏是一个普遍现象,围岩破坏并不意味着巷道失稳,通过采用合理的支护方式,围岩已经破坏的巷道仍能够保持稳定.朱永建<sup>[16]</sup>认为在构造带影响下,巷道围岩表现出极不稳定的特点,采用全断面注浆结合锚喷支护可以有效控制变形量,降低应力的释放.

综上,国内外众多学者对巷道过断层的围岩变形破坏的研究成果颇丰,但在实际工况中存在巷道交叉点穿越断层的情况,因此本文对巷道交叉点在穿越断层时围岩的应力分布及其位移变化进行数值模拟,分析巷道交叉点在断层影响下围岩应力的特征及位移变化的规律,了解复杂的深部巷道围岩变化,针对性地采取合适的巷道支护措施.

## 1 采区概况

糯东煤矿矿井采区埋深230~1 179 m,首采区共有可采煤3层,分别为17、19、20煤层,其中17煤层平均厚度4.39 m,19煤层平均厚度1.65 m,20煤层平均厚度2.14 m,采区岩性如图1所示.开采初期在+1 450 m水平沿17煤层底板岩石开凿2条回风斜井,沿20煤层底板岩石开凿1条主斜井,倾角为5°,沿+1 450水平开掘500 m副平硐至17煤层顶板,然后穿层开掘副暗斜井至+1 200 m水平20煤层底板内,其中F07断层为落差10 m的逆断层,仅在断层端部出现应力集中,断层其他区域应力水平较低.副平硐及12003回风巷为跨度5 m的半圆拱形巷道.采区平面图如图2所示.

厚度/m	柱状	岩性
23.09		粉砂岩
1.02		泥灰岩
4.39		煤
13.98		泥质粉砂岩
15.03		粉砂岩
0.97		泥灰岩
1.65		煤
6.01		粉砂质泥岩
2.14		煤
68.55		粉砂质泥岩

图 1 采区岩性

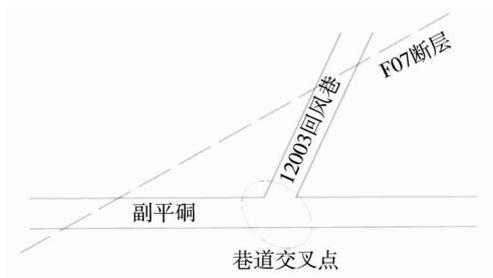


图 2 采区平面

## 2 断层影响下围岩变形机制

在巷道开挖后围岩应力重新分布,开挖巷道的交叉点处形成的三角区如图 3 所示.三角区的应力重新分布后容易产生应力集中现象,导致围岩破碎,形成破碎区、塑性变形区、弹性变形区和原岩应力区,如图 4 所示.

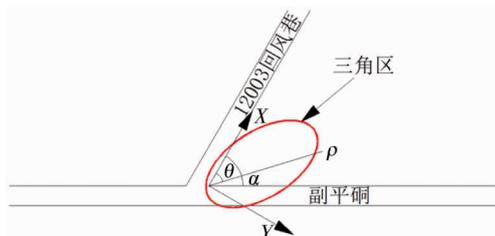


图 3 巷道交叉点三角区

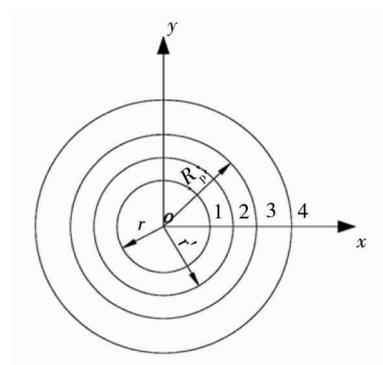


图 4 圆形巷道开挖后围岩状态分布

假设围岩为弹性体,巷道为圆形断面,巷道交叉点三角区垂直应力  $\sigma_h$  的计算式为

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left[ 1 + \frac{R_p^2}{(\rho \sin \theta + R_p)^2} \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ 1 + \frac{3R_p^4}{(\rho \sin \theta + R_p)^4} \right] + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left\{ 1 + \frac{R_p^2}{[\rho \sin(\alpha - \theta) + R_p]^2} \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left\{ 1 + \frac{3R_p^4}{[\rho \sin(\alpha - \theta) + R_p]^4} \right\}. \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为原岩垂直应力和水平应力;  $R_p$  为圆形巷道周边塑性区半径;  $(\rho, \theta)$  为计算点的极坐标;  $\alpha$  为巷道交叉点的交叉角.

由式(1)可知,求解三角区需确定圆形巷道周边塑性区半径.因巷道断面为跨度 5 m 的半圆拱形,用等代圆法可计算出等代圆半径

$$r = \frac{b}{2\sin(e/2)}. \quad (2)$$

式中:  $b$  为巷道跨度;  $e$  为圆拱弧度.

根据修正芬纳(Fenner)方程<sup>[17]</sup>可知巷道周边塑性区半径及周边位移为

$$R_p = r \left[ \frac{(p_0 + c \cos \varphi) (1 - \sin \varphi)^{\frac{1-\sin \varphi}{2\sin \varphi}}}{p_1 + c \cot \varphi} \right]; \quad (3)$$

$$u = \frac{r \sin \varphi (p_0 + c \cos \varphi)^{\frac{1-\sin \varphi}{2\sin \varphi}} (1 - \sin \varphi)^{\frac{1-\sin \varphi}{2\sin \varphi}}}{2G (p_1 + c \cot \varphi)^{\frac{1-\sin \varphi}{2\sin \varphi}}}. \quad (4)$$

式中:  $r$  为巷道半径;  $p_0, p_1$  分别为原岩应力和支护反力;  $c$  为内聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $u$  为巷道周边位移;  $G$  为围岩的剪切弹性模数.

为确保支护时锚杆能锚固在稳定的岩体中并提供足够的锚固力,在断层构造中原岩应力、内聚力等岩石力学参数都发生了变化,应对其进行多次取值计算,获取理论最大塑性区半径.由式(3)和式(4)可知,巷道的塑性区半径和周边位移主要受到岩体初始应力(即原岩应力)、岩体的内摩擦角和内聚力等影响.当原岩应力在 5~25 MPa 变化、内聚力在 1~7 MPa 变化时,巷道塑性区半径及周边位移在二者影响下的变化如图 5 和图 6 所示.

1) 原岩应力对塑性区及周边位移的影响如图 5 所示.由图 5 可知巷道的塑性区半径  $R_p$  和周边位移  $u$  随巷道所在位置原岩应力的升高而不断增长,当原岩应力在 5~10 MPa 时塑性区半径的增长速率较快,原岩应力增长至 10 MPa 之后塑性区半径的增长速率逐步降低;随着原岩应力的不断增加,周边位移的增长速率也随之增加.

2) 巷道的塑性区半径  $R_p$  和周边位移  $u$  随围岩内聚力  $c$  的增加而降低,且其降低速率不断减少,当内聚力增加到 5 MPa 后其降低速率逐渐趋近于 0,如图 6 所示.

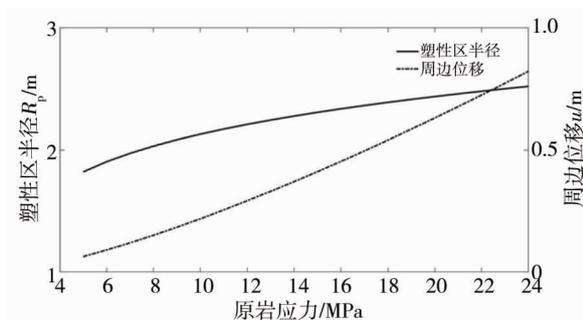


图 5 原岩应力对塑性区及周边位移的影响

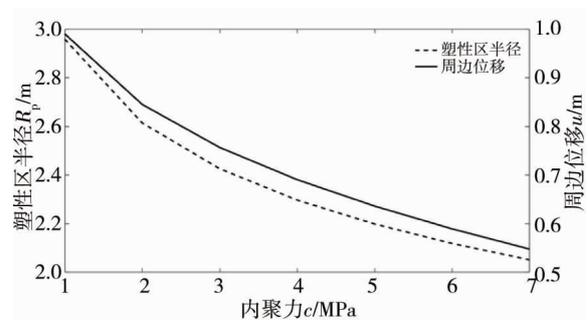


图 6 内聚力对塑性区及周边位移的影响

由于断层的活动改变围岩应力的大小,离断层越近应力越低,在断层内部应力达到最低,断层中部应力相对原岩应力较低,断层两端应力出现集中<sup>[18]</sup>.断层内部的岩体往往是破碎,其内聚力低于周边稳定的围岩,随着内聚力的降低又会导致应力降低,进一步影响塑性区半径及周边位移.

综上所述可以得出:副平硐及 12003 回风巷变形破坏是由于深部围岩的高应力使巷道周边位移明显增大,使巷道周边塑性区范围扩大;深部围岩强度相对变弱使围岩位移迅速增加,同时也造成巷道塑性区半径增加。

### 3 数值模拟

#### 3.1 建立模型

根据糯东煤矿采掘工程的平面图和剖面图建立三维模型并进行网格划分,最后将划分好的网格模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 进行赋值和计算。

图 7 为 F07 数值模拟计算模型.该模型大小为 150 m×105 m×130 m,包括断层 F07、副平硐以及 12003 回风巷,共计单元个数 336 517 个,节点数 225 017 个.模型中心到边界的距离为 150 m,远大于 3 倍巷道半径,可有效避免边界效应的影响.因 F07 断层岩体较完整,根据现场测量数据,取断层破碎带宽度为 2 m,在 F07 断层处建立接触面,并分别在上下盘距接触面 1 m 处建立断层破碎带.12003 回风巷从模型左边界向右 50 m 为 F07 断层的位置,F07 断层右侧约 25 m 为副平硐与 12003 回风巷交叉点。

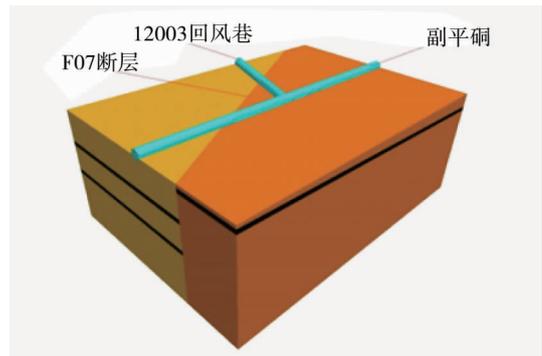


图 7 数值模拟计算模型

#### 3.2 数值计算

根据地质条件,该模型上表面作为自由面,对其施加 23.7 MPa 荷载模拟上覆岩层自重,四周为滑动支承,底部为固定支承,本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,模拟 F07 断层对副平硐以及 12003 回风巷的影响.模型中断层岩体节理的法向刚度为 5 GPa,剪切刚度为 5 GPa,内摩擦角为 30°,内聚力为 1 kPa.模型单元体岩石力学参数见表 1。

表 1 模型各层的岩石物理力学参数

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
粉砂岩	6.27	5.19	38	2.40	1.84	2 460
粉砂质泥岩	7.48	4.34	40	2.40	0.23	2 600
煤	4.06	0.83	34	0.37	0.14	1 450
断层岩	4.01	1.87	30	1.35	1.66	1 600

#### 3.3 巷道围岩垂直应力分布

图 8 为围岩垂直应力的分布.从图 8a 中不难看出副平硐在穿越 F07 断层时发生应力不连续,在 F07 断层两侧垂直应力产生明显差距;图 8b 中,副平硐与 12003 回风巷交叉点的应力降低区扩大,且副平硐与 12003 回风巷交叉的应力集中现象扩张至断层构造的边界,在断层处仍有应力不连续现象;图 8c 表明 12003 回风巷在穿越 F07 断层处同样出现应力不连续现象.在断层影响下,无论是应力降低区还是集中区都出现了明显的不对称现象,副平硐左帮的应力集中程度低于右帮,12003 回风巷由南至北走向左帮应力集中程度低于右帮,因此断层以北的围岩强度在断层的作用下降低.巷道底板应力最低降至 1 MPa 以下,而顶板应力降低区的应力普遍在 1 MPa 以上。

综上所述可以得出在断层影响下巷道围岩变形机理:巷道穿越断层时的垂直应力丧失连续性,断层两侧围岩的应力差距最大可达 1 MPa;巷道交叉点应力降低显著,顶板应力最低降至 0.5 MPa,底板应力最低降至 0.2 MPa;由于断层构造导致围岩更易破碎,从而使底板鼓起问题更加突出。

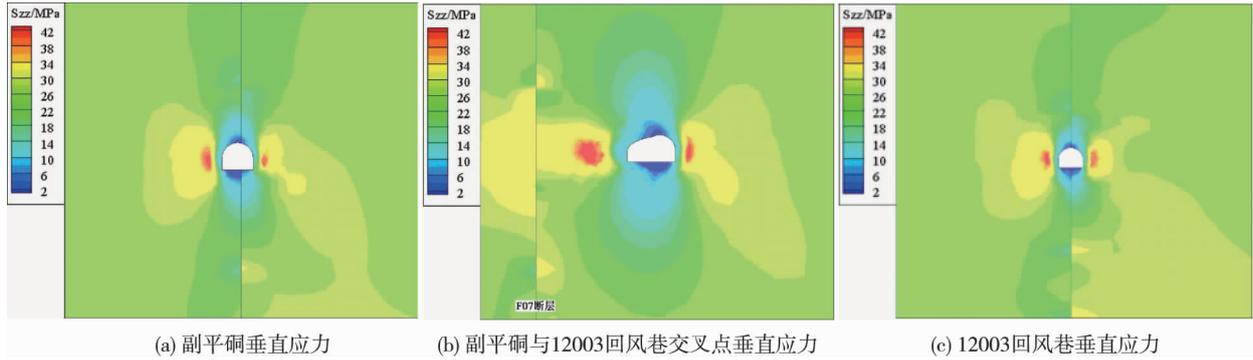


图8 围岩垂直应力分布

### 3.4 巷道穿越断层的围岩稳定控制技术

巷道塑性区如图9所示,其宽度为2.3~2.5 m.根据修正芬纳(Fenner)方程及岩石物理力学参数可以计算出理论塑性区半径约为5.1 m,理论塑性区与模型计算结果相近.由于F07断层的存在使断层周围岩变得破碎,因此在图中形成了一条上下贯穿的塑性破坏带.

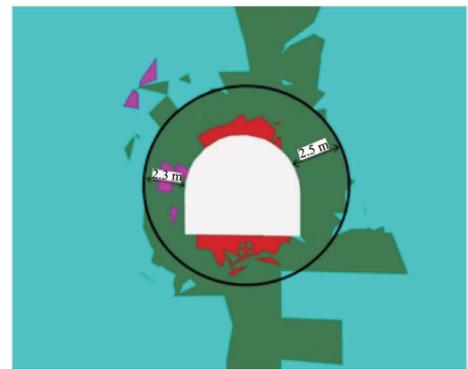


图9 巷道塑性区

针对巷道穿越断层时导致巷道围岩破坏和强度弱化的问题及塑性区特征提出4种支护方案:方案一采用长度为2 500 mm直径22 mm的高强滚丝锚杆,锚杆间排距为700 mm×700 mm,采用长度4 200 mm直径17.8 mm的锚索,锚索间排距700 mm×1 400 mm,锚杆、锚索交错施打;方案二在方案一的基础上将锚杆长度增加至2 800 mm,其他参数不变;方案三则在方案一的基础上增设36U型棚,棚搭接为500 mm;方案四在方案二的基础上增设36U型棚,棚搭接为500 mm.

由于现场施工尚未完成,因此仅讨论数值模拟中不同支护方案的支护效果.图10为模拟未支护和采用4种不同方案支护后的巷道围岩位移情况.

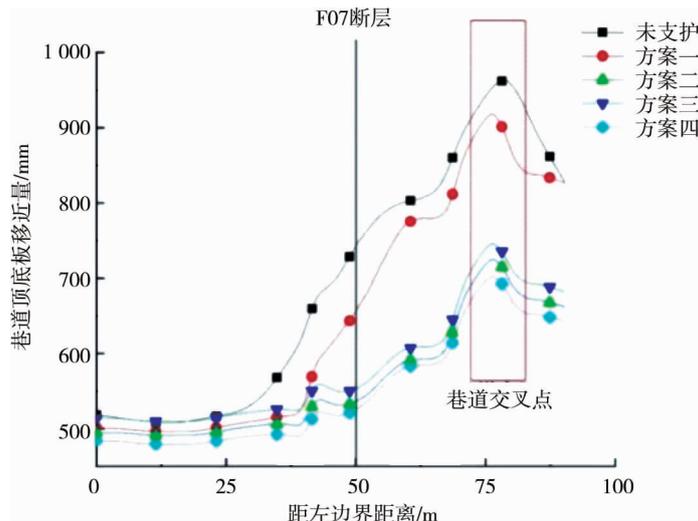


图10 未支护与支护下副平硐顶底板移近量

由图10可以看出:模拟支护方案一时,由于塑性区半径约为5.1 m,长度为2 500 mm的锚杆不能完全穿过塑性区到达围岩稳定区,不能起到良好的控制效果,在交叉点顶底板移近量仍高达930 mm,因此需要加长锚杆的长度;模拟方案二时,交叉点顶底板移近量减少到737 mm,这说明通过增加锚杆长度来减少巷道围岩位移的方法是有效的;方案三在不改变锚杆长度的前提下增设了36U型棚之后,巷道交叉点顶底

板移近量降至 758 mm;方案四在加长锚杆的同时架设 U 型棚,将巷道交叉点顶底板移近量降至 713 mm,效果最佳.

## 4 结论

1) 巷道在穿越断层时应力会发生不连续现象.在不连续应力的影响下,拱形顶板所受应力通过两帮传至底板,使原本破碎的底板进一步受压,进而导致巷道底板变形量大于巷道顶板变形量.

2) 巷道交叉点处的应力降低区范围与其他位置相比更大,顶底板移近更为严重.

3) 增加锚杆长度使其穿过塑性区到达围岩稳定区的方法可以有效控制顶底板移近量,增设 U 型棚能够进一步改善顶底板移近的状况.

## 参考文献:

- [1] 张农,李希勇,郑西贵,等.深部煤炭资源开采现状与技术挑战[C]//全国煤矿千米深井开采技术座谈会.2013.
- [2] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.
- [3] 罗浩,李忠华,王爱文,等.深部开采临近断层应力场演化规律研究[J].煤炭学报,2014,39(2):322-327.
- [4] Ren H, Zhu Y, Wang P, et al. Experimental study on mechanical characteristics of unloaded damaged white sandstone before peak[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(17):395-406.
- [5] 朱永建,任恒,王平,等.损伤石灰岩单轴再加载力学特性及破坏机理[J/OL].哈尔滨工业大学学报:1-9.(2020-06-22)[2021-02-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20200622.0849.002.html>.
- [6] 康红普.深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):12-17.
- [7] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [8] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [9] 陈晓祥,吴俊鹏.断层破碎带中巷道围岩大变形机理及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):885-892.
- [10] 勾攀峰,胡有光.断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J].采矿与安全工程学报,2006(3):285-288.
- [11] 康红普,陆士良.巷道底鼓机理的分析[J].岩石力学与工程学报,1991(4):362-373.
- [12] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):970-978.
- [13] 王军,胡存川,左建平,等.断层破碎带巷道底鼓作用机理与控制技术[J].煤炭学报,2019,44(2):397-408.
- [14] 顾士超,尹增德,宗彩建,等.深部断层破碎带巷道锚注加固机理研究与应用[J].煤炭技术,2016,35(8):63-65.
- [15] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等.深部开采中巷道底鼓问题的研究[J].岩石力学与工程学报,2004(14):2396-2401.
- [16] 朱永建,余伟健.构造带极不稳定围岩注浆加固效果数值分析[J].煤炭科学技术,2011,39(3):14-17.
- [17] 刘刚,肖勇卓,朱俊福,等.围岩松动圈理论计算方法的评述与展望[J].煤炭学报,2021,46(1):46-56.
- [18] 翁剑桥,曾联波,吕文雅,等.断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J].地质力学学报,2020,26(1):39-47.