

# 俄霍布拉克煤矿地应力方向对巷道围岩 稳定性影响研究\*

王延朝<sup>1,2</sup>, 王宏志<sup>1,2†</sup>, 周士航<sup>1,2</sup>, 付瀚天<sup>1,2</sup>, 管玉<sup>1,2</sup>, 程佩昌<sup>1,2</sup>, 刘志强<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 新疆矿产资源绿色开发与生态修复省部共建协同创新中心, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为优化矿井开拓布局、提高巷道围岩稳定性,以俄霍布拉克煤矿为例,开展地应力方向影响巷道围岩稳定性研究. 首先,根据研究区条件构建了FLAC<sup>3D</sup>数值模型,定义了主应力方向,选择主应力方向与巷道夹角为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°共7种情况进行模拟. 其次,确定了不同夹角塑性区最大破坏深度等为模拟对象,发现随着夹角增大,两帮的塑性区呈马蹄形,顶板呈扇形,底板呈三角形;夹角介于0°~45°时以剪切破坏为主,夹角介于60°~90°时两帮表层的破坏区域呈现张拉和剪切复合性破坏,其他部位仍以剪切破坏为主. 最后,通过现场布点进行应力监测,发现随着夹角增加,围岩承载能力和抗剪性能增强,围岩破坏深度与主应力差峰值的排序趋势保持一致. 结果表明:主应力方向与巷道夹角大小对巷道围岩稳定性起着控制作用,合理选择巷道走向可有效减小应力集中,提升围岩稳定性.

**关键词:** 地应力方向; 巷道围岩稳定性; 数值模拟; 塑性区分布; 主应力差

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.04.13.0001

**中图分类号:** TD322 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)06-0665-010

**引文格式:** 王延朝,王宏志,周士航,付瀚天,管玉,程佩昌,刘志强. 俄霍布拉克煤矿地应力方向对巷道围岩稳定性影响研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(6): 665-674.

**英文引文格式:** WANG Yanchao, WANG Hongzhi, ZHOU Shihang, FU Haotian, GUAN Yu, CHENG Peichang, LIU Zhiqiang. Study on the influence of geostress direction on the stability of roadway surrounding rock in Ehuobulake coal mine[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(6): 665-674.

## Study on the Influence of Geostress Direction on the Stability of Roadway Surrounding Rock in Ehuobulake Coal Mine

WANG Yanchao<sup>1,2</sup>, WANG Hongzhi<sup>1,2</sup>, ZHOU Shihang<sup>1,2</sup>, FU Haotian<sup>1,2</sup>,  
GUAN Yu<sup>1,2</sup>, CHENG Peichang<sup>1,2</sup>, LIU Zhiqiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Collaborative Innovation Center of Green Mining and Ecological Restoration  
for Xinjiang Mineral Resources, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** In order to optimize the mine layout and improve the stability of the roadway surrounding rock, the influence of the geostress direction on the stability of the roadway surrounding rock is studied with the Ehuobulake coal mine as an example. Firstly, a FLAC<sup>3D</sup> numerical model is according to the conditions of the study area, the principal stress direction is defined, and the principal stress direction and the roadway angle are determined to be 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° in all 7 cases for simulation. Secondly, the maximum damage depth of plastic areas with different angles is determined as simulation objects. It is found that the range of plastic regions increases with the angle, and the plastic regions of the two walls are horseshoe-shaped, the top plate is fan-shaped, and the bottom plate is triangular. When the angle is between 0° and 45°, the shear failure is the main failure

\* 收稿日期: 2025-04-13

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目“弱胶结地层巷道/采场围岩灾变机制与智能防控关键技术研究”(2023B01010-2).

作者简介: 王延朝(1998—),男,硕士生,从事巷道矿压规律及围岩稳定性控制的研究, E-mail: lw305@stu.xju.edu.cn.

† 通讯作者: 王宏志(1990—),男,博士,副教授,主要从事矿山岩体力学与岩层控制的研究, E-mail: wanghongzhi@xju.edu.cn.

mode, and when the angle is between  $60^\circ$  and  $90^\circ$ , the damage area on the surface of the two walls shows tensile and shear composite failure, and other parts are still dominated by shear failure. Finally, the stress monitoring carried out on site, and the analysis results of the monitoring data show that, with the increase of the angle, the bearing capacity and shear resistance of the surrounding rock are enhanced, and order trend of the surrounding rock damage depth and the peak value of the principal stress difference is consistent. The results of the study show that, the direction of the principal stress and size of the roadway angle play a controlling role in the stability of the roadway surrounding rock, and the reasonable selection of the roadway strike can effectively reduce the stress concentration and improve the stability of the surrounding rock.

**Key words:** geostress direction; roadway surrounding rock stability; numerical simulation; plastic region distribution; principal stress difference

## 0 引言

矿山开采活动中,地应力是导致煤矿井下开采空间变形和破坏的根本作用力<sup>[1]</sup>.地应力不仅影响岩体的力学行为,还直接关系工程设计与施工的安全性与稳定性.其分布特征对巷道围岩的稳定性、应力释放以及变形破坏机制都产生影响<sup>[2-3]</sup>.目前,诸多学者针对地应力分布特征及其对巷道围岩稳定性的影响,进行了一系列研究.

黄龙现等<sup>[4]</sup>研究了地应力场方向对巷道围岩稳定性的影响,发现最大水平应力与巷道轴向越一致,巷道围岩越稳定.郑群等<sup>[5]</sup>认为随着埋深的增加,水平应力增加幅度小于垂直应力.魏超城等<sup>[6]</sup>认为深部地应力由水平应力主导.武瑞龙等<sup>[7]</sup>认为构造应力孕育了蝶形塑性区,软岩诱发了蝶形塑性区恶性扩展.焦建康等<sup>[8]</sup>研究了一种用于中小型煤矿巷道围岩稳定性的定量化评价方法及分级支护技术,该技术基于现场地应力测量、岩石力学属性分析,并结合数值模拟来评估巷道围岩的稳定性.李延河等<sup>[9]</sup>通过理论计算、数值模拟等方法,认为当作用在煤巷两帮的水平法向应力与垂直主应力近似相等时,水平地应力对煤巷布置掘进稳定性影响最小.文献[10-13]发现开采过程中煤层上方原岩应力发生扰动,使能量得到释放,从而诱发覆岩发生持续变形现象,变形破坏的覆岩区域呈下沉抛物线状.张新辉等<sup>[14]</sup>发现主应力关系符合地区的走滑构造特征,揭示了地应力分布主要受地层岩性和断裂带影响.王康健等<sup>[15]</sup>通过FLAC<sup>3D</sup>分析,认为当巷道轴向与水平最大主应力呈角度相交时,巷道两帮围岩破坏变形呈不对称分布,且当相交角介于 $0^\circ \sim 15^\circ$ 或 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时,巷道围岩的不对称破坏变形程度最低,相交角为 $45^\circ$ 时最大.康红普等<sup>[16]</sup>认为垂直应力总体上随埋深增加不断增大,但数据存在一定的离散性,最大、最小水平主应力总体上也与埋深呈正相关,但数据离散性更大.吕卫东等<sup>[17]</sup>研究了济北矿区的地应力及分布特征,发现地应力主要以水平应力为主,最大主应力方向主要为近东西向,提供了巷道布置和支护设计的重要参考.郭延辉等<sup>[18]</sup>发现狮子山矿区地应力场以水平构造应力为主导,最大、最小及中间主应力随深度基本呈线性增长趋势.董海清等<sup>[19]</sup>认为高应力分区内围岩变化程度最大,且能量积聚最为集中,巷道围岩产生应力集中的临界尺度更小,更容易发生强矿压显现情况.张传庆等<sup>[20]</sup>结合实际矿山地应力测量数据,采用FLAC<sup>3D</sup>模拟不同地应力水平下的围岩响应,从而识别和预测围岩的潜在破坏区域,提出了相应的围岩稳定性控制和支护优化方案.国内外学者通过理论分析、现场测试与数值模拟等方法,取得了丰富的研究成果,为矿山巷道的合理布局及支护优化提供了重要依据.

地应力的复杂性和区域差异性对其影响还需进一步梳理,前人的研究较少涉及煤层采动条件下应力场的分布特征,尤其是关于应力场分布特征对巷道变形的影响研究.由于俄霍布拉克煤矿是多煤层开采,采掘活动对各煤层产生扰动,巷道围岩的应力状态会多次发生变化,导致巷道围岩变形逐渐加剧.随着俄霍布拉克煤矿煤炭产能的进一步释放,煤层采动条件下应力场分布特征及其对巷道变形的影响机制成为新的研究方向.结合俄霍布拉克煤矿采掘及实际工程特点,不同的地应力方向对巷道围岩稳定性的影响较大但尚不明晰,本文通过理论分析探讨地应力方向与巷道布局的关系,采用FLAC<sup>3D</sup>模拟俄霍布拉克煤矿不同地应力方向与巷道轴线夹角( $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ),研究不同夹角下巷道围岩的变形与破坏规律,结果可为类似条件下的巷道设计及优化提供参考.

# 1 研究区概况与数据模型构建

## 1.1 研究区概况

俄霍布拉克煤矿位于中国新疆维吾尔自治区库车市,地处库车山前凹陷带,紧邻捷斯德里克复式背斜的背伏端位置<sup>[21]</sup>.井田东西长约8.63 km、南北宽约3.83 km,面积约为33.049 km<sup>2</sup>.井田构造呈现接近东西向和倾向西南的缓波状单斜体特征,构成南北短轴“向斜”.该煤矿共有12层可采煤层,可采煤层总厚(平均)32.75 m,平均倾角为12°,其中下<sub>1</sub>煤层和下<sub>5</sub>煤层为主要开采对象.下<sub>5</sub>煤层基本顶为厚层坚硬砂岩顶板,厚度为8.5 m,属全区可采稳定的特厚煤层,该煤层采用综采放顶煤开采工艺,自采区边界向井筒方向后退式回采.俄霍布拉克煤矿的覆岩活动和应力分布情况复杂,容易导致顶板的二次破断、顶板离层水害以及强矿压显现等问题.煤层受到采掘活动的影响,巷道围岩的应力状态多次发生改变,导致巷道围岩变形逐渐加剧.目前,俄霍布拉克煤矿开采过程中由于不同地应力方向所导致的矿压显现与巷道变形问题日益突出,随着开采范围的不断扩大进一步加剧了这些安全隐患,已对煤矿的正常生产造成了严重威胁,亟需开展相关研究.故本文以下<sub>5</sub>煤层回采巷道为研究对象,采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟技术,探讨不同地应力方向对巷道围岩稳定性的影响,重点分析巷道围岩变形、塑性区分布以及主应力差等方面的变化.

## 1.2 FLAC<sup>3D</sup>模型构建

本文采用FLAC<sup>3D</sup>软件进行数值建模,模型尺寸为30 m×20 m×25 m(长×宽×高).巷道采用矩形设计,宽度为5.3 m、高度为3.6 m,埋深为292 m.模型四周采用位移约束,底面则采用固定边界条件,以限制模型的水平、垂直方向位移.在顶部均匀施加6.5 MPa的垂直压应力,采用Mohr-Coulomb准则和弹塑性本构关系.模型参数根据煤层与岩层的物理力学测试数据及综合柱状图特征赋值,具体岩性及力学参数见表1,数值计算模型见图1.

表 1 岩性及力学参数

岩性	厚度/m	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /°	抗拉强度 /MPa
细砂岩	8.0	2 800	8.6	6.0	19.8	42	10.0
砂质泥岩	2.0	2 600	5.6	3.8	7.9	40	2.9
下 <sub>5</sub> 煤层	8.5	1 350	4.6	2.8	7.5	39	2.0
泥岩	2.5	2 500	4.3	2.1	4.5	33	1.8
中粗砂岩	4.0	2 350	9.6	5.8	9.8	40	5.0

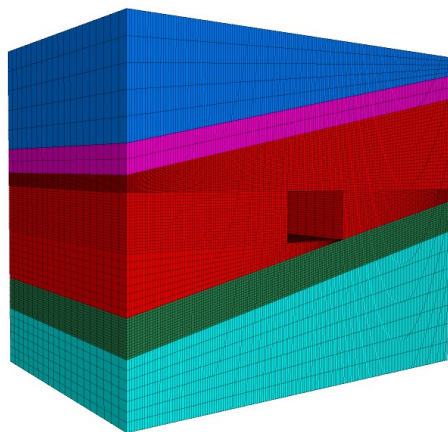


图 1 数值计算模型

## 1.3 模拟方案设计

该模型中,地应力方向通过巷道轴线与最大水平主应力方向之间的夹角表示.计算过程中,采用7种不同的夹角设置方案,分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,其余参数保持不变.根据煤矿巷道布置方向研究的需要,在多种交角工况下观测巷道围岩形变特征、塑性区形态及主应力差的变化,探究并明确最优化的巷道布置方向.

数值模拟中,巷道的轴线方向被定义为Y轴,将最大水平主应力与巷道轴线方向的夹角定义为最大水平主应力与Y轴的夹角,形成以Y轴为基准的数学模型.当最大水平主应力 $\sigma_H$ 开始旋转时,设 $\sigma_H$ 方向与巷道轴线方向Y轴夹角为 $\theta$ ,如图2所示.旋转之后的 $\sigma'_{xx}$ 、 $\sigma'_{yy}$ 、 $\sigma'_{zz}$ 计算方式为

$$\begin{cases} \sigma'_{xx} = \sin^2 \theta \cdot \sigma_H + \cos^2 \theta \cdot \sigma_h, \\ \sigma'_{yy} = \cos^2 \theta \cdot \sigma_H + \sin^2 \theta \cdot \sigma_h, \\ \sigma'_{zz} = \sigma_v, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma'_{xx}$ 、 $\sigma'_{yy}$ 、 $\sigma'_{zz}$ 为施加在模型上的应力分量,MPa.

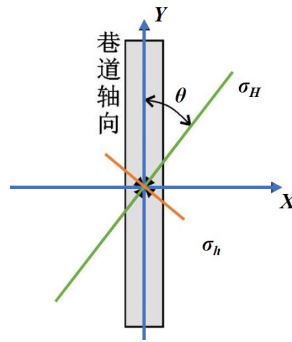


图2  $\sigma_H$ 方向与巷道轴向夹角 $\theta$ 示意图

## 2 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟

### 2.1 位移模拟分析

#### 1) 水平位移模拟分析

不同夹角条件下,巷道帮部围岩的水平位移情况如图3所示.模拟结果表明:夹角为 $0^\circ$ 时,左右两帮的最大水平位移分别为4.63 mm和4.58 mm;随着夹角增大,两帮最大水平位移也随之增加.夹角为 $90^\circ$ 时,左右两帮的最大水平位移分别达到8.70 mm和8.37 mm.相同夹角情况下,左帮的位移略高于右帮.

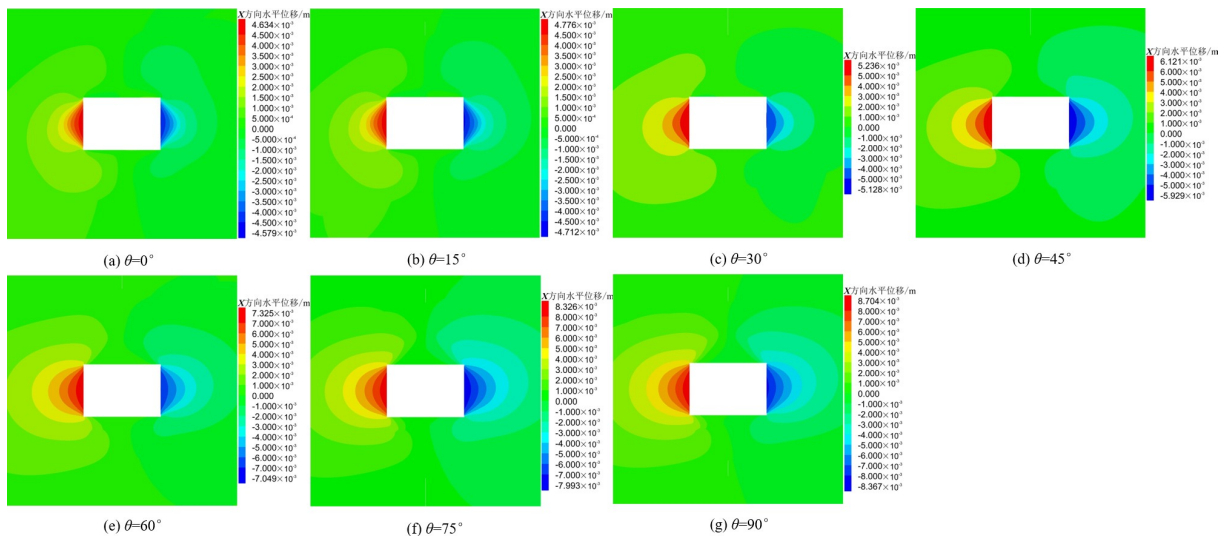


图3 不同夹角巷道围岩水平位移云图

#### 2) 垂直位移模拟分析

不同夹角条件下,巷道顶底板的垂直位移情况如图4所示.模拟结果表明:夹角为 $0^\circ$ 时,顶板下沉量和底板鼓起量的最大值分别为10.42 mm和5.07 mm.随着夹角增大,顶板的最大下沉量和底板的最大鼓起量呈先减小后增大的趋势.夹角为 $45^\circ$ 时,顶板下沉量和底板鼓起量的最大值分别为9.84 mm和4.82 mm;夹角为 $90^\circ$ 时,顶板下沉量和底板鼓起量的最大值分别为11.10 mm和5.25 mm.顶板下沉量显著高于底板鼓起量.

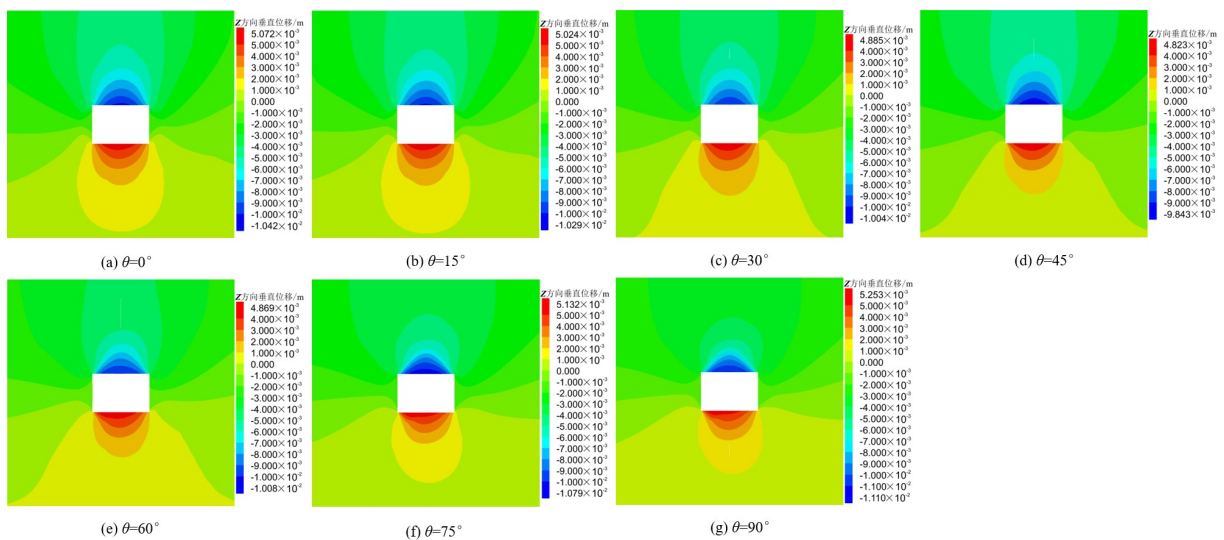


图 4 不同夹角巷道围岩垂直位移云图

### 2.2 塑性区分布与破坏深度模拟

#### 1) 塑性区模拟结果

不同夹角条件下巷道围岩塑性区结果如图5所示.

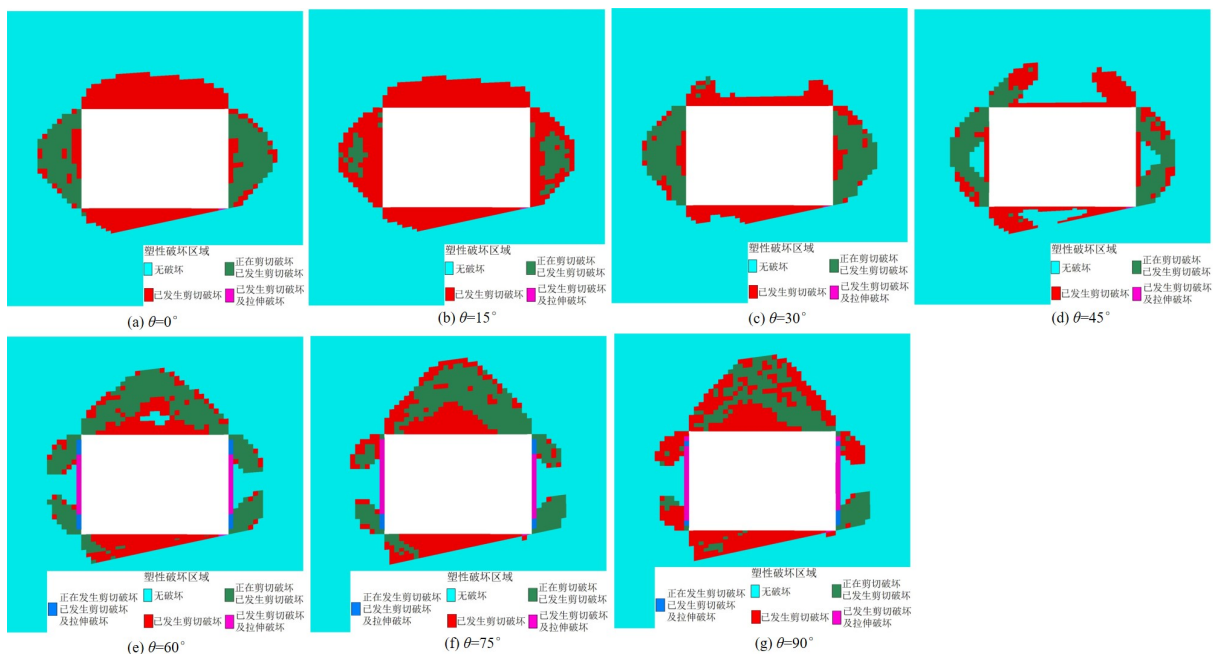


图 5 不同夹角巷道围岩塑性区分布

①塑性区范围. 随着夹角增大, 顶板塑性区的分布范围呈先减小后增大的规律, 最终趋于稳定; 两帮塑性区也表现出类似趋势, 即范围先减小后逐渐扩大, 底板的塑性区分布几乎没有明显变化. 夹角对顶板和两帮塑性区分布范围的影响较大, 对底板的影响相对较小. ②塑性区形态. 夹角为 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 时, 两帮的塑性区呈马蹄形分布, 顶板呈扇形分布, 底板呈三角形分布; 夹角增至 $30^\circ$ 时, 顶板塑性区由扇形转变为马鞍形, 顶底板塑性区中部均向巷道内凹陷并减小, 但整体仍表现为马蹄形分布; 夹角达到 $45^\circ$ 时, 顶底板塑性区中部进一步凹陷, 顶板的最大破坏深度增大, 同时两帮塑性区呈月牙形分布; 夹角增加至 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时, 顶底板塑性区范围显著增大, 顶底板整体上保持马蹄形, 两帮塑性区则向巷道方向进一步凹陷, 呈现马鞍状分布. ③破坏形式. 夹角介于 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 以纯剪切破坏为主; 而夹角介于 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时, 除两帮表层的破坏区域呈张拉和剪切复合作用外, 其他部位主要表现为单一的剪切破坏.

## 2) 破坏深度模拟结果

不同夹角巷道塑性区破坏最大深度模拟结果如图6所示。顶底板破坏深度最大值随夹角变化呈先降后升的演变规律, 夹角为 $30^\circ$ 时, 顶底板受破坏深度最小, 分别为0.95 m和0.69 m; 夹角增至 $90^\circ$ 时, 顶底板的最大破坏深度达到最大值, 分别为2.79 m和1.11 m。两帮破坏深度总体上随夹角增大而减小, 夹角超过 $60^\circ$ 时, 最大破坏深度趋于稳定。

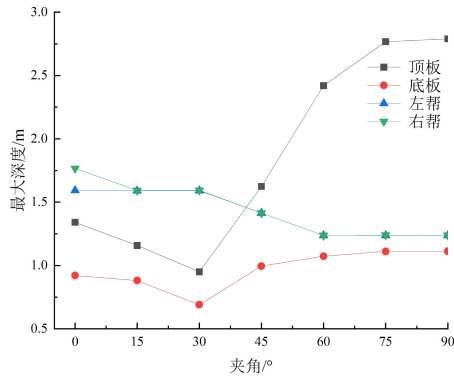


图6 不同夹角巷道塑性区破坏最大深度

## 3 围岩变形及应力分布监测

### 3.1 水平位移监测

在巷道两帮的中部位置, 布置了两条水平测线, 测线每隔0.6 m设置一个测点, 根据监测数据绘制巷道两帮围岩水平位移曲线(图7)。监测数据表明: 水平位移量在巷道表面到围岩深处的方向上逐渐减小。同时, 在相同位置, 随着夹角增大, 水平位移量也会增大。

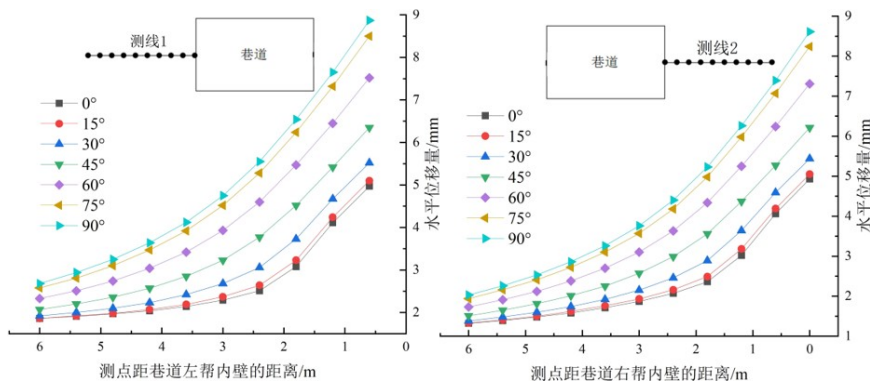


图7 测点测线布置与不同夹角巷道两帮围岩水平位移量变化曲线

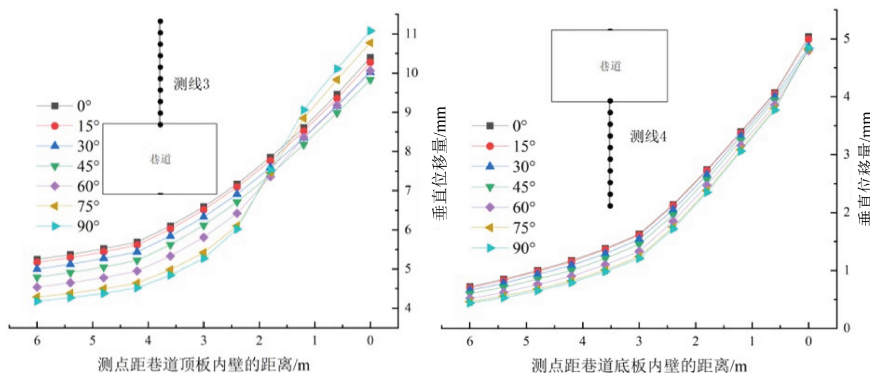


图8 测点测线布置与不同夹角巷道顶底板围岩垂直位移量变化曲线

### 3.2 垂直位移监测

在巷道顶底板中部位置,布置了两条垂直测线,测线每隔0.6 m设置一个测点,根据监测数据绘制垂直位移曲线(图8)。监测数据表明:0~1.5 m范围内,随着夹角增大,顶板下沉量先减小后增大;1.9 m以外的区域,随着夹角增大,顶板下沉量逐渐减小。0~0.2 m范围内,底板鼓起量随着夹角增大呈先减小后增大的趋势;0.2 m以外的区域,底板鼓起量随夹角增加而减小。垂直位移量随着测点向围岩深处延伸逐渐降低。

### 3.3 主应力差监测

巷道掘进过程中主应力场方向存在差异时,围岩内部的高应力区与应力释放区呈动态分布特征。若单纯采用最大或最小主应力参数来评价巷道围岩系统的承载性能,无法完整揭示围岩系统的力学响应特性。根据Mohr-Coulomb准则,围岩最大主应力差与剪切破坏的发生密切相关,其能较好反映剪应力的分布状态,进而表明围岩的破损程度。故分析地应力与巷道轴线夹角变化对巷道稳定性的影响时,采用最大主应力差作为评价指标更加合适。假设主应力为 $\sigma_i(i=1,2,3)$ ,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ,则最大主应力差表示为

$$\sigma = |\sigma_1 - \sigma_3|. \quad (2)$$

为便于分析,选取 $Y=10$  m处的剖面,在巷道顶板和帮部围岩中分别布置了两条测线,测线每隔1 m设置一个测点,监测点布置如图9所示。

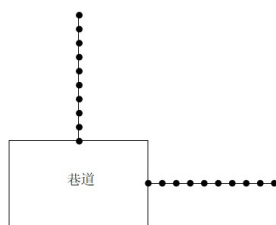


图9 测点布置图

#### 1) 顶板主应力差监测结果分析

根据监测数据绘制巷道顶板主应力差曲线如图10所示。

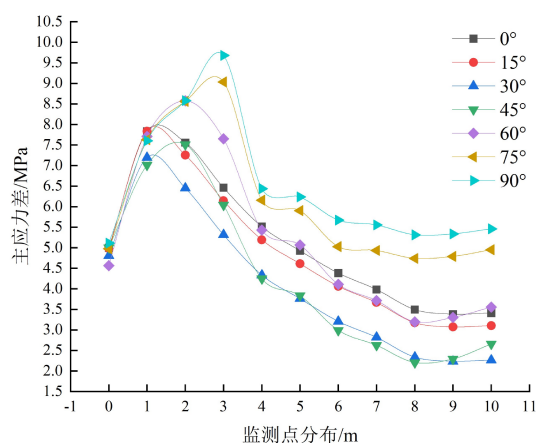


图10 顶板围岩主应力差

由图10可知,随着巷道顶板距离的增大,顶板围岩的主应力差值整体呈“峰前先上升、峰后再下降、逐渐减小并趋于稳定”的变化趋势。夹角为 $90^\circ$ 时,主应力差的峰值最大,其次为 $75^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $30^\circ$ 。结合顶板塑性区的分布特征可知,顶板围岩损伤深度分布与主应力差极值的递变趋势吻合,表明主应力差在控制顶板岩体破坏程度方面具有重要作用。夹角介于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,主应力差的峰值点出现在1.2 m处;随着夹角增大,主应力差的峰值逐步降低,表明夹角越大,围岩的承载能力和抗剪切性能越差,破损情况越严重。夹角为 $45^\circ$ 或 $60^\circ$ 时,主应力差的峰值点位于1.8 m处;夹角达到 $75^\circ$ 或 $90^\circ$ 时,峰值点则向深部围岩移动至2.75 m处,

同时主应力差的峰值也随之增大. 表明随着夹角增大, 围岩的承载能力和抗剪性能增强, 裂隙发育程度降低, 影响范围进一步扩大.

## 2) 巷道帮部主应力差监测结果分析

根据监测数据绘制巷道帮部主应力差曲线如图11所示.

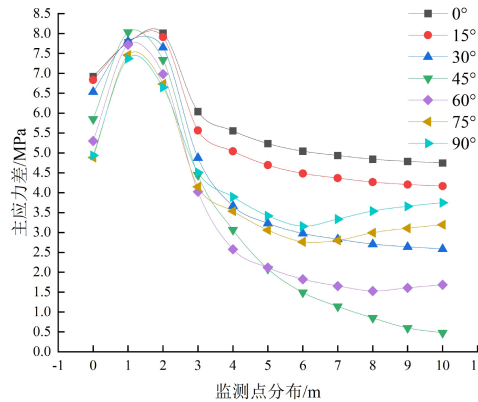


图 11 帮部围岩主应力差

由图11可知, 夹角为 $45^\circ$ 时, 主应力差的峰值达到最大, 其次为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 和 $90^\circ$ . 结合围岩塑性区的分布特征可知, 围岩破坏深度与主应力差峰值的排序趋势保持一致, 表明主应力差是影响巷帮围岩破坏深度的重要控制因素. 峰前应力上升阶段, 随着夹角增大, 主应力差值上升速度越快, 浅部围岩的承载能力和抗剪性能提升越显著, 裂隙发育程度逐渐减弱. 峰值点转移阶段, 夹角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时, 主应力差的峰值点分布在 $1.5 \sim 1.75$  m范围内; 随着夹角增大, 主应力差峰值逐渐减小, 同时峰值点向更浅层的围岩转移. 表明夹角越大, 浅部围岩的承载能力和抗剪性能越弱, 破损程度更加严重. 夹角介于 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时, 主应力差的峰值点位于 $1.2$  m处, 且主应力差峰值随着夹角的增大逐渐降低, 表明围岩的承载能力和抗剪性能进一步减弱, 同时围岩的破损情况更加显著. 峰后应力稳定阶段, 主应力差曲线呈缓慢下降并趋于稳定的变化趋势, 此时岩体的整体完整性较好. 随着巷帮距离的增加, 巷帮围岩的主应力差值整体呈“峰前先上升、峰后再下降、逐渐减小并趋于稳定”的变化趋势.

## 4 结论

1) 巷道布局与地应力方向的相对关系是决定围岩应力状态和变形行为的关键因素. 当巷道轴线与地应力场中最大主应力方向平行时, 围岩应力分布相对均衡, 表现出较高的稳定性; 当巷道轴线与最大主应力方向呈垂直或斜交角度时, 围岩的应力集中现象显著增强, 导致破坏概率及风险相应提高.

2) 结合FLAC<sup>3D</sup>数值模拟结果, 当巷道轴线与最大水平主应力方向之间的夹角逐渐增大时, 两帮的最大变形量整体呈上升趋势, 且左帮的变形略大于右帮. 与此同时, 顶底板的最大变形量则表现为先减小后增大的规律, 夹角为 $45^\circ$ 时, 顶底板的最大变形量达到最小值.

3) 顶底板损伤深度的峰值随夹角度数增加呈先降后升的变化规律. 夹角调整至 $30^\circ$ 时, 顶底板的破坏层厚度达到最低值; 而夹角为 $90^\circ$ 时, 其损伤深度升至最高水平. 两帮破坏深度总体上随夹角增大而减小, 夹角超过 $60^\circ$ 时, 最大破坏深度趋于稳定. 此外, 夹角介于 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 塑性区破坏主要以纯剪切破坏为主; 而夹角介于 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时, 除两帮表面表现为张拉与剪切共同作用的破坏外, 其余区域均为纯剪切破坏.

4) 夹角为 $90^\circ$ 时, 顶板的主应力差峰值点位于 $2.75$  m处, 此时顶板的承载能力和抗剪性能最强; 而夹角为 $45^\circ$ 时, 巷帮的主应力差峰值点位于 $1.2$  m处, 其承载能力和抗剪性能表现最为优越.

## 参考文献:

[1] 康红普, 司林坡, 张晓. 浅部煤矿井下地应力分布特征研究及应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1332-1340.

KANG H P, SI L P, ZHANG X. Characteristics of underground in-situ stress distribution in shallow coal mines and its applications[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1332-1340. (in Chinese)

- [2] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等. 国内外煤巷支护技术研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2377-2403.  
SHAN R L, PENG Y H, KONG X S, et al. Research progress of coal roadway support technology at home and abroad[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2377-2403. (in Chinese)
- [3] 段昌瑞,郑群,薛俊华,等. 不同工况下深部围岩分区破坏非连续变形试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 043038.  
DUAN C R, ZHENG Q, XUE J H, et al. Experimental study on zonal failure discontinuous deformation of deep surrounding rock under different working conditions[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 043038. (in Chinese)
- [4] 黄龙现,杨天鸿,李现光,等. 地应力场方向对巷道围岩稳定性的影响[J]. 中国矿业, 2012, 21(4): 105-107+118.  
HWANG R H, YANG T H, LI X G, et al. Influence of tectonic stress direction on stability of rock body surrounding underground roadway[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(4): 105-107+118. (in Chinese)
- [5] 郑群,焦建康,段昌瑞,等. 淮南矿区地应力场分布特征及其演化过程[J]. 中国矿业, 2023, 32(3): 133-140+157.  
ZHENG Q, JIAO J K, DUAN C R, et al. Distribution characteristics and evolution process of in-situ stress field in Huainan mining area[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(3): 133-140+157. (in Chinese)
- [6] 魏超城,张明,路彦忠,等. 阿舍勒铜矿深部开采地应力测量及分布规律研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(6): 132-138.  
WEI C C, ZHANG M, LU Y Z, et al. Study on ground stress measurement and distribution law of deep mining in Ashele copper mine[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(6): 132-138. (in Chinese)
- [7] 武瑞龙,车驰远,王超群,等. 构造应力影响下软岩巷道围岩破坏机理及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(5): 971-981.  
WU R L, CHE C Y, WANG C Q, et al. Study on failure mechanism and control technology of surrounding rock in soft rock roadway under the tectonic stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(5): 971-981. (in Chinese)
- [8] 焦建康,张镇,颜立新,等. 中小型煤矿巷道围岩稳定性量化评价及分级支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 598-606.  
JIAO J K, ZHANG Z, YAN L X, et al. Stability quantitative evaluation and grading support technology of roadway surrounding rock in small and medium coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 598-606. (in Chinese)
- [9] 李延河,翟成,丁熊. 深部水平主应力方向对煤巷围岩稳定性影响规律研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 86-92.  
LI Y H, ZHAI C, DING X. Influence of deep horizontal principal stress direction on surrounding rock stability of coal roadway[J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 86-92. (in Chinese)
- [10] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.  
YUAN L. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725. (in Chinese)
- [11] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.  
HE M C. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746. (in Chinese)
- [12] YANG W, LIN B Q, ZHAI C, et al. How in situ stresses and the driving cycle footage affect the gas outburst risk of driving coal mine roadway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31: 139-148.
- [13] 李利峰. 近距离煤层开采覆岩运移规律诱发地表沉降分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(5): 110-117.  
LI L F. Analysis of overburden migration law and induced surface subsidence in close coal seam mining[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(5): 110-117. (in Chinese)
- [14] 张新辉,付平,尹健民,等. 滇中引水工程香炉山隧洞地应力特征及其活动构造响应[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 130-139.  
ZHANG X H, FU P, YIN J M, et al. In-situ stress characteristics and active tectonic response of Xianglushan tunnel of Middle Yunnan Water Diversion Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 130-139. (in Chinese)
- [15] 王康健,鲁海峰,张元. 不同地应力环境下巷道破坏变形特征数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(9): 5-10.  
WANG K J, LU H F, ZHANG Y. Numerical simulation of roadway failure and deformation characteristics under different in-situ stress environment[J]. Coal Technology, 2021, 40(9): 5-10. (in Chinese)
- [16] 康红普,伊丙鼎,高富强,等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.  
KANG H P, YI B D, GAO F Q, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33. (in Chinese)
- [17] 吕卫东,杨永杰,马金宝,等. 济北矿区地应力测量及分布特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 32-37.

- LYU W D, YANG Y J, MA J B, et al. Study on geo-stress measurement and distribution features in Jibei mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(11): 32-37. (in Chinese)
- [18] 郭延辉, 侯克鹏. 深部矿井三维地应力特征及其对巷道稳定性的影响[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(2): 28-33.  
GUO Y H, HOU K P. 3D in-situ stress distribution and its influence on stability of roadways in a deep mine[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 39(2): 28-33. (in Chinese)
- [19] 董海清, 兰天伟, 袁永年, 等. 利民煤矿井田地应力场反演及分区特征[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(S2): 105-110.  
DONG H Q, LAN T W, YUAN Y N, et al. Inversion and zoning characteristics of in-situ stress field in Limin coal mine[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(S2): 105-110. (in Chinese)
- [20] 张传庆, 黄书岭, 周辉, 等. 基于地应力水平评价的围岩潜在破坏模式研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3187-3195.  
ZHANG C Q, HUANG S L, ZHOU H, et al. Study on potential failure modes of surrounding rock mass based on evaluation of geostress level[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3187-3195. (in Chinese)
- [21] 李鑫, 魏永恒, 王文峰, 等. 库拜煤田阿艾矿区煤储层地应力特征及其对储层物性的制约[J]. *新疆大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2022, 39(6): 727-735+746.  
LI X, WEI Y H, WANG W F, et al. In-situ stress characters of CBM reservoir in the flexure basin of Kubai coalfield and its constraints on reservoir physical properties[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English)*, 2022, 39(6): 727-735+746. (in Chinese)

责任编辑: 张自强