

软弱夹层对金矿深部巷道围岩稳定性影响研究*

任家苇¹, 左宇军¹, 林健云^{1,2}, 陈庆港¹, 金开玥¹, 荣鹏¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:含软弱夹层巷道围岩稳定性是黔西南金矿深部开采过程中遇到的一大难题。为保障矿山安全高效生产,采用FLAC3D模拟软件建立不同软弱夹层产状对巷道围岩稳定性影响的分析模型,研究巷道埋深、软弱夹层倾角和位置对巷道工作面稳定性的影响。结果表明:随着埋深的增加,巷道围岩变形量和塑性区体积均逐渐增大;当软弱夹层倾角在 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内时,随着倾角的增加,巷道围岩变形量和塑性区体积均逐渐增大;当软弱夹层倾角大于 0° 时,巷道表面位移呈现不对称性:左拱肩>右拱肩,左帮>右帮,左拱脚<右拱脚,且随着角度的增大,这种不对称性更加明显;随着软弱夹层距巷道顶板距离的增加,巷道表面位移逐渐减小,巷道不对称变形的程度变小,围岩的塑性区体积逐渐变小。研究结果可为类似巷道工程支护提供一定的参考依据。

关键词:软弱夹层;深部巷道;围岩稳定性;数值模拟

中图分类号:TD322 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2023)09-0127-07

0 引言

含软弱夹层岩体是隧道、矿山、边坡等工程建设或开采过程中经常会遇到的一种特殊岩体,软弱夹层与其他岩层相比具有强度低的特点,会显著影响地下深部巷道的稳定性^[1-2]。因围岩自身稳固性差,失稳事故频发,造成大量人员伤亡和各种损失^[3-5]。因此,对含软弱夹层巷道围岩稳定性进行研究,具有重要的现实意义。

目前,对于含软弱夹层巷道围岩稳定性的分析主要有理论分析、物理试验和数值模拟3种方法。与理论分析的假设和简化相比^[6],物理试验可以直观地研究巷道周围岩体的变形破坏机理^[7-9]。物理模型试验规模越大,越接近巷道的实际条件,模型试

验的准确性也越高。然而,规模过大的物理模型试验会耗费大量的人力、物力^[10]。相比较之下,数值模拟凭借其成本低、效率高等优势被广泛使用,在选取合适参数的情况下,能很好地还原巷道的真实情况。XIAO X C等^[11]采用 UDEC 方法研究地下深部含软弱夹层煤岩体的滑移破坏,分析探讨了软弱夹层厚度、侧压系数、垂直应力对煤岩体的影响;胡晶^[12]采用 FLAC3D 研究了渗流作用下软弱夹层产状对围岩应力场、渗流场的变化规律,揭示了渗流与软弱夹层相互作用下围岩的破坏模式和破坏机理;MAN J H等^[13]利用 ABAQUS 有限元软件,研究了软弱夹层的尺寸效应对巷道工作面稳定性的影响;贾后省等^[14]通过研究发现,当软弱夹层处于塑性破坏区内时,顶板深部软弱夹层将产生压剪破坏,会出现离层的情况。尽管诸多学者针对含软弱夹层巷道围岩变形规律做了大量的研究,但研究的对象主要都是煤矿,针对不同倾角及位置的软弱夹层对金矿深部巷道围岩稳定性影响的研究较少。

1 工程背景

某金矿位于贵州省黔西南,地处喀斯特地区,地质条件复杂,是集采、选、冶于一体的大型黄金矿山。目前,该金矿开采到 00[#] 水平,平均埋深 720 m,埋深较大,具有高地应力特征。该区域矿体围岩主要由砂岩夹泥岩半坚硬—软弱岩组组成,岩体节理裂隙较发育,其中巷道顶板的泥岩软弱层岩质软、强度低,其位置、倾角、性质以及巷道埋深对围岩稳定性的影响很大。软弱夹层主要位于距巷道顶板 1.5~3.5 m 范围内,倾角范围为 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,平均厚度为 0.8

* 收稿日期:2022-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51964007);贵州省高层次创新型人才培养项目(黔科合人才[2016]4011号);贵州省矿山动力灾害预警与控制技术科技创新人才团队项目(黔科合平台人才[2019]5619);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]一般516,黔科合支撑[2022]一般247)。

作者简介:任家苇(1997—),男,贵州都匀人,硕士,主要从事矿山安全方面的研究,E-mail:renjiawei2016@126.com。

通信作者:左宇军(1965—),男,湖南湘乡人,博士,教授,主要从事岩石力学及采矿工程方面的研究,E-mail:zuo_yujun@163.com。

m。软弱夹层的存在严重制约了矿山的安全高效开采,施工过程中,巷道变形破坏严重,如图 1 所示。因此,研究巷道埋深、软弱夹层倾角和位置对巷道围岩稳定性的影响是必不可少的。



图 1 现场巷道围岩变形破坏情况

2 数值计算模型及方案

2.1 确定参数

在研究区巷道工作面附近进行取样,采集到泥质砂岩、泥岩、细砂岩 3 种性质的试样,分别制成 50 mm×100 mm 的标准岩石试样,并对试样进行室内试验,分析其力学性质。每种岩性测试 3 个,取平均值作为试验结果,之后将试验结果进行修正^[15],得到数值模拟中各岩层参数,见表 1。

表 1 岩石物理力学参数

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa
泥质砂岩	2510	0.862	31.2	0.886	1.305	0.731
软弱泥岩	2250	0.294	28.3	0.298	0.386	0.203
细砂岩	2510	1.503	30.5	1.271	2.227	1.028

2.2 建立模型

为了研究不同软弱夹层产状对巷道围岩变形破坏规律的影响,结合巷道现场情况,采用 MIDAS/GTS NX 有限元软件建立模型,再将模型导入 FLAC3D 软件中进行计算。分别模拟不同埋深、软弱夹层倾角、软弱夹层位置对巷道围岩变形破坏的影响。数值模型尺寸为长×宽×高=60 m×60 m×60 m,巷道尺寸为宽×高=5 m×5.5 m,划分为 316 080 个网格和 269 564 个网格节点。模型自上而下由泥质砂岩、软弱泥岩、细砂岩组成,采用 Mohr-Coulomb 本构模型,计算模型如图 2 所示。软弱夹层与其他岩层之间软弱结构面采用能体现出软弱夹层与围岩的滑动效果 interface 单元模拟^[16-17]。模

型下边界固定,前后左右边界水平位移受到约束。监测点布置在巷道顶底板中心、两帮、拱顶及拱脚,用于记录巷道围岩位移的变化。

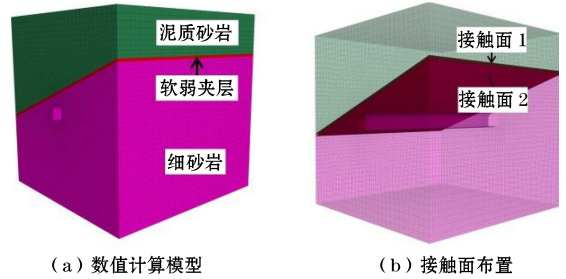


图 2 数值计算模型及接触面布置

2.3 模拟方案

为研究不同软弱夹层产状(倾角、位置)和埋深对巷道围岩稳定性的影响,本文共设立 13 种工况,分别从巷道埋深、软弱夹层倾角、软弱夹层位置 3 个方面展开研究。

(1) 巷道埋深。为研究埋深对含软弱夹层巷道围岩变形破坏的影响,建立 5 个埋深分别为 600 m、660 m、720 m、780 m 和 840 m 的模拟工程。软弱夹层厚度设置为 0.8 m,软弱夹层倾角设置为 20° ,距巷道顶板 2.4 m。

(2) 软弱夹层倾角。为研究软弱夹层倾角对含软弱夹层巷道围岩变形破坏的影响,建立 5 个软弱夹层倾角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 和 40° 的模拟工程。巷道埋深设置为 720 m,软弱夹层厚度设置为 0.8 m,距巷道顶板 2.4 m。

(3) 软弱夹层位置。为研究软弱夹层位置对含软弱夹层巷道围岩变形破坏的影响,建立 5 个软弱夹层距离巷道顶板分别为 1.6 m、2 m、2.4 m、2.8 m 和 3.2 m 的模拟工程。埋深设置为 720 m,软弱夹层厚度设置为 0.8 m,软弱夹层倾角设置为 20° 。

3 数值模拟结果分析

3.1 巷道埋深对含软弱夹层巷道围岩稳定性的影响

3.1.1 不同埋深条件下巷道围岩位移场演化特征

不同埋深条件下含软弱夹层巷道表面位移量如图 3 所示。由图 3 可知,随着埋深的增加,巷道表面位移量均增加,顶底板位移量始终大于两帮位移量。巷道测点的 8 个部位中,顶板位移量最大,左拱肩位移量次之。通过计算可知,当埋深从 600 m 增加到

660 m 时,巷道最大顶板下沉量相对增加 15.3%,最大左帮位移量相对增长 24.3%,最大底板位移量相对增长 13.2%,最大右拱脚位移量相对增加 18.5%。当埋深从 780 m 增加到 840 m 时,最大巷道顶板下沉量相对增加 17.0%,最大左帮位移量相对增长 24.8%,最大底板位移量相对增长 14.7%,最大左拱脚位移量相对增加 20.6%。这表明,巷道围岩位移

增长率随着埋深的增加而增加。位移变化率从大到小依次为:帮部、顶板和拱肩部、拱脚部、底板,随着埋深的增加,帮部与底板之间的位移量越来越接近,与拱脚之间的位移量则越来越远。

3.1.2 不同埋深条件下巷道围岩塑性区分析

图 4 为不同埋深条件下含软弱夹层巷道围岩的塑性破坏区分布情况。

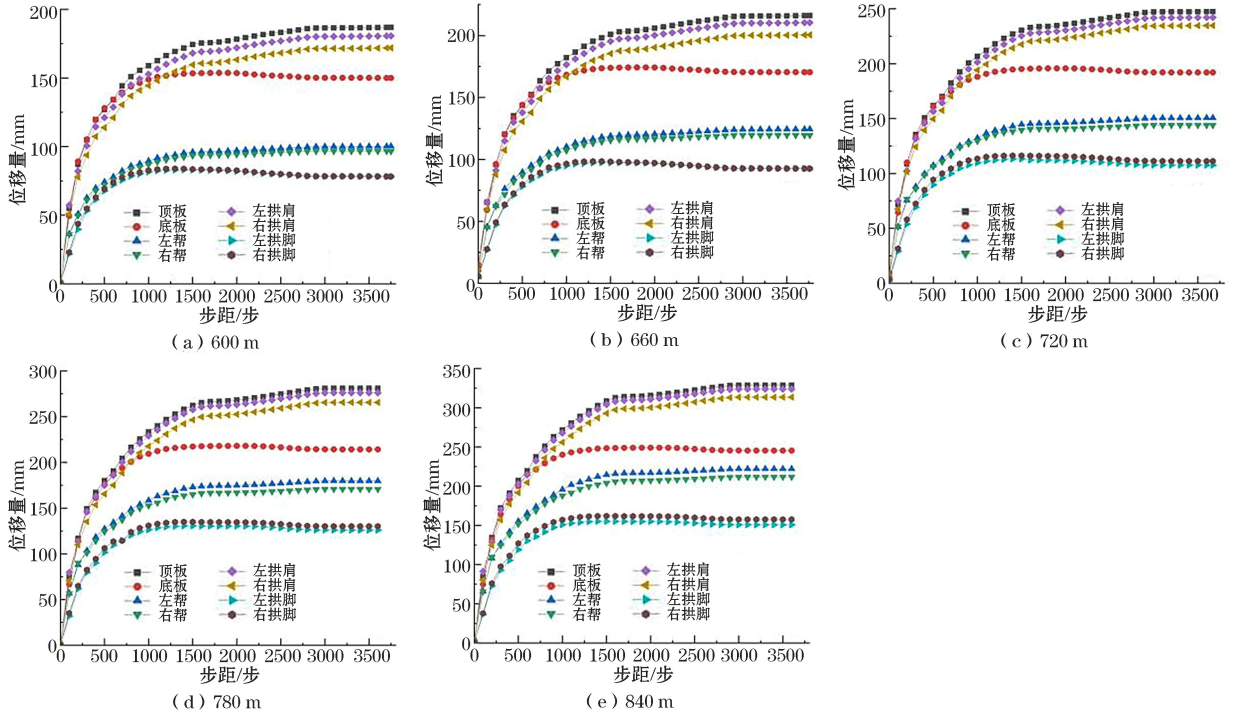


图 3 不同埋深条件下含软弱夹层巷道表面位移量

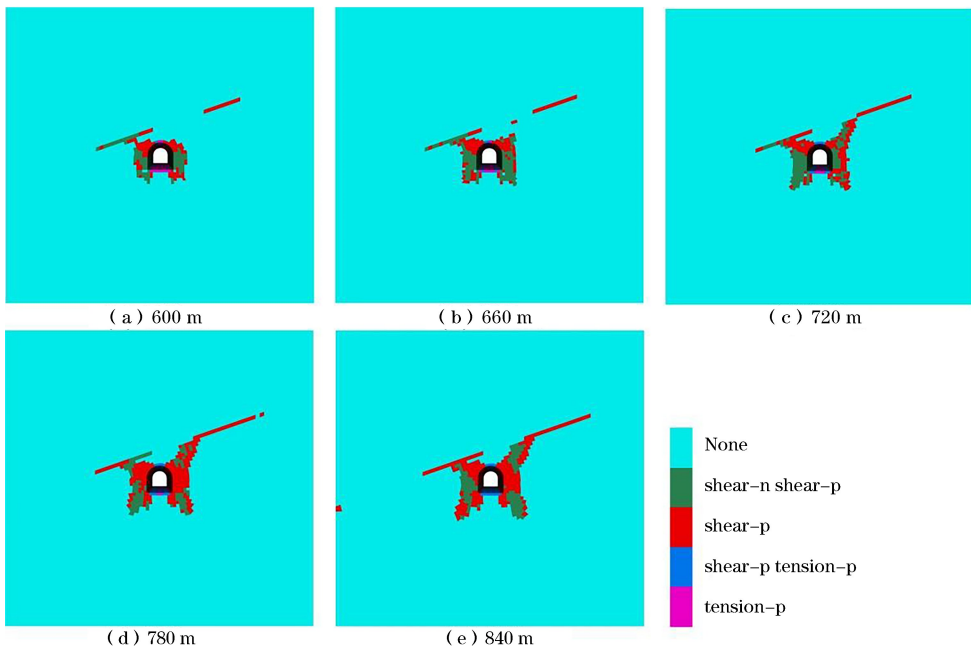


图 4 不同埋深条件下含软弱夹层巷道围岩的塑性破坏区分布

由图 4 可知,巷道的顶底板主要为拉伸破坏,巷道两帮主要为剪切破坏,软弱夹层全为剪切破坏,巷道周围塑性区大体上呈现蝶形破坏,且随着埋深的增加,蝶形愈发明显;塑性区会沿着软弱夹层发展,但一般不会跨过软弱夹层往围岩深处继续发展,主要是软弱夹层受力性能差,很难向岩层深处传递应力。利用 FISH 语言可计算得到巷道围岩的塑性区体积。埋深为 600 m 时,左拱肩小部分区域的塑性区延伸至软弱夹层处,巷道围岩塑性破坏区体积约为 7344 m³。埋深为 660 m 时,塑性区体积约为 9449 m³,较巷道埋深为 600 m 时增加 28.7%。随着埋深的增加,塑性区总体积持续增加。埋深为 720 m 时,塑性区体积约为 11 855 m³,左、右拱肩处的塑性区均已经延伸至软弱夹层处。埋深为 780 m 时,塑性区体积约为 14 428 m³。埋深为 840 m 时,塑性区体积进一步增大,约为 17 760 m³,较巷道埋

深 600 m 时增加 141.8%。可见,含软弱夹层巷道围岩开挖后的塑性破坏区随着埋深的增加越来越大。

3.2 软弱夹层倾角对巷道围岩稳定性的影响

3.2.1 不同夹层倾角下巷道围岩位移场演化特征

不同软弱夹层倾角巷道表面位移量如图 5 所示,由图 5 可知,顶底板的位移量大于两帮位移量,当软弱夹层倾角为 0°时,巷道表面的位移量水平对称,巷道各部位位移量从大到小依次为:拱顶、左拱肩和右拱肩、底板、左帮和右帮、左拱脚和右拱脚;当软弱夹层倾角大于 0°时,巷道表面位移呈现不对称性:左拱肩 > 右拱肩,左帮 > 右帮,左拱脚 < 右拱脚,且随着角度的增大,这种不对称性更加明显。当软弱夹层倾角从 0°增加到 40°时,最大顶底板位移量(顶板位移+底板位移)相对增加 15.1%,最大两帮位移量(左帮位移+右帮位移)相对增加 11.3%。

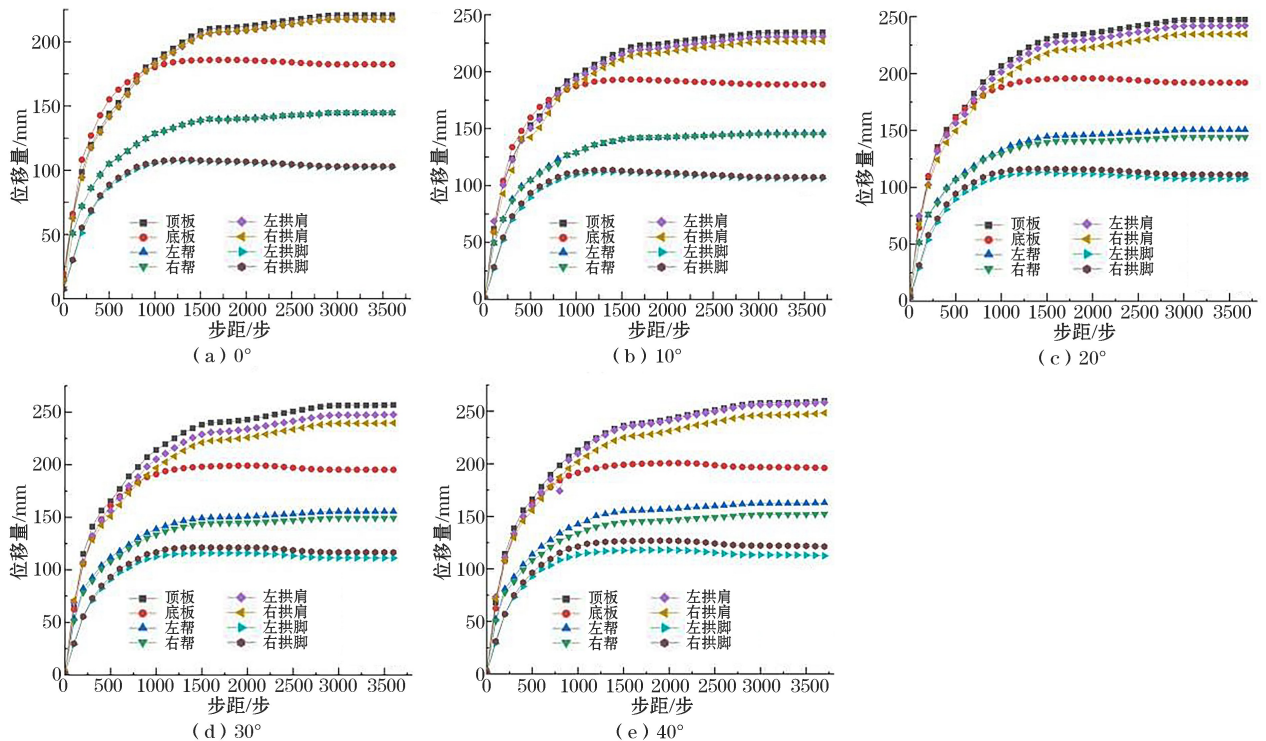


图 5 不同软弱夹层倾角下巷道表面位移量

3.2.2 不同夹层倾角下巷道围岩塑性区分析

图 6 为不同倾角含软弱夹层巷道围岩的塑性破坏区分布情况。倾角为 0°时,巷道塑性区大体上呈现水平对称分布,拱肩处的塑性区未延伸到软弱夹层,巷道围岩塑性破坏区体积约为 9461 m³。倾角为 10°时,左拱肩处的塑性区延伸到软弱夹层处,塑

性区体积约为 10 534 m³,较倾角为 0°时增大 11.3%。倾角为 20°时,左右拱肩处的塑性区均延伸到软弱夹层处,塑性区体积约为 11 855 m³。倾角为 30°时,巷道周围及软弱泥岩层塑性破坏持续增大,塑性区体积约为 13 461 m³。当倾角为 40°时,模型塑性区进一步增大,塑性区体积约为 15 422 m³,较

倾角为 0° 时增大 63%。

3.3 软弱夹层位置对巷道围岩稳定性的影响

3.3.1 不同夹层位置下巷道围岩位移场演化特征

软弱夹层位于顶板不同位置时巷道表面位移量如图 7 所示,由图 7 可知,随着软弱夹层距离巷道距

离的增大,巷道表面位移逐渐减小。巷道表面变形始终较大,但对软弱夹层位置变化的敏感性较低。且随着软弱夹层距离巷道距离的增大,巷道不对称变形的程度变小,以顶板位移为例,1.6~2.0 m 范围内顶板位移量相对减少 2.1%。

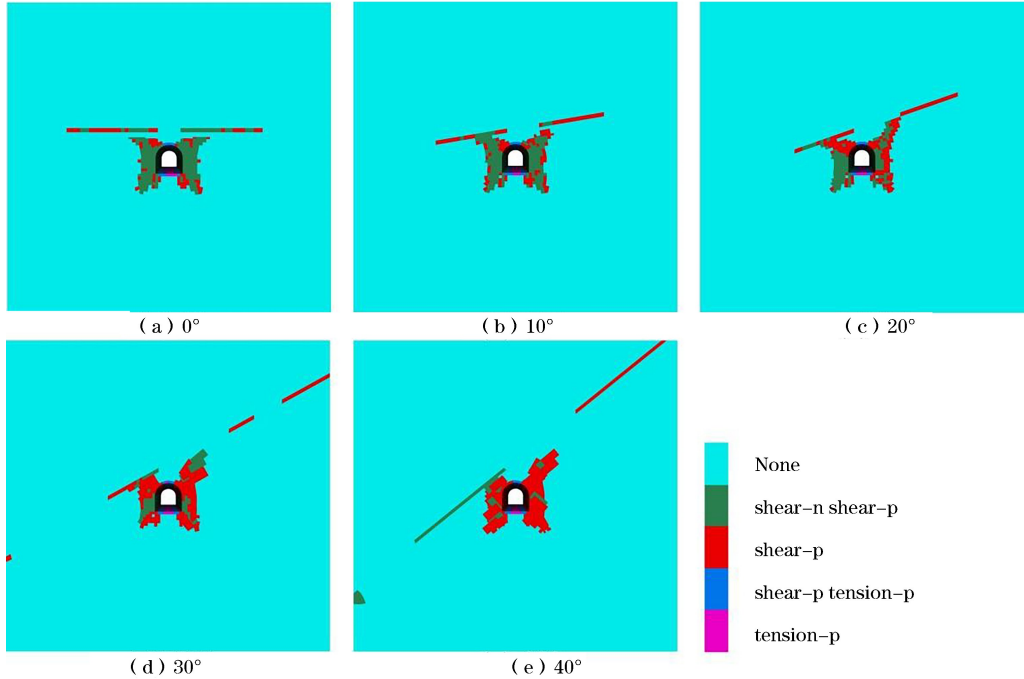


图 6 不同倾角下含软弱夹层巷道围岩的塑性破坏区分布

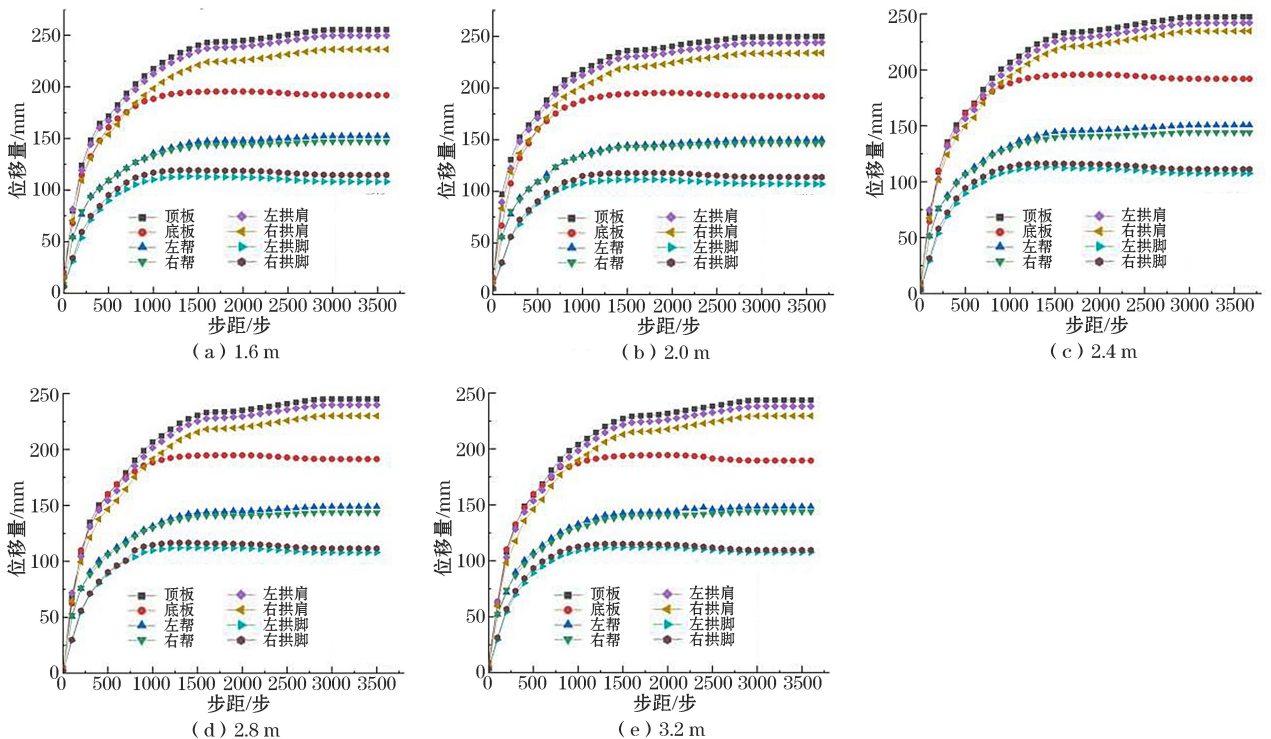


图 7 软弱夹层位于顶板不同位置下巷道表面位移量

3.3.2 不同夹层位置下巷道围岩塑性区分析

图8为软弱夹层位于顶板不同位置时巷道围岩的塑性破坏区分布情况。由图8可知,软弱夹层距离巷道1.6 m时,巷道围岩塑性破坏区体积约为14 142 m³,左、右拱肩处的塑性区均延伸至软弱夹层。软弱夹层距离巷道2.0 m时,塑性区总体积减小,约为12 881 m³,左拱肩处的塑性区不再全部延伸至软弱

夹层处,拱脚处塑性区明显减小。软弱夹层距离巷道2.4 m时,塑性区总体积进一步减小,约为11 855 m³。随着软弱夹层距离巷道越来越远,塑性区的总体积持续减小,右拱肩处的塑性区均不再延伸至软弱夹层。软弱夹层距离巷道2.8 m时,塑性区体积约为10 464 m³;软弱夹层距离巷道3.2 m时,塑性区体积约为10 012 m³,较软弱夹层距离巷道1.6 m时减小29.2%。

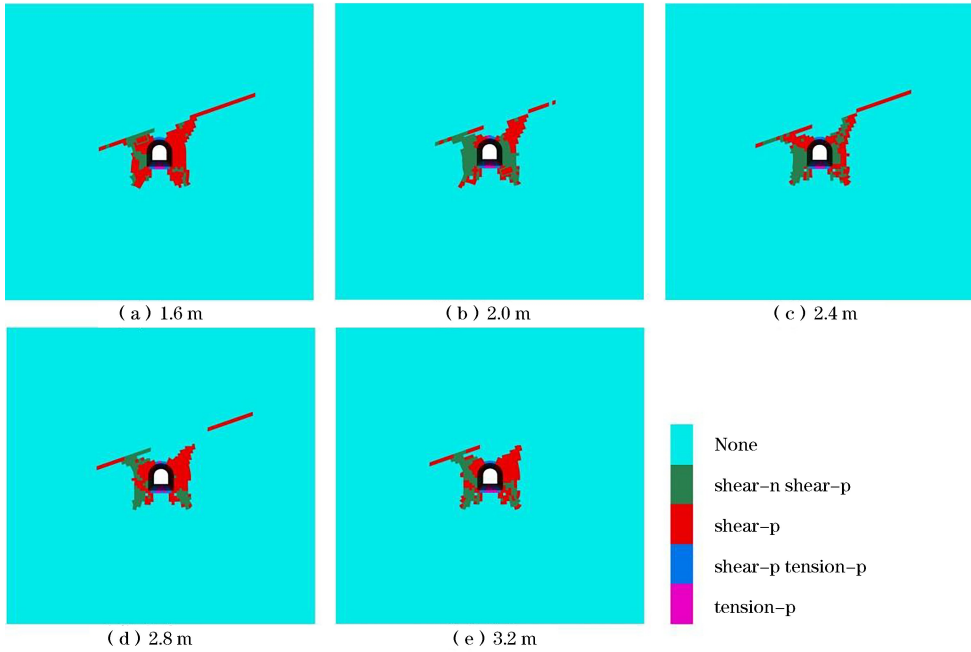


图8 软弱夹层位于顶板不同位置下巷道围岩的塑性破坏区分布

4 结论

(1) 随着巷道埋深的增大,巷道围岩变形破坏情况加重,围岩的变形增长率也不断增大,位移变化率从大到小依次为:帮部、顶板和拱肩部、拱脚部、底板;不同埋深巷道塑性区大体上呈现蝶形破坏,破坏模式以剪切破坏为主,且随着埋深的增加,蝶形愈发明显,塑性区体积越来越大。

(2) 随着软弱夹层倾角的增加,巷道围岩变形量和塑性区体积均不断增加。位移方面,当软弱夹层倾角为0°时,巷道表面的位移量水平对称,巷道各部位位移量从大到小依次为:拱顶、左拱肩和右拱肩、底板、左帮和右帮、左拱脚和右拱脚;当软弱夹层倾角大于0°时,巷道表面位移呈现不对称性:左拱肩>右拱肩,左帮>右帮,左拱脚<右拱脚,且随着角度的增大,这种不对称性更加明显。

(3) 随着软弱夹层与顶板距离越来越远,巷道表面位移逐渐减小,巷道不对称变形的程度变小,围

岩的塑性区体积逐渐变小。

参考文献(References):

- [1] 李新旺,孙利辉,杨本生,等.巷道底板软弱夹层厚度对底鼓影响的模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):504-510.
- [2] 李迁.富水软弱夹层隧道涌水塌方风险识别及预防治理研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [3] LUO Yi, XU Kun, HUANG Junhong, et al. Impact analysis of pressure-relief blasting on roadway stability in a deep mining area under high stress[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,110:103781.
- [4] ZHANG Chunyang, PU Chengzhi, CAO Rihong, et al. The stability and roof-support optimization of roadways passing through unfavorable geological bodies using advanced detection and monitoring methods, among others, in the Sanmenxia Bauxite Mine in China's Henan Province[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7):5087-5099.
- [5] 黄楠,郑禄林,左宇军,等.基于PCA-Fuzzy-PSO-SVM的巷道围岩稳定性评价[J].矿业研究与开发,2020,40(12):75-80.

- [6] 张涇.含软弱夹层隧道围岩稳定性研究及支护效应分析[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [7] DUAN Shuqian, JIANG Quan, LIU Guofeng, et al. An Insight into the Excavation-Induced Stress Paths on Mechanical Response of Weak Interlayer Zone in Underground Cavern Under High Geostress [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(3):1331-1354.
- [8] 赵宏刚,张东明,蒋长宝,等.考虑软弱夹层厚度的岩体力学响应及破坏特征研究[J].*岩土力学*, 2022, 43(4):969-980+1030.
- [9] LIU Xuesheng, SONG Shilin, TAN Yunliang, et al. Similar simulation study on the deformation and failure of surrounding rock of a large section chamber group under dynamic loading[J].*International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(3):495-505.
- [10] HUANG Feng, WANG Yi, WEN Yunbo, et al. The Deformation and Failure Analysis of Rock Mass Around Tunnel by Coupling Finite Difference Method and Discrete Element Method[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2019, 49(4):421-436.
- [11] XIAO Xiaochun, ZHU Heng, LIU Haiyan, et al. Distinct element modeling of deep underground slip failure of coal rock mass with weak interlayers [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(22):1-14.
- [12] 胡晶.含软弱夹层隧道围岩渗流破坏机理及围岩压力计算方法研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [13] MAN Jianhong, HUANG Hongwei, AI Zhiyong, et al. Analytical model for tunnel face stability in longitudinally inclined layered rock masses with weak interlayer [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 143:104608.
- [14] 贾后省,潘坤,刘少伟,等.采动巷道复合顶板离层破坏机理与预测方法[J].*采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3):518-527.
- [15] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.*岩石力学与工程*[M].北京:科学出版社,2013.
- [16] CHEN Qinggang, ZUO Yujun, LIN Jianyun, et al. Numerical research on response characteristics of surrounding rock for deep layered elastic rock roadway under static and dynamic loading conditions[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(3):1-21.
- [17] 闫熠.深埋软弱夹层岩体隧道围岩变形与结构受力特性研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.

Study on the Influence of Weak Interlayer on the Stability of Surrounding Rock in Deep Roadway of Gold Mine

REN Jiarwei¹, ZUO Yujun¹, LIN Jianyun^{1,2}, CHEN Qinggang¹, JIN Kaiyue¹, RONG Peng¹

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The stability of roadway surrounding rock with weak interlayer is a major problem encountered in the deep mining process of Qianxinan Gold Mine. In order to ensure the safe and efficient production of the mine, the FLAC3D simulation software was used to establish an analysis model of the influence of different weak interlayer occurrences on the stability of roadway surrounding rock. The influences of buried depth of roadway and dip angle, as well as position of weak interlayer on the stability of roadway working face were studied. The results show that with the increase of buried depth, the deformation of surrounding rock and the volume of plastic zone increase gradually. When the dip angle of the interlayer is within the range of 0°-40°, as the dip angle increases, the deformation of the surrounding rock and the volume of the plastic zone in the roadway gradually increase. When the dip angle of the weak interlayer is greater than 0°, the surface displacement of the roadway exhibits asymmetry: left arch shoulder > right arch shoulder, left slope > right slope, left arch foot < right arch foot, and this asymmetry becomes more obviously with the increase of angle. As the distance between the weak interlayer and the roof of the roadway increases, the surface displacement of the roadway gradually decreases, the degree of asymmetric deformation of the roadway decreases, and the volume of the plastic zone of the surrounding rock gradually decreases. The research results can provide a certain reference for similar roadway engineering support.

Key words: Weak interlayer, Deep roadway, Stability of surrounding rock, Numerical simulation