

基于构造应力的弱面斜穿巷道围岩变形特征

谷翱翔¹, 余伟健^{1,2,3*}, 潘豹¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 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:为研究弱面与构造应力组合作用对巷道围岩稳定性的影响,基于贵州木孔煤矿工程地质条件,采用3DEC软件,对全断面开挖下的围岩稳定性进行数值模拟,重点分析弱面倾角与构造应力对围岩变形及位移的影响,同时对围岩变形机理进行讨论.研究表明:巷道开挖后,水平方向的位移均表现为向巷道中心收敛;巷道竖向位移受弱面倾角影响较大,随着弱面倾角的增大,最大位移从拱顶逐渐转移到巷道左帮;巷道两帮的变形量随着弱面倾角的变化呈现明显的不均匀变形特征,所设置的监测点显示巷道两帮的位移在特定的弱面倾角范围内表现出相反的变化趋势.该研究结果可为巷道支护设计及工程应用提供技术支撑.

关键词:结构面;不均匀变形;巷道围岩变形;构造应力

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)03-0031-07

Deformation Characteristics of Surrounding Rock in Oblique Roadway with Weak Structural Plane Based on Tectonic Stress

GU Aoxiang¹, YU Weijian^{1,2,3}, PAN Bao¹

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

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environment Protection,

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: To study the influence of the combination of weak plane and tectonic stress on the stability of surrounding rock in tunnels, based on the engineering geological conditions of Mukong Coal Mine in Guizhou, 3DEC software is used to numerically simulate the stability of surrounding rock under full section excavation. The focus is on analyzing the influence of weak plane inclination angle and tectonic stress on the deformation and displacement of surrounding rock, and the deformation mechanism of surrounding rock is discussed. The research results indicate that after excavation of the tunnel, the horizontal displacement converges towards the center of the tunnel. The vertical displacement of the tunnel is greatly affected by the inclination angle of the weak plane. As the inclination angle of the weak plane increases, the maximum displacement gradually shifts from the arch to the left side of the tunnel. The deformation of the two sides of the tunnel exhibits obvious non-uniform deformation characteristics with the change of weak plane inclination angle. The displacement changes of the monitoring points set up on both sides of the tunnel exhibit opposite trends within a specific range of weak plane dip angles. Based on the research on the deformation characteristics of the surrounding rock of the tunnel, technical support is provided for the design and engineering application of tunnel support.

Keywords: structural plane; uneven deformation; deformation of surrounding rock of roadway; tectonic stress

收稿日期:2022-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974117;52174076);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30261)

* 通信作者, E-mail: ywjlah@163.com

随着矿区开采深度的增加,巷道所处的工程地质条件越发复杂,在“三高一扰动”作用下,巷道掘出后围岩碎胀、扩容等大变形现象严重。巷道多布置于强度较低的沉积地层中,受沉积岩成层特征、层间岩性及赋存结构差异的影响,掘进中揭露的围岩类型多、岩性各异。层状岩体中常分布一种强度低、厚度小、胶结性差的特殊成层结构,如软弱结构面、裂隙破碎带、软弱夹层、破碎夹层和泥化夹层等,简称巷道弱面。弱面在应力作用下极易产生损伤破坏,加剧邻近岩层松动破裂区的扩展,威胁巷道整体稳定^[1-3]。因此,研究弱面与构造应力组合作用对巷道围岩稳定性的影响,对类似巷道确定支护技术与参数具有一定的工程实际意义。

关于弱面对巷道变形的影响,国内外诸多学者做了大量的研究。赵同彬等^[4]通过岩石力学试验,分析了加锚前后节理岩石破坏形态、强度特征以及加载过程中变形场演化规律和锚固控制机制;许鹏等^[5]采用霍普金森杆作为冲击加载装置,记录倾斜弱面介质中运动裂纹的扩展过程,对裂纹周围应变场的演化过程、裂纹尖端的开裂应变以及裂纹的扩展速度进行了分析;于永江等^[6]通过对含结构面岩石进行扰动力学试验,发现在循环动力扰动下,岩石塑性变形积累值与扰动循环加载次数存在函数关系;余伟健等^[7-8]通过 FLAC^{3D} 软件对矿山现场调查的裂隙进行重构,分析了我国南方地区部分矿区常规支护方式下典型裂隙巷道围岩变形破裂特征,结合巷道围岩变形特点提出综合控制原则及关键技术;丁乙等^[9]在摩尔-库伦准则的基础上,建立多弱面条件下的强度破坏准则,建立页岩地层坍塌压力预测模型;经来旺等^[10]以甘肃平凉某矿为背景,利用 3DEC 软件构建数值模型,分析中间岩层厚度和节理弱面厚度对上行开采的影响;姚锡伟等^[11]运用 FLAC^{3D} 软件,研究了隧道围岩在双弱面不同空间位置组合下的破坏模式;王亚琼等^[12]以云南昭乐某隧道为工程背景,研究高地应力环境下水平层状隧道围岩的变形破坏特征,构建水平层状围岩力学模型,探讨了隧道围岩变形破坏机理;刘邦等^[13]将贯穿隧道的节理及断层近似为穿越隧道的裂纹,通过室内试验和数值模拟相结合的方法研究双轴作用下模型的损伤破坏规律;郭富利等^[14]以堡镇隧道为研究背景,建立含软弱夹层围岩的力学模型,并分析了含软弱夹层围岩变形破坏的演化过程。

以上成果对复杂地质条件下含弱面围岩的变形破坏特征研究均有积极的作用,但对于构造应力影响下倾斜弱面斜穿巷道围岩变形的研究却较少涉及。为了揭示弱面斜穿巷道围岩的力学特性与变形特性,本文以木孔煤矿为工程背景,取+600 m 处巷道为研究对象,采用 3DEC (3 Dimension Distinct Element Code) 数值模拟软件,模拟分析不同侧压系数条件下受弱面影响的巷道围岩的变化特征。

1 工程地质概况

木孔煤矿矿区主要为碳酸盐岩岩溶地貌,次为碎屑岩侵蚀地貌。+600 m 处运输大巷处于该矿井的 3[#]和 5[#]煤层之间,埋深为 300 m 左右。该巷道围岩的主要矿物成分为硅质灰岩、粉砂岩和粉砂质泥岩,均为弱隔水层。区域内主要水源为裂隙水,预计最大流量为 5~10 m³/h,对生产无太大影响。具体综合岩性如图 1 所示。

厚度(m)	柱状图	岩石名称	岩性描述
4.90~16.20		2 [#] 煤层	金属光泽,参差状断口,结构疏松,层状构造,含少量透视镜状夹矸,偶见星点状黄铁矿
0.00~2.37		细砂岩、黏土岩	灰色,粉砂质黏土岩、中上部含煤1~2层,煤层厚0.05~0.69 m
3.20~16.00		3 [#] 煤层	黑色,金属光泽,贝壳状断口,结构致密,层状构造,含少量透视镜状夹矸
0.27~2.16		细砂岩	灰、深灰色,包含黏土岩夹少量粉砂质黏土岩
3.00~12.80		4 [#] 煤层	金属光泽,贝壳状断口,结构致密,层状构造,局部含少量透视镜状夹矸,偶见星点状黄铁矿
0.80~2.49		细砂岩	灰色,局部相变为黏土岩、粉砂质黏土岩
0.65~14.70		JB煤层	参差状断口,结构致密,层状构造,区内展布稳定,不可采,为4 [#] 煤层的间接对比标志层
0.16~0.67		细砂岩、黏土岩	浅灰、灰色薄至中厚层状、含有粉砂质黏土岩,局部含煤1层,煤层0.10~0.62 m,均不可采
1.80~13.40		硅质灰岩	坚硬、致密,含腕足类化石及碎片
1.40~12.00		细砂岩	灰、深灰色薄至中厚层状细砂岩、黏土岩夹少量粉砂质黏土岩、硅质灰岩
5.80~20.60		5 [#] 煤层	金属光泽,贝壳状及参差状断口,结构较复杂,含1~2层夹矸,见星点状、细脉状黄铁矿
0.09~1.46		细砂岩、黏土岩	浅灰、灰色薄至中厚层状细砂岩、黏土岩、粉砂质黏土岩,中部含煤1~2层,煤层0.13~0.56 m
8.30~18.70			
0.00~1.70		B4生物灰岩	灰、深灰色中厚层状,沉积较稳定,风化后疏松

图1 木孔煤矿综合柱状图^[15]

2 数值模拟

2.1 岩体力学参数

+600 m 运输大巷顶板布置在硅质灰岩层,底板为粉砂岩,在掘进过程中,局部出现小型地质构造.通过岩石力学试验获得基础岩石力学参数,具体数值见表 1.

表 1 岩石物理力学参数

围岩	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
硅质灰岩	2.32	4.38	0.32	30	3.32	4.06	1.66
粉砂岩	2.65	11.65	0.21	31	4.25	6.70	10.04

2.2 数值计算

根据工程地质资料,建立相应的数值分析模型.模型长 \times 宽 \times 高($X \times Y \times Z$)= 50 m \times 20 m \times 50 m,巷道净断面为 4.60 m \times 4.15 m,巷道断面为半圆拱形,埋深 300 m,弱面倾角分别为 $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}$.巷道围岩的本构模型选择摩尔库伦模型,弱面由犀牛软件建模生成,并弱化其黏结参数,刚度为周边单元体等效刚度的 10 倍,根据表 1 中的数据对岩层赋值.计算模型的前后左右和底部取位移边界,上部取应力边界,模型上部应力为上覆岩层的自重应力,大小为 5.8 MPa.数值模型如图 2 所示(图 2 为弱面倾角为 30° 时的数值模型).

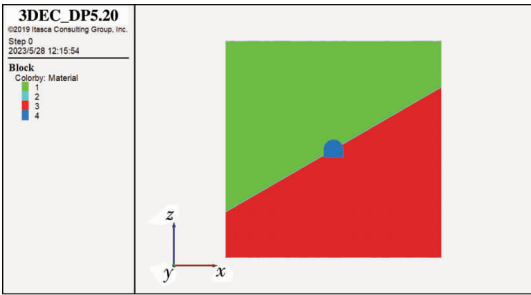


图 2 弱面倾角 $\alpha=30^{\circ}$ 时的计算模型

在模拟过程中对巷道变形进行监测,在巷道顶、底板以及两帮对称布置监测点,监测点位置见图 3.

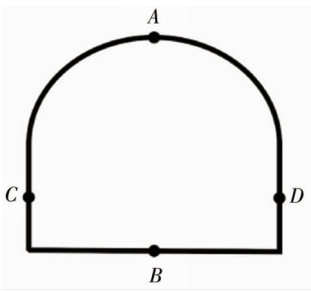


图 3 监测点位置

3 模拟结果分析

3.1 不同侧压系数下弱面倾角对巷道围岩变形的影响

当侧压系数 $k=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 时,研究不同弱面倾角 ($0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}$) 对巷道围岩的变形情况.限于篇幅,选取弱面倾角 $\alpha=15^{\circ}, 30^{\circ}$ 和 45° 时的位移云图,如图 4 所示.根据监测数据及位移云图可知:巷道开挖后,在水平方向的位移均表现为向巷道中心收敛;竖向位移受弱面倾角影响较大,主要发生在底板与巷道左帮.

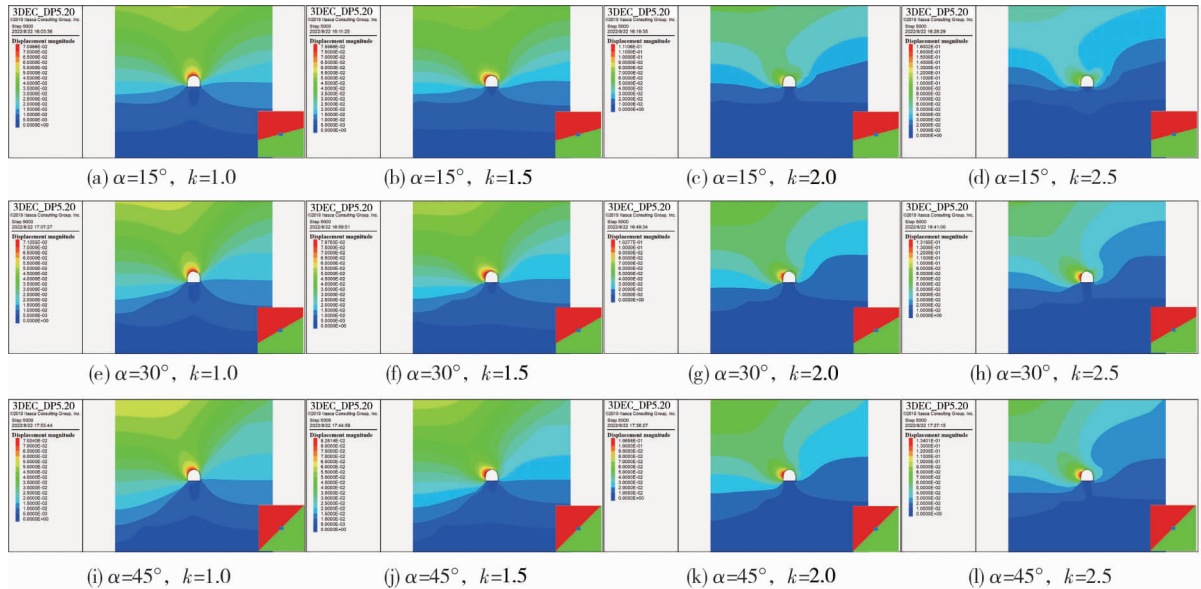


图4 不同侧压系数与弱面倾角组合下巷道围岩位移云图

3.1.1 巷道拱顶与底板变形特征分析

不同侧压系数条件下拱顶及底板的竖向位移与弱面倾角的变化关系如图5所示(图中位移量均取其绝对值).由图5a可知,巷道拱顶的竖向位移量随弱面倾角的增大整体呈现减小的变化趋势.当侧压系数为1.0~1.5时,巷道拱顶围岩竖向变形在弱面倾角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时呈现非线性变化,但位移量变化相对平稳;而在弱面倾角为 $30^\circ \sim 75^\circ$ 时,拱顶的竖向位移量随弱面倾角增大呈现减小的线性变化趋势.在侧压系数为2.5时,拱顶位移量随弱面倾角增大呈现先减小后增大再减小的变化特点.

分析图5b发现,巷道底板的竖向位移量随着弱面倾角的增大呈现非线性的变化.当侧压系数为1.0~1.5时,底板随弱面倾角增大呈现非线性变化,但位移量变化不大;当侧压系数为2.5,弱面倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,巷道底板围岩发生大变形.

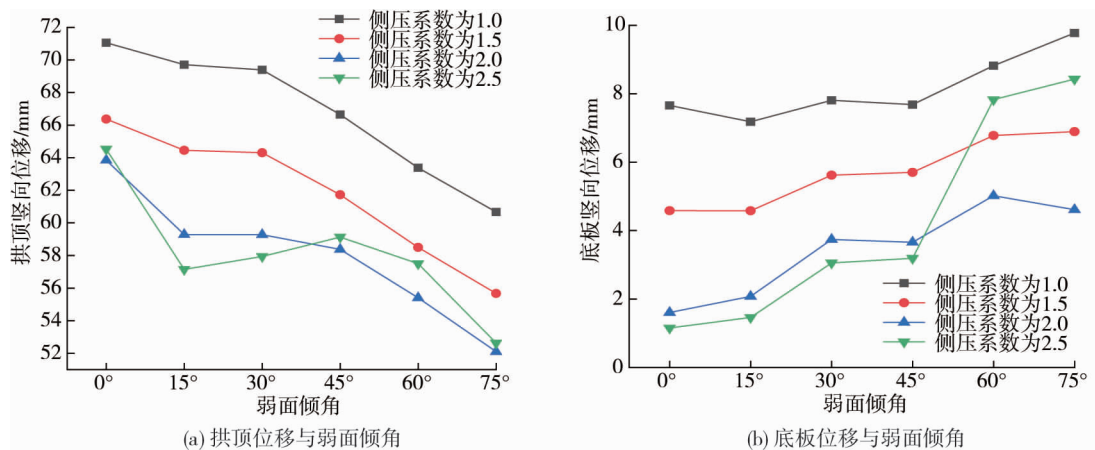


图5 不同侧压系数下巷道顶、底板竖向位移与弱面倾角的变化关系

3.1.2 巷道两帮变形特征分析

不同侧压系数条件下巷道两帮位移与弱面倾角的变化关系如图6所示.由图6a可知,随着弱面倾角的增大,巷道左帮围岩的水平位移量总体呈现先增大后减小的变化特点,同时巷道大变形出现在弱面倾角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 内.而巷道右帮围岩的水平位移量随弱面倾角的增大均呈减小的变化趋势(见图6b).巷道两帮监测点处的横向位移量最大数值发生在 $\alpha=15^\circ$ 时,最小数值发生在 $\alpha=0^\circ$ 时.

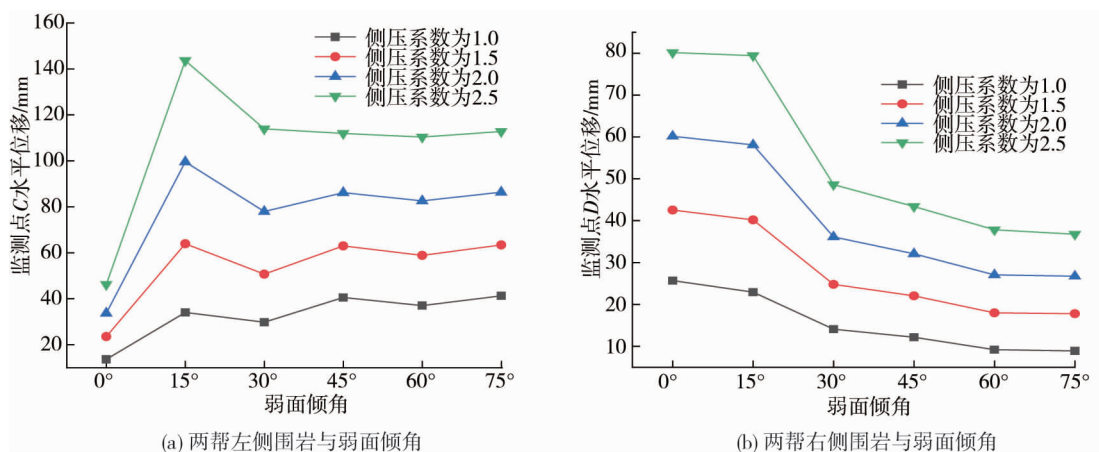


图6 巷道两帮与弱面倾角水平位移变化关系

3.2 不同弱面倾角下侧压系数对巷道围岩位移的影响

侧压系数对巷道围岩变形的影响各不相同,并没有产生同质化的影响规律.图7为不同弱面条件下巷道围岩位移与侧压系数的变化关系曲线.观察图7a可知:在弱面倾角为 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时,巷道拱顶的竖向位移量随侧压系数的增大而减小;在弱面倾角为 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时,随着侧压系数增大,拱顶的竖向位移呈现先减小后增大的变化特点.由图7b可知,在弱面倾角为 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时,巷道拱顶的竖向位移量随侧压系数的增大而减小;在弱面倾角为 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时,随着侧压系数增大,底板竖向位移呈现先减小后增大的变化特点.由图7c和图7d可以得出,巷道两帮的水平位移量均随侧压系数的增大而增大.

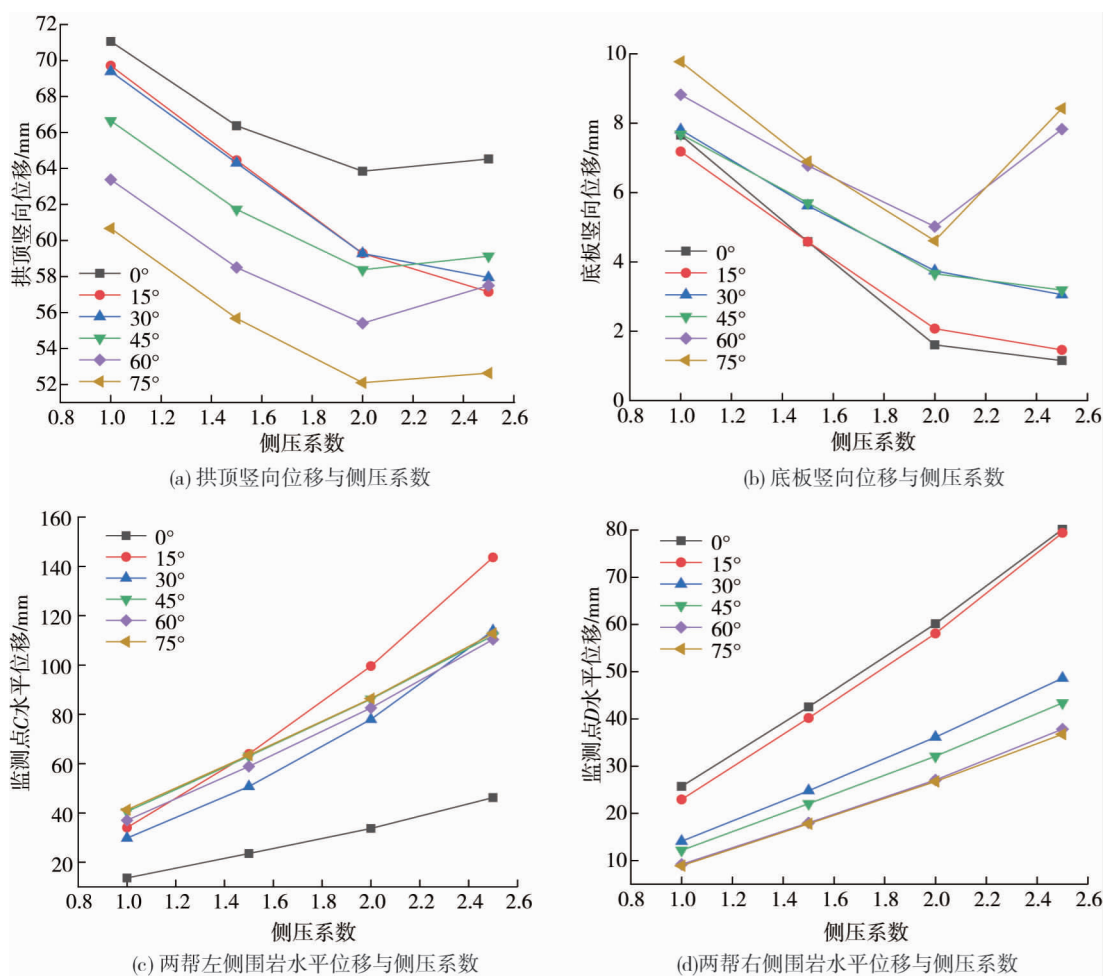


图7 不同弱面倾角下巷道围岩位移与侧压系数的变化关系

4 弱面斜穿巷道围岩变形破坏机理探讨

4.1 不均匀变形特征分析

根据现场调查与分析发现,+600 m 运输大巷的变形与破坏主要表现为:

- 1) 岩体破碎变形状况严重,在巷道拱顶及两帮出现围岩松散状况.
- 2) 水平侧压力大,两帮内挤严重,侧墙张裂.两帮出现大变形,支护的钢筋网发生扭曲变形,喷锚挂网扭曲甚至直接被拉断,如图 8a 所示.
- 3) 巷道顶部变形破坏.在高应力作用下,巷道顶部受上覆岩层所产生的巨大压力而发生较大下沉,锚杆、混凝土喷层、混凝土衬砌等完全破坏失效;在水平挤压力的作用下,拱顶向上产生位移,使巷道支护因不适应这种大位移而发生破坏;两帮移近量较大导致拱顶尖桃形破坏明显,在破坏部位,除了混凝土开裂现象外,还可见衬砌中的钢筋强烈扭曲、喷锚挂网扭曲或被拉断等现象^[7],如图 8b 所示.
- 4) 底鼓引起的底板和底角破坏.底鼓导致巷道底板两侧发生倾斜,变形严重的部分其混凝土底板会从中部或者两端被掀起^[15],如图 8c 所示.

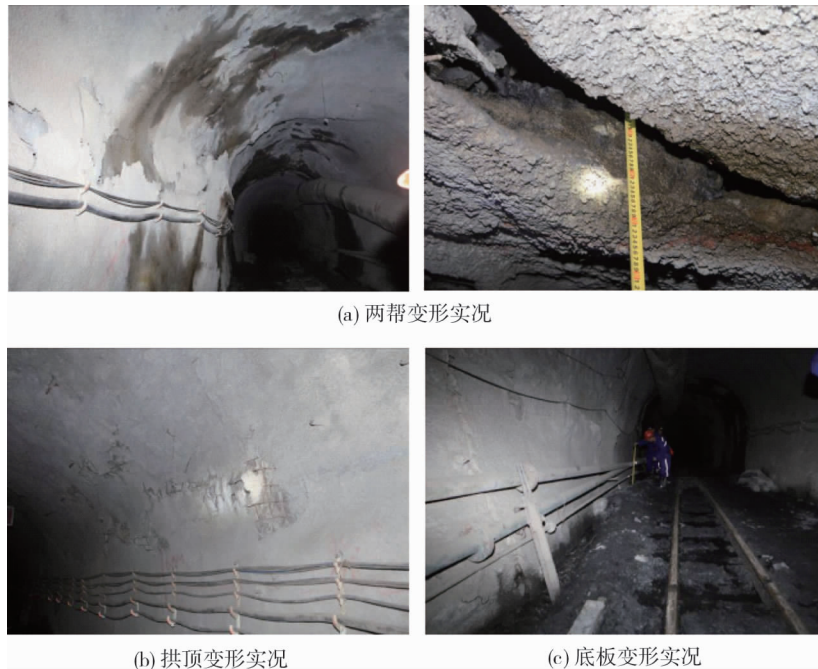


图 8 +600 m 运输大巷变形实况

4.2 围岩变形机理探讨

构建弱面斜穿巷道围岩变形破坏力学模型,如图 9 所示.巷道开挖之后,巷道周围岩体应力状态改变,应力重新分布.弱面作为巷道围岩系统中的薄弱环节,在应力作用下先于其相邻围岩发生破坏.弱面破坏后,相邻围岩应力状态继续变化(围压降低),相邻围岩强度降低.当围岩系统受到的应力大于弱面相邻围岩的强度时,弱面与相邻围岩一起发生破坏,产生“等效弱面”.在“等效弱面”继续扩展到一定厚度之后,相邻围岩由于失去约束作用而成为倾斜悬臂梁.最终导致松动圈向围岩深部扩展,直至在一定深度取得应力平衡为止^[14-15].

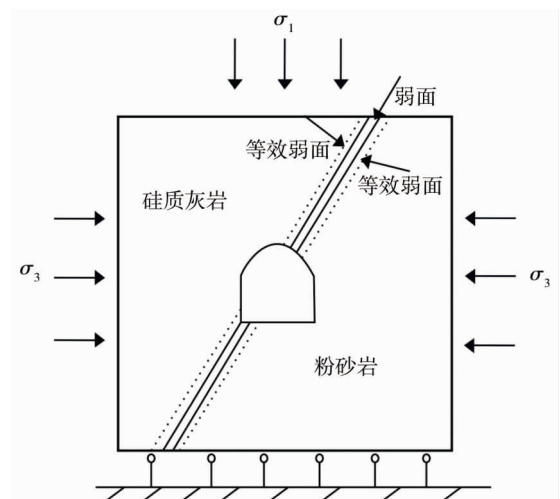


图 9 巷道围岩变形破坏力学模型

5 结论

1) 基于 3DEC 数值模拟可知,弱面斜穿巷道围岩变形呈现不对称特征,巷道两帮位移变化也不相同。

2) 巷道顶板围岩的竖向位移量随侧压系数的增大逐渐减小,底板围岩的竖向位移量及两帮围岩的水平位移量均随着侧压系数的增大而增大。

3) 弱面是巷道围岩承载系统中薄弱环节,弱面承载能力差,在应力状态发生变化后,会先于其他围岩发生破坏。

参考文献:

- [1] 杨志磊,汪鹏,胡海永.弱面影响下深部大断面巷道修护加固技术研究[J].山东煤炭科技,2021,39(7):104-106.
- [2] 刘丰恺,王其洲,叶海旺.基于含弱面矿柱锚固的层状岩体采场参数优化[J].金属矿山,2021(4):35-39.
- [3] 王襄禹,柏建彪,王猛.弱面影响下深部倾斜岩层巷道非均称失稳机制与控制技术[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):544-551.
- [4] 赵同彬,程康康,魏平,等.含弱面岩石滑移破坏及锚固控制试验研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1081-1087.
- [5] 许鹏,杨仁树,鞠杨,等.含倾斜弱面介质中动态裂纹扩展行为研究[J].岩土工程学报,2019,41(9):1645-1652.
- [6] 于永江,刘峰,岳宏亮,等.不同倾角岩体结构面在循环动力扰动下的力学特性[J].煤炭学报,2020,45(11):3748-3758.
- [7] 余伟健,李可,芦庆和,等.裂隙发育岩体巷道围岩工程特征与变形控制[J].煤炭学报,2021,46(11):3408-3418.
- [8] 余伟健,吴根水,安百富,等.裂隙岩体巷道大变形特征与稳定性控制[J].采矿与安全工程学报,2019,36(1):103-111.
- [9] 丁乙,刘向君,罗平亚,等.弱面结构对页岩地层井壁稳定性影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):1130-1136.
- [10] 经来旺,彭绍驰,李树文,等.中间岩层和节理弱面厚度对上行开采的影响[J].煤炭技术,2023,42(2):1-4.
- [11] 姚锡伟,周轲,陶盛宇.双弱面层状岩体本构模型及其工程应用[J].公路交通科技,2020,37(8):81-89.
- [12] 王亚琼,杨强,潘红伟,等.基于 3DEC 模拟的高地应力水平层状隧道围岩变形破坏特征分析[J].现代隧道技术,2022,59(4):127-136.
- [13] 刘邦,朱哲明,周磊,等.贯穿隧道的节理对隧道稳定性的影响[J].煤炭学报,2018,43(5):1296-1304.
- [14] 郭富利,张顶立,苏洁,等.含软弱夹层层状隧道围岩变形机理研究[J].岩土力学,2008,29(增刊1):247-252.
- [15] 杜少华,余伟健,冯涛,等.高应力节理软岩巷道变形特征及其变形机理[J].矿业工程研究,2015,30(3):19-25.