

# 双向极不等压软岩巷道围岩裂隙分布及变形机制

王卫军, 马渝杰, 范磊, 袁超, 吴海, 田芯宇

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**巷道围岩蝶形塑性区破坏是引起巷道围岩大变形的重要原因,近年来引起了巷道支护工作者的高度重视。掌握蝶形塑性区内围岩变形机制是实现软岩巷道围岩控制的基础。然而,有关于蝶形破坏理论中围岩变形机制的研究却鲜有报道。针对上述问题,以南方某矿一采区南运巷产生的大变形特征为研究对象,在分析巷道所处应力环境及地质条件的基础上,对围岩裂隙分布、巷道变形机制及控制方法进行了系统研究。结果表明:南运巷是典型的极不等压软岩巷道,巷道开挖后,围岩裂隙呈“蝶形”分布;“蝶形裂隙区”集中出现在“蝶形塑性区”范围内,蝶叶部位围岩裂隙以剪切裂隙为主,且蝶叶部位剪切裂隙大多围绕巷道呈“环形”分布,而张拉裂隙则集中在巷道围岩自由面附近。蝶形塑性区内围岩应力特征主要有2方面:一为围岩的主应力方向发生了偏转,具体表现为最大主应力围绕巷道呈环形分布,巷道上部最小主应力方向指向巷道中心,巷道下部最小主应力方向背离巷道中心;二为围岩最大/最小主应力比值较大,且主应力比值等值线呈“蝶形”分布。根据塑性区内围岩裂隙分布特点及应力特征,建立了含软弱面围岩力学剪胀模型,认为处于此应力特征下的围岩剪胀作用较强,剪胀作用使围岩向巷道空间内挤压,进而使巷道产生大变形。围岩裂隙分布不规则及原支护方案不合理是导致巷道产生大变形的主要原因。基于上述研究,提出了以“全断面预应力短锚索+关键部位长锚索加强支护+注浆”为核心的差异化支护方案,现场监测表明,新支护方案可有效控制围岩变形,保证巷道在使用期间的稳定性。

**关键词:**软岩巷道;3DEC;裂隙分布;巷道大变形原因;蝶形塑性区;围岩控制

中图分类号:TD322 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2024)07-3025-13

## Fracture distribution and deformation mechanism of surrounding rock in two-way extremely unequal pressure soft rock roadway

WANG Weijun, MA Yujie, FAN Lei, YUAN Chao, WU Hai, TIAN Xinyu

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

**Abstract:** The failure of butterfly plastic zone in roadway surrounding rock is an important reason for the large deformation of roadway surrounding rock. In recent years, it has attracted the attention of roadway support workers. The understanding on the deformation mechanism of surrounding rock in the butterfly plastic zone is the basis for realizing the control of surrounding rock in soft rock roadway. However, there are limited studies on the deformation mechanism of surrounding rock in the butterfly failure theory. In view of the above problems, the large deformation characteristics of the south transport roadway in a mine in the southern China are taken as the research object. Based on the analysis of the

收稿日期:2023-07-28 修回日期:2023-11-07 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jcgs.2023.0913

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074115, 52074117);湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(21B0486)

作者简介:王卫军(1965—),男,湖南涟源人,教授,博士。E-mail: wjwang@hnust.edu.cn

通讯作者:马渝杰(1996—),男,河南项城人,博士研究生。E-mail: mayujie@mail.hnust.edu.cn

引用格式:王卫军,马渝杰,范磊,等.双向极不等压软岩巷道围岩裂隙分布及变形机制[J].煤炭学报,2024,49(7):3025-3037.

WANG Weijun, MA Yujie, FAN Lei, et al. Fracture distribution and deformation mechanism of surrounding rock in two-way extremely unequal pressure soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3025-3037.



移动阅读

stress environment and geological conditions of the roadway, the distribution of surrounding rock cracks, the deformation mechanism and control methods of the roadway are systematically studied. The results show that the south transport roadway is a typical extremely unequal pressure soft rock roadway. After the excavation of the roadway, the surrounding rock cracks are distributed in a ‘butterfly’ shape. The ‘butterfly fracture zone’ is concentrated in the ‘butterfly plastic zone’. The fractures of the surrounding rock at the butterfly leaf are mainly shear fractures, and the shear fractures at the butterfly leaf are mostly distributed around the roadway in a ‘ring’ distribution, while the tensile fractures are concentrated near the free surface of the surrounding rock of the roadway. There are two main aspects of the stress characteristics of the surrounding rock in the butterfly plastic zone. One is the deflection of the principal stress direction of the surrounding rock, which is manifested in the annular distribution of the maximum principal stress around the roadway. The direction of the minimum principal stress in the upper part of the roadway points to the center of the roadway, and the direction of the minimum principal stress in the lower part of the roadway deviates from the center of the roadway. The second is that the maximum / minimum principal stress ratio of the surrounding rock is large, and the principal stress ratio contour is ‘butterfly’ distributed. According to the distribution characteristics and stress characteristics of surrounding rock cracks in plastic zone, the mechanical dilatancy model of surrounding rock with weak surface is established. It is considered that the dilatancy effect of surrounding rock under this stress characteristic is strong, and the dilatancy effect makes the surrounding rock squeeze into the roadway space, which makes the roadway produce large deformation. The irregular distribution of surrounding rock fissures and the unreasonable original support scheme are the main reasons for the large deformation of the roadway. The study mentioned above is used to suggest a differentiated support system, the heart of which is ‘full-section prestressed short anchor cable + key part long anchor cable strengthening support + grouting’. Field observation demonstrates that the revised support plan can successfully manage the surrounding rock’s deformation and guarantee the stability of the roadway while it is in operation.

**Key words:** soft rock; 3DEC; crack distribution; roadway deformation mechanism; butterfly shaped plastic zone; surrounding rock control

煤矿软岩巷道围岩稳定性控制一直是煤矿开采过程中的难题之一。随着我国煤炭开采深度的逐渐增加,软岩巷道围岩往往表现出高应力、大变形、变形持续时间长、维护困难等特点,软岩巷道围岩控制一直是煤矿深部开采的技术瓶颈<sup>[1-2]</sup>。在软岩巷道支护中,巷道支护困难的主要影响因素为地应力水平和围岩条件,在围岩条件相同的条件下,其主要影响因素为地应力水平。我国煤矿巷道所处地应力环境普遍为水平应力大于垂直应力,尤其在一些构造应力显著的地区,巷道往往处于双向极不等压应力环境下,其塑性区形态呈现为“蝶形”<sup>[3-4]</sup>。巷道围岩变形过程实质是围岩塑性区的形成过程,塑性区的发育程度与围岩的变形密切相关,研究软岩巷道围岩变形破坏机制就是研究围岩塑性区的形成和扩展规律<sup>[4]</sup>。

近年来,已有众多学者就双向极不等压应力环境下蝶形塑性区的形成及扩展规律进行了大量研究。笔者团队<sup>[5-7]</sup>分析了蝶形塑性区影响因素及其力学形成机制,认为塑性区恶性扩展是导致巷道失稳的主要原因,控制塑性区恶性扩展是维护巷道围岩稳定的有效途径。针对蝶形塑性区蝶叶部位塑性区半径较大的特点,提出了以“差异化支护”为核心的巷道支护方案,并在现场实际中取得了较好的围岩控制效果。袁

超等<sup>[8]</sup>通过理论分析、数值计算及现场实践认为支护阻力对围岩塑性区半径、围岩连续性变形的影响十分有限;指出对于软岩动压巷道的支护,在整体加固的同时,应对敏感部位加强支护,同时支护结构应具有一定的适应性让压功能才是阻止围岩不协调变形的关键。刘洪涛等<sup>[9]</sup>为研究不同侧压系数下采场侧方主应力方向旋转演化规律,建立了采场等效孔的理论模型;认为当巷道围岩形成了蝶形塑性区时,巷道主应力方向的旋转会引起蝶形塑性区的旋转,进而对巷道的稳定性产生一定影响。赵志强等<sup>[10]</sup>认为蝶形塑性区具有方向性,蝶叶位置会随主应力方向的变化而改变,当蝶形塑性区的蝶叶位于巷道顶板时,巷道便具有发生蝶形冒顶的风险。针对该特征提出了基于蝶形塑性区形态特征为基础的大变形回采巷道冒顶控制方法。吴祥业等<sup>[11]</sup>以实际工程现场为背景探究了重复采动巷道围岩塑性区及应力时空演化规律,并根据重复采动过程中塑性区扩展时空关系,提出分次补强支护方法,解决了重复采动巷道围岩稳定控制的难题。贾后省等<sup>[12]</sup>认为蝶叶塑性区具有隔层穿透发育的特征,未发生塑性破坏的岩层不能阻断蝶叶塑性区在软弱岩层的形成。要防止巷道产生大变形就必须保证锚杆/索的锚固基础处于塑性区外,同时锚杆/

索应具有一定的延伸能力以适应巷道产生的大变形。董海龙等<sup>[13]</sup>针对双向不等压巷道围岩塑性区的解析问题, 对比分析了应力构造法和近似隐式法得到的双向不等压巷道围岩塑性区近似解, 认为应力构造法和近似隐式法求得的塑性区近似解都有其局限性。结合2种方法的特点, 利用相似原理, 相对准确地给出了双向不等压巷道围岩塑性区的近似解析范围, 所得结论可为巷道围岩的支护研究提供一定参考。王志强等<sup>[14]</sup>基于复变理论并结合摩尔库伦强度准则推导了圆形巷道在双向不等压条件下的塑性区计算公式, 通过数值模拟验证了计算公式的准确性。

诸多专家学者对双向极不等压软岩巷道围岩蝶形塑性区的形成、扩展及控制方法进行了大量研究, 并取得了相当丰富的成果<sup>[15-16]</sup>; 然而, 目前对于蝶形塑性区的研究集中在塑性区形成、采动影响下塑性区时空演化规律等, 而关于蝶形塑性区引起围岩变形机制的研究却鲜有报道, 蝶形塑性区引起围岩大变形机制恰恰是软岩巷道支护中必须解决的关键问题。且目前对于巷道围岩塑性区的数值模拟依赖于连续建模技术(如FLAC3D、ABAQUS及ANSYS), 大多采用塑性理论预测岩体破坏的深度及相关的变形<sup>[5-16]</sup>。有文献认为巷道开挖后围岩沿已有节理/裂隙发生剪切或膨胀是造成围岩失稳的重要原因之一<sup>[17-19]</sup>, 而连续建模技术使用的本构模型将膨胀视为体积属性<sup>[20]</sup>, 不能复现现场岩体的破坏及裂隙分布特征。而在矿山工程现场实际中, 多根据钻孔窥视结果中裂隙的深度及范围来指导围岩支护, 因此研究巷道开挖后围岩裂隙分布对于围岩支护具有重要意义。近年来, 基于非连续体的数值建模技术(离散元)已经被运用到模拟岩体的变形及相应裂纹的产生中, 且受到众多学者的推崇<sup>[17-19,21-24]</sup>。

鉴于此, 笔者以云南兴路煤矿一采区南运巷为工程现场并借助于离散元数值模拟软件3DEC, 采用黏结块体建模方法(Bond-Block-Model, BBM)研究了巷道开挖后围岩裂隙分布特征; 通过分析巷道开挖后围岩应力特征及围岩裂隙最终形态, 揭示了巷道围岩大变形原因, 可为围岩支护设计提供新思路。

## 1 工程背景

### 1.1 工程地质概况

云南湾田集团兴路煤矿一采区南运巷肩负着采区内运输重任, 巷道整体处于泥岩内, 岩性较为软弱。所处工程地质柱状如图1所示。使用应力解除法对巷道所处地应力测试可知, 南运巷最大主应力为26.4 MPa, 方向与巷道轴向垂直, 最小水平主应力为

12.1 MPa, 垂直应力为9.8 MPa, 巷道整体处于极不等压应力场内。

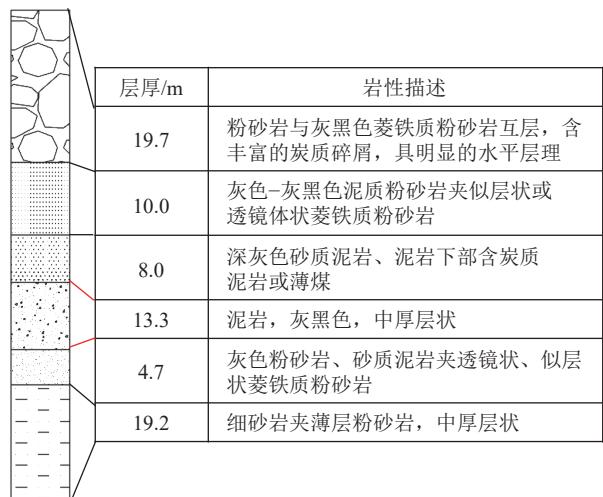


图1 岩层柱状

Fig.1 Composite bar chart of rock strata

南运巷标高-525 m, 巷道形状为直墙拱形, 尺寸为4.6 m×3.6 m。巷道原支护方式为锚网喷支护。具体支护参数为顶板布置2根锚索 $\phi 17.8 \text{ mm} \times 7000 \text{ mm}$ , 间排距为800 mm×800 mm; 顶帮锚杆为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2200 \text{ mm}$ 螺纹钢锚杆, 间排距为800 mm×800 mm; 金属网为铁丝菱形网, 网孔尺寸为40 mm×40 mm; 喷浆厚度为150 mm厚C25混凝土; 对底板不采取支护措施。原支护方案设计如图2所示。

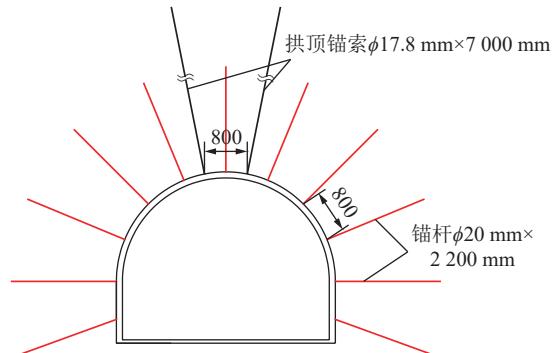


图2 原支护方案设计

Fig.2 Design of original support scheme

### 1.2 变形特征

一采区南运巷掘出后, 巷道围岩出现大变形和支护失效现象如图3所示, 具体破坏特征归纳如下:

(1) 巷道顶部与帮部变形严重, 自巷道掘进半年以来, 两帮挤进量达1000 mm以上, 挤进量大致使喷浆层被严重撕裂; 顶板出现局部冒顶, 部分呈现出“网兜状”, 且冒顶区域随时间增长不断扩大; 在帮部与顶板的变形下, 巷道断面收缩严重。

(2) 底臌量大, 初期支护时因施工困难未对底板进



图3 巷道变形破坏

Fig.3 Tunnel deformation and failure diagram

行支护,致使底板臌起严重,部分区域变形已不能满足正常运输的要求,矿方不得不进行多次检修。

(3) 围岩变形时间长,自巷道掘进以来,围岩的变形问题就一直存在,且巷道部分区段经过多次检修,却始终未能解决变形问题。

(4) 支护构件失效严重,包含喷浆层被撕裂,钢带被压弯,锚杆/锚索松动失效,托盘滑落等现象较为常见。

## 2 巷道围岩裂隙分布及失稳机理

已有众多研究表明,围岩变形是围岩内部裂隙发育、扩展的结果,围岩控制的作用主要为限制裂隙的进一步扩展<sup>[23-24]</sup>;为对南运巷围岩裂隙分布有更进一步的认识及判断,针对南运巷所处应力及相关地质条件,采用3DEC-BBM黏结块体建模技术研究了巷道开挖后围岩裂隙分布特征,以便为后续的支护方案设计提供更合理的依据。

### 2.1 数值计算模型

#### 2.1.1 模型建立及相关参数

3DEC-BBM是将岩石模拟为黏结的块体多面体单元,块体之间通过接触产生相互作用,可通过赋予块体和接触面相应的模型及参数来近似模拟岩石的破裂行为。块体与块体之间的接触表示为潜在的断裂路径,块体之间可以在接触处破裂,用以模拟裂纹的产生,裂纹之间可以合并或扩展以表示岩体的破坏,且在接触破裂之后块体与块体之间可以产生分离、旋

转及平移。3DEC也能和有限单元法一样,块体内部可以细分为单元,并可赋予块体内部单元相应的本构模型及参数<sup>[25]</sup>。

在使用3DEC-BBM计算时应首先确定离散区域及离散块体的尺寸,离散区域过大及块体尺寸过小均会导致计算速度较慢,而离散区域过小及块体尺寸过大又会影响计算精度。在离散区域的选择上,参考了相关文献<sup>[3-5]</sup>,认为巷道围岩变形实质是围岩塑性区的形成过程,塑性区的发育程度与围岩变形密切相关;南运巷所处应力环境侧压系数为2.7,为双向极不等应力场,塑性区为“蝶形”且尺寸较大,故选择按照塑性区最大范围进行离散。基本思路为首先在FLAC3D中计算出塑性区区域,而后在3DEC中将该区域进行离散化处理,离散化的BBM模型包括块体和接触面,如图4所示;考虑到3DEC-BBM对计算机要求较高,未避免差异化,在FLAC3D和3DEC中建立的模型尺寸均为50 m×2 m×50 m(长×宽×高),巷道尺寸按照现场实际尺寸4.6 m×3.6 m;为确保塑性区范围在离散区域范围内,选择离散区域大小为20 m×2 m×20 m,大于FLAC3D中塑性区尺寸。其中FLAC3D模型网格数量为99 272个,其计算参数与3DEC计算中使用参数一致。

文献<sup>[17]</sup>使用3DEC-BBM研究了不同块体尺寸下裂隙的数量及扩展模式,认为当块体尺寸为0.5 m时能在计算速度与计算精度上取得较好的平衡。基

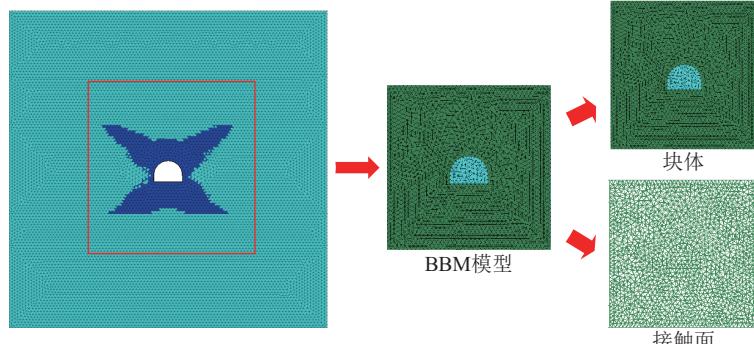


图4 离散区域确定

Fig.4 Determination of discrete regions

于此,本次建立BBM模型选择块体尺寸为0.5 m。模型建立完成后对模型进行网格划分,为确保模型BBM中每个块体都能划分网格,应保证划分网格尺寸小于模型块体尺寸,因此模型BBM部分网格尺寸为0.3 m,其余网格尺寸为1 m,最终划分网格数量为321 283个。按照地应力测试结果对模型施加3个方

向的初始地应力,分别为x方向26.4 MPa,y方向12.1 MPa,z方向9.8 MPa;模型前后左右均约束其相应方向的位移,底部进行全位移约束,3DEC数值计算模型如图5所示。通过地质勘察资料及相关岩石力学实验获得岩层力学参数,并采用摩尔库伦本构模型,表1为数值模拟基本参数。

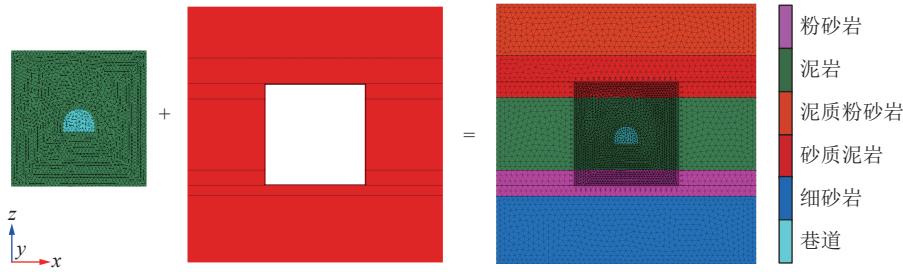


图5 3DEC数值计算模型

Fig.5 3DEC Numerical calculation model

表1 数值模拟基本参数

Table 1 Basic parameters of numerical simulation

岩层	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	5.3	0.27	2 600	4.2	1.75	31
砂质泥岩	3.7	0.25	2 700	2.8	1.40	30
泥岩	2.3	0.35	2 500	1.8	1.20	27
粉砂岩	3.2	0.31	2 550	2.5	1.30	30
细砂岩	4.2	0.33	2 700	3.5	1.50	36

BBM模型中接触模型选用库伦滑移模型,3DEC中裂纹只能在接触之中产生,故接触刚度是控制变形破坏的重要参数,其法向刚度的确定公式<sup>[23,25-26]</sup>为

$$k_n = n(K + 4G/3)/\Delta Z_{\min} \quad (1)$$

$$k_s = 0.4k_n \quad (2)$$

其中,  $k_n$ 、 $k_s$  分别为节理法向、切向刚度;  $n$  为倍增系数, 用于节理弹性模量和岩石弹性模量的匹配, 取值为 1~10, 通常取 10<sup>[23,26]</sup>;  $K$ 、 $G$  分别为块体的体积模量和剪切模量;  $\Delta Z_{\min}$  为块体网格划分最小单元尺寸。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

式中,  $E$  为块体的弹性模量;  $\mu$  为块体的泊松比。

而后,通过一系列模拟压缩实验<sup>[23,26]</sup>,确定了接触需要的其他参数,接触参数见表2。

## 2.1.2 围岩裂隙分布特征

应力平衡后执行巷道开挖,计算完成后,观察巷

表2 BBM模型接触参数

Table 2 Contact parameters of BBM model

法向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	切向刚度/(GPa·m <sup>-1</sup> )	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	摩擦角/(°)
133	53.2	1.2	0.6	30

道开挖后周边围岩裂隙分布特征及形态。进行数值模拟的目的是研究巷道开挖后围岩裂隙分布特征,在这种情况下,应当以裂隙范围作为研究重点,故在本模型中将块体间的接触张开或滑移距离以0为限制,仅显示张开或滑移距离大于0的接触,围岩裂隙分布如图6所示。

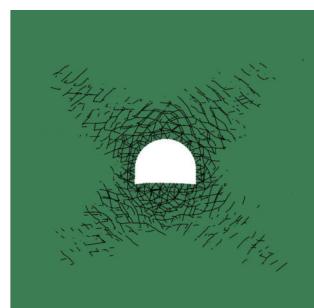


图6 围岩裂隙分布

Fig.6 Cracks distribution of surrounding rock

由模拟结果可知,南运巷开挖后围岩裂隙分布并不规则,裂隙在肩角及底角处范围较大,在巷道帮部裂隙范围较小。针对该围岩裂隙分布特征,参考巷道围岩塑性区的研究成果,将其称为“蝶形裂隙区”。将围岩塑性区范围与裂隙区范围在3DEC里观察比较,如图7所示;可以发现,围岩裂隙集中在塑性区范围内,在巷道帮部,塑性区范围较小,围岩裂隙深度较浅,在塑性区较为发育的蝶叶部位,围岩裂隙深度较深,

这表明围岩裂隙范围与塑性区范围存在高度相关性。

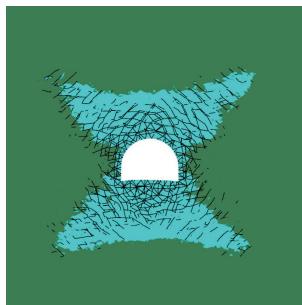


图 7 围岩破坏范围

Fig.7 Failure scope of surrounding rock

为进一步分析巷道围岩的破坏特征,观察巷道开挖后 BBM 模型内接触的破坏类型与裂隙分布,如图 8 所示,不难发现,张拉破坏(图 8 中红色部分)主要集中在巷道自由面附近,而在裂隙范围较深处如巷道肩角及底角处则主要以剪切破坏(图 8 中绿色部分)为主;巷道自由面附近张拉破坏出现处(巷道自由面附近)剪切破坏较为密集;相较于巷道自由面附近,肩角及底角的剪切破坏较稀疏;且肩角及底角处的剪切裂隙分布大多围绕巷道呈“环形”分布(图 8 中黑色为围岩裂隙),而巷道自由面附近同时存在剪切裂隙与拉伸裂隙,裂隙分布纵横交错。

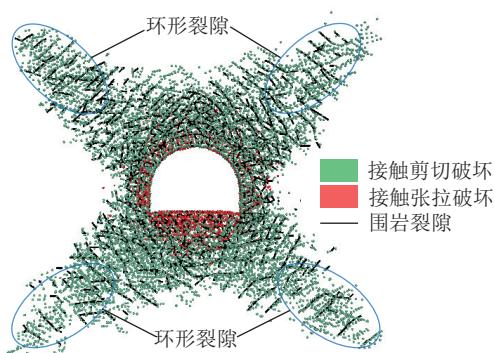


图 8 裂隙区内接触破坏类型与围岩裂隙分布

Fig.8 Type of contact failure in the fracture zone and the distribution of surrounding rock cracks

## 2.2 裂隙区形成原因分析

### 2.2.1 围岩主应力比值及矢量分布

由数值模拟结果可以看出,蝶形裂隙区集中分布在蝶形塑性区范围内,为对蝶形裂隙区形成原因有更清楚地认识及了解,需对塑性区范围内的应力特征进行分析;使用 3DEC 中 FISH 语言统计了数值模型中  $y=1$  m 截面处塑性区内所有单元的最大/小主应力方向余弦,并绘制主应力矢量分布(为方便观察设置矢量长度均为 1),如图 9 所示。

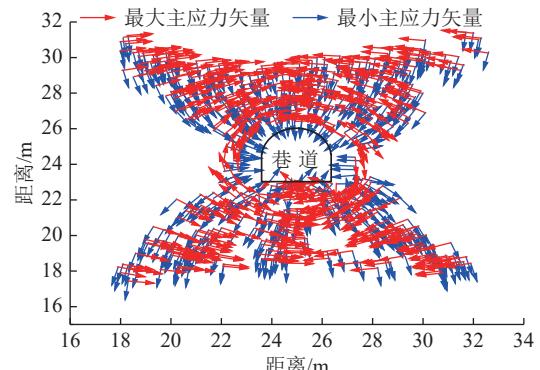


图 9 塑性区内围岩主应力矢量分布

Fig.9 Principal stress vector distribution of surrounding rock in plastic zone

由图 9 可以看出,巷道开挖后塑性区内围岩最大/最小主应力方向均发生了偏转(原岩应力中最大主应力为水平分布,最小主应力为垂直分布),蝶叶部位的最大主应力的偏转角度较巷道自由面附近小,最大主应力方向基本围绕巷道呈环形分布;在巷道自由面附近,最小主应力方向基本上指向巷道中心,越靠近巷道自由面,最小主应力偏转角度同样越大,越远离巷道自由面,最小主应力偏转角度越小;巷道上部最小主应力方向指向巷道中心,巷道下部最小主应力的方向背离巷道中心。

在数值模型中,单元的最大/最小主应力比值往往决定着单元是否发生破坏。为分析蝶形塑性区内单元最大/最小主应力比值分布特征,绘制出巷道开挖后围岩主应力比值等值线,如图 10 所示,(图中,  $\sigma_3$  为岩体所受最小主应力;  $\sigma_1$  为岩体所受最大主应力)。由于巷道开挖后巷道自由面附近最小主应力变为拉应力,致使主应力比值出现负数且数值较大(3DEC 中压应力为负值,拉应力为正值),为方便观察,将主应力比值小于 0 的使用 0 进行代替;由于 BBM 模型属于离散块体,相较于有限元,其等值线并不连续,但这并不影响所得到的结论。

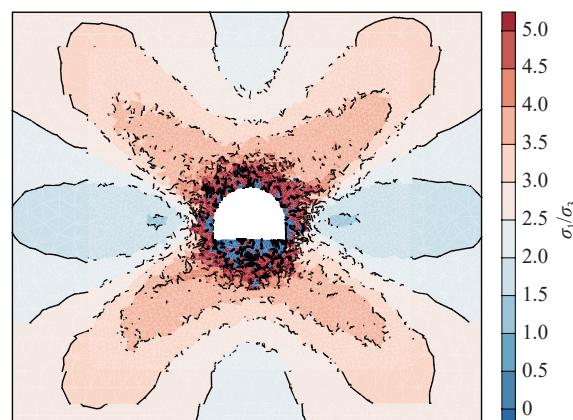


图 10 围岩主应力比值等值线

Fig.10 Contour map of principal stress ratio

图 10 表明, 由于巷道开挖的影响, 巷道自由面附近最小主应力变为拉应力, 主应力比值为负数(图 10 中表示为主应力比值为 0); 除却主应力比值为 0 的区域外, 越靠近巷道自由面, 主应力比值越大, 而后向围岩深处衰减, 巷道帮部主应力比值衰减较快; 而巷道肩角及底角部位, 主应力比值衰减较慢, 致使主应力比值等值线呈现出蝶形分布特征。

为进一步分析塑性区内围岩主应力比值的分布情况, 使用 3DEC 中 FISH 语言统计了蝶形塑性区内所有单元的主应力比值, 并绘制出柱状统计, 如图 11 所示。

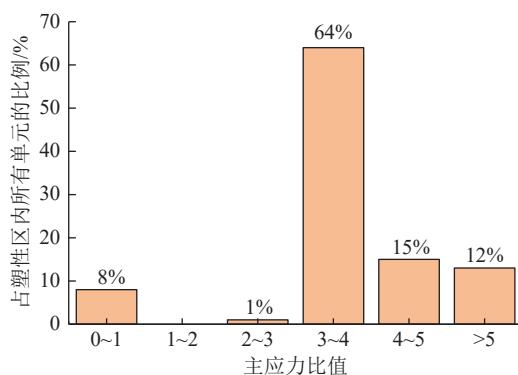


图 11 塑性区内围岩主应力比值分布

Fig.11 Distribution of principal stress ratio of surrounding rock in plastic zone

图 11 表明, 蝶形塑性区内围岩的最大/最小主应力比值处于 3~4 单元占比最高, 约占塑性区整体单元的 64%; 主应力比值处于 4~5 的单元占塑性区整体单元的 15%; 主应力比值大于 5 的单元约占塑性区整体单元的 12%。总体说来, 塑性区内最大/最小主应力比值大于 3 的单元占比较高, 占塑性区内所有单元的 91%。

## 2.2.2 围岩剪胀与大变形

由上述分析可知, 蝶形塑性区内单元的力学特征主要有 2 点: ① 围岩的主应力方向发生了偏转; ② 围岩最大/最小主应力比较大; 岩体是经过漫长的历史演化作用形成的, 在此过程中, 岩体内部孕育了断层、弱面、节理、层理、裂隙等各种尺度的缺陷。相关研究表明<sup>[5-6, 11-12]</sup>, 形成蝶形塑性区的巷道往往伴随着大变形, 为分析蝶形塑性区巷道围岩大变形产生原因, 将岩体内各类缺陷简化为锯齿形结构面<sup>[27]</sup>, 建立了力学模型如图 12 所示(其中, 结构面的起伏差为  $h$ , 起伏角为  $\alpha$ )。

结构面上受到的法向应力  $N$  及切向应力  $T$  为

$$\begin{cases} N = \sigma_1 \sin \alpha + \sigma_3 \cos \alpha \\ T = \sigma_1 \cos \alpha - \sigma_3 \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

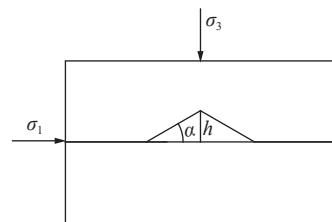


图 12 结构面力学模型

Fig.12 Mechanical model of structural plane

假定结构面的抗剪强度服从库伦准则, 则结构面产生剪切破坏的条件为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan(\varphi_j + \alpha) + \frac{hC_j}{\sin \alpha (\cos \alpha - \sin \alpha \tan \varphi_j)} \quad (6)$$

式中,  $\varphi_j$  为结构面的内摩擦角;  $C_j$  为结构面黏聚力。

由式(5)、(6)可知, 当最大主应力  $\sigma_1$  越大时, 结构面切向力也越大, 结构面越容易发生破坏。在切向力作用下, 模型上半部沿结构面滑动, 除产生沿最大主应力方向的切向位移  $\delta_t$  外, 还将产生沿最小主应力方向的法向位移  $\delta_n$ , 这种在剪切过程中结构面张开的现象被称为剪胀, 如图 13 所示。

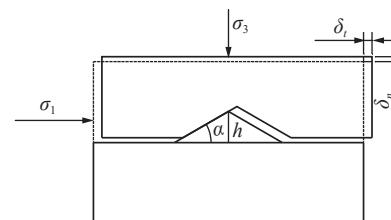


图 13 岩体剪胀力学模型

Fig.13 Mechanical model of rock dilatancy

根据图 12、13 围岩剪胀力学模型并联系到图 8 中蝶形塑性区内围岩裂隙多以“环形裂隙”为主, 为分析蝶形塑性区巷道大变形成因, 针对围岩蝶形部位裂隙进行分析(为方便观察, 将蝶形部位环形裂隙使用紫色线段素描标出), 如图 14 所示。

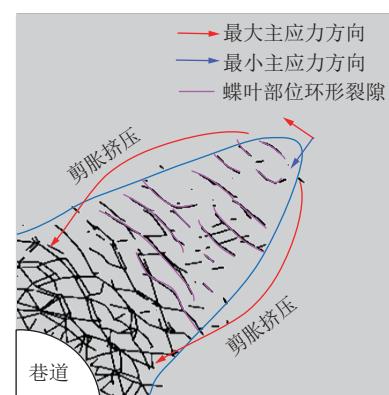


图 14 围岩剪胀变形

Fig.14 Dilatancy deformation of surrounding rock

由图 14 可知, 蝶形部位的“环形裂隙”在塑性区

内围岩应力特征下(此应力特征主要为上述主应力比及主应力方向特征),将产生剪胀,剪胀作用使围岩裂隙张开,并使围岩向巷道空间内挤压,使巷道产生大变形。巷道围岩大变形示意如图15所示(其中,  $\sigma_z$ 为作用在岩体上的垂直应力;  $\lambda$ 为侧压力系数)。

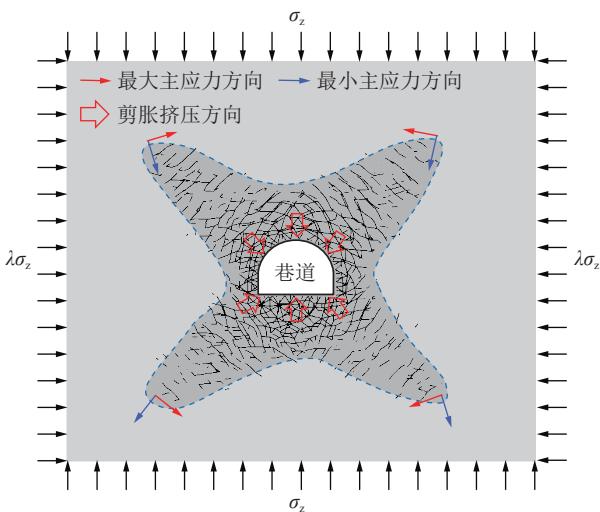
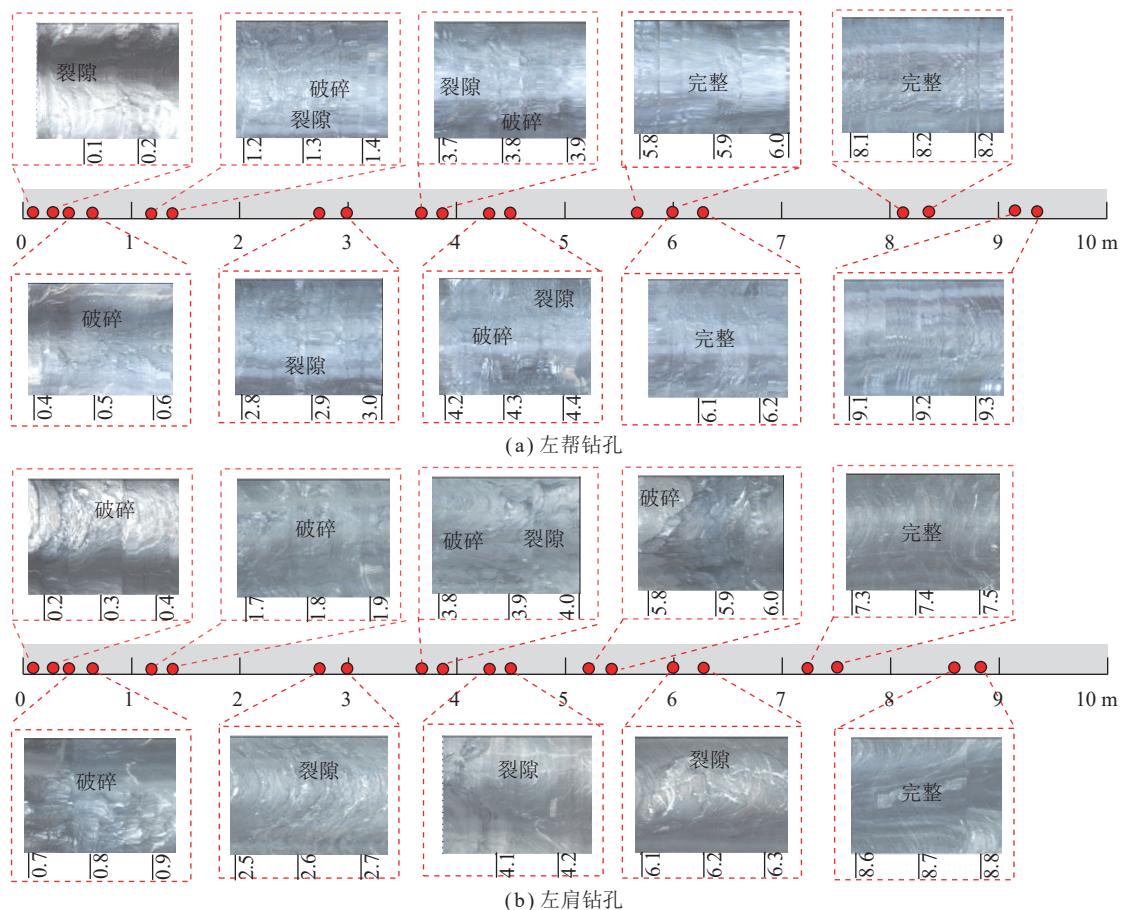


图 15 围岩大变形

Fig.15 Large deformation of surrounding rock

### 2.3 围岩裂隙区范围及钻孔窥视

钻孔窥视可直观、有效的观测巷道周边围岩的裂



隙分布情况,窥视结果可作为巷道支护设计的依据。一方面为探究围岩裂隙区的分布范围,找出原支护失效原因;另一方面为了验证数值模拟结果中围岩裂隙分布的不均匀性;采用武汉长盛科技生产的CXK12(A)钻孔窥视仪对围岩裂隙进行窥视,在南运巷帮部、肩角及顶板分别设置了窥视孔,每个窥视孔深10 m,直径32 mm,图16为5个钻孔的窥视结果。

根据窥视结果,南运巷帮部围岩破坏范围在4.4 m之内;巷道肩角围岩破坏范围最大,约6.2 m;顶板破坏范围约为4.5 m。根据钻孔窥视结果绘制出南运巷围岩破坏范围(为方便进行观察,将窥视结果中肩角破坏大于帮部及顶板的范围用红色填充标出),如图17所示。

通过钻孔窥视结果可以看出,南运巷围岩裂隙分布并不规则,在巷道帮部,裂隙深度较浅,在巷道肩角处,围岩裂隙深度较深,范围较大;且巷道围岩整体裂隙范围均超出锚杆锚固范围,使锚杆的支护作用失效。

### 2.4 巷道围岩失稳机理分析

经过上述分析并综合考虑南运巷所处应力环境、围岩岩性及原支护方案,认为其支护失效的原因主要有以下几点:

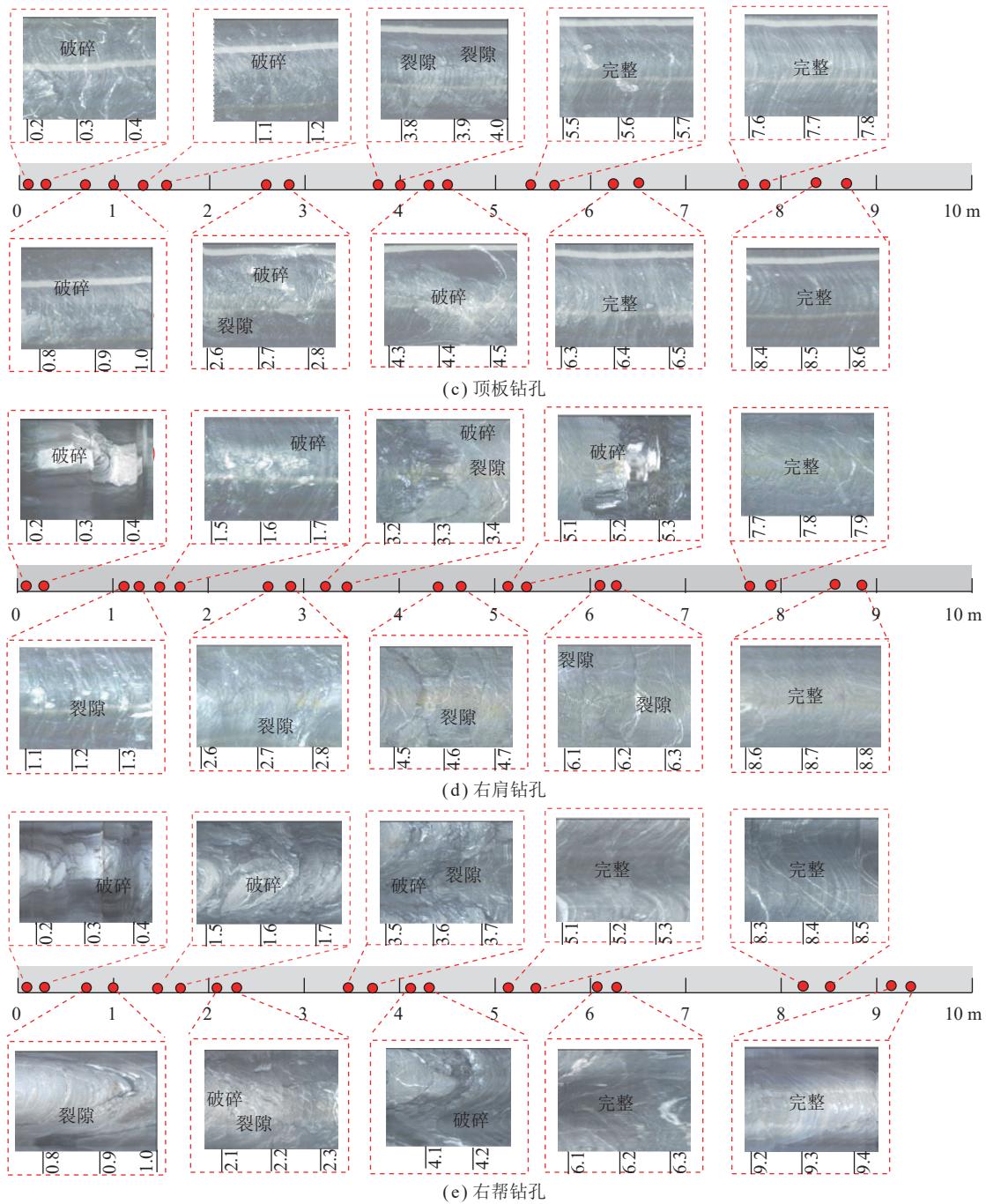


图 16 钻孔窥视结果

Fig.16 Drilling peep results

(1) 巷道所处地应力场为极不等压应力场。经地应力测试可知, 该巷道所处地应力场侧压系数为 2.7; 经数值模拟及钻孔窥视可知, 该巷道开挖后围岩破坏范围呈“蝶形”分布, 蝶形裂隙区内围岩具有较强的剪胀性, 致使围岩发生大变形。

(2) 原支护方案针对性不强。对“蝶形裂隙区”的控制不具有针对性, 在裂隙较为发育部位肩角及底角处未进行针对性支护。

(3) 锚杆支护失效。经钻孔窥视可得, 围岩裂隙范围大于锚杆长度, 即锚杆锚固基础不稳定, 进而使锚杆支护失效, 导致巷道产生大变形。

### 3 巷道围岩稳定性控制

#### 3.1 基本控制思路

已有研究表明, 巷道开挖后围岩发生变形是不可避免的, 巷道开挖后产生的围岩压力由围岩体和支护

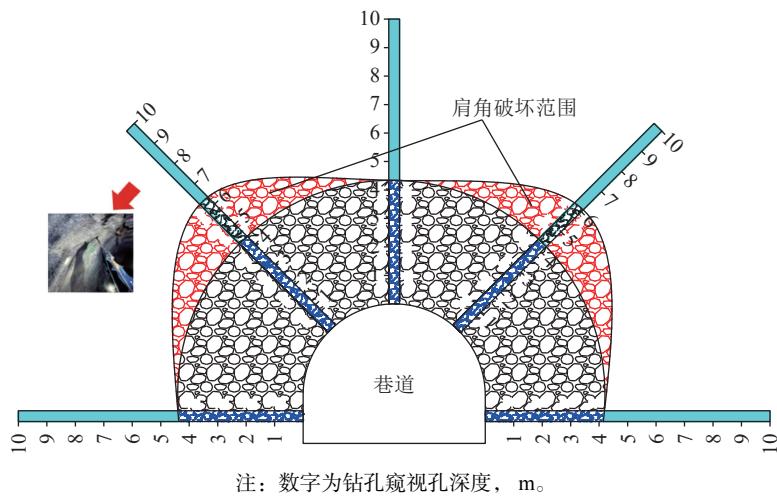


图 17 南运巷围岩破坏范围

Fig.17 Drill holes to peek at renderings

结构共同承担,围岩体承担了巷道开挖后围岩压力的主要部分。锚杆/索的支护作用在于提高破碎岩体的残余强度,使进入的峰后的破碎岩体仍具有一定的承载能力,不至于发生脆性破坏瞬间失去承载能力,从而充分发挥巷道周边围岩自身的承载力<sup>[27-29]</sup>;综合上述分析并结合“蝶形裂隙区”控制理念提出以下基本控制思路:

(1) 整体补强支护。原支护方案中锚杆锚固端均位于围岩裂隙范围内,致使锚杆支护失效。针对锚杆支护失效现象,对巷道进行整体补强支护,确保锚杆/索锚固端位于稳定岩层内,拥有较好的锚固基础。

(2) 关键部位加强支护。巷道开挖后围岩裂隙呈“蝶形”分布,针对“蝶形裂隙区”蝶叶部位裂隙范围较大特点,对巷道底角及肩角应进行加强支护。

(3) 注浆支护。注浆可以提高岩体强度且能封闭围岩裂隙阻止水汽进入围岩内部,对于含有黏土矿物含量较高的围岩,可以防止其水害和风化,从而实现围岩的长期稳定。

### 3.2 新支护方案及相关参数

考虑巷道所处应力条件、围岩岩性及围岩裂隙分布特征,在对巷道进行放顶、扩帮及卧底后提出了以“全断面预应力短锚索支护+关键部位长锚索加强支护+注浆”为核心的差异化支护方案,新支护方案如图 18 所示。具体介绍如下:

(1) 金属网。铁丝菱形网,网孔尺寸为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。

(2) 全断面预应力短锚索。考虑到原支护方案帮部锚杆未锚固在稳定岩层中及底部未设置支护措施,新支护方案采用全断面短锚索支护;短锚索直径为 17.8 mm,长度  $L=5\ 000\text{ mm}$ ,排距为 800 mm;且每根锚索施加预紧力不低于 150 kN。

(3) 关键部位加强支护。由模拟结论可知,蝶叶部

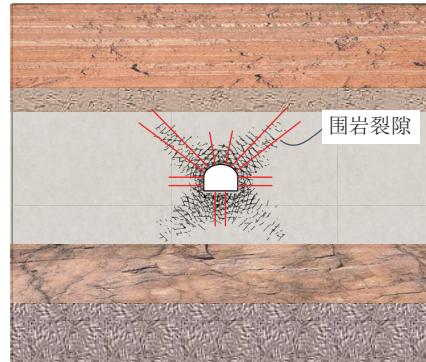


图 18 新支护方案与裂隙区范围

Fig.18 New support scheme and crack zone

位以剪切裂隙为主,已有研究表明,预应力锚杆/锚索可在围岩内形成压应力场,能有效控制围岩的剪切裂隙<sup>[23]</sup>。针对蝶叶部位裂隙范围较大、剪切裂隙为主的特点,选择预应力长锚索支护;在巷道肩角及底角处设置锚索长度  $L=7\ 000\text{ mm}$ ,排距同样为 800 mm,巷道两边肩角处各布置 2 根锚索,因底板长锚索施工不便且施工时间长,故在底角处不再布置长锚索,而是在底板处布置 2 根短锚索,  $L=5\ 000\text{ mm}$ ;底板锚索采用气动架柱式钻机施工。

(4) 喷浆。采用 C25 混凝土,喷射厚度为 150 mm。

(5) 注浆支护。综合考虑巷道所处应力条件及围岩岩性,对巷道进行全断面注浆,注浆管长度为 3 m,全断面布置 7 根,分别为底角处 2 根,每侧帮部各 1 根,肩角 2 根,顶板 1 根,注浆管为 5 分圆形钢管加工制成,排距为 2 000 mm。注浆材料为高水材料,其水灰质量比为 1.5 : 1。高水材料分为甲料、乙料 2 个部分,其具有单独与水混合 24 h 不凝结,而甲料和乙料一旦相互混合则能快速凝结;相对于普通水泥浆,其具有凝结时间短,凝结体具有膨胀性等特点<sup>[30]</sup>,在注浆过程中保证注浆压力在 2~3 MPa 内。

### 3.3 新旧支护方案模拟效果分析

为进一步探讨新旧支护方案对围岩裂隙的控制效果, 在上述 3DEC-BBM 模型中进行初始应力平衡后进行巷道开挖, 并严格按照实际支护参数施加支护单元。其中锚杆/索采用 Cable 单元模拟, 其相关参数见表 3。钢筋网和混凝土喷层采用 shell 单元模拟, 其

计算参数见表 4。新支护方案中注浆加固对象为巷道围岩所处的泥岩, 更确切的说注浆的直接对象为巷道围岩中的裂隙面, 根据文献[31-32]的研究成果, 将 BBM 模型中接触的强度参数提高 20% 用以模拟注浆过程及效果。新旧支护方案下围岩裂隙分布范围如图 19 所示。

表 3 锚杆/索数值计算参数

Table 3 Numerical calculation parameters of bolt/cable

单元类型	弹性模量/GPa	横截面积/cm <sup>2</sup>	水泥浆外圈周长/m	水泥浆黏聚力/(kN·m <sup>-1</sup> )	水泥浆刚度/(kN·m <sup>-2</sup> )	抗拉载荷/kN
锚杆	200	3.8	0.088	430	24.0	144.5
锚索	195	2.5	0.088	170	11.2	353.0

表 4 钢筋网和喷层数值计算参数

Table 4 Numerical calculation parameters of shell

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	厚度/mm
22	0.2	2 350	150

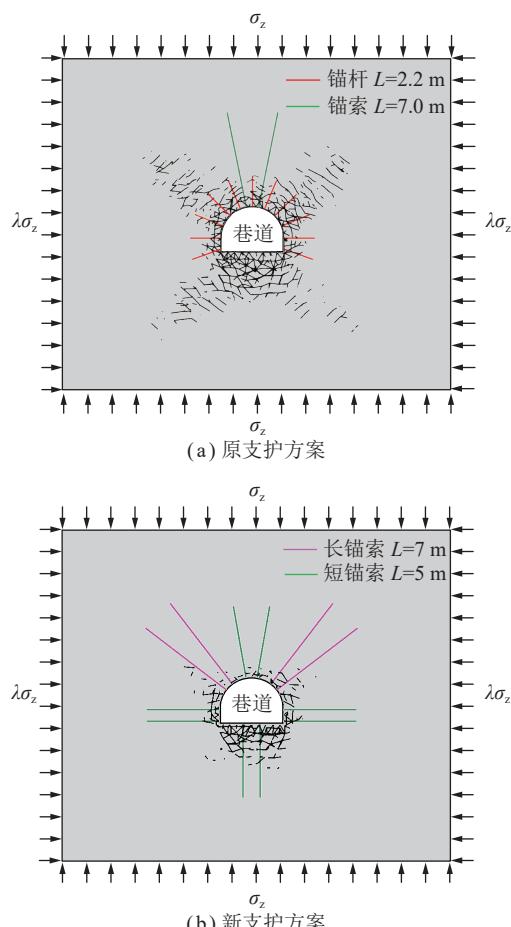


图 19 新旧支护方案下围岩裂隙分布范围

Fig.19 Distribution range of surrounding rock cracks under the new and old support schemes

由图 19 可以看出, 旧支护方案下围岩裂隙区发

育显著且裂隙范围较大, 两帮裂隙范围为 1.6 m, 拱顶裂隙范围 2.3 m 左右, 远大于原支护方案中锚杆支护长度, 尤其是巷道肩角处, 裂隙范围达到 6.7 m。这表明, 原支护方案不能有效控制裂隙的发育及扩展。而采用新支护方案后, 围岩拱顶和两帮的裂隙范围为 0.7 和 1.2 m; 尤其是肩角部位, 采用新支护方案后, 围岩裂隙范围在 2.72 m, 相较于原支护方案, 肩角的裂隙范围减少了 60%。这表明, 新支护方案能有效控制裂隙的发育及扩展, 更有利于巷道围岩的稳定。

### 3.4 支护效果分析

采用新支护方案对巷道进行修复, 修复完成后的巷道如图 20 所示。



图 20 修复完成后的巷道

Fig.20 Roadway after completion of repair

巷道修复完成后在巷道内设置了 3 个位移监测点, 每个监测点监测两帮宽度, 顶底板高度。经过 100 d 的连续监测, 巷道变形情况如图 21 所示。

南运巷整体支护过程持续时间较长, 由图 21 可知, 巷道修复完成后, 约经过 60 d, 其变形速率才逐渐趋于稳定, 3 个测点中, 两帮最大移近量为 158 mm, 顶底板最大移近量为 223 mm, 并逐渐趋于稳定, 这表明新支护方案能有效控制巷道围岩的变形, 能保证该巷道在服务期间的使用要求。

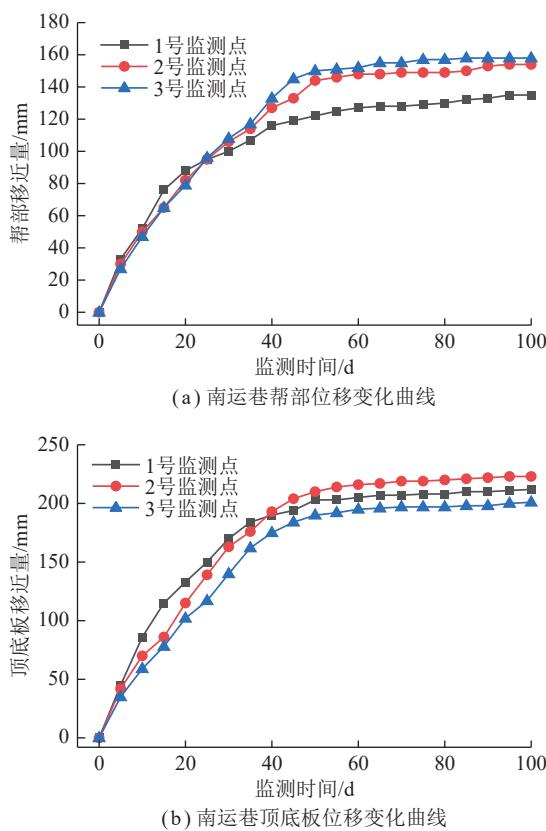


图 21 巷道变形现场监测曲线

Fig.21 Field monitoring curves of roadway deformation

## 4 结 论

(1) 南运巷属于典型的极不等压软岩巷道,通过对数值模拟及钻孔窥视结果进行分析可知,巷道开挖后,周边围岩裂隙呈“蝶形”分布。原支护方案针对性差,且锚杆锚固端位于围岩裂隙区范围内,未起到支护作用,致使巷道出现一系列大变形破坏特征。

(2) 围岩“蝶形裂隙区”集中出现在“蝶形塑性区”范围内,“蝶形裂隙区”内剪切裂隙分布范围较广,蝶叶部位主要为剪切裂隙,且蝶叶部位的剪切裂隙多围绕巷道呈“环形”分布;而巷道自由面附近同时存在剪切裂隙与拉伸裂隙,且较为密集。

(3) 蝶形塑性区内围岩最大主应力围绕巷道呈环形分布,在巷道上部最小主应力方向指向巷道中心,在巷道下部最小主应力方向背离巷道中心;塑性区内围岩最大/最小主应力比值较大,且主应力比值等值线呈“蝶形分布”。塑性区内围岩的应力特征使围岩具有较强的剪胀作用,剪胀作用使围岩向巷道空间内挤压,致使巷道产生大变形。

(4) 根据双向极不等压软岩巷道围岩大变形产生原因及裂隙分布特征,提出了以“全断面预应力短锚索+关键部位长锚索加强支护+注浆”为核心的差异化支护方案。现场监测表明,新支护方案能有效控制巷

道围岩的裂隙范围,使巷道变形在可控范围内,实现了巷道的长期稳定。

## 参 考 文 献(References):

- [1] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845-864.  
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845-864.
- [2] 康红普, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 煤矿千米深井巷道松软煤体高压锚注-喷浆协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 747-762.  
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, YANG Jianwei, et al. Roadway soft coal control technology by means of grouting bolts with high pressure-shotcreting in synergy in more than 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 747-762.
- [3] 赵志强, 马念杰, 刘洪涛, 等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 969-978.  
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 969-978.
- [4] 赵志强. 大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.  
ZHAO Zhiqiang. Mechanism of surrounding rock deformation and failure and control method research in large deformation mining roadway[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [5] 王卫军, 范磊, 马渝杰, 等. 基于蝶形破坏理论的深部巷道围岩控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 157-167.  
WANG Weijun, FAN Lei, MA Yujie, et al. Research on surrounding rock control technology of deep roadway based on butterfly failure theory[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 157-167.
- [6] 王卫军, 郭罡业, 朱永建, 等. 高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2747-2754.  
WANG Weijun, GUO Gangye, ZHU Yongjian, et al. Malignant development process of plastic zone and control technology of high stress and soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2747-2754.
- [7] 王卫军, 董恩远, 袁超. 非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 105-114.  
WANG Weijun, DONG Enyuan, YUAN Chao. Boundary equation of plastic zone of circular roadway in non-axisymmetric stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 105-114.
- [8] 袁超, 王卫军, 冯涛, 等. 基于塑性区扩展的巷道围岩控制原理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1051-1059.  
YUAN Chao, WANG Weijun, FENG Tao, et al. Research on control principles of surrounding rocks of roadway based on expansion of plastic zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1051-1059.
- [9] 刘洪涛, 陈子晗, 郭晓菲, 等. 采场等效孔模型及主应力旋转规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3646-3658.  
LIU Hongtao, CHEN Zihan, GUO Xiaofei, et al. Research on stope

- equivalent hole model and rotation law of principal stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3646–3658.
- [10] 赵志强, 马念杰, 郭晓菲, 等. 大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 2932–2939.  
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 2932–2939.
- [11] 吴祥业, 刘洪涛, 李建伟, 等. 重复采动巷道塑性区时空演化规律及稳定控制[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(10): 3389–3400.  
WU Xiangye, LIU Hongtao, LI Jianwei, et al. Temporal-spatial evolutionary law of plastic zone and stability control in repetitive mining roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3389–3400.
- [12] 贾后省, 马念杰, 朱乾坤. 巷道顶板蝶叶塑性区穿透致冒机理与控制方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1384–1392.  
JIA Housheng, MA Nianjie, ZHU Qiankun. Mechanism and control method of roof fall resulted from butterfly plastic zone penetration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1384–1392.
- [13] 董海龙, 高全臣, 张赵, 等. 两向不等压巷道围岩塑性区近似解及数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3360–3368.  
DONG Hailong, GAO Quanchen, ZHANG Zhao, et al. Approximate solution and numerical simulation for plastic zone of roadway surrounding rock under unequal compression in two directions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3360–3368.
- [14] 王志强, 武超, 石磊, 等. 基于复变理论的双向不等压圆形巷道围岩应力及塑性区分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 419–429.  
WANG Zhiqiang, WU Chao, SHI Lei, et al. Analysis of surrounding rock stress and plastic zone of two-way unequal pressure circular roadway based on complex variable theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 419–429.
- [15] 李季, 强旭博, 马念杰, 等. 巷道围岩蝶形塑性区蝶叶方向性形成机制及工程应用[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2838–2852.  
LI Ji, QIANG Xubo, MA Nianjie, et al. Formation mechanism and engineering application of the directionality of butterfly leaf in the butterfly plastic zone of roadway rock surrounded[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2838–2852.
- [16] 王卫军, 袁越, 余伟健, 等. 采动影响下底板暗斜井的破坏机理及其控制[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1463–1472.  
WANG Weijun, YUAN Yue, YU Weijian, et al. Failure mechanism of the sub-inclined shaft in floor under mining influence and its control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1463–1472.
- [17] LAVOIE T, EBERHARDT E, PIERCE M E. Numerical modelling of rock mass bulking and geometric dilation using a bonded block modelling approach to assist in support design for deep mining Pillars[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 156: 105145.
- [18] GARZA-CRUZ T, PIERCE M, KAISER P K. Use of 3DEC to study spalling and deformation associated with tunnelling at depth[C]//Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014: 421–434.
- [19] KUMAR VERMA R, NGUYEN G D, KARAKUS M, et al. A combined numerical-experimental approach to analyzing fracture initiation and development in brittle rocks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 104663.
- [20] 彭文斌. *FLAC 3D 实用教程*[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [21] LISJAK A, GRASSELLI G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(4): 301–314.
- [22] BOBET A, FAKHIMI A, JOHNSON S, et al. Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(11): 1547–1561.
- [23] 吴博文. 软岩巷道围岩裂纹演化机制与大变形控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
WU Bowen. Research on crack evolution mechanism and large deformation control of surrounding rock in soft rock roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [24] 阳伟. 硬岩破裂过程与机制的数值分析方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
YANG Wei. Study on numerical analysis method of hard rock failure process and mechanism[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [25] ITASCA. 3DEC: 3 dimensional distinct element code[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2016.
- [26] SUN X M, LI G, ZHAO C W, et al. Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling[J]. *Processes*, 2018, 7(1): 2.
- [27] 吴顺川. *岩石力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [28] 沈明荣, 陈建峰. *岩体力学*[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- [29] 王卫军, 董恩远, 赵志伟, 等. 预裂锚固体力学特性及锚固机理[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 82–89.  
WANG Weijun, DONG Enyuan, ZHAO Zhiwei, et al. Experimental study on mechanical properties of anchorage body and on anchorage mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 82–89.
- [30] 柏建彪, 张自政, 王襄禹, 等. 高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 16–28.  
BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, et al. Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 16–28.
- [31] 王晓卿, 阚甲广, 焦建康. 高应力软岩巷道底臌机理及控制实践[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(2): 214–220, 227.  
WANG Xiaoqing, KAN Jiaguang, JIAO Jiankang. Mechanism of floor heave in the roadway with high stress and soft rock and its control practice[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 214–220, 227.
- [32] 吴乐文. 岩石结构面注浆前后力学特性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.  
WU Lewen. Study on mechanical properties before and after grouting of rock structural surface[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013.