

# 基于软弱夹层损伤破坏模型的软岩巷道 支护优化研究

伍国军<sup>1</sup>, 陈卫忠<sup>1, 2</sup>, 杨建平<sup>1</sup>, 谭贤君<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 深部岩体巷道开挖中, 软弱夹层的存在很大程度上影响地下工程的稳定性。针对矿山深部软岩中软弱夹层易破坏离层的特点, 建立岩体软弱夹层指数形式的非线性离层损伤破坏模型, 并采用大型有限元软件 ABAQUS 对刘庄煤矿深部含软弱夹层的泥岩巷道支护方案进行优化, 针对巷道施工期间出现的底臃变形大及软弱夹层围岩变形失稳现象, 提出采用预应力底锚索、反底拱及全封闭钢拱架支护措施, 有效遏制了软弱夹层失稳破坏和底臃变形大的问题。研究成果为类似巷道工程支护提供有益借鉴。

**关键词:** 岩石力学; 软弱夹层; 支护; 巷道; 深部岩体

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2011)增 2 - 4129 - 07

## SUPPORT OPTIMIZATION OF SOFT ROCK ROADWAYS BASED ON DAMAGE CONSTITUTIVE MODEL FOR WEAK INTERCALATED LAYERS

WU Guojun<sup>1</sup>, CHEN Weizhong<sup>1, 2</sup>, YANG Jianping<sup>1</sup>, TAN Xianjun<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*)

**Abstract:** Weak intercalated layers, to a large degree, affect the stability of rock mass when excavating roadways in underground engineering. According to analyzing the features of damage and separation-growing of weak intercalated layers, the exponential nonlinear damage evolution model of weak intercalated layers is proposed; and the contrast optimization of supporting is done for some roadway buried in deep mudstone with weak intercalated layers by finite element software ABAQUS. Aiming at the problem of floor heaving to a large deformation and a serious buckling deformation in the vicinity of weak intercalated layers at the initial period of roadway excavation, measures of prestressed anchor reinforcement, inverted arch excavation and backfilling and steel arch of shoring are proposed, which can restrain separation-growing or damage of weak intercalated layers and deformation of rock mass effectively. The research results can provide useful reference for some similar roadways in deep soft rock mass.

**Key words:** rock mechanics; weak intercalated layer; support; roadway; deep rock mass

**收稿日期:** 2011 - 03 - 31; **修回日期:** 2011 - 04 - 26

**基金项目:** 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(51009133); 湖北省自然科学基金项目(2010CDB10401)

**作者简介:** 伍国军(1977 - ), 男, 博士, 2001年毕业于武汉大学土木建筑学院, 现任助理研究员, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: gjwu@whrsm.ac.cn

# 1 引言

随着我国工程建设规模的发展以及能源、资源的需求的增加，深部岩体工程日益增多，尤其是深部煤矿的开采建设。我国煤系地层绝大部分是由碳质页岩、碳质泥岩、砂质泥岩、泥岩、页岩和粉砂岩等强度较低的岩层或这些岩层的互层组成<sup>[1-3]</sup>。这些岩层由于受高地应力影响，易发生显著塑性变形且具有一定的延性，岩层之间的软弱夹层强度低，易发生变形和破坏，直接影响到工程的稳定性<sup>[4-5]</sup>。

软弱夹层是指岩体内存在的层状或带状的软弱薄层，包含岩体结构中的软弱结构面、裂隙破碎带，它直接制约着工程岩体变形和破坏发展过程，导致夹层压缩、层间错动和变形挤出等破坏现象。深部巷道的稳定性很大程度上由软弱夹层的分布状况及其力学特性所控制<sup>[6-7]</sup>。由于含软弱夹层的软岩巷道容易产生大变形，经常导致巷道底臃、冒顶或片帮等工程破坏事故，国内很多学者开展了此类方面的研究工作：杨建平<sup>[8]</sup>结合国投新集刘庄煤矿深部软岩及其软弱结构面的力学特性试验成果，提出软弱夹层的破坏准则及其损伤演化模型，并进行深部含软弱夹层的软岩巷道稳定性分析；张志强<sup>[9]</sup>应用岩土有限元软件 FINAL 研究了软弱夹层分布部位(拱顶、拱肩、边墙)对地下洞室围岩稳定性以及喷锚支护结构受力性状的影响；马念杰<sup>[10]</sup>针对巷道顶板中含有软弱夹层易导致巷道冒顶的问题，以层状复合岩梁为基础，通过铰接岩梁稳定性分析，对软弱夹层的厚度、位置对顶板稳定性的影响进行研究；王祥秋<sup>[11]</sup>对层状围岩地下洞室的稳定性有限元分析时，提出层状岩体与软弱夹层按横观各向同性材料，层间接触面则以带转动自由度的 Goodman 接触面单元进行模拟。

在深部软岩巷道稳定性数值计算中，考虑软弱夹层常常导致计算难以继续，得不到理想的计算结果。本文针对含软弱夹层巷道进行有限元稳定性分析时计算难以收敛的问题，对软弱夹层提出了一种指数形式的损伤演化模型，以大型有限元软件 ABAQUS 为平台，应用 ABAQUS 的 cohesive 单元模拟软弱夹层，对安徽刘庄煤矿含软弱夹层泥岩巷道的开挖支护方案进行对比优化分析。

# 2 软岩夹层损伤破坏模型

软弱夹层一般厚度很小、胶结差，地下工程开挖后容易产生离层，导致夹层张开或滑移错动。软弱夹层的损伤及其演化破坏与离层产生的张开或剪切位移密切相关，尤其是软弱夹层面由于应力状态改变而发生剪切错动而导致的围岩体失稳破坏，这是软岩巷道施工开挖特别关注的问题。对于岩石这种低抗拉性能材料而言，夹层的离层是由张拉应力控制时，当其拉应力达到抗拉强度时将失效破坏；巷道软弱夹层的离层更多是由于剪切错动变形控制时，其剪切应力开始逐渐增大，在发生损伤到最后失效破坏阶段，剪切应力逐渐减小直至 0，如图 1 所示。用应变等效概念来定义损伤时，软弱夹层损伤后的应力可用下式反映：

$$t_i = (1 - D)\bar{t}_i \quad (i = n, s, t) \quad (1)$$

式中： $t_i$  为考虑损伤后的剪应力； $\bar{t}_i$  为不考虑损伤时依据当前应变估算的应力值； $n, s, t$  为软弱夹层的 3 个剪应力方向； $D$  为损伤变量。

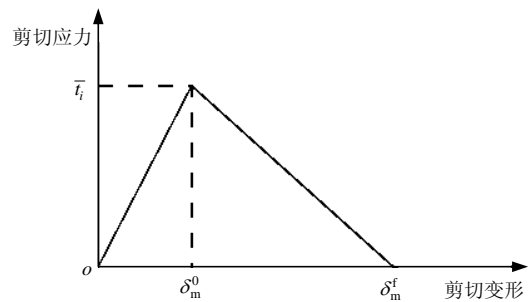


图 1 剪切应力与夹层面变形的线性关系  
Fig.1 Linear relationship between shear stress and deformation for weak intercalated layer

P. P. Camanho 和 C. G. Davila<sup>[12]</sup>曾对离层面的初始损伤到最后失效破坏建立了如下的线性损伤方程：

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m - \delta_m^0)}{\delta_m (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (2)$$

式中： $\delta_m^0$  为软弱夹层初始损伤时的剪切位移， $\delta_m^f$  为软弱夹层面的极限剪切位移， $\delta_m$  为任一应力状态下软弱夹层面的剪切位移。

剪切变形从  $\delta_m^0$  进入初始损伤到  $\delta_m^f$  最后破坏，应力变形为一斜直线的线性关系。本文提出一种指数形式的损伤演化模型，从软弱夹层的初始损伤到最后失效破坏，应力与变形为指数递减的非线性关系，这样不仅符合软弱夹层非线性的破坏过程，而且能最大程度地满足在考虑软弱夹层时巷道稳定性

分析中计算收敛。损伤演化方程变为：

$$D = 1 - \frac{\delta_m^0}{\delta_m} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp \left[ -\alpha \left( \frac{\delta_m - \delta_m^0}{\delta_m^f - \delta_m^0} \right) \right]}{1 - \exp(-\alpha)} \right\} \quad (3)$$

式中： $\alpha$  为常数。

剪切应力与变形的指数关系见图 2。

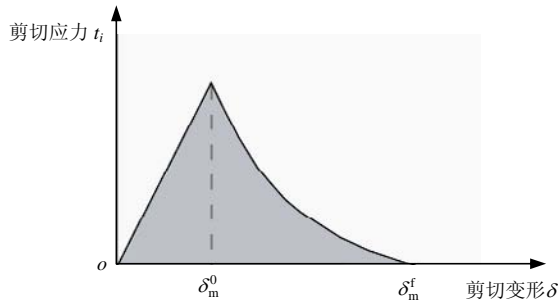


图 2 剪切应力与夹层变形指数关系

Fig.2 Exponential relationship between shear stress and deformation for weak intercalated layer

### 3 深部泥岩巷道支护优化研究

#### 3.1 工程地质概况

刘庄煤矿深部泥岩巷道，为基本顺层掘进，其平均采深在 -700 m 以下，穿过的主要岩层有 17-1 煤、炭质泥岩、砂质泥岩、泥岩，其中，17-1 煤以鳞片状、粉末状为主，厚 1.6 m；炭质泥岩为黑色，以粉末状为主，厚 1.7 m；砂质泥岩为灰色，块状，性脆易碎；泥岩为灰色，性软。根据巷道的地质剖面，从开挖巷道上方 20 m 到拱底下方 20 m 范围内，岩层依次为：泥岩、砂质泥岩、煤、炭质泥岩、煤、砂质泥岩和泥岩，各岩层之间均含有软弱夹层，巷道高 4.8 m，底边宽约 6.85 m。如图 3 所示。

由于巷道埋深较大，围岩地应力水平较高，巷道初始开挖时，便出现了巷道底臃、片帮致使开裂掉块等现象，最大底臃量达到 80 cm，如图 4、5 所示。因此，巷道的支护设计还需加强。

#### 3.2 巷道原有支护方案

支护方案采用锚杆+钢拱架+喷射混凝土(方案 1)。锚杆为中空注浆式，外径  $\phi 22$  mm，长 2.2 m，布置间距 2 m $\times$ 2 m；喷射混凝土厚度  $\delta = 10$  cm，钢拱架为 29# U 型钢，间距为 0.6 m，拱底不作支护，如图 6 所示。

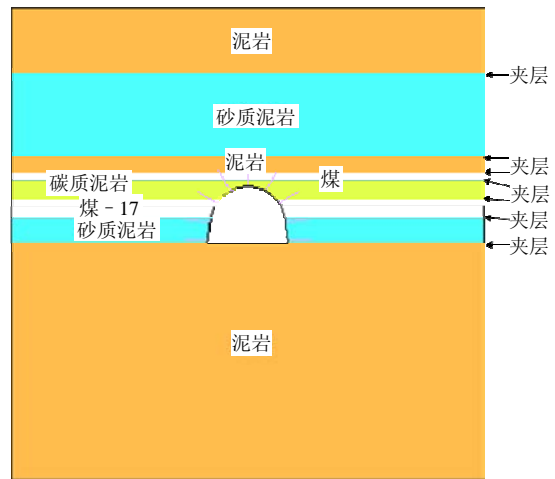


图 3 软岩巷道地质模型图

Fig.3 Geology model of roadway in soft rock mass

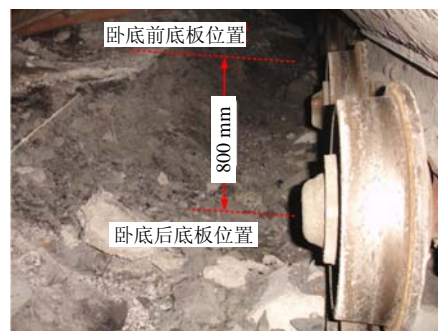


图 4 巷道底臃

Fig.4 Floor heave of roadway



图 5 巷道片帮开裂

Fig.5 Rib spalling and cracking

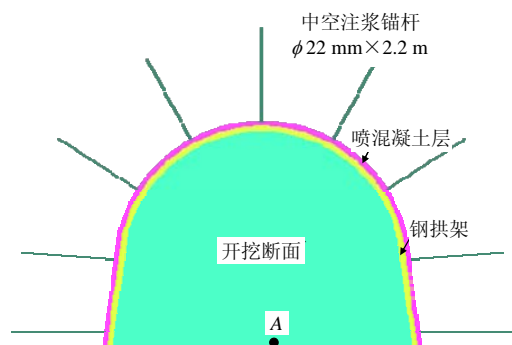


图 6 支护方案 1

Fig.6 Support scheme 1

### 3.3 巷道设计修改方案

根据巷道初始开挖出现的底臃、片帮等现象，在不大幅度提高工程支护成本的前提下，对原有支护设计方案进行了适当修改(方案 2)：考虑到巷道底臃现象比较突出，对巷道拱底实行反底拱施工开挖，同时铺设钢拱架，与上部钢拱架形成闭合整体结构，钢拱架支护参数同原有支护方案，并实行反底拱混凝土回填；由于巷道开挖面经过软弱夹层，除采用 3.0 m 注浆锚杆外，另在每个断面内施作 5 根预应力锚索  $\phi 19.8 \text{ mm} \times 9.2 \text{ m}$ (见图 7)，锚固力为 200 kN，布置间距 4 m $\times$ 4 m。

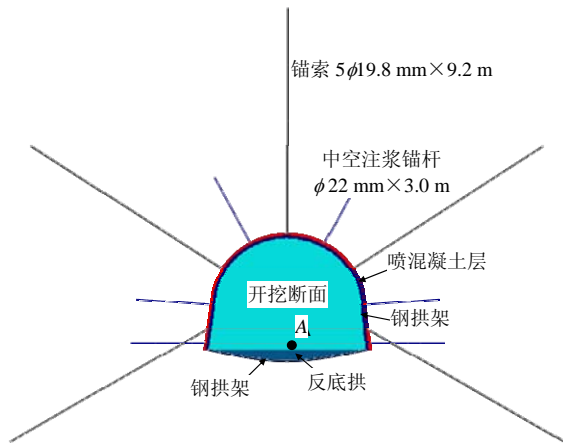


图 7 支护方案 2  
Fig.7 Support scheme 2

### 3.4 数值仿真分析

通过 ABAQUS 数值仿真计算，软弱夹层采用指数形式的损伤演化模型，采用 cohesive 单元模拟软弱夹层，对 2 种支护方案的计算结果进行对比分析。

#### 3.4.1 计算模型

巷道底部距模型顶部 20 m，整个计算模型尺寸 40 m $\times$ 40 m $\times$ 5 m。整个围岩体单元 4 949 个，节点 4 839 个。锚杆和锚索采用杆单元模拟，钢拱架和反底拱采用梁单元模拟，衬砌和回填混凝土采用实体单元模拟。

#### 3.4.2 围岩初始应力场及基本力学参数

根据地应力测试结果，水平侧压力系数为 1.5，以自重应力为主应力方向，得到深埋巷道的初始应力场。

岩体材料的物理力学参数如表 1 所示，围岩体蠕变参数采用在现场开展的三轴压缩流变试验成果<sup>[13]</sup>，蠕变方程为

$$\varepsilon = 3 \times 10^{-5} q^{1.2} t^{0.25} \quad (4)$$

表 1 岩体材料物理力学参数

名称	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c / \text{MPa}$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$
泥岩	2 500	3.0	0.30	0.40	35.0
碳质泥岩	2 500	2.0	0.30	0.45	38.0
砂质泥岩	2 500	7.0	0.30	0.70	38.0
17-1 煤	2 500	3.0	0.30	0.30	40.0
软弱夹层	-	0.1	0.40	0.10	12.0
注浆锚杆/钢拱架	7 800	210.0	0.30	-	-
锚索	7 800	210.0	0.30	-	-
混凝土	2 500	34.5	0.17	2.59	52.4

式中： $\varepsilon$  为应变， $q$  为蠕变应力(MPa)， $t$  为时间(min)。

软弱夹层损伤演化方程中参数  $\delta_m^i = 3 \text{ mm}$ ， $\alpha = 2$ 。

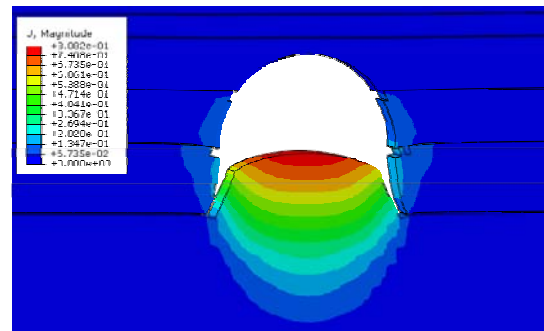
#### 3.4.3 计算结果分析

##### (1) 计算位移对比分析

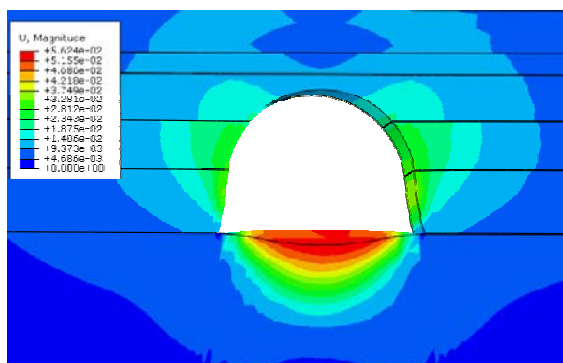
方案 1 未对巷道拱底进行支护，因此，巷道开挖流变后的底臃量达到 80.8 cm，与实际工程情况吻合；由于在巷道周边岩体存在多组软弱夹层，开挖后的软弱夹层岩体变形较大，最大变形接近 15 cm。方案 2 在巷道开挖流变后，由于采用反底拱混凝土回填和铺设了钢拱架，拱底中心底臃变形最大值仅为 5.6 cm，且由于施作了预应力锚索，软弱夹层的变形得到了有效遏制，最大变形小于 3 cm。2 种支护方案下的巷道围岩变形如图 8 所示。2 种支护方案下底板中心点 A(见图 6, 7)处 6 个月变形过程见图 9。

##### (2) 巷道围岩应力特征

2 种支护方案的计算结果表明：巷道开挖后，由于应力的重新分布，在巷道四周产生一定拉应力，主要分布在拱底和拱腰含软弱夹层的部位。方案 1 最大拉应力为 1.3 MPa；方案 2 由于采用了针对性的支护措施，最大拉应力仅为 0.01 MPa。2 种支护方案下最大主应力云图如图 10 所示。



(a) 方案 1



(b) 方案2

图8 2种方案下的巷道围岩变形(单位: m)

Fig.8 Deformations of rock mass for two schemes after excavation(unit: m)

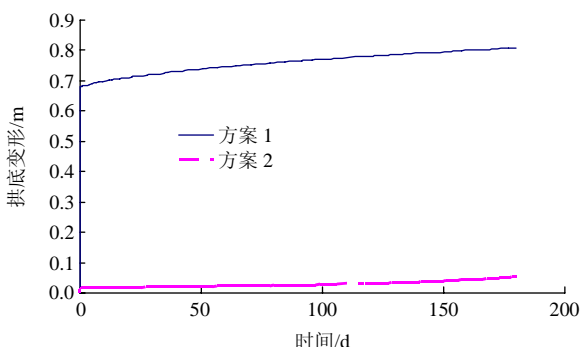
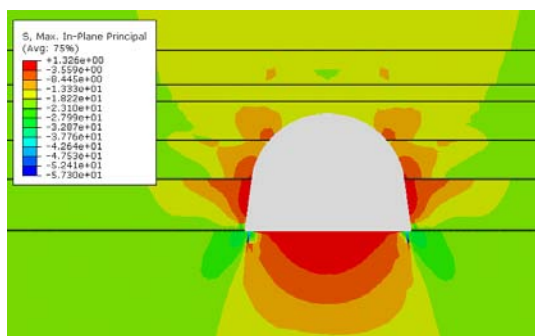
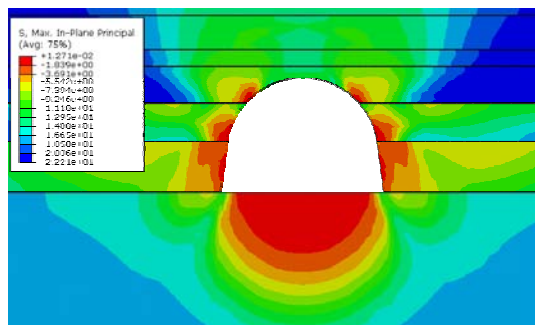


图9 2种方案下底板中心点A处变形曲线对比

Fig.9 Comparison of displacement curves of two schemes at point A in center of baseboard



(a) 方案1



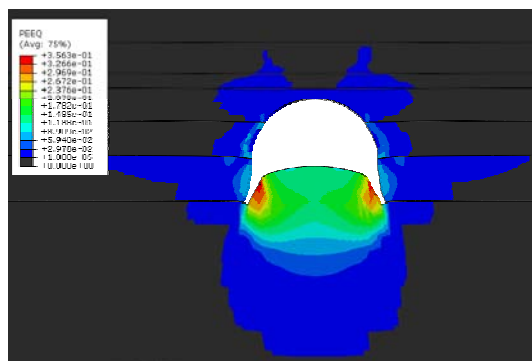
(b) 方案2

图10 2种方案下的最大主应力云图(单位: MPa)

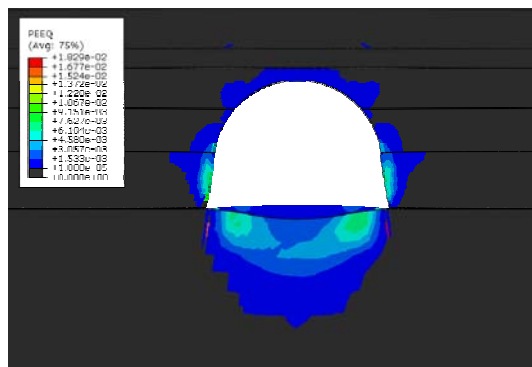
Fig.10 Maximum principle stresses for two schemes after excavation(unit: MPa)

### (3) 塑性区特征

由于深埋巷道地应力水平较高, 开挖后的隧洞周边均出现了屈服破坏, 尤其以拱底屈服最为厉害, 此外, 在拱腰的软弱夹层位置, 沿夹层长度方向也较为严重。方案1沿软弱夹层屈服范围为: 水平方向8.2 m, 竖直方向6.8 m; 方案2沿软弱夹层屈服范围为: 水平方向4.3 m, 竖直方向4.2 m。巷道围岩的破坏区域见图11所示。



(a) 方案1



(b) 方案2

图11 2种方案的塑性区分布图

Fig.11 Plastic zone distribution maps of rock mass for two schemes

### (4) 层理面损伤区对比

由于各岩层之间均有一定厚度的软弱夹层, 通过计算发现, 在巷道软弱夹层发生的损伤范围较大, 尤其是上部碳质泥岩和煤层之间的夹层, 损伤范围达到9.5 m; 方案2软弱夹层损伤范围稍小, 相对于方案1, 隧洞顶部上方软弱夹层几乎未出现损伤, 如图12所示。

### (5) 锚杆受力分布

图13为2种方案的锚杆受力分布云图, 由图可知, 由于锚杆承受了软弱夹层错位位移所产生的较大应力, 都几乎接近屈服强度。方案1中每根锚杆受力沿杆长方向都几乎接近最大应力, 方案2中除拱腰处应力较大之外, 其余部位的锚杆应力均

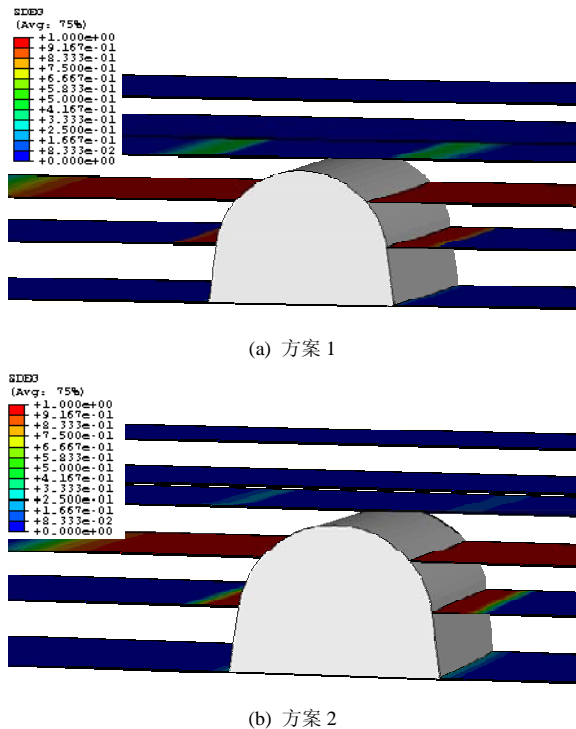


图 12 2 种方案软弱夹层损伤破坏分布图

Fig.12 Damage distributions of weak intercalated layers for two schemes

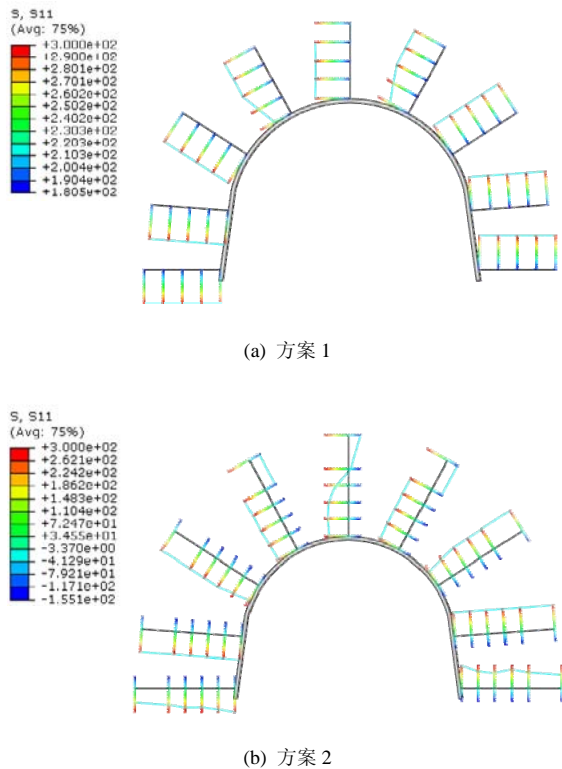


图 13 2 种方案锚杆受力分布云图(单位: MPa)

Fig.13 Stress distributions of anchor for two scheme (unit: MPa)

较小。

(6) 小结

通过上述 2 种支护方案数值仿真结果的对比可

知, 方案 2 由于针对性地采用了预应力锚索和反底拱回填及钢拱架支护措施, 有效遏制了深埋巷道底臃大变形及软弱夹层围岩失稳变形, 达到了预期效果(见图 14)。



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 14 2 种方案的支护效果

Fig.14 Supporting effects after adopting two schemes

4 结 论

(1) 深部软弱岩体巷道开挖中, 软弱夹层的分布状况及物理力学特性影响甚至决定着巷道围岩的稳定性, 开展考虑软弱夹层的深部岩体巷道稳定性研究具有重要意义。针对考虑软弱夹层的巷道稳定性分析中计算难以收敛的问题, 本文提出了一种符合工程实际的指数形式的非线性损伤演化模型。

(2) 通过对刘庄煤矿深部含软弱夹层泥岩巷道的支护方案的对比分析, 结果表明: 由于深部高地应力的客观存在, 围岩体流变效应明显, 巷道的底臃变形大问题特别突出, 最大变形达到 80.8 cm, 软弱夹层导致巷道出现片帮、支护开裂等现象。因此, 针对此类问题, 采用了预应力锚索和反底拱回填及钢拱架支护措施, 有效遏制了深埋巷道底臃大变形及软弱夹层围岩失稳变形: 拱底中心底臃最大变形仅为 5.6 cm, 巷道围岩的应力水平、塑性屈服以及

层理面损伤等都得到了较大改善。

### 参考文献(References):

- [1] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 2 - 3.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Mechanics for soft rocks[M]. Beijing: Science Press, 2002: 2 - 3.(in Chinese))
- [2] HE Manchao. New theory in tunnel stability control of soft rock mechanics of soft rock engineering[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 1996, 2(1): 39 - 44.(in Chinese))
- [3] 刘泉声, 张 华, 林 涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 732 - 3 737.(LIU Quansheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 732 - 3 737.(in Chinese))
- [4] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 4 - 5. (ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Press, 1990: 4 - 5.(in Chinese))
- [5] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 140 - 144.(ZHANG Dingli, WANG Yuehan, QU Tianzhi. Influence analysis of interband on stability stratified rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 140 - 144.(in Chinese))
- [6] 张 农, 李桂臣, 阚甲广. 煤巷顶板软弱夹层层位对锚杆支护结构稳定性影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2 753 - 2 758.(ZHANG Nong, LI Guichen, KAN Jiaguang. Influence of soft interlayer location in coal roof on stability of roadway bolting structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2 753 - 2 758.(in Chinese))
- [7] 芮勇勤, 徐小荷, 马新民, 等. 露天煤矿边坡中软弱夹层的蠕变变形特征分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1999, 20(6): 612 - 614.(RUI Yongqin, XU Xiaohu, MA Xinmin, et al. Study of nonlinear creep properties of weak layer in slope of open-pit coal mine[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 1999, 20(6): 612 - 614.(in Chinese))
- [8] 杨建平, 陈卫忠, 郑希红. 含软弱夹层深部软岩巷道稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2 864 - 2 870.(YANG Jianping, CHEN Weizhong, ZHENG Xihong. Stability study of deep soft rock roadways with weak intercalated layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2 864 - 2 870.(in Chinese))
- [9] 张志强, 李 宁, SWOBODA G. 软弱夹层分布部位对洞室稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 252 - 3 257. (ZHANG Zhiqiang, LI Ning, SWOBODA G. Influence of weak interbed distribution on stability of underground openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 252 - 3 257.(in Chinese))
- [10] 马念杰, 詹 平, 何 广, 等. 顶板中软弱夹层对巷道稳定性影响研究[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(4): 1 - 4.(MA Nianjie, ZHAN Ping, HE Guang, et al. On soft interlayer affecting roadway stabilization in roof[J]. Mineral Engineering Research, 2009, 24(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [11] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 含软弱夹层层状围岩地下洞室平面非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 729 - 732.(WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. 2D nonlinear FEA for underground openings located in the layered rock mass with softening joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 729 - 732.(in Chinese))
- [12] CAMANHO P P, DAVILA C G. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials[R]. [S.l.]: NASA/TM, 2002: 1 - 37.
- [13] 陈卫忠, 谭贤君, 吕森鹏, 等. 深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 735 - 1 744. (CHEN Weizhong, TAN Xianjun, LU Senpeng, et al. Research on large-scale triaxial compressive rheological test of soft rock in depth and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 735 - 1 744.(in Chinese))