

# 加固底板控制软岩巷道底鼓数值模拟和现场试验

李夕兵<sup>1</sup>, 何涛<sup>1</sup>, 姚金蕊<sup>2</sup>, 马春德<sup>1</sup>, 何忠国<sup>2</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

2. 贵州开磷集团, 贵阳 550302

**摘要** 随着开采深度的进一步增加, 贵州开磷集团马路坪矿区深部主要开拓及采准巷道支护困难, 原有的支护技术与措施失效, 巷道返修率高, 永久性巷道支护后存在经常性冒顶、片帮、底鼓等现象。针对开磷集团马路坪矿区深部红页岩巷道围岩严重破坏问题, 通过现场调查和理论分析, 提出加固底板控制巷道底鼓的措施, 在原支护方案的基础上设计了3种改进方案。使用离散元软件3DEC对上述原方案及其改进方案分别进行了数值模拟计算, 同时选取了100m试验巷道进行现场试验。模拟结果表明, 底角锚杆可以切断底板基角部位塑性滑移线从而控制巷道底鼓, 浇灌混凝土地坪并铺设钢筋网, 能增强底板的韧性, 保证底板围岩的整体性, 可以大大提高底板围岩抵抗岩块碎胀压力的能力, 防止底板围岩开裂挤出。现场测试数据显示联合支护方案减小底鼓量83%, 较好控制了巷道底鼓灾害, 解决了长期困扰开磷矿山红页岩巷道的支护难题。

**关键词** 加固底板; 深部岩体; 巷道底鼓; 数值模拟; 现场测试

中图分类号 TD353

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.34.004

## Numerical Simulation and In-situ Measurements of Reinforced Floor in Controlling Floor Heave of Soft Rock Roadway

LI Xibing<sup>1</sup>, HE Tao<sup>1</sup>, YAO Jinrui<sup>2</sup>, MA Chunde<sup>1</sup>, HE Zhongguo<sup>2</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Guizhou Kailin Group, Guiyang 550302, China

**Abstract** With the increase of depth in mining engineering, many support difficulties occurred in main development and preparation roadways in Maluping mining area of Guizhou Kailin Group. Traditional support technologies and measures failed to work. Problems in terms of the safety of the permanent roadways such as roof falling, rib spalling and floor heave were often found, to require repetitive rebuilding work. To control and prevent the severe destruction of the surrounding rocks in the deep red shale roadway of Maluping mining area, in-situ investigations and theoretical analysis were carried out and an approach was put forward to control the floor heave by strengthening the floor. Meanwhile, three new improved support schemes were adopted on the basis of the original support scheme. The original scheme and these three improved schemes were simulated by using 3DEC, a discrete element code, and then in-situ tests were performed in a 100m long experimental roadway. Simulation results indicate that floor anchors can be used to control the floor heave by cutting the plastic sliding line located in floor corners. An improvement of floor toughness, integrity and bearing ability against the bulking pressure of rocks was achieved by placing steel meshes on the concrete floor. The in-situ test data show that the combined support scheme would reduce the floor heave by 83%, which has solved the support problem in Kailin Mine, that had been affecting the mine production for a long time.

**Keywords** reinforced floor; deep rock mass; floor heave; numerical simulation; in-situ measurements

收稿日期: 2011-10-28; 修回日期: 2011-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB732004); 国家自然科学基金重点项目(50934006)

作者简介: 李夕兵, 教授, 研究方向为岩石破裂与岩石动力学, 电子信箱: xbli@mail.csu.edu.cn

## 0 引言

随着开采深度的不断增加,巷道底鼓问题越来越突出,严重影响了矿井的正常生产<sup>[1-4]</sup>。长期以来,国内外学者对巷道底鼓机制与控制技术做了很多有益的研究工作,取得了大量的应用成果。底鼓机制方面,早在1986年,Aafrouz<sup>[5]</sup>研究了底板的承载力,认为引起巷道底鼓的因素有21个,其中主要有底板为松软岩层、巷道围岩中存在较高的岩层应力、水理作用3个;2004年,姜耀东等<sup>[6]</sup>根据巷道所处的地质条件、底板围岩性质和应力状态的差异,底板岩层鼓入巷道的方式将底鼓分为挤压流动性底鼓、挠曲褶皱性底鼓、遇水膨胀性底鼓、剪切错动性底鼓4类。底鼓控制技术方面,从传统的底鼓控制研究只围绕巷道底板进行,发展到后来通过加固巷道的其他部位控制底鼓。李学华<sup>[7]</sup>和秦昊等<sup>[8]</sup>先后提出加固巷道顶板控制底鼓的观点,2005年,王卫军等<sup>[9]</sup>研究了加固两帮控制深井巷道底鼓的机制,何亚男<sup>[10]</sup>和杨生彬等<sup>[11]</sup>研究了底角锚杆在软岩巷道底鼓控制中的机制,2008年,李树清等<sup>[12]</sup>提出注浆加固底板。实际上加固巷道任何一个部位,均能在一定程度上减少底鼓量,从巷道的加固部位分析,加固巷道底角比加固两帮、顶角、顶板的底鼓控制效果更明显,角锚杆的最

佳角度为45°。然而,这些加固巷道其他部位控制底鼓的技术在一定程度上忽略了一些重要因素,如深部软岩巷道底板岩体软弱,强度较低,承载力不足等。

本文以贵州开磷集团马路坪矿为例,根据该矿750中段以下巷道围岩破坏的基本特征,通过现场调查,分析了巷道底鼓的主要原因。在原支护方案上提出了3种改进方案,并进行了数值模拟计算分析和现场试验,最终确定了控制深部软岩巷道底鼓的优化方案。

## 1 工程概况

开磷集团马路坪矿段位于洋水背斜东翼,为一单斜构造,地层倾向120°—130°,倾角30°—35°,地表标高约1300m。随着开采向纵深发展,地应力逐渐增大,巷道支护中暴露的问题越来越突出,高应力地段的巷道出现了严重变形和破坏(图1)。现场调查发现,该矿段软岩巷道的大变形破坏主要由顶板下沉、底鼓和两帮内移变形组成,其中严重的底鼓对矿山的生产影响最大。对于中段运输大巷,每年需要进行大量维护和维修工作,甚至重新支护,对中段运输产生很大影响。这类问题给深部软岩矿山的正常安全生产带来极大困难。



(a) 750m 中段运输巷冒顶情况

(a) Roof fall on 750m haulage roadway



(b) 700m 中段运输巷片帮情况

(b) Rib spalling on 700m haulage roadway



(c) 640m 中段运输巷底鼓现象

(c) Floor heave on 640m haulage roadway

图1 巷道破坏现场照片

Fig. 1 Photos of damaged roadway

## 2 支护对策研究

### 2.1 较高的围岩应力

井巷围岩中的高支撑压力是造成底鼓的决定性因素<sup>[13]</sup>。深部巷道遇到底鼓的情况比浅部巷道多,孤岛盘区或孤岛工作面中巷道的底鼓程度比其他盘区或工作面的巷道严重。这主要是由于开采深度增加,地压升高,存在着一个高支撑压力环境带所致。

现场调查表明,在巷道底板不作任何支护时,开采深度每增加100m,巷道底鼓量增加幅度为10%—15%。

### 2.2 底板岩体承载力不足

巷道底板岩体软弱,强度低,承载力不足是造成底鼓的直接原因<sup>[14]</sup>。马路坪矿750m中段以下巷道大多数布置在矿层底板软弱的红页岩中。红页岩虽不是传统意义上的地质软岩,其单轴抗压强度超过25MPa,在浅部低应力状态时表现出脆性岩石的变形特征,但在高应力条件下会发生明显脆

延转化,发生显著的塑性变形,表现出较明显的工程软岩性质,长期强度降低,流变特征增强。

### 2.3 对原有支护设计的改进措施

马路坪矿原支护方式在750m中段以上支护效果良好,从750m中段往下,巷道底鼓现象越来越严重,主要原因是进入深部,地应力增大,底板变得破碎,而现有支护方案轻视了底板支护。由于底板无支护或支护较迟,使岩体内存储的能量和压力沿底板释放,造成严重底鼓并使两帮和底角向内收敛,造成两帮破坏。

为了加强底板的支护,提出打底角锚杆和浇灌混凝土整体地坪来控制层状构造发生挠曲褶皱形底鼓<sup>[15-16]</sup>。因此,在原支护设计基础上,提出3种改进方案。方案1:在底板浇灌300mm厚的混凝土地坪并铺设钢筋网;方案2:增加底角锚杆,与地坪成45°角;方案3:联合支护,即打底角锚杆+浇灌混凝土地坪。各种支护方案如图2所示。

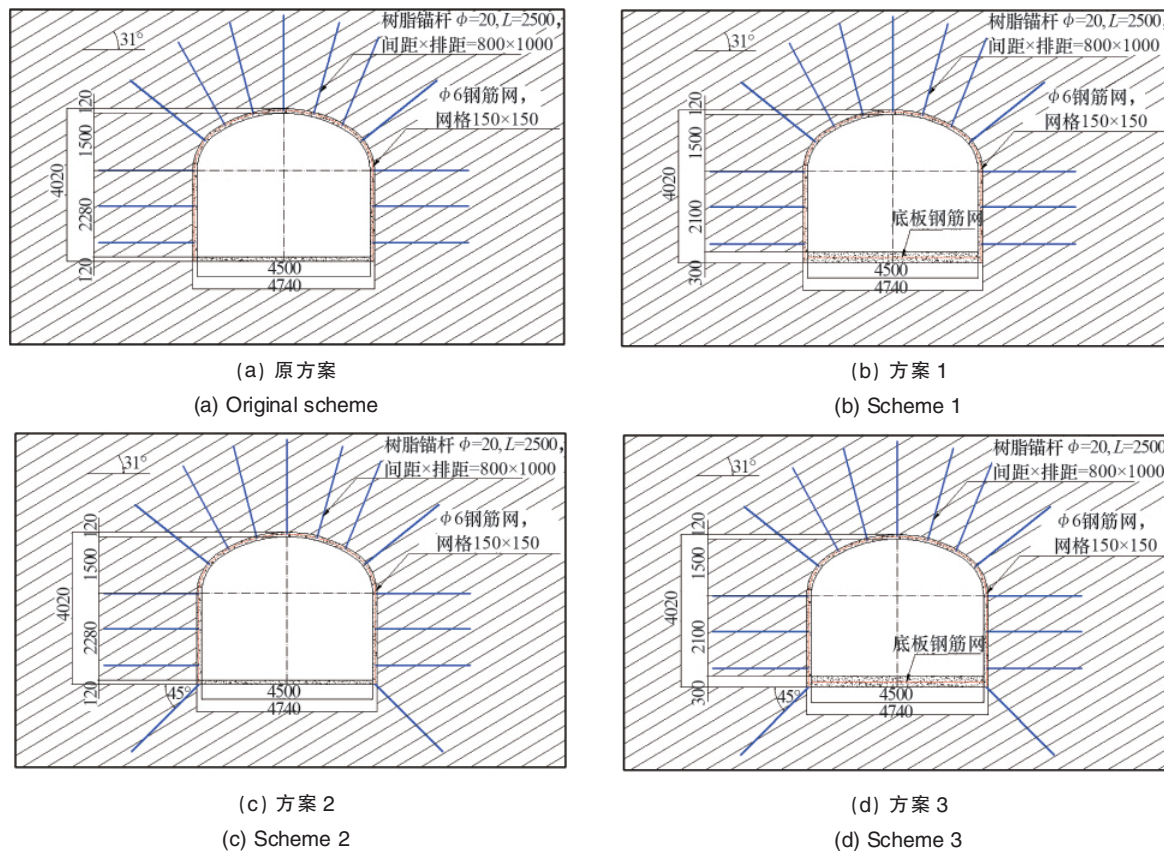


图 2 各种方案支护断面图 (单位: mm)

Fig. 2 Sectional drawing under various schemes (unit: mm)

### 3 数值模拟计算分析

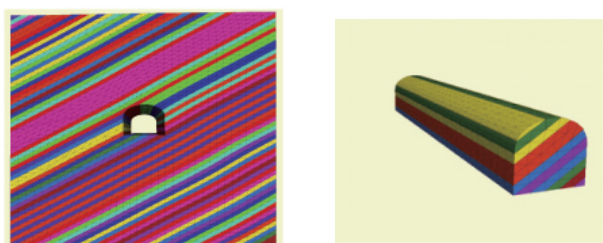
为了验证其有效性,采用离散元数值模拟软件对深部高应力条件下新开挖巷道进行 4 种情况的计算分析,即模拟分析巷道在开挖后使用原支护方案和其他 3 种改进方案支护时的围岩变形情况。

#### 3.1 数值模拟计算模型

模型采用应力边界条件,模型上表面施加均匀的垂直压应力和水平应力,模型两侧施加随深度变化的水平压应力;数值模拟计算的区域尺寸为 30m×30m×30m,模型左右、前后边界和底部边界采用固定边界位移,模型共产生了 3304868 单元,3319892 节点,根据圣维南原理,模型满足精度要求。层状节理巷道在初始地应力作用下运行 10050 步(约 1h)达到平衡状态,对岩体采用理想弹塑性模型,屈服准则为 Mohr—Coulomb 强度准则;对于岩体节理,采用弹性模型,屈服准则为 Coulomb 滑动准则,采取自适应阻尼。计算模型如图 3 所示,计算中所取的主要岩石力学参数如表 1 所示。

#### 3.2 数值模拟结果分析

图 4 为各种方案下的巷道围岩位移云图。从图 4(a)可以看出原方案巷道的整体围岩变形中底鼓量所占比例最大,极值出现在离右底角较近的底板处,约为 46mm,沿巷道右拱肩与左底角连线方向位移量也较大。图 4(b)显示浇灌混凝土地坪后巷道位移场发生变化,底板最大位移为 35mm,比不支护



(a) 模型断面图 (b) 模型开挖部分  
(a) Sectional drawing of model (b) Excavation part of model

图 3 计算模型

Fig. 3 Numerical simulation model

表 1 数值模拟使用的岩石力学参数  
Table 1 Rock mechanical parameters in numerical simulation

力学参数	白云岩	磷矿石	砂岩	红页岩
弹模 $E/\text{GPa}$	7.5	25.0	20.0	8.9
泊松比 $\mu$	0.32	0.22	0.20	0.32
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	35	42	45	45
容重 $\rho/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	26.6	27.6	25.2	27.5
黏聚力 $c/\text{MPa}$	7.8	20.0	15.0	8.0
抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$	3.0	5.0	4.5	2.67

情况减小了。图 4 (c) 中打了底角锚杆, 巷道底板位移为 22.5mm, 对巷道底鼓起到了抑制作用。图 4(d) 使用了联合支

护, 巷道周边分布均匀, 能很好地控制底板的位移量, 对控制底鼓量有明显效果。

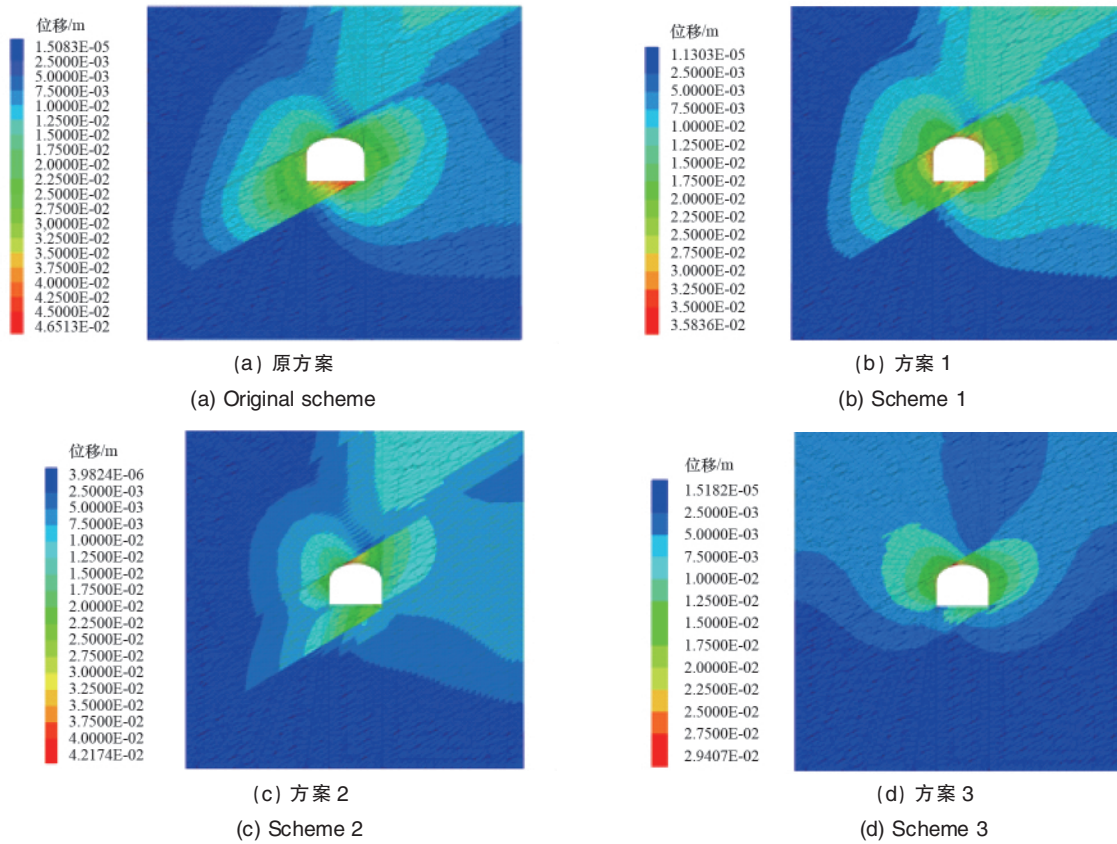


图 4 各种方案巷道围岩位移云图

Fig. 4 Cloud displacement of surrounding rocks under various schemes

分析模型中各关键部位(两帮、顶板和底板)的变形量, 结果如表 2 所示。巷道开挖后, 采用原方案进行支护, 巷道的围岩位移量均最大; 方案 1 和方案 2 一定程度上能减小围岩位移; 方案 3 效果最明显, 与原有支护方式比较, 两帮收敛量、顶板下沉量、底鼓量分别降低了 71%、49%、81%。

图 5 为各种方案下的巷道围岩塑性区分布图。从图 5(a) 可以看出, 巷道开挖后, 采用原方案支护, 巷道周边围岩的塑

表 2 4 种支护方案下围岩位移变形量

Table 2 Displacement distortion under four solutions

编号	两帮收敛量/mm	顶板下沉量/mm	底鼓量/mm
原方案	61.3	32.5	46.5
方案 1	45.0	30.5	35.0
方案 2	21.5	25.0	22.5
方案 3	17.5	16.5	8.5

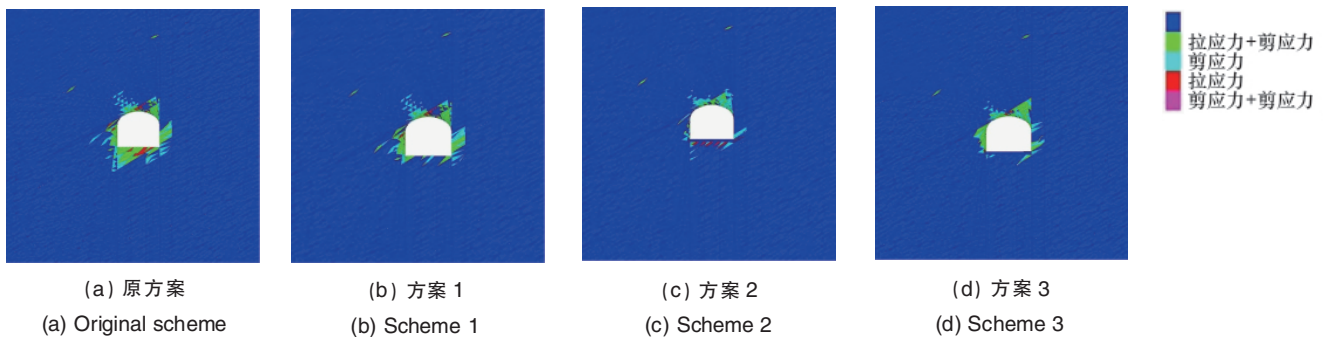


图 5 各方案巷道围岩塑性区分布图

Fig. 5 Surrounding rock plastic zones under various schemes

性区范围很大,主要分布在底板和两帮,在顶板、底板的个别部位及巷道的左拱角出现了拉应力集中的关键部位,易出现较大破坏,且塑性区范围两帮和底板大于拱顶,两帮中下部大于中上部。图 5(b)中浇灌混凝土地坪,在地坪中铺设金属网,底板附近的塑性区明显减小。图 5(c)增加底角锚杆后,巷道围岩塑性区明显减小,这是由于底角锚杆在承受轴向荷载的同时发挥了自身的抗弯性能,有效切断了底角板基角部位的塑性转移线,而且将应力向岩体深部传递。图 5(d)采用联合支护,底板塑性区为 4 种方案中最小,且两帮和顶板塑性区也相应减小,能够很好地控制底板围岩的破坏。

#### 4 现场测试

选取该矿 700 中段南大巷 100m 新开拓巷道为试验巷道,分成 4 段分别采用原支护方案和其他 3 种方案进行支护,并对巷道围岩收敛变形情况进行了为期 6 月的监测。试验中使用的测量工具为中国铁道科学研究院西南分院隧道研究室开发的 SWJ-IV 型隧道收敛计。断面测点采用三角形布置,分别布置在拱顶中央、距底板 1.5m 处的两侧帮壁上、底板中央,具体布置如图 6 所示。测量从巷道开挖后一周开始,第 1 月每 2 天测 1 次,第 2 月每周测 1 次,第 3 月每 15 天测 1 次,第 4 月测 1 次,第 6 月测 1 次,直至位移不变化或变化很小,停止测量,每个试验断面的测点采取相同的测量频率。监测结果如表 3 所示。

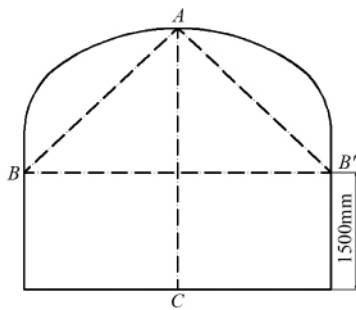


图 6 试验巷道测点布置图

Fig. 6 Layout of tests measurement points in roadway

表 3 各支护方案围岩 6 个月内收敛变形情况  
Table 3 Displacement distortion under several solutions in six months

编号	两帮收敛量/mm	顶板下沉量/mm	底鼓量/mm
原方案	68.75	38.57	52.43
方案 1	47.64	30.08	32.18
方案 2	24.12	28.76	21.41
方案 3	19.94	17.47	8.78

从表 3 可以看出,方案 1 和方案 2 对围岩的控制效果均比原有支护优越,底鼓量得到一定程度的控制;方案 3 对围

岩变形的控制最为理想,与原有支护方式比较,两帮收敛量、顶板下沉量、底鼓量分别减小了 71%、55%、83%,与数值模拟结果比较一致。方案 3 巷道支护段外观形貌保持非常好,巷道表面平直光滑,无任何破裂、开缝和崩块等破坏迹象。

由图 7 可以看出,原支护方案的底鼓量最大且未达到稳定,有继续增大的趋势;通过浇灌混凝土地坪和打底角锚杆加固底板都能够很好地控制底鼓现象,其中方案 3 的底鼓量只有 8.5mm,为原方案的 16.2%,很好地控制了底鼓现象。

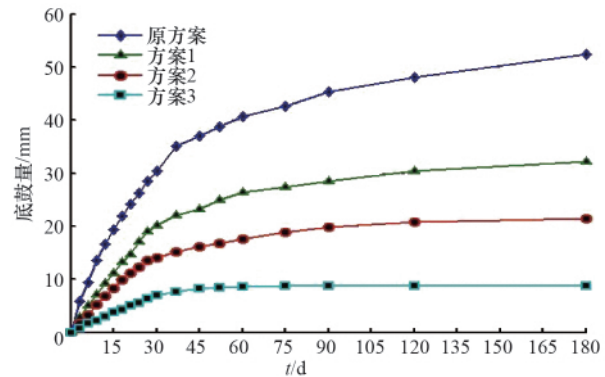


图 7 4 种方案下底鼓量的变化

Fig. 7 Floor heave under various situations

由图 8 可以看出,使用方案 3 支护围岩,巷道的顶板、底板和两帮在 50d 左右变形速率趋近于 0,表示巷道围岩变形达到稳定。

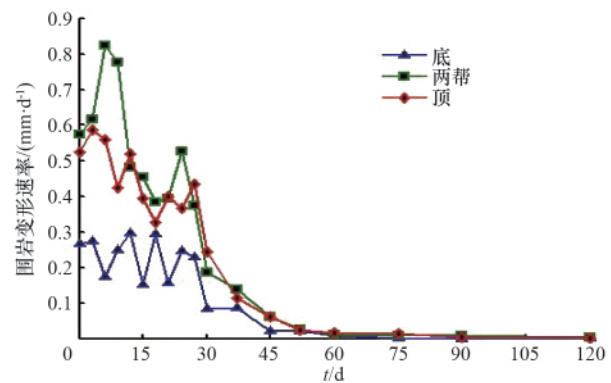


图 8 方案 3 围岩变形速率

Fig. 8 Rock deformation under scheme 3

通过数值模拟和现场实验表明,方案 3 能够有效控制围岩变形,特别是能够很好解决巷道底鼓问题。

#### 5 推广应用情况

联合支护方案比原有支护方式具有较明显的优越性,适合在开磷集团下属各矿山进行推广应用,图 9 为其中一个试点采用联合支护方案支护后 6 月的现场照片。可以看出,联合支护方案下巷道断面形状保持较好,应用效果良好。



图9 应用联合支护方式的巷道现场照片

Fig. 9 Photos of roadway under combined scheme

## 6 结论

(1) 数值模拟结果和现场测试结果比较吻合,为方案的确定提供了理论基础。

(2) 联合支护方案与原有支护方式比较,两帮收敛量、顶板下沉量、底鼓量分别减小了71%、55%、83%,很好地控制了围岩变形,解决了困扰开磷矿山红页岩巷道的支护难题。

(3) 底角锚杆可以切断底板基角部位塑性滑移线,对控制巷道底鼓有较大的作用。

(4) 浇灌混凝土地坪并铺设钢筋网,能增强底板的韧性,保证底板围岩的整体性,可以大大提高底板围岩抵抗岩块膨胀压力的能力,防止底板围岩开裂挤出。

(5) 软岩巷道支护要重视对底板的支护,尽可能采取全断面的支护形式。

(6) 联合支护方案在开磷集团下属矿山已经开始推广应用,效果良好。

## 参考文献 (References)

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2853-2858.  
He Manchao. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2853-2858.
- [2] 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[C]//香山科学会议, 科学前沿与未来(第六集). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179-191.  
Xie Heping. Resources exploitation under high ground stress—present status, basic scientific problems and perspective [C]//Xiangshan Science Conference, Foreland and Future of Science (Vol 6). Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 179-191.
- [3] 张驰, 兰永伟. 深部开采中软岩巷道的支护形式 [J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 47-49.  
Zhang Chi, Lan Yongwei. *Coal Technology*, 2007, 26(8): 47-49.
- [4] 王其胜, 李夕兵, 李地元. 深部开采流变性软岩巷道底鼓原因与防治 [J]. 金属矿山, 2008(1): 47-50.  
Wang Qisheng, Li Xibing, Li Diyuan. *Metal Mine*, 2008(1): 47-50.
- [5] Afrouz A. Geotechnical assessment of the bearing capacity of coal mine floors [J]. *International Journal of Mining and Deological Engineering*, 1986, 2 (6): 297-312.
- [6] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2396-2401.  
Jiang Yaodong, Zhao Yixin, Liu Wengang, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2396-2401.
- [7] 李学华, 王卫军, 侯朝炯. 加固顶板控制巷道底鼓的数值分析[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 436-439.  
Li Xuehua, Wang Weijun, Hou Chaojiong. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(4): 436-439.
- [8] 秦昊, 茅献彪, 徐金海. 软弱顶板煤巷围岩变形破坏特征数值分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 289-292.  
Qin Hao, Mao Xianbiao, Xu Jinhai. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(3): 289-292.
- [9] 王卫军, 冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808-811.  
Wang Weijun, Feng Tao. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(5): 808-811.
- [10] 何亚男. 加固巷道帮、角控制底鼓的研究 [J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 1-5.  
He Ya'nan. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(3): 1-5.
- [11] 杨生彬, 何满朝, 刘文涛, 等. 底角锚杆在深部软岩巷道底鼓控制中的机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2913-2920.  
Yang Shengbin, He Manchao, Liu Wentao, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 2913-2920.
- [12] 李树清, 冯涛, 王从陆, 等. 葛泉矿软岩大巷底鼓机理及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1450-1455.  
Li Shuqing, Feng Tao, Wang Conglu, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1450-1455.
- [13] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. *Soft rock engineering mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究 [J]. 煤炭学报, 1996, 21(23): 225-230.  
Qian Minggao, Miu Xiexing, Xu Jialin. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(23): 225-230.
- [15] 谢卫红, 陆士良, 张玉祥. 挠曲褶皱性巷道底鼓机制分析及防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 57-60.  
Xie Weihong, Lu Shiliang, Zhang Yuxiang. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 57-60.
- [16] 景海河, 胡刚, 何翔. 倾斜岩层巷道底鼓机理的数值模拟 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2001(1): 14-17.  
Jing Haihe, Hu Gang, He Xiang. *Ground Pressure and Strata Control*, 2001(1): 14-17.

(责任编辑 郑伟, 刘志远)