

# 大理深跨采巷道变形机理分析

李廷春<sup>1</sup>, 吕学安<sup>1</sup>, 刘培海<sup>2</sup>, 王建亭<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 肥城矿业集团 杨营能源有限责任公司, 山东 梁山 272600)

**摘要:** 巷道受采动影响时, 应力重新分布, 围岩处于卸压状态, 导致巷道变形严重。针对这一现象, 在华恒煤矿-1000 m 水平副暗斜井, 利用现场实时在线监测数据和数值模拟计算, 分析了跨采巷道随采煤工作面推进的变形破坏规律。监测数据表明, 巷道变形包括顶板下沉、两帮移近和底鼓, 其中底板变形破坏最严重。数值模拟分析得出, 跨采后的巷道底板和右帮塑性区范围比跨采前有较大增长; 在巷道顶底板处, 围岩垂直应力处于卸压状态, 水平应力出现应力集中现象。垂直应力的卸压和水平应力的横向作用是造成巷道底鼓的力学原因, 底板没有采取支护措施是造成底鼓的直接原因。

**关键词:** 跨采巷道; 变形机理; 监测; 数值模拟; 应力

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)06-0040-06

## Analysis on Deformation Mechanism of Deep Roadway in Crossing Mining

Li Tingchun<sup>1</sup>, Lü Xuean<sup>1</sup>, Liu Peihai<sup>2</sup>, Wang Jianting<sup>2</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Yangying Energy Co. Ltd, Feicheng Mining Group, Liangshan, Shandong 272600, China)

**Abstract:** Crossing mining roadways are liable to be severely deformed with the influence of abutment pressure in crossing mining when the stress of surrounding rock is redistributed. To solve the problem, the methods of real-time online monitoring system and numerical simulation were employed to analyze the laws of roadway deformation during crossing mining in -1000 Deputy inclined shaft roadway of Huaheng coal mine. The Monitoring data show that the deformations include the roof subsidence, two sides crowding and the floor heaving, and deformation of the bottom floor is the most serious. The numerical simulation results show that plastic area of the floor increases, the vertical stress of surrounding rock is in the unloading state, and horizontal stress appears to concentrate in the roof and floor. The vertical stress relief and the lateral effect of horizontal stress are the mechanical causes of roadway floor heave while the lack of supporting measures in floor is the direct cause of the floor heave.

**Key words:** cross-mining roadway; deformation mechanism; monitor; numerical simulation; stress

随着煤矿开采深度的增加, 围岩压力越来越大, 降低了巷道围岩的稳定性。据统计, 80% 的煤矿巷道都要受到采动的影响<sup>[1-2]</sup>, 导致跨采巷道的围岩稳定性进一步降低, 变形破坏严重。国内外学者对跨采巷道的变形机理进行了大量的研究, 多数采用数值模拟的方法。Brady 等<sup>[3-4]</sup> 对跨采工作面下方巷道中的应力分布进行了研究, 得出跨采后煤体下方一侧为增压区, 采空区下方一侧为减压区, 引起跨采巷道应力重分布, 影响巷道的稳定性; 刘传孝等<sup>[5]</sup> 采用 FLAC 软件, 数值模拟了 7 种围岩结构型式的巷道, 研究不同采动应力环境

收稿日期: 2013-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279096); 山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM030)

作者简介: 李廷春(1968—), 男, 山西朔州人, 教授, 博士, 主要从事裂隙岩体力学特性方面的研究工作。

E-mail: tchli\_sd@163.com

中的松动圈发育规律;汤雪唯<sup>[6]</sup>对跨采巷道的围岩应力分布和变形规律进行模拟研究,得出在跨采过程中,底板巷道依次处于原岩应力区、应力升高区、卸压区和卸压稳定区,且巷道的主要变形发生在工作面跨巷道的时段;张春等<sup>[7]</sup>数值模拟了骑跨采巷道在不同垂距及水平距离下巷道围岩的稳定性,研究表明巷道围岩变形以底鼓变形最大,巷道围岩的应力、变形及塑性区分布呈明显的不对称性;李佳佳<sup>[8]</sup>对不同情况下的跨采巷道稳定性进行了数值模拟研究,得出底板巷道应力状态的不同决定了巷道变形的阶段性。实时在线监测跨采巷道变形规律的资料较少,本研究结合华恒煤矿-1 000 m 水平副暗斜井的实时在线监测数据和数值模拟计算,分析了跨采巷道随采煤工作面推进过程中的变形破坏规律。

## 1 工程概况

### 1.1 -1 000 m 水平副暗斜井巷道概况

华恒煤矿地处鲁中腹地新泰市境内,目的是为形成-1 000 m 水平生产系统;一般埋深超过 800 m 的巷道属于大理深巷道,-1 000 m 水平副暗斜井埋深为 1 200 m,属于典型的大理深巷道,大变形、高地压、难支护等问题比浅埋深巷道严重;巷道型式为直墙半圆拱,宽度 4.6 m,高度 3.8 m,巷道围岩以粉砂岩和细砂岩为主,巷道的支护形式为“二次锚网喷”支护;副暗斜井位于 41106 采煤工作面的底板中。

### 1.2 采煤工作面概况

41106 采煤工作面的煤层厚度为 1.50~1.96 m,平均厚度为 1.78 m;煤层倾角为 14°~22°,平均倾角为 17°。41106 采煤工作面与跨采巷道的位置关系如图 1 所示。

## 2 跨采巷道的监测及数据分析

### 2.1 巷道监测方案

为了解跨采巷道在跨采期间的变形破坏规律,在跨采段布置了 1 号和 2 号监测断面进行锚杆轴力和收敛位移监测。每个断面上设 5 个锚杆轴力监测点,锚杆测力计在巷道支护完成后安装,测点布置如图 2(a) 所示;在每个断面上布置 4 个测点和 6 条测线进行收敛位移监测,测点布置如图 2(b) 所示。

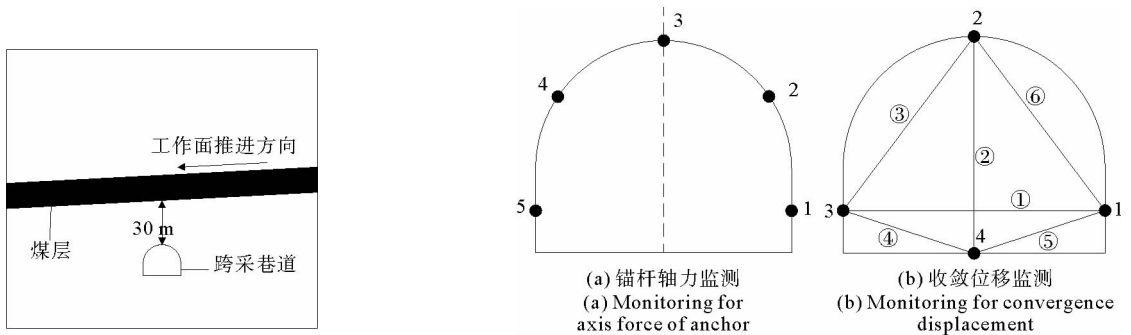


图 1 跨采巷道与煤层的位置关系示意图

Fig. 1 Position relationship of roadway and working face

图 2 监测点布置图

Fig. 2 Layout of monitoring points

### 2.2 监测数据分析

为了分析方便,取跨采巷道拱顶上方为坐标原点,沿工作面推进方向为坐标轴正向。

#### 1) 锚杆受力监测分析

图 3 为 1 号和 2 号断面随跨采工作面推进的锚杆受力图,右帮、右帮脚、顶板、左帮角和左帮分别代表图 2(a)中的 1,2,3,4 和 5 点。

图 3 反映了在工作面推进过程中,锚杆受力的变化规律。锚杆受力在距工作面距离为-100~-70 m 时锚杆受力增长比较缓慢;在-70~40 m 时,锚杆的受力变化比较明显;在 40~100 m 时,锚杆受力趋于平稳。在跨采过程中,1 号和 2 号监测断面顶板和右帮处锚杆受力变化较其他位置明显,比跨采前增加了 2~3 倍。

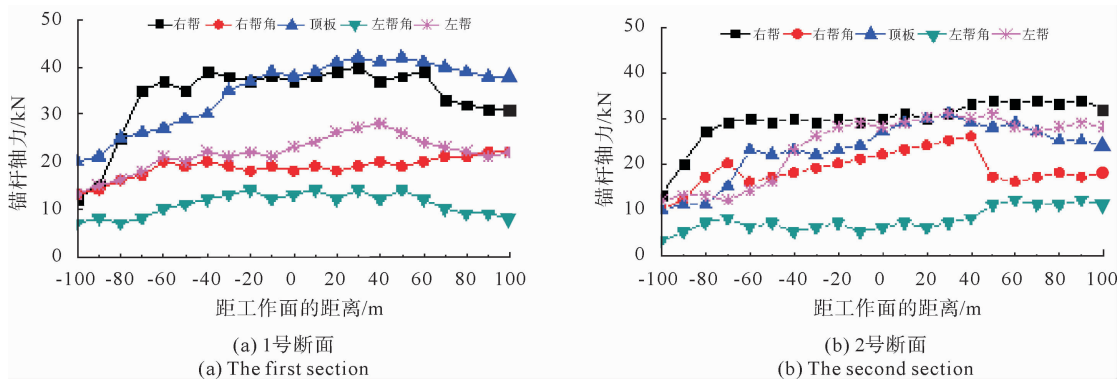


图 3 1 号和 2 号断面随跨采工作面推进的锚杆受力

Fig. 3 The anchor's force of the first and second section with cross mining working face advancing

### 2) 巷道收敛位移测

依据图 2(b) 所示 6 条测线随跨采工作面推进的测量结果, 计算得到 1 号和 2 号断面 4 个测点的收敛位移如图 4 所示。

图 4 反映了工作面推进过程中, 巷道位移的变化规律。在跨采期间巷道的变形包括底鼓、两帮移近和顶板下沉, 底板的变形破坏比较严重。1 号断面和 2 号断面的变形分为 3 个阶段, 变形初期、变形活跃期和变形稳定期。在距工作面为  $-100 \sim -50$  m 时, 巷道处于变形初期, 变形增长比较缓慢; 在距工作面为  $-50 \sim 60$  m 时, 巷道处于变形活跃期, 变形比较剧烈, 底鼓比跨采前增加了 400 mm 以上; 在距工作面为  $60 \sim 100$  m 时, 巷道处于变形稳定期, 此时变形趋于稳定, 几乎不再增长。

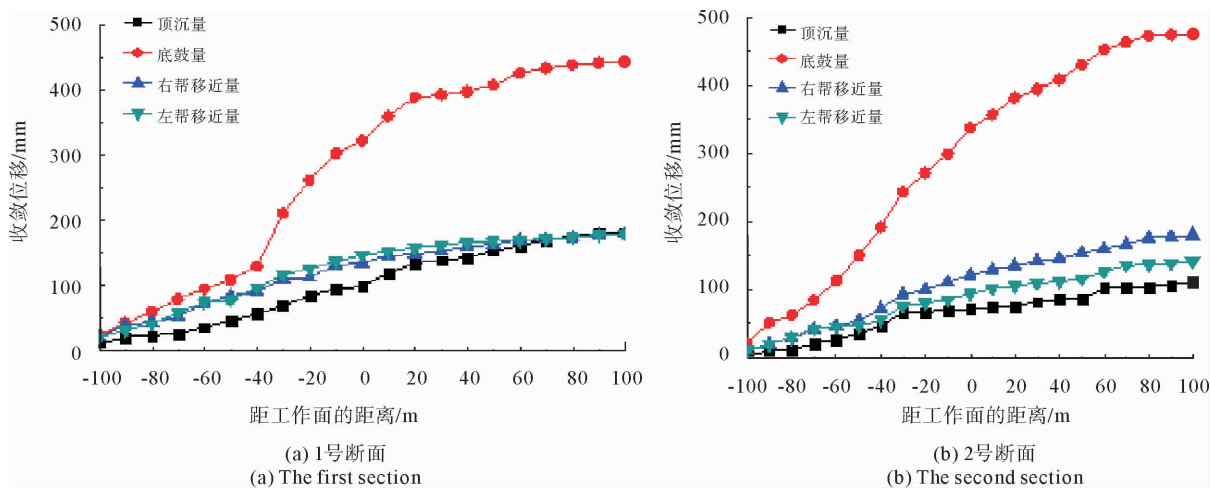


图 4 1 号和 2 号断面收敛位移

Fig. 4 Convergence displacement of the first and second section

## 3 数值模拟

通过现场实时在线监测, 可以了解跨采巷道的变形规律, 但不能了解跨采巷道的塑性区和应力场的变化规律。以华恒煤矿  $-1000$  m 水平副暗斜井为工程背景, 采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>[9] 建立如图 5 所示的计算模型, 分析了跨采巷道的塑性区和应力场的变化规律。

### 3.1 模型的建立

模型尺寸为  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ , 巷道宽度为  $4.6 \text{ m}$ , 高度为  $3.8 \text{ m}$ ; 顶部为应力边界, 底部为垂直约束和水平约束, 左右边界为水平约束; 采用摩尔库伦准则。根据物理力学试验确定围岩的物理力学参数, 如表 1 所示。

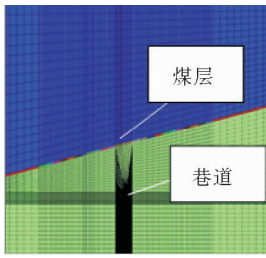


图5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

表1 围岩的物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

名称	弹性模量/ GPa	内聚力/ MPa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
煤	3.5	0.7	0.30	1 400	26
粉砂岩	21.0	3.7	0.24	2 500	35
细砂岩	20.0	3.3	0.23	2 700	39

### 3.2 模拟结果分析

为了分析方便,仍取跨采巷道拱顶为坐标原点,沿工作面推进方向为坐标轴正向。

#### 1) 锚杆受力与塑性区结合图

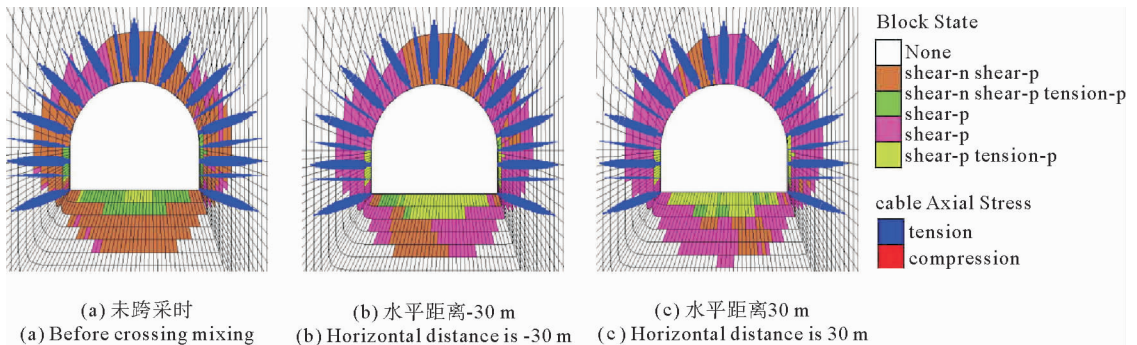


图6 锚杆受力与塑性区结合图

Fig. 6 The displacement plastic zone and bolt's stress

由图6所示的巷道锚杆受力与塑性区结合图可以得出:①跨采前,巷道底板、顶板、左帮和右帮围岩的塑性区范围分别为2 200,1 810,1 170和1 280 mm;②在底板巷道与工作面的水平距离为-30 m时,右帮围岩的塑性区范围比跨采前增加了200 mm,其他位置没有明显变化;③在底板巷道与工作面的水平距离为30 m时,与跨采前相比,底板和右帮围岩的塑性区范围分别增加了530和200 mm,左帮和顶板的塑性区范围没有明显的变化;④在跨采的过程中,顶板处的锚杆受力显著增加,底板和两帮围岩受拉剪破坏,且底板围岩受拉剪破坏范围更大。

#### 2) 垂直应力分布云图

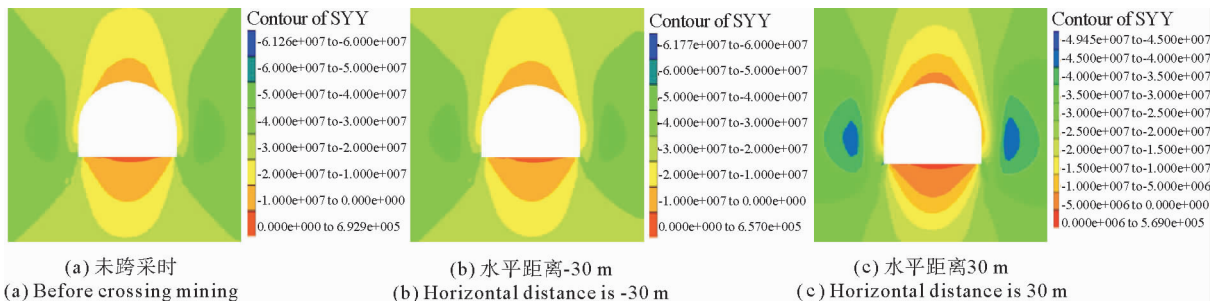


图7 巷道围岩的垂直应力分布云图

Fig. 7 The vertical stress distribution of roadway

由图 7 的垂直应力分布云图分析得出,在采煤工作面的推进过程中,巷道围岩垂直应力重新分布。与巷道跨采前相比,在跨采过程中,当巷道距采煤工作面的水平距离为 -30 m 时,巷道底板局部区域开始卸压;当水平距离为 30 m 时,巷道顶底板约 3 m 位置的最大垂直应力由 20 MPa 减小到 15 MPa,卸压 5 MPa;但在巷道的两侧 2~3 m 位置始终存在两个垂直应力集中区。

### 3) 水平应力分布图

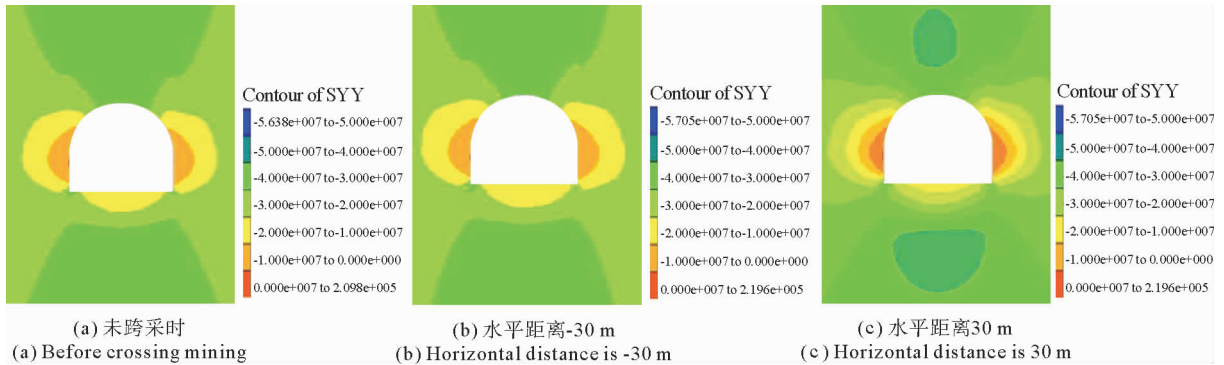


图 8 巷道围岩的水平应力分布云图

Fig. 8 The horizontal stress distribution of roadway

由图 8 水平应力分布云图分析得出,在采煤工作面的推进过程中,巷道围岩的水平应力重新分布。与巷道跨采前相比,在跨采过程中,当巷道距采煤工作面的水平距离为 -30 m 时,左帮局部区域的围岩应力变大;当水平距离为 30 m 时,巷道两帮围岩水平应力处于卸压状态,距帮 2 m 的位置水平应力由 20 MPa 减小到 15 MPa,且顶底板处围岩的水平应力出现了应力集中现象,应力集中系数为 1.1。

## 4 变形机理及规律

### 4.1 跨采巷道底鼓的力学分析

巷道开挖后,围岩分为破碎区、塑性区和弹性区。一般而言,若不受采动影响,在合理的支护措施下,巷道围岩可以保持稳定;当受到跨采影响时,围岩应力重新分布,导致围岩的塑性区扩大,巷道变形严重。

跨采巷道的底鼓现象是由于受到移动支承压力的影响,围岩应力重新分布,在巷道的顶底板处,垂直应力处于卸压状态,但是水平应力集中,垂直应力的卸压和水平应力的横向作用是造成巷道底鼓和顶板岩体破坏的力学原因。

### 4.2 跨采巷道围岩变形规律

根据现场监测数据和数值模拟分析可以得出大埋深跨采巷道的变形规律:

1) 根据现场监测数据及分析可以看出,跨采巷道的变形包括底鼓、顶板下沉和两帮移近,其中底板的变形破坏最严重;可将变形分为三个阶段,分别是变形初期、变形活跃期和变形稳定期;顶板和右帮处的锚杆受力变化较其他位置明显。

2) 数值模拟结果分析可以得出,跨采巷道底板和两帮受拉剪破坏,围岩的塑性区变化首先从右帮开始,但是跨采以后,底板的塑性区增加最大,约为 530 mm,说明底板变形破坏最严重;在巷道的顶板处,围岩的垂直应力处于卸压状态,水平应力在顶底板处出现应力集中现象,应力集中系数为 1.1。

3) 由现场监测数据与数值模拟结果对比分析可以得出,跨采过程中,巷道围岩由于受扰动的影 响,底鼓现象最严重。现场测得最大底鼓量达到了 500 mm,而数值模拟分析得出底板塑性区范围增加了 530 mm,说明跨采期间底板变形破坏严重;由监测数据和数值模拟分析得出顶板和右帮处锚杆受力在跨采过程中明显增大。

## 5 结论

通过对华恒煤矿—1000 m 水平暗斜井跨采期间的变形破坏分析,得出以下结论:

1)跨采对底板巷道的的影响范围约在—50~60 m。

2)跨采巷道严重的底鼓现象是由跨采和巷道底板没有采取支护措施共同引起的。

3)跨采过程中,巷道的变形破坏主要发生在迎采的帮壁和底板部位,且顶巷道板部位的锚杆受力增加较多,跨采巷道支护设计时应加强相应部位的支护。

4)对于跨采巷道,建议采取实时在线监测,并及时分析监测结果,加固有变形破坏前兆的部位、结构等,保证巷道的稳定性和使用安全。

### 参考文献:

- [1]谢文兵,史振凡,殷少举. 近距离跨采对巷道围岩稳定性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):1986-1991.  
Xie Wenbing, Shi Zhengfan, Yin Shaoju. Stability analysis of surrounding rock masses of roadway under overhead mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 1986-1991.
- [2]张学臣,李大勇,陈士海,等. 跨采巷道的围岩稳定性预测与控制[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(3):361-365.  
Zhang Xuechen, Li Dayong, Chen Shihai, et al. Stability prediction and control of surrounding rocks for roadway affected by overhead mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 361-365.
- [3]Brady B H, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London:George Allen & Unwin,1985:212-213.
- [4]陈加轩. 采动应力演化对底板岩巷失稳影响机理及控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009:9-45.
- [5]刘传孝,杨永杰,王德青. 跨采巷道围岩松动圈发育的结构特点[J]. 山东矿业学院学报,1998,17(2):153-156.  
Liu Chuanxiao, Yang Yongjie, Wang Deqing. The structural features of the broken ring of rock mass roadways round the under working face[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1998, 17(2): 153-156.
- [6]汤雪唯,张向阳. 深井跨采巷道围岩应力分布及变形规律模拟研究[J]. 煤炭技术,2010,29(3):189-192.  
Tang Xuewei, Zhang Xiangyang. Simulation study of stress distribution and deformation of surrounding rock during overhead-mining[J]. Coal Technology, 2010, 29(3): 189-192.
- [7]张春,张连英,李凯,等. 骑跨采动压巷道围岩稳定性数值模拟[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2011,26(1):40-46.  
Zhang Chun, Zhang Lianying, Li Kai, et al. Numerical simulation of rock mass stability in mining dynamic pressure straddling [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 26(1): 40-46.
- [8]李佳佳,高明中,王素军. 近距离采动影响巷道稳定性数值模拟研究[J]. 煤炭技术,2010,29(1):79-81.  
Li Jiajia, Gao Mingzhong, Wang Sujun. Numerical simulation research on stability of roadway influenced by short distance over mining[J]. Coal Technology, 2010, 29(1): 79-81.
- [9]Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) user's manual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2005.

(责任编辑:吕海亮)