

丁鑫品,王 俊,李 伟,等. 关键层耦合作用下露井联合采边坡滑动深度分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 354-358. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0327

Ding Xinpin, Wang Jun, Li Wei, et al. Analysis of slope sliding depth for open-underground combined mining under coupling effects about key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 354-358. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0327

关键层耦合作用下露井联合采边坡滑动深度分析

丁鑫品^{1 2 3}, 王 俊^{1 2 3}, 李 伟^{1 2 3}, 刘博文^{1 2 3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013; 3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘 要: 通过理论分析和相似材料模拟实验, 提出了控制露井联合采边坡稳定的“关键层”概念, 研究了“关键硬岩层”与“关键弱层”耦合作用下的露井联合采边坡变形破坏机理。建立工程力学模型, 推导出了关键层耦合作用下露井联合采边坡滑动深度的预计公式, 以平朔矿区安家岭露天矿北端帮井工开采引起的边坡滑动为工程实例, 对公式的适用性进行了验证, 结果表明, 预计结果与相似材料模拟实验结果、现场位移监测结果三者基本吻合。通过研究, 实现了露井联合采边坡潜在滑移深度的合理预计, 为露井联合采时空关系优化、边界参数合理确定、边坡变形监测与失稳治理等工作提供了依据。

关键词: 露井联合采; 边坡稳定; 耦合作用; 关键层; 破坏机理

中图分类号: TD824.7 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)S2-0354-05

Analysis of slope sliding depth for open-underground combined mining under coupling effects about key strata

DING Xin-pin^{1 2 3}, WANG Jun^{1 2 3}, LI Wei^{1 2 3}, LIU Bo-wen^{1 2 3}

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: With the theoretical analysis and the similar material simulation experiment, the concept of the key strata which control the slope stability about open-underground combined mining was proposed, mechanism of slope deformation and destruction about open-underground combined mining under the coupling effects of key hard strata and key weak strata. Then a mechanical model was established, with which the estimating formula of the slope sliding depth for open-underground combined mining under the coupling effects about key strata were deduced, combining with the end slope sliding engineering example caused by underground mining of Anjialing open-pit mine in Pingshuo mining area, the applicability of the formula were verified, the results show that, the expected results and similar material simulation experiment results and the displacement monitoring results are very similar. Based on this research, the reasonable estimate of the slope sliding depth for open-underground combined mining is feasible, which will provide basis for optimizing relationship between time and space, confirming boundary parameter, monitoring the slope deformation and slope treatment about open-underground combined mining.

Key words: open-underground combined mining; slope stability; coupling effect; key strata; failure mechanism

钱鸣高院士于 20 世纪 90 年代后期基于“砌体梁”结构理论提出了岩层控制的关键层理论,为基本顶来压的预测预报和顶板事故的防治奠定了理论基础,是我国煤矿岩层控制理论的重大发展^[1-2]。关键层理论将井工开采过程中对采场上覆岩体活动起控制作用的坚硬岩层称为“关键层”^[3]。实际上,在露天开采过程中,也同样存在着对边坡稳定起关键作用的岩层,由于开挖卸荷,在近边坡面一定范围内的岩体中,发生应力重新分布现象,为适应这种重新分布应力状态,边坡岩体将发生缓慢的沉降变形,如果岩层中存在软弱结构面,最终可能导致边坡的蠕变变形和失稳,这里将影响露天矿边坡稳定的软弱岩层称为边坡的“关键弱层”。研究表明,在采用井工开采方式回收露天矿端帮煤柱条件下,露井联采边坡的变形失稳是由采空区上部“关键层”和边坡内部“关键弱层”的耦合作用引起的,正是由于两者的共同作用,最终导致露井联采边坡“结构改造—蠕滑变形—最终失稳”变形破坏过程的发生,可以将以上 2 种“关键层”合称为控制露井联采边坡稳定的“关键层”。

平朔矿区的露井联采问题,实质是利用井工开采方式回收露天矿端帮下部压滞煤炭的问题^[4-6],井工和露天 2 种开采方式的采动效应相互叠加,边坡内部的“关键层”和“关键弱层”同时存在,如果露井联采边界参数过小,2 种关键层的耦合作用必然导致边坡的失稳,例如 2012-01-30,由于受到井工二矿 B909 工作面开采的扰动,安家岭露天矿北帮 1280 和 1310 标高位置 300 m 长度范围内出现朝向临空面的明显错动,1330 平盘和 1360 平盘边坡最大变形速率达 2.6 mm/h,现场生产陷入被动,造成较大的经济损失。在“关键层”和“关键弱层”的耦合作用下,露井联采边坡的变形破坏表现为沉降破坏和潜在水平滑动破坏 2 种形式^[7-9],在实际生产中,前者可以通过调整边界参数加以控制,对安全生产影响不大,而后者由于初期变形量较小,滑动范围难以预测,对现场生产构成较大威胁。科学预计关键层耦合作用下露井联采边坡的潜在水平滑动深度,实时采取有针对性的监测与治理措施,是解决这种威胁的有效途径。

1 “关键层”耦合作用下的采动边坡变形破坏机理

基于相似理论,采用相似材料模拟实验的方法研究了安家岭露天矿北端帮露井联采条件下采动边坡的变形破坏机理^[10],内容包括 9 号煤顺坡开采和逆坡开采 2 种情况,如图 1 所示。结果表明:露井联采条件下,边坡下部采空区垮落裂缝周围岩体破断时形

成的铰接结构是边坡上部平盘发生水平错动的关键原因^[11-12]。在井采影响下,边坡主要表现为 2 种破坏模式,分别为沉降滑动破坏和潜在滑动破坏,前者主要发生在采空区垮落裂缝内侧平盘(图 1 中红线左侧),后者主要发生在垮落裂缝外侧的上部平盘(图 1 中的蓝色区域)。

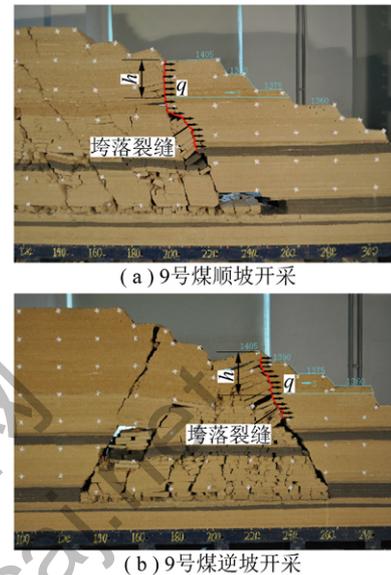


图 1 采动边坡的变形破坏特征

Fig. 1 Deformation and failure characteristics of the mining slope

在工作面推进过程中,上部岩体因失去下部支撑而发生下沉,由于岩体的抗拉强度较小,在垮落边界位置,基本顶岩梁先在两侧支座的上端裂开,然后在梁的中间底部开裂,随着岩块的转动形成强大的水平挤压力,正是这个作用力推动边坡上部平盘朝向临空面方向移动,甚至导致边坡失稳^[13-14]。

从边坡附近岩体变形破坏分区简化模型可知(图 2),井采影响下,根据变形破坏特征可以将边坡岩土体划分为 3 个区,分别为移动边界外侧的 A 区、移动边界和垮落边界之间的 B 区以及垮落边界内侧的 C 区,首先 C 区岩体因失去下部支撑而带动边坡附近岩体发生破断下沉,由于拉应力和剪应力的共同作用产生了 B 区和 C 区。考虑到含煤地层的层理构造特征,如果取其中一个岩层进行单独分析(图 3),A 岩块代表边坡上部某个平盘,该岩块的运动,是其后方 B 岩块直接作用的结果,但是 B 岩块的力是由更远的 G、F、E 和 D 岩块传递过来的^[15],实际上起关键作用的岩块主要为 B 和 C 岩块,当 A 岩块与下部岩层结构面的黏聚力不能抵抗该推力的作用,便发生朝向边坡临空面的移动,边坡上部平盘的失稳正是多个类似岩层发生组合滑动的结果。

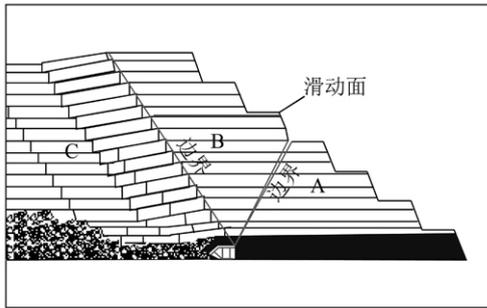


图 2 边坡附近岩体变形破坏分区简化模型
Fig. 2 Simplified model of deformation and failure partition about rock mass near the slope

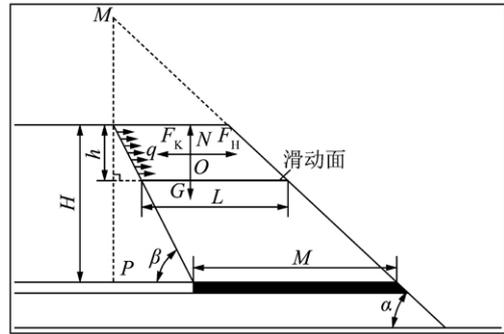


图 4 井采影响下边坡岩体水平滑动深度计算模型
Fig. 4 Calculation model of slope sliding depth under influence of underground mining

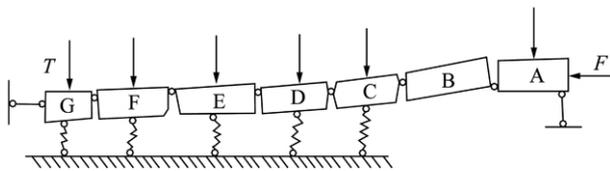


图 3 岩层内部断裂岩块间的铰接结构
Fig. 3 Hinged structure between breaking rock in rock strata

2 工程力学模型的建立

在实际生产中,如果能够准确计算出边坡潜在水平滑动破坏深度 h (图 4) 就可以知道“关键层”耦合作用下露井联采边坡上部平盘可能的滑出位置,从而为有针对性的采取失稳监测与控制措施提供依据。

列滑体发生滑动的在水平方向的受力方程:

$$F_H = F_K \quad (1)$$

抗滑力:

$$F_K = (\sigma \tan \varphi + c) LB \quad (2)$$

又因为 $\sigma = \frac{G}{BL}$,

则

$$F_K = G \tan \varphi + cLB \quad (3)$$

式中 F_K 为抗滑力, N ; F_H 为滑动力; σ 为滑动面正应力, Pa ; c 为滑动面黏聚力, Pa ; B 为边坡走向长度, m ; L 为滑动面长度, m ; G 为滑体受到的重力(滑体近似为长方体 $G \approx 10\rho hBL$), N ; φ 为结构面内摩擦角。

滑动力 F_H 的计算,忽略各岩层之间相互作用的内力,将推动滑体水平移动的多个岩梁视为整体,如图 5 所示。

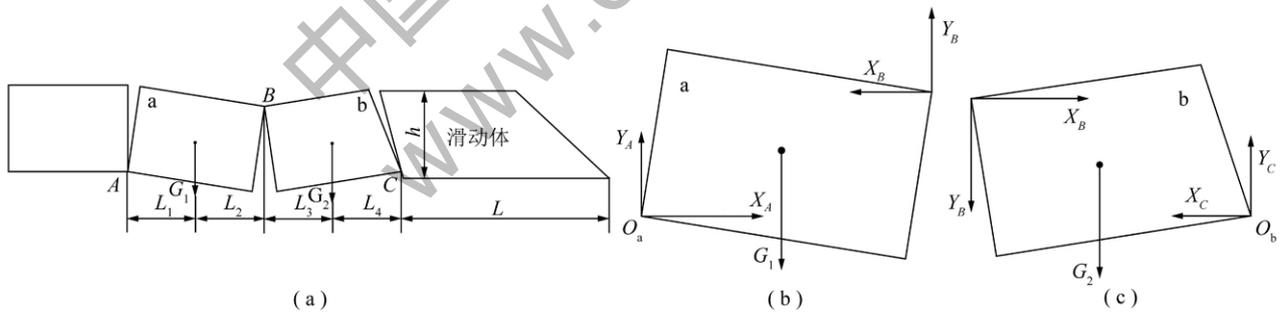


图 5 简化后计算模型受力分析

Fig. 5 Force analysis of simplified calculation model

以 a 岩块为研究对象,如图 5 (b) 所示,以 O_a 点为中心,列力矩平衡方程为

$$X_B h + Y_B (L_1 + L_2) = G_1 L_1 \quad (4)$$

以 b 岩块为研究对象,如图 5 (c) 所示,以 O_b 点为中心,列力矩平衡方程为

$$X_B h = G_2 L_4 + Y_B (L_3 + L_4) \quad (5)$$

将式 (4) 和式 (5) 联立,消去 Y_B , 又 $F_H = X_B = X_C$,

得

$$F_H = \frac{G_1 L_1 (L_3 + L_4) + G_2 L_4 (L_1 + L_2)}{h (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)} \quad (6)$$

根据相似材料模拟实验现象,假设 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$, $L_1 = \lambda h$, λ 为变形破坏程度控制系数,变形破坏程度越大, λ 越小。根据相似材料模拟实验现象, λ 一般取 0.3 ~ 0.5。

则:

$$F_H \approx \frac{G_1}{2} \approx \frac{G_2}{2} = 20\rho\lambda Bh^2 \quad (7)$$

又根据图 4 中的三角函数关系,得

$$\frac{\tan \alpha (H \cot \beta + M) - H + h}{L + h \cot \beta} = \tan \alpha \quad (8)$$

则:

$$L = (H - h)(\cot \beta - \cot \alpha) + M \quad (9)$$

式中 h 为边坡岩体移动深度, m; H 为煤层顶板到地表的距离, m; M 为露井联合采边界参数, m; ρ 为岩体密度 kg/m^3 ; α 为帮坡角 ($^\circ$); β 为垮落角 ($^\circ$)。

将式(3) (7) 和(9) 联立, 得到关于边坡滑移破坏深度 h 的一元二次方程:

$$Ah^2 + B^*h + C = 0 \quad (10)$$

式中 $A = 5\rho(4\lambda^2 + 2\cot \beta \tan \varphi - 2\cot \alpha \tan \varphi)$; $B^* = 10H\rho \cot \alpha \tan \varphi - 10H\rho \cot \beta \tan \varphi + c \cot \beta - c \cot \alpha - 10\rho M \tan \varphi$; $C = c(H \cot \alpha - H \cot \beta - M)$ 。

一般情况下, 式(10) 中其他量为已知量, 水平滑移深度 h 不难求得。

当岩层接触面与边坡面顺倾时, 如图 6(a) 所示。

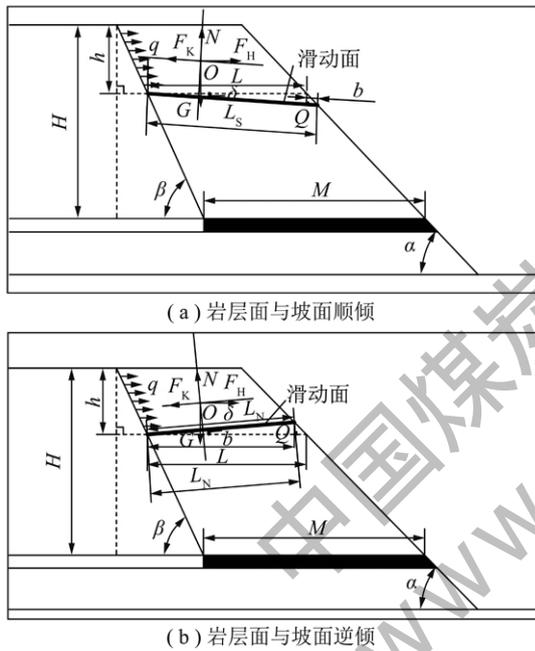


图 6 岩层非水平条件下边坡变形破坏计算模型

Fig. 6 The calculation model of slope sliding depth under not level rock surface condition

列力的平衡方程:

$$\begin{cases} N = G \cos \delta \\ F_k = F_H \cos \delta + G \sin \delta \end{cases} \quad (11)$$

于是,

$$\frac{G \cos \delta}{BL_S} \tan \varphi + c = \frac{F \cos \delta + G \sin \delta}{BL_S} \quad (12)$$

又根据图 6(a) 中的三角函数关系得

$$L_S = L[\sin \delta \cot(\alpha - \delta) + \cos \delta] \quad (13)$$

将式(7) (9) (12) 和(13) 联立, 即可求得岩层面和边坡面顺倾时, 井工开采影响下边坡岩体的滑动破坏深度。

当岩层接触面与边坡面逆倾时, 如图 6(b) 所示。

列力的平衡方程:

$$\begin{cases} N = G \cos \delta \\ F_k = F_H \cos \delta - G \sin \delta \end{cases} \quad (14)$$

于是,

$$\frac{G \cos \delta}{BL_N} \tan \varphi + c = \frac{F \cos \delta - G \sin \delta}{BL_N} \quad (15)$$

又根据图 6(b) 中的三角函数关系得

$$L_N = \frac{b}{\cos \delta} = \frac{L \tan \alpha}{\cos \delta (\tan \delta + \tan \alpha)} \quad (16)$$

将式(7) (9) (15) 和(16) 联立, 即可求得岩层面和边坡面逆倾时, 井工开采影响下边坡岩体的滑动破坏深度。

由于上述公式是平朔矿区露井联合采工程地质模型的基础上推导出来的, 所以建议在采矿条件和工程地质条件类似矿井适用, 具体适用条件如下: ① 利用井工开采方式回收露天矿端帮煤柱; ② 表土层厚度较大的含煤地层; ③ 煤层的一次采出厚度较大。

3 预计方法的适用性分析

以安家岭露天矿北端帮露井联合采典型工程地质剖面为研究对象, 在相似材料模拟实验的基础上, 验证边坡滑移破坏深度 h 计算公式的适用性。由于含煤地层近水平, 故采用近水平条件下的估算公式进行相关计算(式(8) 和(9))。计算所需参数为: 岩层接触面黏聚力 $c = 15 \text{ kPa}$, 接触面岩体摩擦角 $\varphi = 21^\circ$, 逆坡开采开切眼侧垮落角 $\beta = 63^\circ$, 顺坡开采开切眼侧垮落角 $\beta = 55^\circ$, 煤层埋藏深度 $H = 150 \text{ m}$, 露井联合采边界参数(工作面极限位置到边坡临空面的水平距离) 为 145 m , 逆坡开采 $\lambda = 0.30 \sim 0.35$, 顺坡开采时 $\lambda = 0.45 \sim 0.50$, 松散土体密度 $\rho = 1950 \text{ kg}/\text{m}^3$, 帮坡角 $\alpha = 31^\circ$ 。

计算结果表明, 9号煤层逆坡开采条件下边坡滑移破坏深度为 $36 \sim 47 \text{ m}$, 滑动面长度为 $13.4 \sim 26.1 \text{ m}$, 滑动面位于 1360 平盘坡面中部。9号煤层顺坡开采条件下边坡滑移破坏深度为 $20 \sim 30 \text{ m}$, 滑动面长度为 $10.10 \sim 29.32 \text{ m}$, 滑动面位置在 1375 坡面中部。对比发现, 计算结果与相似材料模拟实验和现场位移监测结果吻合度较好。

4 结 论

(1) 当露井联合采边界参数(工作面极限位置到边坡临空面的水平距离) 为 145 m 时, 9号煤层工作面顺坡开采和逆坡开采条件下边坡的滑移破坏深度分别为 $20 \sim 30$ 和 $36 \sim 47 \text{ m}$, 逆坡开采时边坡的破坏程度和影响范围均比顺坡开采大。

(2) 相似材料模拟实验结果表明,采动边坡上部平盘发生水平滑动的力是由采空区垮落裂缝附近破碎岩块的铰接结构提供的,当滑动力大于某岩层接触面的抗滑力时,该接触面上部岩体将作为整体发生朝向临空面的滑动。

(3) 通过建立工程力学模型,推导出了采空区上覆“关键硬岩层”和边坡内部“关键弱层”耦合作用下的露井联合采边坡潜在滑移深度计算公式,并对公式的适用性进行了验证,具有一定的理论价值和指导意义。

参考文献:

- [1] 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(3): 225-230.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [2] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122-126.
Xu Jialin, Qian Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 122-126.
- [3] 鞠金峰, 许家林, 王庆雄. 大采高采场关键层悬臂梁结构运动型式及对矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2115-2120.
Ju Jinfeng, Xu Jialin, Wang Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2115-2120.
- [4] 朱建明, 刘宝宽, 徐金海, 等. 露井联合采技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Zhu Jianming, Liu Baokuan, Xu Jinhai, et al. Open-pit and underground combined mining technology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [5] 朱建明, 刘宪权. 安太堡矿露井联合采边坡稳定性研究及边界参数优化[J]. 工程地质学报, 2008, 16(S1): 456-463.
Zhu Jianming, Liu Xianquan. Study on the slope stability and optimization on boundary parameter under open-underground mining of Antaibao open pit mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(S1): 456-463.
- [6] 刘宪权, 朱建明, 冯锦艳. 水平厚煤层露井联合开采下边坡破坏机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1346-1350.
Liu Xianquan, Zhu Jianming, Feng Jinyan. Mechanism of the slope failure of horizontal thick coal seam under the condition of combined-mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1346-1350.
- [7] 马进岩, 刘培培, 王树仁. 露天与井工联合采动矿山边界距离优化分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(10): 27-30.
Ma Jinyan, Liu Peipei, Wang Shuren. Optimized analysis on boundary distance of mine with surface and underground combined mining[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(10): 27-30.
- [8] 孙世国, 蔡美峰, 王思敬. 地下与露天复合采动效应及边坡变形机制[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497-502.
Sun Shiguo, Cai Meifeng, Wang Sijing. Effect of combined underground and open pit mining and deformation mechanism of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497-502.
- [9] 孙世国, 蔡美峰, 王思敬. 露天转地下开采边坡岩体滑移机制的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 126-129.
Sun Shiguo, Cai Meifeng, Wang Sijing. Study of sliding mechanism for slope due to the excavation from open pit into underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 126-129.
- [10] 丁鑫品, 李绍臣, 王俊, 等. 露天矿端帮煤柱回收井工开采工作面推进方向的优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1923-1928.
Ding Xinpin, Li Shaochen, Wang Jun, et al. Optimization of underground mining development direction about end slope coal pillar recovery of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1923-1928.
- [11] 朱建明, 刘宪权, 吴剑平, 等. 露井联合采下边坡稳定性的相似模拟研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 207-211.
Zhu Jianming, Liu Xianquan, Wu Jianping, et al. Similarity simulation on slope stability under condition of combined open and underground mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 207-211.
- [12] 吴剑平, 朱建明, 成新元. 露井联合采下边界参数优化的相似材料模拟研究[J]. 中国矿业, 2008, 17(9): 79-82.
Wu Jianping, Zhu Jianming, Cheng Xinyuan. Similar simulation research on optimization of boundary parameter under the condition of open-underground mining[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(9): 79-82.
- [13] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [14] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 787-791.
Xu Jialin, Qian Minggao, Zhu Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 787-791.
- [15] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463-467.
Xu Jialin, Qian Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 463-467.