

文章编号:0253-9993(2011)03-0377-06

高陡边坡下开采挂帮矿对滑体稳定性的影响

程文文¹,宋卫东¹,张兴才²,尹家国²

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083;2. 武汉钢铁集团 大冶铁矿,湖北 黄石 435006)

摘要:以湖北大冶铁矿尖山 I_N 挂帮矿开采为工程背景,通过室内相似材料模型实验来模拟挂帮矿开采及降雨过程,使用压力传感器、百分表、近景摄影测量等手段监测滑体内应力变化,最终得到边坡沉降规律,最终沉降量 43.5 cm 与现场监测量 35.4 cm 较为接近。采用基于极限平衡理论的 Geo-Slope 软件对开采前后边坡整体的稳定性进行分析和计算,边坡安全系数由 1.203 降低为 1.171,可以得知挂帮矿的开采对边坡整体的稳定性造成一定的影响,但是还不足以产生大规模的滑坡事故。

关键词:边坡;挂帮矿;滑体稳定性;相似材料实验;Geo-Slope 软件

中图分类号:TD325.1 **文献标志码:**A

The influence of landslide stability on mining hanging wall ore under the high and steep slope

CHENG Wen-wen¹, SONG Wei-dong¹, ZHANG Xing-cai², YIN Jia-guo²

(1. State key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Daye Iron Mine, Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Huangshi 435006, China)

Abstract: On the background of the mining No. I_N hanging wall in Jianshan area of Daye Iron Mine, similar material model experiment indoors was taken to simulate the process of hanging wall mining and rainfall. The regular of slope sedimentation was finally educed by using measures of pressure transducer, dial indicator and close-range photogrammetry to monitor the changes of sliding mass, and the final sedimentation of 43.5 m is much closed to the worksite sedimentation of 35.4 m. Based on the limit equilibrium theory the Geo-Slope was used to analyze and calculate the overall stability of the slope before and after mining, and the slope safety factor decreased from 1.203 to 1.171. The results indicate that though the mining of hanging wall ore has some influence on the overall stability of the slope, large-scale landslide incidents will not be coursed.

Key words: slope; hanging wall ore; landslide stability; similar material model experiment; Geo-Slope software

近年来,随着大型露天矿开采的深入,露天坑深度逐渐增加,剥采比越来越大,矿石开采成本也在不断提高,越来越多的矿山开始转入地下开采,而在露天转地下时对挂帮矿的开采以及如何保证高陡边坡的稳定也是大多数矿山所要面临的课题^[1-2]。

挂帮矿是指露天境界内开采矿体在境界外延伸的部分矿体,其在开采的过程中面临最关键的技术难题是:在露采时期大规模的开挖对周围岩体造成了较大应力扰动,而且在坑底坡脚处形成了应力集中,当

进行挂帮矿的开采时将形成更加复杂的次生应力场,引起边坡围岩的进一步变形和破坏,甚至出现滑坡失稳和巷道变形破坏等工程灾害^[3-5]。

室内相似材料模拟实验由于能够再现采动过程中岩体破坏及位移情况而被普遍采用,石杰红、王金安等^[6]用相似材料模拟实验模拟高陡边坡下开采安全性,并认为开挖后巷道稳定性降低。芮勇勤、寇晓东等^[7-8]用模型实验和 FLAC 数值模型分析了开挖引起的边坡的变形、破坏发展及其破坏机制,并将其

成果应用于工程实际。

数值模拟分析方法是解决矿山岩石力学问题常用的一种手段,秦凯旭等^[9]采用 Geo-Slope 软件对某边坡稳定性进行计算,结果表明该边坡整体稳定性较好,考虑地震荷载时稳定性会急剧下降。屈建军等^[10]采用 Geo-Slope 软件对某边坡在开挖和降雨两种情况下的稳定性进行计算,得出两种情况下均存在安全隐患。

大冶铁矿尖山 I_N 矿体采矿科技攻关开始于 2003 年 8 月,开采对象是 -156 ~ -180 m 水平之间的赋存矿体,滑体从上部 276 m 到下部 -168 m,纵深高度 444 m,宽度在 5 ~ 30 m。挂帮矿体为条带状,走向基本平行于边坡坡面,矿体在水平面上有近 50 m 赋存在 F9 滑体断层错动范围内,滑体下部的矿体支撑上部欲滑落岩体。

2005-07-25,大冶铁矿矿山公园顺利通过评审,成为全国唯一的国家级矿山公园,更加要求边坡和地表的稳定性,所以在挂帮矿的开采过程中尤其要重视 F9 滑体及边坡的稳定性。

1 现场边坡 GPS 监测

结合 1990—1995 年中科院武汉岩土所对大冶铁狮子山北帮尖 F9 断层上盘进行局部的滑体位移监测结果,提出了研究区最危险的几个点,采用全球定位系统 GPS 进行监测,选取挂帮矿开采期间的监测数据进行分析。选取图 1 中的 No. 4 点监测数据进行分析,数据见表 1。

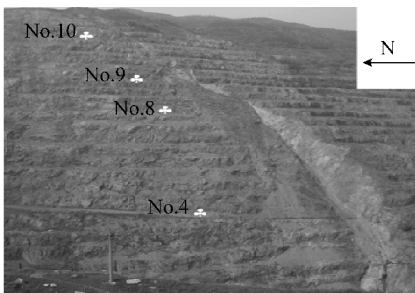


图 1 现场边坡监测点分布

Fig. 1 Distribution of slope monitoring site

开采期间内监测点最大沉降量为 16.88 cm,而 2009 年 8 月到 10 月间有多次大规模降雨,使沉降量增大到 35.40 cm。

2 室内相似材料模拟实验

2.1 模型范围及剖面的选取

模型模拟剖面的选取要尽量垂直于边坡坡面,要与下部的矿体和采矿工程建立必要的联系^[11-12],所

以选取完整切割了高陡边坡和矿体的地质剖面,如图 2 所示。

表 1 现场边坡监测数据

Table 1 The data of slope monitoring site

监测日期	高程/m
2007 年 12 月	-11.258 6
2008 年 2 月	-11.269 2
2008 年 4 月	-11.274 6
2008 年 6 月	-11.312 4
2008 年 8 月	-11.347 6
2008 年 10 月	-11.358 9
2008 年 12 月	-11.390 3
2009 年 2 月	-11.412 5
2009 年 4 月	-11.427 4
2009 年 6 月	-11.442 9
2009 年 8 月	-11.463 5
2009 年 10 月	-11.612 6

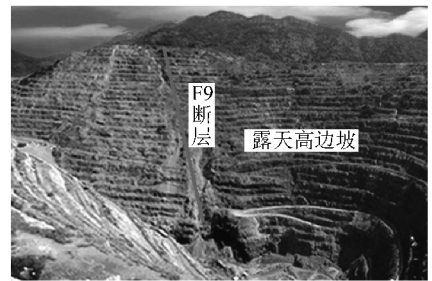


图 2 露天坑全景及剖面位置

Fig. 2 Open-pit panoramic and profile position

根据采场地质图(图 3)和岩石物理力学性质等有关地质采矿资料以及框架系统的几何尺寸确定与研究对象和研究任务相适应的模型几何比,试验原型截面尺寸为 180 m×525 m,采用的几何比为 $C_L=150$,其模型尺寸 1 200 mm×3 500 mm,模型范围如图 4 所示,1 200 mm 以上边坡根据相似原理换算为压力,使用压重物实现。

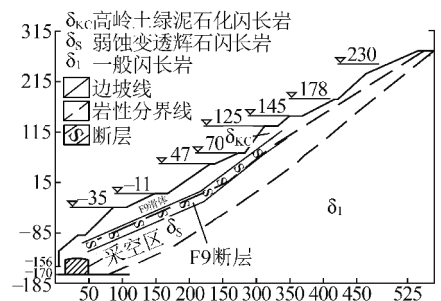


图 3 实际工程地质剖面(单位:m)

Fig. 3 Practical engineering geologic section

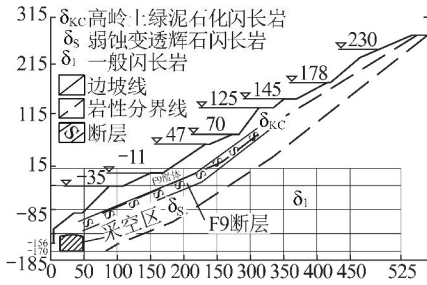


图4 模型选取范围(单位:m)

Fig.4 The range of model selected

2.2 模型的制作

边坡模型中根据岩性的不同分为闪长岩 δ_1 、蚀变透辉石闪长岩 δ_s 、绿泥石化闪长岩矿体 δ_{KC} 、F9 断层,主要岩体参数见表 2。

现场岩石的饱和抗压强度是由点荷载抗压强度转化而来,即

$$\sigma_c = 24I_{s(50)k}^{0.75} \quad (1)$$

式中, σ_c 为饱和岩体抗压强度; $I_{s(50)k}$ 为修正后的标准试件点荷载强度; 准岩体抗压强度 $\sigma_{mc} = K\sigma_c$, K 为岩体完整系数。

本实验采用的模拟材料为河沙、碳酸钙、石膏,模拟的容重在 15 kN/m^3 左右,故而选取模型的容重比 C_γ 为 1.7,应力比 C_σ 和弹性模量比 C_E 为

$$C_\sigma = C_E = C_L C_\gamma = 150 \times 1.7 = 255$$

根据上述所计算的各岩石力学参数,确定的模型岩石力学参数见表 3,选取的相似材料配比见表 4。

表 2 主要岩体参数

Table 2 The main mechanical parameters of rock mass

岩层	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	μ	δ_t / MPa	δ_c / MPa	C / MPa	$\varphi / (^\circ)$
Fe 矿体	41.2	15.6	0.27	11.11	200.00	0.35	42
δ_1	5.3	20.0	0.28	13.33	240.00	0.50	40
δ_s	24.2	20.0	0.28	12.21	220.00	0.20	35
δ_{KC}	23.4	20.0	0.28	11.56	200.00	0.21	30
F9 断层	23.0	7.0	0.30	5.27	94.81	0.03	18

注: γ 为容重; E 为弹性模量; μ 为泊松比; δ_t 为抗拉强度; δ_c 为抗压强度; C 为内聚力; φ 为内摩擦角。

表 3 模型力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the model

岩层	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		弹性模量 E / GPa		准岩体抗压强度 σ_{mc} / MPa	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型
Fe 矿体	41.2	24.24	15.6	0.061 0	82.53	0.324
δ_1	25.3	14.88	20.0	0.078 0	90.27	0.354
δ_s	24.2	14.24	20.0	0.078 0	88.59	0.347
δ_{KC}	23.4	13.76	20.0	0.078 0	88.59	0.347
F9 断层	23.0	13.52	7.0	0.027 4	25.10	0.098

表 4 模型材料配比方案

Table 4 The material ratio program of model

岩层	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MPa	准岩体抗压强度 σ_{mc} / MPa	材料配比
Fe 矿体	24.24	61.0	0.324	6 : 5 : 5
δ_1	14.88	78.0	0.354	7 : 4 : 6
δ_s	14.24	78.0	0.347	7 : 4 : 6
δ_{KC}	13.76	78.0	0.347	7 : 4 : 6
F9 断层	13.52	27.4	0.098	7 : 8 : 2

按照初步设计的材料配比进行单轴抗压强度实验,来验证配比的强度,试件制作方案为按照 3 个配比制作 3 组试件,每组 4 个,共计 12 个进行单轴抗压

实验。

试验中关于降雨部分的模拟,是根据现场滑体面积与模型边坡面积比例换算,实际共需水量 10 kg。

从而模拟一场降雨量为 200 mm, 为时 4 h 的强降雨, 实验室共进行 4 次淋水模拟, 预先称量好每次需水量 2.5 kg, 缓慢倾倒在边坡表面渗入滑体内, 后放置 30 min, 前后共需 4 次, 模拟降雨期间内连续监测应力, 记录百分表读数以及摄影监测。

经过干燥放置依次测量 3、4、5 d 的试件强度。通过最后的数据分析和计算可以得到试件的抗压强度和弹性模量, 与模型的强度和弹性模量进行验证, 分析误差, 并最终确定或修正模型所需的配比。

试件放置 5 d 后强度较为接近模型强度, 见表 5, 最终误差分别为 7.8%、5.8%、7.1%, 基本能够满足强度要求, 说明实验选取配比方案较为合理。

表 5 试件干燥 5 d 后的强度

Table 5 The measured intensity after 5 days drying specimens

组别	配比	单轴压力/kN	抗压强度/kPa
1	7 : 4 : 6	0.345	320
2	7 : 8 : 2	0.115	105
3	6 : 5 : 5	0.326	305

2.3 实验过程

2.3.1 监测手段

在 F9 断层附近布置应力监测点, 在边坡台阶上布置 3 个百分表, 观测沉降规律; 采用数字近景摄影测量法通过布置在模型上的观测点来观察采空区附近围岩、断层的位移情况, 具体监测位置分布如图 5 所示。

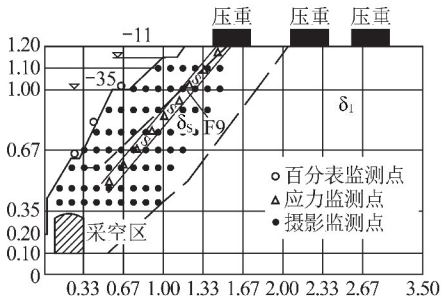


图 5 模型监测方案(单位:m)

Fig. 5 Model monitoring scheme

2.3.2 开挖方案

本实验模拟内容包括 -156 m、-170 m 两个水平, 共 28 m。开挖时将两个水平视作一个, 由上而下自 -142 m 开始开采, 一次开采 3 m, 共 10 步; 开挖前后进行数据采集、拍照。开挖结束后模拟降雨, 进行分析和对比, 为步骤(11)、(12)。

2.3.3 数据分析

(1) 应力监测数据如图 6(a) 所示, 可以看出, 各个监测点的变化趋势基本是由逐渐增大后缓慢降低然后上升的趋势, 随着采空区开挖的进行, 靠近采空区的断层中应力状态被扰动, 开始重新分布。

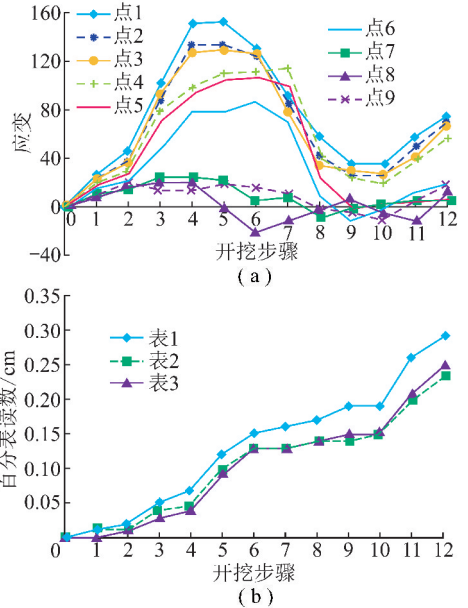


图 6 应变监测数据曲线和边坡沉降曲线

Fig. 6 The curves of strain monitoring data and slope sedimentation

(2) 观察百分表沉降曲线可知, 开挖初始阶段沉降量较小, 随着开挖的进行和采空区面积的增大沉降量逐渐增大, 到达 -154 m 水平时模型达到初步的稳定, 而后沉降量变化较小, 直到开挖结束。而随着模拟降水的开始, 沉降量有明显增大, 表 1 最大的沉降量达到了 43.5 cm, 与现场监测数据较为接近; 沉降曲线如图 6(b) 所示。

(3) 在开挖步骤后期和模拟降雨阶段, 在采空区与断层之间的岩体随着开挖的进行与雨水的渗入出现了破坏的痕迹, 在距离采空区 11 cm 处发生了破坏, 有裂隙产生, 顶板有下沉的迹象, 距离采空区 3 cm 处监测点已经发生冒落, 如图 7 所示。

(4) 通过摄影监测采空区附近以及断层周围岩体的位移情况, 图 8 的总体趋势基本一致, 采空区附近的监测点均朝向采空区内移动, 断层内测点沿滑体向采空区滑移, 而靠近边坡坡面的监测点有向断层移动的水平位移和向采空区移动的垂直位移, 而通过图 8(a)、(b) 的对比可知, 在模拟降雨之后, 各个测点向采空区方向移动的趋势更加明显, 水平和垂直位移都有所增大, 特别是断层内的顺坡滑动更加明显, 采空区附近的岩体位移量都明显增加。

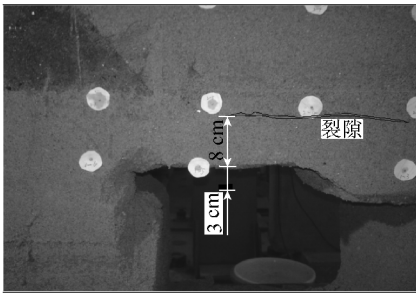


图7 采空区附近岩体破坏示意

Fig. 7 Schematic diagram of mass destruction near the cave

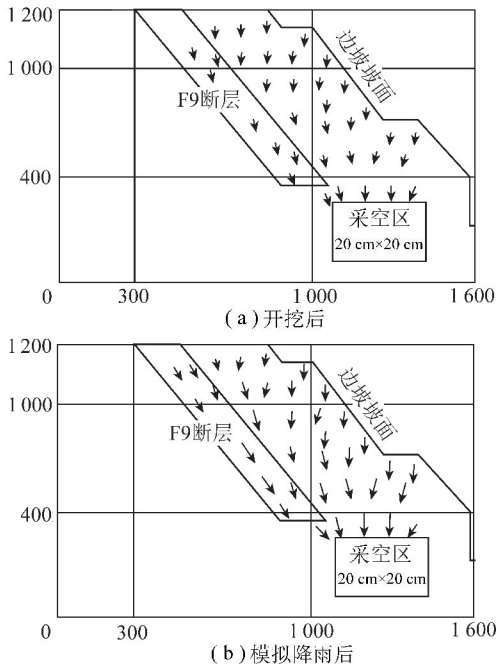


图8 开挖后和模拟降雨后位移累加矢量(单位:mm)

Fig. 8 Cumulative displacement vectors after excavating and rainfall

3 边坡稳定性的计算

3.1 模型的建立

本次选取边坡较危险区域的剖面计算,分别对矿体开采前、开采后两种情况建立模型,力学参数见表2,设计模型如图9所示。

3.2 模型的计算

模型建立后分别对开挖前、后进行计算,可以得到最危险滑动面及边坡最小安全系数,如表6、图10所示。

3.3 计算结果分析

通过计算模型得到最危险滑动面,开挖前边坡安全系数平均值为1.203,根据我国《岩土工程勘察规范》中的规定可以视为是安全的^[13-15];而观察开挖后

得到最危险滑动面区域有所增大,与采空区位置有接触,边坡安全系数平均值为1.171,较之开挖前有所降低。

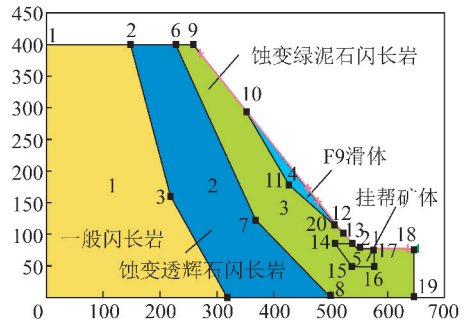
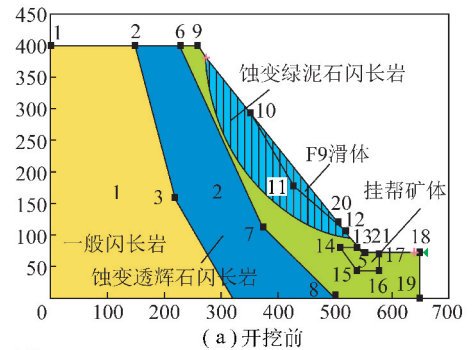
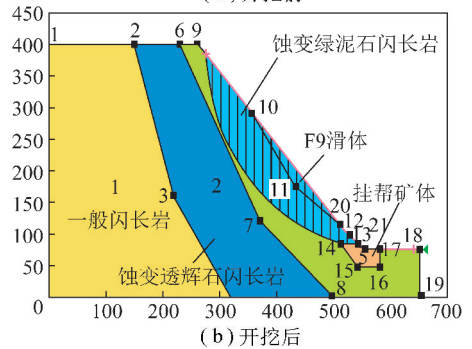


图9 稳定性计算模型(单位:m)

Fig. 9 Calculating model of stability



(a) 开挖前



(b) 开挖后

图10 模型开挖前、后最危险滑动面(单位:m)

Fig. 10 The most dangerous sliding surface of the model before and after excavating

表6 模型开挖前、后的安全系数

Table 6 Safety factor of the model before and after excavating

计算方法	开挖前	开挖后
Ordinary 法	1.176	1.143
Bishop 法	1.244	1.214
Janbu 法	1.165	1.132
摩根斯顿法	1.227	1.195
平均值	1.203	1.171

4 结 论

(1)近年来随着露天矿山开采的深入,部分矿山逐渐需要转入地下开采,其中挂帮矿的开采会引起一系列的岩石力学工程问题,本文以此为背景探讨高陡边坡下开采挂帮矿对滑体稳定性影响。

(2)挂帮矿开挖后对断层中应力状态产生扰动,内部应力开始逐渐和集中增大,随着周围岩体的逐渐稳定,应力重新平衡。模拟降雨渗入断层破碎带后改变其抗滑性,降低黏聚力,使其结构更加软弱,导致其应力再次集中增大。

(3)通过 Geo-Slope 计算和对比得知,挂帮矿体的开挖会增大最危险滑动面的区域,边坡安全系数会有所降低,开挖后平均值为 1.171。

(4)结合两种研究方法可以初步得到如下结论,挂帮矿的开挖会引起周围岩体内应力重新分布,并带动上部滑体顺坡滑动和破坏,从而对边坡整体的稳定性造成一定的影响,但是还不足以发生大规模的滑坡事故,而模拟降雨后边坡的整体稳定性有明显降低。

(5)以上研究得到的结论只是初步的,二维计算有其局限性,影响露天边坡稳定性的因素还有很多,比如没有考虑到实际开挖过程中的爆破震动等。

参考文献:

- [1] 韩 波. 浅析露天转井下时挂帮矿体开采的技术问题[J]. 矿业工程,2008,6(1):26-27.
Han Bo. Mining technology of pit wall-connected ore body in the case open-pit mine turns into underground mine[J]. Mining Engineering,2008,6(1):26-27.
- [2] 郭金峰. 金属矿山露天转地下开采的发展现状与对策[J]. 云南冶金,2003,32(1):7-8.
Guo Jinfeng. Development state and strategy of metal mine transferred from opencast mining into underground mining[J]. Yunnan Metallurgy,2003,32(1):7-8.
- [3] 蔡路军,马建军,江 兵,等. 高陡边坡下采矿安全问题分析探讨[J]. 矿业快报,2006,25(3):33-35.
Cai Lujun, Ma Jianjun, Jiang Bing, et al. Analysis and discussion on mining safety problem under high and steep slope[J]. Modern Mining,2006,25(3):33-35.
- [4] 宋卫东,杜建华,杨幸才,等. 深凹露天转地下开采高陡边坡变形与破坏规律[J]. 北京科技大学学报,2010,32(2):145-148.
Song Weidong, Du Jianhua, Yang Xingcai, et al. Deformation and failure of a high steep slope due to transformation from deep open-pit to underground mining[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2010,32(2):145-148.
- [5] 李 辉,邓建辉. 滑坡体下挂帮矿开采方案与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):985-987.
Li Hui, Deng Jianhui. Mining scheme and its analysis of a hanging-

wall ore below a landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(5):985-987.

- [6] 石杰红,王金安,谢 芳. 高陡边坡下开采安全性的相似材料模拟与数值模拟对比研究[J]. 中国安全生产科学技术,2007,3(6):77-81.
Shi Jiehong, Wang Jinan, Xie Fang. Study on the security of the excavation under the slope with both similar and numerical simulation[J]. Journal of Safety Science and Technology,2007,3(6):77-81.
- [7] 芮勇勤,贺春宁,王惠勇,等. 开挖引起大规模倾移滑移边坡变形、破坏分析[J]. 长沙交通学院学报,2001,17(4):8-12.
Rui Yongqin, He Chunqing, Wang Huiyong, et al. Analysis of deformation and development of the large-scale toppling-sliding slope under mining[J]. Journal of Changsha Communications University,2001,17(4):8-12.
- [8] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1):6-8.
Kou Xiaodong, Zhou Weiyan, Yang Ruojiong. Stability analysis on the high slopes of three-gorges shiplock using FLAC-3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(1):6-8.
- [9] 秦凯旭,冯文凯,郎秋玲. Geo-Slope 软件在某滑坡稳定性计算中的应用[J]. 灾害学,2007,22(2):21-22.
Qin Kaixu, Feng Wenkai, Lang Qiuling. Application of Geo-Slope software in calculation of landslide stability[J]. Journal of Catastrophology,2007,22(2):21-22.
- [10] 屈建军,李建林,王乐华. Geo-Slope 软件在边坡稳定性分析中的应用[J]. 人民长江,2009,40(15):49-40.
Qu Jianjun, Li Jianlin, Wang Lehua. Application of Geo-Slope software in sideslope stability analysis[J]. Yangtze River,2009,40(15):39-40.
- [11] 李晓红,卢义玉,康 勇,等. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京:科学出版社,2007:2-55.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Kang Yong, et al. Experimental simulation of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press,2007:2-55.
- [12] 田国荣,张保平. 岩石力学实验数据处理分析系统设计与实现[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(S1):1 065-1 067.
Tian Guorong, Zhang Baoping. Design and accomplishment of data interpretation system for rock mechanics testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(S1):1 065-1 067.
- [13] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002:379-392.
Cai Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press,2002:379-392.
- [14] 黄成林,罗学东,张建钢,等. 蒙库铁矿边坡岩体质量分级研究[J]. 黄金,2008,29(3):30-31.
Huang Chenglin, Luo Xuedong, Zhang Jianguo, et al. Rockmass quality classification of slope in Mengku Iron Mine[J]. Gold,2008,29(3):30-31.
- [15] 柴红保,曹 平. 采空区对边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(4):1 529-1 531.
Chai Hongbao, Cao Ping. Influence of goaf on slope stability[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2010,41(4):1 529-1 531.