

## 水平地震力作用下岩体破坏机理探究<sup>①</sup>

言志信<sup>1,2</sup>, 史 盛<sup>1,2</sup>, 党 冰<sup>1,2</sup>, 刘 灿<sup>1,2</sup>, 徐 甜<sup>1,2</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:**基于摩尔库伦强度准则和波动理论对地震作用下岩体的破坏机理进行研究。结果表明:当埋深在一定范围内,水平地震作用下岩体的内聚力  $c$  和正应力  $\sigma_n$  与振动速度和埋深呈线性关系。当埋深一定时,振动速度越大  $c$  值越小;在振动速度增大的过程中岩体的应力状态由压应力逐渐转变为拉应力,且拉应力随振动速度的增大而增大;当振动速度一定时,岩体埋深越大  $c$  值越小;埋深越浅,拉应力越大,当埋深达到一定值时岩体就只在其弹性极限内振动而不产生破坏。

**关键词:**岩体;地震作用;内聚力;拉断破坏

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0203-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0203

## Research on the Failure Mechanisms of Rock Masses under Level Seismic Loading

YAN Zhi-xin<sup>1,2</sup>, SHI Sheng<sup>1,2</sup>, DANG Bing<sup>1,2</sup>, LIU Can<sup>1,2</sup>, XU Tian<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Based on Mohr-Coulomb failure criterion and wave theory, the failure mechanism of rock and soil masses under earthquake loading has been theoretically analyzed, with the calculation process assuming the maximum value of seismic stress and the most unfavorable orientation. It has been found that cohesive force and normal stress are linearly related to vibration velocity when the burial depth is within a certain range. When the burial depth is constant, vibration velocity increases as cohesive force,  $c$ , decreases, so with increasing vibration velocity, stresses in the rock mass would transform from the compressive state to the tensile state and continue to increase. When the vibration velocity is constant, the deeper the burial depth of the rock mass, the smaller is the cohesive force; and the shallower the burial depth, the greater is the tensile stress. When the burial depth increases to a certain value, the rock mass begins to vibrate within the elastic limit and no failure can occur. This research can be applied to the assessment of rock mass stability and the forecasting of geological hazards, as rock masses under different burial depths always have different stress states. More specifically, rock masses buried shallowly store only a small amount of strain energy, limiting their destructive potential. Increasing the burial depth correspondingly increases the strain energy; as a result, the rock masses are closer to reaching their limit state and can more easily fail. The evolution of geological bodies shares a similar rule; namely, when a geological body reaches its limit state, a slight perturbation can trigger a geological hazard, whereas if the geological body has not yet approached its limit state, only a suffi-

① 收稿日期:2012-11-15

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20090211110016);云南省交通厅科技项目(云交科 2010(A)06-b)

作者简介:言志信(1961-),男,湖南株洲人,教授,博士生导师,主要从事边坡工程、地下工程和爆破工程的教学与研究。

E-mail: yzx10@163.com

ciently strong disturbance will induce the geological hazard.

**Key words:** Rock mass; Seismic loading; Cohesive force; Tensile failure

## 0 引言

地震是地球内部能量在释放过程中产生的动力作用,是最严重的地质灾害之一。在地震荷载的作用下岩体的变形破坏不仅表现在宏观特征上的崩塌、倾倒和沿结构面的滑动,还有岩体微观的损伤、松动。经过地震动力作用改造的岩体,其形式特征虽然多种多样,但从本质上讲,都具有密度减小、结构疏松、岩体力学参数下降的特点<sup>[1]</sup>。目前,已有大量文献对地震作用下岩体的破坏问题进行了研究<sup>[2-10]</sup>,其中文献<sup>[2-6]</sup>采用数值模拟的方法研究了地震荷载作用下岩体的破坏规律,文献<sup>[7-10]</sup>应用试验的方法对岩体的动力学问题进行了研究。地震波从震源产生后经过岩体向地表传播的过程,必定会改变岩体中原有的应力状态。事实上,在地震荷载作用下岩体所处的应力状态是由地震动应力和自重静应力耦合作用的结果,且地震波的大小和方向时刻都在改变,当某一时刻地震波的强度超过岩体的极限强度时,岩体就会产生破坏。综上可以看出,岩体在地震作用下的破坏是地震产生的动荷载改变了岩体原有的稳定应力场,从而导致岩体的破坏<sup>[11-13]</sup>。通过对上述理论和实验研究的总结,本文基于摩尔库伦强度准则对水平地震作用下岩体的破坏机理进行深入探索。

## 1 地震作用下岩体破坏机理探究

根据波动理论<sup>[14]</sup>,地震波产生的动应力可以表示为

$$\sigma_s = \rho c_s v_s \quad (1)$$

式中, $\sigma_s$ 是地震波产生的水平动应力; $\rho$ 为岩体的密度; $c_s$ 为岩体中横波波速, $c_s = \sqrt{G/\rho}$ , $G$ 为岩体的剪切模量; $v_s$ 为岩体中质点的水平振动速度。由式(1)可知,地震波产生的水平动应力大小及方向都随时间变化,在不同的时刻产生的拉应力和压应力不同。已有研究表明<sup>[15]</sup>,相比于压应力,拉应力对岩体的破坏作用更大。所以在分析中水平动应力采用拉应力,且方向为对岩土体破坏最有利的方向。

图1是岩体中某一点在自然条件下和受到地震产生水平动应力作用时的应力状态。在地震作用下岩体的应力状态将会发生改变,根据设计要求,取地震波产生水平动应力的最大值和最不利于岩体稳定的方向,如图1(b)所示。此时水平方向岩体受到的

应力为 $k_0 \gamma h - \rho c_s v_s$ ,其中 $\gamma$ 为岩体的容重; $h$ 为埋深; $k_0$ 为侧压力系数。赵德安等<sup>[16]</sup>给出我国平均水平地应力与垂直地应力的比值为 $k_0 = 124/h + 1.0$ ,代入 $k_0$ 后岩体在地震作用下水平方向所受的应力为 $124\gamma + \gamma h - \rho c_s v_s$ 。

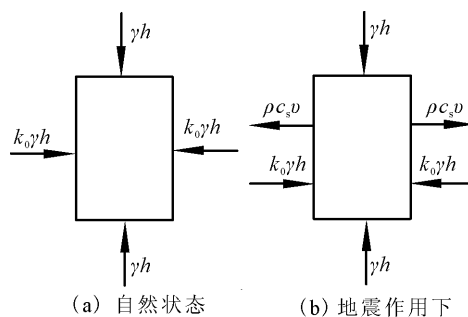


图1 岩体应力状态

Fig. 1 Stress state of rock mass.

图2为地震作用下岩体某一点破坏时的摩尔应力圆与强度包络线之间的关系。由图中可知,岩体

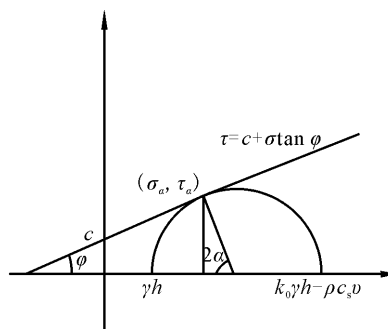


图2 岩体在地震作用下破坏时摩尔应力圆与强度包络线之间的关系

Fig. 2 The relationship between Mohr stress circle and strength envelope of rock mass in the earthquake.

破坏时摩尔应力圆的半径为

$$\sigma = 62\gamma - 0.5\rho c_s v_s \quad (2)$$

根据图2的几何特征可得

$$c + [\gamma h + \sigma(1 - \cos 2\alpha)] \tan \varphi = \sigma \sin 2\alpha \quad (3)$$

令 $\tan \varphi = f$ ,则由 $\tan 2\alpha = 1/f$ 知 $\sin 2\alpha = \sqrt{1+f^2}$ , $\cos 2\alpha = f/\sqrt{1+f^2}$ 。将其代入式(3)得

$$\sigma = c + \gamma h f / \sqrt{1+f^2} - f \quad (4)$$

由于式(2)和式(4)相等,可得

$$c = (\sqrt{1+f^2} - f)(62\gamma - 0.5\rho c_s v_s) - \gamma h f \quad (5)$$

根据图2还可得出在地震作用下当岩体破坏时的正应力为

$$\sigma_n = \gamma h + \sigma(1 - \cos 2\alpha) \quad (6)$$

表 1 为我国当前使用的地震烈度表,计算中岩体密度取  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ;剪切模量取  $56\text{ GPa}$ ;泊松比取  $0.23$ ;内摩擦角取  $27^\circ$ 。根据岩体材料参数和表 1,岩体内聚力  $c$ 、正应力  $\sigma_n$  与地震波产生的水平向振动速度的关系见图 3、4。

表 1 中国地震烈度表(1980)<sup>[17]</sup>

Table 1 Earthquake intensity of China(1980)<sup>[17]</sup>

烈度	物理参考指标		烈度	物理参考指标	
	水平加速度 /[ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ]	水平速度 /[ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		水平加速度 /[ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ]	水平速度 /[ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
I			VI	63(45~89)	6(5~9)
II			VII	125(90~177)	13(10~18)
III			VIII	250(178~353)	25(19~35)
IV			IX	500(354~707)	50(36~71)
V	31(22~44)	3(2~4)	X	1000(708~1414)	100(72~141)

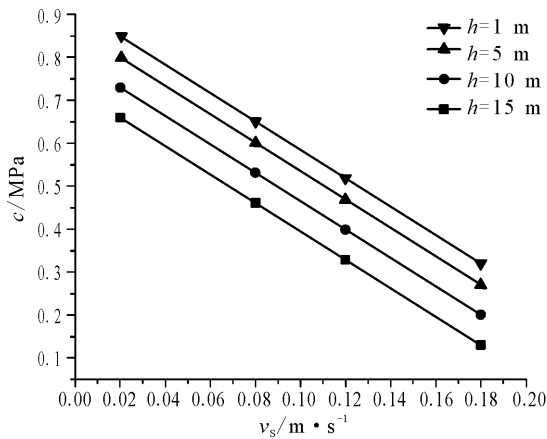


图 3 岩体内聚力  $c$  与水平向振动速度  $v_s$  的关系

Fig. 3 The relationship between rock mass cohesion  $c$  and horizontal vibration velocity  $v_s$ .

由图 3 可知,当埋深一定时,岩体的内聚力  $c$  和地震波产生的水平向速度成线性关系。地震波产生的水平向振动速度越大  $c$  值越小,这是由于地震动力造成岩体微观结构的损伤、松动使岩体质量和力学参数下降。另外从图 3 中还可以看出,岩体内聚力  $c$  和埋深  $h$  有关,当水平振动速度  $v_s$  一定时,内聚力  $c$  随着埋深  $h$  的增大而减小。这是由于处于不同深度的岩体所受的应力状态不同,当埋深较浅时岩体内储存应变能较小,岩体在动力作用下不易发生破坏。随着埋深的增加,岩体内存储应变能增大,也就越来越接近临界稳定状态,此时在动力扰动下便可引发岩体的破坏<sup>[18]</sup>。例如在 VII 烈度( $v_s=0.18\text{ m/s}$ )地震作用下,埋深为  $1\text{ m}$  的岩土体  $c$  值为  $0.28\text{ MPa}$ ;埋深为  $15\text{ m}$  的岩土体  $c$  值为  $0.1\text{ MPa}$ 。这种规律和地质体的演化有关,即当地质体演化已经处于临界稳定状态时,微小的扰动便可诱发地质灾害

的发生;当地质体的演化仅处于接近临界稳定状态时,强烈的扰动可以诱发地质灾害的提前发生<sup>[19]</sup>。当然,这只适用于埋深适中的情况。如果埋深太大,式(5)中的  $c$  值将变成负值,这与实际相悖。这种情况下式(5)就没有意义。

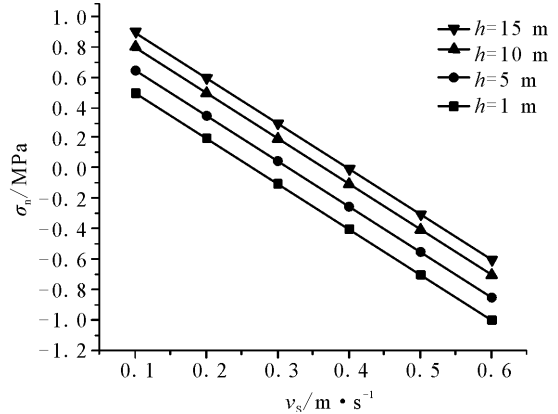


图 4 岩体正应力  $\sigma_n$  与水平向振动速度  $v_s$  的关系

Fig. 4 The relationship between rock mass stress  $\sigma_n$  and horizontal vibration velocity  $v_s$ .

由图 4 可以看出,当埋深一定时,随着水平振动速度  $v_s$  的增大, $\sigma_n$  由压应力逐渐向拉应力转变,且  $v_s$  越大岩体所受的拉应力越大。当水平振动速度  $v_s$  一定时,埋深越小岩体受到的拉应力越大。这表明当岩体埋深较小时,在地震作用下就越容易发生拉破坏。随着埋深的增大,岩体的受压状态越明显,发生拉破坏需要的地震波产生的水平振动速度也越大,岩体也就越不容易发生拉破坏。由此可见,从地表至深部,在地震作用下岩体的受拉破坏因围岩的作用逐渐减弱,到一定深度时,岩体就只在其弹性极限内振动而不产生破坏,这个深度就是地震动力作用下岩体产生破坏的极限深度<sup>[1]</sup>。对地震作用下岩体破坏极限深度的研究,文献<sup>[20]</sup>采用了动力模拟试验进行了分析,模型试验结果与实际情况基本吻合。表 2 为试验结果汇总。

表 3 为岩体的抗拉强度。由表可以看出一般岩体的抗拉强度在  $0.3\sim 1.3\text{ MPa}$  之间,软弱夹层等不连续面的抗拉强度更低。由式(7)可知,当  $\sigma_n$  超过岩体最小抗拉强度( $0.3\text{ MPa}$ )时就产生破坏,由此便可估算出地震作用下岩体破坏的极限深度。

图 5 为地震水平加速度和宏观烈度之间的关系。根据图 5 和表 1 可将表 2 中模型试验水平向地震加速度转化为水平向振动速度。经过计算,当地震水平加速度为  $0.2\text{ g}$  时  $\sigma_n > 0$ ,所以岩体不产生拉破坏;当水平地震加速度为  $0.4\text{ g}$  时,在  $4\text{ m}$  以上范

围内  $\sigma_n < 0$ , 这就出现浅层松动, 4 m 以下深度  $\sigma_n > 0$ , 无拉破坏产生; 当地震水平加速度为 0.6 g 时, 岩体产生拉破坏的极限深度为 44.9~84 m。由此可见, 通过本文建立模型的计算结果和表 2 中模型试验结果基本吻合。

表 2 振动模拟试验结果汇总表<sup>[18]</sup>

Table 2 Experiment results<sup>[18]</sup>

地震动力 施加方向	加速 度/g	破坏现象描述
X	0.2	模型无破坏现象。
	0.4	1#模型局部出现变形破坏, 2#和3#模型浅层出现整体松动, 并有裂缝延伸。
	0.6	1#模型出现大的松动开裂, 破坏拉裂深度约 2 cm(40 m)。2#模型出现整体岩层的严重倾倒、崩塌、拉裂破坏。3#模型的松动拉裂深度约垂直地表 5 cm(100 m)。

表 3 岩体抗拉强度值<sup>[21]</sup>

Table 3 Anti-tensile strength of rock mass<sup>[21]</sup>

岩体名称	抗拉强度/MPa	岩体名称	抗拉强度/MPa
黄土	0.05	砂岩	1.1
砾岩	1.3	煤层	0.4
泥岩	0.3	软弱夹层	0.1

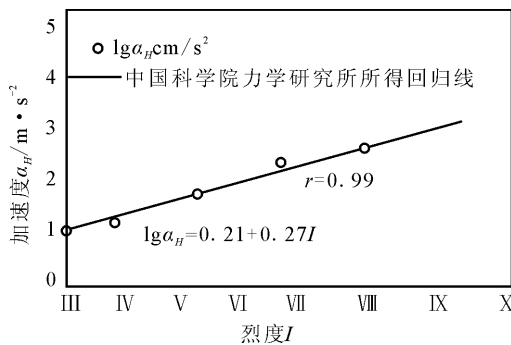


图 5 加速度与烈度之间的关系(据刘恢先, 1978)

Fig. 5 The relationship between acceleration and intensity (from LIU hui-xian, 1978).

## 2 结论

基于摩尔库伦强度准则和波动理论, 计算过程中取地震动应力的最大值和最不利于岩体稳定的方向对地震作用下岩土体的破坏机理从理论方面进行分析研究。结果表明, 当埋深在一定的范围内时, 水平地震作用下岩体的内聚力  $c$  和正应力  $\sigma_n$  与振动速度和埋深呈线性关系。当埋深不变时, 振动速度越大  $c$  值越小; 在振动速度增大的过程中, 岩体的应力状态由压应力逐渐转变为拉应力, 且振动速度越大拉应力越大; 当振动速度不变时, 岩体的埋深越大则  $c$  值越小; 埋深越浅岩体所受拉应力越大, 当埋深达到一定值时岩体就只在其弹性极限内振动而不产

生破坏。本研究对地震作用下岩体稳定性评价及地质灾害预测具有一定的参考意义。

## [参考文献]

- [1] 梁庆国, 韩文峰, 谌文武, 等. 岩体地震动力破坏问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2783-2788. LIANG Qing-guo, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu, et al. Discussion on Rockmass Failure under Seismic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Supp. 2): 2783-2788.
- [2] 言志信, 蔡汉成, 王群敏, 等. 岩土体在地震作用下的破坏研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1621-1626. YAN Zhi-xin, CAI Han-cheng, WANG Qun-min, et al. Research on Failure of Rock and Soil Mass under Earthquake[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1621-1626.
- [3] Tang C A, Kaiser P K. Numerical Simulation of Cumulative Damage and Seismic Energy Release during Brittle Rock Failure—Part I: Fundamentals[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sic., 1998, 35(2): 113-121.
- [4] Wu C Q, Hao H, Ma G W, et al. Dynamic Response Analysis of Rock Mass with Stochastic Properties Subjected to Explosive Loads[J]. FRAGBLAST—International Journal for Blasting and Fragmentation, 1999, 3(2): 137-153.
- [5] Cichowicz A, Milev A M, Durrheim R J. Rock Mass Behaviour under Seismic Loading in A Deep Mine Environment; Implications for Stop Support[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 100(2): 121-128.
- [6] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 等. 动载荷作用下岩石破坏过程的数值试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 887-892. ZUO Yu-jun, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical Test on Failure Process of Rock Subjected to Dynamic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 887-892.
- [7] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387-1395. LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, et al. Study of Rock Mechanical Characteristics under Coupled Static and Dynamic Loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387-1395.
- [8] 张海波, 王媛, 王鲁明, 等. 裂隙岩体动力特性的试验模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 309-311. ZHANG Hai-bo, WANG Yuan, WANG Lu-ming, et al. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Fractured Rock Mass[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(3): 309-311.
- [9] Li Z Z, Lin G X, Xu J H, et al. Experimental and Theoretical Study of Static-dynamic Mixed Mode Brittle Fracture of Rock[J]. Journal of Central South University of Technology (English Edition), 1998, 5(2): 120-123.
- [10] 倪振强, 孔纪名, 阿发友. 地震作用下非贯通节理岩体斜坡破坏的物理模型试验研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 209-214.

- NI Zhen-qiang, KONG Ji-ming, A Fa-you, et al. Physical Model test of Rocky Slope Failure Containing Intermittent Joints under Earthquake Action[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 34(1):209-214.
- [11] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12):2006-2010.  
CAO An-ye, FAN Jun, MOU Zong-long, et al. Burst Failure Effect of Mining-induced Tremor on Roadway Surrounding Rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12):2006-2010.
- [12] 朱万成, 唐春安, 黄志平, 等. 静态和动态载荷作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 24(1):1-7.  
ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, HUANG Zhi-ping, et al. Numerical Simulation on Splitting Failure Mode of Rock under Static and Dynamic Loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(1):1-7.
- [13] 冯文凯, 黄澜秋, 许强. 强震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1):20-25.  
FENG Wen-kai, HUANG Run-qiu, XU Qiang. In-depth Analysis of the Seismic Wave Effect and Slope Shattered Mechanism[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):20-25.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. FLAC2D users manual dynamic analysis1~27[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2008.
- [15] 王来贵, 赵娜, 李天斌. 强震诱发单一弱面斜坡塌滑有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1):3163-3167.  
WANG Lai-gui, ZHAO Na, LI Tian-bin. Finite Element Simulation of Collapse and Sliding of Slope with Single Weak Plane Induced by Strong Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup. 1):3163-3167.
- [16] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6):1266-1272.  
ZHAO De-an, CHEN Zhi-ming, CAI Xiao-lin, et al. The Statistical Analysis to the Distribution of the Geo-stress in the Continental Area of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6):1266-1272.
- [17] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 1993.  
ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Analysis Principles of Engineering Geological[M]. Beijing: Geological Publishing, 1993.
- [18] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 等. 深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6):742-746.  
ZUO Yu-jun, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Mechanism Analysis on Failure of Deep Rock Laneway under Dynamic Disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6):742-746.
- [19] 许强, 黄润秋, 王来贵. 外界扰动诱发地质灾害的机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2):280-284.  
XU Qiang, HUANG Run-qiu, WANG Lai-gui. Mechanism Analysis on Geological Hazards Triggered by External Disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2):280-284.
- [20] 王勇智, 戚炜, 门玉明, 等. 强震区岩体动力破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11):1841-1844.  
WANG Yong-zhi, QI Wei, MEN Yu-ming, et al. Experimental Research of Dynamic Failure Mechanism of Rockmass in Meizoseismal Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1841-1844.
- [21] 黄侃, 程国明. 露天矿高边坡钻孔采矿法的参数研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2):164-166.  
Huang Kan, CHENG Guo-ming. Study on the Parameters of Highwall Auger Mining in Open Pit Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2):164-166.