

地震和煤矿采动耦合作用下露天矿边坡 及采空区稳定性研究*

李海军^{1,2}, 魏晓刚², 孙琦², 卫星³, 母倩雯³

(1. 辽宁交通高等专科学校, 辽宁 沈阳, 110122; 2. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁 阜新, 123000;
3. 辽宁省化工地质勘察院, 辽宁 锦州, 121000)

摘要: 为了探讨地震和煤矿采动耦合作用下的露天矿边坡及采空区的稳定性, 以辽宁排山楼金矿露天转井工开采为研究对象, 基于 FLAC3D 有限元分析平台, 采用强度折减法研究了未进行煤炭开采时和煤矿采动单独作用下露天矿边坡的安全系数, 重点探讨了煤矿采动和地震耦合作用下露天矿边坡及采空区应力场、位移场及塑性区的分布规律。结果表明: 未经采动时, 露天矿边坡的安全系数为 1.21, 边坡处于稳定状态; 煤矿采动后露天矿边坡安全系数降为 1.12, 仍处于稳定状态, 单独的煤矿采动作用不会导致露天矿边坡失稳; 在地震和煤矿采动耦合作用下, 露天矿边坡坡体内出现了较大的拉应力, 采空区顶板出现冒落现象, 底板出现底鼓现象; 在地震和采动耦合作用下, 边坡将出现失稳破坏, 破坏形式主要为采动区顶板的大面积冒落和边坡的崩塌。

关键词: 边坡稳定性; 地震; 采动; 耦合作用

中图分类号: TV441

文献标识码:

文章编号: 1000-0666(2015)01-0161-06

0 引言

随着对矿产资源需求量的不断增加, 露天和井工联合开采越来越多, 由于露天开采而形成的高边坡, 其稳定性受到地震荷载作用以及边坡下井工开采采动作用的影响较大, 地震和采动耦合作用可能导致边坡失稳, 严重影响矿山安全生产, 因此研究地震和采动耦合作用对露天矿边坡稳定性的影响具有重要的现实意义。

在地震对边坡稳定性的影响方面, Hatzor 等 (2004) 采用不连续变形分析方法 (DDA) 研究了动荷载作用下岩质边坡的稳定性; Kokusho 和 Tlshizawa (2007) 从能量角度研究地震振动能量释放对边坡稳定性的影响及其致灾机理; Kazmi 等 (2014) 研究了巴基斯坦克什米尔地震导致断层活化导致边坡失稳的内在机理; 程宇等 (2012) 研究了地震过程中断层破裂过程对边坡稳定性的影响, 探索了荷载场的变化规律; 孙进忠等 (2004) 提出了地震荷载作用下边坡崩塌的三级评判思想; 黄帅等 (2014) 采用转动平衡理论研究了地震荷

载作用下砂土边坡内部孔隙水压力对边坡位移的影响; 冯志仁等 (2014) 研究了地震动峰值、频率和初动方向对边坡内应力和位移的影响; 李祥龙等 (2014a, b) 采用离心机动力试验手段进行边坡动力响应分析, 并研究了结构面对边坡稳定性的影响; 王云鹏等 (2010) 采用概率积分法与数值模拟手段相结合的方法研究了井工开采对露天矿边坡稳定性的影响。在采空区对边坡稳定性影响方面, 江学良等 (2013) 利用 SURPAC 建模, 采用 FLAC3D 探讨了采空区和岩质边坡的相互作用, 研究了边坡的应力和位移的分布规律; 柴红保等 (2010) 基于强度折减法, 重点研究了采空区对边坡安全系数的影响; 尹光志等 (2012) 根据底摩擦模拟模型实验, 进行了采空区影响下磷矿露天边坡稳定性的研究, 分析了边坡的变形破坏响应特征。这些研究极大地推进了对边坡稳定性的认识 (孙世国, 王群, 2014), 但只考虑了地震荷载或采动作用单一因素对边坡稳定性的影响, 近年来有学者研究地震和采动耦合作用对建筑物的影响 (刘书贤等, 2011, 2013, 2014a, b, c; 张春礼, 2009; 魏晓刚, 2011), 但地震和采动耦

* 收稿日期: 2014-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金 (51474045, 51274111)、辽宁省教育厅基金 (L2013137) 和辽宁工程技术大学生产技术问题调研基金 (14—T—005) 联合资助。

合作用对露天矿边坡及采空区的稳定性影响的研究未见报道。

本文将露天矿边坡及其下伏采空区视为一个系统,基于强度折减法的基本计算理论,采用 FLAC3D 分析该系统在地震和采动荷载耦合作用下露天矿边坡及其下伏采空区的应力场和位移场分布规律,探讨煤矿采动损害影响下的露天矿边坡及采空区的地震稳定性。

1 露天矿边坡稳定性分析

1.1 工程背景

位于辽宁省阜新市的排山楼金矿于 1997 年建成投产,开采初期主要以露天开采方式为主,2004 年末露天矿闭坑后逐渐转为井工开采方式。

随着回采工作面的下降,由于顶板围岩滞后冒落,形成了规模较大的不连续采空区,其中 +225 m 水平之上形成的采空区的总面积达 45 470 m²,已形成大面积露天采坑和井下不连续的采空区,且井工开采仍在进行之中,煤矿采空区范围仍然在不断扩大。

1.2 强度折减法的基本计算原理

边坡的稳定性分析采用强度折减法即对边坡岩体的抗剪参数进行折减,当达到边坡的极限平衡状态时,折减系数即为边坡的安全系数(柴红保等,2010),其计算公式为

$$c' = \frac{c}{F_{\text{trial}}} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_{\text{trial}}}\right) \quad (2)$$

式中: F_{trial} 为边坡的安全系数 ($F_{\text{trial}} > 1$ 表示边坡处于稳定状态, $F_{\text{trial}} = 1$ 表示边坡处于稳定临界状态, $F_{\text{trial}} < 1$ 表示边坡处于失稳状态); c 为边坡岩土未经折减状态时的粘聚力(单位: MPa); c' 为边坡岩体折减至极限平衡状态时的粘聚力(单位: MPa); φ 为边坡未经折减状态时的内摩擦角(单位: °); φ' 为边坡岩体折减至极限平衡状态时的摩擦角(单位: °)。

1.3 露天矿边坡稳定性分析

本文基于有限元分析软件 FLAC3D 建立露天矿边坡的整体三维有限元分析模型,模型的平面尺寸为 500 m × 300 m,岩层倾向方向取 150 m,采深

为 80 ~ 200 m,2 个采空区长度分别为 20 m 和 70 m,所建立的露天矿边坡的有限元几何分析计算模型如图 1 所示;假设露天矿边坡岩体为满足 Mohr - Column 屈服准则的弹塑性模型,则该岩体物理力学参数如表 1 所示。

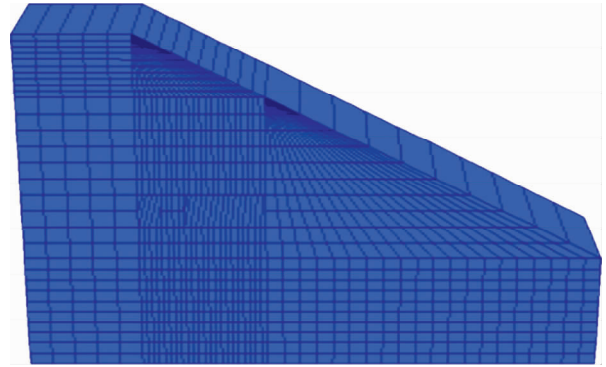


图 1 露天矿边坡的几何模型

Fig. 1 Geometric model of slope of open-pit mine

表 1 岩层物理力学参数

Tab. 1 The physical and mechanical parameters of the stratum

| 岩层名称 | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 黏聚力 /MPa | 内摩擦角 / (°) | 抗拉强度 /MPa |
|-------|--------------|------|-------------|---------------|--------------|
| 松散层 | 0.26 | 0.20 | 0.53 | 16 | 0 |
| 露天风化岩 | 12.5 | 0.23 | 1.02 | 25 | 1.16 |
| 黑糜棱岩 | 56 | 0.27 | 1.63 | 23 | 4.26 |
| 矿石 | 32 | 0.25 | 1.35 | 28 | 3.87 |
| 白糜棱岩 | 46 | 0.25 | 1.53 | 26 | 4.12 |

基于强度折减法的基本理论,将露天矿边坡岩体的抗剪参数进行折减后,此时达到岩体的极限平衡状态,此时露天矿边坡没有进行开采时其边坡安全系数 F_{trial} 为 1.21,由此可以判断露天矿边坡的安全储备理想,此时边坡处于稳定状态。当对露天矿边坡中的煤层进行开采后,所形成的两个采空区内部可以视为松散层,对其进行抗剪参数折减,所得到的边坡安全系数 F_{trial} 为 1.12,由此可以判断煤层开采后所形成的采空区比较稳定,边坡不会产生失稳破坏现象。

2 地震与煤矿采动耦合作用下露天矿边坡失稳破坏的数值模拟

2.1 有限元数值计算分析

为了保证在分析地震和煤矿采动耦合作用下

的边坡稳定性时的数值结果的可靠性,在露天矿边坡的煤层开采完成后,将其几何模型的边界条件改为自由边界条件,以避免地震波折射振荡对边坡的重复破坏(魏晓刚,2011)。边坡的阻尼系数为局部阻尼,阻尼系数为0.15。为了保证数值分析计算结果的可靠性和良好的对比性,所选取的地震波输入为集集地震波。图2为集集地震波的加速度时程曲线。

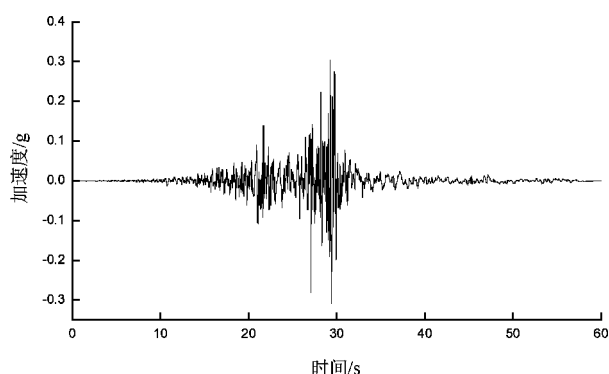


图2 集集地震波

Fig. 2 Chi-Chi earthquake wave

2.2 应力场分析

为了探讨煤矿采空损害影响下露天矿边坡及采空区失稳破坏的原因,对地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的应力场分析进行了重点分析,在对露天矿边坡及采空区的地震动响应进行有限元数值计算完成后,重点研究了露天矿边坡及采空区 X 、 Y 、 Z 三个方向的应力云图的切片如图3所示。

分析图3可知:在地震荷载和煤矿采动的耦合作用下露天矿边坡及采空区水平方向上(X 向和 Y 向)出现了拉应力(由于露天矿边坡岩石已经风化,其抗拉强度较低,在拉应力作用下会岩石出现局部拉裂,由此导致采空区出整体失稳现象),在竖直方向上(Z 向)出现了压应力(露天矿边坡右侧采空区顶板和底板在压应力的作用下,可能顶板冒落、底板鼓起的破坏现象,导致巷道破坏现象严重,采空区会出现整体垮塌现象),并且地震作用下露天矿边坡及采空区的应力集中现象明显,此时露天矿边坡及采空区的稳定性极差,极易发生边坡失稳和采空区坍塌的地震动破坏现象。

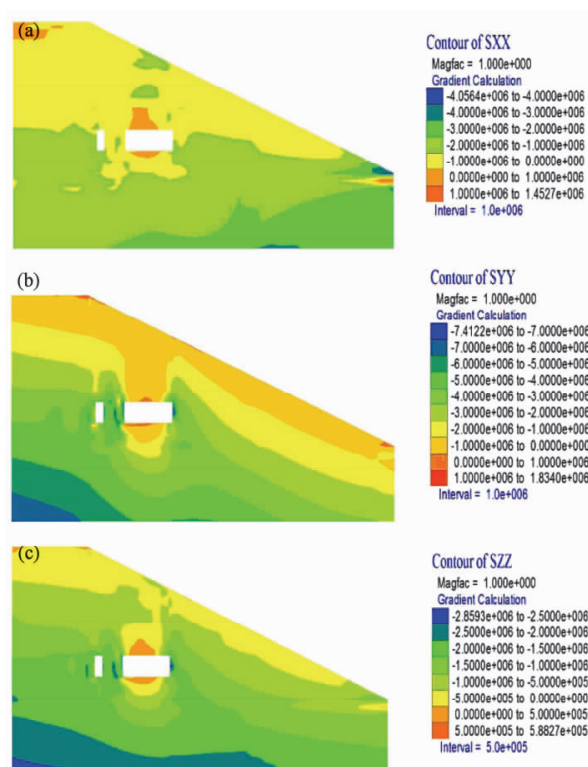


图3 露天矿边坡及采空区 X (a)、 Y (b)、 Z (c)三个方向的应力场分布云图

Fig. 3 Stress distribution nephogram of the slope and goaf of open-pit mine in X (a)、 Y (b)、 Z (c) direction

2.3 位移场分析

在分析露天矿边坡及采空区 X 、 Y 、 Z 三个方向的地震动应力场分布的基础上,需要对其所产生的地震动力位移响应进行分析,以此来保证分析结果的可靠性,所得到的露天矿边坡及采空区的地震动位移响应如图4所示。

通过图4可知:在煤矿采动与地震荷载的耦合作用下露天矿边坡及采空区在水平方向上出现了分别向左、向右的位移响应,在边坡的坡顶出现了0.1 m的向右侧位移响应,在露天矿边坡内部的右侧采空区则出现了0.124 m向左侧的位移响应。边坡的表面位移响应与内部采空区的位移响应的不一致导致露天矿的岩体发生相对运动的动力响应,岩层容易被拉断而出现裂缝,一旦内外部的裂隙贯通则露天矿边坡及采空区会出现崩塌的现象。

分析图4可知:采空区巷道的顶板处的地震动

力位移响应的峰值位移为 0.5 m, 此时顶板极易产生冒落垮塌现象, 由于位移响应过大采空区的沉降变形会波及地表, 导致边坡产生崩塌的整体失稳破坏现象; 而采空区巷道的底板的峰值位移响应为 0.2 m, 说明此时巷道底板的底鼓现象严重, 出现底鼓的原因是煤层开采后岩石内力发生应力重分布, 产生卸荷现象所产生的, 当地震发生时, 巷道的顶板坍塌和底板鼓起现象加剧说明了煤矿采动损害影响下的露天矿边坡及采空区巷道的地震动力稳定性极差, 需要采取相应的抗震加固措施。

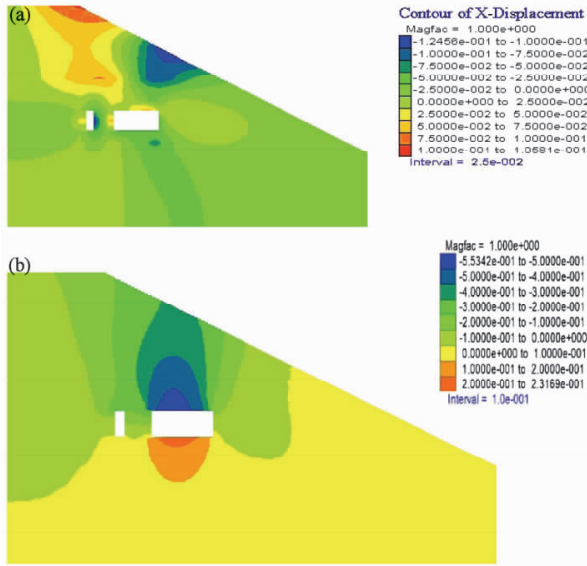


图4 露天矿边坡及采空区水平方向 (a) 及下沉 (b) 位移变化

Fig. 4 Horizontal direction (a) and subsidence (b) displacement of the slope and goaf of open-pit mine

2.4 塑性区分布

岩层的塑性区分布形态反映了在不同的外力扰动荷载作用下岩层的地质强度指标以及破坏程度 (李祥龙等, 2014), 在分析地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的应力场与位移场分布的基础上, 为了更为直观的分析露天矿边坡及采空区的地震动力破坏特征, 需要对其塑性区分布形态进行分析研究, 地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的塑性区分布如图 5 所示。

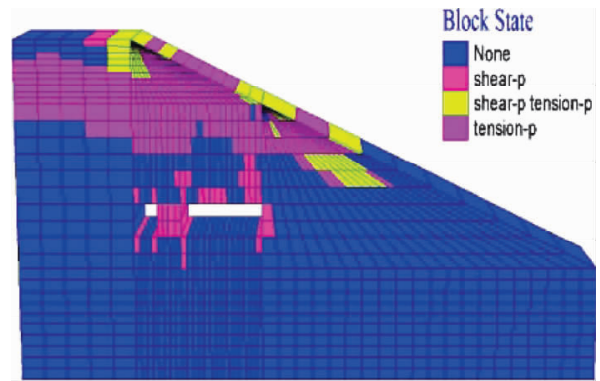


图5 露天矿边坡及采空区塑性区分布

Fig. 5 Plastic zone distribution of the slope and goaf of open-pit mine

通过分析图 5 地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的塑性区分布可以发现: 在露天矿边坡内部采空区塑性区沿着巷道的顶板、帮部以及底板的部分区域呈现出贯通分布的现象, 并且一直延伸至边坡的坡面位置, 并且露天矿边坡及采空区的整体塑性区分布中以剪切破坏的形式较多, 而且出现多处拉伸破坏和剪切破坏重合的位置, 由此可以判断露天矿边坡及采空区的地震动力破坏属于剪切破坏和拉伸破坏共同作用的结果, 在地震荷载的反复作用下, 岩层需要承受扰动荷载剪切和拉伸的反复作用, 一旦超过岩层的抗拉 (压) 强度, 微观上岩层会出现断裂破坏, 对于露天矿边坡及采空区整体系统而言, 则出现裂缝贯通、岩层塌落, 由此造成边坡发生整体失稳破坏现象。

2.5 失稳破坏分析

综合分析地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的的应力场、位移场和塑性区分布可以发现, 煤矿采动损害影响下的露天矿边坡及采空区的地震动力破坏主要以以下两种形式的破坏为主。

(1) 采空区顶板大面积冒落和底板底鼓现象: 应力集中现象、峰值位移响应和塑性区分布均集中出现在露天矿边坡内部的采空区顶板和底板处, 由此可以判断采空区的顶板冒落和底板底鼓现象极易发生, 如果扰动荷载的强度过大, 两个采空区之间的煤柱会发生冲击剪切破坏, 产生压碎失稳现象, 此时采空区的冒落现象会迅速贯通至地

表,导致采空区及边坡出现突然塌陷现象。

(2) 露天矿边坡出现崩塌跨落现象:从图5可以看出,采空区上方的大量岩体均处于塑性区范畴,在拉伸破坏和剪切破坏的共同作用下,边坡坡体已经失稳,但并未出现滑移面,这说明在地震和采动耦合作用下,边坡失稳形式主要是以岩体破碎后沿边坡向下滚动,形成大面积的崩塌,分析其机理主要是由于采空区成为了岩体中的弱面,导致边坡在地震作用下上方岩体破碎崩塌。

3 结论

通过对辽宁阜新排山楼露天矿开采转为井工开采实际情况的有限元数值模拟计算,可以得到如下结论:

(1) 该露天矿边坡未经采动时,边坡安全系数为1.21,边坡处于稳定状态,采动后边坡安全系数降为1.12,仍处于稳定状态,单独的采动作用不会导致边坡失稳;由此可以判断煤层开采后所形成的采空区比较稳定,露天矿边坡不会产生失稳破坏现象。

(2) 在地震和煤矿采动荷载的耦合作用下,露天矿边坡的坡体内出现了峰值拉应力,采空区顶板冒落和底板底鼓现象严重,在拉力剪力复杂应力的共同作用下,露天矿边坡内的岩体出现了拉断破裂现象。

(3) 综合地震与煤矿采动作用下露天矿边坡及采空区的的应力场、位移场和塑性区分布可以发现:煤矿采动损害影响下的露天矿边坡及采空区的地震动力破坏主要以采空区顶板大面积冒落和底板底鼓现象和边坡的崩塌两种破坏形式为主,需要针对灾害冲击荷载的破坏作用采取相应的抗震(振)加固措施,以保证露天矿边坡的稳定性和安全性。

参考文献:

柴红保,曹平,柴国武,等.2010.采空区对边坡稳定性的影响[J].中南大学学报:自然科学版,41(8):1528-1534.
程宇,蔡永恩,胡才博,等.2012.断层破裂过程对边坡的广义荷载场

的动态影响[J].地震研究,35(1):79-85.
冯志仁,刘红帅,于龙.2014.地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡表面放大效应研究[J].防灾减灾工程学报,34(1):96-100.
黄帅,宋波,牛立超,等.2014.地震作用下动孔隙水压力对边坡永久位移影响的简便计算方法[J].建筑结构学报,35(3):215-221.
江学良,杨慧,文畅平,等.2013.含地下采空区岩质边坡的施工过程数值分析[J].中国安全科学学报,23(1):107-114.
李祥龙,唐辉明,王立朝.2014a.顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J].岩石力学与工程学报,33(4):729-736.
李祥龙,唐辉明.2014b.逆层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J].岩土工程学报,36(4):687-694.
刘书贤,郭涛,魏晓刚,等.2014a.地震作用下煤矿开采损伤建筑的能耗耗散演化致灾分析[J].地震研究,37(3):442-449.
刘书贤,刘书会,魏晓刚,等.2011.采动区地震—开采沉陷变形对建筑耦合作用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),30(s):92-94.
刘书贤,王春丽,魏晓刚,等.2014b.煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响[J].地震研究,37(4):642-647.
刘书贤,魏晓刚,张弛,等.2013.煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J].中国矿业大学学报,42(4):526-534.
刘书贤,魏晓刚,张弛,等.2014c.基于隔震技术的桥梁结构抗采动变形抗地震保护[J].地震研究,37(1):86-93.
孙进忠,陈祥,王余庆.2004.岩土边坡地震崩滑的三级评判预测[J].地震研究,27(3):256-264.
孙世国,王群.2014.井工转露天开采边坡岩体滑移机制的试验研究[J].中国安全生产科学技术,10(4):13-17.
王云鹏,张瑞新,李二旭,等.2010.井工开采影响下的露天矿边坡沉陷规律研究[J].中国安全生产科学技术,6(6):98-102.
魏晓刚.2011.考虑土—结构相互作用的采动区建筑物抗震抗变形双重保护装置减震分析[D].阜新:辽宁工程技术大学.
尹光志,李小双,李耀基.2012.底摩擦模型模拟露天转地下开挖采空区影响下边坡变形破裂响应特征及其稳定性[J].北京科技大学学报,34(3):231-238.
张春礼.2009.采动与地震共同作用下建筑物的破坏过程研究[D].青岛:青岛理工大学.
Hatzor Y. H., Arizb A. A., Zaslavskyc Y., et al.. 2004. Dynamic Stability Analysis of Jointed Rock Slopes using DDA Method[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 41:813-821.
Kazmi Z. A., Konagai K., Ikeda T.. 2014. Field Measurements and Numerical Simulation of Debris Flows from Dolomite Slopes Destabilized during the 2005 Kashmir Earthquake Pakistan[J]. Journal of Earthquake Engineering, 18(3):364-388.
Kokusho T., Tlshizawa. 2007. Energy Approach to Earthquake-introduced Slope Failure and its Implication[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(7):828-840.

Stability Research on Slope and Goaf of Open-pit Mine caused by the Coupling Effect of Earthquake and Mining

LI Hai-jun^{1,2}, WEI Xiao-gang², SUN Qi², WEI Xing³, MU Qian-wen³

(1. *Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, Liaoning, China*)

(2. *School of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, Liaoning, China*)

(3. *Liaoning Chemical Geology Prospecting Institute, Jinzhou 121000, Liaoning, China*)

Abstract

To analyze the stability of slope and goaf of open-pit mine caused by the coupling effect of earthquake and mining, we take the opencast-to-underground mining of Paishanlou gold mine in Liaoning Province as the research object. Based on FLAC3D platform, we study the security coefficients of the slope of open-pit mine in unexploited case and under the action of mining by strength reduction method. On the basis of it, we focus on the distribution law of the stress field, displacement field and plastic zone of the slope and the goaf of open-pit mine under the coupling effect of earthquake and mining. The research result show that the security coefficient of the slope of open-pit mine is 1.21 before mining and decreases to 1.12 after mining, and the slope is in the state of stable before and after mining, so the single mining effect cannot lead to the instability of slope. Under the coupling effect of earthquake and mining, the strong tensile stress appears within the slope body of open-pit mine, the caving happens to the roof and the pucking occurs to the roof in the goaf, and the slope will be unstable and destroyed, and the forms of destroy are mainly the carving of roof in large-sized area and the collapse of slope in the goaf.

Key words: slope stability; earthquake; mining; coupling effect