

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.012

## 爆破荷载作用下露天边坡稳定性分析

周后友<sup>1</sup>, 池恩安<sup>2</sup>, 欧阳天云<sup>3</sup>, 于海阔<sup>3</sup>, 高正华<sup>4</sup>

(1. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵阳 550008; 2. 保利久联控股集团有限责任公司, 贵阳 550002;

3. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002;

4. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 露天边坡的稳定性受爆破振动作用影响较大,为进一步分析研究爆破振动作用下露天边坡的稳定性特征,对露天边坡的静力稳定性进行分析,得到边坡在静力条件下的位移、应力和静力安全系数,并在静力计算的基础上,计算边坡在爆破振动下的动态响应特征,进而求得爆破荷载下边坡的位移、应力及动力安全系数等响应特征,可以用来分析边坡在爆破振动作用下的稳定状态。利用 ANSYS 有限元软件,采用强度折减法对别矿露天边坡在静力和动力荷载条件下的稳定状态进行分析,得出爆破荷载下边坡的安全振速和临界振速。仅考虑边坡自重时的安全系数为 1.66,处于稳定状态;在不同强度爆破荷载作用下边坡的安全系数分别为 1.46、1.5、1.56、1.62,相对静力条件下安全系数衰减了 2.4%~12%。通过安全系数与水平径向振动速度关系,推导出了南帮边坡的安全振动速度为 10.64 cm/s,临界振动速度为 13.16 cm/s。

**关键词:** 爆破震动; 安全系数; 振动速度

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)02-0080-08

## Analysis of Stability of Open Slope under Blasting Load

ZHOU Hou-you<sup>1</sup>, CHI En-an<sup>2</sup>, OUYANG Tian-yun<sup>3</sup>, YU Hai-kuo<sup>3</sup>, GAO Zheng-hua<sup>4</sup>

(1. Guizhou Highway Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550008 China;

2. Poly Union Group Corporation, Guiyang 550002, China; 3. Guizhou XinLian Blasting

Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 4. Department of Mechanics and

Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The stability of open pit slope is greatly affected by blasting vibration. In order to further analyze and study the stability characteristics of open pit slope under blasting vibration, the static stability of open pit slope is analyzed and the displacement, stress and static safety factor of slope under static conditions are obtained. On the basis of static calculation, the dynamic response characteristics of the slope under blasting vibration are calculated, and then the response characteristics such as displacement, stress and dynamic safety coefficient of the slope under blasting load are obtained, which can be used to analyze the stable state of the slope under blasting action. By using ANSYS finite element software, strength reduction method is used to analyze the stable state of the open slope under static and dynamic load. The safety factor under the dead weight of the slope is 1.66, which is in a stable state. The safety coefficients of the slope under different blasting loads are 1.46, 1.5, 1.56 and 1.62 respectively, decreasing by 2.4%~12% under the static condition. Through the relation between safety factor and horizontal radial vibration velocity, it is deduced that the safety vibration velocity of the south side slope is 10.64 cm/s and the critical vibration velocity is 13.16 cm/s.

**Key words:** blasting vibration; safety factor; vibration velocity

研究爆破振动作用下露天边坡的稳定性,应对露天边坡的静力稳定性进行分析,得到边坡在静力条件下的位移、应力和静力安全系数。在静力计算的基础上,再计算边坡在爆破振动下的动态响应特征,进而求得爆破荷载下边坡的位移、应力及动力安全系数等响应特征,以此来分析边坡在爆破振动作用下的稳定状态<sup>[1,2]</sup>。利用 ANSYS 有限元软件,采用强度折减法对边坡静力安全系数和动力安全系数进行有限元求解,通过静力安全系数和动力安全系数的差异,分析别矿露天边坡在爆破条件下的稳定性变化规律,导出爆破荷载下边坡的安全振速和临界振速。

## 1 静力作用下露天边坡稳定性分析

### 1.1 有限元强度折减法基本原理

#### (1) 弹性本构关系与屈服准则

D-P 屈服准则采用广义的 von Mises 屈服条件<sup>[3,4]</sup>,其表达式(应力以拉为正)如下

$$f = \sqrt{J_2} + aI_1 - K = 0 \quad (1)$$

式中: $I_1$  为应力张量第一不变量,即: $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_m$ ;

$J_2$  为应力偏量第二不变量,即: $J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$ ;

$a$  为试验常数, $a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \varphi)}$ ,式中, $\varphi$  为岩体内摩擦角;

$K$  为试验常数, $K = \frac{6c \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \varphi)}$ ,式中, $c$  为岩体粘聚力。

从 D-P 材料模型可以看出,在边坡的稳定性计算时,改变弹性模量和泊松比并不会使稳定性发生大幅度变化<sup>[4]</sup>。因此,在岩石密度确定的条件下,选择合适的剪切强度参数粘聚力和内摩擦角是进行强度折减的核心内容。

#### (2) 有限元强度折减法步骤

强度折减法是基于极限平衡法和安全系数法衍生的一种新的分析方法<sup>[5]</sup>。在边坡稳定性计算中,保持岩体所受重力场不变的情况下,通过不断折减

边坡强度参数  $c$  和  $\varphi$ ,使边坡达到失稳状态,进而得到静力安全系数<sup>[6,7]</sup>。在用有限元强度折减法研究边坡稳定性问题时,折减后的岩体抗剪强度参数为  $c'$  和  $\varphi'$ ,可按下式计算

$$c' = \frac{c}{F} \quad (2)$$

$$\tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{F} \quad (3)$$

然后将折减后的强度参数代入到 D-P 材料模型中,运用数值分析程序求解。通过对边坡抗剪强度参数的不断折减,直到边坡临近破坏状态<sup>[8]</sup>,此时的折减系数  $F$  即为边坡的安全系数  $F_s$ 。

### 1.2 边坡数值模拟分析

通过现场地质调查,发现矿区南帮已多次出现边坡小范围垮塌,对矿区安全生产造成了不利的影响,边坡垮塌情况,见图 1 所示。由于受到生产情况的约束,造成南帮部分台阶并断,对边坡稳定造成了一定的安全隐患;此外,人员设备的运作,季节性的雨雪,以及边坡在自重和频繁的爆破振动下,边坡的稳定受到了一定程度的影响。别矿南帮工程地质剖面,见图 2 所示。



图 1 别矿南帮边坡小范围滑坡示意图

Fig. 1 The schematic diagram of small range landslide at south slope of Biesikuduke Mine

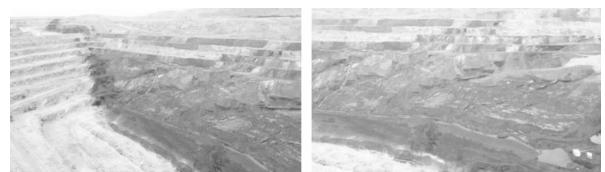


图 2 别矿南帮工程地质剖面示意图

Fig. 2 The engineering geologic profile at south slope of Biesikuduke Mine

#### (1) 边坡岩体本构模型

边坡稳定性问题主要是力与强度的问题,对于有限元强度折减法而言,通常选用理想弹塑性模型作为边坡土体本构模型,而屈服准则的选取又直接影响到稳定系数的计算,选取的屈服准则不同,所计算出的系数不同<sup>[9,10]</sup>。结合矿区实际边坡,边坡岩体本构模型选择理想弹塑性模型,并采用 D-P 屈服准则。

收稿日期:2021-02-22

作者简介:周后友(1993-),男,贵州凤冈县人,工程师、硕士研究生,主要从事爆破工程与安全技术研究,(E-mail) 1096218522@qq.com。

通讯作者:池恩安(1968-),男,贵州印江县人,研究员、博士,主要从事爆破工程与安全技术研究,(E-mail) chi8888@sina.com。

(2) 边坡岩石力学参数

边坡岩体物理力学参数由室内岩石力学参数实验及《新疆巴里坤县巴里坤矿区别斯库都克露天煤矿勘探报告》确定,数值见表1所示。

表1 岩石物理力学参数

Table 1 The physical and mechanics parameters

密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ MPa	摩擦角/ $^{\circ}$
2.5	34.8	0.23	0.32	30

(3) 边坡模型的建立

根据别斯库都克露天煤矿南帮地质剖面图,基于ANSYS构建边坡模型进行边坡稳定性数值分析,采用D-P屈服准则,边坡单元类型为8节点的PLANE82,对边坡模型两侧和底面施加约束,两侧边界水平位移为零,竖直方向为自由,地面位移为零。计算过程中仅考虑边坡自身重力作用,边坡几何模型和网格划分,见图3所示。

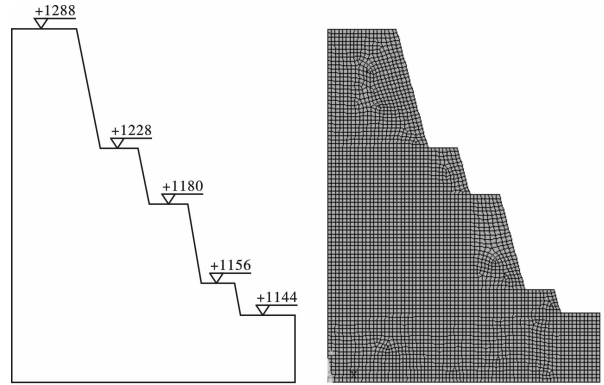
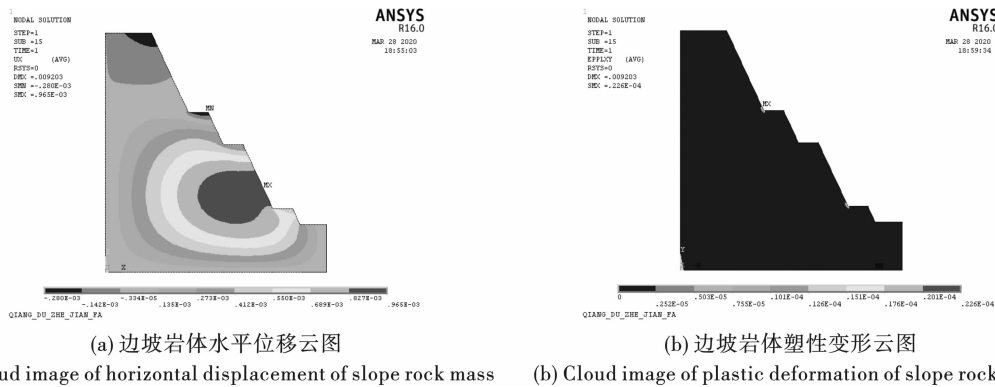


图3 几何模型和网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric model and meshing

(4) 不同强度折减系数下边坡水平位移及边坡塑性区云图

为了节省计算过程和时间,初始强度折减系数取1.0,然后以0.2为精度进行折减。通过有限元计算得出各个折减系数所对应的边坡岩体水平位移和边坡岩体塑性区云图,分别见图4~图8所示。



(a) 边坡岩体水平位移云图

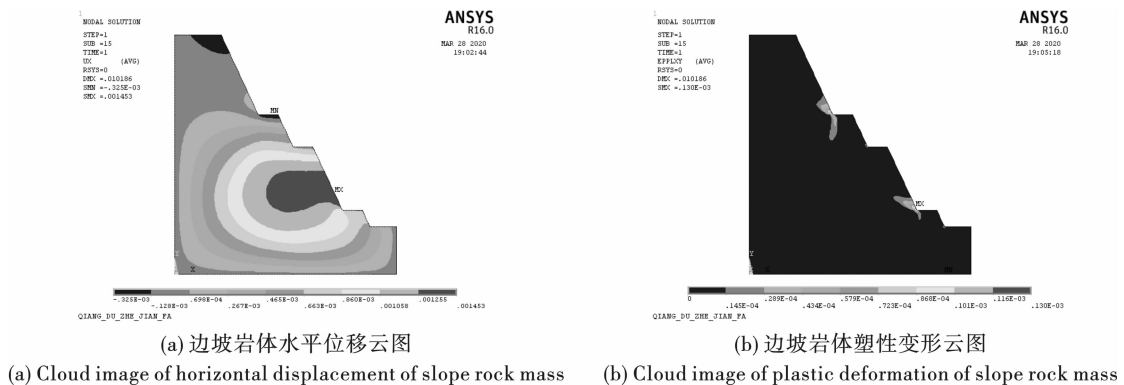
(b) 边坡岩体塑性变形云图

(a) Cloud image of horizontal displacement of slope rock mass

(b) Cloud image of plastic deformation of slope rock mass

图4 折减系数为1.2时位移示意图和应力云图

Fig. 4 Displacement diagram and stress cloud map when the reduction coefficient is 1.2



(a) 边坡岩体水平位移云图

(b) 边坡岩体塑性变形云图

(a) Cloud image of horizontal displacement of slope rock mass

(b) Cloud image of plastic deformation of slope rock mass

图5 折减系数为1.4时位移示意图和应力云图

Fig. 5 Displacement diagram and stress cloud map when the reduction coefficient is 1.4

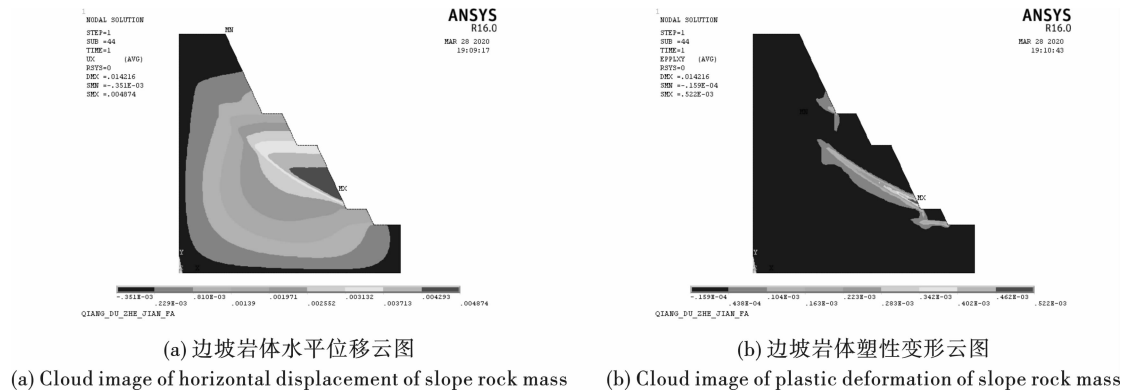


图 6 折减系数为 1.6 时位移示意图和应力云图

Fig. 6 Displacement diagram and stress cloud map when the reduction coefficient is 1.6

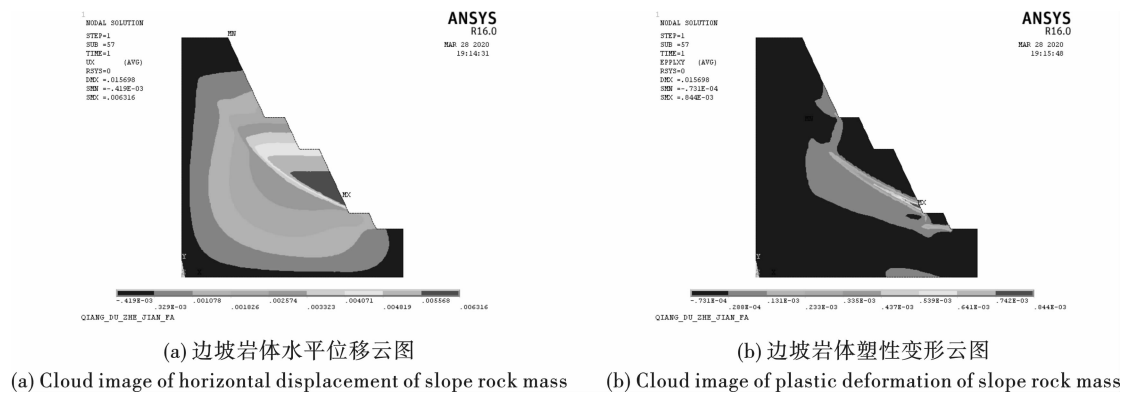


图 7 折减系数为 1.64 时位移示意图和应力云图

Fig. 7 Displacement diagram and stress cloud map when the reduction coefficient is 1.64

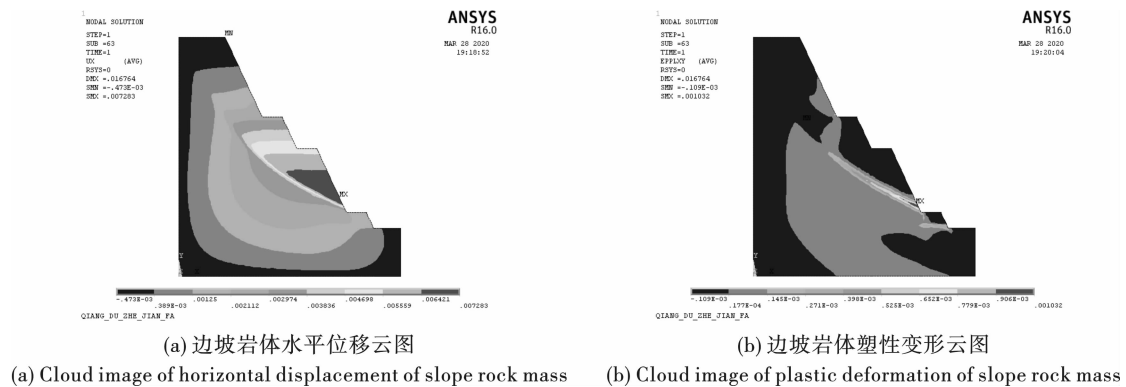


图 8 折减系数为 1.66 时位移示意图和应力云图

Fig. 8 Displacement diagram and stress cloud map when the reduction coefficient is 1.66

### 1.3 模拟结果分析

从图 4 至图 8 可以看出,随着强度折减系数的不断增大,岩体边坡水平位移也在逐渐增大,当折减系数从 1.0 变化到 1.66 时,水平位移从最初的 9.2 mm 上升到 16.76 mm;塑性变形区也随着折减系数的增大而增大,当折减系数为 1.2 时,最上面边坡台阶坡脚最先开始出现塑性应变,直至折减系数变为 1.66 时,第二个台阶坡脚产生最大塑性变形,最大应变值为 0.001032,塑性应变区贯通至坡顶。

计算过程中,当折减系数增大到 1.8 时,计算出现不收敛现象,说明边坡岩体塑性区已贯通,边坡失稳。调整更高精度后以 0.02 为折减精度继续计算,当折减系数超过 1.66 时计算再次不收敛,此时可以认为边坡岩体发生临界破坏状态,边坡水平位移产生突变,最大位移出现在边坡第二个台阶坡脚处,塑性应变区在坡体内全部贯通,表明仅考虑边坡自重作用下的安全系数为 1.66。

## 2 爆破荷载作用下露天边坡的稳定性分析

### 2.1 不同强度爆破振动荷载

利用 ANSYS 有限元软件分析露天边坡稳定性问题,采用强度折减法将爆破振动加速度信号输入到运算程序中计算,从而求得动力安全系数<sup>[11]</sup>。由于边坡主要受到水平径向爆破荷载的影响,本文从大量爆破振动实测数据中选取了4次爆破水平径向振动速度时程曲线,将其通过 Origin8.5 软件处理后得到水平径向加速度时程曲线,将其导入到模型中计算爆破荷载作用下的边坡动力安全系数。

所选取的爆破振动强度数据,见表2所示。

表 2 选取的不同爆破振动强度参数

Table 2 Parameters of different blasting vibration intensity

序号	质点水平径向 振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	质点水平径向振动 加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
1	5.62	18.86
2	4.47	12.92
3	3.58	15.67
4	2.98	16.88

对应的水平径向振动速度时程曲线和加速度时程曲线,见图9~图12所示。

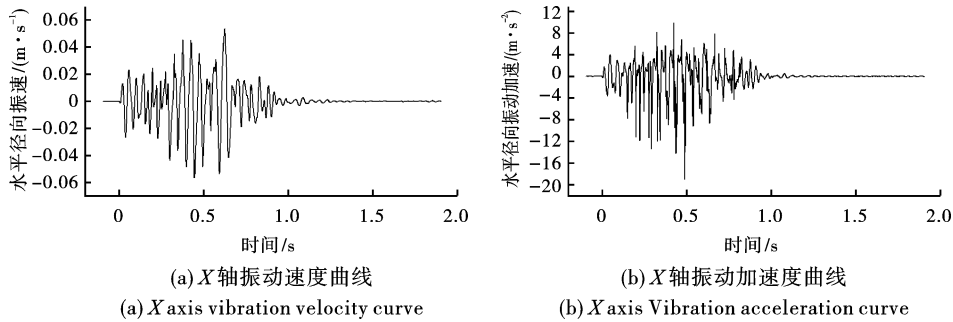


图 9 振动速度及加速度时程曲线图( $v = 5.62 \text{ cm/s}$ )

Fig. 9 Time history curve of vibration velocity and acceleration( $v = 5.62 \text{ cm/s}$ )

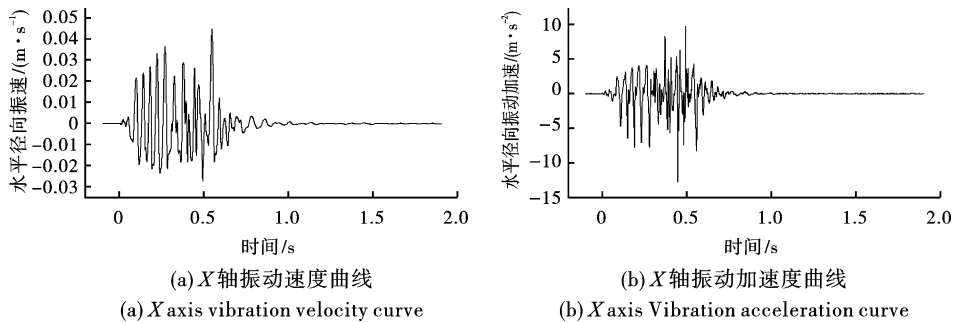


图 10 振动速度及加速度时程曲线图( $v = 4.47 \text{ cm/s}$ )

Fig. 10 Time history curve of vibration velocity and acceleration( $v = 4.47 \text{ cm/s}$ )

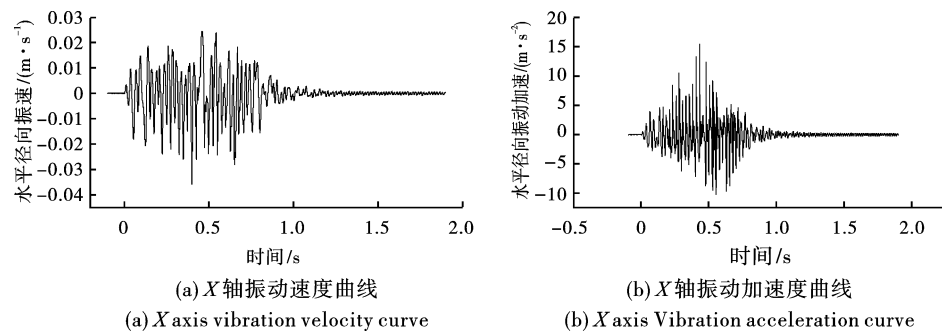


图 11 振动速度及加速度时程曲线图( $v = 3.58 \text{ cm/s}$ )

Fig. 11 Time history curve of vibration velocity and acceleration( $v = 3.58 \text{ cm/s}$ )

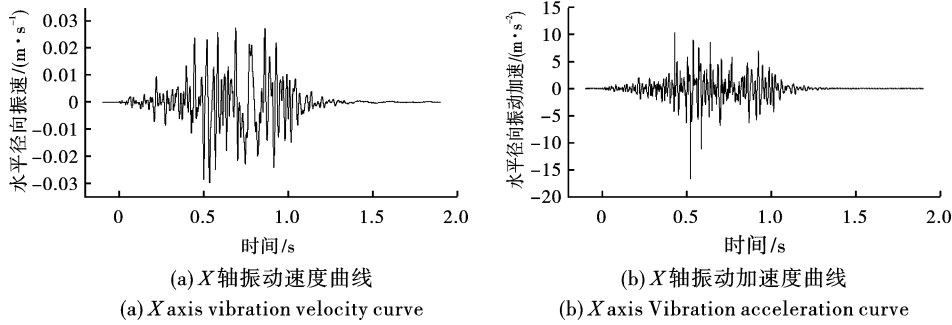


图 12 振动速度及加速度时程曲线图( $v = 2.98 \text{ cm/s}$ )

Fig. 12 Time history curve of vibration velocity and acceleration( $v = 2.98 \text{ cm/s}$ )

2.2 基于强度折减法的边坡动力安全系数模拟计算

由静力条件下的稳定安全系数分析得到,边坡达到失稳状态时,边坡坡脚产生最大水平位移和最大剪应力。因此,仅考虑岩体自重条件时,将加速度荷载施加在边坡模型上,以边坡坡脚节点是否发生位移突变作为失稳判断依据。

选取边坡模型中坡脚产生最大水平位移和剪应力处的节点,计算分析其在速度  $5.62 \text{ cm/s}$  对应加速度  $18.86 \text{ m/s}^2$  的荷载作用下的位移变化,得到不同折减系数下边坡坡脚节点位移时程变化曲线,以及边坡坡脚节点位移与强度折减系数曲线,如图 13、图 14 所示。

可见,坡脚节点位移随着折减系数的不断增加而发生小幅度变大,当折减系数增大到 1.46 时,坡脚节点位移曲线发生明显变化,节点水平位移产生突变,边坡发生破坏,说明此时边坡的动力安全系数为 1.46。

采用同样的计算方法,通过不断增大边坡抗剪强度系数,得到四种强度爆破荷载作用下的边坡坡脚节点位移与不同强度折减系数的关系,从而确定动力荷载作用下的安全系数,将不同强度荷载下的计算结果列表,见表 3 所示。

表 3 不同强度振动荷载下的安全系数  
Table 3 Safety factors under vibration loads of different strength

次数	1	2	3	4
X 轴速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	5.62	4.47	3.58	2.98
加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	18.86	12.92	15.67	16.88
安全系数	1.46	1.50	1.56	1.62

可见,相比静力条件下边坡安全系数而言,四种不同强度荷载下边坡的安全系数发生了不同程度的衰减,其衰减范围为 2.4% ~ 12%。

2.3 边坡安全振速与临界振速

根据我国《水利水电工程边坡设计规范》第

7.0.9 条规定<sup>[12]</sup>,基于矿山边坡长期存在,故矿山边坡稳定系数宜取 1.10 ~ 1.30。根据目前对别斯库都克露天煤矿工程地质勘测资料的掌握情况,以及采场边坡稳定性对采场生产的影响,并考虑到边坡的长期存在性及水土保持等环保要求,结合我国其它大型露天矿采场边坡工程的经验,最终选取 1.15 作为别矿边坡的安全储备系数。将不同水平径向振动速度与其对应的安全系数进行线性拟合,得出安全系数与振动速度的关系,见图 15 所示。

可见,当安全系数为 1.15 时,边坡能够承受的极限爆破水平振动速度为  $10.64 \text{ cm/s}$ ,此时的振动速度可认为是边坡的安全振速;当安全系数为 1 时,边坡的能够承受的极限爆破水平振动速度为  $13.16 \text{ cm/s}$ ,此时的振动速度为临界破坏振速。故当生产爆破引起的质点振动速度小于  $10.64 \text{ cm/s}$  时,可以认为不会对边坡产生破坏性影响,此时边坡稳定,处于安全状态。当爆破产生的振动速度达到  $13.16 \text{ cm/s}$  时,边坡有可能受到破坏性影响,进一步增大可能导致失稳或局部滑坡。

由此得出,别斯库都克露天煤矿南帮安全振速为  $10.64 \text{ cm/s}$ ,临界振速为  $13.16 \text{ cm/s}$ 。为保证南帮边坡在爆破荷载作用下处于安全稳定状态,应实时监控确保产生爆破所产生的振动速度小于安全振动速度,禁绝产生超过临界破坏振速。这可以从爆源和传播过程两个方面来控制,通过实时监测来预警提醒。

3 小结

利用 ANSYS 有限元软件,采用强度折减法分析别矿露天边坡在静力和动力荷载条件下的稳定状态。仅考虑边坡自重时的安全系数为 1.66,处于稳定状态;在不同强度爆破荷载作用下边坡的安全系数分别为 1.46、1.5、1.56、1.62,相对静力条件下安全系数衰减了 2.4% ~ 12%。

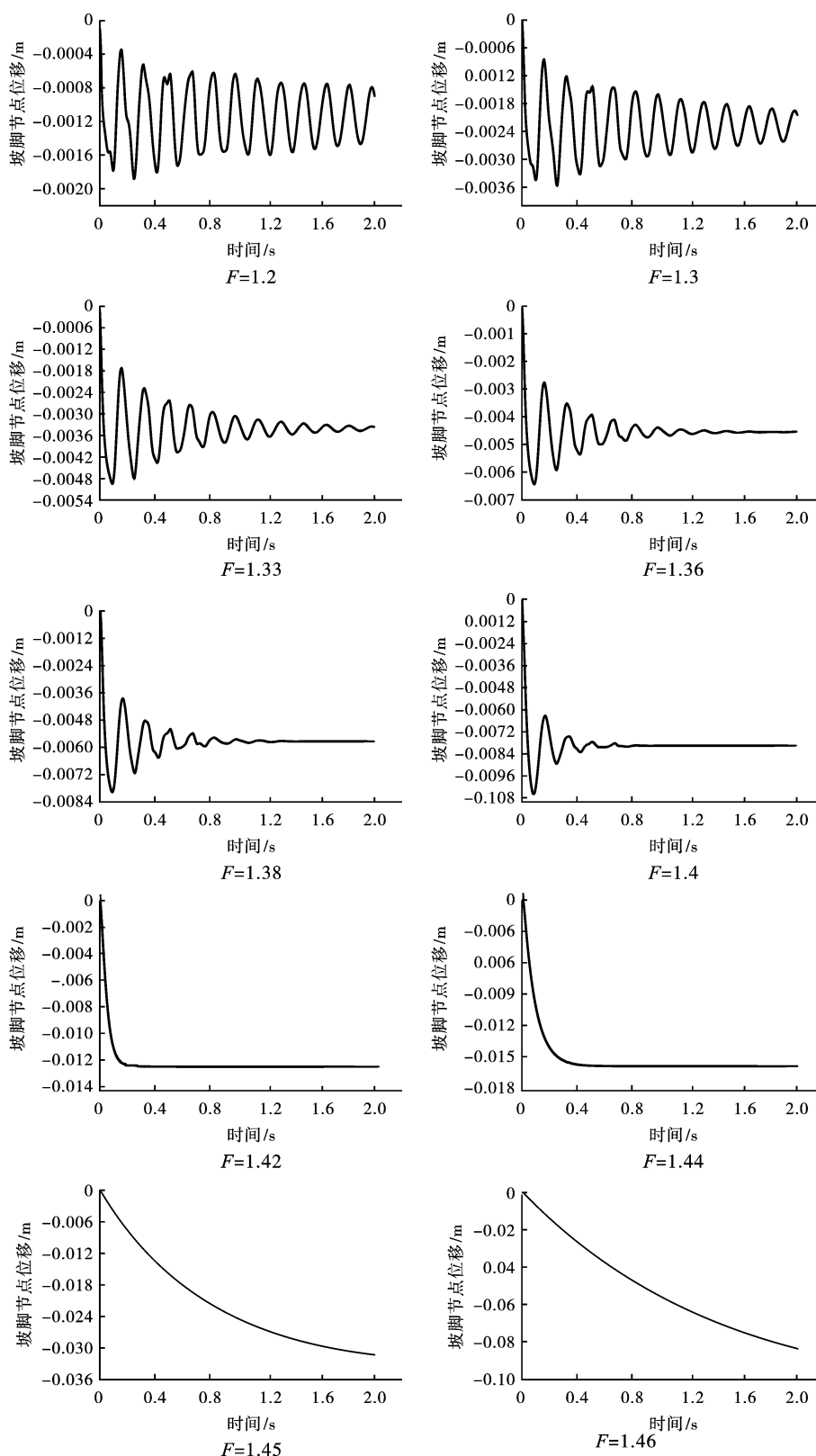


图 13 不同强度折减系数下边坡坡脚节点位移曲线图

Fig. 13 Displacement curves of slope foot nodes under different strength reduction coefficients

通过安全系数与水平径向振动速度关系,推导出南帮边坡的安全振动速度为 10.64 cm/s,临界

振动速度为 13.16 cm/s。

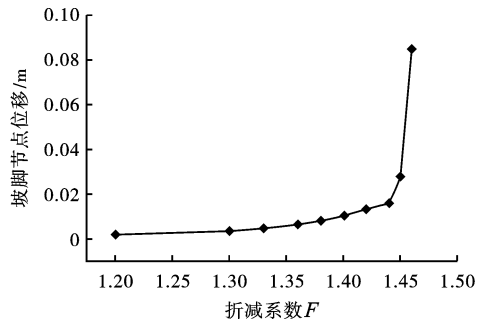


图 14 坡脚节点最大水平位移与强度折减系数曲线图

Fig. 14 Curve of maximum horizontal displacement and strength reduction coefficient at foot of slope

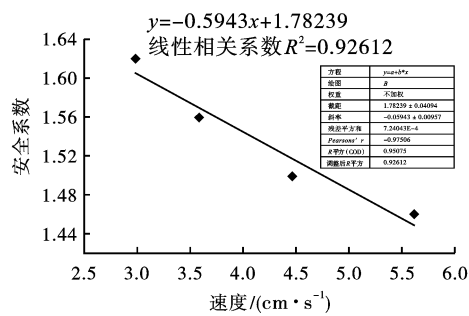


图 15 安全系数与水平径向振动速度关系图

Fig. 15 Relation diagram between safety factor and velocity of horizontal radial vibration

参考文献 (References)

[1] 钟冬望,吴亮,陈浩. 爆炸荷载下岩质边坡动力特性试验及数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,9(S1):2964-2971.

[1] ZHONG Dong-wang, WU Liang, CHEN Hao. Model test and numerical simulation study of dynamic characteristics of rock slope under blasting Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2964-2971. (in Chinese)

[2] 郑允,陈从新,朱玺玺,等. 基于 UDEC 的岩石边坡开挖爆破节点拟静力学稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(S2):3932-3940.

[2] ZHENG Yun, CHEN Cong-xin, ZHU Xi-xi, et al. Node-quasi-static of rock slope under excavation blasting based on UDEC [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(S2):3932-3940. (in Chinese)

[3] 费鸿禄,苑俊华. 基于强度折减法的边坡动力稳定性研究[J]. 爆破, 2016,33(4):140-143.

[3] FEI Hong-lu, YUAN Jun-hua. Study of slope dynamic stability based on strength reduction method [J]. Blasting, 2016,33(4):140-143. (in Chinese)

[4] 赵坚,李海波. 莫尔库仑和霍克布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性[J]. 岩石力学与工

程学报, 2003(2):171-76.

[4] ZHAO Jian, LI Hai-bo. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-Coulomb and Hoek Brown criteria [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(2):171-176. (in Chinese)

[5] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(19):3381-3388.

[5] ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM to soil and rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(19):3381-3388. (in Chinese)

[6] 孙钧,汪炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海:同济大学出版社, 1988.

[7] 李祥龙,店延钢,杨溢,等. 爆破震动对边坡稳定性影响分析[J]. 爆破, 2006,23(4):16-19.

[7] LI Xiang-long, DIAN Yan-gang, YANG-Yi, et al. Slope stability analysis under influence of blasting vibration [J]. Blasting, 2006,23(4):16-19. (in Chinese)

[8] 孙磊. 装药结构对爆炸效能影响的理论与数值模拟[D]. 淮南:安徽理工大学, 2011.

[8] SUN Lei. Theoretical study and numerical simulation of the effect of charge structure on explosion efficiency [J]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[9] 周后友,池恩安,张修玉,等.  $\phi 42$  mm 炮孔空气间隔装药爆破对岩体破碎效果的影响研究[J]. 爆破, 2018, 35(4):63-68.

[9] ZHOU Hou-you, CHI En-an, ZHANG Xiu-yu, et al. Influence of air-decking charge blasting with  $\phi 42$  mm blasthole on rock fragmentation [D]. Blasting, 2018,35(4):63-68. (in Chinese)

[10] 王成,洪彰华. 爆破振动作用下东江拱坝动力响应的数值模拟[J]. 水电与新能源, 2015(3):34-38.

[10] WANG Cheng, HONG Zhang-hua. Numerical simulation of the dynamic response of Dongjiang arch dam under blasting vibration [J]. Hydropower and New Energy, 2015(3):34-38. (in Chinese)

[11] 马冲,詹红兵,姚文敏,等. 爆破振动作用下含软弱夹层边坡稳定性及安全判据[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3):563-571.

[11] MA Chong, ZHAN Hong-bing, YAO Wen-min, et al. Stability and safety criterion of a slope with weak interlayer under blasting vibration [J]. Explosion & Shock Waves, 2018, 38(3):563-571. (in Chinese)

[12] 霍永基. 水工结构爆破震动效应研究及安全分析[J]. 工程爆破, 2003,9(4):72-77.

[12] HUO Yong-ji. Effect of blasting vibration on hydraulic structures and safety analysis [J]. Engineering Blasting, 2003,9(4):72-77. (in Chinese)