

# 爆破振动作用下含断层边坡动力响应分析<sup>①</sup>

李屹<sup>1</sup>, 夏祥生<sup>2</sup>, 徐继业<sup>1</sup>, 张良兵<sup>1</sup>, 黄永辉<sup>3</sup>, 李源源<sup>4,5</sup>, 张智宇<sup>4,5</sup>

(1.攀钢集团矿业有限公司设计研究院,四川攀枝花 617000; 2.攀钢集团攀枝花新白马矿业有限责任公司,四川攀枝花 617000; 3.昆明理工大学 电力工程学院,云南昆明 650093; 4.昆明理工大学 国土资源工程学院,云南昆明 650093; 5.云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室,云南昆明 650093)

**摘要:** 依据施加爆破地震波后含断层边坡稳定性模拟计算结果,研究了爆破振动作用下不同断层厚度边坡的动力响应变化规律。结果表明,爆破地震波在边坡坡表及断层区域传播时存在高程放大效应;断层厚度越大,爆破地震波衰减越快;随着断层厚度增加,边坡在爆破振动作用下产生的位移逐渐增大,整体抵抗变形能力变小;爆破振动作用下不同断层厚度对边坡稳定性影响差异明显,断层厚度 2~8 m 时边坡稳定性呈持续快速降低趋势,断层厚度超过 8 m 后边坡稳定性趋于平稳。

**关键词:** 爆破地震波; 动力响应; 边坡; 断层厚度; 边坡稳定性; 爆破振动

中图分类号: TD854

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.005

文章编号: 0253-6099(2024)01-0021-04

## Dynamic Response of Slope with Fault Under Blast Vibration

LI Yi<sup>1</sup>, XIA Xiangsheng<sup>2</sup>, XU Jiye<sup>1</sup>, ZHANG Liangbing<sup>1</sup>, HUANG Yonghui<sup>3</sup>, LI Yuanyuan<sup>4,5</sup>, ZHANG Zhiyu<sup>4,5</sup>

(1. Design and Research Institute of Mining Co Ltd, Panzhihua Iron and Steel Group, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Panzhihua New Baima Mining Co Ltd, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 5. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, Yunnan, China)

**Abstract:** The stability of slope with fault under the impact of blast-induced seismic wave was analyzed by using simulation to study the dynamic response of slope with different fault thickness under the impact of explosive vibration. The results show that there exists elevation amplification effect when blast-induced seismic wave propagates along slope surface and fault area. The thicker the fault, the faster the attenuation of blast-induced seismic wave. As the fault becomes thicker, the displacement of slope under the action of blast-induced vibration gradually increases, and the overall deformation resistance becomes smaller. Under the action of blast vibration, the fault with different thickness obviously brings different influence to slope stability. With the fault thickness of 2–8 m, the slope stability decreases continuously and rapidly, and tends to be stable as the fault thickness exceeds 8 m.

**Key words:** blast-induced seismic wave; dynamic response; slope; fault thickness; slope stability; blast vibration

露天开采时爆破地震波作用下边坡岩体的稳定性是矿山安全生产需要重点关注的问题<sup>[1]</sup>。断层作为一种地质构造现象,在自然沉积的岩层中普遍存在。含不同类型结构面的边坡比普通边坡更普遍,且发生失稳事故更频繁<sup>[2]</sup>。采场爆破对含地质构造的边坡稳定性影响不容忽视。虽然近年来学者们在边坡爆破

振动和断层软弱层对边坡稳定性影响方面进行了大量研究<sup>[3-8]</sup>,但对不同工况边坡在爆破振动作用下的动态响应方面的研究较少<sup>[9]</sup>。本文基于攀枝花白马铁矿及及坪采场含断层地质构造的边坡开展研究,采用数值模拟方法,建立边坡数值分析模型,模拟不同断层厚度工况下高陡边坡爆破振动响应,分析含不同厚度断

① 收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(52064025)

作者简介: 李屹(1976—),男,重庆巴南人,高级工程师,主要从事矿山采矿设计及工程爆破研究。E-mail: 3166271@qq.com

通信作者: 夏祥生(1983—),男,云南昭通人,工程师,主要从事矿山管理工作。E-mail: xia327049044@163.com

层的高陡边坡在爆破地震波作用下的动力响应。

## 1 工程背景

四川攀枝花白马铁矿及及坪采场断层发育,断层由北向南呈现出间距大致相等的斜梯状。以 F5 断层为例,断层径向长 400~5 000 m,倾角 40°~85°,断层厚度 1~40 m。该区域断层呈现径向发展特征,含矿岩体被分为呈台阶状的多个部分,极大破坏了白马岩体和含矿地层的完整连续性。该矿区断层厚度在不同区域差异较大,高陡边坡因存在 F5 断层而受采区爆破影响较为严重,故对不同断层厚度工况下边坡的爆破动力响应分析尤为重要。边坡现状如图 1 所示。



图 1 边坡现状

## 2 边坡动力响应分析

### 2.1 模型建立

为了研究不同断层厚度工况边坡在爆破振动作用下的响应规律,通过 FLAC<sup>3D</sup>对白马铁矿及及坪北采场东帮边坡开展爆破振动作用下边坡动力响应研究。首先根据矿山地质报告绘制出边坡剖面图(见图 2),数值模拟计算时选取具有代表性的北采场东帮边坡 2035 平台,确定边坡模型尺寸为水平长度沿  $x$  轴 65 m,垂直高度沿  $z$  轴 35 m,基岩为伟晶辉长岩。采用 FLAC<sup>3D</sup>建模辅助软件 Rhino7.0 建立边坡模型,共划分单元体 15 673 个,在模型中对不同岩层进行组别划分,其中组 1 为 F5 断层、组 2 为基岩(伟晶辉长岩)。

### 2.2 岩体力学参数

采用软件内置的摩尔-库伦本构模型<sup>[10]</sup>进行数值模拟,其中岩体剪切模量、体积模量、抗拉强度等参数引自该矿山采场的地质报告,具体岩体力学参数见表 1。

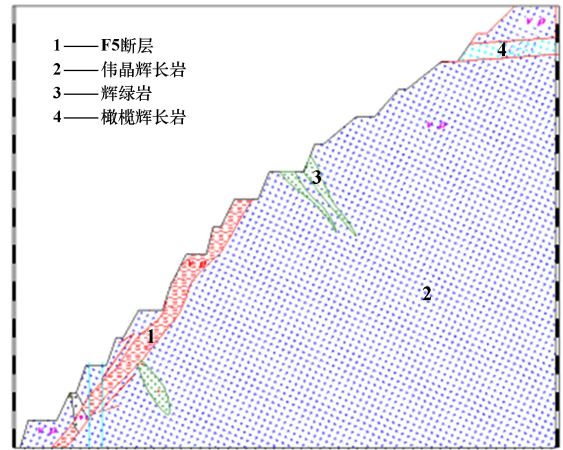


图 2 1960~2205 m 边坡剖面图

表 1 边坡岩体力学参数

岩层类别	剪切模量/ GPa	体积模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	凝聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
伟晶辉长岩	2.08	5.5	7.68	13.6	46	2 300
F5 断层	1	2	2.41	0.27	28.3	1 700

### 2.3 输入波形及边界条件设置

确定爆破振动荷载是研究爆破振动荷载下边坡动力响应的一大难题。以往的数值模拟研究一般选用等效三角形荷载<sup>[11]</sup>,然而简化的等效三角形荷载在数值模拟加载时与实际工况存在较大误差。为避免此误差,在数值模拟动力计算时,输入的波形为现场实测的代表性水平径向振动波。然而现场实测的爆破振动波频率较大,严重影响动力计算时长和精度,为此,在动力计算之前对爆破振动波进行了滤波和基线矫正处理<sup>[12-13]</sup>,输入的爆破振动加速度时程曲线见图 3。

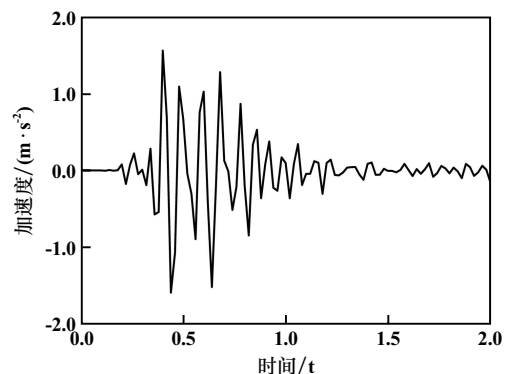


图 3 爆破振动加速度时程曲线

为了更好地通过 FLAC<sup>3D</sup>模拟现场效果,将南、北、东、西 4 个侧面均设置为自由场边界条件来减少边界爆破地震波传播过程中发生反射<sup>[13]</sup>。

### 2.4 监测点设置

为了进一步研究含不同厚度断层边坡在爆破振动作用下的动力响应规律,数值模拟时在模型坡面、断层区域内、边坡内分别布置 A、R、P 共 3 列监测点,监测点具体设置情况如图 4 所示。为了便于辨别不同区域响应,把断层上部区域统称为上覆层,断层区域统称为断层,断层以下区域统称为下覆层。

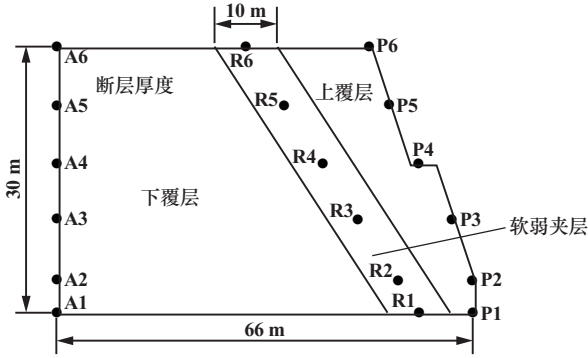


图 4 边坡监测点布置图

### 2.5 不同断层厚度对边坡爆破振动响应分析

#### 2.5.1 加速度放大系数

为了更直观地表示爆破地震波作用下边坡各监测点的响应规律,将边坡任一监测点的加速度响应峰值与输入点加速度峰值之比定义为加速度放大系数 (PGA),根据现场实测的爆破振动数据,将其加载在边坡模型监测点上,研究爆破振动作用下断层厚度对加速度放大系数的影响,结果见图 5。从图 5 可见,边坡

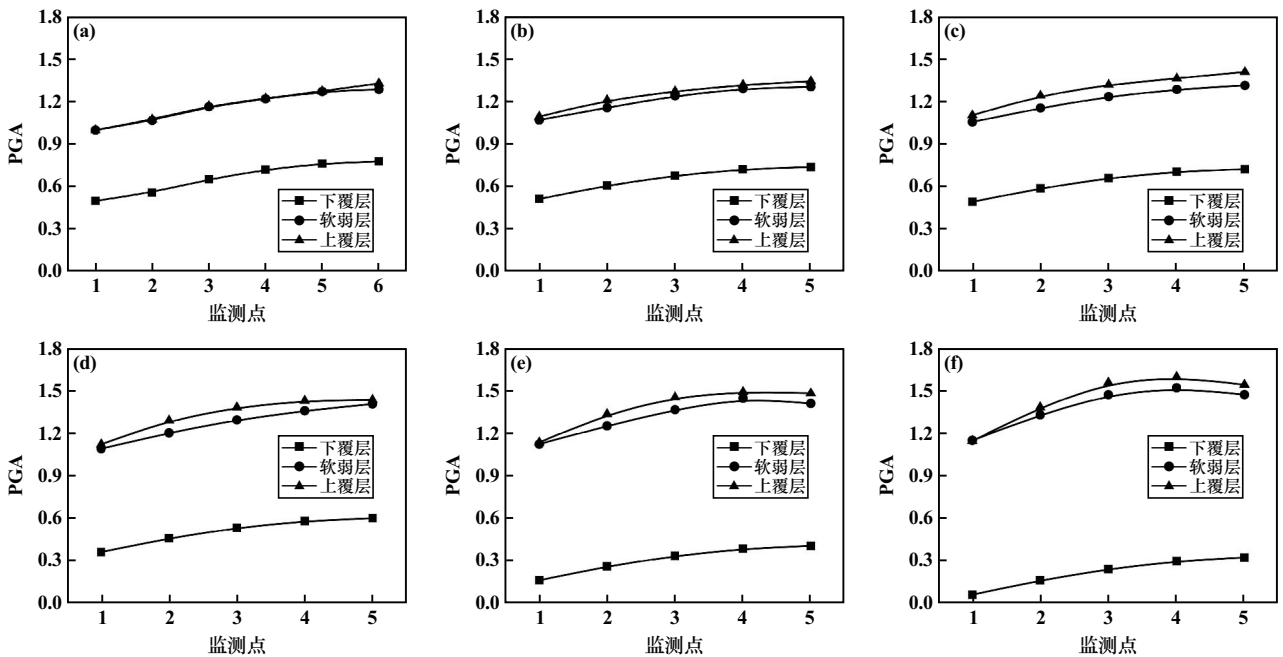
断层厚度较薄时,伴随着高程持续增大,PGA 持续增加,边坡坡顶部位 PGA 达到最大值,存在显著的高程放大效应;随着断层厚度增加,上覆层沿坡表方向及沿断层方向的 PGA 均增加,下覆层各监测点 PGA 减小,边坡在坡表的加速度峰值位置从坡顶转移至坡肩,呈现出明显的地形效应。从下覆层各监测点 PGA 可以得出,断层对边坡的动力响应影响主要表现为断层对振动波的阻隔作用,断层厚度越大,阻隔效果越明显。

综上分析可得,含厚断层的边坡比薄断层边坡对爆破地震波加速度放大效应更明显,断层厚度对加速度放大效应有显著影响,断层厚度越厚,放大效应越明显,断层对爆破地震波的反射与折射放大了边坡的动力响应。

#### 2.5.2 位移及剪切应变增量响应

断层厚度 2~12 m 时,爆破地震波加载后边坡位移响应云图见图 6。从图 6 可以看出,随着断层厚度增加,岩体位移变化区域有扩大的趋势,边坡在爆破地震波作用下变形程度不断增加,且最大水平位移发生在软弱层与边坡上覆层之间的区域,说明断层的存在对该区域的影响十分明显,实际爆破生产中需要重点监测该区域。

为了更加清晰地描述爆破振动作用下含断层岩质边坡断层厚度与位移响应峰值及剪切应变增量峰值的关系,绘制了不同工况下边坡最大水平位移变化及剪切应变增量,结果见图 7。由图 7 可以看出,施加爆破荷载后含不同厚度断层边坡最大位移从 0.000 157 m



(a) 2 m; (b) 4 m; (c) 6 m; (d) 8 m; (e) 10 m; (f) 12 m

图 5 爆破振动作用下断层厚度对加速度放大系数的影响

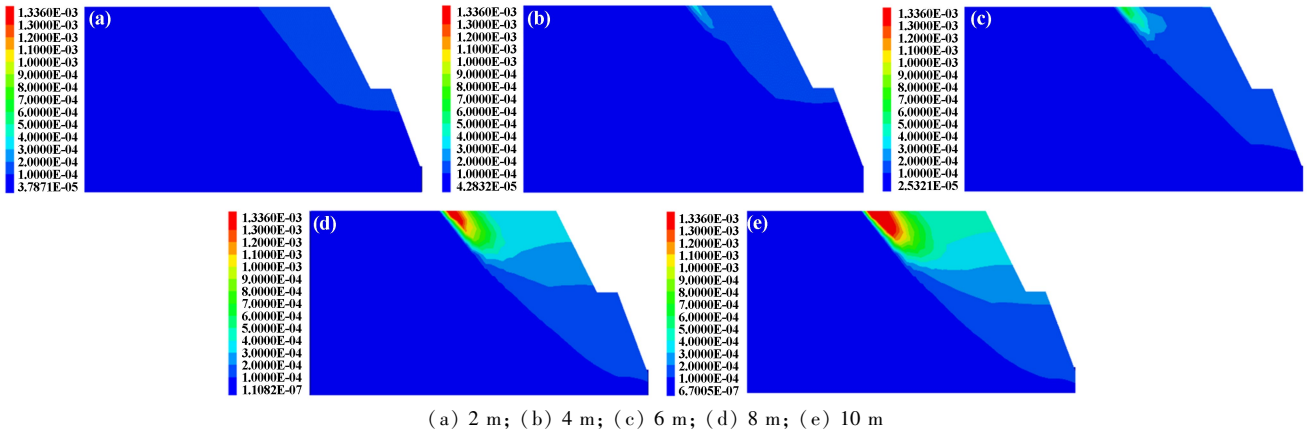


图6 爆破振动作用下边坡位移云图

增加到 0.001 92 m,最大剪切应变增量值从 0.000 096 m 增加到 0.001 4 m;相同条件下,边坡位移值及剪切应变增量值随着夹层厚度增加而增大。随着断层厚度增大,上覆层位移大于下覆层位移,上覆层位移不断增大,层间错动程度越发剧烈。这是爆破地震波传播至断层时受阻,地震波能量在此释放导致上覆层产生滑移。

增加,边坡稳定性系数降低,断层厚度越大,边坡整体稳定性越低;断层厚度达到一定数值时,随着边坡厚度增加,边坡整体稳定性逐渐趋于定值。总的来说,在薄断层工况下,边坡稳定性受断层厚度影响较大;在厚断层工况下,断层厚度变化对边坡整体稳定性影响不大。

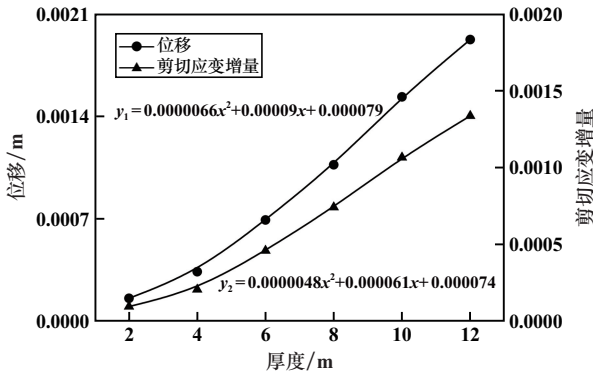


图7 位移及剪切应变增量

分别对最大位移  $y_1$ 、最大剪切应变增量  $y_2$  与断层厚度  $x$  进行拟合,具体拟合关系式为:

$$y_1 = 0.000\ 006\ 6x^2 + 0.000\ 09x + 0.000\ 079 \quad (1)$$

$$y_2 = 0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 061x + 0.000\ 074 \quad (2)$$

从拟合结果来看,边坡最大位移值、最大剪切应变增量值与夹层厚度具有相关性。

### 3 边坡稳定性分析

拟静力法能直接计算出边坡坡体的稳定系数,是目前评价边坡动力稳定性的常用方法。通过拟静力法计算边坡动力稳定性变化情况,结果见表2。

由表2可以看出,在爆破振动作用下,断层厚度2~8 m范围内,边坡安全系数变化比较明显,断层厚度8~12 m时边坡安全系数变化趋缓。说明断层厚度

表2 不同断层厚度下边坡安全系数

断层厚度/m	安全系数
2	2.53
4	2.07
6	1.68
8	1.43
10	1.35
12	1.32

### 4 结 论

1) 在爆破地震波作用下不同断层厚度边坡均呈现明显的边坡高程放大效应。断层厚度对边坡上覆层和断层区域质点的高程放大效应有明显影响,即断层厚度越大,边坡高程放大效应越明显。

2) 含厚断层边坡同一下覆层点位的监测点加速度放大系数均小于薄断层,即断层厚度的增加加速了爆破地震波传播过程中的衰减速度;在爆破振动作用下,上覆层区域和断层连接处是含断层边坡岩体的主要破坏区域;随着断层厚度增加,边坡在爆破地震波作用后产生的永久位移逐渐增大,边坡岩体产生剪切应变的区域逐渐变大。

3) 爆破振动作用下不同厚度断层对边坡动力稳定性影响存在明显差异。断层厚度2~8 m时,随着断层厚度增加,边坡稳定性持续快速降低;断层厚度超过8 m后,继续增加断层厚度,边坡安全系数变化逐渐趋于平稳。

(下转第30页)

灾变点( $\dot{K}_m + \dot{K}_r = 0$ ) 矿岩变形速率突然增大,伴随着机构能量的大量释放;后者发生于机构高刚度( $\dot{K}_m > 0.135$ ) 非灾变区间,没有机构能量的大量释放。

2) 低机构刚度灾变破碎模式和高机构刚度非灾变破碎模式能量传递效率和破岩时效存在很大差异,前者显著低于后者。从能量利用和破岩功效角度考虑,破碎动力系统不宜采用低机构刚度。

3) 在高机构刚度非灾变破碎区间,能量传递效率和破岩时效随机构刚度变化率很小,即对刚度变化的敏感度不高,故从简化结构、降低制造成本角度,不必追求过高的机构刚度,一般控制  $\dot{K}_m > 0.2$  即可满足要求。

4) 对矿岩初始刚度较大的情况,应采用较大的机构刚度,以降低系统能量释放、提高破碎功效。

5) 从破碎能量和时效的角度分析了弱化矿岩破碎系统的动力特性,研究结果可为弱化矿岩破碎动力系统的参数选择和设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Cook N G W. The failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965,2(4): 389-403.
- [2] 朱芝若. 刚性试验机[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1985.
- [3] 周思孟. 刚性试验机及其在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1987,6(2):125-138.

(上接第24页)

#### 参考文献:

- [1] 唐礼忠,高龙华,王 春,等. 动力扰动下含软弱夹层巷道围岩稳定性数值分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016,33(1):63-69.
- [2] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020,28(3):626-638.
- [3] 李 楠,汪班桥,门玉明,等. 地震作用下锚固滑坡动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017,37(6):878-885.
- [4] 杜晓丽,宋宏伟,魏京胜. 地震对软弱夹层边坡稳定性影响数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010,32(1):39-42.
- [5] 吴 晔,许紫刚,杜修力. 软弱夹层对地下结构地震响应的影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021,42(4):91-97.
- [6] 言志信,张 森,张学东,等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(S2):3522-3528.
- [7] 方庆红,胡 斌,盛建龙,等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶面角协同优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):5-9.
- [8] 李军伟,胡弘毅,梅松华,等. 花江北盘江大桥六枝岸高陡边坡稳

- [4] Hustrulid W A, Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, part II-force-penetration and specific energy determination[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1971,8(4):335-356.
- [5] 徐小荷. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 赵统武. 冲击钻进动力学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1996.
- [7] 邹久群,张金松,庞建勇. 基于离散元法的镶齿冲击与切削破岩效果数值分析研究[J]. 振动与冲击, 2022,41(22):173-183.
- [8] 刘春生,王庆华,李德根. 镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J]. 煤炭学报, 2015,40(11):2623-2628.
- [9] 高 锋,甘德清,甘 泽,等. 基于分形理论的磁铁矿石多级破碎演化特征[J]. 矿业研究与开发, 2021,41(11):149-154.
- [10] 汪学清,赵统武. 冲击机具凿入过程的能量传递[J]. 振动与冲击, 2018,37(9):202-207.
- [11] 吴鸿遥,程育仁. 损伤力学的基本内容与进展[J]. 力学与实践, 1985,7(1):2-9.
- [12] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of continuous damage theory[J]. International Journal of Solids Structures, 1982,18(7): 551-562.
- [13] 段 雄. 岩石截割破碎载荷谱的混沌识别与模拟[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1994.
- [14] 谷口修. 振动工程大全[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.
- [15] Salami M D G. Stability, instability and design of pillar workings[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970,7(6):613-631.

引用本文: 汪学清,唐红平,王建华,等. 弱化矿岩破碎动力系统的能量转化和时效特性[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):25-30.

定性评价[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):23-28.

- [9] 韩伟歌,崔振东,涂新斌,等. 不同层理面角度在层状岩体隧道围岩变形中的响应特征研究[J]. 工程地质学报, 2021,29(5): 1267-1275.
- [10] 徐文刚,余旭荣,年廷凯,等. 基于FLAC<sup>3D</sup>的三维边坡稳定性强度折减法计算效率改进算法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021,51(5):1347-1355.
- [11] 朱帅帅,唐 海,万 文,等. 爆破荷载下露天矿高边坡振动速度阈值的确定及控制[J]. 矿业工程研究, 2020,35(4):1674-5876.
- [12] 陈占军,朱传云,周小恒. 爆破荷载作用下岩石边坡动态响应的FLAC<sup>3D</sup>模拟研究[J]. 爆破, 2005(4):8-13.
- [13] 刘长续. 基于FLAC<sup>3D</sup>的堆积型边坡加速度放大效应研究[D]. 保定:河北大学, 2021.

引用本文: 李 屹,夏祥生,徐继业,等. 爆破振动作用下含断层边坡动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):21-24.