

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.006

多条软弱夹层角度对边坡预裂爆破效果影响研究*

向华仙^{1,2}, 苗涛², 郭骏飞³, 黄刚³, 陈姗姗², 张峰³, 张建华³

(1. 中能建绿色建材有限公司, 武汉 430014; 2. 易普力股份有限公司, 长沙 410000;

3. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 软弱夹层易导致边坡预裂爆破出现超挖、欠挖及半孔率低等问题, 明确其角度对爆破效果的影响对优化爆破参数至关重要。采用数值模拟方法, 以 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序为技术平台, 系统探究多条软弱夹层角度对预裂爆破效果的作用机制。基于岩石、节理、空气及炸药的物理特性, 分别选取四类材料模型: HJC 混凝土模型模拟岩石, PK 双线性随动硬化模型表征节理(软弱夹层), ALE 模型代表空气, HEB 模型描述炸药; 引入无反射边界条件以消减边界应力波反射干扰, 将研究参数化以量化分析。构建三维数值模型, 含 8 个炮孔, 底部与上部台阶高分别为 200 cm、1200 cm, 坡面角 80°; 划分网格时对炮孔及附近区域加密, 全局网格长 50 cm 以平衡计算效率与精度。模拟工况包括完整边坡、含与炮孔成 45° 及 90° 夹角的多条软弱夹层边坡, 通过监测点(模型中部、底部)追踪应力变化, 分析应力波传播、预裂缝成缝过程及超挖特征。最终结果显示: 软弱夹层会加剧应力集中, 45° 夹角时超挖更严重, 预裂缝平整度差、半孔率低; 90° 夹角时超挖程度相对较轻。软弱夹层的阻隔与吸能作用随夹角增大而减弱, 随数量增多而增强。研究为含软弱夹层边坡的预裂爆破参数优化提供了量化依据。

关键词: 软弱夹层; 预裂爆破; 数值模拟; 裂缝扩展; 边坡稳定性

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2025)04-0051-11

Influence of Weak Interlayer Angle on Slope Pre-split Blasting

XIANG Hua-xian^{1,2}, MIAO Tao², GUO Jun-fei³, HUANG Gang³,

CHEN Shan-shan², ZHANG Feng³, ZHANG Jian-hua³

(1. China Energy Green Building Material Co., Ltd., Wuhan 430014, China; 2. Explosive Co., Ltd.,

Changsha 410000, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Weak interlayers can easily lead to problems such as over-excavation, under-excavation and low semi-porosity in slope pre-split blasting, and it is critical to clarify the influence of its angle on the blasting effect to optimize the blasting parameters. In this paper, the numerical simulation method is employed to systematically investigate the mechanism of multiple weak interlayer angles on the pre-split blasting effect, utilizing the ANSYS/LS-DYNA finite element program as the technical platform. Based on the physical properties of rock, joints, air and explosives,

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-21

网络首发日期 (Published online): 2025-09-06

作者简介: 向华仙(1982-), 男, 高级工程师, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) 339444634@qq.com.

通信作者: 黄刚(1986-), 男, 湖北省黄冈市人, 副教授、博士、硕导, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271296)

About the author: XIANG Hua-xian (1982-), male, senior engineer, master supervisor, engaged in teaching and research work in mining, blasting, safety, etc., (E-mail) 339444634@qq.com.

Corresponding author: HUANG Gang (1986-), male, from Huanggang City, Hubei Province, associate professor, doctor and master's supervisor, engaged in teaching and research work in mining, blasting and safety, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (42271296)

four types of material models were selected; the HJC concrete model simulated the rock, the PK bilinear follow-up hardening model represented the joints (weak interlayer), the ALE model represented the air, and the HEB model described the explosives. The non-reflection boundary condition is introduced to reduce the reflection interference of boundary stress waves, and the study is parameterized for quantitative analysis. A three-dimensional numerical model was constructed, including eight blast holes. The height of the bottom and upper benches was 200 cm and 1200 cm, respectively, and the slope angle was 80°. When the grid is divided, the blast hole and the surrounding area are encrypted, and the global grid is 50 cm long to balance the calculation efficiency and accuracy. The simulated conditions include a complete slope and some weak interlayer slopes with angles of 45° and 90° to the blast holes. The stress changes are tracked through the monitoring points (located at the middle and bottom of the model), and the stress wave propagation, pre-split formation process, and overbreak characteristics are analyzed. The final results show that the weak interlayer exacerbates stress concentration, and the overbreak is more severe at a 45° angle. Additionally, the pre-split flatness is poor, and the semi-porosity is low. At an angle of 90°, the degree of overbreak is relatively light. The barrier and energy absorption effects of the weak interlayer decrease with an increase in the angle and increase with an increase in the number.

Key words: weak intersection; slope; pre-split blasting; numerical simulation; crack propagation

在岩体中, 软弱夹层作为控制岩体稳定性的主要薄弱面, 具有较高的延展性、较大的面积以及较低的强度。软弱夹层对爆破应力波的传播影响较大, 容易造成爆破泄能, 降低炸药能量利用率, 影响爆破效果。徐叶勤等利用 EPCA3D 动力模块分析发现^[1], 软弱夹层距离隧道越近, 爆破荷载对围岩稳定性的影响越大。随着目前边坡高度的增加, 爆破诱发的地质灾害在大型露天矿中已经成为首要工程灾害, 节理发育岩质边坡尤为严重^[2]。邓运辰等通过数值模拟表明^[3], 邻洞爆破下软弱夹层距离洞室边界小于 0.2 r 时, 对洞库稳定性影响显著。近些年, 针对该方面, 国内外学者开展了系统的实验研究, 例如韩新平等的研究表明软弱夹层对台阶深孔爆破效果具有关键影响^[4], 通过系统调整爆破参数 (包括孔径、孔距、炸药单耗) 及药包和软弱夹层之间的相对位置, 研究人员发现: 爆破质量与爆破参数呈显著负相关, 其中药包与软弱夹层的空间关系是决定爆破效果的核心因素; 夏振坤等采用改变药量及装药位置的方法来研究含有软弱夹层的顺层岩质边坡爆破层裂效应^[5], 从而提出了可以有效控制层裂效应的方法; 郝亚飞等通过爆破模拟实验证实^[6], 调整炮孔装药位置可有效抑制含软弱夹层岩体的层裂效应; 单仁亮团队的理论研究进一步表明^[7], 巷道爆破效果受软弱夹层空间特征 (包括位置、数量、厚度、走向) 的显著影响。刘迪等通过试验和数值模拟证实^[8], 随着软弱夹层强度降低, 其侧爆炸反射应力波增强, 裂纹扩展更充分; 钟冬望等通过模型试验优化了涉水边坡预裂爆破参数^[9], 发现大孔径 (115 mm) 配合适当孔距 (80 cm) 可提升爆破效果; 王卓等在水泥用灰岩矿边坡工程中应用预

裂爆破^[10], 通过优化孔网参数和装药结构, 使半孔留痕率达 75% 以上。

目前, 建好适用于爆炸工况的岩石和炸药用数值模型, 将其导入数值模拟软件, 从而得到相关数据的方法可以观察到整个爆炸过程中各个参数的变化情况^[11]。因此, 采用数值模拟软件分析计算并结合理论与经验的方法逐渐成为一种最常用的参数确定方式。本研究基于 ANSYS/LS-DYNA 动力分析平台, 建立数值计算模型, 系统研究软弱夹层对边坡预裂爆破效果的影响机制。

1 论文研究背景

在矿山开采过程中, 常常需要在露天矿山高陡边坡邻近边帮处进行爆破工作, 此时爆破产生的应力波直接作用于既有边坡, 对既有边坡的稳定性有极大影响, 有时甚至会造成边坡失稳破坏, 从而出现滑坡现象^[12]。在研究岩体损伤破坏的过程中, 为了方便研究, 一般会将岩石视为各项同性的均质连续弹性材料, 爆轰压力作用于岩体, 在损伤之前发生的是弹性变形, 当其内部拉压应力达到极限时, 岩石发生失效破坏^[13]。为了降低爆破对边坡的振动破坏、保证边坡岩体的完整性, 施工中常采用预裂爆破技术。预裂爆破属于定向成缝成面的控制爆破技术范畴, 由光面爆破演变而来, 早期也有称作预裂光面爆破^[14]。用预裂爆破的手段于边坡爆破工作的过程中, 生成预裂缝, 可以有效地减少上述现象的发生。采用预裂爆破的方法, 所产生的预裂缝可以防止应力波接作用于既有边坡, 不但可以使爆破振动减少对既有边坡的影响^[15], 保持既有边坡特别是含软弱夹层的边坡的稳定性, 而且对控制超挖和欠挖现象

也有重要的作用,其现实意义在于保障矿山的安全生产。

矿山边坡的岩体通常不是完整的,存在着的大量发育节理、断层及层面等软弱夹层,会对岩石力学性质产生影响,也会改变其破坏模式。伴随着爆破活动,软弱夹层的性质会进一步变差^[16]。岩体的爆破效果受软弱夹层的影响,而各种力学性质不等的同质地质结构面的切割,使得岩体结构复杂,性质不均一、不连续,炸药爆炸产生能量的一些会穿过节理裂缝进入空气而扩散开来^[17],还有一些会在软弱夹层中出现应力波的反射、折射和透射现象,爆破会更加复杂。现场爆破遇到软弱夹层会发生超欠,因此目前迫切需要得到解决的重要问题就是提高节理岩体的爆破成效^[18]。

2 软弱夹层对边坡预裂爆破效果影响研究

2.1 材料模型的选择

1) 岩石材料

LS-DYNA 中的 * MAT_JoHnson_Holnquist_Con-Cret 混凝土材质的模型,通常缩写为 H-J-C,常用作对岩石和水泥等材质的模拟。该材料模型考虑了大应力、高应变量、高压效应,并且等效屈服强度是受压、应变量和损伤的函数表达式,当中压力是体积应

变的函数,而损伤积累为高塑性体积应力、等效塑性应变和压力的函数表达式。

H-J-C 的强度可以用规范化等效应力表示如下

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$$

式中: $\sigma^* = \frac{\sigma}{f'_c}$, σ 为实际等效应力, f'_c 为静态抗压强度; $P^* = \frac{P}{f'_c}$, P^* 为无量纲压力 (P 为单元静水压力); $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$, $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲应变率 ($\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为真实应变率和参考应变率)。

A 、 B 、 C 、 N 分别为规范化内聚力强度,规范化压力应变系数,应变率系数以及压力硬化指数。

损伤因子 D 根据等效塑性应变与塑性体积应变相加得出

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \Delta \varepsilon_p \varepsilon$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变增量; $\Delta \mu_p$ 为等效体积应变增量。 $\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}$ 为常压 P 下断裂时的塑性应变, ε_p^f 为等效塑性应变, μ_p^f 为等效体积应变; $T^* = \frac{T}{f_c}$ 为材料所能承受的规范化最大拉力 (T 为材料抗拉强度); D_1 与 D_2 为损伤常数。

本论文岩体材料采用 H-J-C 模型模拟,材料参数如表 1 所示。

表 1 岩石材料参数相关数据

Table 1 Rock parameters

密度 Density/ (g · cm ⁻³)	弹性模量 Elastic modulus/10 ⁵ MPa	泊松比 Poisson ratio	剪切模量 Shear modulus/10 ⁵ MPa	抗压强度 Compressive strength/MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa
2.84	0.357	0.27	0.19	48	4
规范化内聚力 A Standardized cohesion A	规范化硬化系数 B Standardized hardening coefficient B	应变率系数 C Strain rate coefficient C	损伤常数 D_1 Damage coefficient D_1	损伤常数 D_2 Damage coefficient D_2	塑性应变 Plastic strain
0.78	0.65	0.02	0.001	1.15	0.01

2) 节理材料

为保证模拟的顺利进行,和结论的可靠性,将节理材料进行简化,假定节理为弹塑性体,选取与应变率无关的双线性随动硬化模型,用弹性和塑性两个

斜率表征应力应变特性,选用 LS-DYNA 中的 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型(简称 PK 模型)作为节理材料,具体参数如表 2 所示。

表 2 节理材料参数相关数据

Table 2 Jointed material parameters

密度 Density/ (g · cm ⁻³)	弹性模量 Elastic modulus/ 10 ⁵ MPa	泊松比 Poisson ratio	屈服应力 Yield strength/ 10 ⁵ MPa	切线模量 Tensile modulus/ 10 ⁵ MPa	硬化参数 Curing parameters
1.16	0.2	0.3	0.025	0.04	0.5

3) 空气材料及状态方程

利用流固耦合方式计算时,必须建立适当尺寸的 ALE 空间,本文使用空气为 ALE 介质,所使用的材质为 *MAT_Null 材料模型,所使用的状态方程为 Linear_Polynomial 状态方程,空气的状态方程可表

示为下式,其参数见表 3。

$$P = C_0 + C_1\mu^1 + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

式中: C_0, C_1, \dots, C_6 均为输入参数; $\mu = \frac{1}{V} - 1$; E 为内能参数。

表 3 空气材料参数
Table 3 Air parameters

密度 Density/(g · cm ⁻³)	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E
1.29e-5	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5e-4

4) 炸药材料及状态方程

在软件中,爆破动力过程一般采用炸药的爆轰研究成果结合爆生气体的状态方程来描述。LS-DYNA 中的 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 可以较为精确的描述炸药的物理化学性质。

在初始化期间,对每单元体计算其形心处的点火时刻 t_1

$$t_1 = \frac{L}{D}$$

式中: L 为单元体的形心至引爆点之间的距离有关系数,cm; D 是指炸药的爆速,cm/ μ s。

在 t 时,单元的燃烧反应率为

$$F = \max(F_1, F_2)$$

式中

$$F_1 = \begin{cases} \frac{(t - t_1)D}{1.5V_e} \cdot \frac{A_{e\max}}{A_{e\max}}, & t > t_1 \\ 0, & t \leq t_1 \end{cases}$$

$$F_2 = \frac{1 - D}{1 - D_{CJ}}$$

JWL(Jones-wilkens-Lee) 状态方程,可得到在高性能炸药引爆后炸药单元体内的总压力为 P

$$P_{eos} = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中: A, B, R_1, R_2, ω 都是常数; V 为相对体积;而 E_0 则为初始内能。见表 4。

表 4 炸药材料参数

Table 4 Explosive parameters

密度 Density/ (g · cm ⁻³)	爆速 Velocity of detonation/ (cm · μ s ⁻¹)	P_{ej} / 10 ⁵ MPa	A	E_0
1.5	0.745	0.22	6.253	0.0856
B	R_1	R_2	ω	V_0
0.233	5.25	1.6	0.28	1

5) 岩石及节理材料的屈服条件

屈服条件研究至今已有两个多世纪,在这之中为描述不同的介质,提出了多种屈服条件。岩石本构模型比较复杂,很难找出完全合理的模型进行描述。但是,对于某些工程,一些屈服条件通过证明其理论和实践一定的正确性后,对工程材料特征的说明更加符合实际,特别在工程应用的便利性,得到了人们的认同,广泛应用于工程中,如 Tresca 屈服条件和 Misses 屈服条件。

1864 年, Tresca 给出了 Tresca 屈服条件,主要考虑了材料的最大剪应力,即:材料屈服时,是由于剪应力超过了某一限制值,数学表达式为

$$\tau_{\max} = k$$

当 $\sigma > \sigma_2 > \sigma_3$ 时,可改写为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2k$$

此时一般应力函数的表达式为

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 4k^2][(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - 4k^2] \cdot [(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 4k^2] = 0$$

该条件是主应力的线性函数。由于其在主应力方向已知的前提下求解问题的便利性,而被广泛采用。其不足在于忽略了中间主应力的影响且曲线上有角点,在数学计算过程中会出现很多困难。

1913 年, Misses 关注到了 Treasca 屈服条件的问题,并给出了畸变能条件。该条件认为,当物质中某一个点屈服时,该点应力状态所相对的畸变能就超过了某极限值 k , 数学表达式为

$$J_2 = GS_{ij}e_{ij} = k^2$$

式中: $S_{ij} = \sigma_{ij}\sigma_m\delta_{ij}$, $e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G}$, 材料的屈服特征参数为 k 。

试验证明 Misses 屈服条件更接近于实验结果,相比 Treasca 屈服条件来说,在塑性力学中,一般将下式定义为 Mises 等效应力 (effectivestress) 以方便使用

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = k^2$$

从而有

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} = \sqrt{3}k$$

以简单拉伸为依据, 当 $k = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_e$ 时: $\sigma_e = \sigma_s$

于是, Misses 的屈服条件就可以描述为: 当材料开始塑性状态的必要条件, 为等效应力满足了简单拉伸的屈服极限条件。本文中, 通过 Misses 等效应力分析了边坡在预裂爆破过程中应力场的分布规律和破坏特点。

2.2 数值模型建立

研究采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学分析软件开展数值模拟研究。在模拟计算前, 首先进行数值模型的建立, 数值模型建立时, 如果建立与实际工况相同的模型, 需要划分数量相当庞大的网格数, 对于一般计算机而言, 计算量巨大, 无法满足模拟需要, 为顺利进行模拟过程, 需要对模型进行化简并且做出相应的假设。假定台阶是无限大的, 即只有正面和上表面为自由面, 其余面均设置无反射边界条件。

本次建模选取的单位制为 g-cm- μ s 单位制, 首先建立的模型长宽高分别为 1100 cm、400 cm、1400 cm, 底部台阶高 200 cm, 上部台阶高 1200 cm, 坡面角 80°, 4 个炮孔, 炮孔倾斜建立, 炮孔与边坡平行, 孔间距 100 cm, 采用径向不耦合装药, 建成二分之一模型后使用 LS-DYNA 中的 Reflect 功能生成整个模型, 完整模型共有 8 个炮孔。具体模型示意图如图 1 ~ 图 4 所示。

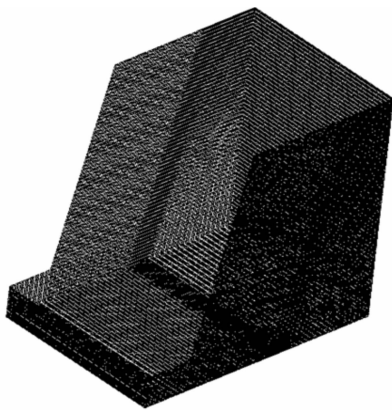


图 1 无反射边界条件的设置

Fig. 1 Settings for no reflection boundary condition

以完整边坡建模为例, 进行岩体网格划分时, 炮孔处网格长度为 2.5 cm, 炮孔附近网格长度为 10 cm, 除此之外岩体全局网格长度为 50 cm; 进行 ALE 空间网格划分时, 炸药网格长度为 0.25 cm, 炮

孔内空气网格长度为 0.5 cm, 除此外全局网格长度为 10 cm。按上述步骤划分得到的模型网格共有 9.54×10^5 个, 其中岩体网格共 3.58×10^5 个, 炸药网格 8.81×10^4 个, 空气网格 5.08×10^5 个。

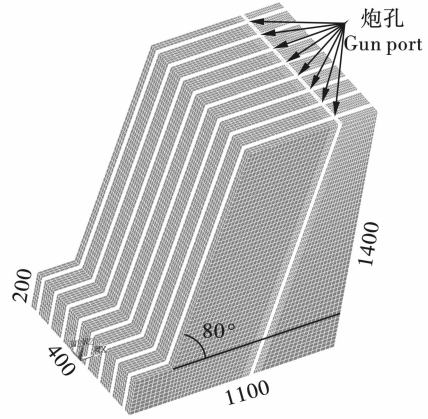


图 2 LS-DYNA 中建立的模型(单位:cm)

Fig. 2 Model established in LS-DYNA (unit: cm)

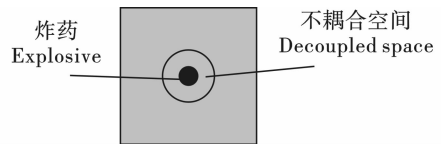


图 3 炮孔径向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the radial direction of the gun hole



图 4 炮孔轴向示意图

Fig. 4 Axial diagram of the blast hole

2.3 夹层与炮孔夹角不同数值模拟结果

1) 完整边坡预裂爆破情况

爆破荷载对岩体的作用过程是一个非常复杂的过程, 岩体在此过程中所受的应力状态也是十分复杂的。在 ANSYS/LS-DYNA 后处理软件 Ls-prepost 中, 一般用 Misses 等效应力来描述整个过程中岩石手里的变化过程。当等效应力值达到岩石的屈服极限时, 岩石将失效进而发生破坏。本次模拟采用两种方式表征预裂缝的形成过程, 为了更加清晰地观察模拟结果, 本次模拟将 Misses 有效应力显示的最大值做了限制, 将显示的最高值设定为了岩石材料的最大屈服应力, 即在云图中显示为红色的区域处的岩石的有效应力, 均大于岩石的最大屈服应力, 这

表示红色区域的岩石已经失效。图 5 是截取的某些时刻的有效应力云图。

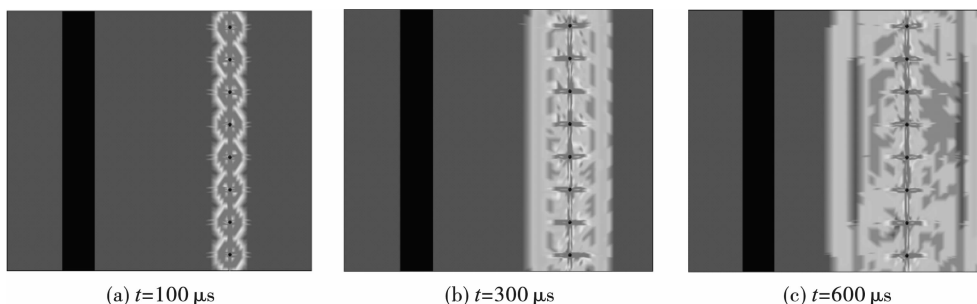


图 5 完整边坡等效应力变化过程俯视图

Fig. 5 Top view of the complete slope equivalent stress change process

图 5 和图 6 分别展示了完整边坡俯视图和炮孔截面处的有效应力图。从图中可以看到,约在 $t = 100$ 时,相邻炮孔间已经出现了有效应力的叠加,应力波在叠加后,继续向四周传播,在 $t = 300$ 时已经形成了完整的贯通缝,此时应力仍然在向四周传播,但最

大应力值始终保持在炮孔和相邻炮孔连线附近,岩石对应力波产生阻碍,应力波对岩石做工,使得能量不断衰减,从 $t = 600$ 时刻的云图可以看出,有效应力仍在扩展,但对岩石已经没有了破坏能力,只存在应力波岩体的振动作用。

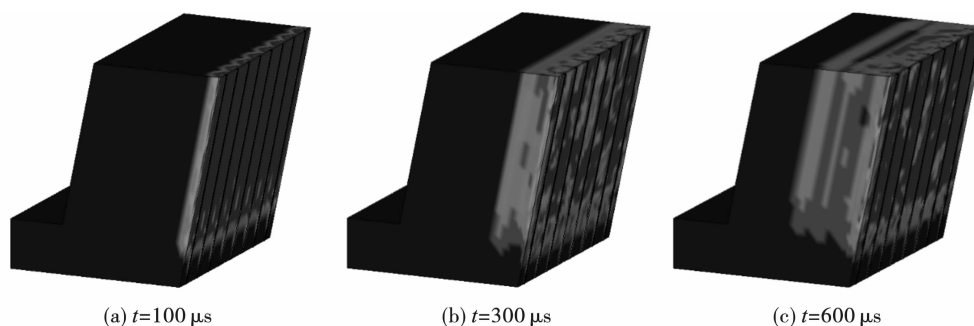


图 6 完整边坡等效应力变化过程炮孔截面图

Fig. 6 Cross-sectional view of the blast hole in the process of the equivalent stress change of the complete slope

图 7 为完整边坡预裂爆破最终结果,相邻炮孔的炸药爆炸,应力波互相叠加,迅速使得岩体破碎,并最终全部失效,形成如该图所示的预裂缝,达到了良好的爆破效果。

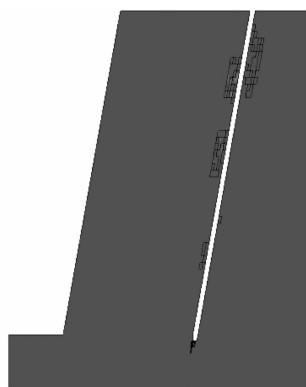


图 7 完整边坡预裂爆破最终效果

Fig. 7 The final effect of complete slope pre-split blasting

最终模拟最终结束时,在两个侧面出现了局部

的岩石破碎现象,如图 7 当中的红圈所示,这是由于 ANSYS/LS-DYNA 软件中的无反射边界不能完全透过应力波,只能一定程度上消减,仍有部分应力波在边界处反射后变为剪切波,而岩石的抗拉强度一般都很弱,所以在边界上出现了局部岩石被破坏的现象。而在实际工程问题中,边坡的两侧一般是无限大的,因此上述现象在模拟的描述中是可忽略的,并不影响对实际工程问题的理论分析。

2) 软弱夹层与炮孔角度为 45°

图 8 是含多层 45° 软弱夹层的边坡应力变化俯视图,从图中看,由于多层软弱夹层的存在,在夹层受力破坏后,应力波沿新生成的自由面传播,较完整岩体和单层软弱夹层岩体,其炮孔轴向应力变大,对预裂缝成型的影响更大,后部岩体的超挖量也随之增大。

除此之外,其有效应力的变化规律与完整边坡预裂爆破的变化规律相似,均表现为炮孔轴向应力

增大,后部岩石的超挖量增大,之后不再对此现象进行赘述。

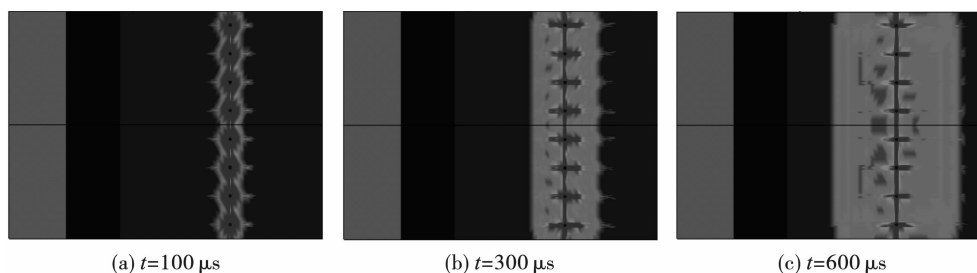


图8 夹层与炮孔夹角45°边坡等效应力变化过程俯视图

Fig. 8 Top view of the equivalent stress change process of the slope with an angle of 45° between the interlayer and the blast hole

与完整边坡预裂缝的成缝效果相比,含多层软弱夹层边坡预裂爆破的成缝效果明显较差,具体表现为:软弱夹层在爆破过程中首先被破坏,新生成的自由面造成了应力波的反射等现象,导致在炮孔和软弱夹层相交处的岩石所受拉压应力增大,在每处相交处都出现了类似“纺锤形”的破坏,如图9(c)红圈中所示。应力波继续传播,软弱夹层的破坏现象加剧,形成更多的自由面,再加上软弱夹层与边坡岩体泊松比和波阻抗的不同,使得应力波的反射,折

射等现象加剧,在夹层附近出现了应力集中区,尤其是在软弱夹层、炮孔和上部自由面形成的“三角区”中,这种应力集中现象更为明显(如图9(d)红色方框处),在 $t = 800 \mu\text{s}$ 时已经出现了严重的超挖现象,而其他应力集中区的出现也都加剧了炮孔壁附近的超挖现象(如图9(d)红圈处),孔壁处岩体变得破碎,预裂缝的平整度降低,预裂爆破的半孔率也减小,预裂缝的宽度也明显变大,预裂爆破质量变差。

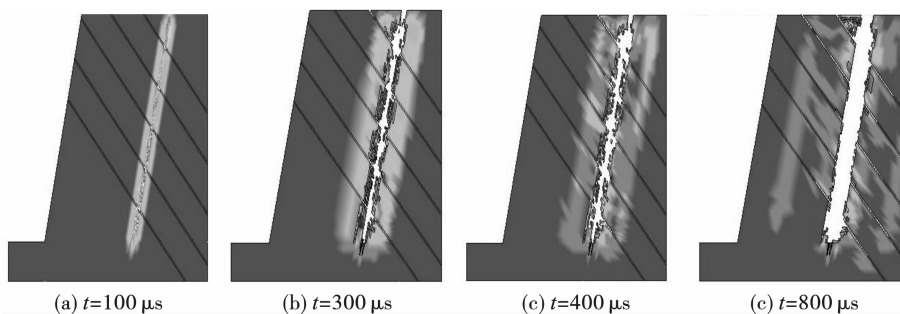


图9 夹层与炮孔夹角45°边坡等效应力变化过程侧视图

Fig. 9 Side view of the equivalent stress change process of the slope with an angle of 45° between the interlayer and the blast hole

此外,由于夹层与完整岩体的岩石力学性质具有差异性,所以在两条软弱夹层中间出现了应力波的反射、折射等现象,如图9(d),这种现象使得原本并不会出现破坏的,远离爆破中心处的岩石和夹层也产生了破坏,对这种现象对保护后部边坡也是不利的。并且,由于多层软弱夹层的出现,应力集中区域变大,在爆破和重力的双重作用下,预裂缝的最终成缝宽度也有很大程度的增加,这些现象的出现,显然不符合预裂爆破效果的期望。

3) 软弱夹层与炮孔角度为90°

由于随着炮孔与夹角的变化,其有效应力的变化规律并无明显变化,均表现为炮孔轴向应力增大,后部岩石的超挖量增大,因此夹角为90°情况下仅

对侧视图进行分析。

如图10所示,由于软弱夹层的吸能作用,爆破发生后,软弱夹层首先被破坏,裂隙首先向夹层方向扩展,在预裂缝贯通之前,软弱夹层与炮孔的相交处,产生了应力集中现象,出现了明显的超挖,形成了“纺锤状”的破碎空间,如图10(c)和图10(d)红圈处所示,随着爆破的继续进行,在 $t = 800 \mu\text{s}$ 时,已经形成了贯通的预裂缝。在最终形成的预裂缝中,由于软弱夹层的存在,形成的预裂缝是不平整的,在局部地区存在明显的超挖,如图10(e)、10(f)红圈处,并且,爆破能量在夹层两壁和上下夹层之间聚集,使得远离爆源的节理也产生了拉压破坏,新自由面的产生加剧了应力波的反射、折射作用,此外,

软弱夹层的存在还使得在后部岩体出现了应力集中区,这些种种原因都不但导致了预裂缝处的超挖现

象,还使得后部岩石的破坏加剧,不利于保护后部岩石。

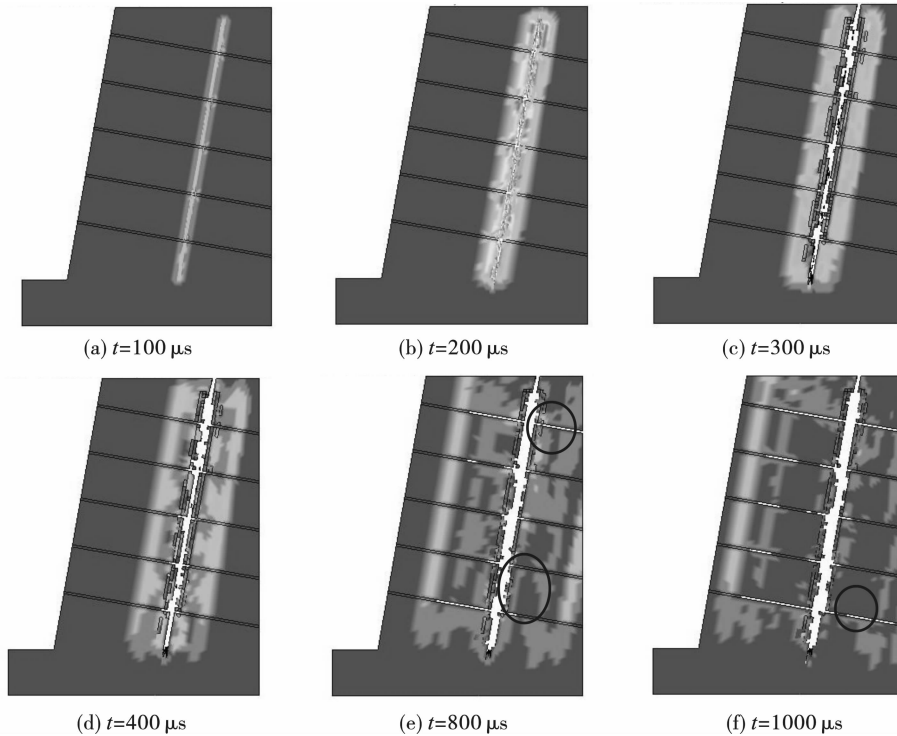


图 10 夹层与炮孔夹角 90° 边坡等效应力变化过程侧视图

Fig. 10 Side view of the equivalent stress change process of the slope with an angle of 90° between the interlayer and the blast hole

3 结果与分析

对比图 9 和图 10,多条软弱夹层的出现会使爆破效果相较完整岩层变得更差,在软弱夹层和炮孔夹角处会出现多处明显的应力集中现象,导致多处岩体超挖现象的发生,在爆破初期形成大量“纺锤状”的破碎空间。随着爆破的继续进行,这种应力集中现象导致的超挖,受角度影响的现象开始明显。在参数不变的情况下,软弱夹层与炮孔夹角为 45° 的边坡,在夹层与炮孔处的超挖现象远远大于夹角为 90° 的情况,超挖处形成的新自由面,又加剧了应力集中现象,最终导致了在夹角为 45° 情况下的预裂缝成缝宽度,远远超过预期。在此次模拟中,位于顶部的与炮孔夹角为 45° 的软弱夹层与炮孔连线形成的三角区域,其夹制作用使得应力集中现象最为明显,模型上部也出现了严重的破坏,如图 11 所示。

为具体分析多层软弱夹层对于爆破效果的影响,在三个不同情形的模拟实验里面放置了两个监测点,分别位于模型的中部和底部(由于多层软弱夹层的存在,在炮孔与软弱夹层夹角处出现了大量的应力波反射、折射现象,导致在夹角处的应力变化

巨大,由于模拟的计算时间间隔的存在,常常出现在夹角处的监测点无法检测到岩石应力的情况,本节不再探讨夹角处的应力变化),具体监测点的布置如图 12 所示。

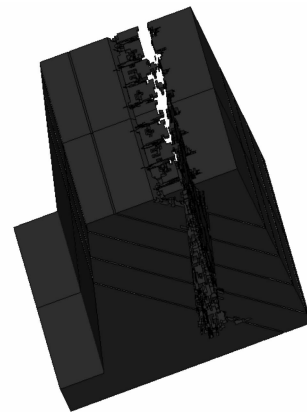


图 11 夹层与炮孔夹角 45° 边坡顶部破碎情况

Fig. 11 The angle between the interlayer and the blast hole is 45° , and the top of the slope is broken

3.1 软弱夹层与炮孔角度为 45°

图 13 是在中部监测点测出的有效应力曲线图,从图中可以看出,三种情况下有效应力的值总体上

均表现为先增大后减小,最后震荡减小至 0。其中完整模型在该点的有效应力最大值大于其余两种情况,且最大值出现在 700 μs 左右,达到有效应力最大值的时间较其余两种情况早。完整模型在监测点的有效应力最大值在 7.5 MPa 左右,夹角为 45° 情况下在监测点的有效应力最大值是 3.75 MPa,而

90° 夹角情况下的最大值不到 3 MPa。45° 夹角情况下的应力值在 110 μs 后出现了升高的情况,随后缓慢归 0。90° 夹角下的有效应力曲线总体与完整岩体相似,但在震荡减小阶段其震荡幅度更大,第二波峰值也更大。

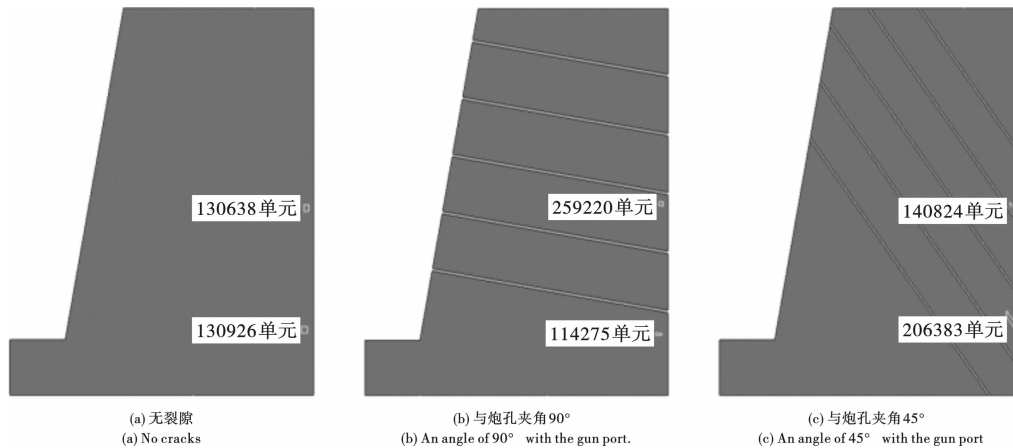


图 12 监测点位置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the location of the monitoring point

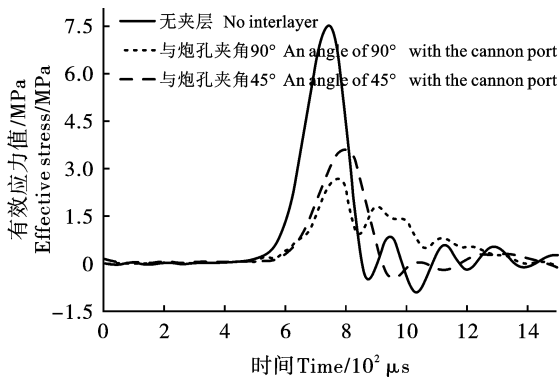


图 13 多层软弱夹层中部监测点有效应力曲线

Fig. 13 The effective stress curve of the monitoring point in the middle of the multilayer weak interlayer

出现上述现象的原因是多种多样的。软弱夹层的吸能作用,导致含软弱夹层边坡在该观测点的有效应力值较小;软弱夹层与完整岩体岩性不同,和软弱夹层破坏生成新的自由面,阻隔了应力波的传播,使得含软弱夹层模型,在该监测点出现了最大值延后出现的情况;为使得监测点在几何位置上保持一致,140 824 单元取在了软弱夹层与原岩接触处,由于边界和软弱夹层的夹制作用,使得爆炸应力波穿过该点后该点又出现了有效应力的上升情况;259 220 单元与炮孔的连线方向,并不存在软弱夹层的阻挡,因此 90° 夹角情况下有效应力的变化情况,与完整岩体基本一致,而在 1200 μs 后,由于软弱夹

层对应力波的反射,使该点处的有效应力曲线出现了略微的上升。

3.2 软弱夹层与炮孔角度为 90°

图 14 是在底部监测点测出的有效应力曲线图,三种情况下有效应力的值的整体变化趋势与图 13 相似。完整模型在该监测点的有效应力最大值出现在 900 μs 左右,最大值为 4.9 MPa,同中部监测点相同,达到有效应力最大值的时间较其余两种情况早。就软弱夹层与炮孔夹角为 45° 的情况来看,其有效应力曲线从一开始就出现了震荡现象,且其在 1200 μs 左右的有效应力值远远大于其他两种情况,随后出现急剧下降的情况。90° 夹角下的有效应力曲线的变化总体与完整岩体相似。

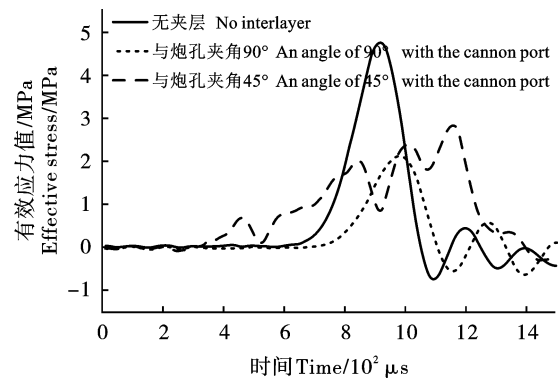


图 14 多层软弱夹层底部监测点有效应力曲线

Fig. 14 Effective stress curves of monitoring points at the bottom of multilayer weak interlayers

同中部监测点相似,软弱夹层的吸能作用也导致了该观测点处含软弱夹层边坡的有效应力值较小;软弱夹层对应力波的阻隔作用,使得含软弱夹层模型在该监测点最大值延后出现;206383 单元受边界和软弱夹层的夹制作用,出现应力集中,使得 1200 μs 后该点又出现了有效应力的震荡上升的情况;114275 单元与 259220 单元相似,其模型前部并不存在软弱夹层的阻挡,其整体变化趋势完整岩体相似,而在 1200 μs 后,由于软弱夹层对应力波的反射,使该点处的有效应力曲线的震荡现象较完整岩体来说开始变得更剧烈,在震荡归 0 的过程中,该单元处的最大最小应力,均大于完整岩体。

综上所述,在上述监测点处,多层软弱夹层对应力波的传播具有阻隔作用,且阻隔作用较单层软弱夹层的大,夹层与炮孔连线的角度大小与阻隔作用的强弱成反比,即角度越大,阻隔作用越弱;更明显,这说明吸能作用的强弱和夹层数量成正比;多层软弱夹层的吸能作用与角度的大小正相关;多层软弱夹层的观测点处,应力波的反射与折射现象更明显。

4 结 论

建立了完整边坡三维模型,模拟了预裂爆破的整个过程,形成了完整的贯穿预裂缝。建立了含与炮孔成 45° 和 90° 夹角的多条软弱夹层边坡模型,观察分析了其成缝过程,得出如下结论:

1) 随着炮孔与夹角的变化,其有效应力的变化规律并无明显变化,均表现为炮孔轴向应力增大,后部岩石的超挖量增大。

2) 软弱夹层的阻隔作用与吸能作用不仅与夹层与炮孔的夹角有关,并且与夹层的数量有关,且与夹角大小成反比,与夹层数量成正比。

3) 当夹层与炮孔夹角过小时,在夹层与炮孔相交处,应力集中现象会导致该处破碎严重,导致预裂缝成缝的效果极差。

参考文献 (References)

- [1] 徐叶勤,李 梅,姚俊伟,等. 爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩稳定性和变形破坏特征的影响[J]. 爆破, 2020,37(2):35-41.
- [1] XU Ye-qin, LI Mei, YAO Jun-wei, et al. Influence of blasting load on stability and deformation failure characteristics of tunnel surrounding rock mass with weak interlayer [J]. *Blasting*, 2020, 37(2): 35-41. (in Chinese)
- [2] 张士磊. 预裂爆破作用下节理岩质边坡损伤区测试研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 74-77, 94.
- [2] ZHANG Shi-lei. Damage zone test of jointed rock slope under pre-split blasting [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 74-77, 94. (in Chinese)
- [3] 邓运辰,上官志浩,杨奥天,等. 邻洞爆破下软弱夹层对洞库稳定性的影响研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(10): 74-82.
- [3] DENG Yun-chen, SHANGGUAN Zhi-hao, YANG Aotian, et al. Study on influence of weak inter-layer under adjacent tunnel blasting on stability of tunnel vault [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2024, 45(10): 74-82. (in Chinese)
- [4] 韩新平,李世丰,苏荣华,等. 含软弱夹层的顺层岩体台阶深孔爆破试验研究[J]. 爆破, 2016, 33(2): 49-54.
- [4] HAN Xin-ping, LI Shi-feng, SU Rong-hua, et al. Experimental study on deep-hole blasting of bedding rock mass with weak interlayers [J]. *Blasting*, 2016, 33(2): 49-54. (in Chinese)
- [5] 夏振坤,郭学彬,肖正学,等. 含软弱夹层的顺层岩质边坡爆破层裂效应及其控制[J]. 化工矿物与加工, 2010, 39(6): 31-34.
- [5] XIA Zhen-kun, GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, et al. Study on bedding cracks effect of blast and controlling on bedding rock slope with weak interlayer [J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2010, 39(6): 31-34. (in Chinese)
- [6] 郝亚飞,李海波,郭学彬,等. 含软弱夹层顺层岩体爆破效应模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 389-395.
- [6] HAO Ya-fei, LI Hai-bo, GUO Xue-bin, et al. Simulation test on blasting effect of the bedding rock with intercalation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 389-395. (in Chinese)
- [7] 单仁亮,黄宝龙,张怀文,等. 厚软弱夹层岩巷中深孔爆破试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(6): 39-41, 45.
- [7] SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, ZHANG Huai-wen, et al. Experiment and research on deep borehole blasting in mine rock roadway with thick soft and weak parting [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(6): 39-41, 45. (in Chinese)
- [8] 刘 迪,吴立辉,顾 云,等. 软弱夹层对岩石爆破裂纹扩展影响的研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 52-60.
- [8] LIU Di, WU Li-hui, GU Yun, et al. Study on the influence of weak interlayer on the crack propagation of rock blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(4): 52-60. (in Chinese)
- [9] 钟冬望,陶好好,李琳娜,等. 涉水边坡预裂爆破参数优化试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 31-43, 128.
- [9] ZHONG Dong-wang, TAO Hao-hao, LI Lin-na, et al. Experimental study on optimization of presplitting blasting parameters for water-adjacent slopes [J]. *Blasting*, 2025, 42(2): 31-43, 128. (in Chinese)

- [10] 王卓,蔡昆. 预裂爆破在水泥用灰岩矿边坡控制工程中的应用[J]. 水泥,2025(7):41-43.
- [10] WANG Zhuo, CAI Kun. Application of pre-split blasting in cement limestone mine slope control engineering[J]. Cement,2025(7):41-43. (in Chinese)
- [11] 夏鹤平. 紫金山金铜矿爆破孔网参数优化模拟研究[J]. 现代矿业,2023,39(3):92-96.
- [11] XIA He-ping. Optimization simulation study of blasting hole network parameters in Purple Mountain gold-copper mine[J]. Modern Mining,2023,39(3):92-96. (in Chinese)
- [12] 朱家剑. 基于水泥改良土对高填方边坡稳定性影响分析[J]. 中国建材科技,2021,30(4):142-143,94.
- [12] ZHU Jia-jian. Analysis of influence of cement-improved soil on stability of high-fill slopes[J]. China Building Materials Science & Technology,2021,30(4):142-143,94. (in Chinese)
- [13] 孙波勇,段卫东,郑峰,等. 岩石爆破理论模型的研究现状及发展趋势[J]. 矿业研究与开发,2007(2):69-71.
- [13] SUN Bo-yong, DUAN Wei-dong, ZHENG Feng, et al. Research status and development trend of theoretical model of rock blasting[J]. Mining Research and Development, 2007(2):69-71. (in Chinese)
- [14] 唐毅,孙飞,李广洲,等. 复杂工况下高边坡预裂爆破技术及施工工艺研究[J]. 爆破,2020,37(1):87-93.
- [14] TANG Yi, SUN Fei, LI Guang-zhou, et al. Research on pre-splitting blasting technology and construction process for high slope under complicated conditions[J]. Blasting,2020,37(1):87-93. (in Chinese)
- [15] 张文龙. 爆破荷载作用下边坡稳定性分析及降振研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [15] ZHANG Wen-long. Stability analysis and vibration reduction study of slope under blasting load[D]. Nanning: Guangxi University,2022. (in Chinese)
- [16] 任杰. 含双软弱夹层顺层岩质滑坡的滑动模式及变形规律研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [16] REN Jie. Study on the sliding mode and deformation law of rocky landslide with double weak interlayer[J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 郭文章,王树仁. 节理岩体爆破的破裂规律分析[J]. 振动与冲击,1999(2):32-36.
- [17] GUO Wen-zhang, WANG Shu-ren. Analysis of fracture law of joint rock mass blasting[J]. Journal of Vibration and Shock,1999(2):32-36. (in Chinese)
- [18] 张学民,阳军生,刘宝琛. 层状岩体中近邻双线隧道爆破的振动响应研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2006(4):70-74.
- [18] ZHANG Xue-min, YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen, et al. Study on the vibration response of adjacent double-line tunnel blasting in layered rock mass[J]. Journal of Hunan University Science & Technology(Natural Science Edition),2006(4):70-74. (in Chinese)

(上接第39页)

- [12] 薛刚,董亚杰,衣笑,等. 橡胶混凝土断裂韧性试验研究[J]. 建筑结构,2022,52(2):115-119,126.
- [12] XUE Gang, DONG Ya-jie, YI Xiao, et al. Experimental study on fracture toughness of rubber concrete[J]. Building Structure,2022,52(2):115-119,126. (in Chinese)
- [13] 尤伟. 橡胶粉改性水泥混凝土路用性能的研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2009.
- [13] YOU Wei. Research of crumb rubber modified cement concrete pavement performance[D]. Guilin: Guilin University of Technology,2009. (in Chinese)
- [14] 马士宾,许艳伟,徐文斌,等. 废橡胶粉水泥混凝土抗冲击性能试验研究[J]. 混凝土,2018(6):76-79,88.
- [14] MA Shi-bin, XU Yan-wei, XU Wen-bin, et al. Concrete pavement experimental study on impact resistance of waste rubber powder cement concrete[J]. Concrete, 2018(6):76-79,88. (in Chinese)
- [15] 汪帅文. 基于结构面因素降低别矿台阶爆破大块率技术研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [15] WANG Shuai-wen. Study on the technique of reducing the bulk rate of blasting step blasting based on structural surface factors[D]. Guiyang: Guizhou University,2018. (in Chinese)
- [16] 郑钢鏢,康天合,柴肇云,等. 运用Rosin-Rammler分布函数研究煤尘粒径分布规律[J]. 太原理工大学学报,2006(3):317-319.
- [16] ZHENG Gang-biao, KANG Tian-he, CHAI Zhao-yun, et al. Applied the rosin-rammler distribution function to study on the law of coal dust particle-size distribution[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006(3):317-319. (in Chinese)