

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.006

## 裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟\*

叶海旺<sup>1</sup>, 韦文蓬<sup>1</sup>, 周汉红<sup>2</sup>, 余梦豪<sup>1</sup>, 李兴旺<sup>1</sup>, 雷涛<sup>1</sup>, 温颖<sup>1</sup>, 王其洲<sup>1</sup>, 石斌宏<sup>3</sup>,  
于燕<sup>3</sup>, 张生<sup>3</sup>, 钟传山<sup>3</sup>, 高玉文<sup>4</sup>, HASSAN Abdou Mohamed Abdelkader<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉市公安局治安管理局, 武汉 430077;  
3. 华新水泥股份有限公司, 武汉 430200; 4. 五矿勘查开发有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 裂隙岩体爆破数值模拟过程中, 裂隙分布模型的真实性和完整性是影响数值模拟结果的关键因素之一, 现有节理裂隙构建方法难以实现三维分布上的复杂表征或是实现操作过于繁杂。为探索在 LS-DYNA 软件中构建三维分布上真实、复杂表征的节理裂隙模型简单可行的操作方法, 通过 MATLAB 软件对爆破数值模型 K 文件进行解析重组, 按照节理裂隙三维分布规律进行勾勒并赋予节理裂隙材料本构, 构建出符合节理裂隙分布规律的节理岩体三维精细化数值模型。以某露天石灰石矿山为实例, 开展节理裂隙三维分布规律统计分析并在台阶爆破数值模型中进行还原, 基于裂隙岩体精细化数值模型, 开展露天台阶爆破数值模拟试验和现场爆破试验对比研究。结果表明: 采用解析重组方法构建的数值节理模型与实际节理裂隙的误差小于 13%; 节理裂隙面使岩体内的损伤分布规律发生了变化, 与完整岩体相比, 损伤范围增加了 12.04%, 粒径处于 0~100 mm 的占比降低了 8.11%; 爆破模拟得到的损伤结果与现场破碎效果接近, 统计粒径在 0~100 mm 之间的碎块的占比, 误差为 4.16%。解析重组法构建三维节理裂隙, 可行、操作简便, 数值模拟结果接近实际。

**关键词:** 裂隙岩体; 裂隙分布规律; 地质模型; LS-DYNA; 爆破数值模拟; 爆破试验

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0044-08

## Refined Numerical Model Construction and Blasting Simulation of Fractured Rock Mass

YE Hai-wang<sup>1</sup>, WEI Wen-peng<sup>1</sup>, ZHOU Han-hong<sup>2</sup>, YU Meng-hao<sup>1</sup>, LI Xing-wang<sup>1</sup>, LEI Tao<sup>1</sup>,  
WEN Ying<sup>1</sup>, WANG Qi-zhou<sup>1</sup>, SHI Bin-hong<sup>3</sup>, YU Yan<sup>3</sup>, ZHANG Sheng<sup>3</sup>, ZHONG Chuan-shan<sup>3</sup>,  
GAO Yu-wen<sup>4</sup>, HASSAN Abdou Mohamed Abdelkader<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China; 2. Security Administration of Wuhan Public Security Bureau,  
Wuhan 430077, China; 3. Huaxin Cement Co., Ltd., Wuhan 430200, China;  
4. Minmetals Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100044, China)

收稿日期 (Date of reception): 2022-11-24

网络首发日期 (Published online): 2023-10-07

作者简介: 叶海旺 (1971-), 男, 教授、博士、博导, 主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作, (E-mail) yehaiwang369@hotmail.com。

通讯作者: 雷涛 (1983-), 男, 博士、讲师, 主要从事采矿、安全、数字化矿山等方面的教学和科研工作, (E-mail) leitao539@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1909602, 2021YFC2902901); 湖北省重点研发计划 (2021BCA152)

**About the author:** YE Hai-wang (1971-), male, professor, Ph. D, doctoral supervisor, mainly engaged in teaching and scientific research in the fields of mining, blasting and safety, (E-mail) yehaiwang369@hotmail.com.

**Corresponding author:** LEI Tao (1983-), male, lecturer, Ph. D, mainly engaged in teaching and scientific research in mining, safety and numerical mining, (E-mail) leitao539@163.com.

**Fund Programs:** National Key Research and Development Program (2020YFC1909602, 2021YFC2902901); Key R&D Program of Hubei Province (2021BCA152)

**Abstract:** The authenticity of fracture distribution model is one of the key factors during numerical simulation of blasting in jointed rock mass, which would obviously affect the numerical simulation results. It is hard to represent the complex three-dimensional joint distribution in the existing joint construction method. To explore a simple and feasible operation method for constructing the complex 3D joint model in LS-DYNA software, a *K* file of blasting numerical model was analyzed and reorganized by MATLAB software. Furthermore, a 3D refined numerical model for jointed rock mass was constructed by the 3D joint distribution law and the constitutive joint model parameters. Finally, a statistical analysis of the three-dimensional joint distribution law was carried out in an open-pit limestone mine, and the joints were reconstructed in the numerical model of a bench blasting. Consequently, a comparative study of the numerical simulation and the field blasting test for open-pit bench blasting was carried out. The results show that the error between the joints built in the numerical model and the actual joints is less than 13%. The joint surface changes the damage distribution of the rock mass. Compared with the intact rock mass, the damage rock mass range increases by 12.04%, and the proportion of fragments with the size of 0 ~ 100 mm decreases by 8.11%. The damage results obtained by blasting simulation are close to the field rock breaking effect, and the percentage error of fragments with the size of 0 ~ 100 mm is 4.16%. The analytical reconstruction method is feasible and easy to represent the complex three-dimensional joint distribution, and the numerical results are close to experimental results.

**Key words:** jointed rock mass; joint distribution law; geological model; LS-DYNA; blasting simulation; blasting test

裂隙岩体爆破时,节理裂隙分布特性是影响岩体爆破破碎效果的关键因素。在爆炸应力作用下,节理裂隙面易产生应力集中、破坏放大及引导破坏等效效应,对岩体动力学响应特性及破坏规律具有重要影响<sup>[1-3]</sup>。节理裂隙的非均质性、不连续性、各向异性和不可全窥性<sup>[4]</sup>,使得节理裂隙岩体的爆破动力响应特性研究工作难度增大。目前,数值模拟是研究裂隙岩体爆破响应特性的主流手段之一,而不规则节理裂隙构建的准确性和合理性将直接影响到数值模拟结果的精度。

在 ANSYS 中直接建立节理裂隙是开展节理岩体爆破数值模拟最简便的方法,金李通过该种方式构建了长宽高为 10 m × 5 m × 10 m 的节理岩体<sup>[5]</sup>,马小满<sup>[6]</sup>、周文海等则构建规则<sup>[7]</sup>、条带状的节理裂隙,规则分布的节理对应力传播、损伤破坏规律的影响较为清晰、直观。叶海旺<sup>[8]</sup>、吴立辉等通过在 ANSYS 中建立模型之后利用 LS/PREPOST 对模型进行修改的方式<sup>[9]</sup>,构建出含 X 型节理裂隙的爆破数值模型,完整表述出了节理裂隙倾角、间距等二维平面内的分布特征。基于 3DEC、UDEC、PFC 等软件构建节理裂隙地质模型基础上,ZL Wang<sup>[10]</sup>、唐海<sup>[11]</sup>、汤云坤提出将爆破应力曲线加载到上述软件中开展数值模拟的方法<sup>[12]</sup>,实现了节理裂隙复杂、精细化表征下的爆破数值模拟。直接法和修改法可以实现二维节理地快速构建,节理岩体爆破数值试验中简便可行,但在倾向、倾角、间距和延伸长度等节理裂隙信息的复杂表征上较为困难。且岩体中因炸药爆轰而产生的应力随着传爆方向、传爆距

离的变化而变化<sup>[13]</sup>,需加载大量爆破荷载曲线才能实现节理裂隙岩体的爆破数值模拟,其操作过程繁琐。现有裂隙岩体爆破数值模拟,在节理裂隙的构建上,难以实现其在三维分布上的复杂表征或是实现操作过于繁杂。

基于已有研究成果,提出爆破数值模型解析重组建模方法,构建符合实际节理裂隙分布规律的岩体爆破数值模型,开展节理裂隙岩体的露天台阶爆破数值模拟研究,将模拟结果与现场试验结果进行对比分析。

## 1 精细化裂隙岩体数值模型构建方法

### 1.1 节理裂隙解析重组建模方法简述

采用 MATLAB 软件进行编程,实现爆破数值模型 *K* 文件的解析,得到数据化的爆破数值模型库,按照节理裂隙产状(倾角、倾向、间距、延伸长度)分布函数对数据库进行筛分、重组,修改其材料特征,将修改后的数据库编译成新的爆破数值模型 *K* 文件。详细流程如图 1 所示。

### 1.2 节理裂隙参数定义

节理裂隙的三维空间分布特性参量倾角  $\alpha$ 、倾向  $\beta$ 、间距  $\gamma$ 、节理裂隙迹长  $l$  通过采样、统计分析可得,节理裂隙延伸长度  $w$  通过节理裂隙迹长  $l$  计算得到。

以绝对地理坐标角度  $34^\circ$  为  $X$  轴正方向,以垂直坡面向外( $304^\circ$ )为  $Y$  轴正方向,即绝对地理坐标轴顺时针旋转  $34^\circ$  得到 ANSYS 数值模拟软件中建模时的相对坐标轴, $r(x_0, y_0, z_0)$  为节理裂隙面中心点,

节理裂隙面与单位块体的交点分别为  $A, B, C, D, EF$  为水平面上的走向线。倾向向量  $\vec{\beta}$  位于水平面上, 垂直于走向线  $EF, \vec{\beta}$  与  $x$  轴负方向的顺时针夹角为  $\beta$ , 节理裂隙面与水平面的夹角为  $\alpha$ 。数值模型中节理裂隙倾向、倾角定义如图 2 所示。节理裂隙间距  $\gamma$  为岩层出露断面上相邻节理的距离, 节理裂隙迹长  $l$  为岩层出露断面上节理裂隙的长度, 延伸长度  $w$  为节理裂隙三维空间内的延展长度。

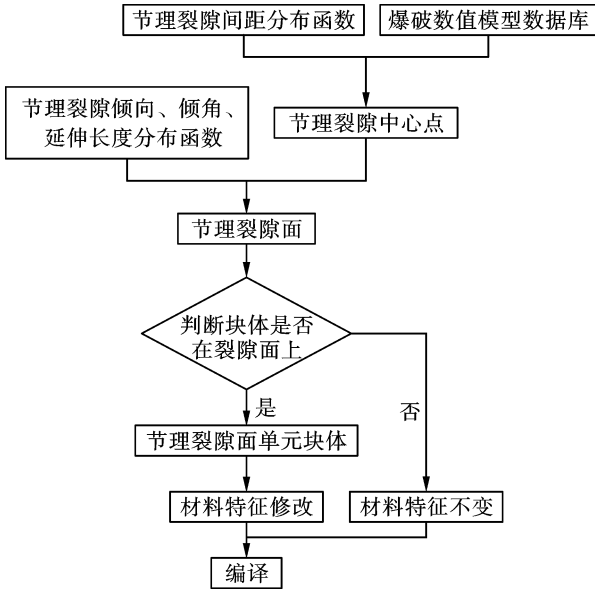


图 1 节理裂隙构建方法

Fig. 1 Flow chart of creating joint in numerical modeling

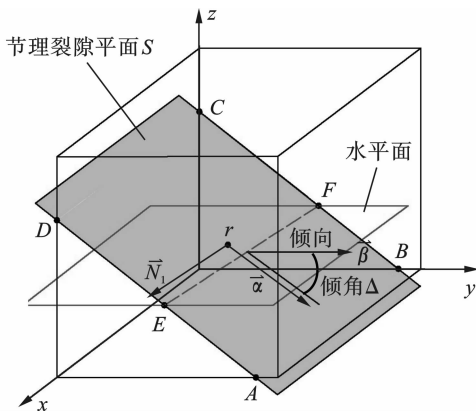


图 2 数值模型节理裂隙定义

Fig. 2 Illustration of joint fissure in numerical model

### 1.3 解析数据重组算法

在数据库所表征的三维模型内虚构出测线截面及测线, 根据边坡测线法得到节理裂隙间距分布函数, 在测线上筛选节理裂隙中心点, 以节理裂隙中心点为起点绘制出倾向单位向量  $\vec{\alpha}$ , 走向单位向量  $\vec{N}_1$  (如图 2 所示), 在裂隙中心点  $\vec{\alpha}, \vec{N}_1$  及延伸长度  $w$

等控制参数下, 计算出节理裂隙面  $A, B, C, D$  四个点的坐标, 确定节理裂隙平面。

$\vec{\alpha}$  为

$$\vec{\alpha} = [\cos \alpha \cdot \cos \beta, \cos \alpha \cdot \sin \beta, \sin \alpha] \quad (1)$$

$\vec{\beta}$  为

$$\vec{\beta} = [-\cos \beta, \sin \beta, 0] \quad (2)$$

走向单位向量  $\vec{N}_1$  水平垂直于倾向单位向量  $\vec{\beta}$ ,

通过向量计算得到  $\vec{N}_1$  为

$$\vec{N}_1 = [\sin \beta, \cos \beta, 0] \quad (3)$$

通过向量运算得到节理裂隙中心点至  $A, B, C, D$  四个点的向量为

$$\begin{cases} \vec{x}_A = \frac{w}{2\sqrt{2}} \cdot (\vec{\alpha} + \vec{N}_1) \\ \vec{x}_B = \frac{w}{2\sqrt{2}} \cdot (\vec{\alpha} - \vec{N}_1) \\ \vec{x}_C = \frac{w}{2\sqrt{2}} \cdot (-\vec{\alpha} - \vec{N}_1) \\ \vec{x}_D = \frac{w}{2\sqrt{2}} \cdot (-\vec{\alpha} + \vec{N}_1) \end{cases} \quad (4)$$

$A$  点坐标计算公式为

$$\begin{cases} x_A = x_0 + x_a \\ y_A = y_0 + y_a \\ z_A = z_0 + z_a \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x_a, y_a, z_a$  为向量  $\vec{x}_A$  的  $x, y, z$  的值,  $x_A, y_A, z_A$  为点  $A$  的坐标。

同理求出  $B, C, D$  的坐标。并通过  $A, B, C, D$  及裂隙中心点  $r$  五个点确定节理裂隙面公式

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (6)$$

式中:  $a, b, c, d$  为节理裂隙面方程参数。

采用三角投影法对单元节点进行判别是否在节理裂隙面上。点  $i, j, k$  为节理裂隙面上的任意点,  $p$  点为单元节点  $P$  在节理面上的投影点。三维空间内任意一点  $P(x_1 + y_1, z_1)$  在平面  $S$  上的投影点  $p(x'_1, y'_1, z'_1)$  的计算公式为

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{(b^2 + c^2)x_1 - a(by_1 + cz_1 + d)}{a^2 + b^2 + c^2} \\ y'_1 = \frac{(a^2 + c^2)y_1 - b(ax_1 + cz_1 + d)}{a^2 + b^2 + c^2} \\ z'_1 = \frac{(a^2 + b^2)z_1 - c(ax_1 + by_1 + d)}{a^2 + b^2 + c^2} \end{cases} \quad (7)$$

若  $\Delta_{ijp}, \Delta_{ikp}, \Delta_{jkp}$  面积之和等于  $\Delta_{ijk}$ , 则表示  $P$  点位于节理裂隙面范围内。设置容差  $\mu$  和  $R$ , 对位于节理裂隙面范围内节点进一步筛选。  $P$  点到平面

垂直距离  $d$  大于容差  $\mu$  或  $p$  点到节理裂隙中心点  $x$  距离  $R$  大于  $\frac{w}{2}$  时, 该节点不在节理裂隙平面内。

将筛选出的节点进行块体匹配, 形成节理裂隙面块体组, 修改其材料特征, 编译并输出  $K$  文件, 构建精细化节理岩体数值模型。

## 2 精细化裂隙岩体数值模型构建实例

以云南省某石灰岩露天矿山为工程背景, 对节理裂隙分布规律进行统计分析, 按照节理裂隙分布函数对数值模型解析重组, 构建精细化节理岩体地质模型。

### 2.1 节理裂隙分布规律求解方法

测线法、岩心取样法和钻孔成像法等方法采集到的节理裂隙分布信息为平面内的节理裂隙分布特征, 不能完全描述节理裂隙三维空间分布特征。对于倾向、倾角相互独立的天然节理裂隙, 可采用三维分形函数求解得到其三维分布累积概率<sup>[14,15]</sup>, 通过函数逼近求解方法得到最优分布函数及参数。岩层出露断面的节理裂隙迹长与节理裂隙延伸长度存在

紧密联系<sup>[16]</sup>, 三维空间内, 节理裂隙可近似看成圆形<sup>[17]</sup>, 圆盘直径即为延伸长度, 可从测线法得到的节理裂隙迹长分布函数进行推算。

### 2.2 节理裂隙分布规律

采用测线法及钻孔电视成像法进行节理裂隙信息采集, 测线法采集总长度 72 m, 钻孔电视成像法采集总长度 378 m。台阶边坡坡面及节理裂隙分布如图 3(a) 所示, 钻孔成像采集到的节理裂隙如图 3(b) 所示; 将倾向和倾角这两个数组进行 Pearson 卡方检验( $\chi^2$ ), 显著性概率为 0.819, 大于显著水平 (0.05), 即节理裂隙倾向和倾角的分布相互独立。通过三维分形函数求解得到各自三维分布累积概率<sup>[14]</sup>, 采用 Kolmogorov-Smirnov 逼近方法得到最优分布函数及参数。通过延伸长度与迹长之间的关系式求解得到节理裂隙延伸长度分布函数<sup>[17]</sup>; 三维空间内节理裂隙分布规律为: 倾向  $\beta \sim N(211.1, 17^2)$ , 倾角  $\alpha \sim N(75.5, 13^2)$ , 间距  $\gamma \sim N(1.1, 5^2)$ , 迹长  $l \sim F(2, 1.52)$ , 延伸长度  $w \sim \frac{2}{n\pi} \sum_{i=1}^n l$ 。

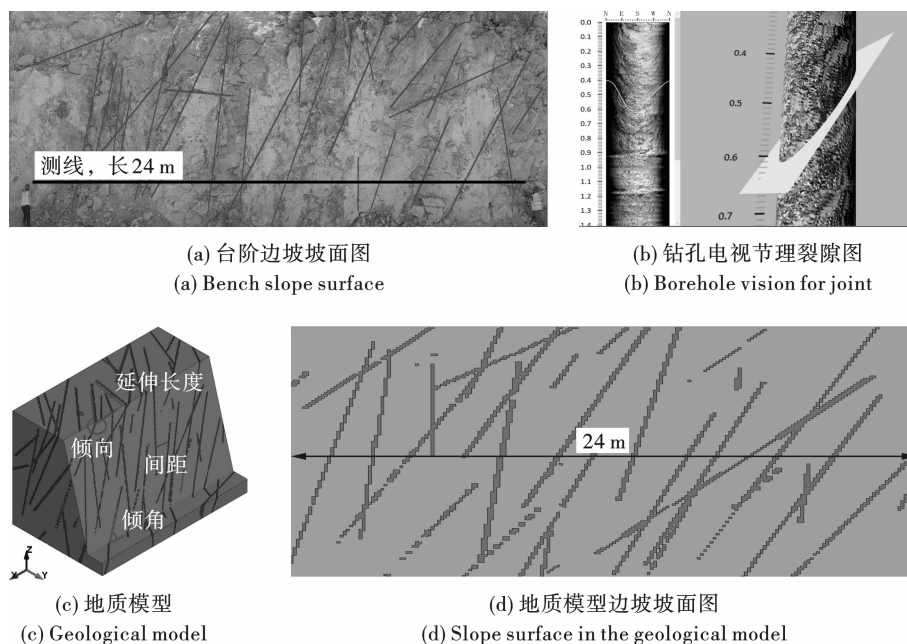


图3 含节理裂隙分布地质模型图

Fig. 3 Illustration of joint distribution and geological model

### 2.3 精细化节理裂隙岩体地质模型

按照节理裂隙倾向、倾角、间距、延伸长度分布函数将地质模型进行解析重组, 得到节理裂隙岩体精细化地质模型(图 3c), 地质模型尺寸为  $24 \text{ m} \times 13 \text{ m} \times 13.5 \text{ m}$ ; 图 3(a) 为实际台阶边坡坡面, 测线长度 24 m, 台阶坡面出露节理裂隙 24 条, 节理裂隙

密度为 1 ~ 2 条/m, 图 3(d) 为地质模型台阶坡面, 地质模型含 68 条节理裂隙, 坡面上出露节理裂隙 27 条, 节理裂隙密度为 1 ~ 2 条/m。台阶坡面与地质模型坡面均存在多条相互平行、交叉的节理裂隙, 两者在数量、节理裂隙密度、分布形式等特征上接近; 将测线法及解析重组法得到的节理裂隙产状信

息绘制成等值线云图(图 4a、b),两者节理裂隙的优势倾角、倾向以及分布的离散性接近。绘制重影对比图(如图 4c),投影面积重叠率为 87.2%。

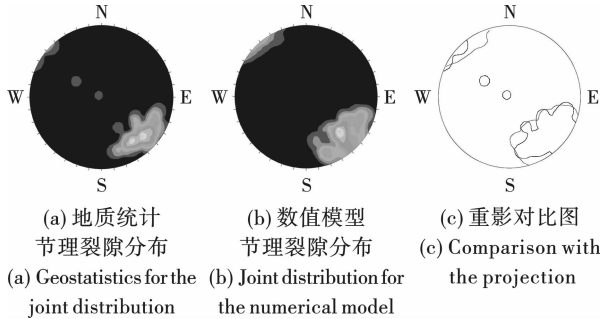


图 4 节理裂隙分布图

Fig. 4 Distribution of the joints

### 3 基于精细化裂隙岩体模型的爆破数值模拟

#### 3.1 裂隙岩体爆破数值模型

##### 3.1.1 爆破数值模型

结合矿山现场,在地质模型外围增加厚 20 m 的岩体,模拟半无限岩体中的爆破条件。在地质模型中构建单排三个垂直孔,钻孔直径 110 mm,孔距为 4.3 m,台阶高度 12 m,钻孔超深 1.5 m,装药长度 10.5 m,堵塞长度 3 m,底盘抵抗线 5.3 m,逐孔起爆,数值模型单元网格尺寸为 100 mm,台阶爆破模型如图 5 所示。设立不加载节理裂隙的完整岩体和优势倾角为 75° 的节理岩体两个工况,节理岩体的台阶坡面节理裂隙分布如图 3(d) 所示,台阶横截面节理裂隙分布如图 6 所示。通过不同截面的损伤分布对比,研究节理裂隙分布对爆破损伤扩展规律的影响,a ~ h 为截面。截面的布置如图 5 所示。

#### 3.1.2 材料本构模型

岩体选用 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 本构模型<sup>[18]</sup>,其基本物理力学参数由试验所得。炸药为膨化硝酸铵炸药,采用 Jones-Wilkens-Lee (JWL) 状态方程描述。节理裂隙采用 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 材料本构模型<sup>[7,19]</sup>,本构模型及材料参数如表 1 所示。

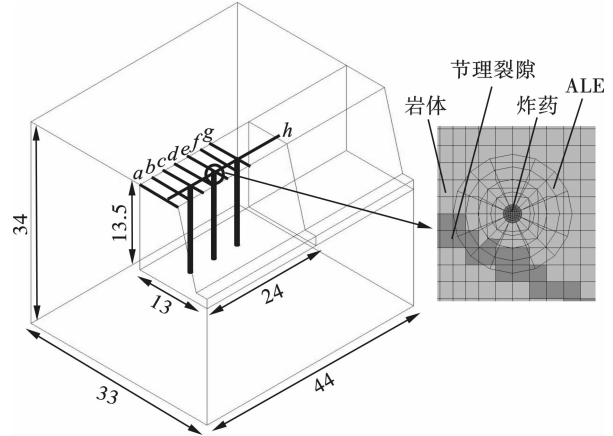


图 5 爆破数值模型(单位:m)

Fig. 5 Numerical model for blasting(unit:m)

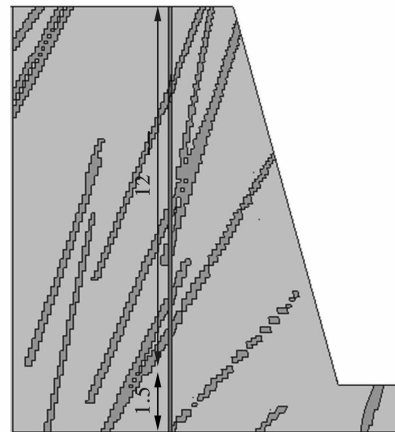


图 6 节理裂隙分布(单位:m)

Fig. 6 Distribution of the joints(unit:m)

表 1 材料本构模型参数

Table 1 Parameters in Lagrange elements

RHT 本构模型	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$f_c / \text{MPa}$	$G / \text{GPa}$	$f_T^*$	$f_s^*$	$\beta_c$	$\beta_t$
	2730	88.81	27.77	0.0518	0.083	0.032	0.036
膨化硝酸铵炸药本构模型	931	$D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$P_{CJ} / \text{GPa}$	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$
		3200	5.9	49.4	1.89	3.9	1.11
节理裂隙本构模型	1800	$E_0 / \text{GPa}$	$\mu$	$\sigma / \text{GPa}$	$E_{tan} / \text{MPa}$	$\beta$	
		28	0.241	0.25	0.025	0.5	

#### 3.2 数值模拟结果及分析

从不同截面的损伤分布图(图 7a、b)对比可知,钻孔轴线损伤范围平均长度为 15.53 m,损伤轮廓

线较规整,大致与台阶坡面平行;节理岩体的损伤范围平均长度为 16.36 m,但是损伤轮廓线不规则。在台阶表面,节理岩体的损伤分布更为密集,损伤带

分割成的块体大小更均匀。在岩体内部, 节理裂隙岩体爆破过程中钻孔周边损伤破碎圈范围减小, 完整岩体中损伤破碎圈直径为 2.73 m, 约为钻孔直径的 25 倍; 节理岩体损伤破碎圈直径为 1.85 m, 约为钻孔直径的 17 倍, 缩小了 32.2%。从截面 b、d、f 的对比可知, 在节理裂隙表面产生明显的损伤增大, 局部破碎效果增强; 同时, 在节理裂隙面两侧的损伤分布密度存在较大的落差, 一侧为片状分布的损伤区

域, 另一侧则是带状分布的损伤区域。完整岩体的损伤分布以钻孔为中心, 损伤分布密度随着距钻孔的距离增大而逐渐减小, 由片状的损伤分布逐渐变成带状损伤分布, 即损伤后的岩体由破碎的小块逐渐向大块变化, 粒径逐渐增大; 而节理岩体的损伤分布较为离散, 钻孔周边压缩损伤范围减小, 岩体损伤分布范围增大, 整体的损伤呈现片状与带状交织分布的规律, 即损伤后的岩体大块与小块交错分布。

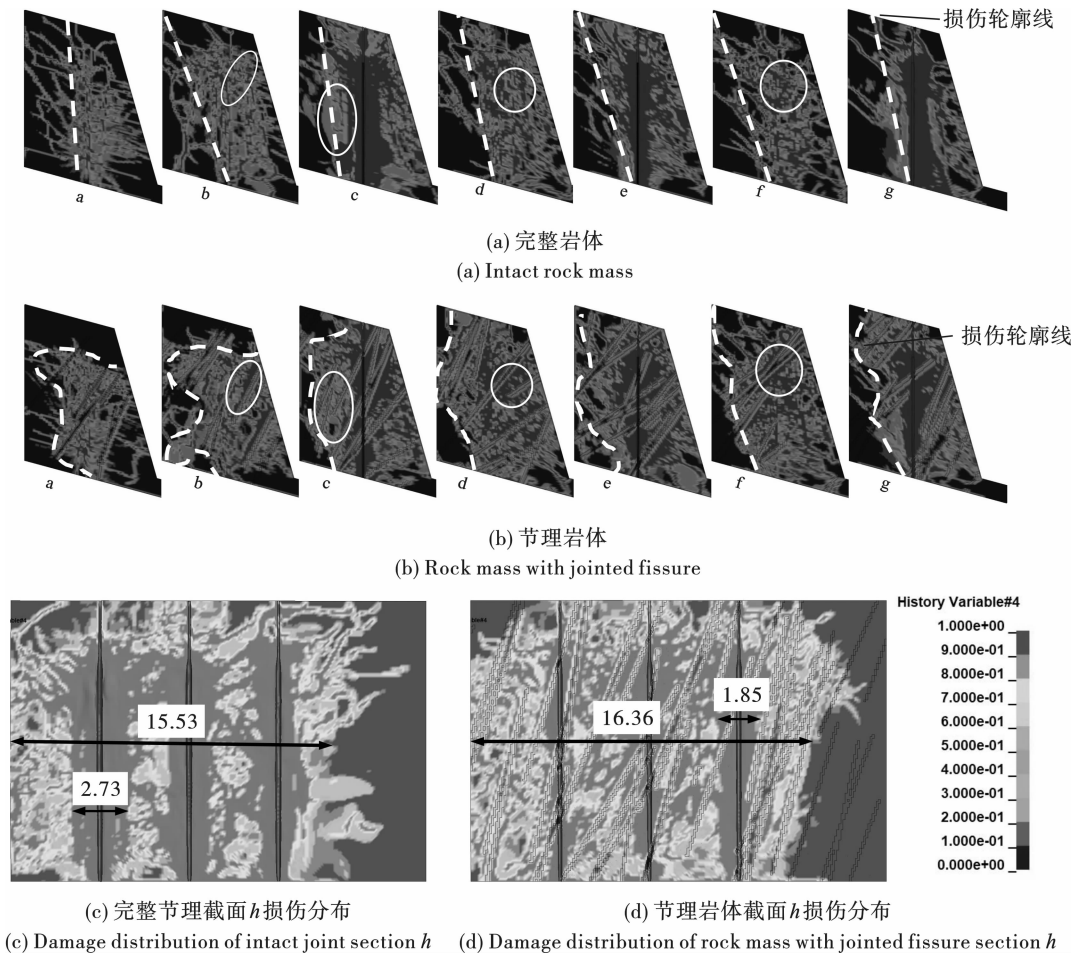


图 7 损伤分布云图(单位:m)

Fig. 7 Blast-induced damage cloud(unit:m)

Chang-ping Yi 进行爆破数值模拟块度统计分析时<sup>[20]</sup>, 将岩体划分为破碎岩体和未破碎岩体, 当岩体损伤值  $D \geq 0.6$  时, 岩体完全破碎, 破碎岩体产生的块体其粒径小于数值模拟中的单元网格尺寸。数值模型的单元网格尺寸为 100 mm, 即可用损伤 ( $D \geq 0.6$ ) 体积占比来表述爆破后粒径处于 0 ~ 100 mm 的体积占比。以损伤轮廓线、台阶轮廓线为界进行爆破体积统计, 完整岩体和节理岩体的爆破体积分别为 1193.01 m<sup>3</sup>、1336.61 m<sup>3</sup>, 损伤 ( $D \geq 0.6$ ) 体积分别为 526 m<sup>3</sup> 和 481 m<sup>3</sup>, 得到整个爆破区域碎块粒径处于 0 ~ 100 mm 的占比分别为

44.09%、35.98%。节理岩体爆破时, 爆破体积增加了 12.04%, 而 0 ~ 100 mm 的碎块占比完整岩体降低了 8.11%。

#### 4 裂隙岩体爆破试验

在矿山 1775 平台进行爆破试验, 台阶坡面倾角 75°, 台阶高度 12 m, 节理裂隙分布规律如 2 - (2) 节所述。采用垂直孔爆破方案, 钻孔直径 110 mm, 孔距、排距为 4.8 m × 4.1 m, 逐孔起爆方案, 孔间延期 50 ms, 排间延期 110 ms。爆破效果如图 8 所示, 爆堆表面块度分布较为均匀, 块度适中; 而爆堆内部

出现局部破碎效果增强,形成较多细小块体,同时在细小块体周围出现明显大块。表明,节理岩体爆破过程中,节理裂隙面两侧的破碎效果存在较大的落差。采用两个直径 18.5 cm 的皮球进行尺寸标定,通过 Split-Desktop 软件获得爆堆粒径分布,如表 2 所示,粒径在 0 ~ 100 mm 之间的碎块占比为 37.68%。

对比现场爆破试验和数值模拟结果可知,损伤分布规律与爆破块度分布规律非常接近。根据数值模拟损伤分析,统计得到的 0 ~ 100 mm 的块体占比

为 35.98%,与现场爆破试验得到 0 ~ 100 mm 的块体占比为 37.68%相比,误差为 4.16%。

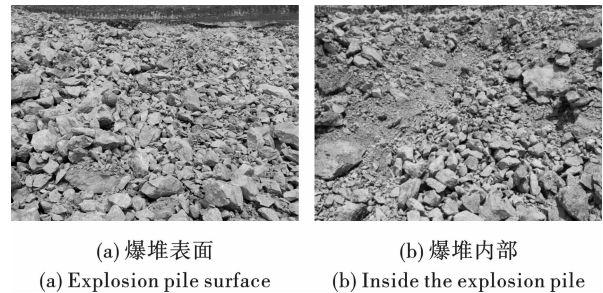


图 8 台阶爆破爆堆

Fig. 8 Bench blasting fragmentation Distribution

表 2 块度统计

Table 2 Block Size Statistics

粒径/mm	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 600	600 以上
占比/%	7.51	7.22	6.25	6.17	10.53	18.01	11.77	14.87	17.67

## 5 结论

(1)通过采样得到的节理裂隙分布特征与解析重组法构建地质模型时得到的节理裂隙分布特征进行对比,二者倾向、倾角、间距、坡面出露节理裂隙条数、分布形式等特征接近,节理裂隙分布等值线云图面积重叠率达到 87.2%。解析重组法生成的节理裂隙三维模型接近实际,操作方法可行、简便。

(2)节理裂隙面对岩体损伤破坏存在引导、控制作用,与完整岩体相比,爆破体积提高了 12.04%,爆堆粒径处于 0 ~ 100 mm 的占比降低了 8.11%。与现场爆破破碎效果相比,爆破模拟损伤分析得到粒径 0 ~ 100 mm 的占比误差为 4.16%。解析重组法构建的三维节理裂隙数值模拟结果接近实际。

### 参考文献 (References)

[1] 杨超,蒋溟南,岳六一,等.法向卸荷条件下非贯通节理岩体剪切力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(9):1741-1750,11.

[1] YANG Chao, JIANG Hao-nan, YUE Liu-yi, et al. Shear mechanical properties of rock mass with discontinuous joints under unloading normal stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(9): 1741-1750, 11. (in Chinese)

[2] 李地元,韩震宇,孙小磊,等.含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2872-2883.

[2] LI Di-yuan, HAN Zhen-yu, SUN Xiao-lei, et al. Character-

istics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2872-2883. (in Chinese)

[3] 王卫华,李坤,王小金,等. SHPB 加载下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性[J].科技导报,2016,34(18):246-250.

[3] WANG Wei-hua, LI Kun, WANG Xiao-jin, et al. Mechanical properties of rock like specimens with different Inclined fractures under SHPB loading[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 246-250. (in Chinese)

[4] 宋杰,孟凡震,岳祝凤,等.节理裂隙岩体力学特性的研究进展[J].青岛理工大学学报,2021,42(5):140-150,154.

[4] SONG Jie, MENG Fan-zhen, YUE Zhu-feng, et al. Research progress in mechanical properties of jointed and fractured rock mass[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(5): 140-150, 154. (in Chinese)

[5] 金李,卢文波,陈明,等.节理岩体的爆破松动机理[J].爆炸与冲击,2009,29(5):474-480.

[5] JIN Li, LU Wen-po, CHEN Ming, et al. Blasting loosening mechanism of jointed rock mass[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 474-480. (in Chinese)

[6] 马小满,陈明,严鹏,等.爆破作用下节理岩体应变能变化规律及影响研究[J].爆破,2018,35(3):1-6,67.

[6] MA Xiao-man, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on strain energy processes and influence on jointed rock mass under blasting excavation[J]. Blasting, 2018, 35(3): 1-

- 6,67. (in Chinese)
- [7] 周文海,胡才智,包娟,等. 含节理岩体爆破过程中应力波传播与裂纹扩展的数值研究[J]. 力学学报, 2022,54(9):2501-2512.
- [7] ZHOU Wen-hai, HU Cai-zhi, BAO Juan, et al. Numerical study on crack propagation and stress wave propagation during blasting of rock mass[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(9):2501-2512. (in Chinese)
- [8] 叶海旺,王皓永,雷涛,等. 基于孔间延时优化的骨料用石灰岩爆破粉矿率控制[J]. 爆破, 2019, 36(4):43-48, 68.
- [8] YE Hai-wang, WANG Hao-yong, LEI Tao, et al. Rock fragmentation distribution control of limestone blasting for aggregate based on optimization of delay time between blasting hole[J]. Blasting, 2019, 36(4):43-48, 68. (in Chinese)
- [9] 王建超,梁卫龙. 老龙山石灰岩矿深孔爆破参数优化试验[J]. 爆破, 2022, 39(4):80-84, 99.
- [9] WU Li-hui, LI Hong-Wei, YANG Sai-Qun, et al. Experimental study on influence of weak interlayer on rock blasting crack propagation[J]. Blasting, 2022, 39(4):80-84, 99. (in Chinese)
- [10] WANG Z L, KONIETZKY H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(12):1945-1955.
- [11] 唐海,马谕杰,夏祥,等. 不同位置爆源作用下硐室围岩损伤规律的数值模拟研究[J/OL]. 爆破:1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20221115.1531.020.html>.
- [11] TANG Hai, MA Yu-jie, XIA Xiang, et al. Numerical simulation study on damage law of chamber surrounding rock under different blasting sources[J/OL]. Blasting:1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20221115.1531.020.html>. (in Chinese)
- [12] 汤云坤. 充填节理岩体中应力波传播特性的颗粒流离散元数值模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [12] TANG Yun-kun. Numerical simulation of stress wave propagation characteristics in filled jointed rock masses by particle flow discrete element method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [13] 高启栋,卢文波,冷振东,等. 岩石爆破中孔内起爆位置对爆炸能量传输的调控作用研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11):2050-2058.
- [13] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, LENG Zhen-dong, et al. Regulating effect of detonator location in blast-holes on transmission of explosion energy in rock blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11):2050-2058. (in Chinese)
- [14] 赵萌,唐辉明,詹红兵,等. 求解岩体裂隙产状三维概率分布的数值方法[J]. 地球科学, 2022, 47(4):1470-1482.
- [14] ZHAO Meng, TANG Hui-ming, ZHAN Hong-bing, et al. A Numerical method for solving the three-dimensional probability distribution of rock mass fracture orientations[J]. Earth Science, 2022, 47(4):1470-1482. (in Chinese)
- [15] OLIVIER Fouché, JEAN Diebol. Describing the geometry of 3d fracture systems by correcting for linear sampling bias[J]. Mathematical Geology, 2004, Vol. 36(1):33-63.
- [16] 梅涛,杨春和,王贵宾,等. 岩体节理大小估算新方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2):3503-3508.
- [16] MEI Tao, YANG Chun-he, WANG Gui-bin, et al. A new method for estimating rock joint size[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2008(S2):3503-3508. (in Chinese)
- [17] 汪进超,王川婴,唐新建,等. 王益腾. 基于钻孔摄像技术的岩体节理大小估算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(9):2701-2707.
- [17] WANG Jin-chao, WANG Chuan-ying, TANG Xin-jian, et al. A method for estimating rock mass joint size using borehole camera technique[J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(9):2701-2707. (in Chinese)
- [18] HUO, Xiao-feng, SHI, Xiu-zhi, QIU, Xian-yang, et al. A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2022, Vol. 123:1-15.
- [19] 袁尔君. 灰岩矿台阶爆破孔间延时效对粉矿率影响及应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2020.
- [19] YUAN Er-jun. Influence of delay time between holes interval of limestone mine bench blasting on ore powder rate and its application[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] YI Chang-ping, SJÖBERG Jonny, JOHANSSON Daniel. Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2017, Vol. 68(1):167-173.