

DOI: 10.11779/CJGE20230410

岩体结构面对爆破块度的影响机制研究

胡英国^{1,2}, 饶宇^{*1,2}, 柴朝政³, 吴新霞^{1,2}, 杨招伟^{1,2}, 周先平^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430071; 2. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国三峡建工(集团)有限公司, 北京 100008)

摘要: 结构面对爆破块度形成的影响一直是爆破工程中的热点问题, 与工程的长期运行安全和经济效益关系密切。首先基于玉龙喀什水利枢纽开展级配料爆破原位试验, 通过对比岩体天然块度与爆破块度的对应关系研究了结构面对爆破块度形成的影响特性, 结果表明对于 5 mm 以下的小粒径块度, 爆破荷载与岩石本身的动抗压强度起主要作用; 对于中大粒径块度, 应力波的扰动和结构面对原始岩体的切割是最重要的影响因素, 试验结果表明结构面对级配形成影响具有明显的分区特性; 进而采用 LS-DYNA 的二次开发技术开展爆破块度数值仿真, 结果表明由于粉碎区的冲击波峰值大, 结构面对小粒径块度的形成影响并不明显, 但结构面的存在改变了应力波传播过程, 对于中大粒径块度则有明显影响; 数值仿真与原位试验相互印证。最后在传统的 KUZ-RAM 模型基础上, 引入修正的小粒径级配预测方法, 采用自学习的方式修正岩体参数项, 提出了基于分区机制的岩体爆破块度预测模型, 结合工程数据与已有的爆破块度预测模型进行验证, 结果表明本文所提的爆破级配分区预测模型在预测精度方面有所提高。

关键词: 岩体; 爆破; 结构面; 块度; 分区; 模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)09-1870-10

作者简介: 胡英国(1987—), 男, 2015年毕业于武汉大学水工结构工程专业, 现为正高级工程师, 主要从事与岩石爆破相关的岩石动力学方面的研究工作。E-mail: huyingguo@mail.crsri.cn。

Influence mechanism of rock joints on blasting fragmentation

HU Yingguo^{1,2}, RAO Yu^{1,2}, CHAI Chaozheng³, WU Xinxia^{1,2}, YANG Zhaowei^{1,2}, ZHOU Xianping^{1,2}

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Ministry of Water Resources, Wuhan 430071, China; 3. China Three Gorge Construction Engineering Corporation, Beijing 100008, China)

Abstract: The influences of rock joints on the formation of blasting fragmentation have always been a hot issue in blasting engineering, which is one of the most important factors affecting the construction efficiency and long-term operation safety. Based on the explosion tests on the graded materials of Yulongkashi Water Conservancy Project, the influences of rock joints on the formation of blasting fragmentation are studied. The test results show that the fragmentation with rock particle size below 5 mm is mainly formed by the blasting loads and dynamic compressive strength but rarely by the rock joints. However, the influences of the rock joints on the fragmentation rock particle size above 5 mm are significant, which is reflected in the partition characteristics for the formation of rock blasting fragmentation. Further, the numerical simulation of rock blasting fragmentation is carried out by using the LS-DYNA secondary development technology, and the mechanical mechanism of the rock joints on rock blasting fragmentation is analyzed. The results show that the rock joints greatly affect the stress wave propagation in the fracture zone but produce a small effect on the formation of the fragmentation with small rock particle size, which is verified by the test results. Based on the dual influences of rock blasting fragmentation and rock joints, a partition prediction model for the rock blasting fragmentation is proposed. The rock blast fragmentation for many test samples is predicted by the proposed model and the existing models. By comparing the predicted results, it is found that the proposed model has a higher accuracy in predicting rock blasting fragmentation.

Key words: rock; blasting; joint; fragmentation; partition; model

0 引言

爆破开挖是水利水电工程、铁道、市政等基础工

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279093, 52079009); 中央科研业务费项目(CKSF2019477/YT, CKSF2019193/YT)

收稿日期: 2023-05-10

*通信作者(E-mail: raoyu@mail.crsri.cn)

程建设的重要环节,也是矿产资源开采的重要手段。基于中国水电强国战略的实施以及未来国家对深部资源开发、矿业安全领域的重大需求,新时期工程爆破技术面临更高的要求和挑战。其中,科学的利用炸药爆炸能量有效的破碎岩体形成适宜的爆破块度是关键技术问题之一^[1]。爆破块度分布是反映爆破开采效果好坏的主要指标,它不但直接影响后续作业工序如装载、运输、溜井放矿等设备生产效率和设备磨损,涉及其作业成本;而且在水电工程堆石坝建设中,开采的级配料合格与否直接关系到大坝的填筑质量和坝体运行期的安全^[2-5],需引起足够重视。

爆破块度预测模型是分析爆破块度的最重要工具之一。已有的爆破块度模型可分理论模型和经验模型两大类。理论模型主要以 BCM (bedded crack model) 和 NAG-FRAG Model 等模型为代表,其建立的主要基础是岩体爆破破碎机理和裂纹扩展的力学行为^[6-8]。经验模型主要以 KUZ-RAM 模型和 HARRIES 等模型为代表,其主要的方式为建立爆破特征块度与爆破参数的对应关系,并通过引入相关参数来修正块度的分布结果,使其预测的精确度更高^[9-10]。近年来,关于爆破块度的研究深度和研究方法方面,研究者们开展了多元化的探索。武仁杰等^[11]建立了基于统计分级判别的爆破块度预测模型,吴发名等^[12]提出了基于原生节理统计和爆破裂纹模拟的堆石料块度分布预测方法,王仁超等^[13]提出一种基于双隐含层 LM 算法的神经网络模型预测爆破块度尺寸的方法,周继国等^[14]提出了一种基于最小抵抗线对岩石破碎块度影响的能量分析方法。

关于岩体结构面对爆破块度影响的研究一直是热点和难点。Paine 等^[15]认为:节理面的存在对爆破效果的影响超过了岩石物理力学性质的影响。Shockey 等^[16]基于裂纹的密集度和扩展情况以及破碎程度研究提出了 NAG-FRAG 模型。Rossmanith 等^[17]指出爆破时裂隙的形成和扩展由节理不连续面所控制。张继春^[18]提出了考虑工程岩体的尺寸效应来建立块度模型的观点。郭文章等^[19]分析了岩体节理存在对块度分布的影响。Aler 等^[20]将岩体分级参数引入块度模型中,讨论了块度破碎指数表征爆破效果可能性。

已有的块度预测研究在爆破块度预测的精确性方面已取得一定的发展,但由于岩体结构本身的复杂性,考虑结构面对爆破块度影响的认识仍停留在定性层面。在考虑结构面的影响下,计算爆破块度的分布特征要取得理论解十分困难,因此本文首先通过开展现场试验,研究爆破块度与岩体天然切割块度的对应关系,然后分析结构面对爆破块度分布特征的影响规律,进而采用数值仿真方法研究不同爆心距结构面对应力

波与爆破块度的影响特性,揭示结构面对爆破块度形成的影响力学机理;最后建立改进的爆破块度预测模型,为工程中块度控制和参数优化提供参考。

1 结构面对爆破块度分布特性的试验研究

此次研究从岩体中结构面的三维裂隙分布网络出发,确定爆破前结构面切割岩体形成初始块度的分布特征,同时对爆破后的块度分布特征进行筛分确定,通过爆破前后岩体块度分布的对比,达到揭示结构面对爆破块度形成影响特征的目的。

1.1 试验设计

试验在新疆玉龙喀什水利枢纽开展,该枢纽位于和田河支流玉龙喀什河中游河段上,是玉龙喀什河山区河段的控制性水利枢纽工程,其最大坝高 230.5 m。工程区规划的级配料开采主要在 P#1 料场,岩体岩性以花岗闪长岩、花岗岩、英云闪长斑岩为主。工程地质勘探资料显示,料场不同部位的岩体质量分级差异较大,这为选取结构面分布条件不同的区域开展对比试验提供了便利,试验区的分布如图 1 所示。

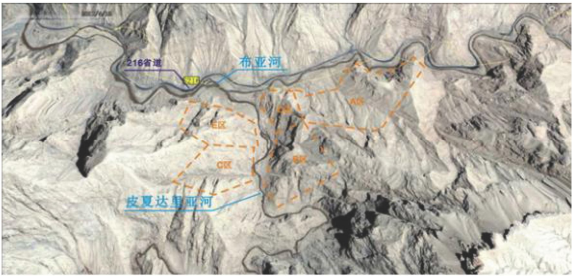


图 1 试验场地的分区情况

Fig. 1 Zoning of test site

为探究结构面对爆破块度的影响特性,开展了 5 组对比试验。由于试验区的岩体各向异性很强,通过采用较为精细的岩体地质勘测测试手段,对岩体进行较为详细的分类,以获得比较理想的试验结果。在试验中,爆破参数、施工机械以及其他操作方式尽量保持相同。表 1 列出了现场爆破专项试验的部分参数。

表 1 现场爆破专项试验的部分参数

Table 1 Parameters of blasting fragmentation tests

试验序号	岩体体积节理数	孔距/m	排距/m	孔深/m	堵塞长度/m	钻孔角度/(°)	筛分方法
1	<3	4	3	10	2.5	90	人工
2	3~10	4	3	10	2.5	90	人工
3	10~20	4	3	10	2.5	90	人工
4	3~10	4	3	10	2.5	90	人工
5	10~20	4	3	10	2.5	90	人工

试验中采用采用的钻机为志高掘进 ZGYX420III, 钻孔直径 90 mm。采用 Φ80 乳化炸药连续装药,堵塞

1.0 m。主爆孔均为垂直钻孔,采用电子雷管起爆网路,试验区采用数码雷管间隔 17 ms 等间隔顺序起爆,爆破单耗为 0.8~1.0 kg/m³, 单次爆破总方量为 3000 m³ 左右, 部分爆破试验后的爆堆如图 2 所示。



图 2 部分试验爆堆照片

Fig. 2 Photos of partial test explosions

1.2 天然块度和爆破块度的确定

(1) 岩体天然块度的确定

由于研究过程中需比较天然块度与爆破块度的对应关系, 因此首先要确定天然块度的分布特征。基于块度理论的发展, 石根华^[21]、邬爱清^[22]通过对结构面的产状、长度、间距等的地质统计分析, 将基于岩石力学规律的特定数学算法用计算机语言实现, 并模拟生成结构面随机网络等方面做了比较系统的研究。参考已有的研究成果, 此次研究中结构面切割岩体形成初始块度的具体方法如图 3 所示。

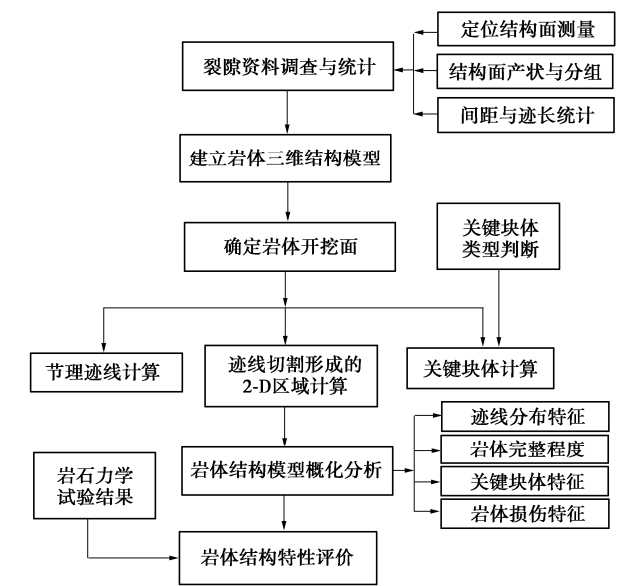


图 3 岩体中三维裂隙网络的计算路线

Fig. 3 Calculation route of 3D fracture network in rock mass

对于已建立的节理岩体三维区域模型, 为在三维岩体开挖面上进行结构面迹线计算及结构面网络搜索分析, 需进行主要的计算步骤有: ①岩体中结构面一般假定为圆盘形或椭圆形, 对任意给定的岩体开挖区域, 计算和判断位于该有界区域内的节理迹线; ②对任意给定开挖面, 为分析迹线切割形成的块体特征, 需建立开挖面上迹线上、下半平面和相应结构面上、下半空间对应关系, 即每条迹线应能表示所在结构面的三维信息; ③为对三维结构面迹线进行网络搜索, 需建立相应的排列规则, 使得在三维条件下, 对与某交点相连的各迹线交点实现有序排列; ④一般形状闭合区域面积及块体(凸形及凹形体)体积计算。

试验区域台阶表面的节理裂隙的采集主体采用基于 ShapeMetriX3D 岩体裂隙网络概化系统完成。以试验中的一个台阶为例, 这里给出计算天然块度需要的几何参数, 利用图 3 的三维网络模拟方法, 对相应岩体开挖面上岩体天然块度特征进行模拟和分析。表 2 为#2 试验区统计得出的岩体结构面参数值, 边坡高度 10 m, 岩体开挖面选取试验区域两个台阶的开挖范围, 岩体三维裂隙网络的模拟尺寸范围为 50 m×50 m×50 m。

表 2 岩体结构面参数

Table 2 Parameters of rock joints

统计 区段	分 组	倾向/ (°)	倾角/ (°)	间距/ m	迹长/ m
①	NEE/NW	332	75	1.24	1.57
	NNE/NW	290	70	1.91	2.63
	NNE/SE	116	62	1.79	2.98
	NNW/SW	256	70	2.45	3.65
②	NWW/NE	19	67	1.91	2.93
	NEE/NW	345	74	1.58	3.66
	NNW/NE	71	63	0.93	4.18
	NNE/NW	290	68	2.50	5.04

基于上述计算程序, 边坡开挖面上节理迹线三维展布图、迹线连通网络图如图 4 所示。

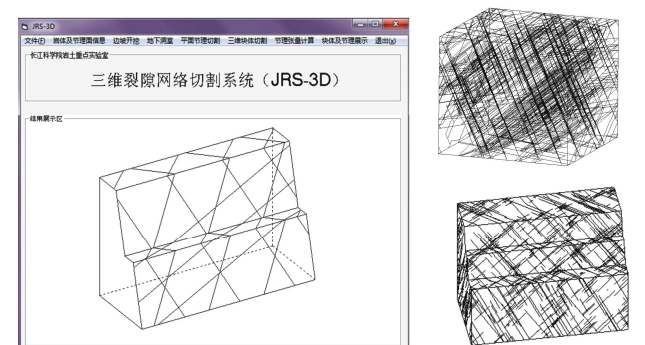


图 4 原生结构面切割岩体形成天然块度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of natural fragmentation shaped by original joints cutting through rock mass

(2) 爆破块度筛分方法

目前爆破块度的筛分有包括人工筛分、机械筛分以及图像处理方法。考虑现场的操作条件，试验中爆破块度的方法为人工筛分，为此试验过程中制备了不同粒径的筛子，开展细致的人工筛分试验（如图 5 所示），以保证试验结果的准确性。



图 5 试验中筛分工具和筛分现场

Fig. 5 Tools and site condition in screening tests

已有的工程实践表明，人工筛分是当前堆石坝级配料最准确的筛分方法。除了制定精细的筛分工具以外，还确定了较为合理的取料方法，选择爆堆的前缘、中心、后缘 3 个断面，在断面上分左、中、右侧，同时分上、中、下部，以确保取样的代表性。

1.3 试验结果分析

基于上述试验设计与块度确定方法，不同试验区的爆破后块度分布曲线如图 6 所示。

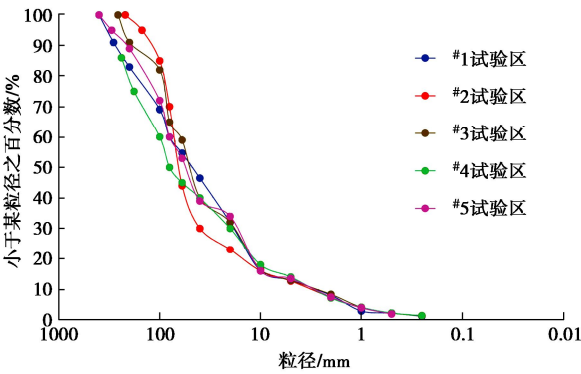


图 6 不同试验区的岩体爆破级配筛分曲线

Fig. 6 Screening curves of blasting gradation of rock mass in different test regions

从图 6 可以看出，采用相同爆破参数、不同地质条件下的爆破级配曲线分布存在明显的特点，主要体现在两个方面：其一，总体的分布是离散的，尤其在中大粒径块度部分，不同试验工况条件下的粒径分布并无统一的相关性规律；其二，局部的分布具有统一性，体现在 5 mm 以下小粒径块度方面，在不同地质条件下，采用相同的爆破参数时，小粒径块度的分布基本相同。为了进一步详细对比不同粒径范围内的分

布规律，下文将小粒径块度与中大粒径块度进行分类研究，需要说明的是由于堆石坝级配料块度要求中 5 mm 是一个重要的特征尺寸，因此，下文将以 5 mm 为边界进行分析。

(1) 5 mm 以下粒径的结果分析

堆石坝对粒径小于 5 mm 以下的级配占比要求非常严格，针对地质条件分布迥异的 5 个试验区，在同样采用如表 1 所示的爆破参数时，比较小粒径级配分布的差异，其结果如图 7 所示。

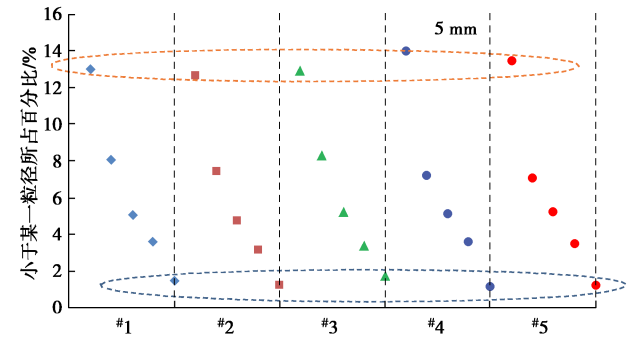


图 7 小粒径块度对比分析示意图

Fig. 7 Illustration of comparative analysis of blasting fragmentation with small particle sizes

结果表明，0.075~5 mm 区间的级配料在不同试验区内的粒径分布非常接近，并未因结构面的存在，导致其规律的改变。从量值角度，在不同地质条件区域，小粒径块度所占的百分比非常接近，基本在一条直线上下微小浮动。由此可以得出，在相同的爆破参数条件下，结构面的分布作为主要变量，其对 5 mm 以下的小粒径块度并未造成明显的影响。

(2) 中大级配料分布特性

对于中大级配料，同样进行了对比筛选，结果如图 8 所示。

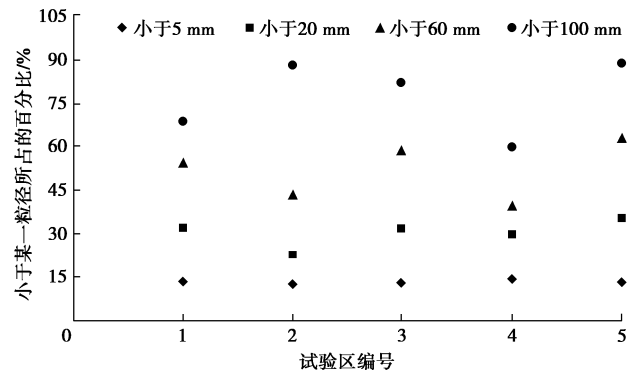


图 8 不同试验区中、大粒径块度对比示意图

Fig. 8 Comprison of fragmentations with large particle sizes

从图 8 可以明显看出，随着粒径的增大，不同地质条件的试验部位筛选得到的粒径范围呈多样性的变

化。如前所述,对于 5 mm 以下粒径,爆破级配料基本呈稳定的直线变化趋势,对于小于 100 mm 的大粒径级配料,不同施工区的变化则非常明显,试验结果印证了对于中大粒径块度的形成,结构面的影响不可忽视,应是爆炸荷载与结构面共同作用的结果。

(3) 爆破块度与天然块度的关系

将岩体结构面切割形成的块度定义为天然块度,并绘制爆前爆后对应的块度分布曲线,如图 9 所示。

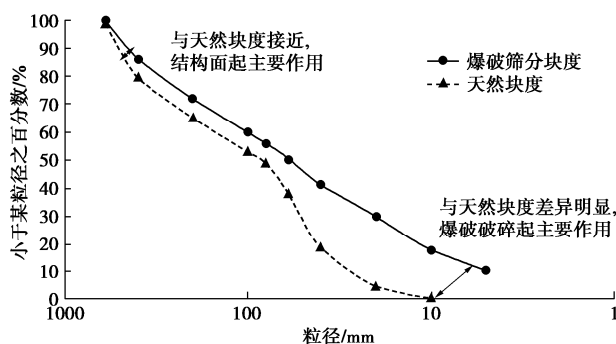


图 9 爆破块度与天然块度的对应关系

Fig. 9 Relationship between blasting and natural fragmentation

图 9 表明,爆破块度与天然块度存在着明显的分区关系。对于中大粒径块度区域,天然块度与爆破块度具有很好的一致性,这表明天然块度很大程度上影响了大粒径块度的分布。从力学机理上解释,当应力波衰减到一定程度,裂纹只能从原生结构面的边界进行扩展,原生结构面切割形成的闭合块体在爆破应力波作用下很容易脱离母岩,形成大块,因此,爆破产生的大粒径块度应该是爆炸荷载与结构面共同作用的结果。

另一方面,从小于 5 mm 粒径块度的范围内,天然块度与最终爆破块度的分布差异明显。该粒径范围的爆破块度可以近似等同于岩体粉碎区的形成。随着炸药起爆,气体高速膨胀对邻近的岩体介质产生极大的冲击压缩从而使岩体中形成冲击波,其压力远高于岩体的动抗压强度,使药包附近的岩体被压碎形成粉碎区。在冲击波作用的区域,岩体处于极高的三向压应力状态下,岩体本身的动抗压强度决定了粉碎区的范围,结构面的存在产生的二次反射等力学过程可能未来得及产生岩体即被粉碎,因此结构面对岩体小粒径块度的分布影响并不明显。这里需要强调的是岩体的小粒径块度范围是由爆炸荷载与岩体动抗压强度联合确定的,与岩石本身的强度关联密切。

2 结构面对爆破块度影响的分区力学特性

本节将根据应力波在岩体中传播的基本理论,进

行简单的数学推导,分析爆破应力波峰值的衰减特征。进而基于 LS-DYNA 的爆破块度数值仿真,进一步验证分析结构面对爆破块度形成影响的力学机制。

2.1 爆炸应力波峰值的快速衰减

岩体爆破块度形成的力学机制是爆炸应力波与岩体介质及赋存结构面的相互作用。因此,要揭示结构面对爆破块度影响的内在机理,首先应分析爆破块度形成过程中应力波的衰减特征。炸药作用在炮孔孔壁上的初始平均压力可由 C-J 爆轰理论和能量守恒方程确定。炸药初始平均压力 P_e 与炸药密度 ρ_e 、炸药爆速 D 以及炸药的等熵指数 γ 有关,具体表达式见下式:

$$P_e = \frac{\rho_e D^2}{(\gamma + 1)} \quad (1)$$

由于料场开采通常采取耦合装药,炮孔孔壁上的平均压力 $P_0 = P_e/2$ 。假定粉碎区由冲击波作用,冲击波径向峰值 P_t 与爆心距 r 的关系可由下式表示:

$$P_t = P_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: r_0 为炮孔半径;衰减指数 α 与岩体泊松比 μ 有关, $\alpha = 2 + \mu/(1 - \mu)$ 。

以本文中的爆破试验为例,采用 90 mm 的炮孔直径,70 mm 的药卷直径,图 10 给出了此爆破参数条件下花岗岩的应力波随爆心距变化规律。

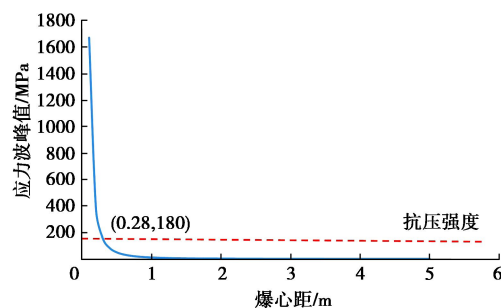


图 10 特定爆破参数花岗岩中应力波的衰减规律

Fig. 10 Attenuation laws of stress wave in granite with specific blasting parameters

从图 10 可以看出,岩体中应力波的衰减速度极快,仅在距离炮孔 0.28 m 的位置,应力波的峰值已经衰减至岩体的抗压强度,这表明爆破荷载直接压碎的岩体范围是极小的。可以认为小粒径块度范围基本等同于爆炸冲击荷载产生的粉碎区。

2.2 结构面对爆破块度影响的数值仿真验证

通过现场试验,往往只能得到最终的爆破块度分布信息,没法精确确定应力场变化特征,因此本节开展 LS-DYNA 的爆破块度数值仿真,模拟结构面处的应力变化特征。计算选取的工况与上文试验相同,选取对称边界进行分析(如图 11(a)所示),采用四周

施加法向约束来考虑群孔作用（如图 11（b）所示）。另一方面,通常实际岩体中结构面分布是杂乱无章的。为了便于得到一般的影响规律,在爆破孔的粉碎区和裂隙区各设置一组互相垂直的节理,图 12 给出了对应的模型示意图。

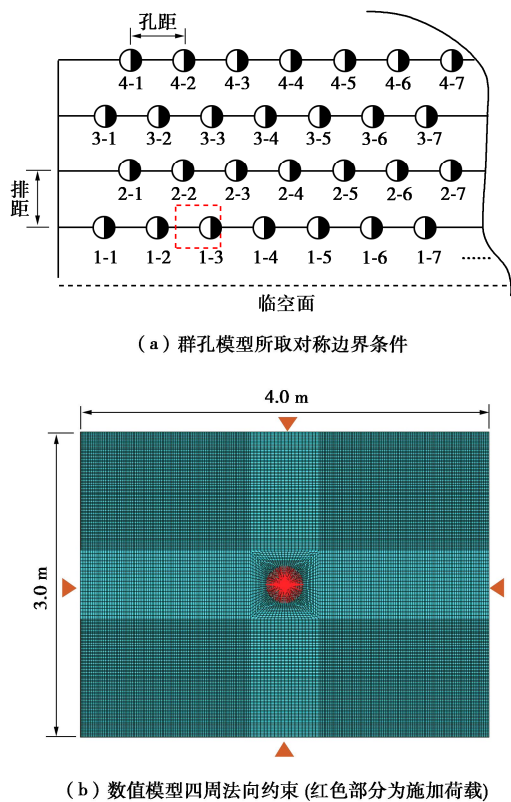


图 11 群孔爆破数值计算模型

Fig. 11 Numerical model for group holes blasting

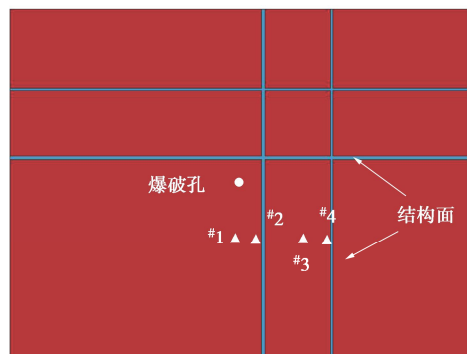


图 12 预设结构面模型

Fig. 12 Model for predetermined joints

在已有数值仿真软件后处理中鲜有爆破块度的选项,因此本文采用基于动力有限元软件 LS-DYNA 的二次开发技术,嵌入爆破块度的计算模型,分析结构面对爆破块度分布特征的影响。需要说明的是,目前并无通用的爆破级配预测模型,本文采用 Grady 等^[6]提出的爆破块度数学模型,将其通过历史变量记录,实现在爆破块度的计算。模型通过建立块度与应变率、

断裂韧度以及时间等多个参数的关系,直观地显示不同粒径的块度分布,其中爆破块度的表征方法为

$$a = \frac{6K_{IC}^2}{D_f E^2 \dot{\epsilon}^2 t_f^2} \quad (3)$$

式中: a 为块度大小; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; K_{IC} 为断裂韧度。表 3 给出了计算中采用的相关岩体力学参数,参数的确定过程是首先基于地质勘测资料进行初选,采用初选参数模拟现场的爆破振动场衰减规律,并根据现场振动实测资料进行进一步校准,得到能够反映爆破地震波衰减的计算参数。

表 3 计算参数

Table 3 Parameters for calculation

密度/ (kg·m ⁻³)	动弹性 模量/ GPa	泊松 比	动抗拉 强度/ MPa	损伤参数 k m	$K_{IC}/$ (MN·m ^{3/2})	损伤 系数 $\lambda/$ (kg·J ⁻¹)
2700	45	0.16	5	2.33×10^{24}	7	1.13 0.0001

采用上述模型进行计算,提取模型中的预测测点的等效应力时程曲线进行比较,结果如图 13 所示。

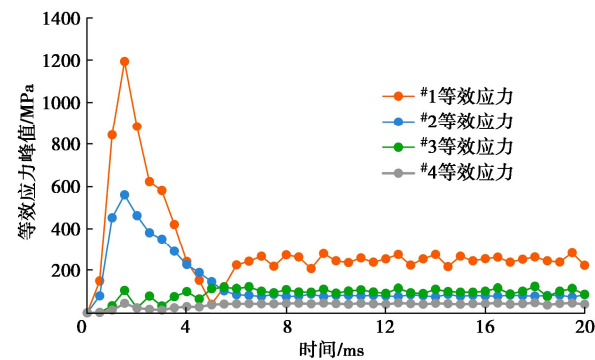


图 13 不同区域等效应力变化对比曲线

Fig. 13 Comparison curves of variation of equivalent stress in different regions

结构面对应力波的传播有明显影响,在结构面的两侧,应力的峰值均有明显下降,符合一般规律。但是,从图 13 中 #1, #2 点的结果对比,可以看出在粉碎区的区域,即便有结构面的干扰,应力波的峰值仍然处在 500 MPa 以上的高峰值,岩体仍然可以被充分破碎为小粒径块度。但是在处于裂隙区的 #3, #4 测点而言,应力波的峰值已衰减至一定量级,在结构面的扰动下,峰值已经在 50~100 MPa 左右,此时应力波可驱动裂纹沿着结构面边界扩展并形成中、大粒径的爆破块度。因此在粉碎区,冲击波峰值虽受结构面的影响,但应力峰值仍处于较高量级;在裂隙区,由于应力波的峰值较低,结构面可以较为明显地影响块度的形成。

采用 LS-DYNA 二次开发技术,可以直接显示爆破块度分布,提取不同级配范围内的分布云图,分别

如图 14, 15 所示。

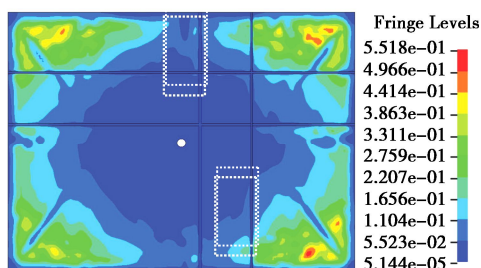


图 14 总体爆破级配分布 (50 cm 以内)

Fig. 14 Overall distribution of blasting gradation

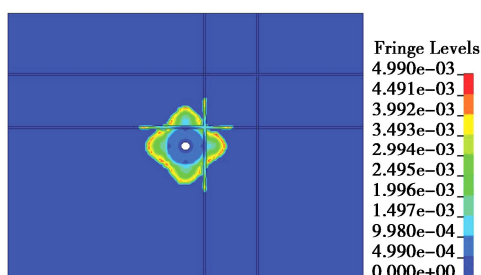


图 15 5 mm 以下小粒径级配分布

Fig. 15 Gradation distribution of small particle size

根据计算结果, 可以从两方面进行分析: 首先从总体的块度分布来看, 中远区的爆破块度等势线在结构面处发生了明显的聚集或散射现象, 这表明结构面对中、大粒径级配的爆破块度的形成具有明显影响; 然后从 5 mm 以下的块度分布来看, 炮孔附近的块度分布由近到远逐渐在增大, 且形状近似环形, 仅仅在结构面部位的软弱岩体有一些小粒径级配分布的延伸, 总体呈现环形, 没有在结构面部位出现散射现象。这表明除去结构面内部软弱岩体影响, 结构面实际对小粒径级配的分布影响不大, 这印证了试验结果。

在上述计算结果的基础上, 如果不考虑结构面的存在, 将原先的结构面单元调整为岩体单元, 进行各向同性计算, 分别统计不同块度范围所占的比例, 将有无结构面条件下块度分布情况进行对比, 见图 16。

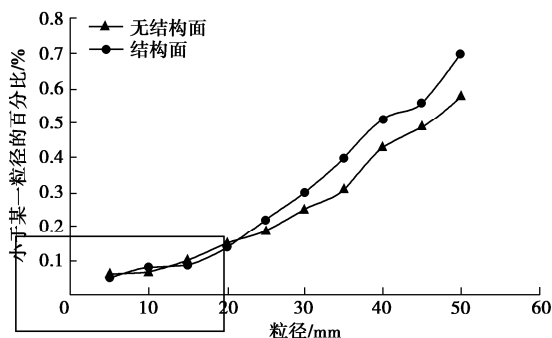


图 16 有无结构面条件下的块度分布情况对比

Fig. 16 Comparison of fragmentation distribution with and without joints

从两种工况对比来看, 在粒径小于 10 mm 范围内, 两者结果十分接近, 说明自然结构面对于小粒径的破碎情况影响不大; 粒径大于 10 mm 以后, 两者差异逐渐变大, 同等粒径时有结构面条件下的比例明显增大, 结构面的影响作用显现。

3 考虑结构面影响的爆破块度分区模型

已有的爆破块度预测模型往往整体对岩体质量进行分级, 引入一个表征岩体的参数来反映岩体性质对爆破块度的影响, 某种意义上而言这在工程上是非常直接且实用的。但是工程实践表明这种整体用一个参数表征的方法很难刻画复杂的岩体结构特征, 常常导致块度控制效果不理想。基于上述试验研究和数值仿真分析结果, 结构面对爆破块度影响具有明显的分区机制, 本节将基于前两节的研究认识上, 提出考虑结构面影响的爆破块度预测模型。

3.1 小粒径块度预测

如果认为小粒径块度是由于岩石受压缩所致, 爆炸冲击波压碎岩体需要满足下式条件:

$$P_i \geq [\sigma_d] \quad (4)$$

式中: P_i 为粉碎区内爆炸冲击波压力; $[\sigma_d]$ 为岩体的动抗压强度。联立式 (2), (4) 可得爆破粉碎区半径表达式:

$$r_c = \left(\frac{P_0}{[\sigma_d]} \right)^{1/\alpha} r_0 \quad (5)$$

由上式可知, 爆破粉碎区的半径与炸药本身的性质、炮孔半径以及岩体动态抗压强度有关系。特别需要说明的是本文所提出的观点中关于结构面对小粒径料的影响不明显主要是针对同一岩性的岩体, 对于不同岩性的岩体, 其动抗压强度是主要的影响指标之一。

由于上式包含诸多假定, 理论计算可能与现场实际筛分不同, 现场筛分时考虑块度的大小, 理论计算仅能算出爆破粉碎区半径理论解, 并不能对粉碎区内岩石块度的大小进行精确计算。为此, 引入反映现场实测结果的级配系数 K_x , 建立如下式所示的小粒径块度半径计算公式。其中, 级配系数 K_x 通过工程的筛分采用反分析法确定。

$$R_x = K_x \left(\frac{\rho_c D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{a}{b} \right)^{2\gamma} \right)^{1/\alpha} r_0 \quad (6)$$

式中: R_x 为粒径小于 x mm 块度分布半径; r_0 为炮孔半径; K_x 为系数, 由试验筛分结果来确定。

以上方法的核心是在基于爆炸应力波的传播规律和岩体破坏准则, 嵌入工程的试验结果, 是一种兼顾理论和工程现场特性的预测方法。为验证这一方法的

准确性, 利用现场试验筛分结果进行复核, 随机选取 8 次爆破试验数据, 利用爆破试验参数以及现场筛分结果对系数 K_x 进行反算。采用上式计算得到的 K_x 如图 17 所示。

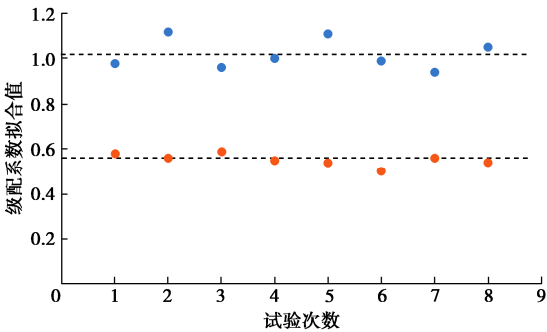


图 17 基于试验数据反演得到的级配系数

Fig. 17 Grading coefficient based on inversion of test data

上图结果表明, 对于同一岩性的岩体, 表征岩体性质影响的参数 K_x 基本稳定在同一水平线, 波动很小, 这从现场试验的另一个侧面证明了上述结论, 对于同一岩性的岩体, 结构面对小粒径块度的影响并不明显。

3.2 中、大粒径块度的“结构面主控”表征法

基于已有的爆破块度研究, 中、大粒径块度的预测已有一定基础, 其中最为应用广泛的是 Kuz-Ram 模型。该模型中, 块度的分布主要考虑两大方面的因素, 其一是爆破荷载的破碎作用, 其二是岩体质量的影响, 其主要的数学表达方法如下:

$$\bar{X} = A \cdot q^{-0.8} Q^{1/6} (115/E)^{19/30} \quad (7)$$

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad (8)$$

$$n = (2.2 - 14w/d)(1 - e/w)[1 + (m-1)/2]L/H \quad (9)$$

式中: A 为岩石系数, 取值大小与岩石的节理、裂隙发育程度有关, 节理裂隙越发育其值越小 (经验认为: A 值为 7~10, 节理发育; A 值大于 10 为岩体较完整); q 为炸药单耗 (kg/m^3); Q 为单孔装药量 (kg); E 为炸药相对重量威力, 铵油炸药 (非散装) 为 100, TNT 时为 115; \bar{X} (即 d_{50}) 为爆破岩块的平均粒径 (cm); R 为小于某粒径的石料质量百分数 (%); X 为岩块颗粒直径 (mm); X_0 为特征块度 (cm), 即筛下累积率为 63.21% 时的块度尺寸; n 为不均匀指数, 表示分布曲线的陡缓; e 为钻孔精度 (m); L 为不计超钻部分的装药长度; d 为炮孔直径 (mm); W 为抵抗线 (m); m 为间排距系数, 孔距与真实排距 (与起爆方式有关) 之比; H 为台阶高度 (m)。

基于大量的工程实践, KUZ-RAM 模型的优点在于采用 R-R 分布函数描述爆破块度的整体分布, 可以很好地预测中大粒径块度的比例, 但是多年来基于水

电工程堆石坝级配料开采的预测结果, 该模型在预测 5 mm 及其以下粒径块度的精确性不够理想。同时, KUZ-RAM 模型的应用效果很大程度取决相关参数选取, 其中反映岩体特性的参数 A 尤其重要。

基于这一现状, 本文提出用一种简单的数学拟合方法以自学习的方式, 通过已有的几次爆破结果, 学习获取岩体结构特征的信息, 通过动态拟合, 确定岩体性质参数, 从而实现实时反映岩体结构面对爆破块度的影响。由于通常的矿山或水电工程的爆破开采是一个长期的过程, 在大量梯段爆破的开采中将积累大量数据, 这为自动更新 A 值提供了条件。因此基于式 (7), 将其进行简单变换可得下式:

$$A = \exp(\bar{X}, q) \quad (10)$$

式中: 指数函数的相关系数通过不同爆破梯段数据样本进行拟合确定。以两河口水电站为例, 在两河口石料场的开采爆破中, 采用平均块度与单耗进行拟合的示意图如图 18 所示。

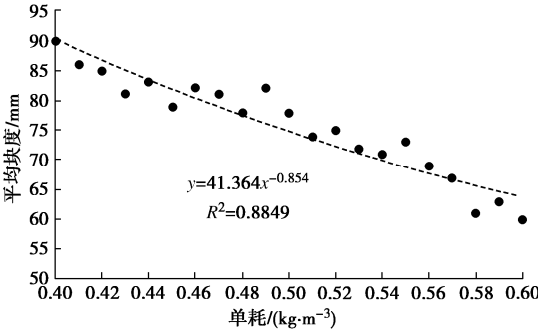


图 18 平均块度与单耗的拟合关系

Fig. 18 Regression relationship between average fragmentation size and specific explosive consumption

从图 18 可以看出, 平均块度和单耗之间具有良好的指数型函数关系, 如果在开采的过程中, 不断用样本数据去拟合和更新 A 值, 改进的爆破块度预测方式则更加准确。如果在基本确定两个核心变量 (如平均块度和单耗) 的数学关系前提下, 基于大数据库建立二者的拟合关系, 实时更新相关的计算参数。在数据库的更新过程中, 拟合数据源的不断增加实际是一个自学习的过程。采用这种方法拟合得到的相关参数的物理意义有了更丰富的含义, 其不仅仅值的是某一项参数, 而是融合了环境条件、岩体特征以及开挖历史等多重含义。

3.3 模型的有效性验证

根据以上对小粒径和中、大粒径的分别考虑, 则可以提出爆破块度的分区预测模型, 其数学表达式如下所示:

$$\left. \begin{aligned} R_x &= K_x \left(\frac{\rho_c D^2}{2(\gamma+1)} \left(\frac{a}{b} \right) / [\sigma_d] \right)^{1/\alpha} r_0, \\ \bar{X} &= Aq^\delta. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中：第一个分式对应于小于等于 5 mm 粒径的块度，第二个分式对应于大于 5 mm 粒径的块度。对于小粒径块度和中大粒径块度分别采用不同的公式进行计算，一方面克服了广泛使用的 KUZ-RAM 模型对小粒径块度预测不准的缺点，另一方面采用基于自学习机制的岩体参数更新方法，学习前期岩体天然块度对爆破块度的影响，并应用于后期的爆破块度预测。

选取本工程典型梯段的级配料开采结果，选取本文提出的块度分区模型与目前应用比较常规的 KUZ-RAM 模型与 USBM 模型进行对比，不同预测模型对应的块度分布比较如下图 19 所示。

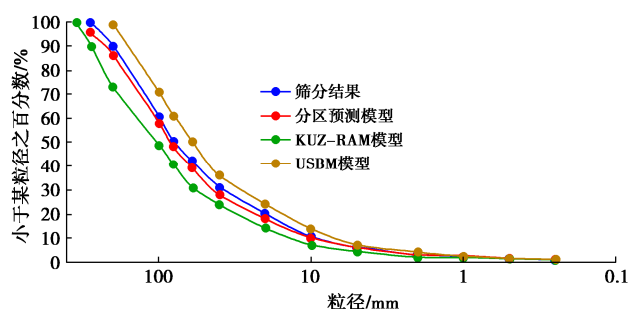


图 19 不同模型的对比结果

Fig. 19 Comparison of results obtained by different models

结果表明，本次研究提出的爆破级配分区预测方法对爆破块度的预测精度最高，常规未经修正的 KUZ-RAM 模型的预测结果相比与实际结果明显偏大，这与已有的相关文献研究结果相符，采用美国垦务局提出的爆破块度预测模型则明显偏大。由此可见，但从爆破块度的预测精度角度，爆破级配分区预测模型的准确性明显更高。

4 结 论

本文致力于探明结构面对爆破块度形成影响的力学机制，采用现场原位试验、数值仿真以及理论推导等方式开展了系列研究，得到以下 3 点结论。

(1) 开展了结构面对爆破块度影响的专项试验，得到了岩体爆破块度与结构面切割的天然块度的影响关系，结果表明，当粒径小于 5 mm 时，爆破块度与结构面的关联性不明显，随着粒径增大，爆破块度与天然块度的吻合程度逐渐提高。

(2) 开展了爆破块度数值仿真，分析了结构面对爆破块度的影响机制，结果表明由于爆破瞬间的压碎过程，结构面的存在明显影响了裂隙区的应力波传播

过程和破碎特征；但由于粉碎区的冲击波峰值整体较大，结构面对小粒径料的形成影响并不明显，从侧面与试验结果相互印证。

(3) 基于岩体爆破破碎与岩体结构面的双重影响，提出了岩体爆破块度的分区力学模型，并给出其数学表达，基于大量试验样本进行对比，结果表明本文所提新模型的预测精度更高。

需要指出的是本文所采用的数值仿真方法是基于连续介质等效的方法，下一步的工作中将进一步研发基于非连续介质的模拟方法，实现岩体爆破块度的精细模拟。

参考文献:

- [1] 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. (GAO Qidong, LU Wenbo, LENG Zhendong, 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))
- [2] 吴新霞, 彭朝晖, 张正宇. 面板堆石坝级配料开采爆破块度预报模型及爆破设计参数优化研究[J]. 工程爆破, 1996, 2(4): 95-100. (WU Xinxia, PENG Zhaohui, ZHANG Zhengyu. Study on optimization of blasting fragmentation forecasting model and blasting design parameters of the gradating material mining of the rockfill dam with concrete facing[J]. Engineering Blasting, 1996, 2(4): 95-100. (in Chinese))
- [3] 张有才, 朱传云. 堆石坝级配料爆破块度分布模型的研究[J]. 爆破, 2005, 22(1): 44-47. (ZHANG Youcai, ZHU Chuanyun. Blasting fragmentation forecasting model for concrete panel rock-fill dam[J]. Blasting, 2005, 22(1): 44-47. (in Chinese))
- [4] 蔡建德, 郑炳旭, 汪旭光, 等. 多种规格石料开采块度预测与爆破控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1462-1468. (CAI Jiande, ZHENG Bingxu, WANG Xuguang, et al. Research on blasting control technique and block size prediction of different dimensions stones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1462-1468. (in Chinese))
- [5] 吴新霞, 胡英国, 刘美山, 等. 水利水电工程爆破技术研究进展[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 112-120, 147. (WU Xinxia, HU Yingguo, LIU Meishan, et al. Research progress of blasting technology in hydropower engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10):

- 112-120, 147. (in Chinese))
- [6] GRADY D E, KIPP M E. Dynamic rock fragmentation[J]. *Fracture Mechanics of Rock*, 1987, **10**: 429-475.
- [7] CHUNG S H, KATSABANIS P D. Fragmentation prediction using improved engineering formulae[J]. *Fragblast*, 2000, **4**(3/4): 198-207.
- [8] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram fragmentation model - 20 years on[C]// Brighton Conference Proceedings. Brighton, UK: European Federation of Explosives Engineer, 2005.
- [9] KUZNETSOV V M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock[J]. *Soviet Mining Science*, 1973, **9**(2): 144-148.
- [10] ROSIN P A U L. Laws governing the fineness of powdered coal[J]. *Journal of Institute of Fuel*, 1933, **7**: 29-36.
- [11] 武仁杰, 李海波, 于崇, 等. 基于统计分级判别的爆破块度预测模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(1): 141-147. (WU Renjie, LI Haibo, YU Chong, et al. Model for blasting fragmentation prediction based on statistical classification[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(1): 141-147. (in Chinese))
- [12] 吴发名, 刘勇林, 李洪涛, 等. 基于原生节理统计和爆破裂纹模拟的堆石料块度分布预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(6): 1341-1352. (WU Faming, LIU Yonglin, LI Hongtao, et al. Fragmentation distribution prediction of rockfill materials based on statistical results of primary joints and simulation of blasting cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(6): 1341-1352. (in Chinese))
- [13] 王仁超, 连嘉欣, 邸阔. 结合深度学习和 NCFS 算法的堆石料粒度分布智能检测方法[J]. *水利学报*, 2021, **52**(9): 1103-1115. (WANG Renchao, LIAN Jiaxin, DI Kuo. Intelligent detection method of rockfill particle size distribution based on deep-learning and NCFS algorithm[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(9): 1103-1115. (in Chinese))
- [14] 周继国, 张智宇, 王建国, 等. 最小抵抗线对岩石破碎块度影响的能量分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, **17**(1): 135-142. (ZHOU Jiguo, ZHANG Zhiyu, WANG Jianguo, et al. Energy analysis on the effect of minimum burden on rock fragmentation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, **17**(1): 135-142. (in Chinese))
- [15] PAINE A S, PLEASE C P. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting: some analytical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, **31**(6): 699-706.
- [16] SHOCKEY D A, CURRAN D R, SEAMEN L. Fragmentation of rock under dynamic loads[J]. *Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr*, 1974, **11**: 303-317.
- [17] ROSSMANITH H P, FOURNEY W L. Fracture initiation and stress wave diffraction at cracked interfaces in layered media: I brittle/brittle transition[J]. *Rock Mechanics*, 1982, **14**(4): 209-233.
- [18] 张继春. 节理岩体爆破的损伤机理及其块度模型[J]. *中国有色金属学报*, 1999, **9**(3): 21-27. (ZHANG Jichun. Damage mechanism of blasting in jointed rock masses and its fragment size model[J]. *The Chinses Journal of Nonferrous Metals*, 1999, **9**(3): 21-27. (in Chinese))
- [19] 郭文章, 王树仁. 节理岩体爆破块度预测的力学模型探讨[J]. *爆破*, 1997, **14**(3): 31-34. (GUO Wenzhang, WNAG Shuren. Discussion on the mechanical model of jointed rock mass fragmentation forecast by blasting[J]. *Blasting*, 1997, **14**(3): 31-34. (in Chinese))
- [20] ALER J, DU MOUZA J, ARNOULD M. Evaluation of blast fragmentation efficiency and its prediction by multivariate analysis procedures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, **33**(2): 189-196.
- [21] 石根华. 一般自由面上多面节理生成、节理块切割与关键块搜寻方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(11): 2161-2170. (SHI Genhua. Producing joint polygons, cutting joint blocks and finding key blocks for general free surfaces[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(11): 2161-2170. (in Chinese))
- [22] 郭爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2019, **36**(2): 1-7. (WU Aiqing. Series methods of analyzing rock mass stability based on key block theory and their applications to Three Gorges Project[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(2): 1-7. (in Chinese))