

考虑延迟时间的爆破块度预测模型的建立与应用

李庚泉^{1,2}, 胡英国^{1,2}, 徐辰宇^{1,2}, 侯聪聪^{1,2}, 聂睿^{1,2}, 刘美山^{1,2}

(1, 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430014; 2, 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430014)

摘要: 起爆延迟时间是工程爆破中的关键参数之一, 对爆破块度具有重要调控作用。准确预测不同起爆延迟时间条件下爆破块度, 对指导爆破工程具有重要意义。为研究起爆延迟时间对爆破块度的影响规律并实现块度预测, 在两河口水电站级配料爆破开采工程中开展了不同孔间延迟时间爆破现场试验, 获取了不同延迟时间条件下的块度级配分布特征, 结果表明爆延迟时间影响爆破块度具有分区特性: 小粒径块度不明显, 平均块度变化显著, 并有着随起爆延迟时间的增加呈现先减小后增大趋势, 最佳延迟时间约为 3.3ms/m。在此基础上, 开展了基于有限元的不同孔间延迟时间数值仿真, 并将其结果与试验数据对比, 二者所得变化规律高度吻合。基于不同起爆延迟时间应力波传播特性分析表明影响平均块度的内在力学机制为不同孔间延迟时间引起的应力波叠加效应与新自由面反射。最后基于不同延迟时间下的爆破块度分布特征, 建立了延迟时间与平均块度和不均匀系数的数学关系, 在 KUZ-RAM 模型中引入了时间项, 提出了考虑延迟时间的爆破块度预测模型。修正后的 KUZ-RAM 模型克服了已有块度预测模型不能体现延迟时间对爆破块度影响的缺点, 可提高电子雷管延迟起爆条件下爆破块度分布预测的精确性。

关键词: 爆破; 块度; 延迟时间; 模型; 试验; 数值仿真

中图分类号: O.383.1; TV 554

国标学科代码: 081101

文献标识码: A

Establishment and application of a blasting fragmentation prediction model considering delay time

LI gengquan^{1,2}, HU yingguo^{1,2}, XU chenyu^{1,2}, HOU congcong^{1,2}, NIE rui^{1,2}, LIU meishan^{1,2}

(1. Changjiang Water Resources Commission Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Jiangxi Communications Investment Group Co., LTD, Nanchang, Jiangxi 330108;

4. Jiangxi Communication Investment Maintenance Technology Group Co., LTD, Nanchang, Jiangxi 330200;)

Abstract: The initiation delay time is one of the key parameters in engineering blasting and plays an important regulatory role in blast fragmentation. Accurately predicting blast fragmentation under different initiation delay time conditions is of great significance for guiding blasting engineering. To investigate the influence of initiation delay time on blast fragmentation and to achieve fragmentation prediction, field blasting tests with different inter-hole delay times were carried out in the grade-fill material blasting excavation project at the Lianghekou Hydropower Station. The fragmentation size distribution characteristics under different delay time conditions were obtained. The results show that the influence of delay time on fragmentation exhibits zone-dependent characteristics: the small size fragments is not significantly affected, while the mean fragment size changes markedly, showing a trend of first decreasing and then increasing with increasing initiation delay time, with an optimal delay

*收稿日期: 2026-05-26; 修回日期: 2026-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52279093; 52079009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (CKSF2026 374/YT); 江西省交通运输厅科技项目 (2023C0007);

第一作者: 李庚泉 (1999—), 男, 硕士, 博士研究生. E-mail: lgq0628@yeah.net;

通信作者: 胡英国 (1987—), 男, 博士, 正高级工程师. E-mail: huyingguo@mail.crsri.cn.

per meter of approximately 3.3 ms/m. On this basis, finite element numerical simulations with different inter-hole delay times were conducted, and damage images under different delays were obtained. Based on the analysis of the damage images, simulated fragmentation size distribution curves under different delay time conditions were derived. Comparing these results with the test data, it was found that the fragmentation curves from both approaches show a high degree of consistency in their variation with delay time. Analysis of the stress wave propagation characteristics under different initiation delays indicates that the intrinsic mechanical mechanism affecting the mean fragment size is the superposition effect of stress waves caused by inter-hole delays and reflection from newly formed free surfaces. Finally, based on the blast fragmentation distribution characteristics under different delay times, mathematical relationships between delay time and both the mean fragment size and the non-uniformity coefficient were established. A time variable is introduced into the KUZ-RAM model, and a blast fragmentation prediction model considering delay time is proposed. The modified KUZ-RAM model overcomes the shortcoming of existing fragmentation prediction models that cannot reflect the influence of delay time on blast fragmentation, and can improve the accuracy of predicting blast fragmentation distribution under electronic detonator delay initiation conditions.

Keywords: blasting; fragmentation; delay time; model; test; numerical simulation

1 引言

随着国民经济的持续发展, 加快水能资源开发速度, 已成为发展低碳经济、改善能源结构、推进节能减排的重要战略方针。爆破块度在水利水电爆破施工中是一个很重要的控制指标, 良好的块度分布可以有效地提升后续清理、运输等工序的施工效率, 降低施工成本。除此以外, 有些工程需要特定的连续-不均匀的石料级配, 其质量直接关系到大坝的填筑质量和坝体运行期的安全。如何科学的分配爆破能量, 探寻适宜的爆破手段, 从而更方便、经济地获得大量可用的坝体填筑料成为亟待解决的关键技术问题。

为了预测爆破块度, 国内外学者们构建了许多基于理论研究与工程实践的预测模型, 在这些预测模型之中, KUZ-RAM 模型^[1]因其参数与计算简便而运用广泛^[2], 许多学者也在此基础之上做出改进以扩展其运用范围并提高预测精度。Cunningham 经过长期的工程实践, 结合其他学者工作成果^[3], 在模型计算、岩体质量评价等方面对此模型进行了修改和完善^[4-6]。吴新霞等^[7]、刘定华^[8]、赵华^[9]利用现场试验等手段, 通过在原模型基础上添加修正系数的手段对模型进行了优化, 提升了模型对特定工程中预测精度。S. Gheibie 等^[10]采用爆破性指数对 KUZ-RAM 模型进行了修正并在 Sungun 铜矿进行了运用。朱子晗等^[11]通过改进 KUZ-RAM 模型中岩石质量系数的选取计算方式来改进 KUZ-RAM 模型。马建博等^[12]采用试验的手段修正了 KUZ-RAM 模型, 利用岩石系数将平均块度与不均匀指数之间建立联系, 改善了模型预测精度。Abiodun Ismail Lawal^[13]根据矿山开采数据结合图像分析技术, 提出了 KUZ-RAM 模型平均块度新的计算方法。胡英国等^[14]基于级配料开采爆破工程, 考虑结构面的影响, 在传统的 KUZ-RAM 模型基础上, 提出了基于分区机制的岩体爆破块度预测模型。这些研究极大的改进了原有模型, 然而现有的研究没有将延迟时间这一影响因素纳入爆破模型的考量范围之内。

随着电子雷管起爆技术的发展, 起爆时间误差被压缩到 1ms 之内^[15], 灵活精确地控制起爆时间间隔成为了可能, 这也为采取设置起爆延时时间从而改变爆破块度的方法的使用与研究起爆延时时间对爆破效果的影响提供了便利。在众多影响爆破块度的影响因素中, 起爆延时调整方便, 调整成本较低, 值得进行进一步的研究。

关于起爆延时对爆破块度的影响方面, 国内外已经进行了广泛的研究。李顺波等^[16]通过理论分析与数值模拟方法论证了起爆延时会改变台阶爆破中内部岩石的受力状态, 进而使得岩石的破碎块度分布产生差异。Yi 等^[17]通过统计台阶爆破数值模型不同区域的破碎程度分析了短延迟时间条件下应

*收稿日期: 2026-05-26; 修回日期: 2026-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52279093; 52079009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (CKSF2026 374/YT); 江西省交通运输厅科技项目 (2023C0007);

第一作者: 李庚泉 (1999—), 男, 硕士, 博士研究生. E-mail: lgq0628@yeah.net;

通信作者: 胡英国 (1987—), 男, 博士, 正高级工程师. E-mail: huyingguo@mail.crsri.cn.

力波相互作用对爆破破碎的影响。Yang 等^[18]通过试验表明较短延迟时间可以加强岩石在爆破破碎过程中的相互碰撞,进而有利于岩石的破碎。赵毅波等^[19]采用有限元方法模拟了群孔起爆不同短延迟时间爆破过程并分析了应力波相互作用过程,证明了延迟爆破有利于提高岩石的破碎效果并减少大粒径块体的产生。A.Saadatmand Hashemi 等^[20]采用有限元模拟多孔延时起爆下岩体的损伤分布,并基于此计算结果分析下爆破破碎与不同孔间延时条件的关系,得出了破碎效果最佳的延时时间范围。张阳光等^[21]采用平均最大有效应力作为指标分析台阶爆破有限元数值模拟结果,并探究最佳起爆延迟时间。Hong 等^[22]建立了爆破实验模型,利用 3D-DIC 技术分析双炮孔延迟起爆条件下的应力应变变化规律,并寻找最优破碎延迟。黄雪峰等^[23]通过有限元数值模拟并分析模拟结果的损伤特征与应力变化探究不同延时时间长短对爆破破碎的影响。余良松等^[24]进行了不同孔间延迟时间的台阶爆破试验,得出了孔间延迟时间对不同区间范围块度的影响规律。大量的研究已经表明起爆延迟时间对爆破块度存在显著影响,合适的起爆延迟时间可以减少爆破大块的产生,增强岩石的破碎。然而,现有的爆破块度预测模型却很少考虑起爆延迟时间对爆破块度的影响,在当前电子类管普遍应用的背景下,传统爆破块度预测技术与方法已经不能满足工程控制的要求。

本文基于重大水电工程两河口水电站堆石坝级配料爆破开采,开展了不同孔间延迟时间对爆破块度形成影响机制试验,获取不同延迟时间条件下的块度级配曲线与平均块度数据,并得出延迟时间对爆破块度的影响规律,进而开展了基于有限单元法的爆破块度数值仿真,研究起爆延迟时间对爆破块度形成的内在影响机制。最后基于不同延迟时间下的爆破块度分布特征,对 KUZ-RAM 爆破块度预测模型进行修正,建立了延迟时间与平均块度和不均匀系数的数学关系,提出了考虑延迟时间的爆破块度预测模型。研究成果期望为电子起爆条件下爆破块度预测提供理论依据与方法支撑。

2 延迟时间对爆破块度形成影响的试验研究

2.1 试验情况简介

两河口水电站位于四川省甘孜州雅砻江干流与支流庆大河的汇河口下游,雅江县城上游约 25km 处。坝址多年平均流量 $664\text{m}^3/\text{s}$,水库正常蓄水位为 2865m,相应库容 101.54 亿 m^3 ,调节库容 65.60 亿 m^3 ,具有多年调节能力,电站装机容量为 3000MW ($6\times 500\text{MW}$),多年平均发电量 110.62 亿 kW.h。两河口水电站是雅砻江中下游的“龙头”水库,是雅砻江干流中游规划建设 7 座梯级电站中装机规模最大的水电站。

两河口水电站坝高 295 米,工程体量巨大,需要开采级配料超 4300 万 m^3 ,其中坝壳级配料(即最大粒径为 80cm 的堆石料、最大粒径为 30cm 的过渡料)为 3586 万 m^3 。堆石坝级配料开采数量大、周期长、质量要求高,开采作业面临严峻的挑战。堆石坝级配料级配需求如图 2 所示:

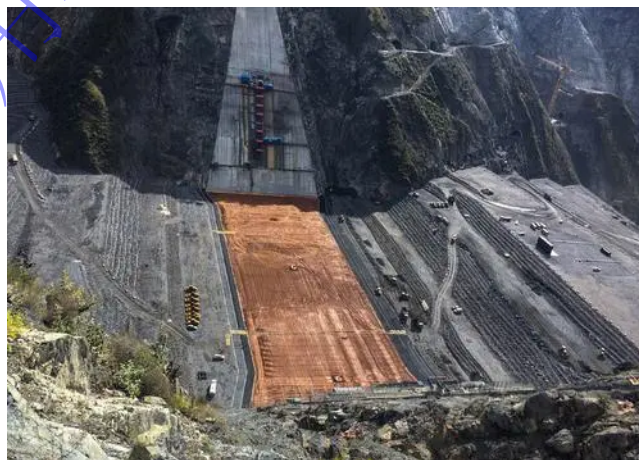


图 1 两河口水电站堆石坝施工图

Fig.1 The construction of rock-fill dam in Lianghekou

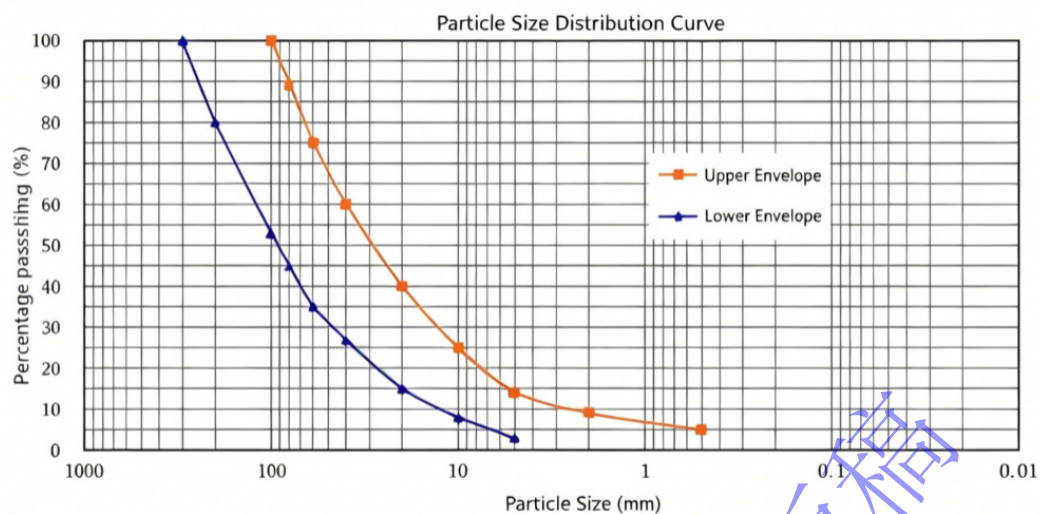


图2 两河口水电站堆石坝过渡料包络线

Fig.2 Transition material envelope of rockfill dam of Lianghekou Hydropower Station

两河口水电站共有两个石料场，分别为两河口石料场和瓦支沟石料场（如图3所示）两河口料场变质粉砂岩为主夹少量粉砂质板岩，场内无全、强风化岩体，以弱风化为主，强度较低；瓦支沟料场主要组成为粉砂质板岩与变质砂岩，风化程度较弱，岩石强度相比之下较高，边坡整体稳定性较好。

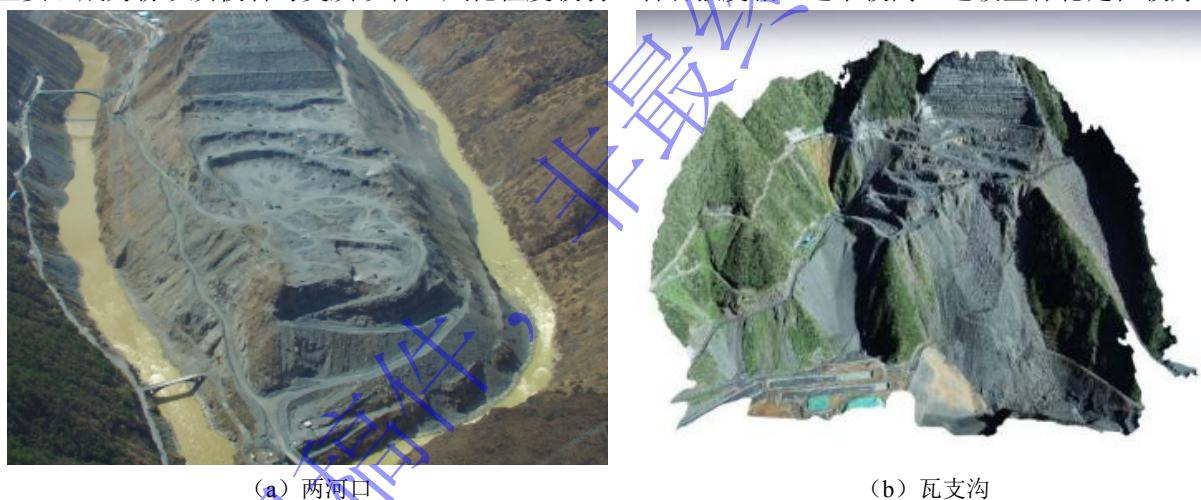


图3 料场图像

Fig.3 The grading yard

在两河口料场与瓦支沟料场开展了针对延迟时间对爆破块度影响的试验研究，主要变量为孔间延迟参数，控制其余爆破参数不变。由于电子雷管具有起爆时间控制精确的特性，两个试验区域均采用电子雷管控制炮孔炸药起爆，以实现精确地毫秒级延迟时间爆破。两个料场的岩石性质有所不同，可以用于分析延迟时间对爆破块度影响受岩体条件的影响程度。试验中爆破参数如表一所示。

表1 试验爆破参数

Table.1 Blasting parameters of experiments

试验部位	延迟时间	台阶高度/m	炮孔直径/mm	炮孔深度/m	堵塞长度/m	孔间距/m	排间距/m	最小抵抗线/m	单孔装药量/kg	爆破单耗/(kg · m ⁻³)
两河口	0	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36

爆炸与冲击 Explosion and Shock Waves										
	5	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36
	10	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36
	20	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36
	30	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36
	50	10	110	11	2.5	3.6	3	4.5	39	0.36
瓦支沟	0	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37
	5	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37
	10	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37
	20	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37
	30	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37
	50	10	110	10.5	2.5	3	3	3.5	37	0.37

工程上以筛分试验作为衡量爆堆块度的手段，这种方法得出的爆堆级配曲线一致性较好，但此方法费时费力。随着计算机技术的发展，图像识别技术逐渐成熟，可以高效准确地评估爆堆颗粒级配。本次试验中部分爆堆采用人工筛分方法获取级配颗粒曲线，其余则采用 wipfrag 图像识别软件分析爆堆图片获取级配颗粒曲线（见图 4）。

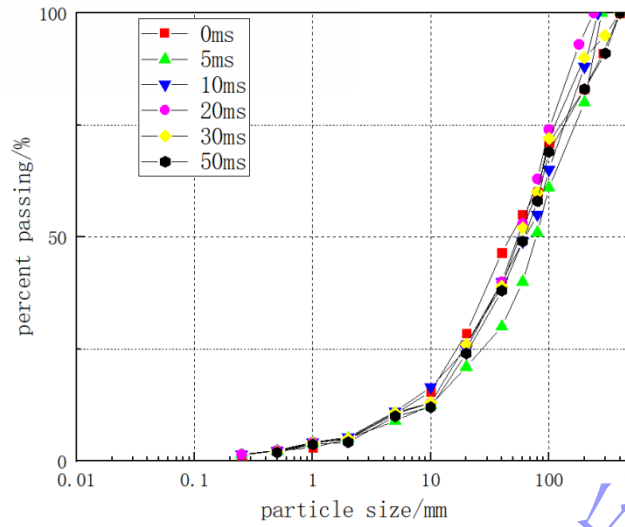


图 4 爆破试验与块度测量

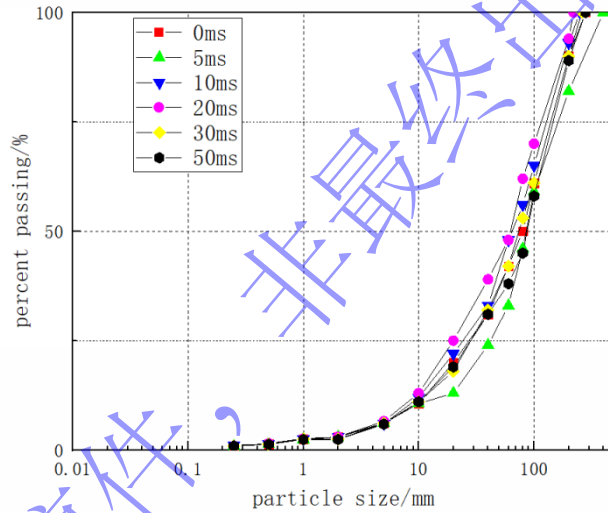
Fig.4 The blasting tests and block size measure

2.2 试验结果分析

爆破试验后，采用上述方法对爆堆进行筛分统计，结果如图5所示。



(a) 两河口



(b) 瓦支沟

图 5 试验颗粒级配曲线图

Fig.5 Particle size distribution curve of the experiments

从图中可以看出，随着孔间延迟时间变化，爆破块度级配曲线也产生明显的变化；级配曲线在 $<10\text{mm}$ 区间内重合较高，而在 $>10\text{mm}$ 区间差别明显，体现出孔间起爆延迟时间主要对中大粒径块度的分布产生影响，而对小粒径块度占比影响不大。这主要是因为小粒径块度主要形成于炮孔粉碎区范围内，而炮孔粉碎区的形成爆破荷载与岩石本身的动抗压强度起主要作用^[25]，因而在试验中小粒径块度占比变化较小。

对爆破实验结果进行统计，得出试验平均块度变化曲线（见图 6）与不均匀系数变化曲线（见图 7）。

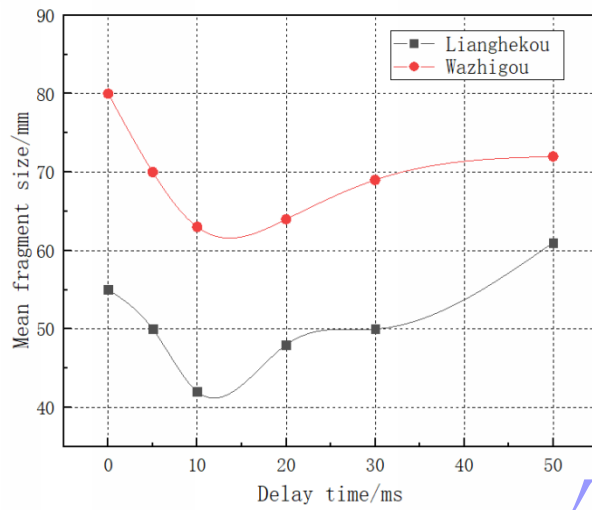


图.6 试验平均块度

Fig.6 Mean fragment size in tests

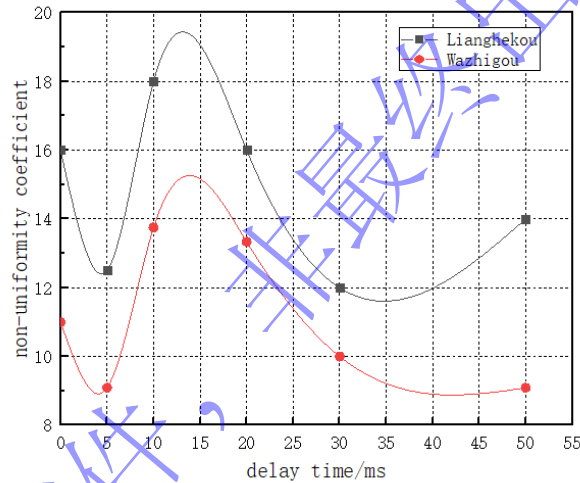


图.7 试验不均匀系数

Fig.7 Non-uniformity coefficient in tests

综合分析两个试验区域试验结果,可以发现平均块度随起爆延迟时间的增加呈现先减小后增大趋势,且极小值均处于 10ms 附近。且在两种试验区域不同的岩体条件下,块度分布与平均块度变化趋势依旧具有较高的一致性,可以认为起爆延迟时间对爆破块度的影响变化规律受岩体条件影响较小。

3 工程尺度爆破块度有限元数值仿真

3.1 数值仿真方法

采用动力有限元爆破损伤数值模拟与图像块度识别软件相结合的方法探究不同延时时间对爆破破碎效果的影响。具体方法流程如下:

首先建立平面多炮孔有限元模型,设置不同的起爆延时参数进行数值模拟计算,得出模拟损伤图像;随后基于岩体损伤阈值确定爆破形成特定块度的边界并对模拟结果图像进行处理;最后将得到的损伤图像输入块度图像识别软件中分析,得到不同延时条件下的块度级配曲线。具体流程如下图所示:

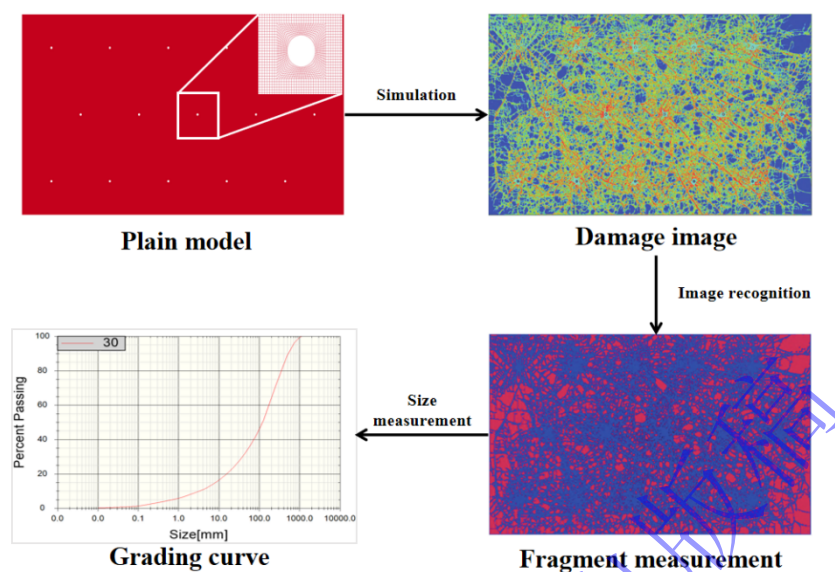


图8 数值模拟流程

Fig.8 Process of simulation

数值模拟中岩石采用 RHT 模型，该模型可以很好地模拟岩石受冲击荷载破坏过程。RHT 模型设定等效塑性应变增量与材料破坏时的最小等效塑性应变的比值 D 量化岩石受到的损伤^[26]，当损伤变量大于一定值时可以认为岩石完全破坏，根据过往对 RHT 模型损伤变量的研究^[27-29]，本次模拟中损伤阈值设定为 0.8^[30]。

本次数值模拟共模拟 1650×900cm 范围内的岩体，岩体内部共设置三排炮孔，一排 5 个，呈梅花形布局，炮孔直径 115mm，采用耦合装药形式。孔排间距 3×3m，最小抵抗线 1.5m。在模型上部为自由面，其余三面设置无反射边界以模拟半无限岩体情况。模型计算从第一个炮孔起爆开始，到最后一个炮孔起爆后过 5ms 后停止。具体模型如图 9 所示。

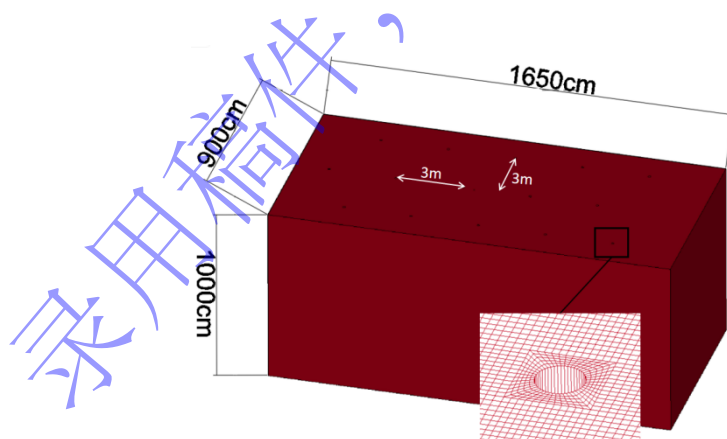
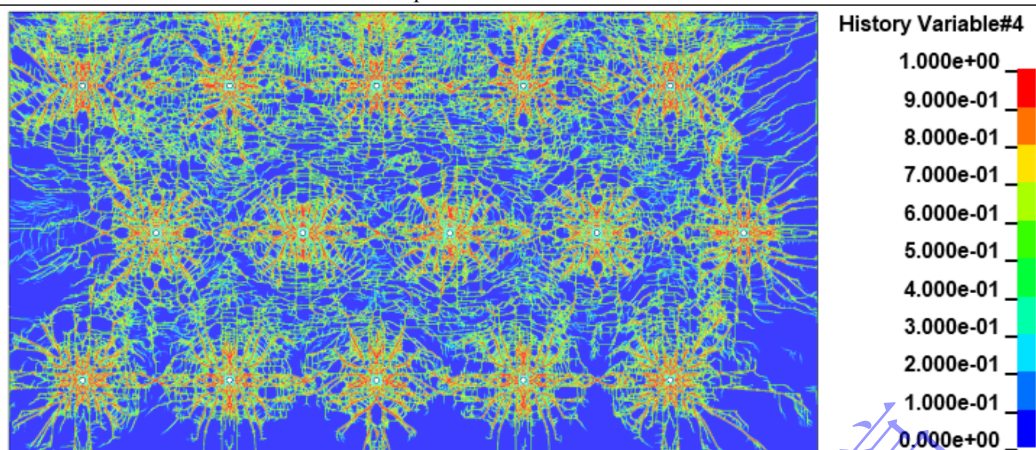


图9 台阶模型示意图

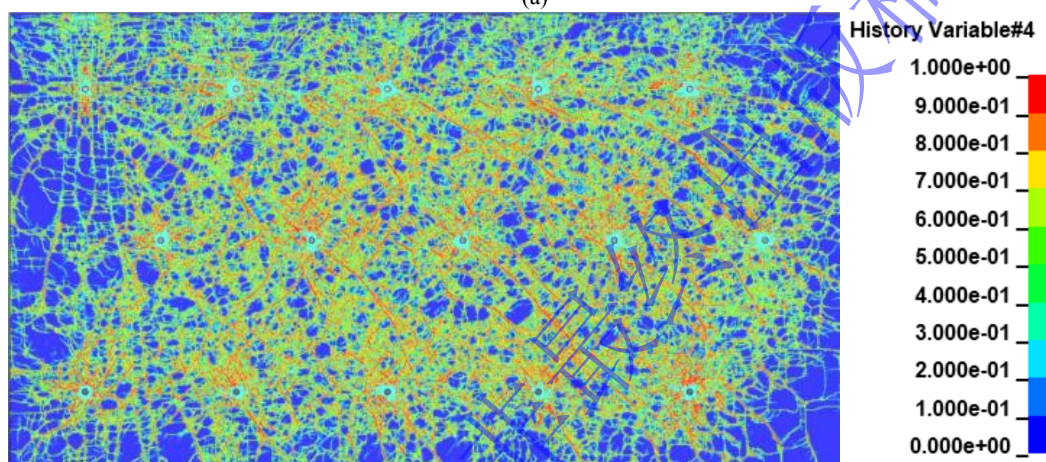
Fig.9 The bench model

3.2 数值模拟结果

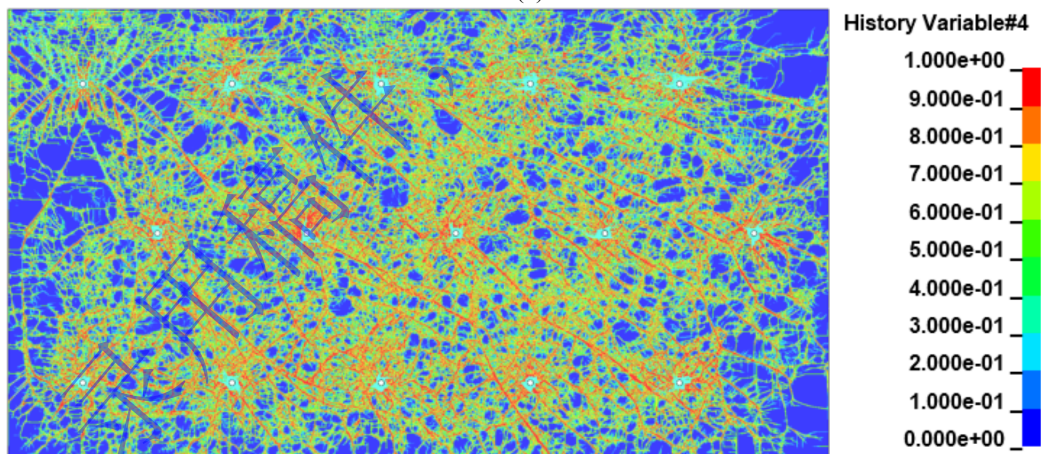
设置孔间延迟时间 0ms, 3ms, 5ms, 10ms, 15ms, 20ms 进行数值模拟，得出如下图所示的岩体损伤图像：



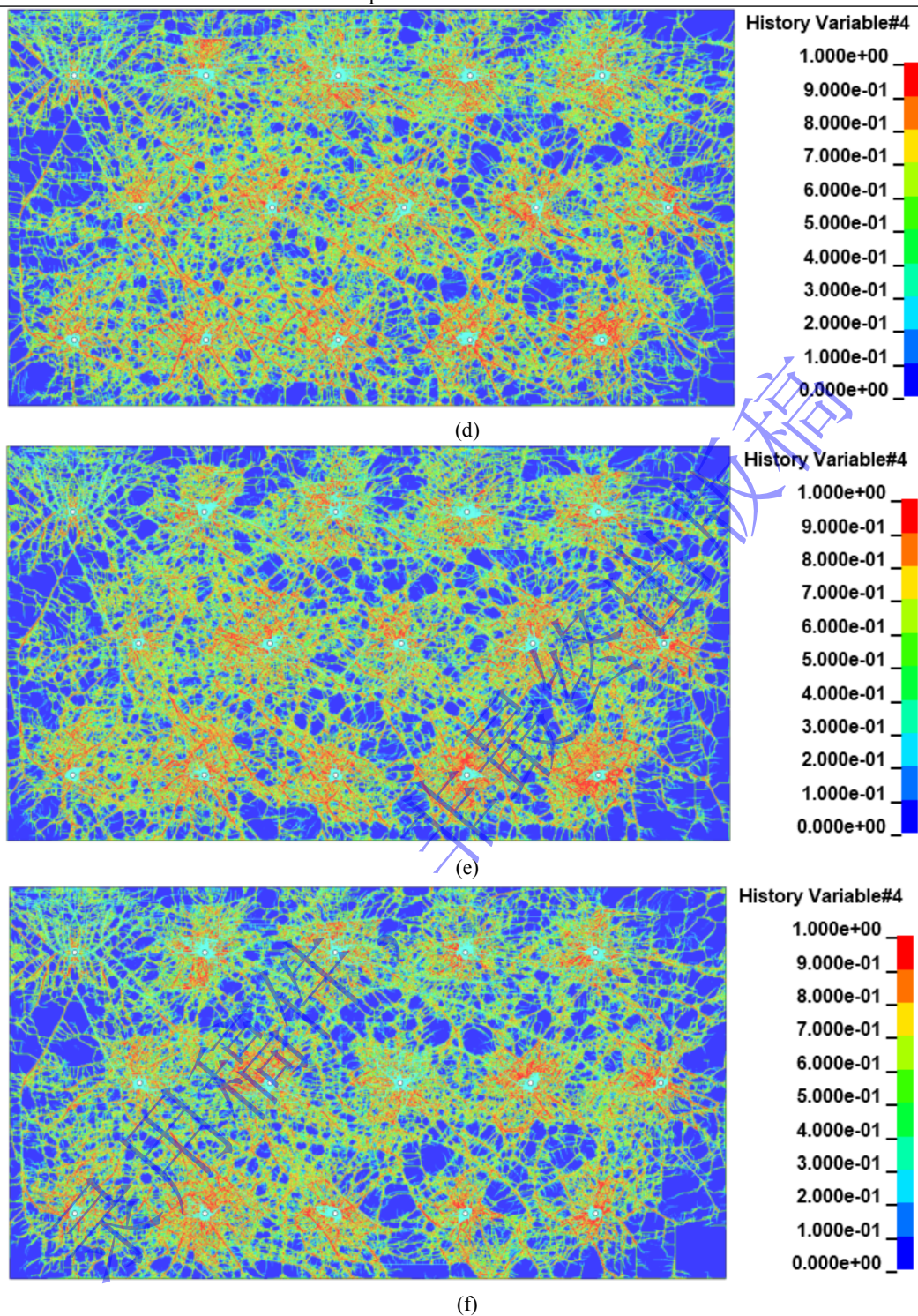
(a)



(b)



(c)



(a) 0ms; (b) 3ms; (c) 5ms; (d) 10ms; (e) 15ms; (f) 20ms

图 10 不同延时条件下最终岩体损伤图

Fig.10 Rock damage map under different delay time conditions

将各个损伤图中岩石损伤值大于损伤阈值的单元隐藏，将结果输入 desktop-split 图像块度分析软件之中划分块度边界并测量其尺寸，得到如图 11 所示不同起爆延时条件下岩体破碎的块度级配曲线。根据爆破级配曲线可以得出各个起爆延时下的平均块度（见表 2）。

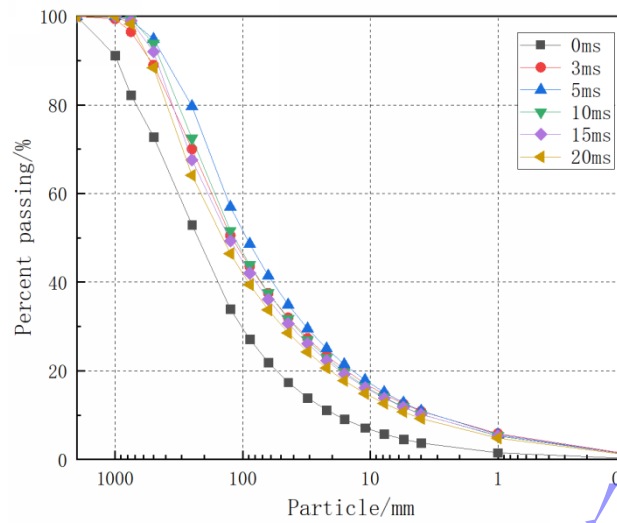


图 11 不同延时时间块度级配曲线

Fig.11 Grading curves of block sizes with different delay times

表 2 不同延时时间平均块度

Table.2 Mean fragment size with different delay times

延迟时间/ms	块度/mm
0	150.93
3	137.40
5	124.52
10	121.34
15	139.61
20	148.92

从级配曲线和表 2 中可以看出，起爆延时可以减小大块的产生，相较于同时起爆，较长的逐孔延时起爆条件模拟下最大粒径块体粒径显著下降。数值模拟平均块度变化趋势与试验结果相一致，均呈现减小后缓慢增大的趋势（如图 12 所示），其最小值在 10ms 左右；在不同延迟时间条件下，小粒径块度占比变化并不明显，变化主要体现在中大粒径块度分布之中。

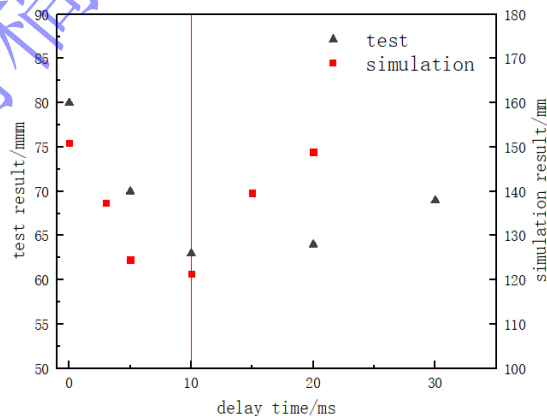


图 12 平均块度变化趋势图

Fig.11 The trend of mean fragment size

综合分析岩体损伤图像与块度曲线可以发现，应力波叠加与应力波和先爆炮孔形成的裂缝相互作用是孔间延迟时间对爆破级配料分布的主要影响因素。在较小延迟时间条件下，不同炮孔间的应力波

相互作用起主导作用,适当的延迟时间使得应力波在岩体内部相互叠加,加强了岩体的破碎。而在>10mm孔间延迟时间条件下,由于先爆炸孔形成的裂隙扩宽并伸展,爆破破碎的岩体向自由面方向移动,对后爆炸孔的应力波产生了阻碍,影响了炮孔周围粉碎区的形态并在粉碎区之外形成了大块度岩体集中的欠破碎区域,导致了较大的平均块度。

4 考虑延迟时间的 KUZ-RAM 模型的修正

4.1 KUZ-RAM 模型的优缺点分析

为了预测爆破块度,国内外学者进行了大量研究,基于理论与试验建立了众多爆破块度预测模型,在这些爆破块度预测模型中,由Cunningham于1983年综合前人研究成果创立的Kuz-Ram模型是应用最广泛的爆破块度预报模型。

KUZ-RAM模型主要由Kuznezov方程、均度不均匀指数、R-R分布函数三部分组成,具体表达式如下^[1]:

$$n = (2.2 - 14 \frac{W}{d})(1 - \frac{e}{W})(\frac{m+1}{2}) \frac{L}{H} \quad \#(1)$$

$$X_{50} = Aq^{-0.8}Q^{1/6}(115/E)^{19/30} \quad \#(2)$$

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad \#(3)$$

$$X_0 = \frac{X_{50}}{(\ln 2)^{1/n}} \quad \#(4)$$

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;

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,铵油炸药取值 100, TNT 取值为 115;

X_{50} 平均块度尺寸, cm ;

R 为代表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,即筛下累积率为 63.21% 时的块度尺寸, cm ;

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, m ;

W 为最小抵抗线, m ;

d 为炮孔直径, mm ;

m 为炮孔密集系数,是孔径和排距的比值;

H 为台阶高度, m 。

从工程运用方面来看, Kuz-Ram 模型是比较成功的,它具有以下几个明显的优点:参数大多已知且易于获取、计算简便,结果直观、计算结果相对容易修正等优点,因而得到了广泛的应用与研究。

从 KUZ-RAM 模型公式中可以看出,该模型主要考虑到了炸药威力与用量、岩石质量、钻孔密度、最小抵抗线等爆破参数对爆破块度的影响,而没有反应延迟时间这一对爆破块度产生影响的因素也纳入预测之中,缺乏体现延迟时间对爆破块度影响的参数项。因此,本文针对起爆延迟时间对 KUZ-RAM 模型进行修正,使其可以输出不同起爆延迟时间下爆破块度预测结果。

4.2 平均块度预测修正

参照过往的针对 KUZ-RAM模型的修正研究, 本文采用对原有模型添加基于孔间延迟时间变化的修正系数来修正 KUZ-RAM 模型, 使其能够针对延迟时间预测平均块度。根据现场试验与数值模拟结果可以看出, 孔间延迟时间对爆破块度的影响具有一定的独立性, 其影响规律受岩体性质等其它参数影响较小。采用在计算公式中添加基于延迟时间变化的修正函数以对平均块度预测进行修正, 平均块度修正预测公式修正如式下所示:

$$x_{50} = Aq^{-0.8}Q^{1/6}(115/E)^{19/30}f(t) \quad (5)$$

式中: t 为孔间延迟时间, $f(t)$ 为孔间延迟时间修正函数。

根据试验得出的延迟时间对爆破块度影响规律, 对试验数据进行耦合, 得出修正函数如下式所示:

$$f(t) = 1.07 - e^{-0.0834t}(0.011 + 0.0647t) \quad (6)$$

采用两河口与瓦支沟料场的平均块度试验数据验证此修正后的模型的准确性, 对比结果如下图所示。

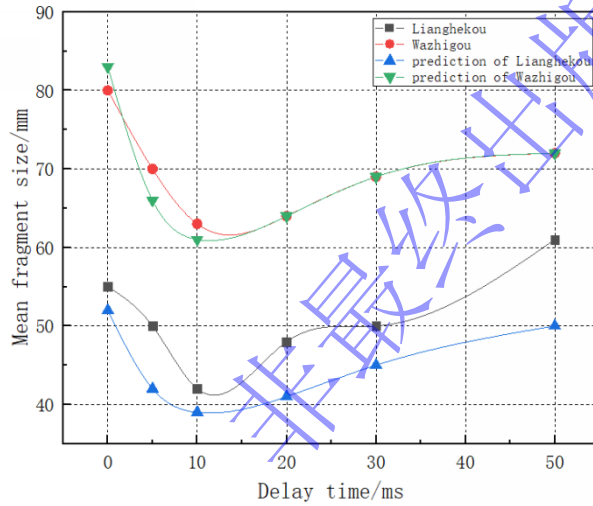


图 13 修正模型预测结果对比
Fig. 13 Comparison between experiment and model

通过对比可以看出, 改进的模型可以预测在有孔间延迟时间条件下的爆破块度, 且在一定范围内有着不错的精度。

4.3 不均匀系数修正

KUZ-RAM 模型通过 R-R 分布函数输出预测爆破块度。R-R 分布函数由特征块度与不均匀系数两个参数组成, 其中特征块度可由平均块度计算得出, 因而只需要针对不均匀系数进行修正即可。

采用对 n 值计算公式添加基于延迟时间变化的修正函数以修正 n 值, 具体修正公式如下所示:

$$n = (2.2 - 14\frac{W}{d})(1 - \frac{e}{W})(\frac{m+1}{2}\frac{L}{H})g(t) \quad (7)$$

采用两河口与瓦支沟现场试验数据进行耦合, 得出修正函数如下式所示:

$$g(t) = 1.08 - 0.25e^{-1.5(0.1t-0.7)^2} \quad (8)$$

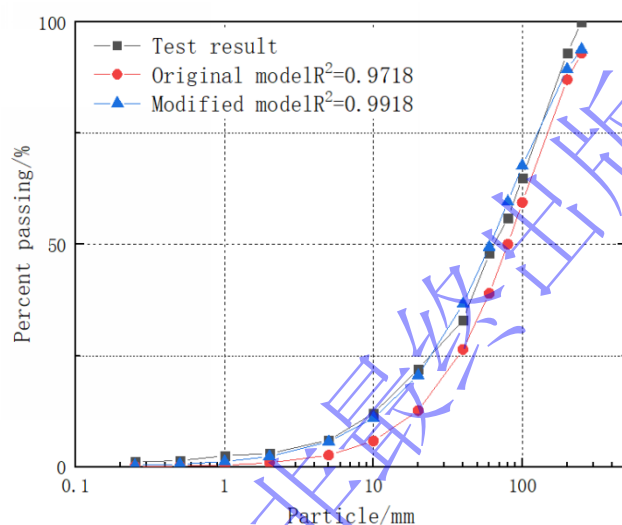
4.4 模型准确性验证

根据上文进行的拟合, 总结的改进模型如下式所示

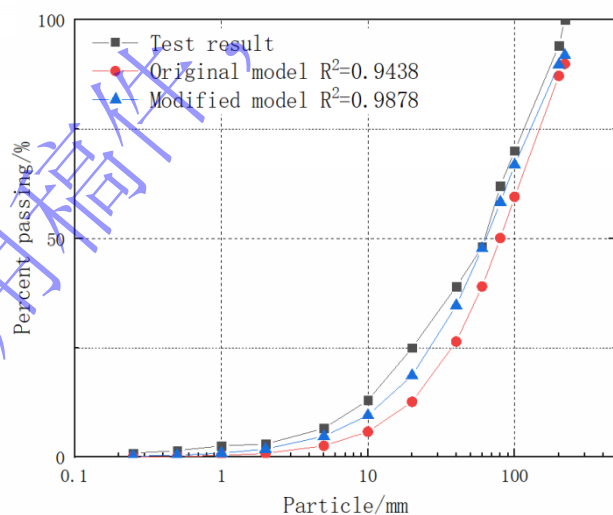
$$\begin{cases} X_{50} = Aq^{-0.8}Q^{1/6}(115/E)^{19/30}f(t) \\ n = (2.2 - 14\frac{W}{d})(1 - \frac{e}{W})(\frac{m+1}{2})\frac{L}{H}g(t) \quad \#(9) \\ f(t) = \alpha - e^{-\beta t}(\gamma + \delta t) \\ g(t) = \sigma - \tau e^{-\varphi(0.1t - \omega)^2} \end{cases}$$

其中： α 、 β 、 γ 、 δ 、 σ 、 τ 、 ω 随工程条件变化而变化，需要在工程中设置不同延迟时间进行多次现场爆破试验，根据结果进行取值。

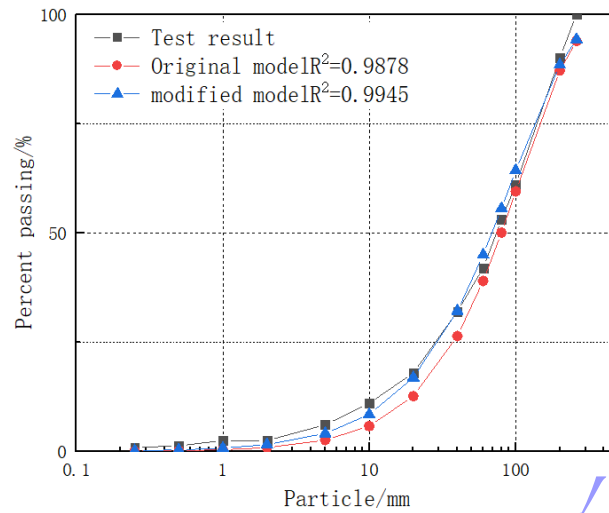
采用上述改进模型对工程中不同延迟时间的爆破块度级配曲线进行验证，实际数据与原始模型和改进模型结果对比如下图所示。



(a) 10ms



(b) 20ms



(c) 30ms

图 14 实际与预测颗粒级配曲线对比图

Fig.14 Comparison of actual and predicted particle size distribution curves

从上图可见，改进后的模型可以很好的输出不同孔间延迟时间条件下的块度级配曲线，相比于原始模型，改进的模型输出的级配曲线更吻合实际结果， R^2 可达到 0.99 以上。

5 结论

本文采用现场试验与数值模拟手段探究了孔间起爆延迟时间对爆破块度的影响，并对传统的 Kuz-Ram 爆破块度预测模型进行了改进，以预测不同孔间延迟时间对爆破块度的级配曲线。

(1) 以孔间延迟时间为主要变量在两河口与瓦支沟两处料场进行了现场试验。结果表明孔间延迟时间主要影响大于 10mm 粒径块度分布，而对小粒径块度分布影响不大；爆破平均块度随起爆延迟时间的增加呈现先减小后增大的趋势；最佳延迟时间约为 3.3ms/m。孔间延迟时间对爆破块度的影响具有一定的独立性，其影响规律受岩体性质等其它参数影响较小。

(2) 采用有限元数值模拟手段研究了起爆延迟时间与爆破块度的关系。通过在相同条件下设置不同延迟时间的方式进行了数次数值模拟。模拟结果得出的孔间延迟时间与爆破块度的关系与试验结果，进一步验证了延迟时间对爆破块度的影响规律。

(3) 根据现场试验与数值模拟总结处的规律，对 KUZ-RAM 模型平均块度与不均匀系数计算进行了改进并验证了其准确性。改进后的 KUZ-RAM 模型可以在一定孔间延迟时间范围内有效地预测爆破平均块度并输出级配曲线。在工程上可以运用此模型对不同孔间延迟时间爆破效果进行评估。

本次研究中，受限于试验条件与模拟运算时长，较长延迟时间条件下的爆破块度变化特性未能得到充分研究；研究中所采用的连续模拟方法在模拟爆破破碎方面也存在局限性，不能很好地体现爆破破碎的全过程；所得到的修正模型也需要从理论与现场运用方面进一步地完善，这些有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] CUNNINGHAM C. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting [C].Proc. First Int.Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, 1983:439-453.
- [2] 卢文波,孟婷,胡英国.岩石爆破破碎模拟和块度预报的研究现状与展望[J].工程爆破, 2024,30(5) 20-28. DOI:10.19931/j.EB.20240107.
- LU W B, MENG T, HU Y G. A review of numerical simulation of rock fragmentation by blasting and prediction of fragments[J].

- Engineer Blasting, 2024, 30(05):20-28. DOI:10.19931/j.EB.20240107.
- [3] Lilly PA. An empirical method of assessing rock mass blastability [C]. Proceedings of Large Open Pit Mine Conference. Newman: October; 1986:89 – 92, 1986.
- [4] Cunningham CVB. The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. in: Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting[C]. Sweden: Lulea University of Technology; August 1983:23 – 27, 439-453.
- [5] Cunningham CVB Fragmentation Estimations and the Kuz-Ram Model-Four Years on[C]. in: Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. USA. August 1987:23 – 26, 475-87.
- [6] Cunningham CVB. The Kuz-Ram Fragmentation Model-20 Years on[C]. in: Proceedings of 3rd World Conference on Explosives and Blasting. Brighton, UK. 2005:201 – 210, 13 – 16 September.
- [7] 吴新霞,彭朝辉,张正宇,等. Kuz-Ram 模型在堆石坝级配料开采爆破中的应用[J].长江科学院院报,1998,(04):40-42+46.
WU X X, PENG C H,ZHANG Z Y, et.al. The application of Kuz-ram model in grade material mining of rock-fill dam[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1998,(04):40-42+46.
- [8]刘定华.水布垭面板堆石坝石料爆破开采技术及试验研究[D].武汉大学,2005.
LIU D H.Study on techniques and experiments quarrying construction materials of concrete face rock-fill dam in SHUIBUYA projects[D].Wuhan University
- [9]赵华.基于采场生产成本的梅岭露天矿爆破参数优化[J].露天采矿技术,2020,35(4):12-14.
ZHAO H.Optimization of blasting parameters based on production cost at stope in Meiling Open-pit Mine[J].Opencast Mining Technology,2020,35(4):12-14.
- [10] S. Gheibie, H. Aghababaei , S.H. Hoseinie, Y. Pourrahimian. Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 967 – 973.
- [11] 朱子晗,尹岳降,陈明,等.长九神山灰岩矿开采爆破块度预测研究[J].爆破,2021,38(02):17-23+ 31. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.003
ZHU Z H,YIN Y J,CHEN M, et al.Study on Prediction of Blasting Fragmentation in Changjiu Shenshan Limestone Mine[J]. Blasting,2021,38(02):17-23+31. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.003
- [12]马建博,王仲琦,杨恩.基于 KUZ-RAM 修正模型的矿山爆破精度评估研究[J].中国安全生产科学技术, 2023,19(07):51-56. DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2023.07.008.
- MA J B, WANG Z Q,YANG E. Research on mine blasting accuracy evaluation based on KUZ-RAM modified model[J].Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(07):51-56. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.07.008.
- [13] Abiodun Ismail Lawal. A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 138 (2021) 104595. DOI: 10.1016/ j.ijrmms. 2020.104595.
- [14] 胡英国,饶宇,柴朝政,等. 岩体结构面对爆破块度的影响机制研究[J].岩土工程学报,2024, 46(09): 1870 -1879. DOI: 10.11779/CJGE20230410.
- HU Y G, RAO Y, CHAI C Z, et al. Influence mechanism of rock joints on blasting fragmentation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024, 46(09): 1870-1879. DOI: 10.11779/ CJGE20230410
- [15] 冷振东,范勇,涂书芳,等. 电子雷管起爆技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2023, 25(01): 142-154.
Leng Zhendong , Fan Yong , Tu Shufang , Zhou Guisong, Guo Yiming.Electronic Detonator Initiation Technology: Research Progress and Development Strategies[J]. Strategic Study of CAE,2023, 25(01): 142-154. DOI:10.15302/ J-SSCAE-2023. 07.001
- [16] 李顺波,杨仁树,杨军.精确延时对台阶爆破岩石破碎块度影响的数值模拟研究[J].爆破器材.,2016,45(03):11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.003.

- LI S B, YANG R S, YANG J. Numerical Simulation of the Impact of Precise Time Delay on Rock Fragmentation in Bench Blasting[J]. Explosive Materials, 2016, 45(03):11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.003.
- [17] YI C P, SJÖBERG J, JOHANSSON D, et al. A Numerical study of the impact of short delays on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100:250-254. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.026.
- [18] Hyung-Sik Yang, Piyush Rai. Characterization of fragment size vis-à-vis delay timing in quarry blasts[J]. Powder Technology 211(2011)120 – 126. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.04.006.
- [19] 赵毅波, 苏都都, 范勇, 等. 群孔起爆不同短延迟时间岩石破裂过程仿真与块度分析[J]. 爆破, 2023, 40(03):92-100+122. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.013.
- ZHAO Y B, SU D D, FAN Y et al. Simulation of Rock Fracture Process and Fragmentation Analysis with Different Short Delays for Group Hole Blasting[J]. Blasting, 2023, 40 (03):92-100+122. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.013.
- [20] A. Saadatmand Hashemi, P. Katsabanis. The Effect of Stress Wave Interaction and Delay Timing on Blast-Induced Rock Damage and Fragmentation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 2327 – 2346. DOI: 10.1007 /s00603 -019-02043-9.
- [21] 张阳光, 林飞, 赵彭, 等. 延时时间对露天深孔爆破破碎效果的影响研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(04):69-75. DOI: 10.19931/j.EB.20200224.
- ZHANG Y G, LIN F, ZHAO P et al. Research on the influence of delay time on fragmentation in open-pit deep hole blasting [J]. Blasting, 2021, 27 (04) :69-75. DOI: 10.19931/j.EB.20200224.
- [22] HONG Z X, TAO M, ZHAO M S, et al. Numerical modelling of rock fragmentation under high in-situ stresses and short-delay blast loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, Volume 293, 2023, 109727. DOI: 10.1016/ j.engfracmech.2023.109727.
- [23] 黄雪峰, 储亚坤, 杨赛群, 等. 露天矿山台阶爆破合理微差时间优选及应用[J]. 煤矿爆破, 2024, 42(01):15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3970.2024.01.004.
- HUANG X F, CHU Y K, YANG S Q, et al. Optimal selection and application of reasonable millisecond delay time for bench blasting in open-pit mines[J]. Coal Mine Blasting, 2024, 42(01):15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3970.2024.01.004.
- [24] 余良松, 周龙杰, 胡英国, 等. 两河口水电站级配料开采爆破孔间延时优选的试验研究[J]. 爆破, 2021, 38(04):81-88. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.012.
- YU L S, ZHOU L J, HU Y G, et al. Experimental Study on Delay Optimization between Blasting Holes in Grade Batching Mining of Lianghekou Hydropower Station[J]. Blasting, 2021, 38(04):81-88. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.012.
- [25] 胡英国, 饶宇, 柴朝政, 等. 岩体结构面对爆破块度的影响机制研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(09):1870-1879. DOI: 10.11779/CJGE20230410.
- HU Y G, RAO Yu, CHAI C Z, et al. Influence mechanism of rock joints on blasting fragmentation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(09): 1870-1879. DOI: 10.11779/CJGE20230410.
- [25] Riedel W, Thoma K, Hiermaier S. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a macroscopic concrete model for hydrocodes[C]. 9th International symposium interaction of the effect of munitions with structures, 1999.
- [26] Yi C P, Sjöberg J, Johansson D. Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68:167-173. DOI: 10.1016/j.tust.2017.05.030.
- [27] YI C P, JOHANSSON D, GREBERG J, et al. Effects of in situ stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 321–330. DOI: 10.1016/j.tust.2017.05.030.
- [28] 黄永辉, 孙博, 张智宇, 等. 岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(06). DOI: 10.15918/j.tbti1001-0645.2022.157

HUANG Y H, SUN B, ZHANG Z Y, et al. Optimization and Verification of Blasting Fragmentation Judgment Method for RHT Constitutive Model of Rock[J]. 2023, 43(06). DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.157.

[30] 胡英国, 李庚泉, 徐辰宇, 等. 筑坝级配料爆破开采数值仿真与应用[J]. 工程爆破, 2024(05). DOI: 10.19931/j.EB.20240205.

HU Y G, LI G Q, XU C Y, et al. Numerical simulation method and application of hydraulic grade material extraction at engineering scale[J]. Engineer Blasting, 2024(05). DOI: 10.19931/j.EB.20240205.

录用稿件，
非最终出版稿