

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.002

## 基于能量传输效率控制的 现场混装炸药与岩石匹配方法\*

崔雪姣<sup>1,2</sup>, 李启月<sup>1</sup>, 冷振东<sup>3</sup>, 姚颖康<sup>4</sup>, 周建敏<sup>2</sup>, 赵明生<sup>2,5</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002;  
3. 中国葛洲坝集团 易普力股份有限公司, 重庆 401121;  
4. 江汉大学 省部共建精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056; 5. 贵州大学 矿业学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 炸药与岩石的匹配关系对于提高炸药能量利用率、提升爆破效果与降低成本至关重要。首先分析了钻孔爆破中爆破能量的分配规律, 然后考虑现场混装炸药的非理想爆轰特性和岩石应变率效应对岩石钻孔爆破破坏分区计算模型进行了修正, 在此基础上建立了基于能量传输效率控制的现场混装炸药-岩石匹配模型, 最后结合现场试验对新的炸药-岩石匹配方法的合理性进行验证。结果表明: 新方法综合考虑了现场混装炸药非理想爆轰特性和岩石应变率效应对爆破破坏分区范围的影响, 可以直观地反映爆破破碎效果及能量有效利用率, 更加科学合理。不同炸药-岩石匹配条件下的爆破块度试验验证了匹配结果与传统波阻抗理论并不总是一致, 采用新的现场混装炸药-岩石匹配方法, 爆破粉矿率较原有炸药参数有明显的降低, 爆破大块率从6.7%下降至1%以下, 进一步验证了新方法的合理性。

**关键词:** 钻孔爆破; 破坏分区; 岩石-炸药匹配; 能量利用率

**中图分类号:** TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0009-07

## A Method for Matching On-site Mixed Explosives with Rocks based on Controlling Energy Transfer Efficiency

CUI Xue-jiao<sup>1,2</sup>, LI Qi-yue<sup>1</sup>, LENG Zhen-dong<sup>3</sup>, YAO Ying-kang<sup>4</sup>, ZHOU Jian-min<sup>2</sup>, ZHAO Ming-sheng<sup>2,5</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Poly Xinlian Blasting Engineering Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 3. Gezhouba Group Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 4. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 5. Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The matching relationship between explosives and rocks is crucial for improving the energy utilization efficiency of explosives, enhancing blasting effectiveness, and reducing costs. Firstly, this study analyzed the energy distribution during drilling and blasting operations. Then, the damage zone calculation model was revised considering

收稿日期 (Date of reception): 2024-08-05

网络首发日期 (Published online): 2024-08-23

作者简介: 崔雪姣 (1985-), 女, 博士研究生、高级工程师, 主要从事岩石动力学和工程爆破技术相关的研究, (E-mail) 205502038@csu.edu.cn。

通讯作者: 冷振东 (1989-), 男, 湖南益阳人, 博士、研究员, 主要从事岩石动力学与采矿技术相关的研究, (E-mail) zdleng@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51809016, 52064003); 重庆市自然科学基金 (cstc2022ycjh-bgzxm0079); 精细爆破国家重点实验室、爆破工程湖北省重点实验室联合开放基金资助 (PBSKL2022C02)

**About the author:** CUI Xue-jiao (1985-), female, Ph. D, senior engineer, mainly engaged in research related to rock dynamics and engineering blasting technology, (E-mail) 205502038@csu.edu.cn.

**Corresponding author:** LENG Zhen-dong (1989-), male, Ph. D, research professor, mainly engaged in research related to rock dynamics and mining technology, (E-mail) zdleng@whu.edu.cn.

**Fund Programs:** Chinese National Natural Science Foundation (Nos. 51809016, 52064003), Chongqing Municipal Natural Science Foundation (No. cstc2022ycjh-bgzxm0079), Joint Open Fund of State Key Laboratory of Precision Blasting and Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering (No. PBSKL2022C02)

the non-ideal detonation characteristics of explosives and the strain rate effect on rocks. And an on-site mixed explosives and rock matching model was then developed based on the control of energy transmission efficiency. Finally, field experiments were conducted to verify the rationality of the new explosive-rock matching method. The results show that the new method is more scientific and reasonable than traditional methods, and can intuitively reflect the blasting fragmentation effect and energy utilization efficiency, by taking account of the non-ideal detonation behavior of mixed explosives and the strain rate effects on rock damage partition. Blasting fragmentation tests under various explosive-rock matching conditions revealed discrepancies with the traditional wave impedance theory. By applying the new explosive-rock matching method, the percentage of fines was significantly reduced, and the boulder yield decreased from 6.7% to below 1%, further validating the method's effectiveness.

**Key words:** drilling and blasting; damage partition; explosive-rock matching; energy utilization rate

炸药和岩石之间的匹配关系一直以来是爆破工程中一个重要的研究领域,合理的炸药与岩体结构特性匹配对于提高炸药能量利用率、提升爆破效果与降低成本至关重要。常见的炸药岩石匹配理论主要有波阻抗匹配理论、全过程匹配理论、能量匹配理论,工程实践中使用最为广泛的仍然是波阻抗匹配理论<sup>[1-3]</sup>。传统的炸药与岩石波阻抗匹配理论在实际工程运用中存在局限性,仅凭爆破试验确定孔网参数及炸药类型的选择很难实现预期的爆破效果。

李夕兵等以传递到岩石介质中的爆炸能量最大为目标<sup>[4]</sup>,修正了合理匹配时岩石与炸药参数之间的关系。钮强和杨小林等对不同的预制岩石试件采用不同阻抗的炸药进行了一系列室内爆破模拟试验<sup>[5,6]</sup>,试验结果表明最佳匹配的炸药波阻抗并不一定等于试样的波阻抗。赖应得和郭子庭等根据简化的气体驱裂和能量分配模型<sup>[7,8]</sup>,提出了炸药与岩石全过程匹配的观点和实施办法。赵明生等设计了不同的炸药配方<sup>[9]</sup>,通过现场试验研究了不同混装炸药配方对炸药波阻抗的影响。冷振东等从爆破破碎机理出发<sup>[10]</sup>,在保证相邻炮孔间岩石充分破碎的前提下,通过对粉碎区的合理控制来确定钻孔爆破最优的炸药性能参数,获得了炸药与岩石的匹配关系。Amir Khademian 等采用不同炸药对花岗岩进行爆破试验<sup>[11]</sup>,分析了不同炸药爆炸性能对岩石破碎效果的影响规律,获得了不同炸药与岩石的匹配关系。Raina 等采用爆破压力测量方法探索了炸药与岩石之间的匹配关系<sup>[12]</sup>。冷振东等基于改进的非理想爆轰模型<sup>[13]</sup>,采用数值模拟研究了不同耦合介质不同装药结构下炸药与岩石的匹配关系。Li Tingting 等采用 LS-DYNA 数值模拟软件,研究了双孔爆破中岩石物理密度、弹性模量、泊松比、抗压强度和剪切模量与炸药性能的匹配关系<sup>[14]</sup>。

近年来人工智能等开始被运用到炸药与岩石匹配关系的研究中。赵明生和叶海旺等基于 BP 神经网络和模糊数学方法,建立了炸药与岩石匹配模

型<sup>[15,16]</sup>,解决了岩石的复杂多变性和爆破过程的复杂性等问题。王祥厚等利用径向基神经网络<sup>[17]</sup>,建立了台阶爆破块度的预测模型,实现了炸药与岩石破碎的匹配关系,为炸药与岩石相互作用机理研究提供了较好的研究思路。

炸药与岩石的匹配关系是一个复杂而精细的过程,涉及岩石性质、炸药性能、爆破参数以及爆破技术的综合考量。本文首先分析了钻孔爆破中爆破能量的分配规律,然后考虑炸药非理想爆轰特性和岩石应变率效应对岩石钻孔爆破破坏分区计算模型进行了修正,在此基础上建立了基于能量传输效率控制的现场混装炸药-岩石匹配模型,最后结合现场试验对新的炸药-岩石匹配方法的合理性进行验证。

## 1 岩石钻孔爆破中爆破能量分配规律

炮孔中炸药起爆后的破岩过程涉及不同种类的能量,按照划分方法的不同,计算的方法也不相同,根据冷振东等的研究<sup>[18]</sup>,可以采用以下简单的方法来区分,如图 1 所示。

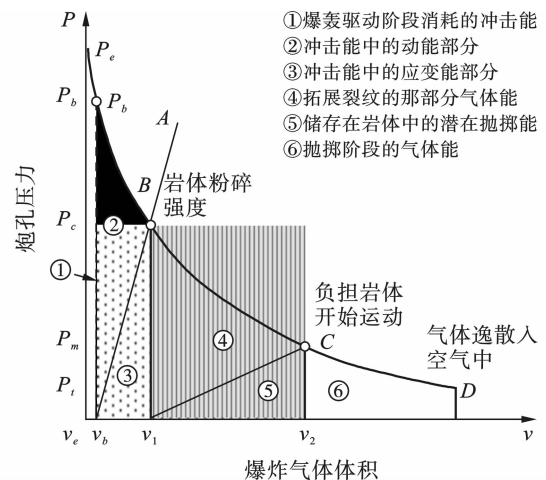


图 1 岩石钻孔爆破中涉及的不同种类的能量<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Different types of energy involved in rock drilling and blasting<sup>[18]</sup>

根据能量守恒定律,按照岩石钻孔爆破产生的最终效果,炸药释放的能量可以表示为以下形式<sup>[19,20]</sup>

$$E_t = E_F + E_S + E_K + E_{NM} \quad (1)$$

式中: $E_t$  为炸药释放的总能量; $E_F$  为产生裂纹消耗的能量; $E_S$  是转化为地震波的能量; $E_K$  是破碎岩块的动能; $E_{NM}$  为放热、空气冲击波和噪声等其他难以测量的能量。

Calnan、吴亮、李桐等人对钻孔爆破能量分配比例进行了统计分析<sup>[21-23]</sup>,如图 2 所示,由于不同学

者对爆破过程中的能量分类和定义不同,其能量类型和分配比例有着显著差异,但普遍认为实际工程中炸药破碎岩石的能量利用率仅为 15% ~ 30%,只有很少一部分用于岩石破碎和运动,大部分炸药能量转化为无用甚至有害的作用。由此可见,岩石钻孔爆破中炸药能量利用率还有很大的提升空间,这其中一个最重要的研究工作之一就是如果通过合理的炸药选型来实现炸药-岩石之间的最佳匹配,从而从源头提高炸药能量的有效利用率。

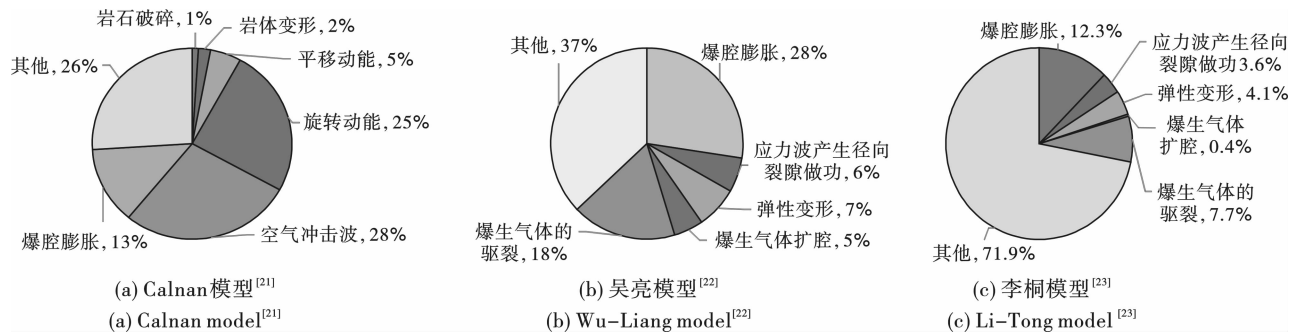


图 2 不同计算模型下的钻孔爆破能量分配比例

Fig. 2 Distribution of drilling and blasting energy under different calculation models

## 2 岩石钻孔爆破破坏分区计算模型的修正

岩体爆破破坏区的范围的确定是研究爆炸能量分布与利用的基础,炸药爆轰压力变化规律及岩体动态强度特性是研究炮孔近区岩体破坏特征的关键,采用合理的炸药爆轰模型和岩石动态强度模型直接决定了炮孔破坏区范围计算结果的正确性。

苏联学者 A H Ханукаев 给出的单个炮孔爆破形成的粉碎区和破裂区范围分别为<sup>[24]</sup>

$$r_c = \left( \frac{\rho c_p^2}{5\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{P_0}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{4}} r_b \quad (2)$$

$$r_f = \left[ \frac{vP_0}{(1-v)\sigma_{td}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (3)$$

式中: $r_c$  为粉碎区半径; $r_f$  为破裂区半径; $r_b$  为炮孔半径; $\sigma_{cd}$  和  $\sigma_s$  分别为岩体单轴和三轴抗压强度; $\sigma_{td}$  为岩体单轴抗拉强度; $\alpha$  为破碎区内应力波衰减指数; $\rho$  为岩体密度; $c_p$  为岩体纵波速度; $v$  为岩石泊松比; $P_0$  为炮孔压力。

岩体动态抗压强度与应变率的关系可近似统一表示为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_{cd} = \sigma_{cs} \dot{\epsilon}^{1/3} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{cd}$  和  $\sigma_{cs}$  分别为岩体动态和静态单轴抗压强度; $\dot{\epsilon}$  为作用在岩体上的应变率。

岩体动态抗拉强度一般可采用以下幂指数模型表示<sup>[23]</sup>

$$[\sigma_{td}] = \begin{cases} \sigma_{td} & , \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0 \\ \sigma_{td} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^\kappa \right] & , \dot{\epsilon}_0 \leq \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_1 \\ C & , \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{cd}$  和  $\sigma_{cs}$  分别为岩体动态和静态单轴抗压强度; $\dot{\epsilon}_0$ 、 $\dot{\epsilon}_1$  为抗拉强度变化临界值, $\kappa$  为变化指数。

对于耦合装药结构,作用在炮孔壁面上的初始平均压力为波阵面上爆轰压力的一半<sup>[25]</sup>

$$P_0 = \frac{\rho_0 D_c^2}{2(1+\gamma)} \quad (6)$$

式中: $D_c$  是炮孔内约束条件下爆轰速度; $\rho_0$  为炮孔内炸药的密度; $\gamma$  为等熵指数。

在爆破破坏分区的计算中的关键之一是正确确定炮孔压力值,常见的现场混装乳化炸药和现场混装铵油炸药的爆轰特性受到装药直径、耦合介质和岩体约束条件的影响,其爆轰过程存在明显的非理想爆轰特性。炸药爆速是和岩体约束条件相关的,Esen 通过试验数据统计分析得到了在无约束条件下<sup>[26]</sup>,炸药爆轰速度与装药直径存在以下关系

$$D_u = \frac{D_{CJ}}{1 + m\left(\frac{1}{d}\right) + n\left(\frac{1}{d}\right)^2} \quad (7)$$

式中： $m, n$  为拟合参数； $D_u$  为无约束条件下的炸药爆速； $D_{CJ}$  为  $CJ$  爆速； $d$  为炸药直径。

在炮孔内约束条件下，炸药爆轰速度可以通过以下经验公式计算

$$D_c = D_u \left[ 1 + \left( \frac{D_{CJ} - D_u}{D_{CJ}} \right) \left( \frac{M}{1 + aM^b} \right) \right] \quad (8)$$

式中： $M$  为炸药和约束介质的阻抗比， $M = (\rho_r v_p) / (\rho_0 D_u)$ ； $a, b$  为常数， $a, b$  的取值分别为 4.56 和 0.69； $\rho_r$  为约束介质的密度； $v_p$  为约束介质的纵波速度。

综上，新的岩体爆破破坏区计算模型主要做了 2 个修正：一是引入了应变率效应对岩体动态强度的影响，二是考虑了工业炸药的非理想爆轰特性，即考虑了装药直径、耦合介质和岩体约束条件等因素对炸药爆轰压力的影响。

### 3 基于能量传输效率控制的混装炸药-岩石匹配模型

据能量守恒原理，消耗在粉碎区上的爆炸能量可分为破碎表面能、变形能、岩石移动的动能以及其他形式的能量，其他形式的能量所占比例较小，在计算中忽略不计，那么消耗在粉碎区上的总能量为<sup>[10]</sup>

$$E_c = \pi (r_c^2 - r_b^2) \left[ \frac{6G_F}{x_k^S - x_k^I} \ln \frac{x_k^S}{x_k^I} + \frac{3(1-2\nu)\sigma_s^2}{2E} \right] - A_{IS} G_F \quad (9)$$

式中： $A_{IS}$  为原始结构面的面积； $G_F$  为岩石的单位表面能，即临界能量释放率， $x_k^S$  和  $x_k^I$  分别为粉碎区细颗粒粒径在级配曲线上的上、下限； $E$  为岩石的弹性模量。

从能量传输效率控制的角度来看，若消耗在粉碎区的能量过多，则用于粉碎区以外的开裂破碎的能量必然减少，导致炸药的有效利用率降低。因此要把粉碎区控制在合理范围，粉碎区范围的上限值<sup>[10]</sup>

$$1 \leq r_c \leq \sqrt{\frac{\eta_c E_c + A_{IS} G_F}{\pi \left[ \frac{6G_F}{x_k^S - x_k^I} \ln \frac{x_k^S}{x_k^I} + \frac{3(1-2\nu)\sigma_s^2}{2E} \right]} + r_b^2} \quad (10)$$

表 1 不同岩石的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of different rock type

岩石类型	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	纵波速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	波阻抗/ ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )
砂岩(弱风化)	103	8.3	3360	2.80	9.41E+6
泥岩(中风化)	32	2.5	2856	2.35	6.71E+6

式中： $\eta_c$  为消耗在粉碎区上的能量占爆炸总能量的百分比； $E_c$  为炸药能量。

另一方面，还需要有充分的爆破能量通过孔壁传递到粉碎区外围的岩石介质中去，使在岩石中形成的破裂区应足够大，保证相邻炮孔之间裂纹贯穿并保证裂纹有一定的重合度，实现相邻孔间岩石的充分破碎，如图 3 所示。

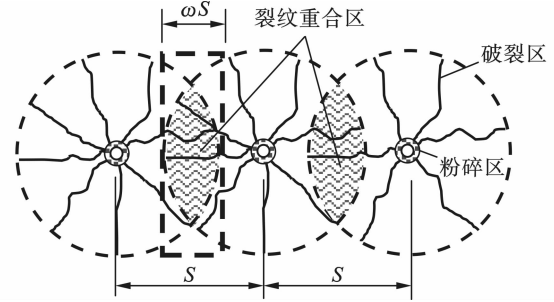


图 3 相邻炮孔之间裂纹重合区

Fig. 3 Overlapping area of cracks between adjacent boreholes

这就要求单个炮孔的爆破破裂区范围满足以下公式

$$r_f \geq \frac{1}{2}(1 + \omega)S \quad (11)$$

式中： $S$  为设计炮孔间距； $\omega$  为相邻炮孔之间裂纹之间的最小重合度。

根据上面的分析，现场混装炸药和岩石参数匹配合理时，粉碎区和破裂区的大小均应处于合理的范围。将公式(2)和(3)分别代入公式(10)、(11)中，可得最佳的炮孔压力范围值  $P_0$ ，进而由公式(6)~(8)可计算最优的炸药密度  $\rho_0$  和炸药爆速  $D_{CJ}$  等参数。这组匹配参数充分考虑了装药直径、耦合介质和岩体约束条件等因素对现场混装炸药的爆轰特性的影响。

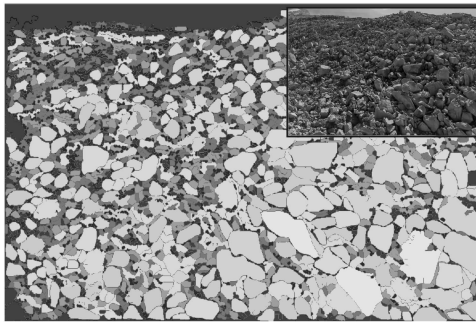
### 4 现场混装炸药-岩石匹配方法的试验验证

在某大型露天矿山选择不同的岩性区域，开展了基于能量传输效率控制的现场混装炸药与岩石匹配方法的验证性爆破试验，矿区主要有砂岩、泥岩两种类型，其基本物理力学参数如表 1 所示。

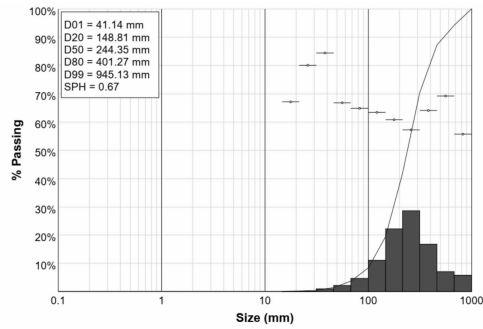
爆破试验前,矿区针对砂岩、泥岩分别采用的是现场混装乳化炸药(密度为  $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,爆速  $5250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和现场混装铵油炸药(密度为  $0.84 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,爆速  $4230 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),采用前文所述的现场混装炸药与岩石匹配方法给出合适的炸药性能参数如表 2 所示。同类岩石的对比试验中单孔药量

保持不变,即不同实验组的炸药单耗是基本相同的。

爆破后采用 WipFrag 块度分析系统对不同炸药-岩石匹配条件下的爆破块度进行统计分析,如图 4 所示,证实了最优的炸药-岩石阻抗匹配区间与传统波阻抗理论并不一致,在中硬岩中已经无法通过波阻抗匹配方法得到合适波阻抗的炸药。

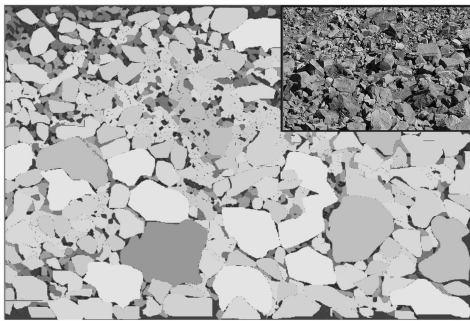


爆破块度图像分析处理  
Image analysis of blasting fragmentation

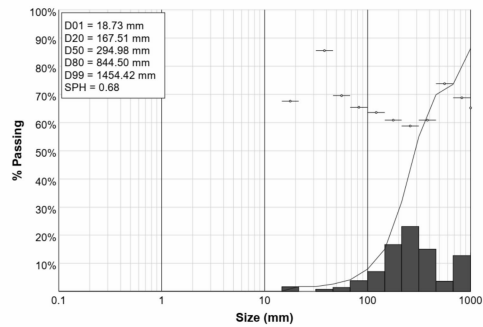


爆破块度分布曲线  
Blasting fragmentation distribution curve

(a) 本文炸药-岩石匹配方法  
(a) The method proposed in this article

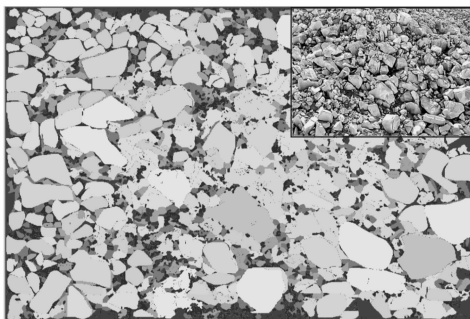


爆破块度图像分析处理  
Image analysis of blasting fragmentation

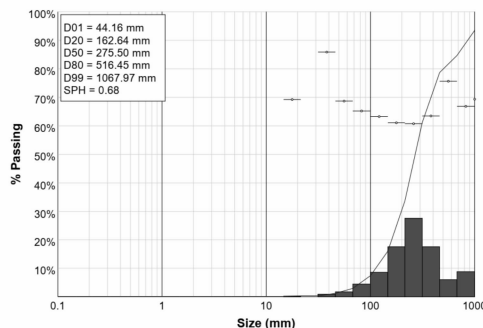


爆破块度分布曲线  
Blasting fragmentation distribution curve

(b) 传统波阻抗匹配方法  
(b) Traditional impedance matching method



爆破块度图像分析处理  
Image analysis of blasting fragmentation



爆破块度分布曲线  
Blasting fragmentation distribution curve

(c) 原有炸药参数  
(c) Original explosive parameters

图 4 不同炸药匹配参数下的中风化泥岩爆破块度分析

Fig. 4 Fragmentation analysis under different explosive parameters in moderately weathered mudstone

表2 不同匹配方法下的炸药参数(单耗保持不变)

Table 2 Explosive parameters under different matching methods( with constant unit consumption)

岩石类型	匹配方法	爆速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	波阻抗/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	爆破平均 块度/m
砂岩(弱风化)	本文匹配方法	3801	0.85	$3.23\text{E}+6$	0.307
	传统波阻抗匹配方法	7840	1.20	无法提供该炸药	/
	原有炸药参数	5250	1.14	$5.99\text{E}+6$	0.355
泥岩(中风化)	本文匹配方法	3210	0.76	$2.44\text{E}+6$	0.244
	传统波阻抗匹配方法	5593	1.20	$6.71\text{E}+6$	0.295
	原有炸药参数	4230	0.84	$3.55\text{E}+6$	0.275

在单耗一致的前提下,软岩爆破中尽管铵油炸药相对乳化炸药的波阻抗匹配性更差,但是往往铵油炸药反而比乳化炸药的爆破效果更优。采用传统波阻抗匹配方法选择得到的炸药的密度和爆速过大,导致装药段主要集中在炮孔底部,在中风化泥岩的爆破试验效果表现为粉矿偏多,上部爆破大块明显,尺寸超过1.0 m的大块比例达13%。采用本文新的炸药岩石匹配方法,爆破粉矿率较原有炸药参数有明显的降低,爆破大块从原有炸药参数的6.7%下降至1%以下,验证了基于能量传输效率控制的混装炸药-岩石匹配方法是合理性。

## 5 结论

本文分析了钻孔爆破中爆破能量的分配规律,从爆破破碎机理出发,提出在此基础上建立基于能量传输效率控制的现场混装炸药-岩石匹配模型,主要得出以下结论:

(1)炸药爆炸所释放出的能量只有很少的一部分被用于破碎和抛掷岩石,大部分炸药能量转化为无用甚至有害的作用,岩石钻孔爆破中炸药能量利用率还有很大的提升空间。

(2)新方法综合考虑了装药直径、耦合介质和岩体约束条件等因素对现场混装炸药的非理想爆轰特性的影响,以及岩石应变率效应对爆破破坏分区范围的影响,可以直观地反映爆破破碎效果及能量有效利用率,更加科学合理,可操作性强。

(3)不同炸药-岩石匹配条件下的爆破块度试验证实了匹配结果与传统的波阻抗理论并不总是一致,采用新方法得到的炸药参数条件下的爆破粉矿率和大块率均有显著下降,验证了基于能量传输效率控制的现场混装炸药-岩石匹配方法的合理性。

## 参考文献 (References)

[1] 冷振东. 岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D].

武汉:武汉大学,2017.

- [1] LENG Zhen-dong. Explosion energy release and transmission mechanism in rock blasting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [2] NICHOLLS H R. Coupling Explosive Energy to Rock[J]. Geophysics, 1962, 27(3): 305-316.
- [3] 冷振东, 高启栋, 卢文波, 等. 岩石钻孔爆破能量调控理论与应用技术研究进展[J]. 金属矿山, 2023(5): 64-76.
- [3] LENG Zhen-dong, GAO Qi-dong, LU Wen-bo, et al. Research progress in theory and technology of energy regulation for rock drilling and blasting [J]. Metal Mine, 2023(5): 64-76. (in Chinese)
- [4] 李夕兵, 古德生, 赖海辉, 等. 岩石与炸药波阻抗匹配的能量研究[J]. 中南大学学报, 1992, 32(1): 18-23.
- [4] LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui, et al. The energy analysis on matching of acoustic impedance between rock and explosive[J]. Journal of Central South University, 1992, 32(1): 18-23. (in Chinese)
- [5] 钮强, 熊代余. 探索炸药岩石匹配的试验研究[J]. 爆破, 1987, 4(4): 3-8.
- [5] NIU Qiang, XIONG Dai-yu. Experimental study on exploring the matching of explosives and rocks[J]. Blasting, 1987, 4(4): 3-8. (in Chinese)
- [6] 杨小林. 炸药岩石阻抗匹配与爆炸应力, 块度的试验研究[J]. 煤炭学报, 1991, 16(1): 89-96.
- [6] YANG Xiao-lin. Study of blasting stress, size and matched impedance between explosive and rock [J]. Journal of China coal society, 16(1): 89-96. (in Chinese)
- [7] 赖应得. 论炸药和岩石的能量匹配[J]. 工程爆破, 1995, 1(2): 22-26.
- [7] LAI Ying-de. On energy match between explosive and rock [J]. Engineering Blasting, 1995, 1(2): 22-26. (in Chinese)
- [8] 郭子庭, 吴从师. 炸药与岩石的全过程匹配[J]. 矿冶工程, 1993, 13(3): 11-15.
- [8] GUO Zi-ting, WU Cong-shi The explosive-rock matching throughout the blasting process [J]. Mining and Metallur-

- gical Engineering, 1993, 13(3): 11-15. (in Chinese)
- [9] 赵明生, 黄胜松, 周建敏, 等. 混装乳化炸药配方对炸药-岩石匹配效果影响研究[J]. 爆破, 2021, 38(4): 124-128, 179.
- [9] ZHAO Ming-sheng, HUANG Sheng-song, ZHOU Jian-ming, et al. Study on influence of formula of mixed emulsion explosive on matching effect of explosive and rock [J]. Blasting, 2021, 38(4): 124-128, 179. (in Chinese)
- [10] 冷振东, 卢文波, 严鹏, 等. 基于粉碎区控制的钻孔爆破岩石-炸药匹配方法[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11): 28-35, 47.
- [10] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. A new theory of rock-explosive matching based on the reasonable control of crushed zone [J]. Engineering, 2014, 16(11): 28-35, 47. (in Chinese)
- [11] AMIR Khademian, RAHEB Bagherpour. Environmentally sustainable mining through proper selection of explosives in blasting operation[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(4): 1-11.
- [12] A K Raina, R Trivedi. Exploring rock-explosive interaction through cross blasthole pressure measurements[J]. Geotech Geol Eng, 2019(37): 651-658.
- [13] 冷振东, 赵明生, 卢文波, 等. 基于非理想爆轰的炸药-岩石相互作用过程[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 1-9, 32.
- [13] LENG Zhen-dong, ZHAO Ming-sheng, LU Wen-bo, et al. Explosive-rock interactions based on non-ideal detonation[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 1-9, 32. (in Chinese)
- [14] LI T, NIU X, FEI A, et al. Numerical simulation for the matching effect of rock parameters on explosives and rocks[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 304(5): 052110.
- [15] 赵明生, 徐海波, 张敢生. 基于神经网络的炸药与岩石匹配的研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2009, 11(1): 1-3.
- [15] ZHAO Ming-sheng, XU Hai-bo, ZHANG Gan-sheng. Research into the matching between explosives performance and rock strength based on the neural network[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2009, 11(1): 1-3. (in Chinese)
- [16] 叶海旺, 叶结旺, 朱瑞赓. 基于模糊推理的炸药与岩石智能匹配系统研究[J]. 爆破, 2003(4): 5-6.
- [16] YE Hai-wang, YE Jie-wang, ZHU Rui-gong. Study on intelligent matching system of explosive and rock based on fuzzy inference[J]. Blasting, 2003(4): 5-6. (in Chinese)
- [17] 王祥厚, 李程远. 用神经网络建立台阶爆破块度的预测[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001(5): 8-12.
- [17] WANG Xiang-hou, LI Cheng-yuan. The neural network of forecast of breaking size of rock for the open cast terrace blasting[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2001(5): 8-12. (in Chinese)
- [18] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Explosion energy transmission under side initiation and its effect on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 86: 245-254.
- [19] SANCHIDRI N J A, SEGARRA P, L PEZ L M. Energy components in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(1): 130-147.
- [20] KANCHIBOTLA SS. Models for assessing the blasting performance of explosives [D]. The University of Queensland, 1994.
- [21] CALNAN JT. Determination of explosive energy partition values in rock blasting through small-scale testing [D]. University of Kentucky, 2015.
- [22] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 735-739.
- [22] WU Liang, LU Wen-bo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 735-739.
- [23] LI Tong, CHEN Ming, WEI Dong, et al. Disturbance effect of blasting stress wave on crack of rock mass in water-coupled blasting[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(6): 2939-2951.
- [24] XAHYKAEB AH. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 33-34.
- [24] XAHYKAEB AH. The physical process of mineral rock blasting[M]. Translated by Liu Dianzhong, Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980: 33-34. (in Chinese)
- [25] 冷振东, 卢文波, 陈明, 等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 101-107.
- [25] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 101-107. (in Chinese)
- [26] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(4): 485-495.