

DOI: 10.11779/CJGE20230714

地应力对岩体爆破块度分布特征的影响研究

曹泽铭¹, 杨建华^{*1}, 叶志伟¹, 冷振东², 姚池¹, 张小波¹

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 中国葛洲坝集团易普力股份有限公司, 重庆 401121)

摘要: 深地工程高地应力岩体爆破开挖时常出现岩体破碎难、大块率高的问题。为深入理解这一问题, 采用动力有限元方法模拟不同地应力条件下的岩体爆破开裂过程, 引入爆生裂纹分形维数和岩体爆破块度图像识别方法, 研究地应力对岩体爆破爆生裂纹分布和块度分布特征的影响, 并通过不同埋深和地应力水平下的岩体爆破工程实例进行验证。研究表明: 地应力对炮孔远区爆生裂纹扩展的抑制作用以及非静水地应力对爆生裂纹扩展的导向作用, 导致了岩体爆破大块的产生; 随着地应力水平的提高, 岩体爆破平均块度尺寸、最大块度尺寸、块度不均匀系数和大块率均显著增加; 炮孔近区的爆生裂纹扩展几乎不受地应力的影响, 从而使得地应力对岩体爆破小块度的尺寸影响不大; 垂直于炮孔轴向的两个主地应力差别较大时, 不利于爆破破岩, 侧压力系数约为 0.75 时, 岩体破碎效果较好。

关键词: 深地工程; 爆破; 地应力; 爆生裂纹; 爆破块度

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2202-10

作者简介: 曹泽铭(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石动力学及工程爆破数值模拟方面的研究工作。E-mail: 406000210058@email.ncu.edu.cn。

Influences of in-situ stress on distribution characteristics of rock blasting fragmentation

CAO Zeming¹, YANG Jianhua¹, YE Zhiwei¹, LENG Zhendong², YAO Chi¹, ZHANG Xiaobo¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Gezhouba Group Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: During blasting excavation of deep rock masses under high in-situ stress, the rock masses are often difficult to be fully broken, frequently resulting in large fragments. To understand this problem more deeply, the blast-induced rock cracks under various in-situ stress conditions are simulated by using the dynamic finite element method. The fractal dimension theory and the image recognition method are introduced to investigate the influence of in-situ stress on the distribution characteristics of rock blasting fragmentation. The project cases blasted at different depths and in-situ stress levels are also employed to study this problem. The results show that the generation of large fragments during blasting in deep rock masses owes to the inhibiting effect of in-situ stress on the growth of blast-induced cracks in the far field of blastholes, and the orienting effects of the non-hydrostatic in-situ stress on the propagation of blast-induced cracks. As the in-situ stress level increases, average size, the maximum size, nonuniform coefficient and large block rate of rock fragmentation increase significantly. The size of the smaller fragments is little affected by the in-situ stress as these fragments are generated in the vicinity of blastholes and the propagation of blasting cracks in this zone is almost unaffected by the in-situ stress. When the maximum and minimum principal in-situ stresses perpendicular to the blasthole axis differ greatly, it is adverse to rock fragmentation by blasting. In comparison, a better rock fragmentation is achieved when the lateral coefficient of the principal in-situ stresses is about 0.75.

Key words: deep rock engineering; blasting; in-situ stress; blast-induced crack; blasting fragmentation

0 引言

随着川藏铁路、雅鲁藏布江下游水电开发、国家水网等战略工程的实施推进, 中国水利、交通等行业深地工程建设将更加趋于常态化, 深地工程的典型特征是岩体承受高地应力^[1]。钻孔爆破法因对地质条件

适应性强且成本低, 是深地工程高地应力岩体开挖的主要手段。但由于深部岩体爆破的理论与技术体系尚

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179102, 51969015); 江西省自然科学基金项目(20224BAB214079, 20232BAB204090)

收稿日期: 2023-07-27

***通信作者:** (E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn)

不完善, 相关行业在深埋洞室开挖爆破方案选择和技术参数设计方面, 仍然参照浅埋洞室的技术规范, 没有充分考虑高地应力对岩体爆破过程的影响, 从而导致破岩效果不理想, 常出现岩体破碎难、大块率高等问题(如图 1), 由此降低了开挖效率、增加了工程成本。因此, 探究地应力对岩体爆破块度的影响, 对于深地工程开挖爆破设计参数优化, 改善岩体爆破破碎效果具有重要意义。



图 1 深埋隧洞开挖爆破后的大块岩石

Fig. 1 Large fragments created by blasting in a deep tunnel

随着岩体工程向深部推进, 地应力对爆破破岩的影响日益受到国内外研究者的关注, 国内外学者主要采用室内试验和数值模拟的方法开展了相关研究。在室内试验方面, He 等^[2]研究了双向受压花岗岩试件中炸药爆炸岩体应变场的演化过程, Mitchell 等^[3]研究了围压作用下圆柱形斑岩试件的爆破开裂模式, Yang 等^[4]分析了地应力方向对预裂爆破成缝的影响, 张凤鹏等^[5]研究了单向静应力对砂岩试件爆破漏斗形成的影响; 徐颖等^[6]分析了初始地应力条件下装药不耦合系数对爆破裂纹扩展的影响。试验研究一致表明, 地应力对爆生裂纹的扩展起抑制作用, 非静水地应力条件下, 裂纹主要沿最大主应力方向扩展。在数值模拟方面, 一批学者采用 FEM、SPH 及其耦合方法, 研究了地应力作用下单孔爆破破裂区分布和群孔爆破炮孔间裂纹扩展贯通过程^[7]; Han 等^[8]采用 FEM-DEM 方法研究了地应力对周边孔爆破成型的影响; Córdova 等^[9]采用基于连续-非连续分析方法的 HSBM 爆破模型研究了地应力作用下岩体结构面和自由面对爆破成型的影响。数值模拟得到了与室内试验类似的结论, 且发现随着地应力水平的提高, 炮孔间难以形成贯通裂缝, 开挖成型效果较差。地应力对岩体爆破破岩过程存在影响已被国内外研究者所证实, 但目前的研究主要集中在地应力对爆生裂纹传播和分布特征影响方面, 地应力对爆破破岩块度分布特征的影响, 目前还

鲜有研究报道; 而有关爆破块度的研究, 主要针对的是浅部岩体^[10-11], 地应力未予以考虑。

本文首先采用动力有限元方法模拟不同地应力条件下的岩体爆破开裂过程, 通过分形维数定量分析地应力对爆生裂纹分布的影响; 然后引入 ImageJ 图像处理方法, 分析地应力对岩体爆破块度分布特征的影响; 最后结合不同埋深岩体爆破块度现场实测结果的对比分析, 论证数值模拟分析结果的可靠性, 为深地工程高地应力岩体开挖爆破参数设计提供理论依据。

1 数值模型与参数

1.1 数值模型

深埋隧洞全断面爆破开挖往往是几十甚至上百个炮孔分段起爆, 岩体爆破破碎过程异常复杂。为便于分析, 本文仅以不含自由面的掏槽孔爆破为例进行研究, 将掏槽孔爆破简化为 4 个炮孔同时起爆, 如图 2 所示。炮孔直径 42 mm, 炮孔间距 1 m, 采用耦合装药结构, 药卷直径等于炮孔直径。为了获得清晰的爆生裂纹来分析爆破块度, 模型的最大单元尺寸设置为 2.5 mm。此时若采用三维数值模型开展研究, 在炮孔长度为 1 m 的情况下, 模型单元数将达到 10^9 量级, 这导致计算效率十分低下甚至无法计算。为同时保障计算精度和计算效率, 本文采用平面应变模型开展数值模拟研究。模型尺寸为 5 m×5 m, 炮孔距模型边界 2 m, 模型四周均设置为无反射边界。

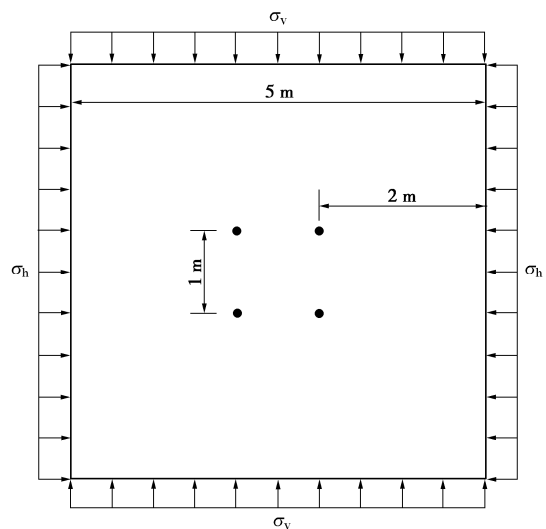


图 2 高地应力岩体爆破计算模型

Fig. 2 Computational model for rock blasting under high in-situ stress

在模型四周施加水平向应力 σ_h 和竖直向应力 σ_v 模拟岩体所承受的地应力。本文分静水地应力场 ($\sigma_h = \sigma_v$) 和非静水地应力场 ($\sigma_h \neq \sigma_v$) 两类工况进行研究, 静水地应力条件下取 $\sigma_h = \sigma_v = 0, 10, 20$,

30, 40, 50 MPa, 分析地应力水平对岩体爆破块度的影响; 非静水地应力条件下, 保持竖直向地应力 $\sigma_v=30$ MPa 不变, 侧压力系数 $\lambda=\sigma_h/\sigma_v$ 分别取为 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 分析地应力各向异性对岩体爆破块度的影响。

1.2 材料模型与参数

采用动力有限元程序 LS-DYNA 模拟高地应力岩体爆破, 其中采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程模拟炸药爆轰过程, JWL 状态方程描述了爆轰产物压力、体积和能量之间的关系:

$$P=C_1\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1v}+C_2\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2v}+\frac{\omega E_0}{V}。$$
 (1)

式中: P 为爆轰产物压力; V 为爆轰产物相对体积; E_0 为爆轰产物初始内能密度; C_1 , C_2 , R_1 , R_2 和 ω 为炸药常数, 采用的炸药材料参数见表 1^[12]。

RHT 动力损伤本构模型因能同时反映材料的压剪和张拉损伤破坏, 且能体现材料的应变率效应、应变硬化和损伤软化等现象, 近年来被广泛应用于岩体爆破的数值模拟研究。本文采用 RHT 模型模拟爆炸冲击和地应力作用下岩体的损伤破坏效应, 采用的花岗岩 RHT 模型参数见表 2^[13]。

1.3 材料模型与参数验证

为说明上述材料模型与参数选择的合理性, 采用 Dehghan 等^[14]的花岗岩爆破试验结果进行验证。该试

验采用直径为 144 mm、高度为 150 mm 的花岗岩样进行单孔爆破试验, 在岩样中心钻设直径为 6.45 mm 的炮孔, 孔内放置直径为 1.65 mm 的 PETN 炸药起爆, 爆破后花岗岩样中部横断面的裂纹分布如图 3 (a) 所示。采用上述炸药和岩石材料的模型与参数, 模拟 Dehghan 等^[14]的花岗岩单孔爆破试验, 得到的爆生裂纹分布如图 3 (b) 所示。可以看到, 炮孔周围的岩体根据破坏形式的不同可以分为粉碎区、径向裂隙区和自由边界应力波反射形成的环向裂隙区, 如图中①②③所示。在试验中, 这 3 个区域的尺寸大致为 $3.7r_b$, $13.1r_b$, $5.6r_b$ (r_b 为炮孔半径); 在数值模拟中, 这 3 个区域的尺寸分别为 $3.4r_b$, $12.9r_b$, $6.0r_b$, 二者吻合较好, 表明本文的材料模型和参数是合理的。

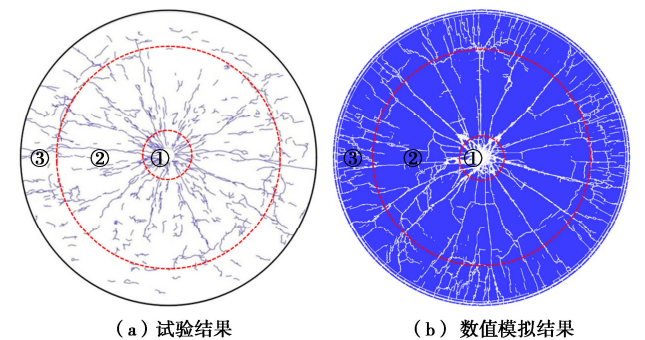


图 3 花岗岩单孔爆破裂纹分布试验与数值模拟结果对比
Fig. 3 Comparison of blast-induced cracks in granite between experimental and numerical results

表 1 炸药材料参数

Table 1 Parameters of explosive

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	C_1/GPa	C_2/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
880	5170	348.6	11.29	7.0	2.0	0.24	5.025

表 2 花岗岩 RHT 模型参数

Table 2 RHT model parameters of granite

参数	数值	参数	数值
密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2660	初始孔隙度 α_0	0
压碎压力 p_{ci}/MPa	125	孔隙度指数 N	3.0
压实压力 p_{comp}/GPa	6.0	参考压缩应变率 EOC/s^{-1}	3×10^{-5}
Hugoniot 多项式参数 A_1/GPa	25.7	参考拉伸应变率 EOT/s^{-1}	3×10^{-6}
Hugoniot 多项式参数 A_2/GPa	37.84	失效压缩应变率 EC/s^{-1}	3×10^{25}
Hugoniot 多项式参数 A_3/GPa	21.29	失效拉伸应变率 ET/s^{-1}	3×10^{25}
侵蚀塑性应变 EPSF	2.0	最小失效应变 EPM	0.015
状态方程参数 B_0	1.22	压缩应变率指数 β_c	0.026
状态方程参数 B_1	1.22	拉伸应变率指数 β_t	0.007
状态方程参数 T_1/GPa	25.7	压缩屈服面参数 g_c^*	0.53
状态方程参数 T_2	0.0	拉伸屈服面参数 g_t^*	0.7
剪切模量 G/GPa	21.9	失效面参数 A	2.44
单轴抗压强度 f_c/MPa	167.8	剪切模量缩减系数 ξ	0.5
拉压强度比 f_t^*	0.04	损伤参数 D_1	0.04
剪压强度比 f_s^*	0.21	损伤参数 D_2	1.0
失效面指数 n	0.76	残余应力强度参数 A_r	0.25
拉压子午比参数 Q_0	0.68	残余应力强度指数 n_r	0.62
罗德角相关参数 B	0.05	Grunesien 参数 Γ	0.0

2 爆生裂纹分形维数计算及爆破块度统计方法

2.1 爆生裂纹分形维数计算方法

相关研究表明, 爆炸载荷作用下岩石断裂面粗糙程度、爆生裂纹分布以及破碎块度分布特征都满足分形原理, 可通过分形维数定量表征岩石爆破破坏程度, 分形维数越大, 岩石破坏程度越高^[15]。鉴于爆炸荷载作用下炮孔近区岩体裂纹分布异常复杂, 难以定量描述, 本文引入分形维数定量分析地应力对爆生裂纹分布特征的影响。

目前, 分形维数的计算方法主要有 Hausdorff 维数、自相似维数、容量维数、计盒维数等。其中, 计盒维数由于能直观地反映目标物在研究区域的占有程度, 且计算方法相对直观简便, 在分形研究中得到了广泛的应用。采用计盒法计算爆生裂纹分形维数的流程如图 4 所示, 将数值模拟的爆生裂纹图像由边长为 δ 的盒子覆盖, 统计所有包含裂纹像素点的盒子数 $N(\delta)$, 逐步缩小盒子的边长 δ , 当 δ 趋近于 0 时, 可得爆生裂纹分形维数 D_f ^[16]:

$$D_f = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(\delta)}{\lg \delta} \quad (2)$$

由于实际计算中很难使盒子尺寸 δ 趋近 0, 通常在求出多组的 $\lg \delta$ 与 $\lg N(\delta)$ 数据后, 通过最小二乘法对数据点 $(\lg \delta, \lg N(\delta))$ 进行线性拟合得到拟合直线方程式 (3), 直线方程的斜率即为分形维数 D_f 。

$$\lg N(\delta) = -D_f \lg \delta + b \quad (3)$$

式中: b 为拟合直线方程的截距。

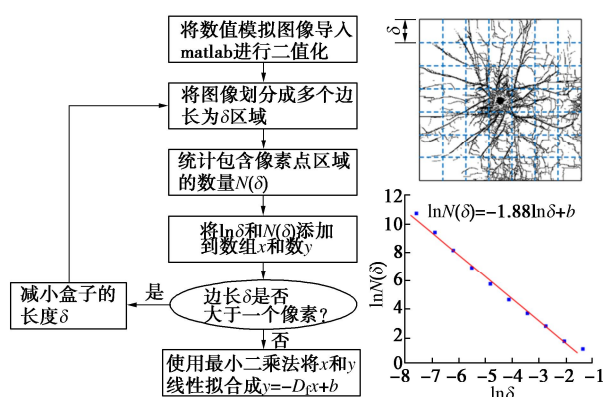


图 4 爆生裂纹计盒维数计算流程图

Fig. 4 Flow chart for calculating box-counting fractal dimension of blast-induced cracks

2.2 爆破块度统计方法

爆破产生的裂纹纵横交错, 将完整的岩体分割成不同形状和尺寸的岩块, 通过统计裂纹间各岩块的尺寸, 即可得到爆破破岩块度分布。由于被分割成的岩

块众多, 采用 ImageJ 图像处理方法统计岩体爆破块度, 流程如图 5 所示。首先将数值模拟得到的岩体爆破裂纹分布图像转换成 8 bit 深度灰度图, 灰度图每个像素点的灰度值为 0~255。然后选取灰度图像素阈值, 将大于该阈值的灰度转换为黑色像素点, 小于该阈值的灰度转化为白色像素点, 得到只包含 0 和 255 像素点的二值图, 图 5 中黑色部分为爆生裂纹, 白色部分为岩块。之后利用 ImageJ 的颗粒分析功能对二值图进行边缘检测, 检测出所有被裂纹分割而成的岩块边界, 得到各个岩块的图像。最后导出所有岩块图像的几何尺寸, 按照等面积计算得到各个岩块的等效直径, 统计所有岩块的块度分布。

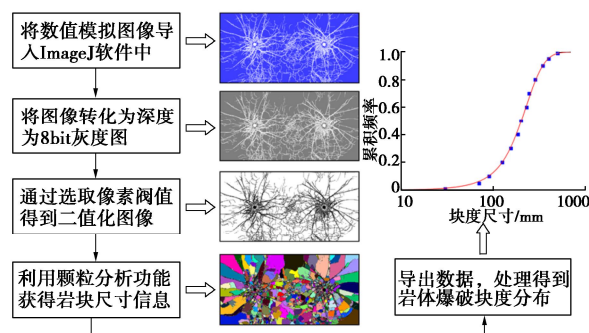


图 5 基于 ImageJ 图像处理的岩体爆破块度统计流程图

Fig. 5 Flow chart for analyzing rock blasting fragmentation based on ImageJ

大量现场实测数据表明, 三参数广义极值 (GEV) 分布函数可以较好地描述岩体爆破块度分布^[16]。通过 ImageJ 图像处理获得各个岩块的特征尺寸后, 采用 GEV 函数拟合得到岩体爆破块度分布曲线。GEV 函数的基本方程为

$$F = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (4)$$

式中: x 为岩块的等效直径; μ 为与块度尺寸分布有关的位置参数; σ 为与块度尺寸分布范围有关的比例参数; ξ 为拟合曲线的形状参数; F 为等效直径小于 x 的岩块质量在总岩块质量中的占比, 也称为尺寸 x 的累积频率。

3 静水地应力条件下的岩体爆破块度分布

3.1 不同静水地应力水平下的爆生裂纹分布

不同静水地应力条件下, 岩体爆生裂纹分布如图 6 所示。在地应力为 0~20 MPa 较低水平下, 随着地应力水平的提高, 岩体爆生裂纹分布没有明显变化, 地应力对岩体爆破开裂过程的影响不大。当地应力继续增加, 炮孔周围径向裂纹的数量开始明显减少, 长

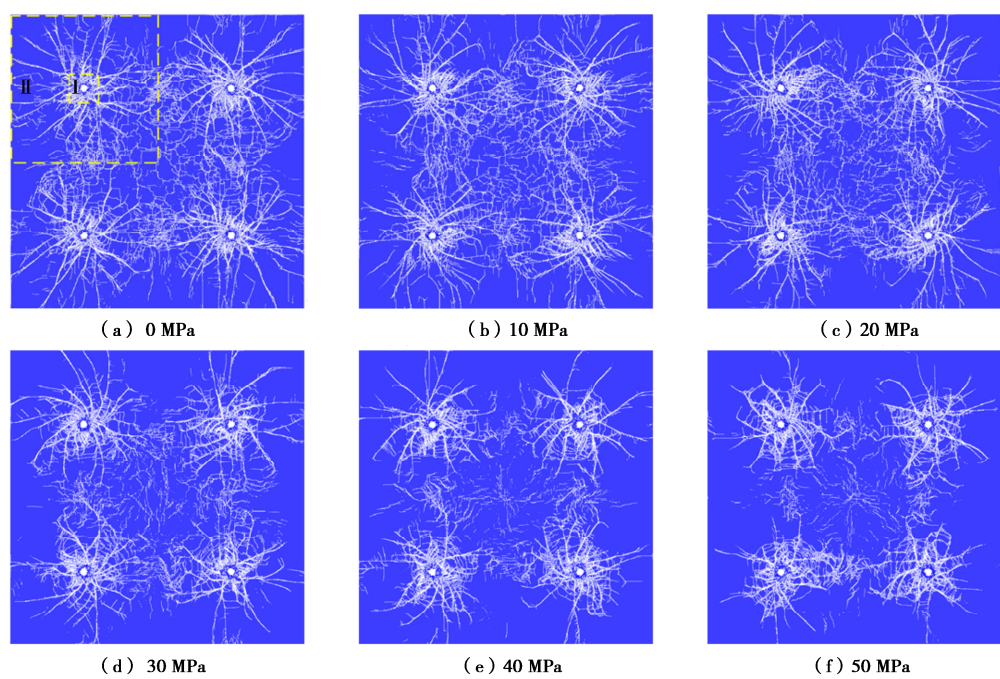


图 6 不同地应力水平下的岩体爆生裂纹分布

Fig. 6 Distributions of blast-induced cracks in rock under different in-situ stress levels

度变短，模型中心区域的裂纹密度也显著降低。特别是当地应力达到 50 MPa 后，中心区域仅有稀疏的爆生裂纹，此处的岩体没有充分破碎，必将形成较大的岩块。这表明，随着地应力水平的提高，爆生裂纹的传播扩展受到抑制，进而影响岩体爆破破碎效果。炮孔周围岩体的爆生裂纹密集，而远离炮孔区域的爆生裂纹较为稀疏，为研究地应力对不同区域岩体爆生裂纹传播的影响，将炮孔 0.1 m 范围（约 5 倍炮孔半径）划分为 I 区，0.1~0.5 m 范围划分为 II 区，如图 6（a）所示。

不同地应力水平下，I 区和 II 区的爆生裂纹分形维数如图 7 所示。当地应力从 0 增大到 50 MPa，I 区的爆生裂纹分形维数几乎不变，而 II 区的爆生裂纹分形维数从 1.58 下降到了 1.41，II 区岩体破碎程度明显降低。定义不同地应力水平下的爆生裂纹面积与无地应力情况下的爆生裂纹面积之比为裂纹面积比，图 7 给出了不同地应力水平下 I 区和 II 区岩体的爆生裂纹面积比。当地应力从 0 提高到 50 MPa，I 区的裂纹面积没有明显的变化，而 II 区的裂纹面积比从 1.0 下降到了 0.67，裂纹面积减小了 33%，II 区岩体破碎程度显著降低，与分形维数的分析结论一致。这表明，地应力对炮孔近区的爆生裂纹传播几乎没有影响，主要抑制炮孔远区的裂纹扩展。这是由于炮孔近区的爆炸冲击波压力远高于地应力，地应力对爆炸冲击波驱动的岩体裂纹扩展抑制作用不明显；随着爆炸冲击波的快速衰减，在炮孔远区爆炸应力波的强度与地应力处于同一量级，地应力对爆生裂纹扩展的抑制作用才得以体现。

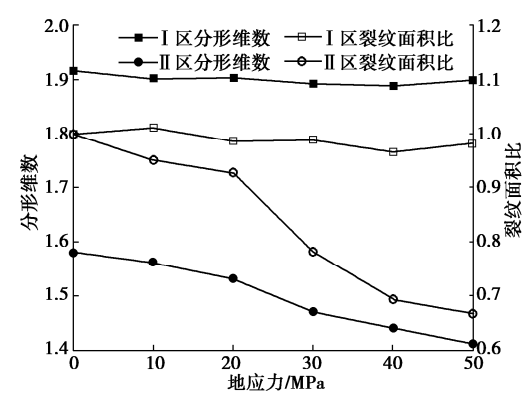


图 7 不同地应力水平下爆生裂纹分形维数和裂纹面积比

Fig. 7 Fractal dimensions and scaled areas of blast-induced cracks under different in-situ stress levels

3.2 地应力水平对爆破块度分布特征的影响

采用上述岩体爆破块度统计方法，得到不同地应力水平下的岩体爆破块度分布，如图 8 所示。采用式（4）三参数广义极值（GEV）分布函数对不同地应力水平下的爆破块度分布进行拟合，相关系数的平方均达到了 0.97 以上，说明该函数能够准确地描述岩体爆破块度分布特征。随着地应力水平的提高，爆破块度分布曲线整体右移，位置参数 μ 和比例参数 σ 均增大，说明地应力水平的提高使得整体的爆破块度尺寸增大。

尽管 GEV 分布函数位置参数 μ 和比例参数 σ 的变化在一定程度上可以反映平均块度尺寸和最大块度尺寸的变化，但工程爆破界更习惯采用平均块度尺寸、最大块度尺寸、块度不均匀系数等特征参数来描述爆破块度分布特征，下文分析地应力对这 3 个特征参数

的影响。在块度分布函数曲线中, 累计频率 10%, 20%, 50%, 60%, 80%, 100% 对应的块度尺寸分别表示为 x_{10} , x_{20} , x_{50} , x_{60} , x_{80} 和 x_{\max} , x_{50} 也就是平均块度尺寸, x_{\max} 为最大块度尺寸。定义 x_{60} 与 x_{10} 之比为块度不均匀系数, 不均匀系数越大, 表明岩体爆破块度分布越不均匀。不同行业、不同工程对岩体爆破大块尺寸的界定标准不同, 本文数值模拟中将等效直径大于 400 mm 的岩块归类为大块, 大块质量占岩块总质量的百分比称之为大块率。不同地应力水平下, 岩体爆破块度的各特征尺寸如图 9 所示。随着地应力水平的提高, 各特征尺寸均呈增大的趋势, 整体的爆破块度尺寸增大。地应力从 0 增大到 50 MPa, 平均块度尺寸 x_{50} 从 120 mm 增大为 417 mm, 大块度尺寸 x_{80} 从 237 mm 增大为 624 mm, 最大块度尺寸 x_{\max} 从 326 mm 增大为 821 mm, 增幅明显; 相比之下, 代表小块度的 x_{20} 尺寸变化较小。这表明, 地应力主要导致了大尺寸岩块的产生, 随着地应力水平的提高, 大尺寸级别的岩块更多, 尺寸变得更大。这是因为地应力主要影响炮孔远区爆生裂纹的传播, 而大尺寸级别的岩块一般在炮孔远区形成。

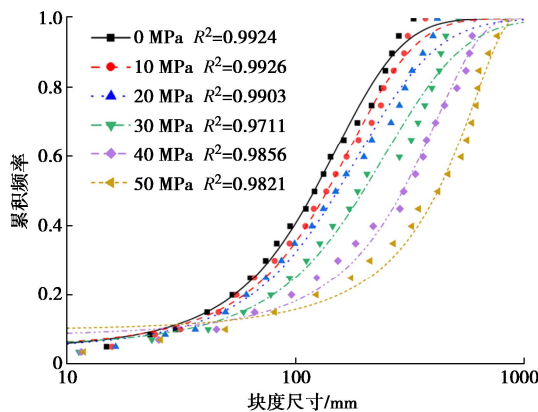


图 8 不同地应力水平下的岩体爆破块度分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of rock blasting fragmentation under different in-situ stress levels

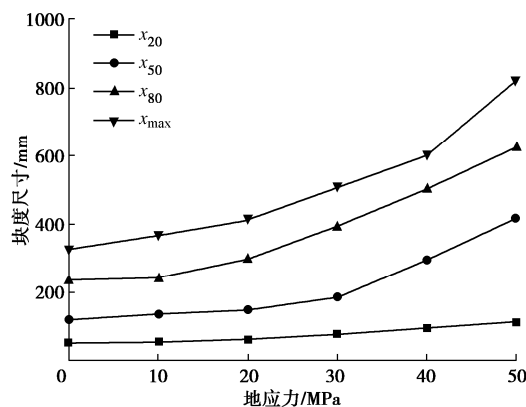


图 9 不同地应力水平下岩体爆破块度的特征尺寸

Fig. 9 Characteristic sizes of rock blasting fragmentation under different in-situ stress levels

图 10 给出了不同地应力水平下岩体爆破块度不均匀系数和大块率。随着地应力水平的提高, 特别是地应力超过 20 MPa 后, 不均匀系数显著增大, 岩体爆破块度变得越不均匀。在地应力小于 10 MPa 时, 岩体爆破未产生直径超过 400 mm 的大块; 之后随着地应力水平的提高, 大块率逐渐增大, 当地应力为 50 MPa 时, 大块率达到了 50%。地应力水平从 20 MPa 增大到 30 MPa, 大块率由 4.2% 增加到 14.0%; 而当地应力从 40 MPa 增大到 50 MPa 时, 大块率从 29.2% 迅速增加到了 50.3%, 地应力水平越高, 大块率随地应力增长的速率越快。

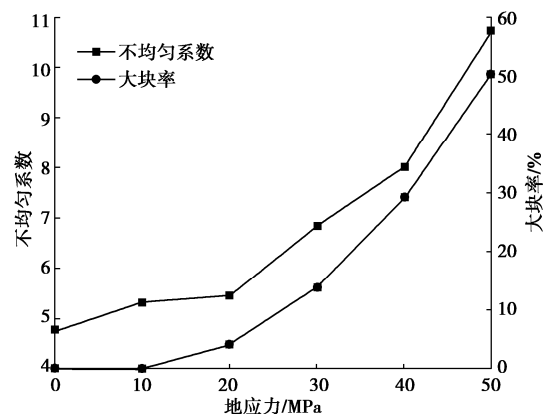


图 10 不同地应力水平下爆破块度不均匀系数和大块率

Fig. 10 Nonuniform coefficients and large block rates of rock blasting fragmentation under different in-situ stress levels

4 非静水地应力条件下的岩体爆破块度分布

4.1 不同非静水地应力条件下的爆生裂纹分布

竖直向地应力 σ_v 保持 30 MPa 不变, 侧压力系数 λ 由 0.5 增大到 2.5 时, 岩体爆破产生的裂纹分布如图 11 所示。整体上看, 随着侧压力系数的增大, 爆生裂纹的数量减少, 长度变短。当侧压力系数 λ 小于 1 时, 竖直向地应力为大主应力, 此时水平向地应力较小, 随着水平向地应力的增加, 爆生裂纹分布并没有显著的改变。但当侧压力系数 λ 大于 1 后, 水平向地应力变为大主应力, 此时随着水平向地应力的提高, 竖向传播的裂纹因受到地应力的抑制, 其长度明显变短。在侧压力系数达到 2.5 时, 甚至出现了上下炮孔间裂纹无法贯通的情况, 岩体爆破破碎效果较差。

不同侧压力系数条件下, 炮孔周围 I 区和 II 区的爆生裂纹分形维数和裂纹面积比如图 12 所示。同样, 炮孔附近 I 区的爆生裂纹分形维数和裂纹面积几乎不受侧压力系数变化的影响; 在距离炮孔相对较远的 II 区, 随着侧压力系数从 0.5 增大为 2.5, 裂纹分形维数和裂

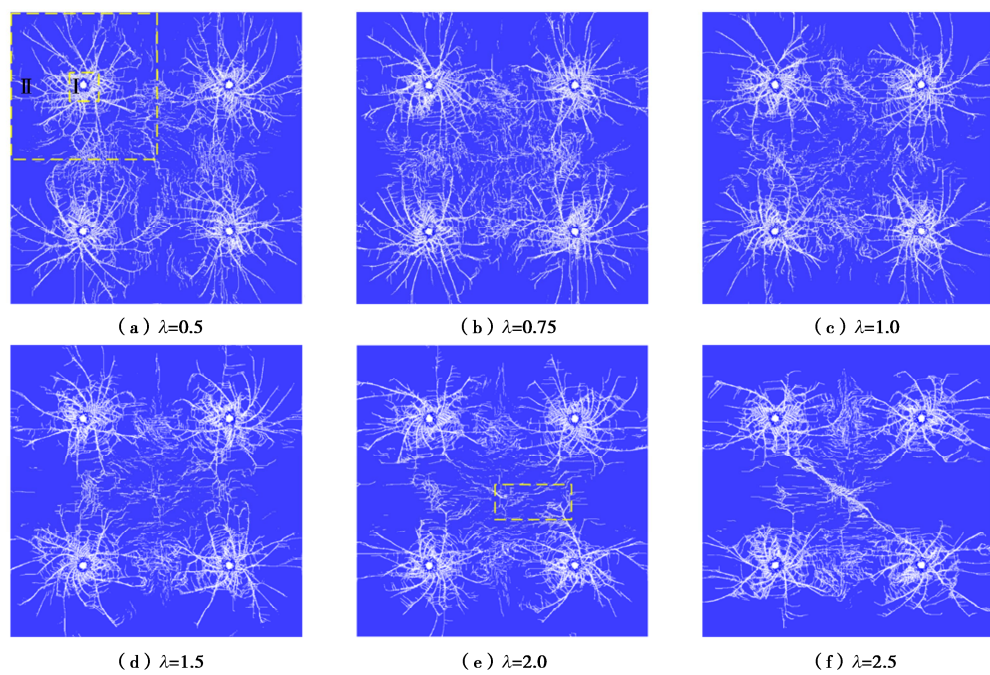


图 11 不同侧压力系数下的岩体爆生裂纹分布 ($\sigma_v=30$ MPa)

Fig. 11 Distributions of blast-induced cracks in rock under different lateral coefficients ($\sigma_v=30$ MPa)

纹面积呈现出了先增大后减小的变化趋势,在侧压力系数为 0.75 左右时,裂纹分形维数和裂纹面积达到最大,此时岩体爆破破碎最充分。也就是说,当两个主应力差别较小时,岩体爆破破碎效果相对较好;而当两个主应力差别较大时,不利于爆破破岩。这是由于当两个方向的地应力差别较大时,炮孔远区的裂纹趋于沿大主应力方向传播扩展,裂纹分布具有了明显的方向性,从而沿大主应力方向产生了长条型的岩块(如图 11 (e) 中的虚线标识),导致爆破块度尺寸增大。但侧压力系数 $\lambda=1.0$ 时,裂纹分形维数和裂纹面积并未最大,这是由于 $\lambda=1.0$ 时的平均地应力水平比 $\lambda=0.75$ 时的高,地应力对炮孔远区的裂纹扩展起抑制作用。

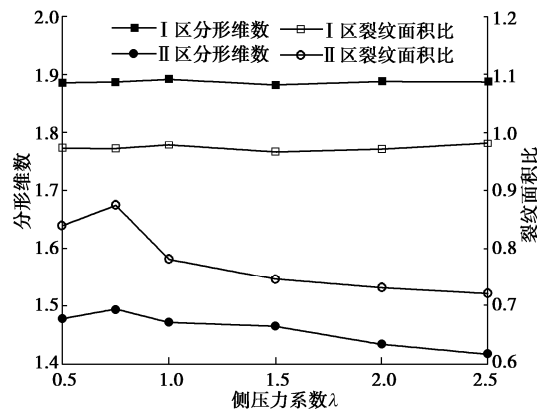


图 12 不同侧压力系数下爆生裂纹分形维数和裂纹面积比 ($\sigma_v=30$ MPa)

Fig. 12 Fractal dimensions and scaled areas of blast-induced cracks under different lateral coefficients ($\sigma_v=30$ MPa)

4.2 侧压力系数对爆破块度分布特征的影响

不同侧压力系数条件下,拟合得到的岩体爆破块度分布曲线如图 13 所示,当侧压力系数 λ 从 0.5 增大到 2.5 时,分布曲线的位置参数 μ 和比例参数 σ_v 先减小后增大,在侧压力系数 $\lambda=0.75$ 时最小。根据分布曲线得到的爆破块度特征尺寸如图 14 所示,同样,平均块度尺寸 x_{50} 先减小后增大,在 $\lambda=0.75$ 时平均块度尺寸最小,岩体破碎最充分,这与上文的爆生裂纹分形维数和裂纹面积分析结论是一致的。侧压力系数由 1.0 增大为 2.5,平均块度尺寸 x_{50} 由 186 mm 变为 349 mm,增幅 88.2%;大块度尺寸 x_{80} 由 392 mm 变为 708 mm,增幅 80.6%;最大块度尺寸 x_{\max} 由 510 mm 增大为 823 mm,增幅 61.4%,而小块度尺寸 x_{20} 由 77 mm 增大为 103 mm,增幅仅 32.8%。可见,侧压力系数主要影响大块特征尺寸。

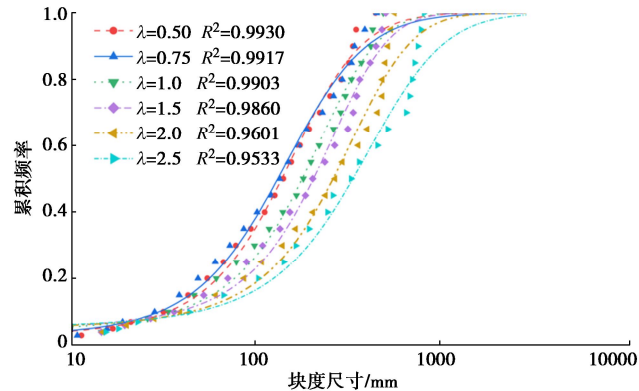


图 13 不同侧压力系数下的岩体爆破块度分布曲线 ($\sigma_v=30$ MPa)

Fig. 13 Distribution curves of rock blasting fragmentation under different lateral coefficients ($\sigma_v=30$ MPa)

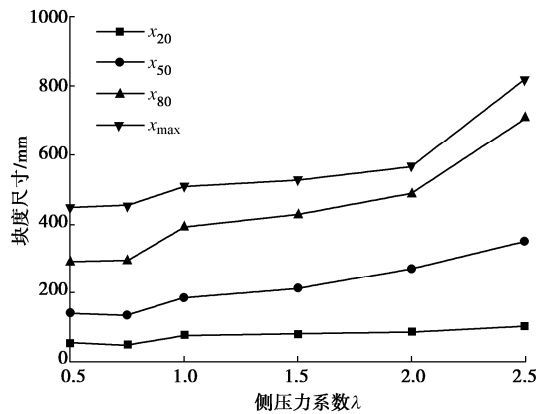


图 14 不同侧压力系数下的岩体爆破块度特征尺寸

Fig. 14 Characteristic sizes of rock blasting fragmentation under different lateral coefficients

图 15 给出了岩体爆破块度不均匀系数和大块率随侧压力系数的变化。由于侧压力系数对大块特征尺寸影响较大, 导致块度不均匀系数和大块率均随侧压力系数的增大而单调递增。相比于静水地应力条件 $\lambda=1.0$, 侧压力系数 λ 为 2.5 时, 不均匀系数由 6.85 增大为 12.85, 大块率由 14.0% 变为 48.2%, 变化显著。

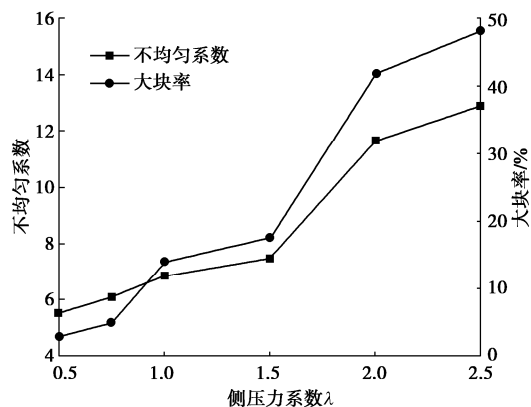


图 15 不同侧压力系数下爆破块度不均匀系数和大块率

Fig. 15 Nonuniform coefficients and large block rates of rock blasting fragmentation under different lateral coefficients

以上分析表明, 地应力对炮孔远区爆生裂纹扩展的抑制作用以及非静水地应力对爆生裂纹扩展的导向作用, 导致了岩体爆破大块的产生; 垂直于炮孔轴向的两个主地应力差别越大, 越容易产生大块。因此, 在地应力水平较高、侧压力系数较大的情况下, 可以通过缩小最小主应力方向上的炮孔间距, 或在该方向上设置空孔, 引导爆生裂纹沿最小主应力方向扩展, 从而减少大块的产生。需要指出的是, 由于现有数值方法在模拟工程尺度岩体爆破全过程方面的局限性, 上文有限元数值模拟仅考虑了爆炸应力波引起的岩体开裂, 未考虑爆生气体在裂纹中的流动过程。此外, 二维数值模拟不能很好地反映孔口堵塞段岩体的开裂破碎情况, 而实际工程中大块易在堵塞段岩体中产生,

因此二维数值模拟得到的大块率可能偏低。尽管存在上述局限性, 上文数值模拟仍然揭示了地应力对岩体爆破块度分布特征的影响规律。考虑数值模拟研究存在的不足, 下文结合工程实例分析, 进一步说明地应力对岩体爆破块度分布特征的影响。

5 工程实例分析

5.1 工程概况

某地下实验室主要由实验厅、斜井、竖井、地下安装间和其它功能性辅助洞室组成, 地下总容积约 7.5 万 m^3 。斜井作为该地下实验室开挖的进入通道, 从地表一直延伸至地下约 760 m, 坡度 23.5° 。斜井沿线主要为石英砂岩夹粉砂岩及泥质页岩、角岩和花岗岩, 无较大断层发育, 围岩稳定性较好。现场水压致裂法地应力测试结果表明, 埋深 145~190 m 处的最大水平主应力为 4.7~6.6 MPa, 平均侧压力系数为 0.97~1.11; 埋深 700~750 m 处的最大水平主应力为 18.4~24.3 MPa, 平均侧压力系数为 0.80~0.99。工程区域地应力总体近似静水地应力场, 岩体强度应力比一般为 4.5~7.0, 属中等地应力场。

斜井采用全断面钻爆法开挖, 断面开挖尺寸 4.7 m×5.5 m (宽×高), 整个断面钻设 91 个炮孔, 采用非电毫秒延迟雷管分 6 段进行爆破, 炮孔直径 42 mm, 孔深 3.0 m, 炮孔间距 0.5~0.6 m。爆破采用#2 岩石乳化炸药, 药卷直径 32 mm, 一次爆破炸药用量 80 kg, 最大单响药量 36 kg。

5.2 不同埋深岩体爆破块度对比分析

选取斜井开挖至地下约 150 m 和斜井末端水平段 (埋深约 760 m) 的两次爆破进行对比分析。两次爆破的地层岩性、开挖断面尺寸和采用的爆破设计参数基本相同, 主要区别在于地应力水平不同, 埋深 150 m 处的地应力约 5 MPa, 埋深 760 m 处的地应力约 25 MPa。因此, 对比该斜井工程不同埋深处岩体爆破的块度特征, 可以反映地应力对岩体爆破块度分布特征的影响。

该斜井埋深 150, 760 m 处两次爆破产生的爆堆如图 16 所示。由于实际工程爆堆图像岩块边缘与岩块本身之间的颜色差别较小, 且受环境光线影响, 采用 ImageJ 图像处理法对图像进行二值化处理较为困难, 因此采用无需进行图像二值化处理的 WipFrag 岩体爆破块度分析软件对实际工程爆堆图像进行识别。将采集的图像导入 WipFrag 分析软件, 得到不同埋深岩体爆破的块度分布曲线, 如图 17 所示。整体上看, 埋深 760 m 岩体爆破的块度分布曲线其位置参数 μ 和比例参数 σ 更大, 则该埋深处岩体爆破块度尺寸更大。

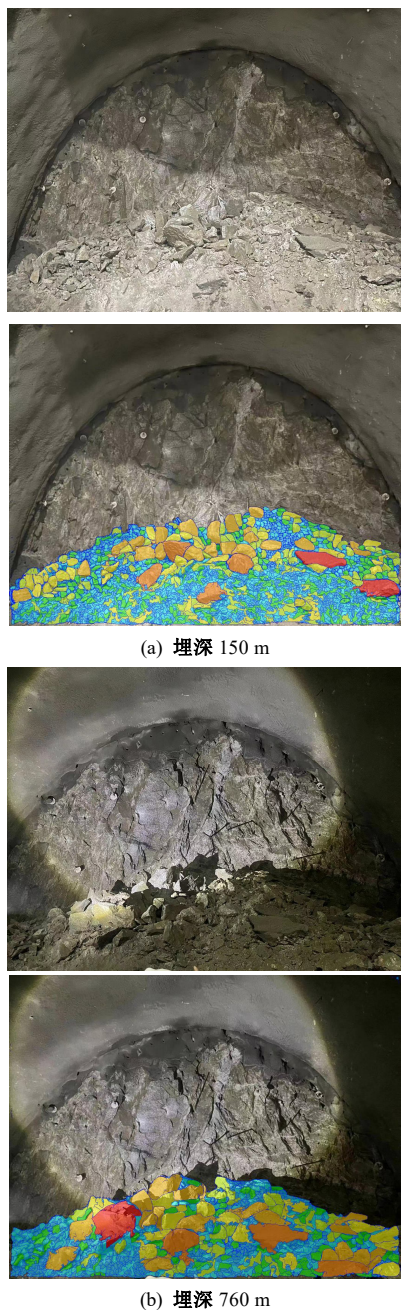


图 16 斜井不同埋深岩体爆破后的爆堆

Fig. 16 Piles of rock blasting at different depths in inclined shaft

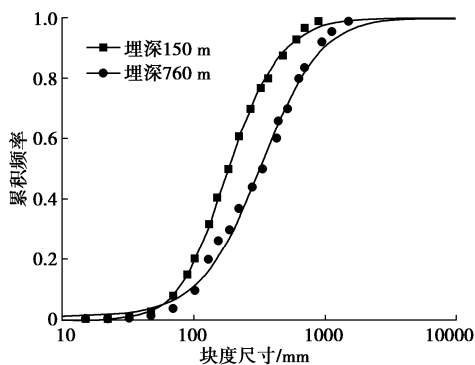


图 17 不同埋深岩体爆破块度分布曲线

Fig. 17 Distribution curves of rock blasting fragmentation at different depths

图 18 给出了不同埋深岩体爆破块度的特征尺寸，对于埋深 150 m 的浅部岩体，其小块度尺寸 x_{20} 、平均块度尺寸 x_{50} 、大块度尺寸 x_{80} 和最大块度尺寸 x_{\max} 分别为 101, 183, 367, 889 mm，爆破块度不均匀系数为 2.91；而对于埋深 760 m 的深部岩体，其 x_{20} , x_{50} , x_{80} , x_{\max} 分别为 125, 332, 633, 1495 mm，不均匀系数为 4.12。两种不同埋深和地应力水平下，小块度尺寸 x_{20} 仅相差 24.0%，差别较小；而平均块度尺寸 x_{50} 、大块度尺寸 x_{80} 和最大块度尺寸 x_{\max} 分别相差 81.3%，72.8%，68.2%，差别显著，说明爆破产生的小岩块的尺寸受地应力影响较小，地应力主要导致大块尺寸显著增大，爆破块度变得更加不均匀。根据现场所使用的铲装出渣设备，尺寸超过 800 mm 的岩块界定为大块。两种不同埋深情况下岩体爆破的大块率分别为 2.0%，13.5%，地应力使得岩体爆破产生了更多的大块，大块率显著增加，这与上文数值模拟研究得到的结论是一致的。

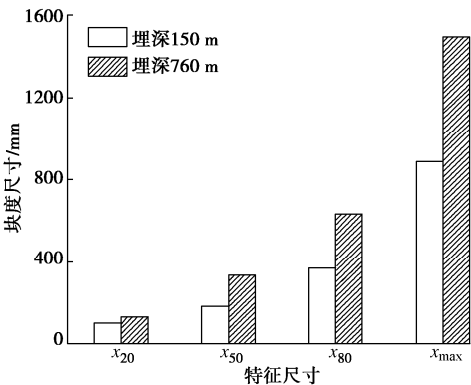


图 18 不同埋深岩体爆破块度特征尺寸对比

Fig. 18 Comparison of characteristic sizes of rock blasting fragmentation at different depths

6 结 论

- (1) 地应力对炮孔远区裂纹扩展的抑制作用以及非静水地应力对爆生裂纹扩展的导向作用，改变了岩体爆破开裂特征，进而影响爆破块度分布。
- (2) 高地应力作用对岩体爆破小块度的尺寸影响不大，主要导致大块的产生；随着地应力水平提高，岩体爆破平均块度尺寸、最大块度尺寸、块度不均匀系数和大块率均显著增大。
- (3) 当垂直于炮孔轴向的两个主应力差别较大时，易产生长条形岩块，导致爆破块度不均匀系数和大块率增加；当侧压力系数为 0.75 左右时，爆破破岩效果较佳。

参考文献：

[1] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初

- 步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(2): 217-232. (XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(2): 217-232. (in Chinese))
- [2] HE C L, YANG J, YU Q. Laboratory study on the dynamic response of rock under blast loading with active confining pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, **102**: 101-108.
- [3] MITCHELL T R, WANG Z, ARAOS M, et al. Experimental and numerical investigation into the fracture patterns induced by blast-loading under unconfined and confined conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, **56**(4): 2433-2455.
- [4] YANG L Y, YANG A Y, CHEN S Y, et al. Model experimental study on the effects of in situ stresses on pre-splitting blasting damage and strain development[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, **138**: 104587.
- [5] 张凤鹏, 闫广亮, 郝琪琪, 等. 单向压应力对砂岩漏斗爆破过程的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, **42**(2): 220-225. (ZHANG Fengpeng, YAN Guangliang, HAO Qiqi, et al. Influence of unidirectional compressive stress on the crater blasting of sandstone[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, **42**(2): 220-225. (in Chinese))
- [6] 徐 颖, 顾柯柯, 葛进进, 等. 装药不耦合系数对初始地应力下岩石爆破裂纹扩展影响的试验研究[J]. 爆破, 2022, **39**(4): 1-9. (XU Ying, GU Keke, GE Jinjin, et al. Experimental study on effect of charge decoupling coefficient on crack propagation in rock by blasting under initial in-situ stress[J]. Blasting, 2022, **39**(4): 1-9. (in Chinese))
- [7] 杨建华, 孙文彬, 姚 池, 等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击, 2020, **40**(7): 118-127. (YANG Jianhua, SUN Wenbin, YAO Chi, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, **40**(7): 118-127. (in Chinese))
- [8] HAN H Y, FUKUDA D, XIE J B, et al. Rock dynamic fracture by destress blasting and application in controlling rockbursts in deep underground[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **155**: 105228.
- [9] CORDOVA E, GOTTREUX I, ANANI A, et al. Blasting and preconditioning modelling in underground cave mines under high stress conditions[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2021, **121**(2): 71-80.
- [10] 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))
- [11] 陈 榕, 武智勇, 郝冬雪, 等. 高应力下石英砂三轴剪切颗粒破碎演化规律及影响[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(8): 1713-1722. (CHEN Rong, WU Zhiyong, HAO Dongxue, et al. Evolution rules and effects of particle breakage for quartz sand in triaxial shear tests under high pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(8): 1713-1722. (in Chinese))
- [12] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in situ stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **66**: 19-33.
- [13] LI X H, ZHU Z M, WANG M, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, **113**: 103968.
- [14] DEGHAN BANADAKI M M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, **40**: 16-25.
- [15] 杨仁树, 肖成龙, 陈 程, 等. 基于分形理论不同装药量的爆破动焦散线实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(14): 80-86, 93. (YANG Renshu, XIAO Chenglong, CHEN Cheng, et al. Experimental study on the blasting dynamic caustics under different charge weight based on the fractal theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, **39**(14): 80-86, 93. (in Chinese))
- [16] LI X D, LIU K W, YANG J C, et al. Numerical study on blast-induced fragmentation in deep rock mass[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, **170**: 104367.