

· 水工岩石力学 ·

DOI:10.12454/j.jsuese.202500285



本刊网刊

## 高地应力下随机节理岩体单孔爆破响应特征模拟研究

刘浩杉<sup>1,2</sup>, 王建国<sup>1,2</sup>, 宋永康<sup>1,2</sup>, 张智宇<sup>1,2\*</sup>, 黄永辉<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093;  
3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**随着地下工程开采深度不断增加, 原位地应力与岩体结构面的耦合作用对爆破破碎行为的影响愈加显著。传统研究多聚焦于均质或规则节理岩体, 难以准确反映节理裂隙空间分布复杂性与地应力联合作用对爆破响应的实际影响。为此, 本文基于 (particle flow code, PFC) 离散元软件构建了考虑地应力与随机节理网络 (DFN) 耦合的爆破模型, 深入揭示节理密度、埋深、装药直径对爆破裂纹演化及岩体破碎行为的影响规律。结果表明: 地应力和节理密度对爆破裂纹演化及岩体破碎程度具有显著影响; 节理密度的增加显著抑制微裂纹的扩展, 并使裂纹分布趋于局部化, 表现出微裂纹数量和分形维数的非线性下降特征; 节理密度与地应力之间存在耦合效应, 高节理密度在低地应力下对裂纹扩展具有更强的抑制能力, 且微裂纹优先发育于最大主应力方向。在此基础上进一步研究了耦合装药条件下装药直径对高地应力下富含节理岩体破碎效果的影响, 发现装药直径的增大虽可显著提升破碎范围, 但在达到某一临界直径后, 裂纹网络复杂性趋于饱和, 进一步增加装药量对岩体破碎效果提升作用有限。该研究有助于深入理解高地应力条件下节理岩体的爆破行为及其工程应用。

**关键词:** 节理岩体; 高地应力; 单孔爆破模型; 分形维数; 颗粒流

**中图分类号:** TD235

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2026)01-0133-12

随浅层资源的枯竭, 对深层资源的开发需求日益增加。当前, 国内外多座矿山开采深度已超千米, 预计在未来相当长一段时间内, 中国金属、非金属资源开采将集中于 1 000~2 000 m 的深度<sup>[1]</sup>。在深部开采中, 岩体受“三高一扰动”的影响表现出与浅部岩体不一样的力学特性, 而钻爆法作为一种高效、经济的手段被广泛用于深部资源开发<sup>[2]</sup>。单钻孔爆破是研究岩体破裂特征的常用方法, 有助于了解裂纹分布特征及优化爆破参数。因此, 针对深部富含节理的岩体, 研究其爆破裂纹的扩展特性, 对于更好地理解岩体的破裂机制、实现高效爆破设计具有重要意义。

大量学者通过数值模拟或现场试验的手段研究了原位应力对爆破效果的影响, 陈士海等<sup>[3]</sup>基于波动微分方程和分离变量法, 通过物理模型试验研究了高地应力下隧道围岩爆破振动衰减规律。Huo 等<sup>[4]</sup>进行了高地应力下天井掏槽爆破试验, 结果表明在较高原

位应力下采用短延时爆破能有效降低爆破所带来的损伤。Yan 等<sup>[5]</sup>在等轴应力条件下进行了大量爆破模型试验, 研究了地应力对裂纹扩展以及爆破效果的影响。Hong 等<sup>[6]</sup>在埋深 680 m 的巷道进行了单孔爆破测试, 并以此为基准校准了数值模型, 研究了不同地应力下岩体破碎情况。杨帅等<sup>[7]</sup>针对不同地应力情况开展了 4 组相似模型试验, 证明地应力对煤体爆破的裂纹扩展起抑制作用。杨建华等<sup>[8]</sup>基于叠加原理计算了地应力和爆破荷载双重作用下岩体爆破应力分布特征。金解放等<sup>[9]</sup>基于改进 SHPB 试验, 得到地应力与冲击载荷对红砂岩动态强度和变形特性的耦合影响规律。Liu 等<sup>[10]</sup>结合 DIC 以及声发射 AE 系统开展了不同静载条件下花岗岩的单孔爆破试验, 并基于能量指数提出了动静耦合条件下岩石的破坏准则, 明确了动静耦合作用对花岗岩破坏模式及能量响应的影响。数值方法是研究节理岩体的有效手段。Pu 等<sup>[11]</sup>采用 Auto-

收稿日期:2025-04-18 修回日期:2025-09-25 网络出版日期:2025-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(42467023;52274083);云南省教育厅企业出题项目(FWCY-QYCT2024010)

作者简介:刘浩杉(1998—),男,博士生。研究方向:工程爆破数值仿真。E-mail:liuhaoshan1998@163.com

\*通信作者:张智宇,教授, E-mail:924221851@qq.com

dyn 数值软件研究了类岩石材料 PMMA 在双孔爆破下的裂纹扩展行为,结果表明开槽孔可促进裂纹协同贯通。Zhang 等<sup>[12]</sup>通过 LSDYNA 研究了双节理岩体破坏过程,揭示含节理岩体爆破破坏机制及节理几何参数对裂纹演化的影响。马龙浩<sup>[13]</sup>结合蒙特卡洛算法建立了含随机裂隙的有限元模型,模拟了多种工况下节理岩体的裂纹扩展规律。周文海<sup>[14]</sup>利用波动理论与能量密度理论计算出爆破荷载下节理岩体的透反射能量比。Zhou 等<sup>[15]</sup>利用 LSYDNA 建立了水耦合双孔爆破数值模型,考虑了等轴地应力和非等轴地应力对岩体破碎和裂纹扩展的影响。有限元方法在表示大量随机分布的不连续结构时存在局限。离散元法是研究节理岩体行为和评估裂缝和尺寸效应引起的岩体动态响应变化的理想选择。Wang 等<sup>[16]</sup>采用块体离散元(UDC)研究了爆破荷载下两种典型节理岩体的裂纹扩展行为。Fakhimi 等<sup>[17]</sup>提出一种 DEM-SPH 模型用于岩体单孔爆破数值模拟。Qiu 等<sup>[18]</sup>通过 PFC2D 研究了高地应力下爆破扰动对巷道的动力响应特性,结果表明在较深地层中的巷道周围的爆破开挖活动会更易使巷道发生破坏。Sarfarazi 等<sup>[19]</sup>以石灰石为试验对象,采用模型试验和 PFC 手段研究了不同爆破参数对光面爆破的影响,其试验测试和数值模拟呈现出一致的趋势。Shen 等<sup>[20]</sup>聚焦于平行节理对爆破过程中断裂模型和爆破裂缝长度的影响,并基于 PFC 重现了裂纹扩展及应力波演化过程。Zuo 等<sup>[21]</sup>结合 FDEM 手段研究了天然节理岩石在动态冲击荷载下的断裂破坏过程。Li 等<sup>[22]</sup>通过 FDEM 开展了不同地应力水平下的单孔爆破数值模拟,探索其粉碎区及裂隙区演化过程。

以上通过数值模拟或模型试验手段的研究,主要集中在爆破对均质岩体或有限节理数量岩体的影响,但实际工程岩体往往节理裂隙发育,而这恰是影响爆破效果的一个重要因素。本文基于 PFC 离散元方法,构建了地应力与随机节理耦合的数值模型,深入探讨了富含节理岩体在不同地应力条件下的爆破行为。通过考虑节理的几何分布、节理密度及其随机性,模拟了不同深度下地应力对节理岩体爆破破碎过程的影响,揭示了地应力、节理密度及装药直径等因素对岩体裂纹扩展、块度分布及能量耗散的作用机制,以期对深部矿山的爆破设计、优化爆破参数以及提高爆破效果提供参考。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 粒子膨胀法

粒子膨胀法的可靠性已在前人研究中得到验证<sup>[23-24]</sup>。当爆炸粒子膨胀时,会与周围的岩石粒子系

统产生叠加量。根据 PFC 中的颗粒接触原理,当爆炸颗粒膨胀到炮孔壁时,爆炸颗粒会对周围的岩石颗粒产生径向压力。在已知爆炸粒子的法向刚度  $k_n$  情况下,设炸药颗粒的膨胀半径变化量为  $\Delta r$ ,则炸药对周围岩石颗粒产生的径向压力  $F_1$  为:

$$F_1 = k_n \Delta r \quad (1)$$

设爆破粒子作用到岩体粒子上的初始炮孔壁爆炸冲击压力为  $p_m$ ,则岩体粒子的合力  $F_2$  为:

$$F_2 = 2\pi r_0 p_m \quad (2)$$

式中,  $r_0$  为炮孔半径,  $p_m$  的计算公式<sup>[25]</sup>为:

$$p_m = \frac{\rho_c D_c^2}{k+1} \quad (3)$$

式中:  $\rho_c$  为炸药密度,取  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ ;  $D_c^2$  为炸药爆速,取  $3\ 200\ \text{m/s}$ ;  $k$  为绝热指数,取  $k=3$ 。

令式(1)等于式(2),即  $F_1=F_2$ ,可得  $\Delta r$ ,此时不同大小和不同形式的爆破荷载可通过控制  $\Delta r$  来实现。

$$\Delta r = \frac{2\pi r_0 p_m}{k_n} \quad (4)$$

本文采用半正弦波的形式来模拟爆炸过程的波动特性,其表达式如下:

$$r(t) = \frac{\Delta r}{2} (1 - \cos(2\pi ft)) \quad (5)$$

$$R(t) = r(t) + r_0 \quad (6)$$

式(5)~(6)中:  $f$  为半正弦波频率,取  $f=100\ \text{Hz}$ ;  $t$  为加载时间;  $r(t)$  为膨胀半径随时间变化量;  $R(t)$  为炸药颗粒半径随时间变化量。

根据上述理论计算,可得到不同孔壁压力下的爆破荷载时程曲线,如图 1 所示。

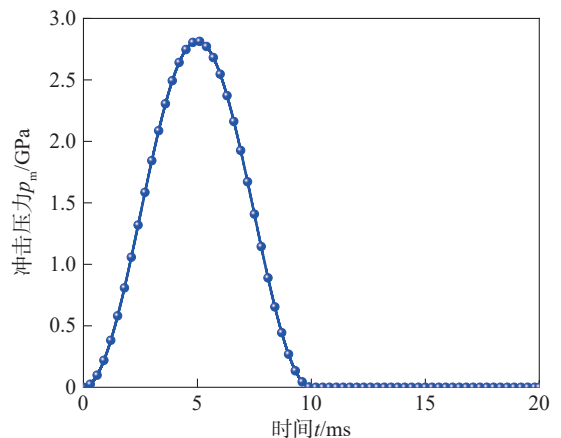


图 1 爆破荷载时程曲线

Fig. 1 Blasting load time history curve

### 1.2 模型建立

为了研究节理岩体在爆炸荷载下的破裂行为,将离散裂隙网络(discrete fracture network, DFN)引入到完整岩体模型中,采用节理岩体建模先进方法(synthetic rock mass, SRM)建立随机节理岩体,如

图 2 所示。SRM 岩体由完整岩石以及离散裂隙网络 DFN 两部分组成,DFN 可用于详细描述岩体结构面的空间分布和特征。其中,岩石粒子之间接触采用线性平行接触模型(PBM)描述。DFN 采用光滑节理模型(SJM)描述岩石粒子之间的力学特性<sup>[26-27]</sup>。SRM 能够有效模拟节理面之间的滑动及开裂过程。

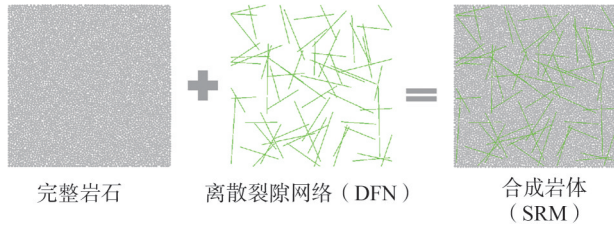
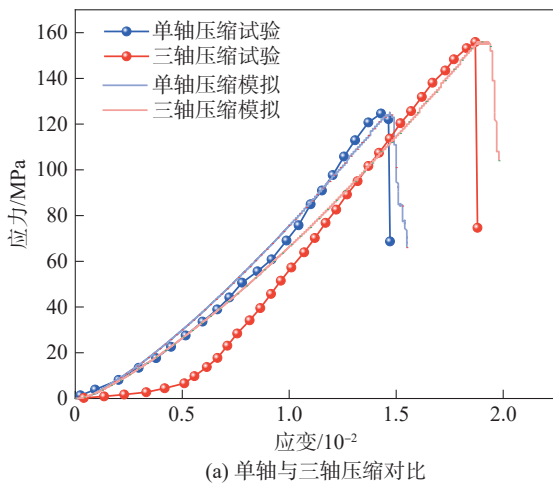
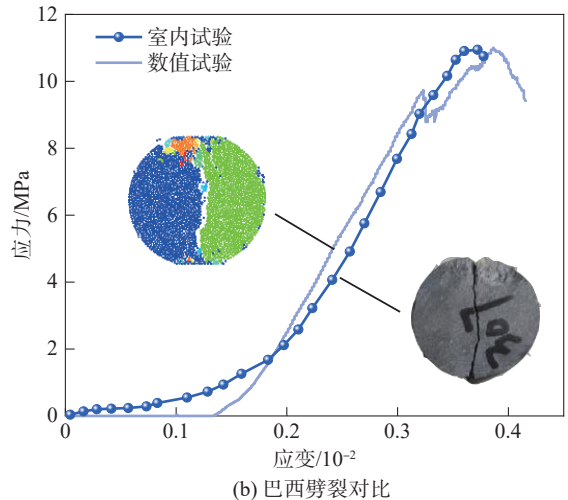


图 2 SRM 合成岩体模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SRM synthetic rock mass



(a) 单轴与三轴压缩对比



(b) 巴西劈裂对比

图 3 试样细观参数标定过程

Fig. 3 Mesoscopic parameter calibration procedure of the specimen

表 1 PBM 平行黏结模型细观参数

Tab. 1 Microscopic parameters of PBM parallel bonding model

| 线性组             |     |            |         | 平行黏结组    |         |          |     |
|-----------------|-----|------------|---------|----------|---------|----------|-----|
| 接触模量 $E_c$ /GPa | 刚度比 | 摩擦系数 $\mu$ | 黏聚力/MPa | 抗拉强度/MPa | 摩擦角/(°) | 黏结模量/MPa | 刚度比 |
| 2               | 1.5 | 0.5        | 20      | 4        | 42      | 42       | 1.5 |

表 2 SJM 光滑节理模型细观参数

Tab. 2 Calibration results of mesoscopic parameters of SJM smooth joint model

| 法向刚度/MPa | 切向刚度/MPa | 摩擦系数 $\mu$ | 抗拉强度/MPa | 黏聚力/MPa | 摩擦角/(°) |
|----------|----------|------------|----------|---------|---------|
| 1 300    | 500      | 0.5        | 2        | 8       | 30      |

## 2 数值模拟结果

### 2.1 数值模拟可靠性验证

图 4 为不同模型的单孔爆破结果。图 4(a)为直径 144 mm 花岗岩在 6.45 mm 钻孔直径下爆破裂纹的损伤切片示意图。图 4(b)为基于 LS-DYNA 建立的圆形

### 1.3 参数标定

为了使后续模拟爆破试验中岩石的力学性能和宏观破坏模式尽可能接近真实岩样,需要对初始数值模型细观参数进行标定。在灰岩室内试验所得到的应力应变曲线基础上,使用 PFC2D 代码获取单轴压缩、三轴压缩及巴西劈裂 3 种数值试验相对应的应力-应变曲线,并采用试错法<sup>[28]</sup>进行调整,使模拟工况最大程度对应实际工况,此时所获得的细观参数即可用于后续岩体爆破模型。试样的细观参数标定如图 3 所示,试样样品的孔隙压密阶段和弹性模量与对应数值模型之间存在一定差异,但在峰值强度和峰后软化阶段表现出较好的一致性,表明所选定的微观参数能够满足后续测试要求。基于 PFC2D 的灰岩以及随机节理的细观力学参数分别如表 1、2 所示。

准 3 维数值模型。模型圆周边界设置为无反射边界条件,材料采用 RHT 本构模型,并将爆后区域划分为粉碎区、裂隙区和弹性振动区。模拟结果验证了单孔爆破过程中的典型波动传播与破坏特征。图 4(c)基于 PFC 建立了边长 10 m 的离散元爆破模型,研究了不耦合系数  $\zeta$  为 1.0 的裂纹扩展情况。图 4(d)即本文模型,建立了长、宽均为 1 m 的数值模型,炮孔设置在模型中心处,直径  $r$  为 0.01 m,采用耦合装药,模型四周设置了黏性边界以模拟岩体处于无限介质的情况。从本文模型中可以看出,粉碎区大小位于 3~5 倍炮孔半径,裂隙区大小位于 10~50 倍炮孔半径,符合多数岩体爆破破碎区域预测模型,证明了本模型的有效性。

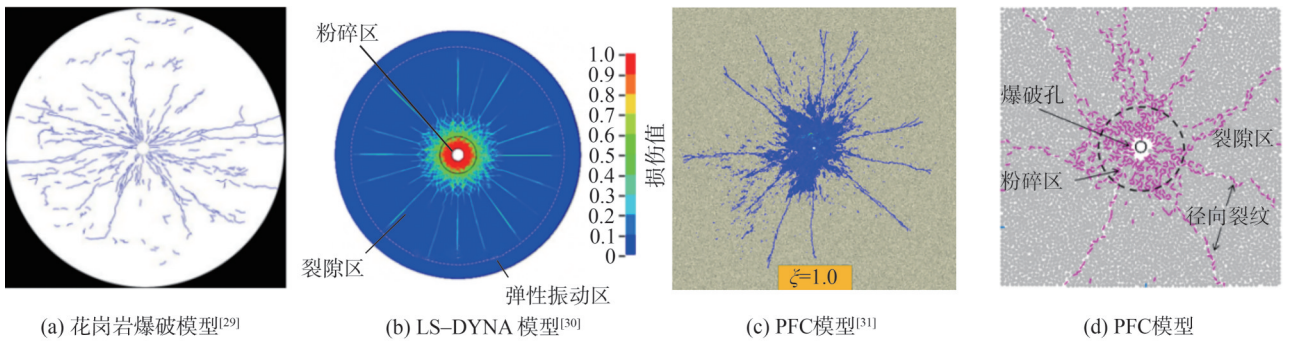


图 4 不同数值模型计算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results of different numerical models

## 2.2 不同节理密度下岩体破坏结果

直接获取天然岩体中的节理裂隙网络的几何信息并不容易,可以基于统计方法来表示裂隙的发育情况。文献[32]表明,可以假设节理的几何参数如长度、厚度及方向服从一定的概率分布,使用幂函数可以很好拟合节理长度 $l$ 的分布规律<sup>[33]</sup>,如式(7)所示:

$$n(l) = al^{-a}, l \in [l_{\min}, l_{\max}] \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 为比例系数,表示在 $[l_{\min}, l_{\max}]$ 范围内节理的总

数或密度; $a$ 为幂指数,对于2维模型其取值范围一般为1.3~3.5<sup>[34]</sup>。

在离散型裂隙网络中,2维模型节理的密度一般用 $P_{10}$ 来表示,即每单位长度上切割断裂的数目 $N$ <sup>[35]</sup>。本文考虑了长度指数 $a=2$ 情况下5种不同的节理密度情况( $P_{10}=2\sim 10\text{ m}^{-1}$ )以及一个完整模型,共建立6种不同节理密度下的模型,如图5所示。节理的方向以及位置服从均匀分布,其中Intact表示完整岩体模型,DFN1~DFN5代表5种不同节理密度模型。

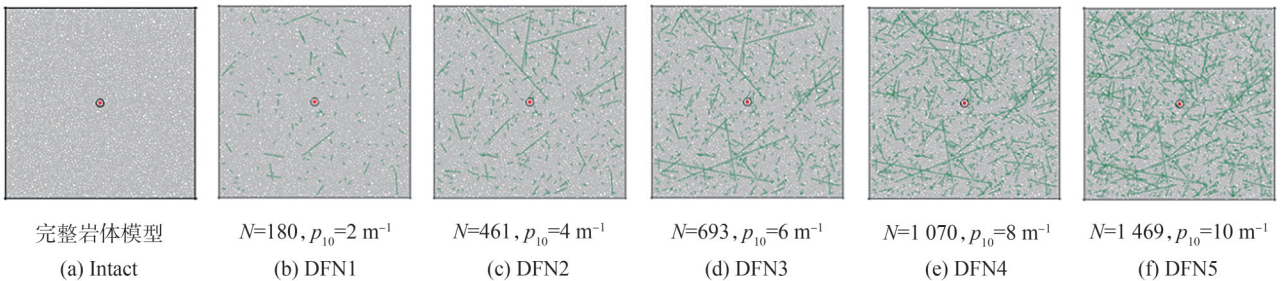


图 5 不同节理密度爆破数值模型

Fig. 5 Numerical model of blasting with different joint densities

图6展示了Intact完整岩体在爆破荷载下的微裂纹时程曲线,其中微裂纹是指模型中颗粒间黏结因受到拉应力或剪应力超过其强度极限而发生破坏时所记录的微裂纹事件,软件自带DFN模块可识别不同裂纹类型及裂纹数量。当大量微裂纹在局部区域聚集并相互贯通时,便可形成宏观裂纹。微裂纹整体发育趋势可分为缓慢增长阶段I、快速增长阶段II以及稳定阶段III。在 $t$ 为0~3.0 ms时,模型处于微裂纹缓慢增长阶段,炸药能量集中释放形成了粉碎区周围一圈微裂纹,但此时微裂纹数只占总数的15.65%;在 $t$ 为3.0~5.5 ms时,模型处于微裂纹快速增长阶段,此时粉碎区和裂隙区裂纹基本发育完成,微裂纹数达到总微裂纹数的93.66%;在 $t \geq 5.5$  ms时,裂纹处于稳定阶段,这一阶段裂纹扩展达到动态平衡,爆炸能量的大部分已经消耗或传递。

模型中发育的微裂纹数量可以在一定程度上反映岩石损伤的程度。为定量表征不同节理密度模型的损伤程度,统计了不同工况下的剪切裂纹和张拉裂纹

数量,如图7所示。当节理密度从0增加到 $10\text{ m}^{-1}$ 时,总微裂纹数短暂增加后快速下降。在节理密度为 $2\text{ m}^{-1}$ 时,总微裂纹数达到最大值1279。最小值928出现在节理密度为 $10\text{ m}^{-1}$ 的工况下,相较Intact完整模型总微裂纹数下降了约27.44%,较DFN1节理模型总微裂纹数下降了约34.09%。总体而言,微裂纹数与节理密度呈负相关关系,但在低节理密度DFN1工况下微裂纹数大于完整岩体模型,这是因为应力波在遇到节理时发生反射和折射,导致节理周围局部出现应力集中,促进了微裂纹小幅度增加,但随节理密度增加,节理作为弱面会改变爆破能量的传播路径,能量更容易沿节理方向释放,从而减少岩体内部的微裂纹形成。

借助分形维数可以定量描述爆生裂纹的复杂性以及空间分布规律,进而揭示节理密度对爆破效果的影响,分形维数计算流程见文献[7],图8展示了不同节理密度下各模型爆生裂纹的分形维数变化趋势。图8中, $\delta$ 表示盒尺寸, $N(\delta)$ 表示盒尺寸数量。

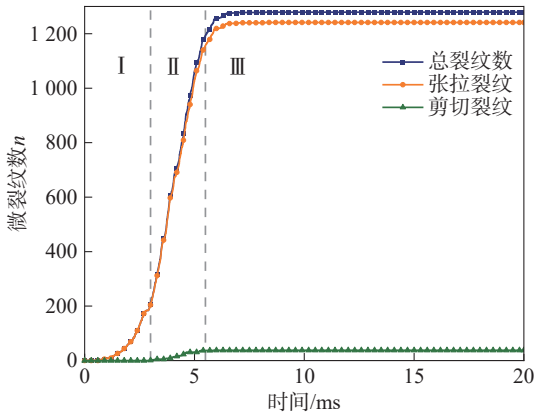


图 6 Intact 模型裂纹时程曲线

Fig. 6 Intact model crack time history curves

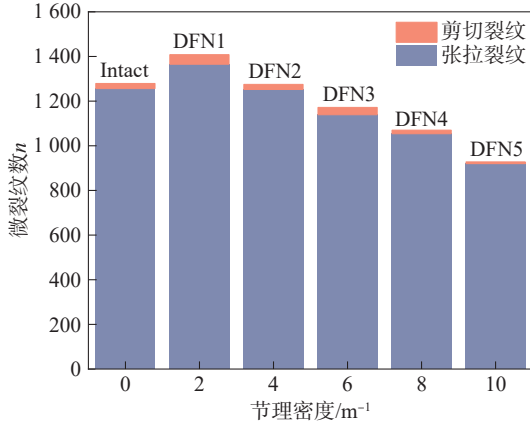


图 7 不同工况下剪切与拉伸裂纹数量

Fig. 7 Number of shear and tensile cracks under different working conditions

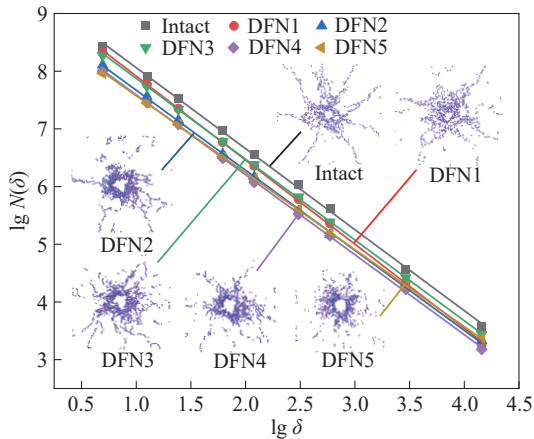


图 8 不同节理密度模型爆生裂纹分形维数

Fig. 8 Fractal dimension of crack initiation in models with different joint densities

从图 8 中可以看出,随节理密度的增加,裂隙区范围显著减小,而粉碎区范围呈扩大趋势。在 Intact 完整岩体模型中粉碎区呈现以爆炸点为中心的近圆形分布,其裂隙区内存在多条长距离的辐射状主裂纹。在模型 DFN1 中,粉碎区显著扩大,同时裂隙区主裂纹数量相对较少,表明炸药所产生的能量集中于粉碎区域范围

内。在模型 DFN2~DFN5 中,随着节理密度的逐渐增加可以看到爆生微裂纹越来越集中在粉碎区,而裂隙区几乎没有主裂纹。同时,裂隙区域范围内裂隙呈点状分布,表明爆炸应力波在高节理密度岩体中的传播受到强烈阻碍,与之所对应的分形维数较低,表明裂纹的复杂度和空间分布较为简单。试验结果表明,节理密度的增加对粉碎区的影响相对较小,而对裂隙区裂纹扩展影响较大,尤其是最长径向主裂纹的扩展。

图 9 为不同节理密度下各模型微裂纹数与分形维数关系示意图。微裂纹数和分形维数处于快速上升阶段且达到了峰值,此时裂纹分布的复杂度显著增加。在节理密度处于 2~10 m<sup>-1</sup> 时,微裂纹数与分形维数处在下降阶段,分形维数的下降反映了裂纹网络复杂程度的减弱。

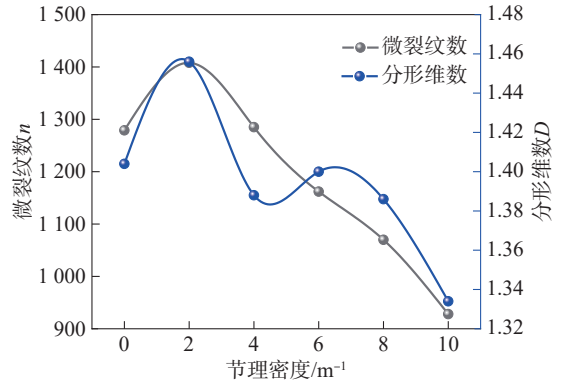


图 9 不同节理密度模型微裂纹与分形维数示意图

Fig. 9 Schematic diagram of microcracks and fractal dimension in different joint density models

块度一直是岩体爆破中重点关注的问题,在 PFC 中颗粒通过接触模型相互黏结,当颗粒受到超出黏结阈值的应力波作用时,会发生拉伸或剪切破坏。PFC 内置 Fragment 功能,通过判断 pb\_state 状态来识别新产生的块体,但该功能并不能直接识别块体的直径以及体积,因此无法统计爆破后碎块的粒径分布。受 Fragment 功能启发,使用软件自带 Fish 语言编写程序重新识别块体。首先,基于颗粒接触关系来将各爆破碎块分成不同的组别,通过累积在同一组别内的颗粒面积来计算此块体的几何面积,块体中的形状类似锥形的不规则体,故需要通过等效直径的方法来统一计算爆破后块体的面积。其表达式为:

$$d = 2 \sqrt{\frac{b_{vol}}{\pi}} \quad (8)$$

式中,  $d$  为等效直径,  $b_{vol}$  为碎块颗粒体积。

图 10 展示了爆破后不同节理密度模型的块度分布曲线。从图 10 中粒径占比曲线可见,随着节理密度的增加,块度分布逐渐向细粒径方向偏移,表现为大粒径块体的比例显著减少,而小粒径块体的比例逐渐增加。这表明节理密度越高,岩体受到爆破或破坏后形成的破碎

块体越小,破碎程度越高。高节理密度提供了更多的弱面,使得爆生裂纹更容易在节理面附近扩展并分割岩体,从而导致较小的块度分布。总体上节理密度与岩体破碎细化程度呈正相关。节理密度对爆破效果有直接影响。在高节理密度模型中,虽然微裂纹数量减少,但大块岩体的分离更容易发生,从而提高了爆破效率。

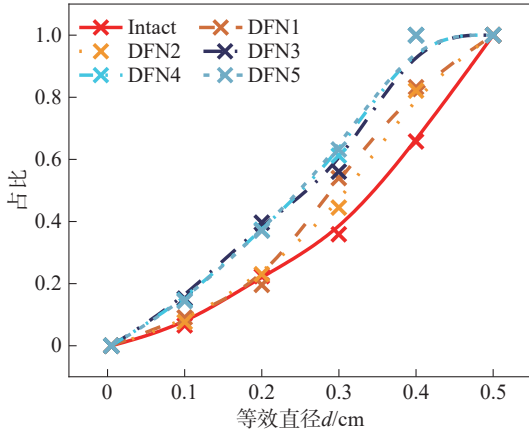


图 10 不同节理密度模型爆后块度分布

Fig. 10 Distribution of fragmentation after explosion in different joint density models

### 2.3 节理密度对应力影响

以完整岩体模型为例,在水平方向上布置了 5 个测点(A~E),以监测不同距离下爆破应力波的传播响应规律。图 11 展示了各测点的应力时程曲线。由图 11 可知:测点 A 处首先受到爆炸应力波影响,应力迅速上升至 154 MPa,随后迅速衰减并呈现出较强的波动特性。测点 B 亦表现出较高应力响应,其波形趋势与测点 A 类似,但峰值应力及波动幅度相对减小。与之相比,测点 C~E 的曲线波动幅度较小、形态平稳,几乎无明显峰值特征。这一规律验证了爆破应力波在岩体中呈现的典型的快速衰减特性。

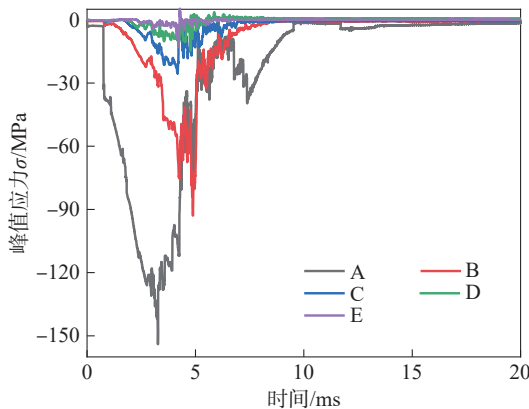


图 11 水平方向不同测点应力时程曲线

Fig. 11 Stress time history curves at different measuring points in the horizontal direction

图 12 展示了不同节理模型下 5 个测点的应力峰值变化规律。整体来看,应力峰值随测点距离炮孔中

心距离的增加呈现指数衰减趋势,但不同节理密度下应力传播存在显著差异。以测点 A 为例,完整岩体的峰值应力为 154 MPa,随节理密度增加,峰值应力在 DFN4 模型后出现了陡降,由完整岩体的 154 MPa 下降到 121 MPa,降幅达 21.42%。最大下降幅度在 DFN5 模型处,为 25.97%,这表明当节理密度超过某一阈值后,节理面对应力波传播的阻滞效应显著增强。

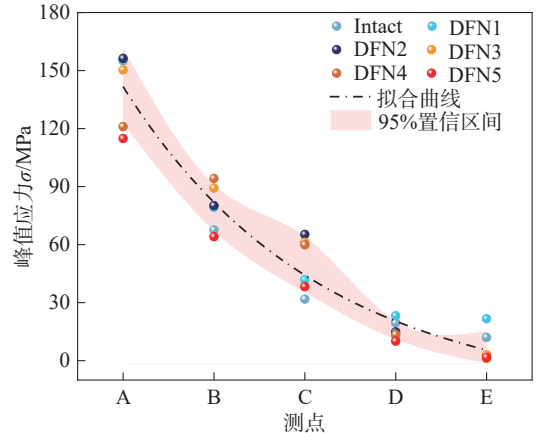


图 12 不同节理模型的峰值应力变化规律

Fig. 12 Variation law of peak stress of different joint models

出现此现象的原因为节理结构对爆破波传播路径产生的扰动作用。随着节理密度的增加,应力波在传播过程中发生更频繁的反射、折射,导致应力波波幅减弱和传播方向偏折,最终表现为测点处应力峰值减小。

### 2.4 节理密度对能量耗散影响

PFC 离散元方法可以跟踪仿真过程中能量存储和释放的变化,因此可以从能量方面更直接地分析节理密度变化对爆炸能量的影响<sup>[36-37]</sup>。本文从动能、应变能及摩擦能 3 种能量的角度对爆炸能量的利用及转换进行了探讨。其中,动能  $E_k$  计算公式为:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (9)$$

式中, $n$  为粒子总数, $v_i$  为粒子速度, $m_i$  为粒子质量。

摩擦能  $E_F$  计算公式为:

$$E_F = -F_d(\delta^t) \quad (10)$$

式中, $F_d$  为阻尼力, $\delta$  为相对平移速度, $t$  为时间。

应变能  $E_s$  计算公式为:

$$E_s = \frac{1}{2} \left( \frac{F_n^2}{\bar{k}_n \bar{A}} + \frac{\|F_s\|^2}{\bar{k}_s \bar{A}} + \frac{\bar{M}_t^2}{\bar{k}_s \bar{J}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{\bar{k}_n \bar{I}} \right) \quad (11)$$

式中: $F_n$  和  $F_s$  分别为颗粒的法向接触力和切向接触力; $\bar{M}_t$  和  $\bar{M}_b$  分别为平行键合扭矩和弯矩; $\bar{k}_n$  和  $\bar{k}_s$  分别为法向和切向平行黏结刚度; $\bar{A}$  为平行黏结横截面积; $\bar{J}$  为平行键合截面积的极限惯性矩; $\bar{I}$  为平行黏结横截面的惯性矩。

图 13 显示了不同节理密度下各节理岩体模型能量转化趋势。其中,应变能随节理密度增加呈逐渐下降趋

势,表明岩体内部储存的弹性应变能显著减少,结合第 2.2 节中微裂纹数量可知,爆破荷载下更多的能量会被节理滑动所耗散,因此,在高节理密度岩体中微裂纹数目少于低节理密度岩体。而摩擦能势较为缓慢,节理密度的增加使更多的能量通过颗粒间的摩擦耗散。动能保持在较低水平,随节理密度的增加变化不大,这表明系统的整体动能对节理密度的变化较不敏感。

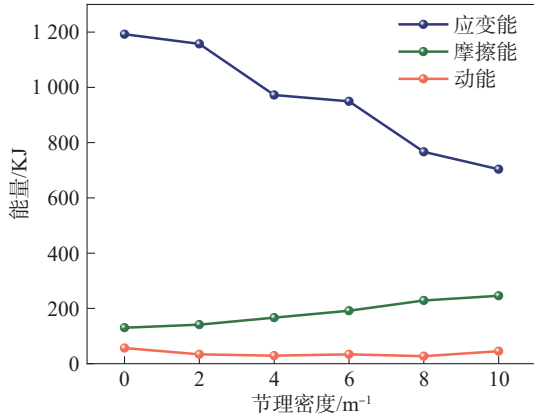


图 13 不同节理密度模型能量转化趋势

Fig. 13 Energy transformation trends of models with different joint densities

### 3 地应力及节理对岩体破碎效果影响

根据大量学者的研究,原位应力对爆破裂纹的演化以及爆破效果存在显著影响。同时,岩体内已存在

张拉裂纹 剪切裂纹 随机分布节理

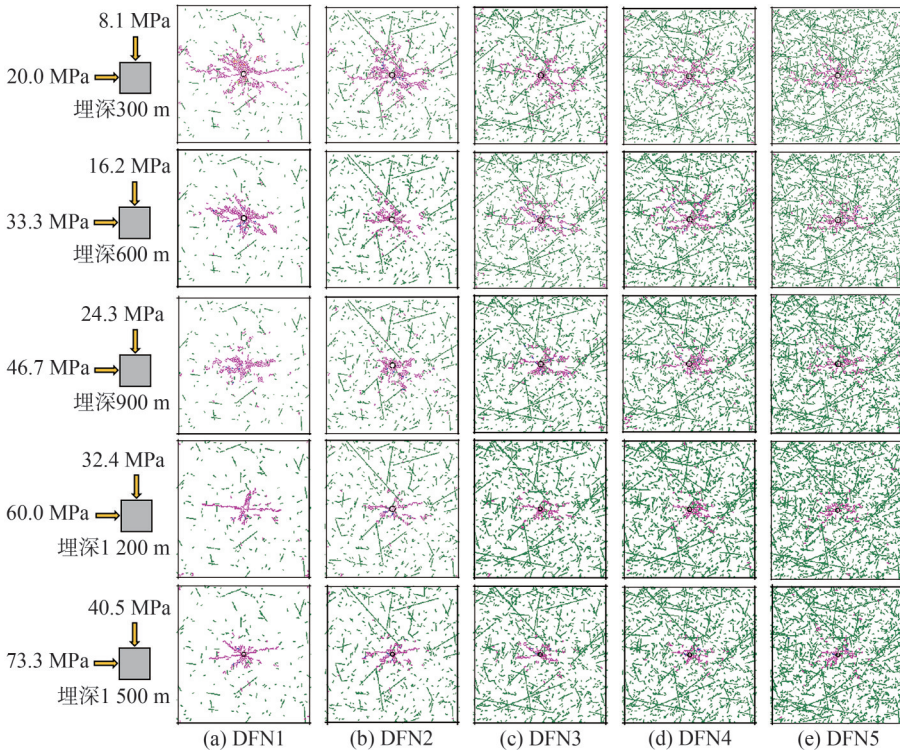


图 15 不同地应力和不同节理密度下爆破模拟结果

Fig. 15 Blasting simulation results under different *in situ* stress and joint densities

的节理裂隙也会影响爆破裂纹以及爆破效果。在本节中考虑了 300、600、900、1 200 和 1 500 m 这 5 个不同埋深的节理岩体数值模型,以分析原位应力和已存在的节理对爆破效果的影响。所采用的水平和垂直原位应力<sup>[38]</sup>如图 14 所示。图 14 中, $\sigma_{h, \min}$ 为最小水平主应力, $\sigma_{h, \max}$ 为最大水平主应力, $\sigma_v$ 为垂直应力, $h$ 为埋深。

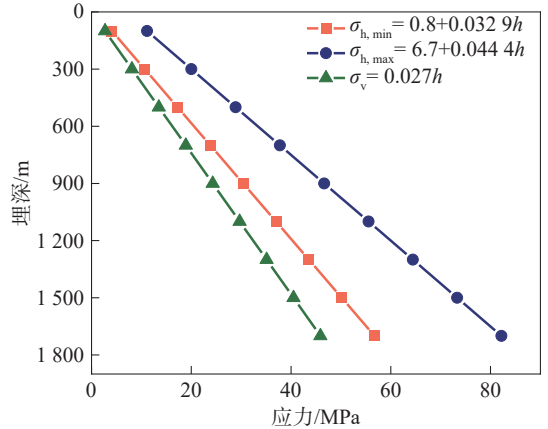


图 14 不同埋深原位应力曲线<sup>[38]</sup>

Fig. 14 *In situ* stress curves at different burial depths<sup>[38]</sup>

#### 3.1 模型损伤

图 15 展示了不同地应力和不同节理密度下的裂纹扩展结果。从图 15 可见,埋深 300 m 时爆生裂纹分布呈辐射状,在地应力作用下微裂纹主要聚集在粉碎区周围,且由于水平应力大于垂直应力,裂隙区的微裂

纹沿水平最大主应力方向发育更长,表明原位应力对裂纹扩展方向具有主导作用。随节理密度的增加微裂纹数大幅减少,且微裂纹的发展受节理的引导和截断的现象更明显,裂隙区几乎无扩展的爆破裂纹。随埋深的增加,总体上表现为粉碎区以及裂隙区微裂纹数不断减少,在埋深 1 200 和 1 500 m 高地应力下,裂隙区水平方向的爆生裂纹受水平应力影响显著。随着节理密度的增加,在高地应力、高节理密度下爆破效果显著降低,岩体破碎集中于炮孔附近的有限范围。

### 3.2 微裂纹数

图 16 为不同埋深和节理密度下微裂纹数,该图揭示了地应力与节理密度在岩体爆破中对微裂纹数的共同作用,其总体呈现为倾斜的平滑凹面状,方向为由低地应力低节理密度向高地应力高节理密度倾斜。在低地应力和低节理密度下节理岩体产生微裂纹数最多,低地应力下岩体内部的约束作用较弱,这与文献[39]高地应力下岩体破碎的平均块度尺寸显著增加的结论相吻合。同时,低节理密度中随机分布的裂纹对爆破产生能量的分散作用有限,更多能量用于新裂纹的生成。节理密度在低地应力条件下对微裂纹发育的抑制作用更为显著。例如,在埋深 300 m 时,节理密度由  $2 \text{ m}^{-1}$  增加至  $10 \text{ m}^{-1}$  时,微裂纹数减少了 65.77%;而在埋深 1 500 m 时,相同密度变化仅使微裂纹数减少 49.17%。当固定节理密度时,如节理密度为  $2 \text{ m}^{-1}$  时,埋深由 300 m 增加至 1 500 m,裂纹数减少 53.46%;但在节理密度为  $10 \text{ m}^{-1}$  时,相同埋深变化仅使裂纹数减少 30.89%。这表明在低节理密度条件下,微裂纹发育对地应力变化更加敏感。

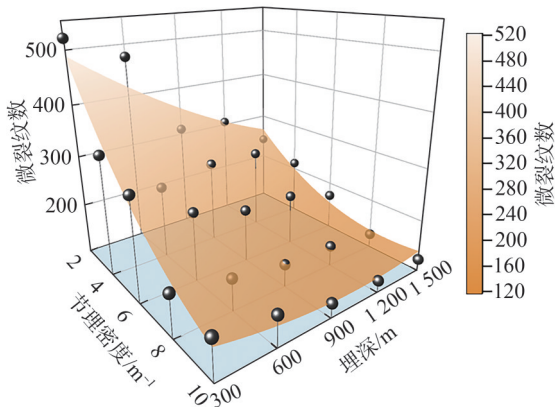


图 16 不同埋深和不同节理密度下微裂纹数

Fig. 16 Number of microcracks at different burial depths and joint densities

### 3.3 分形维数

图 17 为不同埋深和节理密度下爆生裂纹的分形维数。从图 17 可看出,总体呈现与微裂纹类似的倾斜趋势,即地应力和节理密度越大,分形维数越小。这与文

献[40]研究中的非静水围压下含空孔爆破模型,其裂纹分形维数随围压增大而变小的结论相符。但分形维数的数值局部存在波动,这与节理密度的局部不均匀性有关。总体上,随着地应力和节理密度增加,分形维数呈下降趋势,但部分工况下微裂纹可能会沿着节理面发育成分支或呈现更复杂的传播方式,导致局部分形维数上升。

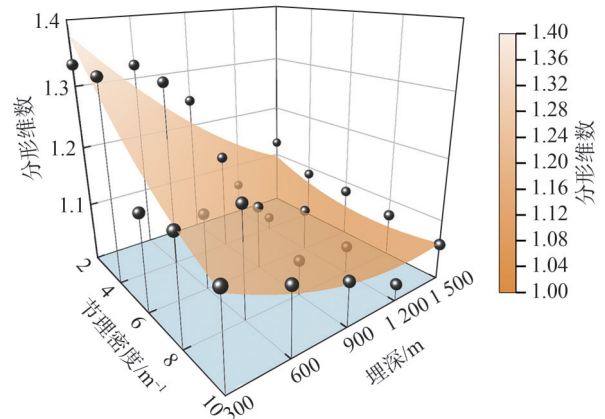


图 17 不同埋深和不同节理密度下分形维数

Fig. 17 Fractal dimensions at different burial depths and joint densities

## 4 讨论

根据上述分析可知,地应力以及节理密度的增加会显著抑制爆破效果,文献[38]建议增加装药直径来获得良好的爆破效果。而关于装药直径增大对含节理岩体破碎效果的具体影响目前还鲜有讨论。为此,本节讨论在耦合装药条件下增加装药直径对含节理岩体破碎程度的影响。联立式(2)~(5)可得不同装药直径  $R$  下炮孔壁作用力  $F_2$ ,如图 18 所示。同时为防止数值模型尺寸过小,边界条件影响试验结果的准确性,本节中所建立的岩体模型长、宽均为 2 m。

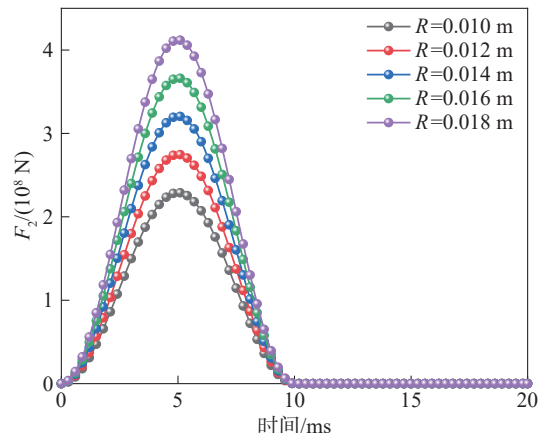


图 18 不同装药直径下炮孔壁作用力  $F_2$

Fig. 18 Force  $F_2$  on the blasthole wall under different charge diameters

以埋深 1 500 m 为例,计算出垂直应力和最大水平应力分别为 40.5 MPa 和 73.3 MPa,在此情况下不同装药直径  $R$  为 0.010~0.018 m,梯度为 0.002 m。爆后微裂纹扩展范围如图 19 所示,在 高地应力高节理密度情

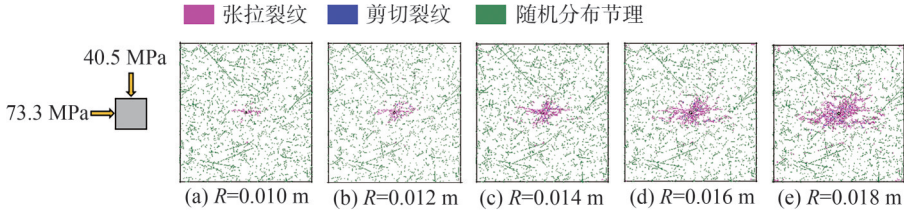


图 19 高地应力下不同装药直径节理岩体破坏范围

Fig. 19 Failure range of jointed rock mass with different charge diameters under high ground stress

况下,增加药量会显著增加破碎区和裂隙区的破坏范围,但此时破坏范围内的微裂纹密集程度显著提高,粉碎区与裂隙区的界限不再明显,过大的装药直径可能会导致岩石的过度粉碎。

图 20 为不同装药直径下微裂纹数与分形维数对比,随炸药直径的增加微裂纹数呈快速上升趋势,其增幅分别为 57%、42%、46%、38%。但分形维数变化趋势为快速上升后趋于平稳。在装药直径达到 0.016 m 后岩体爆破损伤程度并未显著增加。结合图 19 可以发现,随装药直径的增加,爆破过程中微裂纹数显著增加,这与图 19 中粉碎区范围的逐渐扩大相对应。而图 19 中粉碎区与裂隙区的界限逐渐模糊,这也进一步佐证了图 20 中分形维数趋于平稳的趋势,即在装药直径达到 0.016 m 后,节理岩体的整体破碎结构趋于饱和,继续增加装药直径对岩体破碎效果的提升效果有限。

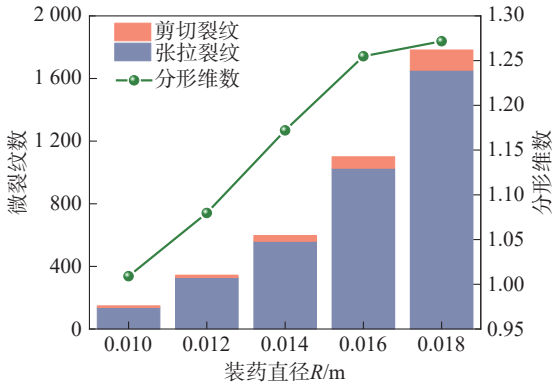


图 20 不同装药直径下微裂纹数与分形维数对比

Fig. 20 Comparison of microcrack count and fractal dimension under varying charge diameters

## 5 结论

本文利用 PFC2D 软件建立了随机节理-地应力耦合的 2 维岩石爆破模型,围绕节理结构特征、应力环境与装药直径,开展了对岩体动态破坏机制的多维度响应分析,通过自编 FISH 语言实现了微裂纹演化到宏观块度表征的定量分析,揭示了节理密度与地应力在控制裂纹复杂度过程中的耦合作用规律,主要结论如下:

1) 在无地应力条件下,随着节理密度的增加,爆后岩体内部的微裂纹数及分形维数呈现先增加后减小的类似趋势,裂纹结构趋于局部化,粉碎区范围随

节理密度上升略有扩大,裂隙区范围则有明显收缩。基于 PFC 开发的块体识别程序实现了爆后块度的定量统计,结果表明高节理密度会显著降低大粒径块体比例,粒径分布向细粒端偏移。

2) 节理密度的增加改变了应力波传播路径,致使峰值应力整体下降,尤其在 高节理密度下应力响应出现了阶跃式衰减,最高达 25.97%。能量分析结果表明,应变能随节理密度增加而显著衰减,动能变化不大,裂纹扩展局限于炮孔附近的区域。

3) 在地应力及节理耦合作用下,岩体的微裂纹数和分形维数整体呈现非线性下降趋势。高节理密度增强了能量在结构面上的反射与耗散,显著抑制了微裂纹的生成,同时微裂纹趋于沿水平最大主应力方向扩展。在相同节理密度下,微裂纹数与分形维数随地应力增加而降低,在低地应力情形下节理密度的影响更为显著。

4) 在地应力与节理联合控制下,装药直径的增加可扩大岩体破碎范围,微裂纹数量增加的同时粉碎区与裂隙区的界限逐渐模糊,裂纹复杂度趋于稳定,进一步增加装药量对岩体破碎效果提升有限。该结果表明,在节理发育且地应力显著的条件下,单纯增加装药量会导致爆破能效降低,需在参数优化中综合考虑结构面特征与地应力环境。

### 参考文献:

[1] Huang Linqi, Chen Jiangzhan, Zhou Jian, et al. Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3436-3449. [黄麟淇, 陈江湛, 周健, 等. 未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3436-3449.]

[2] Chen Lu, Zhou Zilong, Gao Shan, et al. Research status and prospects of blasting excavation of tunnel under high stress condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 849-865. [陈璐, 周子龙, 高山, 等. 高应力隧道爆破研究现状与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 849-865.]

- [3] Chen Shihai, Chu Shaofeng, Gong Jiachen, et al. Blasting vibration response of sandstone tunnel surrounding rock under high ground stress[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(17): 73–80. [陈士海, 初少凤, 宫嘉辰, 等. 高地应力下砂岩隧道围岩爆破振动响应研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(17): 73–80.]
- [4] Huo Xiaofeng, Shi Xiuzhi, Qiu Xianyang, et al. A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 123: 104407.
- [5] Yan Guangliang, Zhang Fengpeng, Ku T, et al. Experimental study and mechanism analysis on the effects of biaxial *in situ* stress on hard rock blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3709–3723.
- [6] Hong Zhixian, Tao Ming, Zhao Mingsheng, et al. Numerical modelling of rock fragmentation under high *in situ* stresses and short-delay blast loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 293: 109727.
- [7] Yang Shuai, Liu Zegong, Zhang Jianyu, et al. Test study on damage features of deep coal body under explosive load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(19): 276–286. [杨帅, 刘泽功, 张健玉, 等. 爆炸荷载作用下深部煤体损伤特征试验研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(19): 276–286.]
- [8] Yang Jianhua, Peng Chao, Ye Zhiwei, et al. Energy distribution of shock wave in deep rock mass blasting[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(6): 1735–1746. [杨建华, 彭超, 叶志伟, 等. 深部岩体爆破冲击波能量分布特征[J]. 兵工学报, 2024, 45(6): 1735–1746.]
- [9] Jin Jiefang, Yang Yi, Liao Zhanxiang, et al. Effect of dynamic loads and geo-stresses on response characteristics of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1990–2002. [金解放, 杨益, 廖占象, 等. 动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1990–2002.]
- [10] Liu Huilin, Huang Linqi, Wang Zhaowei, et al. Experimental study on dynamic response of hard rock blasting under *in situ* stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 182: 105860.
- [11] Pu Chuanjin, Yang Xin, Zhao Han, et al. Numerical investigation on crack propagation and coalescence induced by dual-borehole blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157: 103983.
- [12] Zhang Yongjun, Xu Meng, Liu Sijia, et al. Rate-dependent constitutive modelling blasting crack initiation and propagation in rock masses[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(1): 83.
- [13] Ma Longhao. Study on dynamic damage constitutive model of rock and low damage blasting method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. [马龙浩. 岩石动力损伤本构模型及低损伤爆破方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.]
- [14] Zhou Wenhai, Hu Caizhi, Bao Juan, et al. Numerical study on crack propagation and stress wave propagation during blasting of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(9): 2501–2512. [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.]
- [15] Zhou Zilong, Wang Zhen, Cheng Ruishan, et al. Performance of water-coupled charge blasting under different *in situ* stresses[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(7): 2300–2320.
- [16] Wang Z L, Konietzky H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(12): 1945–1955.
- [17] Fakhimi A, Lanari M. DEM–SPH simulation of rock blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 158–164.
- [18] Qiu Jiadong, Li Diyuan, Li Xibing, et al. Numerical investigation on the stress evolution and failure behavior for deep roadway under blasting disturbance[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 137: 106278.
- [19] Sarfarazi V, Fu Jinwei, Haeri H, et al. Investigation of fracture mechanisms in smooth blasting of limestone samples: Numerical and experimental approaches[J]. Computational Particle Mechanics, 2024, 11(6): 2943–2969.
- [20] Shen Yang, Lin Baiquan, Liu Ting, et al. Research on the influence of parallel joints on the extension length and morphology of blasting cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167: 106088.
- [21] Zuo Ting, Li Xianglong, Wang Jianguo, et al. Insights into natural tuff as a building material: Effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108584.
- [22] Li Qian, Li Haibo, Fu Shuiyang, et al. The effect of *in situ* stress on blast-induced rock fracture and damage zone[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 154: 106091.
- [23] Yu Rangang, Zhang Zehua, Gao Wenle, et al. Numerical simulation of rock mass blasting vibration using particle flow code and particle expansion loading algorithm[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2023, 122: 102686.
- [24] Luo Renyu, Li Qizhi, Huang Yunjin, et al. Numerical simulation and safety analysis of foundation pit blasting based on PFC[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(5): 107–114. [罗仁宇, 李奇志, 黄云进, 等.]

- 基于 PFC 的基坑爆破数值模拟及安全性分析[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文),2023,62(5):107–114.]
- [25] Du Junlin, Luo Qiang, Zong Qi. Analysis on preliminary shock pressure on borehole of air-de-coupling charging[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2005,25(3):306–310.[杜俊林,罗强,宗琦.空气不耦合装药爆破孔壁冲击压力分析[J].西安科技大学学报,2005,25(3):306–310.]
- [26] Mas Ivars D, Pierce M E, Darcel C, et al. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011,48(2):219–244.
- [27] Zhao Weihua, Huang Runqiu. Potential failure paths of fractured rock slope based on synthetic rock mass(SRM) method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(8):1843–1855.[赵伟华,黄润秋.基于 SRM 的裂隙岩质边坡潜在失稳路径分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1843–1855.]
- [28] Wang X, Yuan W, Yan Y T, et al. Scale effect of mechanical properties of jointed rock mass: A numerical study based on particle flow code[J]. Geomechanics and Engineering, 2020,21(3):259–268.
- [29] Dehghan Banadaki M M, Mohanty B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,40/41:16–25.
- [30] Gao Qianxi, Wang Zhiliang, Ni Yu, et al. A study on blasting response of rock mass considering *in situ* stress and joint inclination[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2025,143:103144.
- [31] Yuan Wei, Wang Wei, Su Xuebin, et al. Numerical study of the impact mechanism of decoupling charge on blasting-enhanced permeability in low-permeability sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018,106:300–310.
- [32] Zhou Zongqing, Sun Jiwei, Lai Yongbiao, et al. Study on size effect of jointed rock mass and influencing factors of the REV size based on the SRM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022,127:104613.
- [33] Khodaei M, Biniiaz Delijani E, Hajipour M, et al. Analyzing the correlation between stochastic fracture networks geometrical properties and stress variability: A rock and fracture parameters study[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021,11(2):685–702.
- [34] Bonnet E, Bour O, Odling N E, et al. Scaling of fracture systems in geological media[J]. Reviews of Geophysics, 2001,39(3):347–383.
- [35] Jia Zhengzhao. Study on blasting mechanism and blasting effect evaluation of burnt rock in open-pit mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.[贾正昭.露天矿烧变岩爆破破碎机理及爆破效果评价研究[D].阜新:辽宁工程技术学, 2022.]
- [36] Ao Yunhe, Jia Baoxin, Sun Chuang, et al. Fracture characteristics and energy evolution analysis of pre-cracked granite under uniaxial compression based on a 3D-Clump model[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023,124:103756.
- [37] Wang Zhiliang, Yu Langlang. Analysis on true triaxial mechanical properties of deep marble by using a discrete element-finite difference coupling method[J]. Explosion and Shock Waves, 2024,44(7):124–136.[王志亮,余浪浪.深部大理岩真三轴力学特性离散元和有限差分耦合分析[J].爆炸与冲击, 2024,44(7):124–136.]
- [38] Li Xiaohan, Zhu Zheming, Wang Meng, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,113:103968.
- [39] Cao Zeming, Yang Jianhua, Ye Zhiwei, et al. Influences of *in situ* stress on distribution characteristics of rock blasting fragmentation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024,46(10):2202–2211.[曹泽铭,杨建华,叶志伟,等.地应力对岩体爆破块度分布特征的影响研究[J].岩土工程学报, 2024,46(10):2202–2211.]
- [40] Fu Shigui, Liu Zegong, Zhang Jianyu, et al. Study on mechanism of controlled blasting and damage evolution of rock mass under high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024,41(4):867–878.[傅师贵,刘泽功,张健玉,等.高地应力下岩体控制爆破机理与损伤演化特征研究[J].采矿与安全工程学报, 2024,41(4):867–878.]

## Numerical Investigation of Single-hole Blasting Response in Randomly Jointed Rock Masses Under High *in situ* Stress

LIU Haoshan<sup>1,2</sup>, WANG Jianguo<sup>1,2</sup>, SONG Yongkang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiyu<sup>1,2\*</sup>, HUANG Yonghui<sup>3</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Provincial Department of Education, Kunming 650093, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

### Abstract:

**Objective** With the ongoing depletion of shallow mineral resources, deep mining operations often exceeding depths of 1 000 m have become in-

creasingly common. In such high-stress environments, the coupled effect of *in situ* stress and pre-existing joint networks significantly influences rock blasting performance. However, most traditional studies focus on homogeneous or regularly jointed rocks, which fail to represent the geometric randomness and complexity of natural joint distributions. This study aims to investigate the mechanisms of blast-induced damage and fragmentation in jointed rock masses under varying *in situ* stress conditions. Specifically, it examines how joint density, burial depth, and charge diameter interactively influence microcrack propagation, fractal complexity, and energy dissipation behavior during blasting, with the goal of providing guidance for efficient blasting in deep rock masses.

**Methods** A two-dimensional numerical blasting model was developed using the Particle Flow Code in 2D (PFC2D), with a discrete fracture network (DFN) incorporated to construct a synthetic rock mass (SRM). The joint planes were modeled using the Smooth Joint Model (SJM), and the intact rock matrix was represented by the Parallel Bond Model (PBM). The blasting load was applied through the particle expansion method, and the loading curve was defined by a half-sine waveform. The micro-mechanical parameters of the model were calibrated against laboratory test results of limestone samples, including uniaxial compression, triaxial compression, and Brazilian tensile tests to ensure the physical accuracy of the simulation. The simulations covered five joint densities ( $P_{10}=2\sim 10\text{ m}^{-1}$ ), five burial depths (300~1 500 m), and five charge diameters (0.010~0.018 m). The output indicators included microcrack count, peak stress, energy distribution (kinetic, strain, and frictional energy), fractal dimension of crack networks, and block size distribution. In addition, a custom FISH script was developed to identify fragmented blocks and quantify post-blast fragment size distribution.

**Results and discussions** The results showed that joint density had a non-monotonic influence on fragmentation behavior. At low joint densities, microcrack formation was enhanced due to localized stress concentrations near joint tips. However, as density increased, joint interfaces acted as preferential energy dissipation paths, which reduced the formation of new cracks and decreased the fractal dimension of the crack network. Peak stress propagation showed an exponential attenuation pattern, with up to a 25.97% reduction at high joint densities due to enhanced wave scattering and reflection. Increasing *in-situ* stress led to a marked reduction in microcrack count and fractal dimension, which indicated more localized and constrained damage zones. Under high stress conditions, microcracks tended to align along the direction of maximum principal stress, particularly in jointed media. A stronger inhibitory effect of joint density on microcrack development was observed at lower stress levels, which highlighted the interactive coupling between these two parameters. Energy analysis revealed that strain energy storage decreased with increasing joint density, while frictional dissipation became more prominent. Kinetic energy remained relatively insensitive to joint configuration. Block size distribution analysis indicated a shift toward finer fragmentation with increased joint density, which demonstrated higher energy efficiency in rock breakage under joint-controlled failure modes. Regarding charge diameter, increasing the diameter enlarged the fragmented zone and increased the number of microcracks. However, beyond a critical diameter (approximately 0.016 m), both the microcrack count and fractal complexity plateaued, which indicated saturation in the fragmentation mechanism. At this stage, a further increase in charge size contributed to over-crushing and inefficient energy utilization.

**Conclusions** This study establishes a PFC2D-based numerical model that couples *in-situ* stress with randomly distributed joints to simulate the dynamic blasting behavior of jointed rock masses. The simulation results indicate that increasing joint density reduces crack complexity and encourages localized fracture patterns, whereas *in-situ* stress further restricts crack propagation and raises directional growth along the principal stress direction. The interaction between joint density and stress is nonlinear, with more pronounced suppression of fracture development at lower stress levels. Although larger charge diameters expand the fragmentation zone, the growth in crack complexity reaches saturation beyond a threshold, indicating limited improvement in breakage efficiency. Overall, the model provides theoretical support and design guidance for efficient blasting in deep, jointed rock masses.

**Key words:** jointed rock masses; high *in situ* stress; single-hole blasting model; fractal dimension; particle flow

(编辑 张 琼)

引用格式: Liu Haoshan, Wang Jianguo, Song Yongkang, et al. Numerical investigation of single-hole blasting response in randomly jointed rock masses under high *in situ* stress[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 133–144. [刘浩杉, 王建国, 宋永康, 等. 高地应力下随机节理岩体单孔爆破响应特征模拟研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 133–144.]