



## 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究

丁晨曦 梁欣桐 杨仁树 郭啸 杨阳 周俊 朱心广

### 引用本文:

丁晨曦, 梁欣桐, 杨仁树, 等. 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 79–88.  
DING Chenxi, LIANG Xintong, YANG Renshu. Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 79–88.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0852>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究

Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 116–128 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0503>

#### 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究

Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 50–64 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1042>

#### 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制

In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 140–150 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/89ccb35a-401e-4189-a310-94470bd0dd0d>

#### 高地应力条件煤与瓦斯突出模拟试验研究

Simulation test study on coal and gas outburst under conditions of high in-situ stress

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 113–121 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/51494c2a-4e83-41bf-8ada-77e8e682de7f>

#### 深部高地应力巷道组合锚索高压注浆技术研究

Study on high-pressure grouting technology with combined anchor and cable under high ground stress roadway

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52f7d592-479a-4e5f-9e62-6983e9a9e572>

#### 沁水盆地南部煤层水力压裂裂缝及地应力方向分析

Analysis of hydraulic fracturing cracks for coal reservoirs and in-situ stress direction in Southern Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4c5c2c77-cb86-4ba0-a278-c59417ddc1c6>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

丁晨曦, 梁欣桐, 杨仁树, 等. 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 79–88.

DING Chenxi, LIANG Xintong, YANG Renshu, *et al.* Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 79–88.

## 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究

丁晨曦<sup>1</sup>, 梁欣桐<sup>1</sup>, 杨仁树<sup>1</sup>, 郭 啸<sup>2</sup>, 杨 阳<sup>1</sup>, 周 俊<sup>3</sup>, 朱心广<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 数理学院, 北京 100083; 3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:**近年来, 矿产资源的开采状态由露天转地下, 由浅部转深部, 在深部岩体的钻爆法施工中, 地应力对爆破效果有显著影响。有关掏槽爆破机理和应用的研究主要是针对浅部地层中的巷道爆破施工, 没有考虑地应力对爆破效果的作用。采用一种考虑爆破荷载下粉碎区能量耗散的改进型连续-非连续单元法(Continuum-Discontinuum Element Method, CDEM), 基于二维平面应变模型, 分别研究了普通直眼掏槽爆破和大空孔直眼掏槽爆破在不同地应力条件下的应力演化过程和破裂损伤特征。数值模拟结果表明, 大空孔的存在增强了爆炸应力波的反射拉伸作用, 削弱了地应力对爆炸裂纹扩展的抑制作用, 促进了爆炸主裂纹的扩展, 增加了掏槽爆破的分形损伤和损伤面积, 提高了掏槽爆破的岩体破碎程度。双向等压地应力对爆炸裂纹的扩展有抑制作用, 对径向爆炸裂纹的扩展尤为显著。较大的地应力削弱了孔间爆炸应力波的相互作用, 相邻炮孔对爆炸主裂纹扩展的导向效应减弱。随着地应力的增加, 爆炸裂纹的分形维数和分形损伤整体上呈逐渐减小的趋势, 但是大空孔直眼掏槽爆破的裂隙区分形损伤和损伤面积均显著大于普通直眼掏槽爆破的裂隙区分形损伤和损伤面积。说明在高地应力环境下, 大空孔直眼掏槽爆破依然能够显著增加岩石破碎程度和破碎范围, 提高爆破效果和破碎效率。

**关键词:** 地应力; 掏槽爆破; CDEM; 应力演化; 损伤破裂

**中图分类号:** TD235; TD236 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)07-0079-10

### Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway

DING Chenxi<sup>1</sup>, LIANG Xintong<sup>1</sup>, YANG Renshu<sup>1</sup>, GUO Xiao<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>3</sup>, ZHU Xing Guang<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In recent years, the mining state of mineral resources has changed from open air to underground and from shallow to deep. In the drilling and blasting construction of deep rock masses, in-situ stress has a significant impact on the blasting effect. An improved continuum-discontinuum element method (CDEM) considering energy dissipation in the crushing zone under blasting load is used to study the stress evolution process and rupture damage characteristics of ordinary straight hole cut blasting and large empty hole cut blasting under different in-situ stress conditions based on a two-dimensional plane strain model. The numerical results show that the existence of the large empty hole enhances the reflection and stretching effect of the explosion stress wave, weakens the inhibitory effect of the ground stress on the explosion crack expansion, promotes the expansion of the main explosion crack, increases the fractal damage and damage area of the trough blast, and improves the crushing degree of the rock mass of the trough blasting. The bi-directional isobaric in-situ stress has an inhibitory effect on the propagation of blast-induced cracks, especially on the propagation of radial cracks. The larger in-situ stress weakens

收稿日期: 2023-12-11 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-0852

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204085); 北京市自然科学基金资助项目(8224086); 北京科技大学青年教师学科交叉研究资助项目(FRF-IDRY-21-006)

作者简介: 丁晨曦(1991—), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 博士。E-mail: dingcx91@sina.com

通讯作者: 朱心广(1993—), 男, 河南驻马店人, 博士后, 博士。E-mail: zhuxg@imech.ac.cn

the interaction of blasting stress waves between holes, and the guiding effect of adjacent holes on the propagation of the main crack is weakened. With the increase of in-situ stress, the fractal dimension and fractal damage of explosion crack decrease gradually on the whole, but the fissure differentiated damage and damage area of large empty hole blasting are significantly greater than the fissure differentiated damage and damage area of ordinary straight hole blasting. It shows that in the high in-situ stress environment, the large empty hole cut blasting can still significantly increase the rock crushing degree and crushing range and improve the blasting effect and crushing efficiency.

**Key words:** in-situ stress; cut blasting; CDEM; stress evolution; damage fracture

## 0 引言

随着社会经济发展和人口数量攀升,人类对煤炭等矿产资源的需求量和消耗量也在持续增加。而地表和地球浅部的资源经过长期开发后已经很难再满足人类工业生产和生活的需求,向地球深部开发是必然的发展趋势。钻爆法目前仍然是深部硬岩开挖的主要手段,深部岩体爆破破岩是爆炸荷载与高地应力共同作用的结果<sup>[1-2]</sup>。深部岩体中巷道爆破施工效率的关键在掏槽,掏槽爆破可为崩落孔爆破提供新的自由面,有利于后续爆破克服围压条件下岩石的夹制作用,是深部巷道爆破掘进的关键技术<sup>[3-4]</sup>。其中,直眼掏槽是巷道掘进钻爆法施工中常用的掏槽技术之一,具有施工简单、碎岩抛掷距离短、槽腔形状规整、破碎后块度均匀等优点。在直眼掏槽技术的基础上,为了让掏槽区域岩石在爆破过程中获得更大的碎胀空间及自由面,往往会在掏槽孔附近钻凿大直径空孔,即大空孔直眼掏槽爆破技术<sup>[5-6]</sup>。与单孔爆破相比,掏槽爆破通常是多孔同时或延时起爆,岩石爆破破碎机理更加复杂。

近年来,众多科研工作者和工程技术人员在掏槽爆破机理和应用技术方面作了大量研究工作。其中,杨仁树等<sup>[7]</sup>研究了直眼掏槽爆破中掏槽孔超深深度与炮孔利用率的相关关系,发现适当加大掏槽孔超深深度能显著提高炮孔利用率。此外,丁晨曦等<sup>[8]</sup>进一步提出了分阶分段直眼掏槽爆破技术,通过数值模拟获得了孔内最优分段长度比例,并在纱岭金矿的主井施工中进行了工程应用。在此基础上,针对大空孔直眼掏槽爆破技术,李启月等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析发现空孔改变了掏槽爆破的应力分布,使得掏槽孔间及空孔壁处最大拉应力随空孔直径增大而增大。孟海利等<sup>[10]</sup>基于弹性力学和波动力学理论阐明了空孔应力集中效应的力学机理,为大空孔直眼掏槽爆破设计提供了理论基础。

目前,有关掏槽爆破机理和应用的研究主要是针对浅部地层中的巷道爆破施工,没有考虑地应力对爆破效果的作用。然而,实践表明随着巷道施工深度的增加,地应力对爆破效果的影响效应是不可

忽略的<sup>[11]</sup>。因此,开展深部高地应力岩体掏槽爆破机理研究是十分迫切的,有利于为深部岩体爆破参数优化提供科学依据和参考。相关研究工作已经处于初步探索阶段,明确指出了地应力对掏槽爆破应力演化和破裂特征均有显著影响<sup>[12-13]</sup>。由于地应力施加的复杂性和爆破过程的瞬态性,数值模拟是高地应力岩体掏槽爆破机理研究的主要手段。其中,有限元方法是相关数值模拟研究中最常用的方法。但是,有限元方法是一种基于连续介质的力学方法,在模拟爆破大变形和裂纹扩展等问题方面存在局限性。基于此,本文采用连续-非连续单元方法,对不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破和大空孔直眼掏槽爆破的裂纹扩展和破裂特征进行对比分析。

## 1 数值模拟与计算模型

### 1.1 改进 CDEM 方法简介

连续-非连续单元方法(CDEM)<sup>[14-15]</sup>是基于拉格朗日方程实现有限元和离散元的耦合,模拟块体内部和边界断裂,以块体表示连续性质,界面表示不连续性质,实现材料的渐进破坏过程(图1)。与常用的有限元和离散元软件相比具有一定的优势,区别于通过失效控制实现的裂纹扩展,它可以描述非线性力学行为,通过块体边界和内部裂纹模拟大变形破坏过程,从而更真实地模拟裂纹扩展和破裂的物理过程。

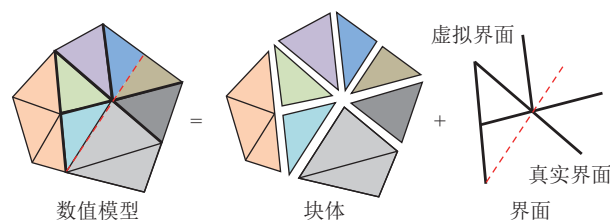


图1 CDEM 数值模型的基本组成<sup>[14]</sup>

Fig.1 Fundamental components of CDEM numerical model<sup>[14]</sup>

CDEM方法能够比较真实地实现爆破裂隙区的形成过程。但是,由于爆破过程的复杂性,尚未有一款数值模拟软件能够实现爆破粉碎区形成过程的真实模拟。CDEM方法在进行爆破数值模拟时,没有



考虑粉碎区的形成,炮孔周边直接形成裂隙区。由于粉碎区范围较小,在研究岩石破裂过程中可以忽略粉碎区的范围,但是粉碎区对爆炸能量的消耗是不可忽略的。基于此,笔者考虑爆破荷载下粉碎区的能量消耗,通过理论计算得出粉碎区的耗能特性并开发能量折减的计算插件,即提出了适用于爆生裂纹扩展研究的改进 CDEM 方法<sup>[16]</sup>,使得数值模拟计算更符合爆生裂纹扩展的物理过程。

## 1.2 计算模型基本参数

采用上述改进 CDEM 方法,建立直眼掏槽和大空孔直眼掏槽 2 种不同掏槽形式的二维平面应变爆破模型。普通直眼掏槽爆破数值模型如图 2 所示,岩体尺寸 2 100 mm×1 900 mm,炮孔半径为 22.5 mm,相邻炮孔间距为 600 mm。大空孔直眼掏槽爆破数值模型如图 3 所示,该模型以普通直眼掏槽模型为基础,在岩体中心位置设置了一个半径为 100 mm 的空孔。

在数值模拟中,岩体采用线弹性本构模型,炸药采用朗道爆源模型,岩体单元之间的接触面采用脆断模型,边界设置为无反射边界条件。岩体材料参数见表 1,炸药参数见表 2。

为模拟岩体所处的深部高地应力状态,在模型边界处施加地应力,水平方向地应力为  $\sigma_h$ , 竖直方向地应力为  $\sigma_v$ 。数值模拟中施加的地应力为双向等压地应力,即  $\sigma_h = \sigma_v$ 。为方便对后文不同数值模拟算例进行描述,以 10 MPa-10 MPa 表示水平方向地应力和竖直方向地应力均为 10 MPa 的算例,20 MPa - 20 MPa、30 MPa-30 MPa 同理。

## 2 掏槽形式对掏槽爆破应力演化和裂纹扩展的影响

### 2.1 普通直眼掏槽爆破

普通直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展如图 4 所示,炸药起爆时间记为  $t=0$ 。从图中可以看出炸药

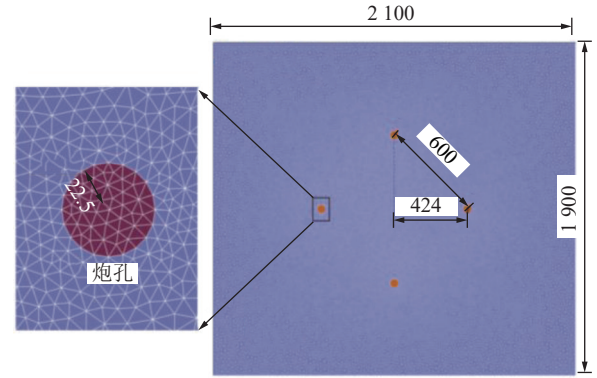


图 2 普通直眼掏槽爆破模型的尺寸与网格划分  
Fig.2 Dimensions and mesh division of ordinary straight hole cut blasting model

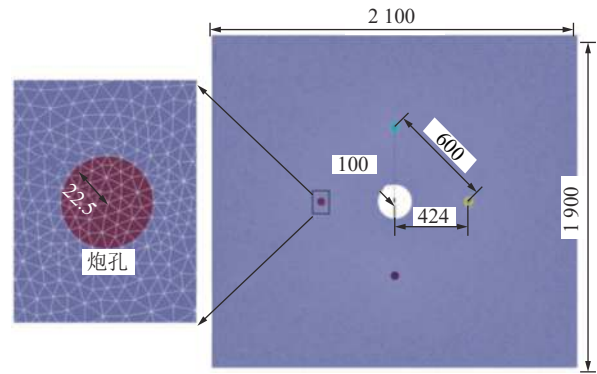


图 3 大空孔直眼掏槽爆破模型的尺寸与网格划分  
Fig.3 Dimensions and mesh division of large empty hole cut blasting model

起爆后,炮孔周边形成多条裂隙,部分裂隙在随后的扩展过程中成为爆炸主裂纹,其余裂隙由于扩展能量不足而止裂。 $t=300 \mu\text{s}$  前,4 个炮孔爆破产生的裂纹尖端爆炸应力相互独立,爆炸应力以炮孔为中心的圆形波阵面向外传播,主裂纹尖端均在爆炸应力波阵面上同步向外扩展,爆炸裂纹的扩展方向呈现随机性。 $t=300 \mu\text{s}$  后,炮孔间应力波阵面出现交错并相互作用,孔间爆炸主裂纹以更大速度扩展。孔间爆炸应力波的叠加对孔间爆炸裂纹的扩展具有促进作用。

表 1 岩体材料参数

Table 1 Rock material parameters

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	纵波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泊松比	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	剪胀角/ ( $^{\circ}$ )
2 700	7.5	167.8	3 500	0.3	13.9	40	10

表 2 炸药参数

Table 2 Explosive parameters

爆破速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	爆破热能/( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1阶段绝热系数	2阶段绝热系数	爆轰波压力/MPa
6 930	4 500	3.0	1.333	20 000

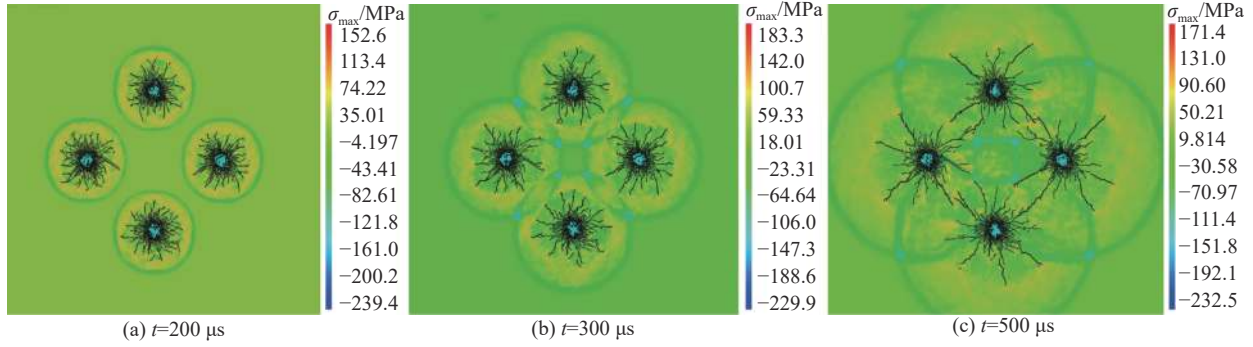


图4 普通直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展

Fig.4 Stress evolution and crack propagation in ordinary straight hole cut blasting

## 2.2 大空孔直眼掏槽爆破

大空孔直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展如图5所示。 $t=300\ \mu\text{s}$ 后,大空孔直眼掏槽爆破应力演化过程与普通直眼掏槽爆破的存在显著差异。 $t=300\ \mu\text{s}$ 后,炮孔间应力波阵面开始出现交错并相互作用,孔间爆炸主裂纹快速扩展。此外,爆炸应力波

从空孔处反射形成拉升应力波。在反射拉伸应力波的作用下,空孔孔壁处产生裂纹,空孔周边岩体逐渐剥落。与图4相比,4个掏槽孔朝向空孔一侧的爆炸裂纹更加密集,掏槽区域的岩石更加破碎,验证了大空孔的存在对于提高掏槽爆破的破碎效果是有利的。

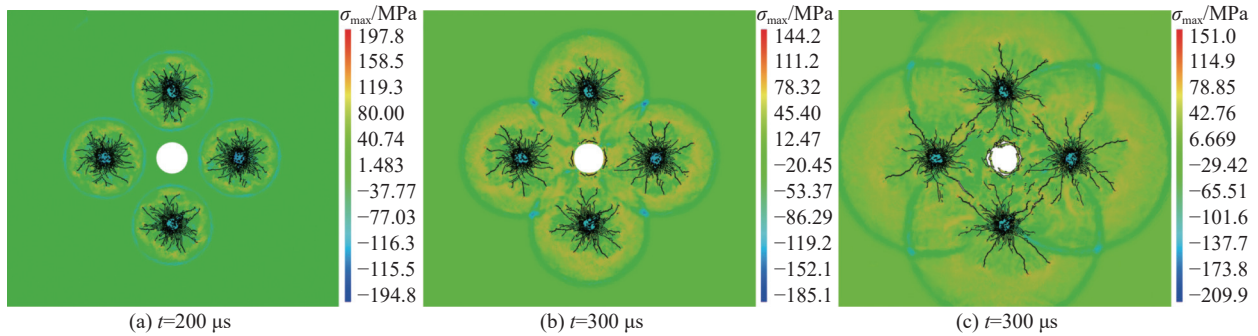


图5 大空孔直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展

Fig.5 Stress evolution and crack propagation in large empty hole cut blasting

## 3 地应力对掏槽爆破应力演化和裂纹扩展的影响

### 3.1 炮孔受力分析

高地应力岩体的爆破破坏是爆炸应力与地应力共同作用的结果。对于二维平面应变问题,假设炮孔受到水平方向地应力  $\sigma_h$  和竖直方向地应力  $\sigma_v$  的作用,炸药爆炸后炮孔内冲击波的压力为  $P$ 。根据厚壁圆筒理论,到炮孔中心距离为  $R$  的测点的爆炸应力场为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + P \left(\frac{r}{R}\right)^\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \left(1 - \frac{4r^2}{R^2} + \frac{3r^4}{R^4}\right) \cos 2\varphi \quad (1)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) \left(1 + \frac{r^2}{R^2}\right) - \lambda_d P \left(\frac{r}{R}\right)^\alpha - \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \left(1 + \frac{3r^4}{R^4}\right) \cos 2\varphi \quad (2)$$

式中:  $\sigma_r$  为径向应力;  $\sigma_\varphi$  为切向应力;  $P$  为爆炸后炮孔内冲击波压力;  $\sigma_h$  为水平方向地应力;  $\sigma_v$  为垂直方向地应力;  $\varphi$  为计算点与炮孔中心的连线和水平方向的夹角;  $r$  为炮孔半径;  $R$  为计算点到炮孔中心的距离;  $\alpha$  为爆炸冲击波、应力波传播过程中的衰减系数;  $\lambda_d$  为动态侧压系数。

根据式(1)和式(2)可知,当水平方向地应力和竖直方向地应力相同时,即  $\sigma_h = \sigma_v$ , 炮孔孔壁 ( $R=r$ ) 的爆炸应力场为

$$\sigma_r = P \quad (3)$$

$$\sigma_\varphi = 2\sigma_h - \lambda_d P \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,在双向等压地应力 ( $\sigma_h = \sigma_v$ ) 条件下,炮孔孔壁处的径向应力  $\sigma_r$  不受地应力的影响,而切向应力  $\sigma_\varphi$  随着地应力的增加而显著增加。切向应力  $\sigma_\varphi$  主要影响了径向爆炸裂纹的萌生和扩展,

因此,双向等压地应力显著抑制了径向爆炸裂纹的扩展,不利于岩石破碎。工程实践中,随着巷道埋深的增加,地应力也逐渐增加。由上述分析可知,逐渐增加的地应力对爆破裂纹扩展的抑制作用也逐渐增加,不利于岩石的破碎和槽腔的形成,导致掏槽爆破效果逐渐变差。这种情况下,往往需要增加单孔装药量或减小掏槽孔间距。

### 3.2 普通直眼掏槽爆破

不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展如图 6 所示。无地应力条件下每个炮孔周边的主裂纹数量平均为 7 条,如图 4 所示。而 10 MPa-10 MPa、20 MPa-20 MPa 和 30 MPa-

30 MPa 算例中每个炮孔周边的主裂纹数量分别为 5 条、4 条和 2 条。可见,随着地应力的增加,爆炸主裂纹数量逐渐减少。此外,主裂纹的最大长度和平均长度也随着地应力的增加而明显变短。从图 6 中可以看出,双向等压地应力抑制了各个方向爆破裂纹(径向裂纹)的扩展,并且抑制作用随着地应力的增加而显著加强,这与前文理论分析的结论是一致的。此外,较大的地应力削弱了孔间爆炸应力波的相互作用,相邻炮孔对爆炸主裂纹扩展的导向效应减弱。当地应力为 30 MPa 时,各方向裂纹长度无明显差异,说明相邻炮孔对裂纹扩展和分布已无明显的导向效应。

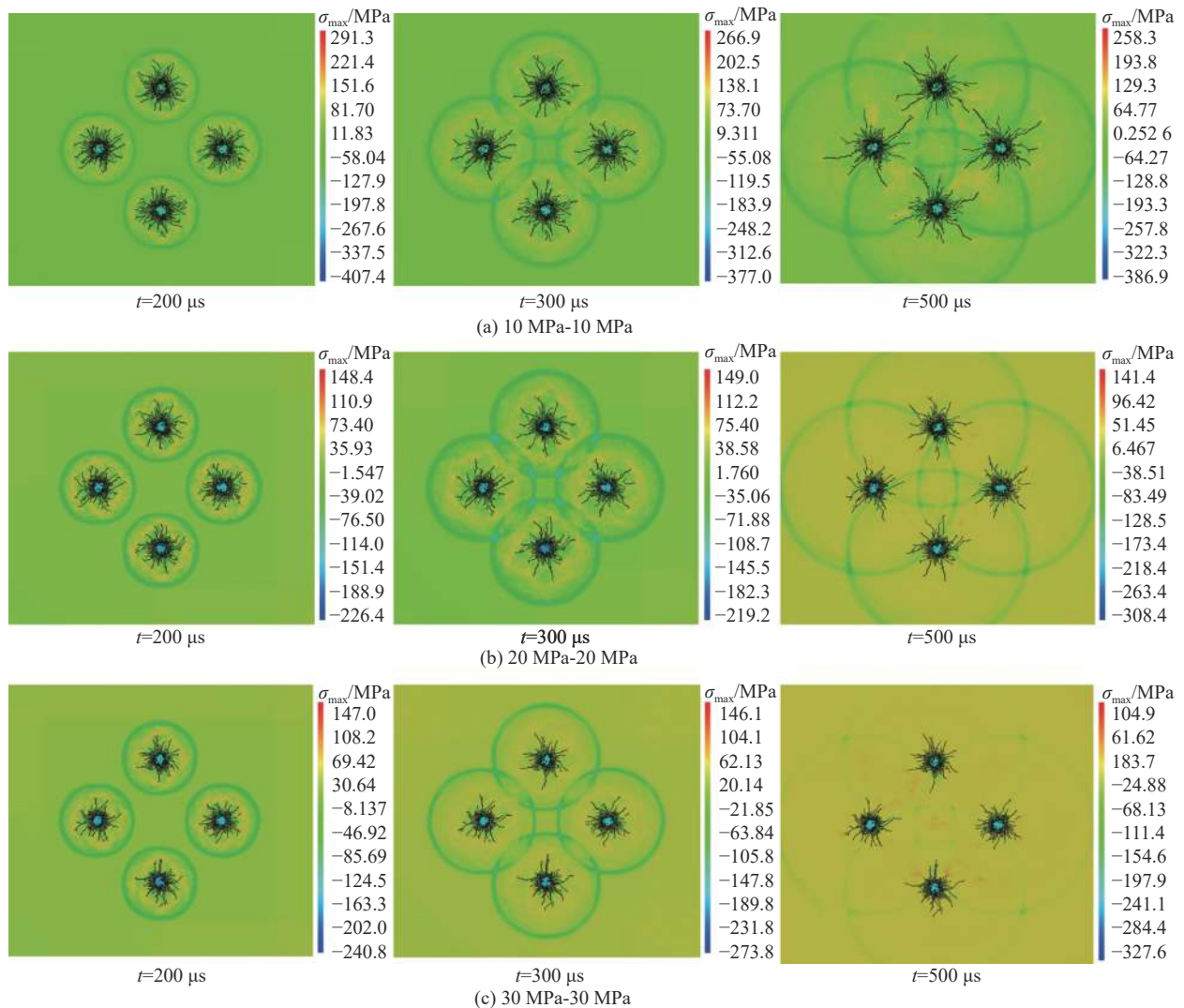


图 6 不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展

Fig.6 Stress evolution and crack propagation in ordinary straight hole cut blasting under different in-situ stress conditions

### 3.3 大空孔直眼掏槽爆破

不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展如图 7 所示。与不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破的爆炸裂纹类似,炮孔周边主裂

纹数量和长度均随着地应力的增加而迅速减小。此外,地应力的增加对空孔周围岩石破裂的也产生了影响,空孔周围环向裂纹密度逐渐降低。与图 6b 相比可以明显发现,在相同的较大地应力条件下,大空



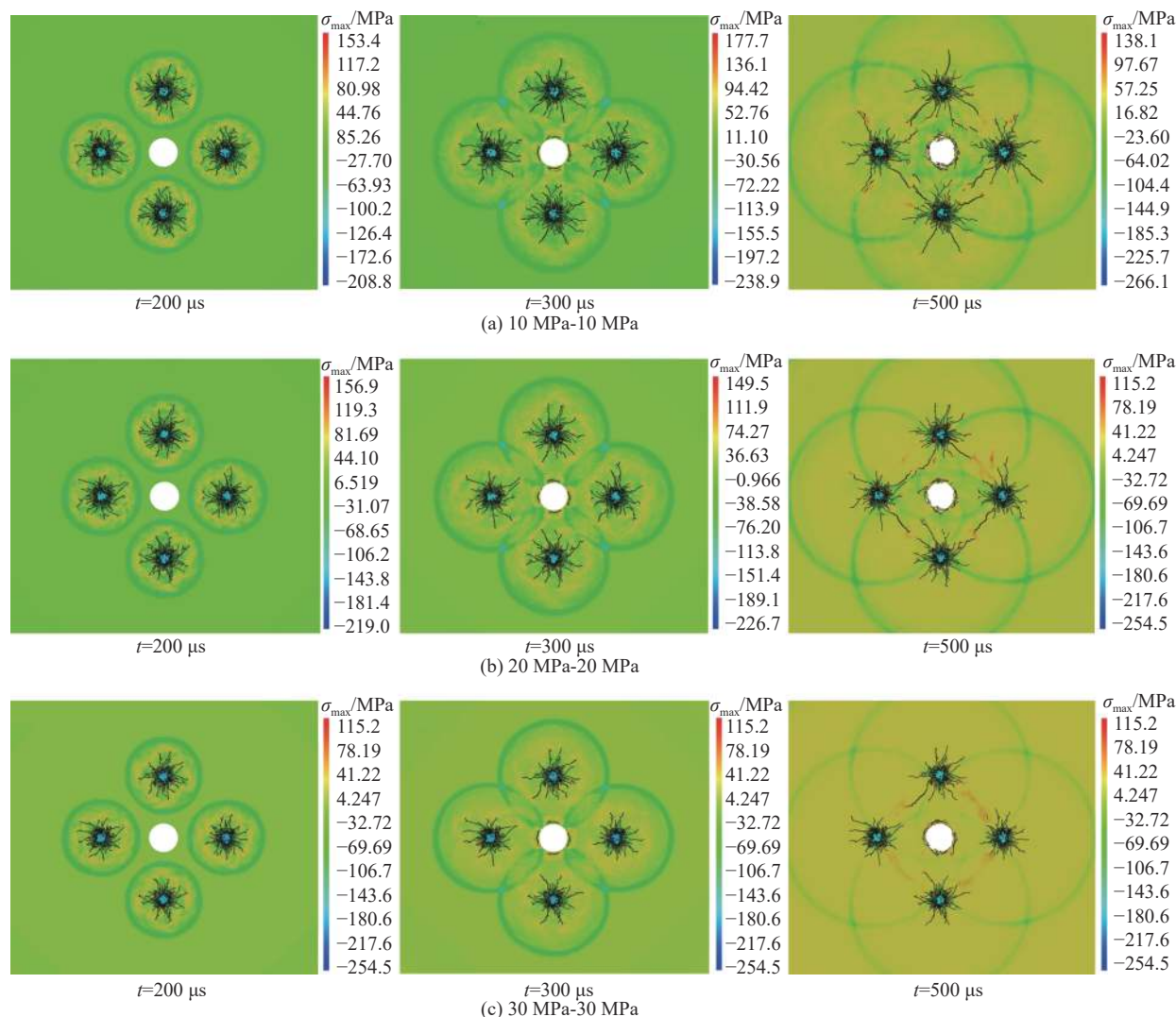


图 7 不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破的应力演化和裂纹扩展

Fig.7 Stress evolution and crack propagation in large empty hole cut blasting under different in-situ stress conditions

孔直眼掏槽爆破的孔间爆炸裂纹仍然可以基本贯通,主裂纹数量和长度均显著大于普通直眼掏槽爆破的。大空孔对爆炸裂纹扩展具有导向和促进作用,地应力对爆炸裂纹扩展就有抑制作用。大空孔在一定程度上可以削弱地应力对爆炸裂纹扩展的抑制作用。

#### 4 地应力对掏槽爆破裂纹分布与损伤特征的影响

##### 4.1 分形损伤理论

分形理论最早被谢和平院士引入含裂隙岩体的非连续性破坏的分析中,建立了分形-岩体力学<sup>[18]</sup>,为岩体的损伤、破坏等研究提供了新方法。相关研究结果<sup>[19-20]</sup>表明,岩体爆破的裂纹分布、破碎块度和断面粗糙度等分布特征都满足分形原理,分形方法可以帮助我们进一步揭示岩体爆破机理<sup>[21]</sup>。根据计盒维数的基本原理,任意非空有界目标集合的分形

维数<sup>[22]</sup>可表示为

$$D = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lg N(\delta_k)}{-\lg \delta_k} \quad (5)$$

式中:  $D$  为分形维数;  $\delta_k$  为建立的以方形网格边长为元素的递减序列;  $N(\delta_k)$  为用边长为  $\delta_k$  的方形网格覆盖目标几何时所需的最小网格数目。

将数值模拟爆破后的裂纹分布图进行二值化处理,图 8 所示为无地应力条件下 2 种形式掏槽爆破的裂纹分布二值化图像,图像分辨率均为  $1\,024 \text{ pix} \times 1\,024 \text{ pix}$ ,分辨率为 119 ppi。在采用计盒维数计算爆炸裂纹的分形维数时,必须确定覆盖裂纹区域的方形网格数,网格的尺寸与像素的大小有关,网格的最小尺寸等于像素的实际尺寸。因此,图像分辨率越高,盒子的尺寸越小,计算结果的精度越高。利用 FIJI 图像处理软件对覆盖爆炸裂纹所需的不同边长网格的数目进行统计,并通过计算得到分形维数的

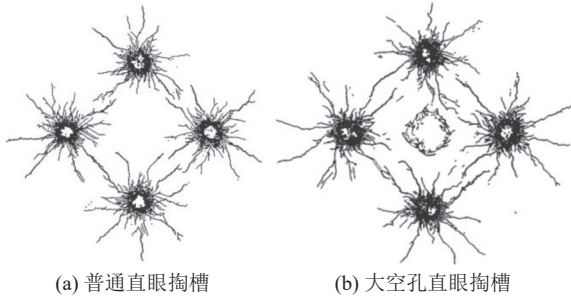


图8 无地应力条件下掏槽爆破的裂纹分布二值化图像

Fig.8 Binary images of crack distribution in cut blasting under zero in-situ stress conditions

数值。分形损伤与分形维数之间存在线性关系,可以根据计算的分形维数得到分形损伤<sup>[23]</sup>。

#### 4.2 普通直眼掏槽爆破

不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破爆炸裂纹分布的二值化图像如图9所示。炸药爆炸后炮孔周边产生数条较长的爆炸主裂纹和数目繁多的爆炸次裂纹,以4个炮孔连线为界,爆炸主裂纹主要向外扩展而向内扩展的裂纹明显受到抑制作用。10 MPa-10 MPa算例的爆炸裂纹分布情况与无地应力算例的分布情况类似,但裂纹明显更短。由于地应力的缘故,裂纹扩展受到抑制作用;地应力越大,抑制效应越显著。

将图9中爆炸裂纹分布的二值化图像导入 FIJI

中的分形维数计算程序,得到图10所示的3组不同地应力条件下爆炸裂纹分布的分形维数拟合直线。10 MPa-10 MPa、20 MPa-20 MPa和30 MPa-30 MPa算例的爆炸裂纹分形维数依次为1.491、1.498和1.485,对应的分形损伤依次为0.746、0.749和0.743。无地应力条件下的爆炸裂纹分形维数和分形损伤分别为1.536和0.768。随着地应力的增加,爆炸裂纹的分形维数和分形损伤整体上呈逐渐减小的趋势。

#### 4.3 大空孔直眼掏槽爆破

不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破爆炸裂纹分布的二值化图像如图11所示。地应力的作用下,爆炸裂纹扩展和空孔周边岩石破碎均受到抑制作用。30 MPa-30 MPa案例中,炮孔周围主要形成粉碎区,爆炸裂纹扩展受到极大限制,空孔周围也没有形成较好的破碎自由面。由此可见,对于大空孔直眼掏槽爆破,地应力、爆炸应力和空孔均对岩石破碎效果产生显著影响。

图12所示为不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破的爆炸裂纹分形维数拟合直线。10 MPa-10 MPa、20 MPa-20 MPa和30 MPa-30 MPa算例的爆炸裂纹分形维数依次为1.521、1.510和1.478,对应的分形损伤依次为0.761、0.752和0.739。无地应力条件下的爆炸裂纹分形维数和分形损伤分别为

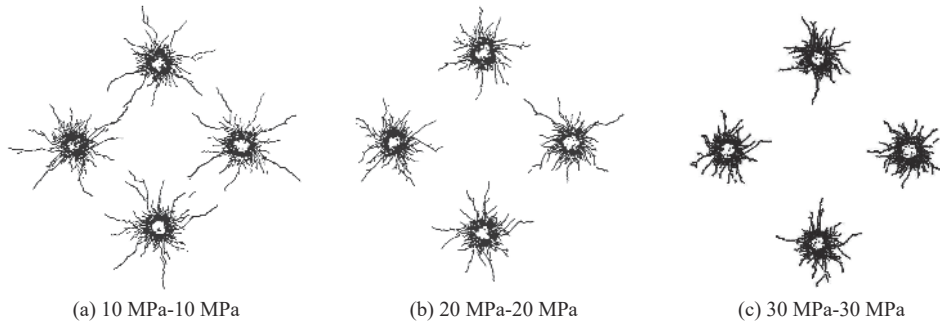


图9 不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破裂纹分布的二值化图像

Fig.9 Binary images of crack distribution in ordinary straight hole cut blasting under different in-situ stress conditions

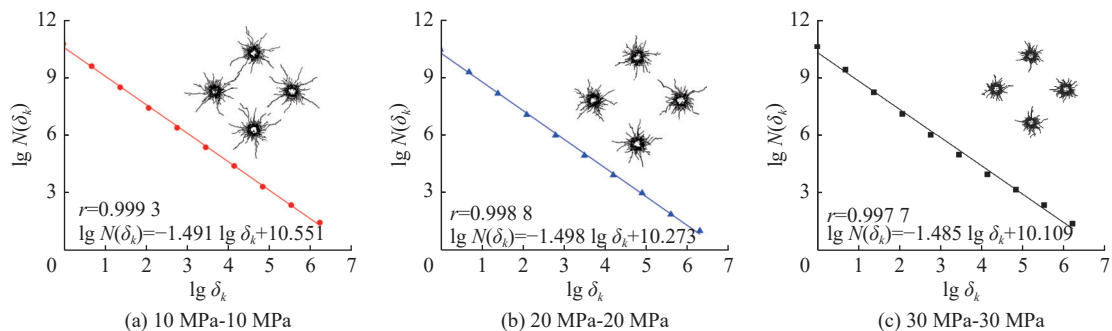


图10 不同地应力条件下普通直眼掏槽爆破裂纹分形维数计算

Fig.10 Calculation of crack fractal dimension in ordinary straight hole cut blasting under different in-situ stress conditions



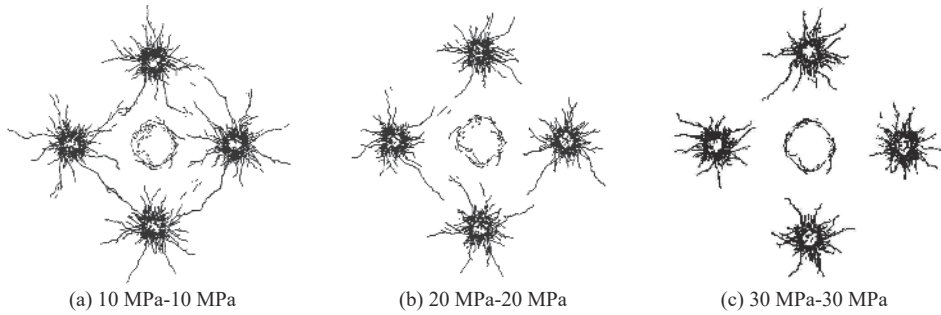


图 11 不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破裂纹分布的二值化图像

Fig.11 Binary images of crack distribution in large empty hole cut blasting under different in-situ stress conditions

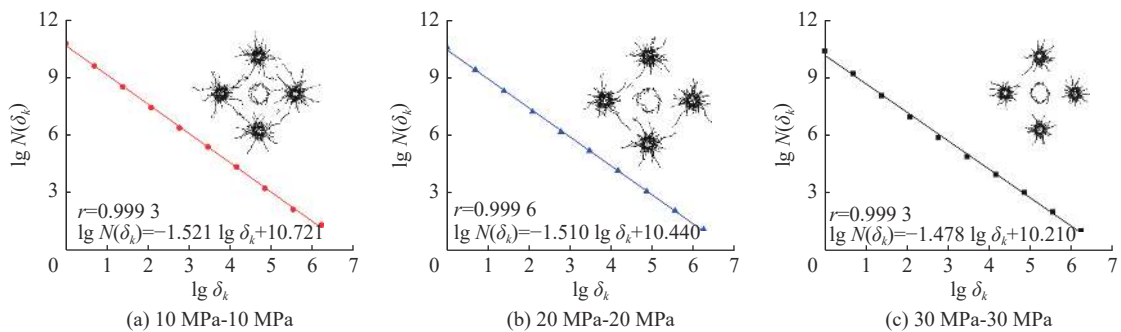


图 12 不同地应力条件下大空孔直眼掏槽爆破裂纹分形维数计算

Fig.12 Calculation of crack fractal dimension in large empty hole cut blasting under different in-situ stress conditions

1.538 和 0.769。与普通直眼掏槽爆破的情况类似,随着地应力的增加,爆炸裂纹的分形维数和分形损伤整体上呈逐渐减小的趋势。

#### 4.4 对比分析

图 13 为 2 种形式掏槽爆破的分形损伤随地应力的变化曲线,分形损伤整体上均随着地应力的增加而逐渐减小。并且,当地应力为 0、10、20 MPa 时,大空孔直眼掏槽爆破裂隙区爆破分形损伤都要显著大于普通直眼掏槽爆破,而当地应力为 30 MPa 时普通直眼掏槽爆破分形损伤却反超了大空孔直眼掏槽爆破。由此可见,在一定范围内,大空孔能够为掏槽爆破增加裂隙区的破碎度。炸药爆炸后,炮孔周边

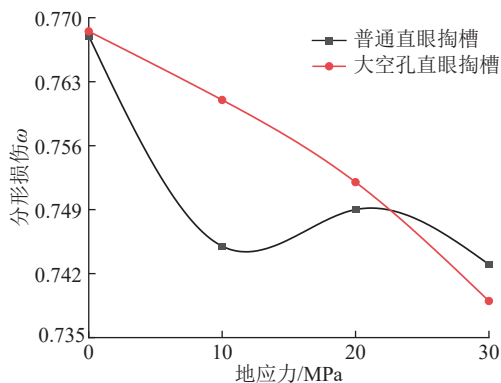


图 13 分形损伤随地应力的变化

Fig.13 Fractal damage variation with in-situ stress

一般会形成 2~5 倍炮孔半径的粉碎区,粉碎区的外围是裂隙区。图 14 为 2 种形式掏槽爆破的损伤面积随地应力的变化曲线,损伤范围随着地应力的增加而显著减小,并且在相同地应力条件下,大空孔直眼掏槽爆破的损伤面积始终大于普通直眼掏槽爆破的损伤面积,说明地应力能抑制爆破裂纹的扩展,并显著降低岩体损伤面积,但大空孔却能有效加剧岩体的损伤和破碎。

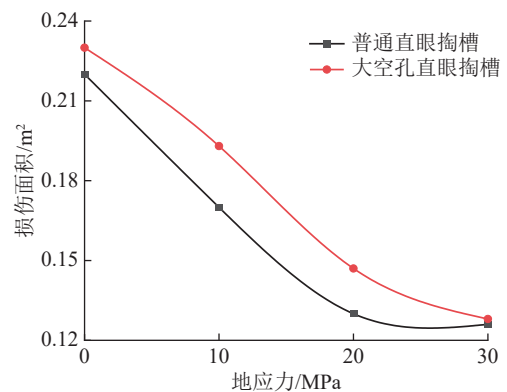


图 14 损伤面积随地应力的变化

Fig.14 Damage area variation with in-situ stress

## 5 结 论

1) 大空孔的存在增加了爆炸应力波的反射拉伸

作用,促进了爆炸主裂纹的扩展,增加了掏槽爆破的分形损伤和损伤面积。大空孔直眼掏槽爆破有利于提高岩体破坏程度和岩体破碎范围。

2)双向等压地应力对爆炸裂纹的扩展有抑制作用,对径向爆炸裂纹的扩展尤为显著,这种抑制作用随着地应力的增加而显著加强,不利于岩石的破碎。此外,较大的地应力削弱了孔间爆炸应力波的相互作用,相邻炮孔对爆炸主裂纹扩展的导向效应减弱。

3)随着地应力的增加,大空孔直眼掏槽爆破的裂隙区分形损伤和损伤面积均显著大于普通直眼掏槽爆破。这说明即使在高地应力环境下,大空孔直眼掏槽爆破依然能够显著增加岩石破坏程度和破碎范围,提高爆破效果和破碎效率。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] DING C X, YANG R S, YANG L Y. Experimental results of blast-induced cracking fractal characteristics and propagation behavior in deep rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104772.
- [3] 杨仁树, 李成孝, 陈骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224-241.  
YANG Renshu, LI Chengxiao, CHEN Jun, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224-241.
- [4] 倪昊. 竖井二氧化碳“二阶二段”筒形掏槽爆破技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 65-71.  
NI Hao. Application and carbon dioxide two-step barrel cut blasting technology in coal mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 65-71.
- [5] 张召冉, 王岩, 刘国庆. 空孔对直眼掏槽参数及爆破效果的影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(1): 141-156.  
ZHANG Zhaoran, WANG Yan, LIU Guoqing. Theoretical study of the influence of empty-hole on both the blasting parameters and the blasting effect of straight-hole cutting[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(1): 141-156.
- [6] 张召冉, 陈华义, 矫伟刚, 等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 791-800.  
ZHANG Zhaoran, CHEN Huayi, JIAO Weigang, et al. Study on void effect and blasting parameters of straight cut with void[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 791-800.
- [7] 杨仁树, 张召冉, 安晨, 等. 煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 10-23.  
YANG Renshu, ZHANG Zhaoran, AN Chen, et al. Discussion on ultra-deep depth problem of slot hole in blasting excavation of rock roadway in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 10-23.
- [8] DING C X, YANG R S, ZHENG C D, et al. Numerical analysis of deep hole multi-stage cut blasting of vertical shaft using a continuum-based discrete element method[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(12): 1086.
- [9] 李启月, 徐敏, 范作鹏, 等. 直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. 爆破, 2011, 28(4): 23-26.  
LI Qiyue, XU Min, FAN Zuopeng, et al. Simulation of rock failure process in cutting by parallel hole and analysis on empty hole effect[J]. Blasting, 2011, 28(4): 23-26.
- [10] 孟海利, 孙鹏昌, 薛里, 等. 大直径中空孔直眼掏槽爆破的空孔应力集中效应研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 60-65, 153.  
MENG Haili, SUN Pengchang, XUE Li, et al. Study on stress concentration effect of large-diameter empty hole in burn cut blasting[J]. Blasting, 2023, 40(4): 60-65, 153.
- [11] LU W B, CHEN M, GENG X, et al. A study of excavation sequence and contour blasting method for underground powerhouses of hydropower stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29: 31-39.
- [12] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 257-270.
- [13] 张宪堂, 马力, 余辉, 等. 空孔直径对有围压直眼掏槽爆破破碎效果的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 55-64.  
ZHANG Xiantang, MA Li, YU Hui, et al. Influence of diameter of empty hole on the fragmentation effect of parallel cut blasting under confining pressure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 55-64.
- [14] 冯春, 李世海, 郝卫红, 等. 基于CDEM的钻地弹侵彻爆炸全过程数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 11-18, 26.  
FENG Chun, LI Shihai, HAO Weihong, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 11-18, 26.
- [15] LI S H, WANG J G, LIU B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4): 331-348.
- [16] DING C X, LIANG X T, YANG R S, et al. A study of crack propagation during blasting under high *in situ* stress conditions based on an improved CDEM method[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023: 1-18.
- [17] 皇新宇, 纪强, 张宪堂, 等. 地应力作用下四孔掏槽破岩机理数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 60-69.  
HUANG Xinyu, JI Qiang, ZHANG Xiantang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(2): 60-69.
- [18] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [19] XIE H, ZHOU H W. Application of fractal theory to top-coal cav-

- ing[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2008, 36(4): 797-807.
- [20] 徐鹏,程远方,张晓春,等.水泥试样爆炸压裂实验及裂纹分形评价[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(2): 179-184.
- XU Peng, CHENG Yuanfang, ZHANG Xiaochun, *et al.* Fractal evaluation of explosive fracturing simulation test on cement samples[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 179-184.
- [21] 丁晨曦.爆炸动静破岩作用与高应力状态下爆破动力学行为研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
- DING Chenxi. Study on dynamic-static rock fracture mechanism of blasting and blasting dynamic behavior under high stress condition[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing, 2020.
- [22] 杨仁树,许鹏.爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3065-3071.
- YANG Renshu, XU Peng. Fractal study of media damage under blasting loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3065-3071.
- [23] DING C X, YANG R S, LEI Z, *et al.* Fractal damage and crack propagation in decoupled charge blasting[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141: 106503.