

文章编号: 1003-1480(2025)01-0083-06

孔内多分段掏槽爆破数值模拟及实验研究

冯婷¹, 夏治园², 杨帆², 陈欢², 罗国安², 杨士昌², 鲁海生²

(1. 郑州经贸学院, 河南 郑州, 451191; 2. 安徽江南爆破工程有限公司, 安徽 宣城, 242300)

摘要: 针对传统煤矿巷道掏槽爆破成本高、炮孔利用率低等问题, 提出了一种孔内多分段掏槽爆破技术。通过采用 ANSYS/AUTODYN 数值模拟软件建立直眼掏槽、楔形掏槽和孔内多分段掏槽 3 组仿真模型, 结合 SPH 算法进行仿真计算, 对比分析了不同掏槽爆破模型的进尺效果, 并针对孔内多分段掏槽爆破方法进行了现场缩比实验。研究表明: 孔内多分段掏槽爆破模型理论上具有改善掘进面掏槽区自由面形态、破除岩石夹制力、增强爆破作用力等多种优点; 仿真结果显示孔内多分段掏槽模型炮孔利用率可达 97%, 高于直眼掏槽和楔形掏槽; 现场缩比实验结果表明, 孔内多分段掏槽爆破进尺效果良好, 最高可达 100%, 充分证明了孔内多分段掏槽爆破技术的优越性。

关键词: 孔内多分段掏槽; 数值模拟; 模型实验; 爆破漏斗

中图分类号: TJ510.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.014

Numerical Simulation and Experimental Study on Multi-Segment Cut Blasting in Hole

FENG Ting¹, XIA Zhi-yuan², YANG Fan², CHEN Huan², LUO Guo-an², YANG Shi-chang², LU Hai-sheng²

(1. Zhengzhou Institute of Economics and Business, Zhengzhou, 451191; 2. Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co. Ltd., Xuancheng, 242300)

Abstract: Aiming at the problems of high cost and low utilization rate of blast hole in traditional coal mine roadway cut blasting, a multi-segment cut blasting method in hole was proposed. By using ANSYS/AUTODYN numerical simulation software, three groups of simulation models, namely straight cut, wedge cut and multi-segment cut in hole, are established. Combined with SPH algorithm, simulation calculation is carried out, and the footage effects of different cut blasting models are compared and analyzed. In addition, field scale experiments are carried out for multi-segment cut blasting method in hole. The study show that the multi-segment cut blasting model in the hole has many advantages in theory, such as improving the free surface shape of the cutting area of the heading face, breaking the rock clamping force, enhancing the blasting force, etc. The simulation results show that the hole utilization rate of the multi-segment cut model in the hole can reach 97%, which is higher than those of the straight cut and wedge cut; the field scaling experiment results show that the footage of the multi-segment cut blasting in the hole is good, the maximum footage can reach up to 100%, the superiority of multi-segment cut blasting in hole technology is fully demonstrated.

Key words: Multi-segment cut in hole; Numerical simulation; Model experiment; Blasting crater

钻爆法作为一种高效且经济的施工方法, 已在我国煤矿巷道掘进爆破过程中得到广泛应用^[1-3]。在掘进爆破过程中, 常采用掏槽爆破方式以开挖新自由面, 随后通过辅助孔扩槽和周边孔光面爆破成型, 完成整

个断面的开拓作业。掏槽效果的优劣直接关系到后续炮孔的爆破效果^[4-6]。

目前国内煤矿巷道爆破常见的掏槽方法有直眼掏槽、楔形掏槽等方式, 国内外学者已进行了较为广

收稿日期: 2023-12-27

作者简介: 冯婷(1988-), 女, 讲师, 主要从事岩土工程研究。

通讯作者: 夏治园(1995-), 男, 工程师, 主要从事计算爆炸和工程爆破研究。

基金项目: 2023年度郑州经贸学院青年科研基金项目(项目编号: QK2336)。

引用本文: 冯婷, 夏治园, 杨帆, 等. 孔内多分段掏槽爆破数值模拟及实验研究[J]. 火工品, 2025(1): 83-88.

泛的研究。蒋克文等^[7]探究了掏槽孔与空孔间距对空孔附近有效应力分布规律及掏槽效果的影响。李成孝等^[8]研究了岩石巷道深孔分段装药掏槽爆破技术以提升掏槽爆破效率。张召冉等^[9]从爆生气体膨胀做功致裂岩体和空孔效应入手,推导了爆生裂纹的长度计算公式。陈一曦等^[10]运用 SPH-FEM 耦合法建立孔内分段延时爆破的三维数据模型,通过对比分析了在掏槽爆破过程中的孔内分段延时起爆下爆破产物抛掷过程、耦合效果以及掏槽演化效果,观察了爆破岩体所受到的破坏及其特征。王雁冰等^[11]分析了断面尺寸、断面面积、炮孔密度和掏槽区域面积占比等多个维度,同时对掏槽面积占比与炮孔密度进行了线性拟合。刘浩杉等^[12]采用基于 LSDYNA 流固耦合算法对楔形掏槽爆破参数进行优化,分析掏槽孔微差爆破对掏槽区域破碎效果的影响与地表振速响应规律。

综合文献,目前对于掏槽爆破的主要研究方向集中在延期时间、孔网参数优化等方面,爆破效果相较于常规施工得到了一定提升,然而掏槽爆破本身存在单耗大、炮孔利用率低等缺点,尤其楔形掏槽存在钻孔难度大、易穿孔等不利因素。目前地下矿山掘进爆破朝着深进尺方向发展,部分掘进面循环进尺可达 4.0 m,钻孔长度的增加导致岩石夹制作用增大,掏槽爆破的炮孔利用率呈现明显的下降趋势;掏槽区待爆破岩体量的增加,导致掏槽区岩体爆破时挤压加剧,无法得到有效抛掷,甚至会导致“关门”现象出现。为提高深进尺掘进爆破施工效率和质量,研究人员提出了一种孔内多分段掏槽爆破方法,通过孔内多分段爆破抛掷改变原掏槽区自由面形态,以提高掏槽区域岩体爆破破碎效果和炮孔利用率。本文对该技术开展相关数值模拟及实验研究,并与直眼掏槽、楔形掏槽效果进行对比分析。

1 孔内多分段掏槽爆破技术方案

1.1 基本方法

孔内多分段掏槽爆破是指在工作面原掏槽区域均匀布置崩落孔,孔间布置群柱状药包同段起爆,孔内利用延期爆破原理按一定的延期间隔分段起爆,以

实现对整个掏槽区待爆破岩体分段破岩、抛掷的目的,以此来降低岩石夹制力,增加爆破有效破坏力,解决掏槽爆破存在的技术难题。

根据孔内多分段掏槽爆破基本思路,将原掏槽区域崩落炮孔分为长度适中的多段并装填炸药,各段炸药之间分别进行堵塞,利用延期雷管使各崩落炮孔中的各炸药段从孔口起依次向孔底独立延时起爆,各炮孔中序号相同的炸药段在同一时刻起爆,每爆一段,围岩就沿巷道轴线方向剥落一层,如此层层剥落直至成槽完全。布孔、装药方案如图 1 所示。

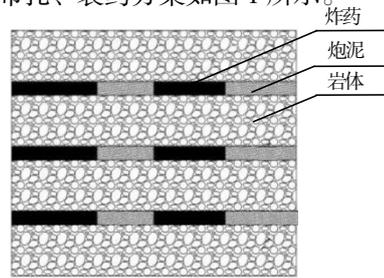


图1 孔内多分段掏槽爆破布孔装药方案

Fig.1 Scheme diagram of hole arrangement and charging for multi-segment cut blasting in hole

1.2 技术特点

(1) 所有槽区崩落炮孔均采用孔内分段微差起爆,即每个崩落孔都分为数段装填炸药,各段炸药分别堵塞,独立起爆。

(2) 各崩落炮孔的分段数及各段炮孔的长度、装药系数和堵塞均相同。

(3) 同一崩落孔中的各炸药段由孔口起依次向孔底独立延时起爆,孔间起爆不分段。

(4) 各崩落孔中序号相同的各炸药段在同段起爆,被爆岩矿由工作面起沿巷道轴线即掘进方向逐层剥落,而不是沿平行于工作面的方向崩落。

(5) 崩落炮孔间距,可根据岩石坚硬程度适当调整。

(6) 所有炮孔均为直孔,且直径相同,无需空孔和斜孔。

2 孔内多分段掏槽爆破机理研究

掘进爆破过程中仅有 1 个自由面,同时待爆破岩体受到很大夹制作用,直眼掏槽过程中炸药爆炸时沿

自由面法线方向,爆炸冲击波反射拉伸作用有限,爆生气体压力有效破坏作用也同样减小,导致其单次爆破炮孔利用率降低。根据这一特点,提高掘进爆破效果须降低约束力,同时增加最有效破坏力。

2.1 降低约束力

抵抗线的大小是决定爆破难易程度的关键因素之一,传统有槽爆破(直孔)的爆破效果一般,根本原因之一在于其抵抗线过大,进而导致约束作用加剧。孔内多分段掏槽爆破采用孔内分段微差起爆,将1个炮孔分为 n 段装填炸药,使各段的抵抗线降至原来的 $1/n$,从而减小夹制作用,由炸药量计算公式:

$$Q = kw^3 \quad (1)$$

式(1)中: Q 为每孔装药量,kg; k 为炸药单耗,kg/m; w 为最小抵抗线,m。当最小抵抗线由 w 降至 w/n 时,相应的单段炸药量为:

$$Q_1 = kw_1^3 = k\left(\frac{w}{n}\right)^3 = \frac{Q}{n^3} \quad (2)$$

这样,单孔总炸药量仅为:

$$Q_n = n\frac{Q}{n^3} = \frac{Q}{n^2} \quad (3)$$

比原炸药用量减少 $(1-1/n^2)$ 倍,由此可见孔内多分段掏槽爆破能有效减少炸药单耗。

2.2 增加最有效破坏力

在单自由面条件下,炮孔中的爆炸气体压力可沿自由面和自由面的外法线方向分解为相互垂直的2个分量,其中最有效破坏力为:

$$P_{\perp} = \mu P_d = \mu \pi r^2 p \quad (4)$$

式(4)中: μ 为堵塞体的摩擦阻力系数; P_d 为作用在堵塞体里端面上的爆炸气体压力,N; r 为堵塞体即炮孔的半径,cm; p 为炮孔中的爆炸气体压强峰值,Pa。

传统掏槽爆破中掏槽炮孔的装药系数常高达0.90~0.95,过量的装药限制了炮孔的堵塞长度,致使炮孔因堵塞长度不够而形成“冲天炮”,结果导致爆炸气体压强 p 难以升到较高的值,并且多采用黄泥炮泥,其与炮孔壁间的摩擦阻力系数远远小于1,由此可见,在传统掏槽爆破中 μ 和 p 都很小,导致 P_{\perp} 一般也很小。

孔内多分段掏槽爆破通过提高炮孔堵塞质量、增加炮孔堵塞体的数量和改变堵塞体在炮孔中所处的位置等,使作用在被爆岩矿上的有效破坏力得到明显增加,同时孔内多分段掏槽爆破将单孔分为 n 段装药,各段分别堵塞,使单个炮孔中的堵塞体由1个增加到 n 个,垂直与平行于自由面的爆炸气体压力之比 $\delta(P_d/P_b)$ 相应地变成:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{P_{d1}}{P_{b1}} + \frac{P_{d2}}{P_{b2}} + \dots + \frac{P_{dn}}{P_{bn}} = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n \\ &= \sum_{i=1}^n \delta_i \geq n\delta \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{\perp} = n\mu P_d = n\mu \pi r^2 p \quad (6)$$

与传统掏槽爆破相比, P_{\perp} 扩大 n 倍。

2.3 改变岩石的抗爆力

连续装药单次起爆时,孔底最大抗爆力(f_c)远大于破岩能力(F)。但分段微差起爆时,由于新自由面的形成,抗爆力发生变化,孔底最大抗爆力减小,如果孔深合理,使 f_c 与 F 基本相接近,就能达到最佳爆破效果。

2.4 减小岩石的夹制作用

在爆破中,夹制系数 K 越大,岩石夹制作用越大,爆破效果越差,反之爆破效果明显提高。

夹制系数 K 为:

$$K = LB \quad (7)$$

式(7)中: L 为自由面反射为拉伸波能量的延伸深度; B 为掏槽区域面积。

在井巷孔内多分段掏槽爆破中,孔内采用分段微差起爆,前段先爆为后段提供自由面。将岩体沿炮孔方向分成2段微差爆破,前后段长度分别为 L_1 和 L_2 (L_1, L_2 均小于 L)。此时前后段岩体的夹制系数为:

$$K_1 = L_1 B \quad (8)$$

$$K_2 = L_2 B \quad (9)$$

对于掏槽爆破掏槽孔来说,其夹制系数为:

$$K_3 = L_3 B \quad (10)$$

在掏槽区域 B 一致条件下, $L_1(L_2) < L_3$,则 $K_1(K_2) < K_3$,因此,分段微差爆破可减小岩体的夹制系数,从而使岩体的夹制作用减小,提高爆破效果。

2.5 改变自由面的形成方式

对于常用的掏槽爆破，自由面首先自中心掏槽孔爆破形成，掏槽孔的爆破好坏直接影响自由面的形成。而孔内多分段掏槽爆破是将整个岩体分为前后两段，先炸药包对岩体的破坏和抛掷，使岩石在空间上产生位移，为后段爆破创造新自由面和更多的或大或小的裂隙辅助自由面。

3 数值模拟

3.1 仿真方案

为验证孔内多分段掏槽爆破方案的可行性和爆破成槽效果，采用 ANSYS/AUTODYN 数值模拟软件，结合 SPH 算法对孔内多分段掏槽爆破、直眼掏槽和楔形掏槽爆破进行仿真计算，对比其掏槽爆破效果、损伤效果和应力应变变化情况。

3.2 材料模型与参数

仿真模型中炸药组分为乳化炸药，采用 JWL 状态方程描述炸药爆轰时相关物理变化过程。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (11)$$

式(11)中： P 为爆轰压力，Pa； V 为相对体积， m^3 ； E_0 为初始比内能，J； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为与炸药有关的常数。

乳化炸药材料参数如表1所示。模拟用岩体采用 AUTODYN 自带材料库中的 CONC- 35 MPa 混凝土代替，采用 PLAPHA 状态模型及 RHT 强度及失效模型描述其物理力学性质，材料参数如表2所示。

表1 乳化炸药材料参数

Tab.1 Material parameters of emulsion explosive

材料	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	爆速 D /(m·s ⁻¹)	爆压 P /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω
乳化炸药	1.1	4160	9.5	214.4	0.182	4.2	0.9	0.35

表2 混凝土材料参数

Tab.2 Concrete material parameters

参数	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	剪切模量 G/GPa	压碎压力 P_{cu} /GPa	压实压力 P_{comp} /GPa	单轴抗压强度 f_c /GPa	损伤系数 D_1	损伤系数 D_2
取值	2.75	16.7	0.0233	0.6	0.035	0.04	1

堵塞材料采用普通的砂土材料 (SAND)，采用 Compaction 状态方程加以定义。

3.3 模型建立

考虑到计算量，采用缩减比例模型进行仿真计算，共设置3组模型，分别为直眼掏槽模型、楔形掏槽模型、孔内多分段掏槽模型，其几何参数如图2所示。

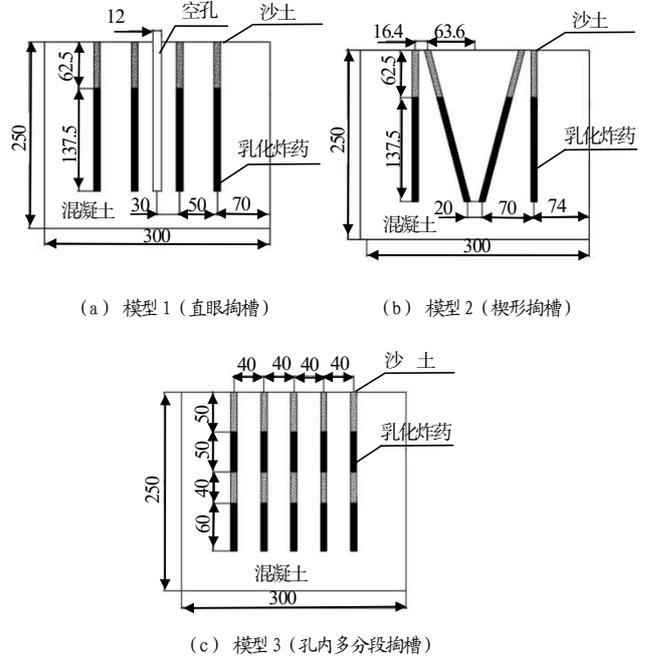


图2 模型1~3几何参数

Fig.2 Geometric parameters of model 1~3

根据模型1~3几何参数建立 SPH 模型，孔底起爆同时在模型外边界定义法向位移约束，如图3所示。

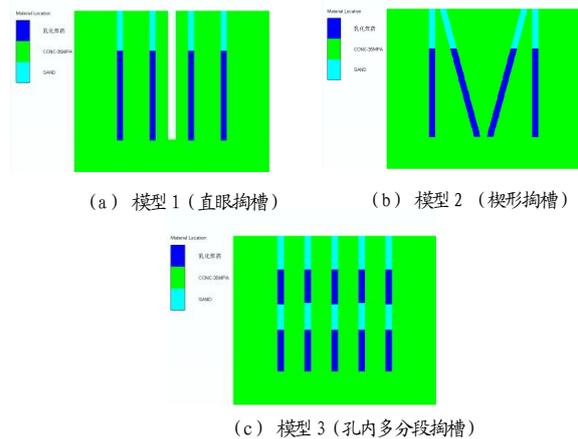


图3 模型1~3 SPH模型

Fig.3 Model 1~3 SPH model

为减小计算量，通过预计算发现，延期时间为3ms时，孔内多分段掏槽爆破前排混凝土基本抛掷完毕，故设计延期时间为3ms。

3.4 掏槽效果

为对比模型1~3掏槽效果，选取10ms时各模

型成槽情况，如图4所示。

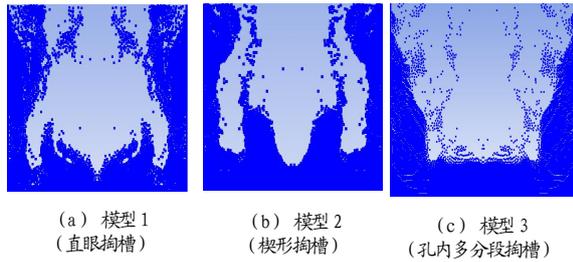


图4 10 ms 模型1~3成槽效果

Fig.4 Grooving effect of model 1 ~ 3 at 10 ms

对比掏槽效果可以发现，模型1和模型2在第1排和第2排炮孔之间孔底位置存在部分混凝土材料未有效抛掷，底部混凝土体不平整，成槽形状一般，而模型3成槽效果较好，混凝土材料基本抛掷完全，呈梯形，底部平整。整体来看孔内多分段掏槽成槽效果明显优于直眼掏槽和楔形掏槽，可为后续炮孔提供更好的自由面条件和补偿空间。

测量各模型进尺量，结果如表3所示，对比发现相较于直眼掏槽和楔形掏槽，孔内多分段掏槽模型进尺效果最好，进尺率可达97%。

表3 各模型进尺效果

Tab.3 Effect of footage of each model

模型	模型1 (直眼掏槽)	模型2 (楔形掏槽)	模型3 (孔内多分段掏槽)
进尺量/cm	18.0	15.5	19.4
进尺率/%	90.0	77.5	97.0

4 现场实验

4.1 实验准备

为验证孔内多分段掏槽爆破效果，设计孔内多分段掏槽爆破缩比实验进行现场爆破分析，实验采用的模拟巷道掏槽区域如图5所示，模拟巷道模型由水泥砂浆模型外罩铁质圆桶而成。

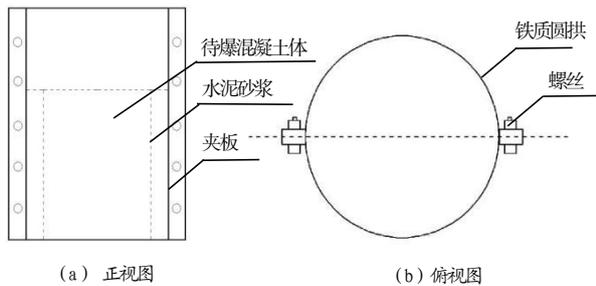


图5 孔内分段掏槽实验模型

Fig.5 Experimental model of segmented cut in hole

孔内分段掏槽爆破布孔如图6所示。

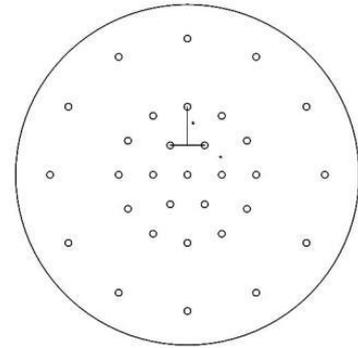


图6 孔内分段掏槽爆破布孔图

Fig.6 Hole location layout of segmented cut blasting in hole

图6中工作面上除周边孔以外采用均匀布孔、均匀装药，掏槽区域排距、孔距均为40~50mm，分上下2层。由于模型相对较小，考虑到起爆条件等因素，无法使用乳化炸药进行实验，故采用雷管+黑索今进行近似实验，下层使用3段8号工业雷管加0.5g黑索今，上层使用1段8号工业雷管。带雷管（按1g计算）药量共47.5g。

4.2 实验结果

观察孔内多分段掏槽模型爆破后效果，如图7所示。由图7可以看出，爆破后混凝土体成槽效果良好，岩体基本抛掷完全，进尺效果良好，经过现场测量发现炮孔利用率基本可达100%。



图7 孔内分段掏槽爆破后效果

Fig.7 Effect of segmented cut blasting in hole

由此可见，采用孔内多分段群柱状药包爆炸，可有效改变自由面形态，体腔爆破作用力和冲击波反射拉伸作用促使掏槽区形成裂隙和片落漏斗并抛掷岩石，相较于普通掏槽方式掏槽效果明显改善，更适用于煤矿井下巷道掘进爆破作业。

5 结论

本文根据煤矿巷道掘进爆破工况,提出了一种孔内多分段掏槽爆破技术,通过将掏槽区分层延期起爆、单层齐爆方式,有效提高了掏槽爆破效果,并得出以下结论:

(1) 孔内多分段掏槽爆破技术通过采用孔内分段微差起爆,即每个崩落孔都分为数段装填炸药,各段炸药分别堵塞、独立起爆,有效降低了槽区约束力、岩石夹制力,提高了爆破破坏作用,改良了后续炮孔的自由面形态,有效保障了爆破效果。

(2) 孔内多分段掏槽爆破技术通过孔间群柱状药包爆炸,爆炸冲击波遇自由面拉伸反射形成裂隙和片落漏斗,爆生气体的气楔作用增大了裂隙尖端的拉应力,并抛掷岩石,有利于掏槽区岩体崩出,有利于生成补偿空间,便于后续岩体有效崩落。

(3) 通过采用 SPH 数值模拟方法对 3 种掏槽模型进行对比分析发现,孔内多分段掏槽爆破模型相较于直眼掏槽、楔形掏槽,爆破后进尺效果良好,炮孔利用率明显提高,成槽效果更为良好,现场缩比实验充分证明了孔内多分段掏槽爆破技术的优越性。

参考文献:

- [1] 王雁冰,孔维文,王国豪,等.深孔掏槽超深爆破破岩机制及最佳超深值研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6): 1210-1218.
- [2] 程兵,汪海波,宗琦,等.基于切缝装药定向预裂的中深孔掏槽爆破研究[J].振动与冲击,2023,42(03): 322-329.
- [3] 王国豪,王雁冰,谢平,等.基于数码电子雷管的岩巷中深孔-孔内分段爆破破岩机制及应用[J].工程科学学报,2023,45(11): 1820-1832.
- [4] 段宝福,侯亚洪,张正欣,等.岩巷掘进中角柱形掏槽孔合理间距的分析与应用[J].工程爆破,2023,29(04): 69-77.
- [5] 刘翔宇,龚敏,杨仁树,等.隧道爆破新自由面形成时间的识别与应用[J].振动与冲击,2023,42(10): 15-22.
- [6] 张满,康钦容,李梦玲,等.浅孔楔形掏槽爆破技术在特大断面小净距隧道群施工中的应用[J].武汉工程大学学报,2023,45(05): 568-573.
- [7] 蒋克文,王海亮,郭建,等.大空孔直眼掏槽有效应力分布规律模拟研究[J].煤炭技术,2023,42(07): 30-34.
- [8] 李成孝,杨仁树,王雁冰,等.基于数值模拟的岩石巷道深孔分段装药掏槽爆破研究[J].煤炭科学技术,2023,51(09): 100-111.
- [9] 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(01): 141-156.
- [10] 陈一曦,钟明寿,刘影,等.平行掏槽孔内延时爆破技术的 SPH-FEM 数值模拟[J].工程爆破,2023,29(03): 55-62.
- [11] 王雁冰,王国豪,鲍舟琦,等.基于数码电子雷管的岩巷爆破掘进炮孔密度优化方法[J].金属矿山,2023(5): 113-121.
- [12] 刘浩杉,侯江,张智宇,等.复杂环境下隧道楔形掏槽合理延期时间优化研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(8): 116-123.