



移动扫码阅读

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.

空孔直径对有围压直眼掏槽爆破破碎效果的影响

张宪堂^{1,2}, 马力^{1,2}, 余辉^{1,2}, 张经双³, 朱宝合⁴, 周红敏^{1,2}, 王向阳^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 3. 安徽理工大学 矿地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 4. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 掏槽爆破是井巷爆破掘进的关键技术, 高围压对掏槽爆破效果有明显的抑制效果, 而空孔对于提高掏槽爆破效率具有重要意义, 但目前相关研究并不充分。为研究中空孔直径对围压作用下掏槽爆破破碎效果的影响, 制作边长为 600 mm、砂胶质量比为 2:1 的立方体水泥砂浆试块, 并通过电液伺服加载系统对试块施加双向等围压, 进行直眼掏槽爆破水泥砂浆相似模型试验。对爆后爆破块度进行筛分统计分析, 分析研究了不同中空孔直径下模型碎块块度分布、平均粒径, 通过分形维数表征碎块分形特征, 量化分析了碎块破碎程度。采用 ANSYS/LS-DYNA 软件基于试验模型参数建立了数值模型, 分析了不同空孔直径时不同时刻的应力云图。研究表明: 炮孔装药量分别为 2 g 和 3 g 时, 中空孔直径为 24 mm 和 16 mm 的模型碎块分形维数最大, 此时碎块粒径主要集中在 19~75 mm 的中部区间, 且此时碎块总质量最大, 分别为 3.128、3.615 kg, 空孔直径不同时, 空孔附近产生的应力集中效应与反射拉伸波效果不同, 使得掏槽爆破破碎效果不同, 适宜的空孔直径能够有效利用空孔效应, 空孔附近应力波峰值和作用范围较大, 应力波作用时间较长, 因此破碎效果较好; 空孔直径过小, 空孔附近应力较小, 空孔直径过大时, 应力波由空孔溢出, 应力集中叠加后的压应力较小, 且拉伸应力作用区域较小, 空孔直径过大或过小都会使大块度碎块占比较高; 装药量为 3 g 时, 空孔直径 32 mm 与 16 mm 模型碎块的分形维数差值大于 16 mm 与无空孔模型碎块分形维数的差值, 说明当空孔直径过大时对碎岩块度的影响更大; 空孔直径同为 16 mm 时, 3 g 装药量模型的碎块平均粒径小于 2 g 装药量模型, 分形维数及碎块总质量大于 2 g 装药量模型试块, 说明当空孔直径相同时增加装药量可以提高岩石的破碎度及槽腔体积。

关键词: 爆破掘进; 掏槽爆破; 空孔直径; 分形维数; 破碎效果; 数值模拟

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0055-10

Influence of diameter of empty hole on the fragmentation effect of parallel cut blasting under confining pressure

ZHANG Xiantang^{1,2}, MA Li^{1,2}, YU Hui^{1,2}, ZHANG Jingshuang³, ZHU Baohe⁴,
ZHOU Hongmin^{1,2}, WANG Xiangyang^{1,2}

(1. Shandong Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Cut blasting is the key technology for roadway blasting excavation. High confining pressure has obvious inhibition effect on cut blasting effect, while empty hole is of great significance to improve cut blasting efficiency, but the relevant research is not sufficient so far.

收稿日期: 2022-08-30 责任编辑: 常琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1357

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874189); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME106); 矿地下工程教育部工程研究中心开放基金资助项目(JYBGCZX2021102)

作者简介: 张宪堂(1973—), 男, 河北井陉人, 教授, 博士生导师。E-mail: zzxhtm@sdust.edu.cn

To study the crushing effect of the cut blasting with different empty hole diameters under the confining pressure, cubic cement mortar test blocks whose side length was 600 mm were made with sand cement ratio of 2:1. The test blocks were subjected to equal bi-axial confining pressure through an electro-hydraulic servo loading system, and the parallel cut blasting cement mortar physical model test was carried out. After the blasting fragmentation was screened and statistically analyzed, the fragmentation distribution and average particle size of model fragments under different empty hole diameters were analyzed and investigated. With fractal features of fragments characterized by fractal dimension, the fragmentation degree was quantitatively analyzed. ANSYS/LS-DYNA software was used to establish numerical models based on the parameters of the test model, and the stress contour at different times with different hole diameters was analyzed. The research result shows that, when two empty holes are charged with different charge of 2 g and 3 g, respectively, the maximum fractal dimension of the model fragment can be attained with empty holes in diameter of 24 mm and 16 mm, respectively, with the particle size of the fragment mainly concentrated in the middle segment between 19 to 75 mm, and the largest total mass of the fragment is 3.128 kg and 3.615 kg, respectively; When the sizes of empty holes are different, the stress concentration effect and the reflected tensile wave produced near the empty hole are also different, which brings the difference of cut blasting fragmentation effect and can effectively benefit from the empty hole effect. The peak value and action range of stress wave near the empty hole are bigger, with a long action time, suggesting a better crushing effect; the diameter of the empty hole is too small, the stress around the empty hole is small. An oversized empty hole will lead to the overflow of the stress wave from the hole. The compressive stress is small after the superposition of stress concentration, and the action area of tensile stress is also small. The proportion of large rock pieces will be high with extremely large or small empty hole. When charged with 3 g, the fractal dimension difference between empty hole model fragments of 32 mm and 16 mm is greater than the difference of model fragments between 16 mm and without empty hole, indicating that the influence on the fragmentation of rock is greater when the empty hole diameter is too large. When the empty hole diameter is the same as 16 mm, the average particle size of the fragments in the model charged with 3 g is less than that in the model charged with 2 g, with the greater fractal dimension and total mass of the fragments than that in the test model charged with 2 g. This shows that an increased charge can contribute to rock fragmentation and the volume of the cut cavity with the same diameter of empty holes.

Key words: blasting excavation; cut blasting; diameter of empty hole; fractal dimension; fragmentation effect; numerical simulation

0 引言

我国地下资源开采深度逐渐增加, 钻孔爆破依然是岩巷掘进的主要手段^[1], 围压条件下的爆破开采技术有待跟进, 掏槽爆破可为后续巷道爆破提供新的自由面, 有利于为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^[2]。

许多学者对于掏槽爆破进行了大量研究, 也取得了诸多进展。王远来等^[3]通过理论计算和LS-DYNA软件数值模拟方法, 进行了直眼掏槽爆破参数的优化研究, 结果表明空孔具有导向和应力集中作用, 孔径为0.051 m, 装药孔与空孔间距为0.30 m时, 爆破效果较好。李兰等^[4]通过理论分析和现场试验研究, 改善装药系数和炮孔堵塞, 增设大直径空孔, 提高了掏槽爆破循环进尺。单仁亮等^[5]分析了掏槽爆破作用机理, 发现岩石爆破掏槽是由冲击波、应力波和爆生气体三者共同作用的结果。黄丹等^[6]提出了中心双空孔超深滞后抛掷直眼掏槽, 该爆破方法在降低炸药单耗的同时提高了炮孔利用率和有效进尺, 爆破块度均匀。GAO等^[7]利用ANSYS/LS-DYNA软件模拟了不同侧压力系数下复杂五孔掏槽爆破, 分析了爆破裂缝侧压力系数的演化规律。左进京等^[8]研究了掏槽爆破不同中空孔直径对槽腔体积、爆破

块度的影响, 试验结果表明空孔直径越大, 槽腔体体积越小, 岩石块度越小。ZHANG等^[9]通过数值模拟分析了不同空孔个数对掏槽爆破效果的影响, 发现空孔具有导向和应力集中作用, 多空孔布置时, 相邻空孔导向方向不一致。郝英剑^[10]在巷道爆破掘进中增设了大直径空孔, 提高了掏槽爆破效率, 缩短了工期。皇新宇等^[11]基于RHT岩石本构模型, 进行了不同地应力下四孔掏槽爆破数值模拟, 分析了岩石损伤裂纹的演化规律和炮孔周围应力场变化过程。笔者等^[12]给出了考虑碎块间挤压碰撞作用的节理裂隙岩体爆破块度分布的理论模型, 并进行了数值模拟和实验验证。杨洋等^[13]开展霍普金森杆冲击试验, 发现随着冲击荷载的增大, 爆破块度的平均粒径越来越小。于冰冰等^[14]分析了顾北煤矿岩石巷道断面掘进原始方案, 提出炮孔超深优化方案, 并通过了现场试验验证。

上述研究大多是针对无围压作用下的岩体爆破效果分析或围压作用下的数值模拟分析, 关于围压作用下空孔直径对岩石破碎效果的试验分析还缺乏深入研究。采用自主设计的大型双槓组合式加载框架及电液伺服加载系统, 以水泥砂浆为模型材料建立了双轴围压条件下掏槽爆破模型, 分析了初始地应力作用下不同空孔直径时, 岩石破碎块度分布特

征和分形维数。

1 掏槽爆破模型试验

1.1 试验方案

试验掏槽眼布置形式为菱形布孔，模型中心设空孔。水泥砂浆爆破模型试块的尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ，根据几何相似理论确定模型几何参数，炮孔间距为 50 mm ，炮孔直径为 16 mm ，炮孔到空孔中心距离为 35 mm ，炮孔与中空孔深均为 160 mm ，装药深度为 80 mm ，炮孔堵塞长度为 80 mm ，实际最小抵抗线为 160 mm 。以含有 DDNP 起爆药的数码电子雷管代替炸药，每发电子雷管含有 1 g 炸药，炮孔底部近似耦合装药，四炮孔同时起爆。炮孔填塞选用细砂和土作为填塞物，填塞时将填塞物捣实，避免在填塞时造成炮孔卡堵、填塞不实现象。

为能近似满足爆炸动力学相似，遵循“炸药爆炸能量相似”理论^[15]设计装药量，确定炸药单耗为 0.588 kg/m^3 ，单炮孔炸药用量为 2.3 g 。选择每炮孔装填 2 发、3 发电子雷管，即单炮孔装药量为 2、3 g。通过 3 g 装药量模型试验确定适宜的空孔直径大致范围，后续减小装药量为 2 g ，并在前期试验基础上细化空孔直径范围继续试验研究。炮孔布置示意图如图 1 所示，具体试验方案见表 1。

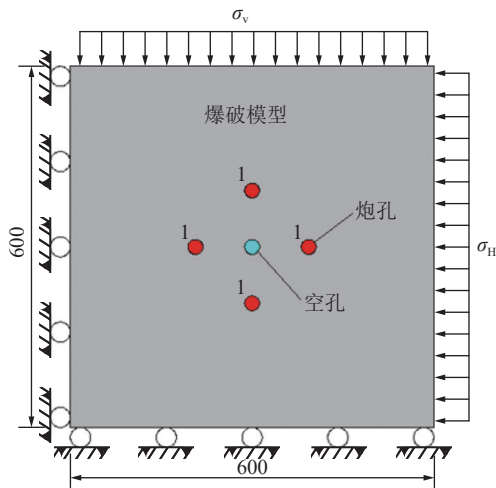


图 1 炮孔布置示意

Fig.1 Layout diagram of blast holes

采用自主设计的大型双槓组合式加载框架及电液伺服加载系统，对试验模型施加双向围压。试验加载区域面积为 $400\text{ mm} \times 340\text{ mm}$ ，考虑到水泥砂浆为低强度脆性材料，应力取模型抗压强度的 10%， $\sigma_v = \sigma_H = 1.0\text{ MPa}$ 。

表 1 爆破模型试验方案

Table 1 Blasting model test scheme

模型编号	炮孔直径/mm	炮孔间距/mm	炮孔深度/mm	空孔直径/mm	单炮孔药量/g
H0	16	50	160	无空孔	3
H16	16	50	160	16	3
H32	16	50	160	32	3
E16	16	50	160	16	2
E24	16	50	160	24	2
E28	16	50	160	28	2
E32	16	50	160	32	2

1.2 模型制作

选用 M10 水泥砂浆作为模型试验的相似材料，选用 P.O325 普通硅酸盐水泥，砂子选用中砂，按照砂胶比为 2 : 1，浇筑水泥砂浆作为模型，浇筑过程中边浇筑边振捣，以减少试块中的气泡，常温下养护 28 d (表 2)。

表 2 水泥砂浆力学参数

Table 2 Mechanical parameters of cement mortar

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	抗压 强度/MPa	抗拉 强度/MPa	弹性 模量/GPa
2 175	0.23	10.0	1.32	24.17

2 中空孔直眼掏槽破岩机理

1) 耦合应力场炮孔周边应力演化规律。围压作用下的爆破，岩石受到初始地应力场和爆炸动荷载的耦合作用。地应力能够抑制掏槽爆破损伤裂纹的扩展，随着地应力的增大，掏槽损伤区域减小，切向拉应力峰值降低^[11]。耦合应力场下，炮孔周围某一点径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 见式 (1)：

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_v)\left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_v)\left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right)\left(1 - 3\frac{r_1^2}{r^2}\right)\cos 2\theta + p_c\left(\frac{r_1}{r}\right)^\alpha \\ \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_v)\left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_v)\left(1 + 3\frac{r_1^2}{r^2}\right)\cos 2\theta - \lambda_d p_c\left(\frac{r_1}{r}\right)^\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中， σ_H 、 σ_v 分别为该点的水平应力与垂直应力，MPa； θ 为计算点与炮孔中心的连线和水平方向的夹角； r_1 为炮孔半径，m； r 为该点至炮孔中心距离，m； α

为应力波传播过程的衰减系数； λ_d 为侧向应力系数。

2) 空孔应力集中效应。掏槽孔中炸药爆炸后会产生冲击波，随着在岩石中传播距离的增加，冲击波

逐渐衰减为应力波在岩石中继续传播,当到达中空孔孔壁时,部分应力波会发生反射,空孔附近发生应力重分布,此时空孔附近岩石中的应力值大于无空孔时的应力值,从而更有利于岩石的破碎,此为空孔的应力集中效应^[16]。空孔附近的叠加应力场^[17]表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{2} [(1-k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + (1-4k^2+3k^4)(\sigma_\theta + \sigma_r) \cos 2\theta] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} [(1+k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + (1+3k^2)(\sigma_\theta + \sigma_r) \cos 2\theta] \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2} (1+2k^2-3k^4)(\sigma_\theta + \sigma_r) \cos 2\theta \\ k = \frac{r_2}{r_b} \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_{rr} 为应力重分布后计算点的径向应力, MPa; $\sigma_{\theta\theta}$ 为应力重分布后计算点的切向应力, MPa; σ_θ 为应力重分布后计算点的剪应力, MPa; $\tau_{r\theta}$ 为计算点与炮孔和空孔连心线夹角, ($^\circ$); r_2 为空孔半径, m; r_b 为空孔附近某点距离空孔中心距离, m(图2)。

3) 自由面效应。空孔可为掏槽爆破提供一个新的自由面,当爆炸应力波传播到自由面时,应力波部分反射形成拉伸波,拉伸波作用于自由面处的岩石,由于岩石的抗拉强度仅为抗压强度的 1/8 ~ 1/15,如

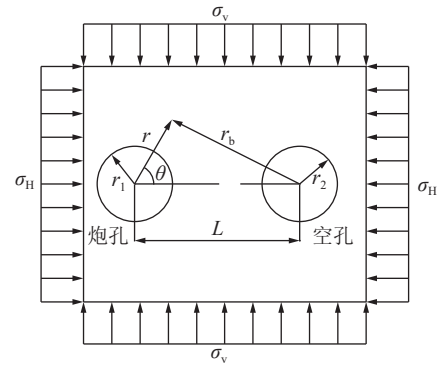


图2 空孔应力集中效应示意

Fig.2 Schematic of stress concentration effect of empty hole
果反射的拉伸应力波的强度大于岩石抗拉强度,则自由面处岩石被拉伸破坏,此即为空孔的自由面效应^[18]。

3 爆破块度筛分统计

3.1 碎块块度筛分分析

在掏槽爆破中,岩石破碎效果是反应爆破效果的一个重要指标,爆破块度过大会对碎岩的清理、搬运过程产生阻碍,爆破块度过小则说明炸药有剩余能量未被完全利用,使得炸药利用效率低,造成资源的浪费(图3)。

表3 不同空孔直径模型试验碎块块度筛分统计

Table 3 Lumpiness screening statistics of model tests with different diameters of empty holes

碎岩块度分布/mm		<9.5	9.5~19	19~31.5	31.5~53	53~75	75~90	>90
H0	质量/kg	0.066	0.069	0.321	0.358	0.594	0.477	0.579
	累计质量/kg	0.066	0.135	0.456	0.814	1.408	1.885	2.464
	质量占比/%	2.7	2.8	13.0	14.5	24.1	19.4	23.5
	累计质量占比/%	2.7	5.5	18.5	33.0	57.1	76.5	100.0
H16	质量/kg	0.241	0.545	0.766	0.638	0.554	0.512	0.359
	累计质量/kg	0.241	0.786	1.552	2.19	2.744	3.256	3.615
	质量占比/%	6.7	15.1	21.2	17.6	15.3	14.2	9.9
	累计质量占比/%	6.7	21.8	43.0	60.6	75.9	90.1	100.0
H32	质量/kg	0.028	0.072	0.136	0.321	0.54	0.476	0.866
	累计质量/kg	0.028	0.100	0.236	0.557	1.097	1.573	2.439
	质量占比/%	1.1	3.0	5.6	13.2	22.1	19.5	35.5
	累计质量占比/%	1.1	4.1	9.7	22.9	45.0	64.5	100.0
E16	质量/kg	0.111	0.164	0.402	0.417	0.200	0.316	0.339
	累计质量/kg	0.111	0.275	0.677	1.094	1.294	1.610	1.949
	质量占比/%	5.7	8.4	20.6	21.4	10.3	16.2	17.4
	累计质量占比/%	5.7	14.1	34.7	56.1	66.4	82.6	100.0
E24	质量/kg	0.276	0.382	0.557	0.578	0.538	0.365	0.432
	累计质量/kg	0.276	0.658	1.215	1.793	2.331	2.696	3.128
	质量占比/%	8.8	12.2	17.8	18.5	17.2	11.7	13.8
	累计质量占比/%	8.8	21.0	38.8	57.3	74.5	86.2	100.0
E28	质量/kg	0.039	0.074	0.108	0.168	0.446	0.547	0.736
	累计质量/kg	0.039	0.113	0.221	0.389	0.835	1.382	2.118
	质量占比/%	1.8	3.5	5.1	7.9	21.1	25.8	34.8
	累计质量占比/%	1.8	5.3	10.4	18.3	39.4	65.2	100.0

爆破试验完成后,根据文献 [19-21] 选取破碎区半径为 0.08 m 范围内的水泥砂浆碎块进行筛分。采用国家标准的等级石子筛将碎块块度分为 7 个级配,对每个级配下的碎块进行称重,对不同空孔直径模型的碎块质量、累计质量及质量占比等进行统计,得到碎块块度筛分见表 3。

为更直观表征各试验方案碎块块度分布情况,根据块度筛分析统计结果绘制碎岩块度分布折线图如图 4 所示。



图 3 部分爆破碎块

Fig.3 Partial blasting fragments

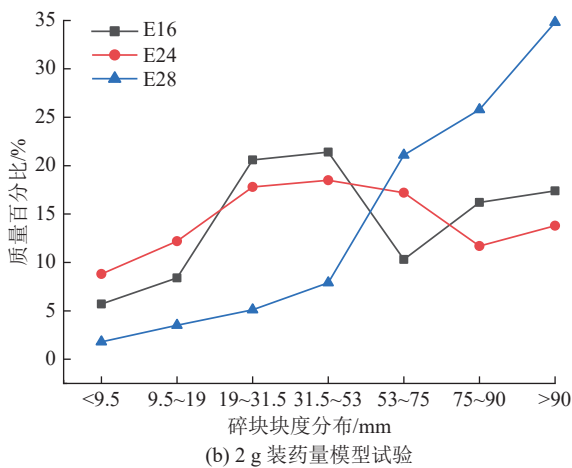
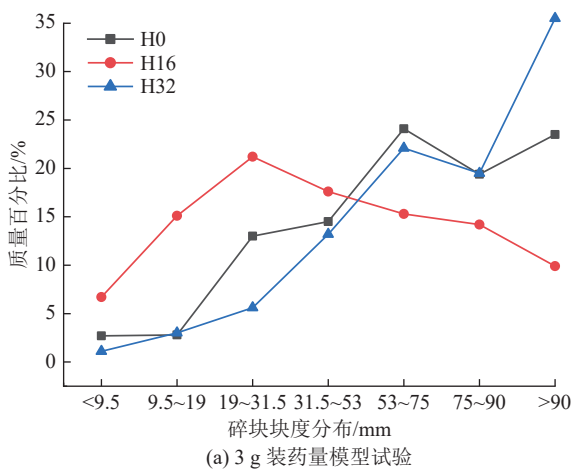


图 4 碎岩块度分布

Fig.4 Distribution of fragmentation degree

由图 4 中可以看出,6 种试验方案在各个筛分等级内均有碎块分布,且大块度碎块质量占比差异较大。由于围压的存在,掏槽爆破需要更多的能量克服岩石的夹制作用形成槽腔,6 种试验方案的小块度碎块均较少。炮孔装药量为 3 g 时,H0 和 H32 模型试块碎块块度分布趋势大致相同,小块度碎块较少而大块度碎块较多,碎块块度分布主要集中在粒径大于 53 mm 区间,此区间碎块质量占比分别为 67.0%、77.1%。这是由于 H0 试块未布设空孔,相比其他试块需要更多的能量克服岩石的夹制作用,导致没有足够的能量使岩石进一步破碎。空孔直径为 16 mm 时,碎块块度分布较为均匀。

炮孔装药量为 2 g 时,空孔直径为 28 mm 的模型试块小块度碎块最少,E16 和 E24 碎块块度整体分布趋势相近,相比于 E16 试验方案,E24 小块度碎块较多而大块度碎块较少。但碎块粒径小于 19 mm 时,E24 方案碎块各筛分等级质量占比均大于 E16 方案,碎块粒径大于 75 mm 时,E24 方案碎块各筛分等级质量占比均小于 E16 方案。E24 试验方案碎块块度分布主要集中在 19 ~ 75 mm,质量占比为 53.5%,超过半数,其中 3 种筛分等级质量占比接近。E28 试验方案粒径小于 53 mm 的碎块所占质量百分比较少,大部分为粒径大于 53 mm 的大块度碎块。

3.2 碎岩平均粒径分析

为进一步分析碎块粒径分布情况,利用平均破碎粒径特征值 d_s 来表示掏槽爆破后的岩石破碎程度,计算式如式 (3):

$$d_s = \frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i} \quad (3)$$

式中, d_s 为围岩岩石破碎平均粒径特征值; d_i 为不同孔径下岩石粒径尺寸; r_i 为粒径为 d_i 时,对应粒径质量占比。

由式 (3) 计算得各试验方案模型碎块平均粒径见表 4。

表 4 碎块平均粒径

Table 4 Average particle size of fragments

模型编号	H0	H16	H32	E16	E24	E28
平均粒径/mm	63.7	46.2	71.4	52.2	48.2	73.0

由表 4 中可以看出,E16 和 E24 试验方案碎块平均粒径较小。H16 平均粒径小于 E16,当空孔直径相同时增加装药量可以提高岩石的破碎度。E28 试验方案碎块平均粒径大于 E16,H32 试验方案碎块平均粒径大于 H0,说明当空孔直径过大时对碎块块度的影响大于空孔直径较小或没有空孔时。

4 分形维数分析

已有研究表明^[22-24], 岩石破碎后的块度具有分形特征, 分形维数是衡量岩石破碎程度的标尺, 可以清晰地反映破碎过程与破碎产物的联系, 是一种很好的研究岩石破碎的方法。

G-G-S 分布函数是碎岩块度分形分析中常用的计算方法^[25]。G-G-S 分布函数的计算公式为

$$Y = \left(\frac{r}{r_m}\right)^\alpha \quad (4)$$

式中, Y 为筛分等级 r 以下的碎岩累计质量占比; r_m 为碎岩最大尺寸; α 为碎岩分布指数。

$$Y = \frac{M_{(r)}}{M_T} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^\alpha \quad (5)$$

式中, $M_{(r)}$ 为尺寸小于 r 的碎岩累积质量; M_T 为碎岩总质量; 对上式求导得:

$$dM_{(r)} \propto r^{\alpha-1} dr \quad (6)$$

设 M 为粒径大于等于 r 的碎岩质量, 则 $M=M_T-M_{(r)}$:

$$dM = -dM_{(r)} \propto r^{\alpha-1} dr \quad (7)$$

代入碎岩块度个数与质量关系:

$$dM \propto r^3 dN \quad (8)$$

碎岩分形维数 D 与特征尺寸 r 及等效粒径大于等于 r 的碎块个数 N 存在以下关系:

$$N \propto r^{-D} \quad (9)$$

对式 (9) 求导得:

$$dN \propto r^{-D-1} dr \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8) 得:

$$dM_{(r)} \propto r^{3-D-1} dr \quad (11)$$

结合式 (7), 式 (11) 得:

$$D = 3 - \alpha \quad (12)$$

对式 (5) 两边求取对数, 可得近似一元一次方程表达形式, $y=ax+b$ 。因此可将各筛分等级的碎岩质量累积百分数 $M_{(r)}/M_T$ 与碎岩特征尺寸 r 在双对数坐标系下进行线性拟合, 所得直线方程的斜率 a 即为碎岩分布指数 α 。

分维数 D 值越大, 表明爆后生成的小块度岩石占比越大^[26]。当 $D=2$ 时, 各尺度区间的碎块质量比例相等; 当 $0 < D < 2$ 时, 大尺度区间碎块所占质量比例较大, 破碎程度低; 当 $2 < D < 3$ 时, 小尺度区间碎块所占质量比例较大, 破碎程度高。

将各试验方案分形参数拟合得到图 5, 为便于观察分形维数与空孔直径变化关系, 拟合结果的相关

系数 R^2 均大于 0.96, 拟合效果良好。由拟合参数表 5 和分形维数与空孔直径关系图 6 可以看出, 两组试验方案分形维数随着空孔直径的增大, 均呈现先增大后减小的趋势, 分形维数大于 2 的试验方案为 E16、E24、H16, H32 试验方案分形维数最小, 大块度碎块比例最高。

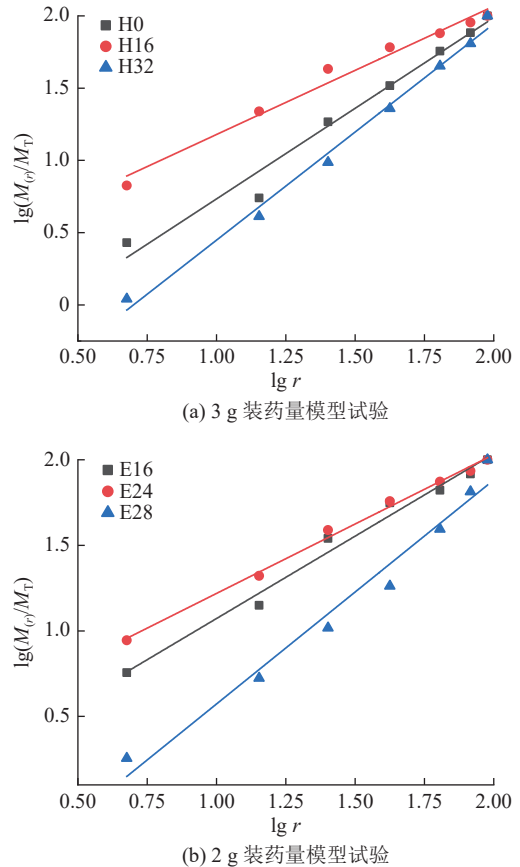


图 5 不同试验方案分形维数拟合曲线
Fig.5 Fractal dimension fitting curves of different test schemes

两组试验中 E24、H16 分形维数最大, 碎块破碎程度最好, 且产生的碎块总质量最大, 分别为 3.128、3.615 kg, 即形成的槽腔体积最大。炮孔装药量为 2 g 和 3 g 时, 掏槽爆破破碎效果较好的试块中空孔直径为 24 mm 和 16 mm。

E32 未能产生槽腔及 H32 分形维数最小的原因, 分析是由于空孔直径过大导致过多的爆炸应力波和爆生气体从空孔溢出, 剩余能量不能使岩石进一步破碎, 使得大块度碎块占比过大。E16 分形维数小于 E24 的原因, 分析是由于空孔直径较小时, 爆炸应力波到达空孔壁反射后形成的拉伸应力波较少, 爆炸产生的能量不足以使岩石更好破碎。因此, 适宜的空孔直径能够更好地发挥空孔效应, 有效利用爆破能量, 促进岩石的破碎, 提高碎岩小块率, 降低大块率, 使得碎岩块度更加均匀。而空孔直径过大或

表5 碎块 $\lg r - \lg(M_{cr}/M_T)$ 拟合参数
Table 5 Fitting parameters of fragment $\lg r - \lg(M_{cr}/M)$

参数	试验编号	拟合曲线	a (斜率)	b (截距)	分形维数 D	调整后 R^2
$\lg r - \lg(M_{cr}/M_T)$ 拟合参数	H0	$y=1.254x-0.52$	1.254	-0.520	1.746	0.973
	H16	$y=0.888x+0.291$	0.888	0.291	2.112	0.977
	H32	$y=1.497x-1.048$	1.497	-1.048	1.503	0.991
	E16	$y=1.016x+0.065$	0.963	0.110	2.037	0.981
	E24	$y=0.811x+0.408$	0.811	0.408	2.189	0.994
	E28	$y=1.302x-0.724$	1.309	0.736	1.691	0.968

过小均不能有效利用爆炸能量,导致碎岩块度较大,不利于实际生产中的排研。

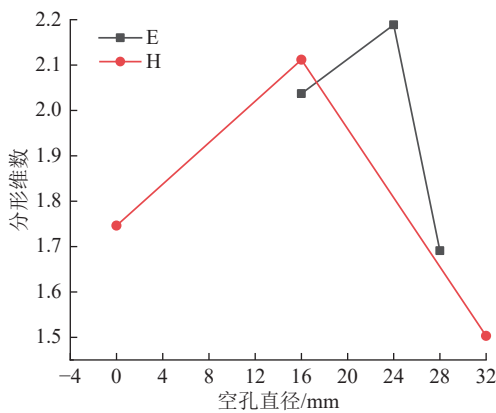


图6 空孔直径与分形维数关系

Fig.6 Relationship between empty hole diameter and fractal dimension

5 掏槽爆破数值模拟分析

各试验模型破碎程度的不同是由于中空孔直径不同导致空孔附近应力不同,从而影响了爆破破碎效果,而模型试验无法直观分析空孔附近应力分布情况,因此有必要通过数值模拟手段分析应力分布,并与试验结果相互验证。

5.1 掏槽爆破数值模型

1) 模型建立。为验证试验结果及分析的正确性,根据试验所用的模型尺寸,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了装药量 2 g, 4 种不同空孔直径的掏槽爆破数值模型,分别记为 N16、N24、N28、N32。模型尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 取双轴围压大小 $\sigma_V = \sigma_H = 1 \text{ MPa}$ (图 7)。同时建立空孔直径 24 mm 的无围压模型,分析围压对爆炸应力的影响。

2) 模型材料与状态方程。岩石单元类型设置为 SOLID164 号单元,岩石材料使用 RHT 材料模型。模型关键字为: *MAT_RHT。数值模拟岩石力学参数与相似模型试验材料保持一致,并通过参考相关

文献确定^[27-28]。

炸药模型关键字为 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 采用 JWL 状态方程, JWL 状态方程用于反映爆炸后爆轰结果的体积和压力变化, JWL 状态方程如式 (13) 所示。

$$\rho = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (13)$$

式中, ρ 为爆轰产物的压力; V 为爆轰产物的相对体积; E_0 为初始内能密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程参数(表 6)。

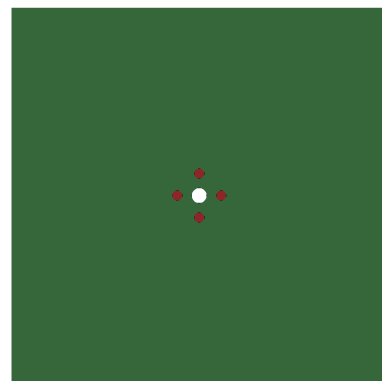


图7 数值模型

Fig.7 Numerical model

表6 炸药及其状态方程参数

Table 6 Explosive and its state equation parameter

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1 200	320	229	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

5.2 模拟结果分析

由图 8 分析可知,炸药起爆后,各炮孔爆炸应力波以圆形向外传播,空孔附近出现应力叠加,应力波在 $40 \mu\text{s}$ 时到达空孔孔壁,并在空孔壁处发生反射,形成反射拉伸波,之后爆炸应力波在空孔附近形成多次反射应力波,应力波作用范围主要集中在炮孔及空孔附近的掏槽区域, $220 \mu\text{s}$ 后应力波逐渐消散,

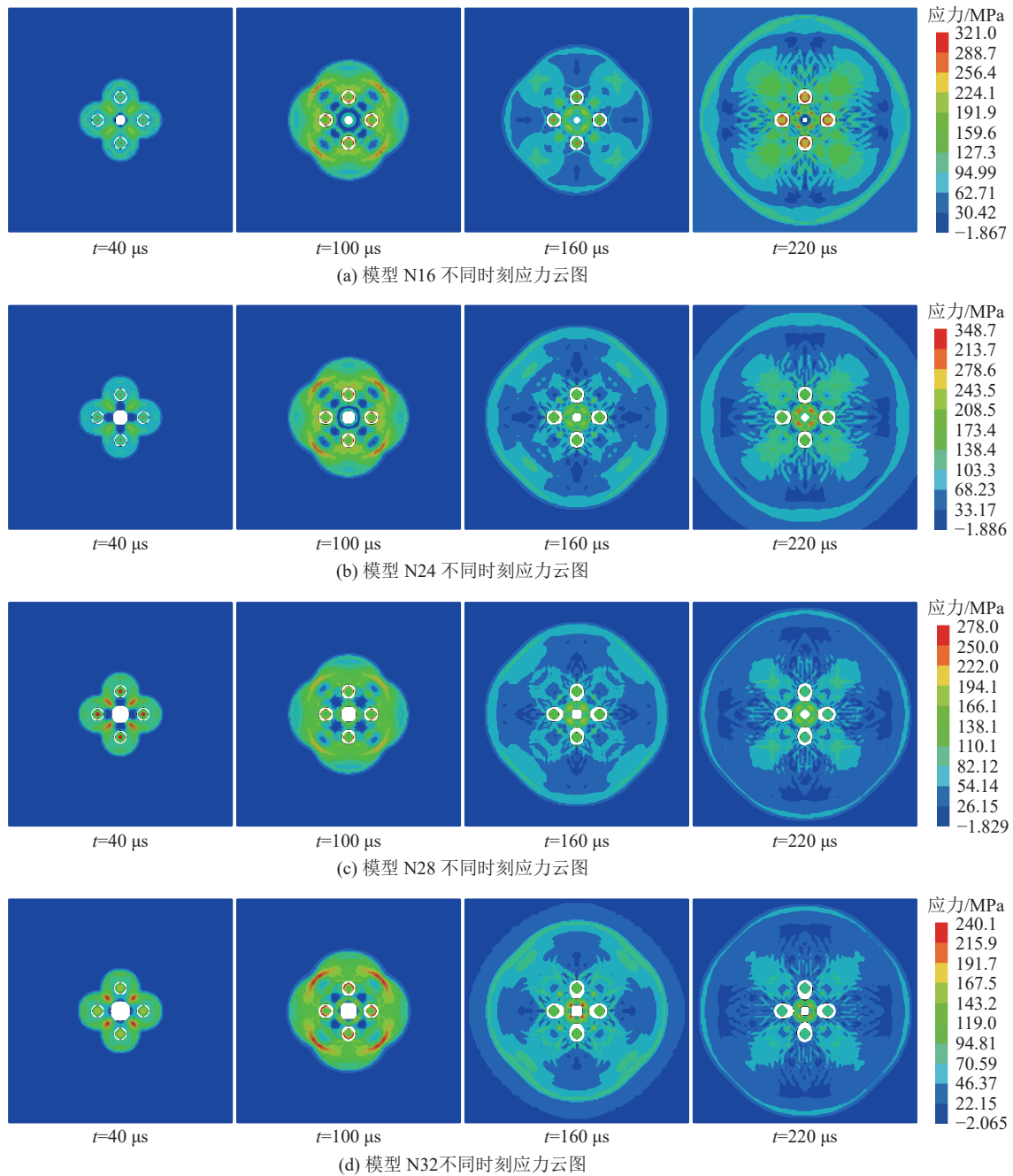


图8 各模型不同时刻应力云图

Fig.8 Stress cloud diagram at different times

试块破碎完成形成槽腔。N24 模型应力峰值最大,且应力峰值作用时间最长,作用面积最大,因此破碎效果较好,N16 次之,N32 模型由于空孔较大,应力波由空孔溢出,应力集中叠加后的压应力较小,且拉伸应力作用区域较小,因此未能破碎试块。220 μs 后应力波逐渐消散,试块破碎完成形成槽腔。模型应力状态与试验破碎效果相吻合,较好地验证了试验结果。由有无围压时的应力云图 9 对比分析可知,无围压时应力传播速度较快,相同时刻下无围压模型的应力云图面积较大,且空孔和炮孔附近的压应

力及拉应力相较于有围压时均更大,围压对爆炸应力波的传播有抑制作用。

6 结 论

1) 空孔直径不同时,空孔附近产生的应力集中效应与反射拉伸波效果不同,使得掏槽爆破破碎效果不同,适宜的空孔直径能够有效利用空孔效应,空孔附近应力波峰值和作用范围较大,应力波作用时间较长,因此破碎效果较好;空孔直径过小,空孔附近应力较小,空孔直径过大时,应力波由空孔溢出,

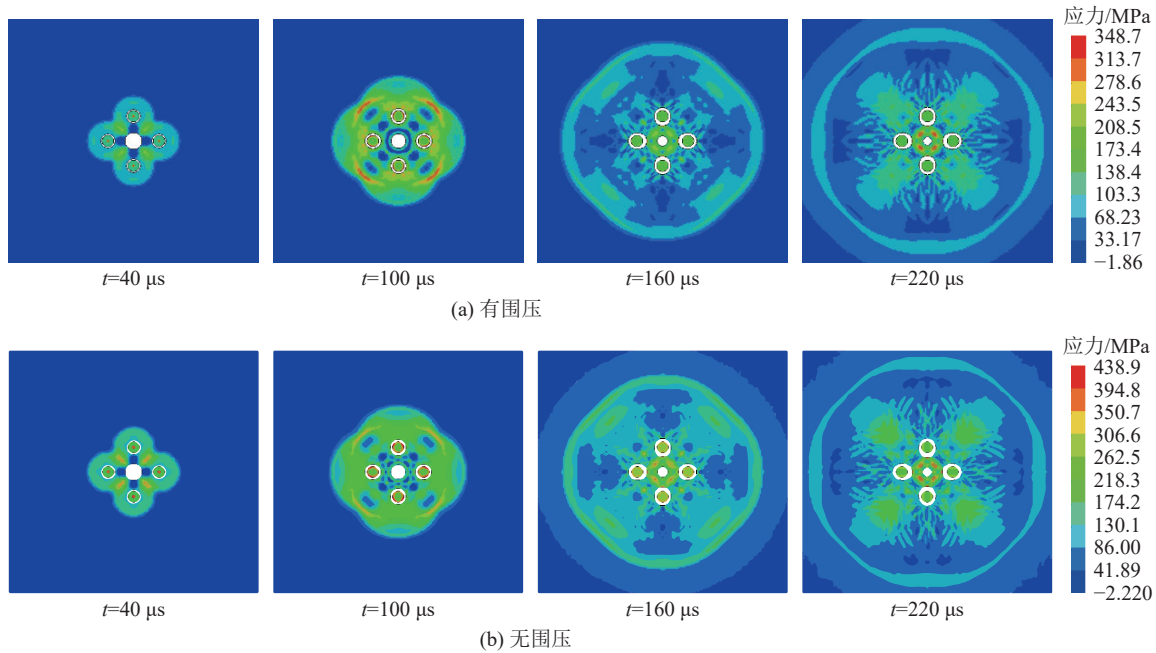


图9 空孔直径 24 mm 模型不同时刻应力云图

Fig.9 Stress cloud diagram of 24 mm hole diameter model at different times

应力集中叠加后的压应力较小,且拉伸应力作用区域较小,空孔直径过大或过小都会使大块度碎块占比较高。

2) 空孔直径为 32 mm 与 16 mm 模型碎块的分形维数差值大于空孔直径 16 mm 与无空孔模型碎块分形维数的差值,说明当空孔直径过大时对碎岩块度的影响大于空孔直径较小或没有空孔时。

3) 空孔直径同为 16 mm 时,3 g 装药量模型试块的碎块平均粒径小于 2 g 装药量模型试块,分形维数及碎块总质量大于 2 g 装药量模型试块,说明当空孔直径相同时增加装药量可以提高岩石的破碎度及槽腔体积。

4) 相同时刻下无围压模型的应力云图面积较大,且空孔和炮孔附近的压应力及拉应力相较于有围压时均更大,围压对爆炸应力波的传播和峰值有抑制作用。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 李刚,牛磊,李文龙.煤矿硬岩巷道快速掘进技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):13-20.
LI Gang, NIU Lei, LI Wenlong. Study on rapid excavation technology for hard rock roadway in coal mine[J]. *Coal Science and*

Technology, 2018, 46(11): 13-20.

- [3] 王远来,史秀志,王发民,等.地下矿山直眼掏槽爆破参数优化研究[J].矿冶工程,2021,41(5):36-40.
WANG Yuanlai, SHI Xiuzhi, WANG Famin, *et al.* Optimization of blasting parameters of burn cut in underground mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(5): 36-40.
- [4] 李兰,张电吉,姚金蕊,等.地下磷矿大直径空孔桶形掏槽试验研究[J].中国矿业,2015,24(11):139-141,146.
LI LAN, ZHANG Dianji, YAO Jinrui, *et al.* Experimental study on large diameter cutting with empty hole in underground phosphate ore[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(11): 139-141, 146.
- [5] 单仁亮,周纪军,黄宝龙,等.巷道掏槽爆破影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(2):25-27,54.
SHAN Renliang, ZHOU Jijun, HUANG Baolong, *et al.* Analysis on slotting blasting influencing factors of mine roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(2): 25-27, 54.
- [6] 黄丹,陈何,赵瑶瑶,等.地下铝土矿破碎岩体高效爆破技术研究[J].中国矿业,2019,28(9):116-119,147.
HUANG Dan, CHEN He, ZHAO Yaoyao, *et al.* Research on high efficiency blasting technology of broken rock mass in underground bauxite[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(9): 116-119, 147.
- [7] GAO Jing, XIE Shizhen, ZHANG Xiantang, *et al.* Study on the 2D optimization simulation of complex five-hole cutting blasting under different lateral pressure coefficients[J]. *Complexity*, 2020(11): 1-12.
- [8] 左进京,杨仁树,肖成龙,等.煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J].矿业科学学报,2018,3(4):335-341.
ZUO Jinjing, YANG Renshu, XIAO Chenglong, *et al.* Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drirage[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(4): 335-341.
- [9] ZHANG Xiantang, LI Juan, LI Dan, *et al.* Numerical simulation of

- parallel cutting with different number of empty holes[J]. *Tehnički vjesnik*, 2021, 28(5): 1742-1748.
- [10] 郝英剑. 大直径中空眼在岩巷掘进中的应用[J]. *采矿技术*, 2021, 21(1): 21-23, 26.
HAO Yingjian. Application of large diameter hollow hole in rock tunneling[J]. *Mining Technology*, 2021, 21(1): 21-23, 26.
- [11] 皇新宇, 纪强, 张宪堂, 等. 地应力作用下四孔掏槽爆破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.
- [12] 张宪堂, 陈士海. 考虑碰撞作用的节理裂隙岩体爆破块度预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002(8): 1141-1146.
ZHANG Xiantang, CHEN Shihai. Study on blasting fragmentation prediction of jointed and fractured rock mass considering impact[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002(8): 1141-1146.
- [13] 杨洋, 吕文伟. 露天煤矿爆破块度特征分析[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(11): 269-273, 280.
YANG Yang, LYU Wenwei. Analysis of blasting fragmentation characteristics in open-pit coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(11): 269-273, 280.
- [14] 于冰冰, 王雁冰, 王宝珠. 顾北煤矿岩巷掏槽超深爆破试验研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(11): 113-119.
YU Bingbing, WANG Yanbing, WANG Baozhu. Experimental study on over-slotting blasting of rock roadway in Gubei Coal Mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(11): 113-119.
- [15] 张宇菲. 高地应力岩巷掏槽爆破围压效应模型试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
ZHANG Yufei. Model Test study on confining pressure effect of cut blasting in high geo-stress rock lane[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(BeiJing), 2018.
- [16] 范军平, 张召冉, 左进京, 等. 大直径空孔直眼掏槽爆破效果的实验研究[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(5): 83-87.
FAN Junping, ZHANG Zhaoran, ZUO Jinjing, *et al.* Experimental study on parallel cut blasting effect of large diameter empty-hole[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(5): 83-87.
- [17] LYU Y, YUAN C, FU Y, *et al.* Empty-hole effect on fracture propagation under blasting load[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(8): 1-15.
- [18] 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.* Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 791-800.
- [19] 穆兵兵. 空孔对直眼菱形掏槽爆破破岩过程及振动规律影响研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
MU Bingbing. Study on the effect of empty hole on rock breaking process and vibration law of straight eye rhomboid cut blasting[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [20] 谢事臻. 不同侧压系数下岩石五孔掏槽爆破数值模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
XIE Shizhen. Study on the numerical simulation of the blasting of five-hole grooves of rock under different side pressure coefficients[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [21] 谢理想, 卢文波, 姜清辉, 等. 深部岩体在掏槽爆破过程中的损伤演化机制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(5): 1252-1260.
XIE Lixiang, LU Wenbo, JIANG Qinghui, *et al.* Damage evolution mechanism of deep rock mass in process of cut blasting[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(5): 1252-1260.
- [22] XU Ying, GE Jinjin, LI Hailong, *et al.* Relationship between fractal dimension of fragmentation degree and energy dissipation of rock-like materials under initial stress[J]. *Shock and Vibration*, 2020(13): 8861971:1-10.
- [23] 武仁杰, 李海波, 李晓锋, 等. 冲击载荷作用下层状岩石破碎能耗及块度特征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1053-1060.
WU Renjie, LI Haibo, LI Xiaofeng, *et al.* Broken energy dissipation and fragmentation characteristics of layered rock under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1053-1060.
- [24] 李杨杨, 张士川, 文志杰, 等. 循环载荷下煤样能量转化与碎块分布特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1411-1420.
LI Yangyang, ZHANG Shichuan, WEN Zhijie, *et al.* Energy conversion and fragment distribution characteristics of coal sample under uniaxial cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1411-1420.
- [25] HU Lihua, ZHANG Zhenghu, LIANG Xin, *et al.* Fractal analysis of fragmentation distribution of rockbursts induced by low-frequency seismic disturbances[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021(5): 1-14.
- [26] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7): 1379-1389.
HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Fractal characteristics of marble fragmentation under high confining pressure unloading and its correlation with energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1379-1389.
- [27] 蔡永乐, 付宏伟. 水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 902-907.
CAI Yongle, FU Hongwei. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 902-907.
- [28] 李华超. 围压应力作用下复式三角形掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
LI Huachao. Numerical simulation study on rock breaking mechanism of compound triangle cut blasting under confining pressure stress[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.