文章编号：1003-1480（2026）01-0082-06

排间延时对凝灰岩台阶爆破块度的影响规律与优化研究

张阳光

（中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司，安徽 淮北，235000）

摘 要：岩石爆破块度直接影响后续装载效率与破碎成本，合理控制延时爆破参数是优化破碎效果的关键。本文基于应力波叠加理论，结合数值模拟与现场试验，系统研究了排间延时时间对致密坚硬凝灰岩爆破块度的影响规律。采用 ANSYS/LS-DYNA 建立台阶深孔爆破模型，在固定孔间延时 19 ms 的条件下，对比分析排间延时分别为 35，40，45，50，55，60 ms 时不利破碎区的最大有效应力响应。结果表明，当排间延时为 40 ms 时，不利破碎区平均最大有效应力峰值达 35.69 MPa，应力场强化效应最显著。在此基础上，开展 6 组现场爆破试验（台阶高 15 m，孔排距 4.5 m × 3.5 m），利用无人机航拍与 Split-Desktop 软件对爆堆块度进行定量分析。试验数据显示，孔间延时 19 ms、排间延时 40 ms 组合下，爆破后最大块度尺寸最小（95.35 cm），大块率最低（4.86%），破碎效果最优。研究成果可为类似岩性条件下的矿山延时爆破参数优化提供理论依据与工程参考。

关键词：排间延时；ANSYS/LS-DYNA；爆破块度；应力波叠加；大块率

中图分类号：TJ450.3 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.013

Influence and Optimization of Inter-Row Delay Time on Blast Fragmentation in Tuff Bench Blasting

ZHANG Yang-guang

（Huaibei Blasting Technology Research Institute Co.,Ltd.,CCTEC，Huaibei，235000）

Abstract: Blast fragmentation directly affects subsequent loading efficiency and crushing costs, thus, appropriate control of delay blasting parameters is crucial for optimizing fragmentation performance. Based on the stress wave superposition theory, this study systematically investigates the influence of inter-row delay time on blast fragmentation in dense, hard tuff through integrated numerical simulation and field trials. A bench-scale deep-hole blasting model was established using ANSYS/LS-DYNA, with the inter-hole delay fixed at 19 ms, to comparatively analyze the maximum effective stress response in poorly fragmented zones under inter-row delays ranging from 35, 40, 45, 50, 55, 60 ms. The results show that an inter-row delay of 40 ms yields the highest average maximum effective stress (35.69 MPa) in the poorly fragmented zone, indicating the most pronounced stress field enhancement. Subsequently, six field blasting tests were conducted, featuring a 15 m bench height and a hole pattern of 4.5 m×3.5 m. Unmanned aerial vehicle photogrammetry combined with Split-Desktop software was employed to quantitatively assess fragment size distribution. Field data demonstrate that the combination of 19 ms inter-hole delay and 40 ms inter-row delay achieves the optimal fragmentation outcome, with the smallest maximum fragment size (95.35 cm) and the lowest oversize ratio (4.86%). The findings provide both theoretical support and practical guidance for optimizing delay blasting parameters in mines with similar rock mass conditions.

Key words: Inter-row delay time；ANSYS/LS-DYNA；Blast fragmentation；Stress wave superposition；Oversize ratio

延时爆破技术通过按预设时间间隔顺序起爆炮孔，使先爆炮孔产生的应力波与后爆炮孔的能量场在

收稿日期：2025-10-25
作者简介：张阳光（1992-），男，工程师，主要从事爆破工程技术研究。
引用本文：张阳光. 排间延时对凝灰岩台阶爆破块度的影响规律与优化研究[J]. 火工品, 2026(1): 82-87.

特定时间窗口内发生叠加，从而增强岩石破碎效果。该技术已广泛应用于露天矿山台阶爆破作业。然而，在实际工程中，受地质条件的复杂性、岩体非均质性以及传统导爆管雷管延时精度不足等因素制约，精确调控延时参数以有效降低爆破块度仍面临较大挑战。

近年来，高精度工业电子雷管推广应用使毫秒级甚至亚毫秒级延时控制成为可能，为精细化爆破设计提供技术支撑。在此背景下，针对不同岩性条件科学匹配孔间与排间延时参数以获最优破碎效果，成为矿山企业的技术难题。围绕孔间延时对爆破块度的影响，国内外学者已开展大量研究。杨俊等[1]通过数值模拟与现场试验相结合，指出在深孔台阶爆破中，20 ms 孔间延时可显著改善岩石破碎均匀性，整体爆破效果较优。于传泽等[2]系统对比了 11~23 ms 范围内不同孔间延时下的有效应力响应及块度分布，发现 17 ms 时粒径小于 20 cm 的岩块占比达 77.24%，而大于 50 cm 的仅占 0.31%，破碎效果最佳。邹宗山等[3]在吉朗德露天矿开展现场试验，结果表明 15 ms 孔间延时较 25 ms 可使大块率降低 59%，有效实现降本增效。此外，张阳光等[4]在福建上杭紫金山金铜矿的实践中亦证实，19 ms 孔间延时条件下，爆破后的岩石块度最大尺寸和大块率均达到最小值，爆破效果显著优于其他工况。

综上所述，现有研究多聚焦于孔间延时的优化，而关于排间延时对爆破块度影响的系统性探讨仍较为匮乏。尤其在致密坚硬岩体（如凝灰岩）中，排间延时如何通过应力波叠加机制调控不利破碎区的应力演化，尚缺乏充分的理论与试验支撑。

为此，本文基于应力波叠加原理，结合 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟与台州湾新材料产业园现场爆破试验，系统研究排间延时时间（35~60 ms）对致密坚硬凝灰岩爆破块度的影响规律，旨在确定最优排间延时参数，为类似岩性条件下的矿山精细化爆破设计提供理论依据与工程实践参考。

1　应力波叠加机理分析

炸药在炮孔内爆炸后，主要通过爆轰波和高温高压爆炸生成气体对孔壁施加作用。其中，爆轰波传播至孔壁时，在炮孔周围形成动态应力场[5-6]；随后，爆炸生成气体持续作用于孔壁，在炮孔周围形成 1 个以炮孔为中心的近似圆柱状裂隙区。

当相邻炮孔间采用合理的延时起爆时，先爆炮孔产生的应力波尚未完全衰减，后爆炮孔的应力波即已传播至同一区域，2 者发生有效叠加，从而显著增强局部应力场强度，促进岩石充分破碎。反之，若排间或孔间延时时间过长，则先爆炮孔产生的应力波在后爆炮孔起爆前已基本消散，无法实现应力波的有效叠加，导致应力场强化效应缺失，最终爆堆块度偏大，破碎效果不佳，应力场叠加失效示意图如图 1 所示。

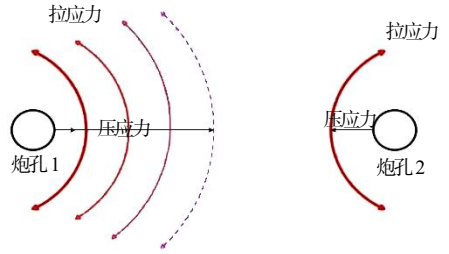

图 1　延时时间过长时应力场叠加失效示意图
Fig. 1　Schematic diagram of ineffective stress wave superposition due to excessive delay time

如果延时时间过短甚至趋于零（即近似齐发爆破），两炮孔几乎同时起爆，其产生的应力波将在极短时间内于孔间区域相遇并发生干涉叠加，形成加强合应力。该合应力迅速将炮孔之间的岩石拉裂，生成贯穿性主裂缝。爆炸生成气体随即沿此裂缝快速泄出，大幅缩短其在孔内的滞留与膨胀作用时间，削弱了气体对裂隙的进一步扩展与破碎作用，反而不利于整体破碎质量的提升，具体如图 2 所示。

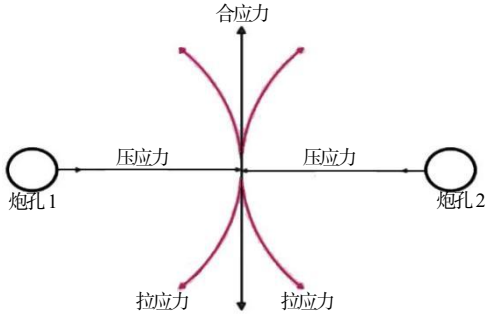

图 2　延时时间过短时应力波过早叠加及气体提前泄出示意图
Fig. 2　Schematic diagram of premature stress wave superposition and early gas venting due to insufficient delay time

因此，存在一个最优延时窗口，既能保证应力波

的有效叠加以增强动态破碎效应，又能为爆炸生成气体提供足够的作用时间以实现静态破碎补充，从而实现岩石块度的最优控制。

2　数值模拟方法与结果分析

2.1　爆破数值模型构建

为探究不同排间延时时间对应力波传播及岩石破碎效果的影响，本文基于 ANSYS/LS-DYNA 平台建立三维台阶爆破数值模型。模型采用梅花形布孔方式，共设置 3 个炮孔：前排 2 个，后排 1 个。梅花形布置数值模型如图 3 所示。

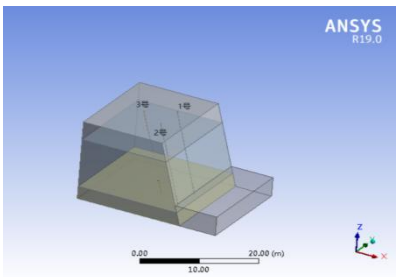

图 3　数值模型示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the numerical model

建立的模型整体尺寸为 35 m（长）× 36 m（宽）× 16.5 m（高），该尺寸可有效减小应力波在边界处的反射与拉伸干扰。边界条件设置如下：模型上表面及临空斜面定义为自由面，其余 5 个面均施加无反射边界条件[7]，以模拟无限域岩体中的应力波传播行为。

2.2　材料本构模型与状态方程

2.2.1　岩石材料模型

针对致密坚硬凝灰岩的动态响应特性，选用 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型描述岩体行为。该模型能有效表征岩石在大应变、高应变率及高压条件下的强度增强与损伤演化特征[8]，适用于深孔爆破等强动载工况。

2.2.2　炸药材料模型与状态方程

拟采用岩石乳化炸药，在 ANSYS/LS-DYNA 中采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 作为炸药材料模型，并通过*EOS_JWL 定义状态方程，表达式如公式（1）所示。

$$P = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \qquad (1)$$

式（1）中：P 为爆轰压力，GPa；V 为相对体积；E_0 为初始比内能；A、B、R_1、ω 为试验确定的炸药材料参数[9]。其具体参数如表 1 所示。

表 1　炸药材料参数及 JWL 状态方程参数

Tab. 1　Explosive material parameters and JWL equation-of-state coefficients

参数	数值
ρ/(g·cm^{-3})	1.200
D/(km·s^{-1})	4.0
P/KPa	9.5
A/KPa	214.4
B/KPa	182 000
R_1	4.2
R_2	0.9
ω	0.35
E_0/KPa	4.2

2.3　不利破碎区监测点布设

鉴于爆破后大块岩体主要集中在特定区域，本文聚焦于“不利破碎区”的应力响应特征。根据爆破漏斗理论及现场经验[10-11]，此类区域主要包括：（1）炮孔孔口附近，受炮泥堵塞影响，没有炸药直接作用；（2）相邻炮孔爆破漏斗母线交汇形成的三角形区域，此处应力波传播路径长、衰减显著，且无直接装药作用，极易形成大块。通过分析得到的易产生大块岩石的不利破碎区如图 4 所示。

图 4　梅花形布孔下的不利破碎区示意图

Fig. 4　Unfavorable crushing zone in triangular hole pattern

为定量表征该区域的动态响应，在不利破碎区内选取 3 个代表性监测点：A（H145560）、B（H151320）和 C（H158544），其空间位置如图 5 所示。通过记录各点在不同延时工况下的等效应力时程，评估排间延时对局部破碎效能的影响。

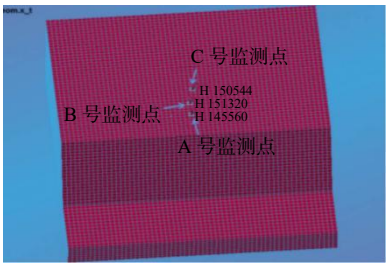

图 5　应力监测点空间位置示意图

Fig. 5　Spatial layout of stress monitoring points

2.4　模拟结果与讨论

基于前期研究[4]，孔间延时 19 ms 已被证实可获

得较优块度控制效果。因此，本次数值模拟固定孔间延时为 19 ms，变量仅为排间延时，依次设为 35，40，45，50，55，60 ms。各工况下监测点 A、B、C 的等效应力时程曲线如图 6 所示。

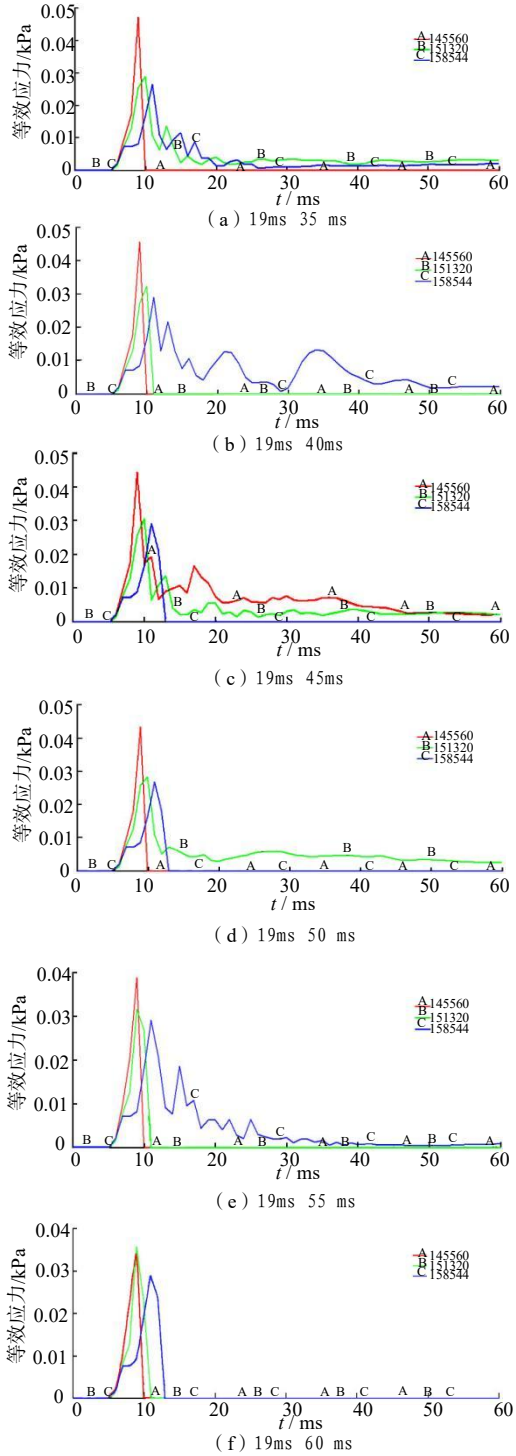

图 6　不同排间延时下监测点等效应力时程曲线

Fig.6　Equivalent stress time histories at monitoring points under various inter-row delays

提取各曲线峰值，得到 A、B、C 3 点的最大有效应力及其平均值如表 2 所示。进一步绘制平均最大有效应力随排间延时的变化趋势，结果如图 7 所示。

表 2　各监测点最大有效应力值　　MPa

Tab. 2　Maximum effective stress at monitoring points

监测点	35 ms	40 ms	45 ms	50 ms	55 ms	60 ms
A	47.25	45.70	44.59	43.51	38.96	35.71
B	28.97	32.32	30.62	28.47	31.71	35.83
C	26.52	29.07	29.33	26.81	29.17	29.14
平均值/MPa	34.25	35.69	34.84	32.92	33.28	33.56

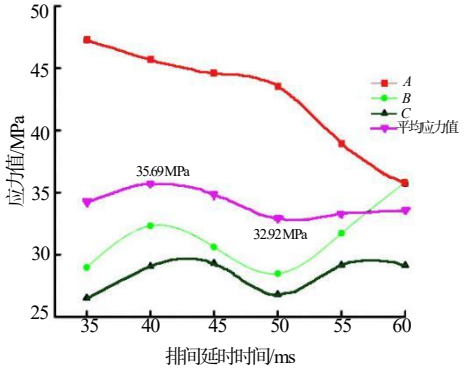

图 7　平均最大有效应力随排间延时的变化趋势

Fig. 7　Variation of average maximum effective stress with inter-row delay time

分析表明：（1）监测点 A 的应力峰值随排间延时增加呈单调递减趋势，而 B、C 点则呈现“先增后减再微增”的非单调变化，反映出不同位置对应力波叠加路径与时序的敏感性差异；（2）3 点平均最大有效应力在排间延时为 40 ms 时达到峰值（35.69 MPa），较最小值（50 ms 时的 32.92 MPa）高出约 8.4%。这表明 40 ms 排间延时可实现最有效的应力场强化，有利于改善不利破碎区的岩石破碎效果。

3　现场爆破试验与块度分析

3.1 试验场地工程地质条件

试验位于浙江省台州市台州湾经济技术开发区内的台州湾新材料产业园，距临海市区约 53 km。规划爆破区域涵盖 A ~ H 共 7 个区块，如图 8 所示，分布于上盘镇至桃渚镇一带丘陵及头门岛。区内山体表层覆盖层厚度为 0.70 ~ 1.95 m，强风化层厚度为 4.10 ~ 6.90 m，均为松散岩土层；其下伏基岩为完整性较好的中风化原岩，适合作为爆破试验对象。

岩性以流纹质含角砾玻屑熔结凝灰岩为主，局部夹有含角砾沉凝灰岩、紫红色凝灰质粉砂岩，偶见安

山岩及安山玢岩夹层。主岩体厚度达 1 000~1 200 m，致密坚硬，具有典型高抗压强度特征。本次试验选取覆盖层以下的中风化凝灰岩段进行爆破作业，以确保岩体条件的一致性。

图 8　爆破区域分布示意图

Fig. 8　Schematic diagram of blasting zones

3.2　试验方案设计

爆破器材采用2号岩石乳化炸药与高精度工业电子雷管。为单一变量控制，除排间延时时间外，其余爆破参数均保持恒定，具体如表 3 所示。共开展 6 组现场试验，排间延时时间依次设为 35，40，45，50，55，60 ms，孔间延时统一固定为 19 ms（基于前期研究成果）。

表 3　主要爆破参数

Tab. 3　Main blasting parameters

参数	数值
炮孔直径 D /mm	115
孔倾角/°	85
台阶高度 H/m	15
孔间距 a /m	4.5
排间距 b /m	3.5
装药长度 L_2/m	8
堵塞长度 L_1/m	4
超深 h/m	1.5
单孔装药量 Q/kg	90

每次爆破完成后，采用无人机对爆堆进行垂直航拍，获取高分辨率影像数据；随后利用专业图像分析软件 Split-Desktop 对爆堆块度分布进行自动识别与统计，最终获得不同粒径区间的体积占比及最大块度尺寸，现场试验爆堆图片如图 9 所示。

3.3 试验结果与分析

基于 Split-Desktop 软件处理结果，不同排间延时下的爆堆块度分布数据如表 4 所示。为直观展示变化趋势，采用 Origin 软件绘制最大块度尺寸及各粒径区间占比随延时时间的变化关系，如图 10~11 所示。

图 9　现场试验爆堆图片

Fig. 9　Picture of explosion pile in field test

表 4　不同排间延时下的爆破块度分布　%

Tab. 4　Fragment size distribution under different inter-row delay times

块度尺寸/cm	35 ms	40 ms	45 ms	50 ms	55 ms	60 ms
0-30	40.13	42.69	40.05	39.16	35.41	33.85
30-50	33.45	37.21	34.20	32.43	30.27	28.25
50-80	19.39	15.24	20.75	20.89	26.34	29.85
80-120	7.03	4.86	5.00	6.82	7.98	8.05
最大块度	98.25	95.35	98.89	102.56	109.66	107.32

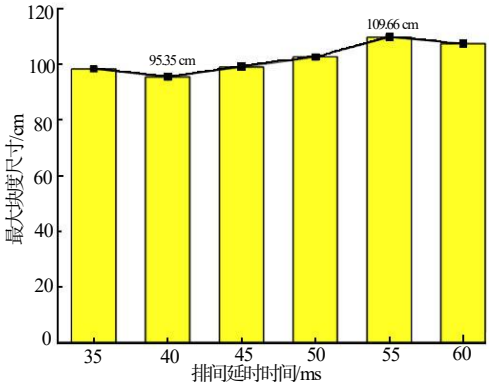

图 10　最大块度尺寸随排间延时时间的变化

Fig. 10　Variation of maximum fragment size with inter-row delay time

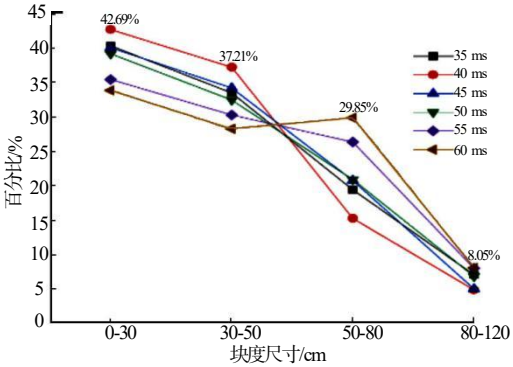

图 11　各粒径区间岩块占比分布

Fig.11　Percentage distribution of fragment sizes

分析表明：

（1）当排间延时为 40 ms 时，爆堆最大块度最小（95.35 cm），较最不利工况（55 ms，109.66 cm）降低 13.05%；

（2）按工程惯例将 >80 cm 的岩块定义为“大块”，则 40 ms 工况下大块率最低（4.86%），显著优于 60 ms 工况（8.05%），降幅达 39.6%；

（3）粒径 ≤50 cm 的岩块占比均超过 70%，且整体呈现“小块多、大块少”的合理分布趋势，其中 40 ms 工况下该比例高达 79.90%，破碎效果最优。

分析表明，孔间延时 19 ms、排间延时 40 ms 的组合在本试验条件下实现了最佳破碎效果，验证了数值模拟中关于应力场强化峰值出现在 40 ms 的预测，体现了理论与实践的良好一致性。

4 结论

本研究针对矿山开采过程中爆破后岩石块度对装载效率及后续破碎工序的影响，采用数值模拟结合现场试验的方法，系统探讨了不同排间延时时间条件下台阶深孔爆破的破碎效果。主要结论如下：

（1）优化排间延时时间可改善破碎效果。在中风化、致密坚硬的凝灰岩地质条件下，当台阶高度为 15 m，孔排距设定为 4.5 m × 3.5 m 时，通过调整排间延时时间至 40 ms，并保持孔间延时时间为 19 ms 不变，可以有效增强不利破碎区内的应力场强度，达到最优的岩石破碎效果。此时，最大岩石块度尺寸降至最低值 95.35 cm，大块率（>80 cm）仅为 4.86%，相比其他测试条件下的表现更为优异。

（2）应力波叠加效应促进岩石破碎。基于应力波叠加理论，数值模拟揭示了当孔排间延时时间设置为 19 ms 和 40 ms 时，不利破碎区的最大有效应力平均值达到峰值 35.69 MPa。这表明适当的延时设计能够促使先爆炮孔与后爆炮孔产生的应力波相互叠加，形成更强的应力场，从而有利于岩石的有效破碎，减少大块率并降低最大块度尺寸。

（3）工程实践验证数值模型准确。台州湾新材料产业园内 6 次现场爆破试验的数据分析证实了上述结论的可靠性。选定岩体条件和爆破参数下，孔排间延时时间为 19 ms 和 40 ms 时，能实现最佳破碎效果，粒径≤50 cm 小块占比超 70%，符合作业需求。

综上所述，合理选择排间延时时间对于控制爆破后的岩石块度具有重要意义。特别是孔排间延时时间分别为 19 ms 和 40 ms 时，能够在提高爆破质量的同时，降低岩石的大块率和最大块度尺寸，为类似矿山生产提供了重要的技术参考和指导依据。

参考文献：

[1] 杨俊, 王凡繁, 马亚, 等. 孔间不同毫秒延时深孔台阶爆破模拟研究与块度分析[J]. 煤矿爆破, 2023,41(2): 28-34.

[2] 于传泽, 郭连军, 邓丁, 等. 露天矿山孔间延时起爆条件下的岩石破碎效果研究[J]. 爆破, 2024,41(2): 1-7.

[3] 邹宗山, 崔峻语, 和铁柱, 等. 孔间延时时间对台阶爆破块度影响试验研究[J]. 工程爆破, 2023,29(6): 75-80.

[4] 张阳光, 林飞, 赵彭, 等. 延时时间对露天深孔爆破破碎效果的影响研究[J]. 工程爆破, 2021,27(4): 69-75.

[5] 边俊城. 爆炸应力波在节理岩体中传播规律的数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.

[6] 付天光. 逐孔起爆技术应用基础研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.

[7] 缪玉松, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 爆轰波碰撞聚能效应及其数值分析[J]. 工程爆破, 2016,22(05): 45-49.

[8] 祝效华, 罗衡, 贾彦杰. 考虑岩石疲劳损伤的空气冲旋钻井破岩数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(4): 754-761.

[9] 成诗冰, 洪志先. 液态 CO_2 致裂技术在管廊基坑台阶开挖中的应用[J]. 工程爆破, 2021,27(5): 80-89.

[10] 林大泽. 降低地下矿深孔爆破落矿大块率的技术措施[J]. 中国安全科学学报, 2007,17(1): 86-90.

[11] 李绍斌, 吕增在. 降低露天爆破大块率及控制根底产生的措施[J]. 科技创新与应用, 2019(21): 136-137.