

DOI: 10.7672/sgjs2026020095

# 精确延时爆破下隧道岩体损伤效应研究\*

王建辉<sup>1</sup>, 谭天龙<sup>1</sup>, 杨璐<sup>1</sup>, 凌天龙<sup>2</sup>, 乔璐<sup>3</sup>

(1. 浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 泰山学院土木与建筑工程学院, 山东 泰安 271000;

3. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

[摘要] 数码电子雷管的使用为地下工程逐孔起爆方式提供了条件,得以广泛应用。针对隧道光面爆破技术,采用LS-DYNA建立崩落孔逐孔起爆数值模型,分析隧道断面损伤分布特征。研究表明:同时起爆时,炮孔间应力叠加效应明显,炮孔连线能形成贯通裂隙;逐孔起爆时,自由面对裂隙的形成起到重要作用,孔间延期时间增大,破碎面积先增大后减小,延期时间为1ms和3ms时破碎效果最好;抵抗线对破碎效果影响较大,抵抗线越大,岩石破碎比 $\eta$ 越小,破岩效率越低。

[关键词] 隧道;精确延时;爆破损伤;数值模拟

[中图分类号] U455.6

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0095-04

## Damage Effect of Precise Delayed Blasting in Tunnel Rock Mass

WANG Jianhui<sup>1</sup>, TAN Tianlong<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>1</sup>, LING Tianlong<sup>2</sup>, QIAO Lu<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Taishan University, Taian, Shandong 271000, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The application of digital electronic detonators has enabled the implementation of hole-by-hole initiation in underground engineering, which has been widely adopted. However, a unified understanding of the damage mechanism of rock mass under precise delay blasting has not yet been established. Focusing on the smooth blasting technique in tunnels, this study employs LS-DYNA to establish a numerical model of hole-by-hole initiation for breaking holes, analyzing the characteristics of damage distribution on the tunnel cross-section. The results indicate that under simultaneous initiation, stress superposition between blast holes is significant, leading to through-going cracks along the line connecting the holes. Under hole-by-hole initiation, the free surface plays a crucial role in crack formation. As the inter-hole delay time increases, the fractured area first increases and then decreases, with the best fragmentation effect observed at delay times of 1ms and 3ms. The burden also has a notable influence on the fragmentation effect. By defining a rock fragmentation ratio  $\eta$ , it is found that a larger burden results in a smaller  $\eta$  and lower rock-breaking efficiency.

**Keywords:** tunnels; precise delay; blasting damage; simulation

## 0 引言

在“双碳”目标的引领下,中国掀起了加快推进能源革命、构建新型电力系统的热潮,其中抽水蓄能是当前技术最成熟、最具大规模开发条件的清洁能源<sup>[1]</sup>。抽水蓄能电站建设迎来了大发展时期,同

时也促生了大量地下工程。这些地下工程的建设仍以钻爆法为主要施工手段。爆破开挖引起的围岩损伤对隧道的安全性和支护成本有重要影响。因此,针对隧道开挖围岩爆破损伤的研究一直是工程界关心的热点问题。

合理的孔间延时可使岩体充分碰撞、破碎均匀,同时减弱或消除孔间应力波的叠加,降低爆破振动及其对围岩的损伤扰动。以往工程实践中,同

\* 山东省自然科学基金(ZR2020QE266)

[作者简介] 王建辉,高级工程师,E-mail: wang\_jh6@hdec.com

[通信作者] 凌天龙,博士,讲师,E-mail: ll85@126.com

[收稿日期] 2025-08-05

一圈炮孔一般采用同一段毫秒延期雷管同时起爆。随着高精度数码电子雷管的广泛应用,针对精确延时设计的爆破技术革新一直在探索与尝试。Li等<sup>[2]</sup>结合数码电子雷管,提出了岩巷深孔分段掏槽爆破技术,从机理和技术方面研究深孔掏槽爆破问题。刘翔宇等<sup>[3]</sup>研究了周边孔孔间延时对爆破损伤的影响,认为损伤范围并不随孔间延时的增大而减小,孔间延时超过3ms时对爆破损伤范围影响较小,周边孔采用逐孔延时起爆较好。王国豪等<sup>[4]</sup>提出了中深孔-孔内分段爆破技术,对比了单循环进尺、炮孔利用率、孔痕率及大块率等爆破效果指标。上述文献一般针对掏槽孔破岩效率或周边孔损伤效应展开研究,但孔间延期时间的选择仍是难点,尤其是孔间延时等爆破参数对爆破损伤的影响研究较少。本文以圆形隧道掘进施工为工程背景,构建崩落孔逐孔起爆数值模型,分析逐孔起爆下岩体的爆破损伤演化特征。

## 1 数值模拟

为了准确描述崩落孔逐孔起爆时相邻炮孔间的相互作用,采用LS-DYNA中的JWL状态方程模拟炸药爆轰过程。由于采用ALE计算方法对崩落孔逐孔起爆的数值模型需要精细的网格划分,且模型规模超过10m,为简化计算,建立12m×12m的二维模型<sup>[5]</sup>,如图1所示。模型的4个边界均设置为无反射边界,以防止应力波反射对计算结果产生影响。数值模拟以最外1圈崩落孔为研究对象,崩落孔采用逐孔起爆技术,设置了4种不同孔间延期时间,即0,1,3,5ms。在模型中半径为2m的圆上以1m等间距布置10个崩落孔。将前几段炮孔已破碎的岩体移除,仅保留当前崩落孔要破碎的岩体,并设置不同的抵抗线,分别为0.5,0.8,1m,用于分析抵抗线大小对岩体损伤的影响。

在LS-DYNA软件中,RHT模型常被用于模拟岩石在爆破荷载作用下的力学响应。该模型可以考虑围压、应变率、应变硬化和损伤软化对材料破坏强度的影响。模型中共有31个参数,本文中花岗岩岩体RHT模型参数参考文献<sup>[6]</sup>选取,初始密度取2606kg/m<sup>3</sup>,Hugoniot多项式系数 $A_1$ , $A_2$ 和 $A_3$ 分别取19.5,31.2和17GPa,状态方程参数 $B_0$ 和 $B_1$ 均取1.6,状态方程参数 $T_1$ 和 $T_2$ 分别取19.5GPa和0,孔隙压碎时压力取42.7MPa,压实时压力取6GPa,初始孔隙度取1.11,孔隙度指数取4,失效面参数 $A$ 和 $N$ 分别取2.27和0.98,剪切模量取19.8GPa,单轴抗压强度取64.1MPa,压缩屈服面参数取0.8,拉伸屈服面参数取0.9,压缩应变率增强

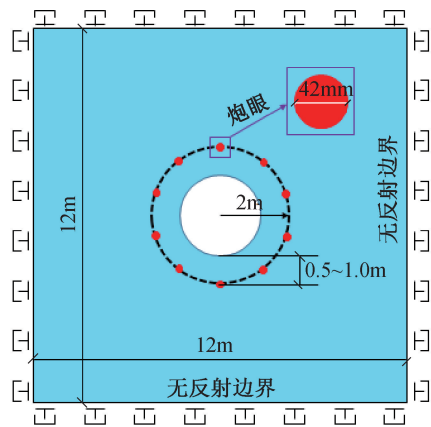


图1 崩落孔逐孔起爆数值模型

Fig. 1 Numerical model of hole-by-hole initiation

指数 $\beta_c$ 和 $\beta_t$ 分别取0.019,0.024,剪压强度比和拉压强度比分别取0.15和0.012,拉压子午比参数取0.685,脆-塑性转化系数取0.0105,剪切模量折减系数取0.5,残余强度参数 $B$ 和 $N$ 分别取1.6和0.61,损伤参数 $D_1$ 和 $D_2$ 分别取0.036和1,最小损伤残余应变取0.01,Grüneisen常数取1.6。

空气采用MAT\_NULL材料模型和EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL线性多项式状态方程进行描述,其压力 $P$ 为<sup>[7]</sup>:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_a \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为比体积, $\mu = \rho_1 / (\rho_0 - 1)$ ;  $\rho_1$ 为当前密度; $\rho_0$ 为初始密度,取1.29kg/m<sup>3</sup>;  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 为状态方程参数,除 $C_4, C_5$ 取0.4外,其余参数均取0;  $E_a$ 为空气的初始比内能,取0.25MPa<sup>[8]</sup>。

炸药采用MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN材料模型,并使用EOS\_JWL状态方程计算压力:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-VR_1} + B' \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-VR_2} + \frac{\omega E_b}{V} \quad (2)$$

式中: $A, B', R_1, R_2$ 和 $\omega$ 为状态方程参数,分别取714.3,2.309GPa,12.527,0.918,0.39;  $V$ 为相对体积; $E_b$ 为炸药的初始比内能,取3GPa。2号岩石乳化炸药的密度取1000kg/m<sup>3</sup><sup>[9]</sup>。

## 2 孔间延期时间对损伤演化的影响机制

为了对比孔间延期时间对岩体损伤的影响,模拟了同时起爆下岩体损伤的演化规律。孔间延期时间为0时的岩体损伤分布云图如图2所示。

由图2可知,崩落孔起爆后,炮孔壁附近岩体形成压碎区,压碎区半径约20cm,是炮孔半径的10倍,模拟结果符合爆破破碎理论。崩落孔同时起爆时,相邻炮孔间形成了贯通裂缝。上一段炮孔起爆

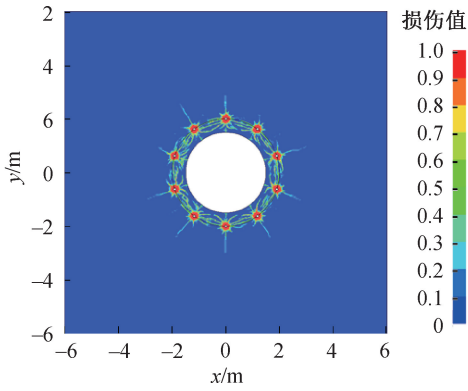


图2 同时起爆岩体损伤云图

Fig. 2 Damage of rock mass under simultaneous initiation

形成的空腔为当前炮孔提供了自由面。受自由面处形成的反射拉伸波影响,炮孔间的贯通裂缝并非完全沿炮孔连线方向发展,而是向自由面方向弯曲。此外,反射拉伸波也能使临近自由面的岩体产生大量层状裂隙,增强了崩落孔的破碎效果。

在RHT模型中,损伤变量 $D$ 是通过累积塑性应变计算得到的。当累积塑性应变导致损伤值超过临界值0.2时,即认为岩体已经破坏<sup>[5,10]</sup>。在LS-PrePost中,将损伤值超过0.2的单元涂成白色,可以直观显示出逐孔起爆时岩体裂缝的扩展情况。孔间延期时间为1ms时的岩体裂缝分布状态如图3所示。

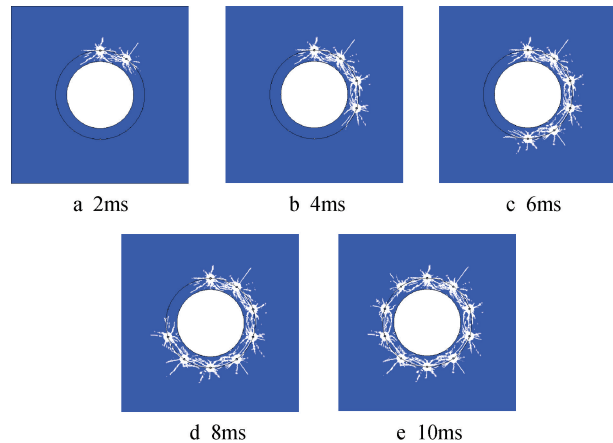


图3 延期时间1ms时岩体裂缝发展规律

Fig. 3 Rock fracture distribution induced by one-by-one detonation with a 1ms delay time

由图3可知,首个炮孔起爆时,炸药爆轰产生的应力波不受其他炮孔影响;与同时起爆相比,炮孔壁周围的裂隙密度明显增大;由于应力波在自由面处产生的反射拉伸波强度较高、作用时间较长,自由面处层状裂隙明显增多,且在炮孔抵抗线方向形成与炮孔贯通的裂缝。后续炮孔起爆后,炮孔间产生的应力波产生叠加效应,炮孔连线产生贯通裂

缝,前4个炮孔间的裂缝宽度和密度均比同时起爆时大;随着起爆炮孔个数的增加,岩体内的应力波变得复杂,与后续炮孔应力波产生叠加效应后既可能有利于破碎岩体,也可能抑制后爆炮孔周围裂隙的发展。

数值模型中,损伤值超过0.2的单元可认为岩体已经发生破坏,形成了裂隙。损伤单元的面积可看作岩体的裂隙面积,裂隙面积越大,意味着岩体破碎得越充分。利用图像分析软件ImageJ计算得到不同孔间延期时间下岩体的裂隙面积,如图4所示。

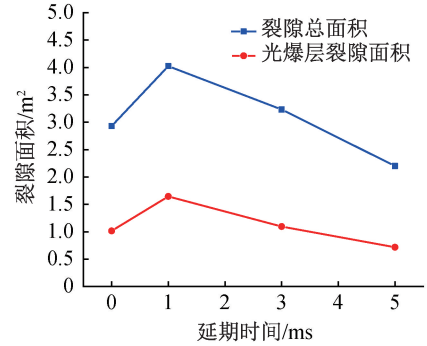


图4 不同延期时间下岩体裂隙面积

Fig. 4 Fractured area of rock mass under different inter-hole delay times

由图4可知,随着孔间延期时间的增加,岩体裂隙面积先增大再减小。孔间延期时间为1ms时,岩体裂隙的总面积最大,为 $4.025\text{m}^2$ ,比同时起爆增加了37.3%;延期时间为5ms时,岩体裂隙的总面积最小,仅为 $2.201\text{m}^2$ 。在光面爆破中,不仅应关注崩落孔的破碎效果,还应考虑其对光爆层的影响。光爆层内岩体裂隙面积与岩体裂隙总面积的变化规律相同,即随着孔间延期时间的增加先增大再减小;与同时起爆相比,延期时间为1,3,5ms时,光爆层内岩体裂隙面积分别增加61.9%,7.8%和减小29.3%。

### 3 抵抗线尺寸对岩体损伤范围的影响

先爆炮孔为崩落孔提供了自由面条件,崩落孔的最小抵抗线对其破岩效果同样有明显的影。通过数值计算对比,研究不同抵抗线对围岩损伤的影响规律,最小抵抗线 $B$ 取0.5,0.8和1m,围岩最终裂隙分布状态如图5所示。

由图5可知,抵抗线较小时,反射拉伸波的强度较高,自由面附近岩体更容易产生层状裂隙。随着最小抵抗线的增大,相邻炮孔间的裂隙宽度和裂隙数量均呈减小趋势。以上现象表明,在相邻炮孔应力波的叠加效应下,位于炮孔连线上的岩体产生裂隙;当最小抵抗线较小时,自由面形成的反射拉伸

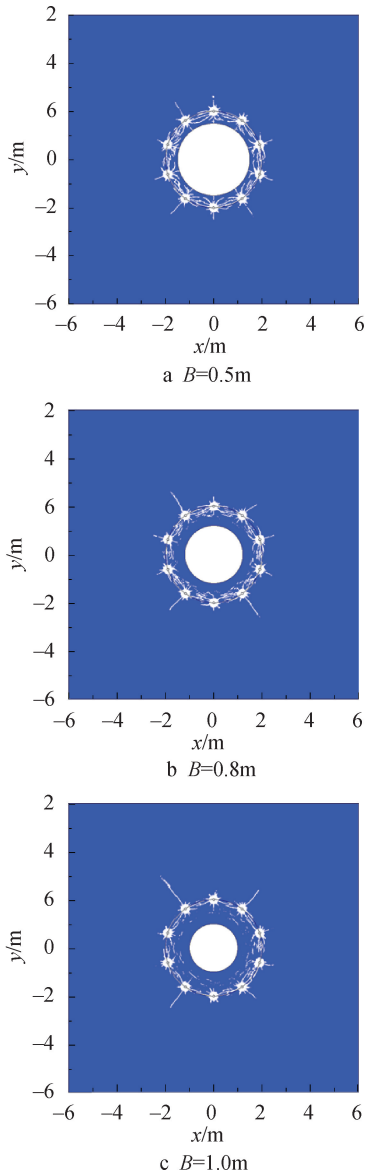


图5 不同抵抗线下岩体裂缝分布状态

Fig. 5 Fracture distribution under different burden distances

波传播至炮孔连线附近,其强度超过岩体的抗拉强度,仍能使岩体损伤进一步累积,从而增大了崩落孔主爆区内岩体的裂隙密度。

为了清晰地对比不同抵抗线下崩落孔的破岩效率,采用式(3)定义岩体破碎比 $\eta$ :

$$\eta = \frac{A_1}{A_0} \quad (3)$$

式中: $A_0$ 为爆破前抵抗线范围内岩体的总面积; $A_1$ 为爆破后抵抗线范围内裂隙的面积。

由式(3)可知,破碎比 $\eta$ 越大,岩石破碎越充分,岩石大块率越低,更利于铲装运输。统计不同抵抗线下岩体裂隙面积和岩体破碎比 $\eta$ ,如图6所示。由图6可知,岩体破碎比随最小抵抗线的增大

而逐渐减小;与 $B=0.5\text{m}$ 相比, $B=1.0\text{m}$ 时岩体破碎比下降了12.35%。此外,当最小抵抗线增大时,位于光爆层内的岩体裂隙面积出现小幅度增大,增大幅度仅4.5%,表明最小抵抗线对开挖边界以外岩体的影响较小。

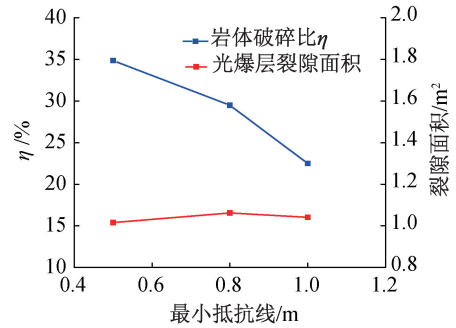


图6 不同抵抗线下岩体裂隙面积

Fig. 6 Fractured area under different burden distances

需要指出的是,本文利用二维数值模型,在假设岩体均匀性且不考虑其他先爆炮孔累积损伤效应的前提下,分析了圆形隧道最外圈崩落孔的孔间延期时间和最小抵抗线对岩体损伤的影响。然而,精确延时爆破引起的岩体损伤是极其复杂的课题,本文仍存在一定的局限性。

#### 4 结语

1)崩落孔延期时间不仅影响炮孔壁附近破碎区的大小,也影响炮孔连线之间裂隙的宽度和数量,甚至影响光爆层裂隙面积;延期时间为1ms和3ms时裂隙面积较大,破岩效率较高。

2)定义岩体破碎比,并依此分析爆破破岩效率;崩落孔抵抗线大小是其破岩效率的重要影响因素,抵抗线越大,破岩效率越低;此外,抵抗线对光爆层裂隙面积的影响不大。

#### 参考文献:

- [1] 柏睿,韩冬,金伟,等.混合式抽水蓄能电站建设运行关键问题研究[J].人民长江,2024,55(11):46-56.  
BAI R, HAN D, JIN W, et al. Analysis on key issues in construction and operation of hybrid pumped storage power stations[J]. Yangtze River, 2024, 55(11): 46-56.
- [2] LI C X, YANG R S, WANG Y B, et al. Theoretical and numerical simulation investigation of deep hole dispersed charge cut blasting [J]. International journal of coal science & technology, 2023, 10(1): 15.
- [3] 刘翔宇,龚敏,杨仁树,等.隧道周边孔毫秒延时爆破围岩损伤数值分析研究[J].振动与冲击,2023,42(24):8-15.  
LIU X Y, GONG M, YANG R S, et al. Numerical analysis of surrounding rock damage caused by millisecond delay blasting of tunnel peripheral holes[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(24): 8-15.