

# 隧道开挖循环爆破下围岩累积损伤的数值模拟

刘红岩<sup>1,2,3</sup>, 刘毅<sup>1,2,3</sup>, 刘强<sup>4</sup>, 王光兵<sup>4</sup>, 和铁柱<sup>4</sup>, 张光雄<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)工程技术学院深部探测与成像全国重点实验室, 北京, 100083;

3. 中国地质大学(北京)工程技术学院河北省城市地下工程灾害防治与更新重点实验室, 河北 雄安, 133100;

4. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839000)

**摘要:** 隧道开挖循环爆破不可避免会对围岩造成累积损伤, 针对目前数值模拟研究中几乎均是炸药爆炸荷载简化为冲击荷载的不足, 首先针对 Bandaki 微型爆破试验基于 LS-DYNA 软件对其进行了数值重现, 验证了该数值模型所采用的 RHT 本构模型、ALE 耦合算法及材料参数的合理性。其次, 采用该软件模拟了某隧道断面 88 个炮孔的真实爆炸过程, 实现多炮孔显式建模及爆生气体作用的模拟, 弥补了目前方法未能考虑爆生气体作用及简化误差的不足; 同时采用完全重启动技术和初始地应力施加方法很好地模拟了循环爆破与初始地应力耦合作用下隧道围岩的累积损伤机理。最后, 基于上述数值模型研究了各向等压地应力条件下循环爆破对隧道围岩的累积损伤机制, 发现随着循环爆破次数的增加, 围岩损伤范围逐步扩大, 累积损伤效应明显。初始地应力对隧道围岩损伤具有显著的抑制作用, 损伤范围随地应力增大而减小。以第三次循环爆破为例, 当初始地应力由 0MPa 逐渐增加到 10MPa 和 20MPa 时, 围岩平均损伤范围则由 64.05cm 逐渐降低到 20.99cm 和 13.34cm, 降低幅度分别为 67.2%和 36.4%, 即降低幅度总体上呈逐渐减缓的趋势。研究成果可为隧道爆破开挖工程提供有益参考。

**关键词:** 隧道开挖; 循环爆破; 初始地应力; 围岩累积损伤; 数值模拟

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

## Numerical simulation of cumulative damage of surrounding rock under tunnel excavation cyclic blasting

LIU Hongyan<sup>1,2,3</sup>, LIU Yi<sup>1,2,3</sup>, LIU Qiang<sup>4</sup>, WANG Guangbing<sup>4</sup>, HE Tiezhu<sup>4</sup>, ZHANG Guangxiong<sup>4</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Hebei Key Laboratory of Disaster Prevention and Renewal for Urban Underground Engineering, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Xiong'an 133100, Hebei, PR China; 4. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The cyclic blasting in tunnel excavation inevitably causes cumulative damage to the surrounding rock. In view of the deficiency that the explosive load is almost simplified as an impact load in the current numerical simulation studies, the Bandaki micro-blasting test was first numerically reproduced based on the LS-DYNA software, which verified the rationality of the RHT constitutive model, ALE coupling algorithm and material parameters adopted in the numerical model. Secondly, the real explosion process of 88 blast holes in a certain tunnel section was simulated by this software, which achieved the explicit modeling of multiple blastholes and simulation of the effects of blast gas, and made up the shortcomings of the current methods that failed to consider the effect of blast gas and simplification errors. At the same time, the complete restart technology and the initial in-situ stress application method were adopted to well simulate the cumulative damage mechanism of the surrounding rock of the tunnel under the coupling effect of cyclic blasting and initial in-situ stress. Finally, based on the above numerical model, the cumulative damage mechanism of the surrounding rock of the tunnel under isotropic compressive stress conditions caused by

cyclic blasting was studied. It is found that with the increase of the number of cyclic blasting, the damage range of the surrounding rock gradually expands, and the cumulative damage effect is obvious. The initial in-situ stress has a significant inhibitory effect on the damage of the surrounding rock of the tunnel, and the damage range decreases with the increase of in-situ stress. Taking the third cyclic blasting as an example, when the initial in-situ stress gradually increases from 0 MPa to 10 MPa and 20 MPa, the average damage range of the surrounding rock gradually decreases from 64.05 cm to 20.99 cm and 13.34 cm, with the reduction rates of 67.2% and 36.4% respectively, that is, the reduction rate generally shows a gradually slowing trend. The research results can provide useful references for tunnel blasting excavation engineering.

**Keywords:** tunnel excavation; cyclic blasting; initial ground stress; cumulative damage of the surrounding rock; numerical simulation

钻爆法由于经济性好和灵活性强等优点一直是岩体隧道开挖的主要手段<sup>[1]</sup>。然而由于隧道开挖是在多次循环爆破下完成的,而大量模型试验<sup>[2-4]</sup>及现场测试<sup>[5-7]</sup>结果均表明循环爆破加载下隧洞围岩损伤程度呈非线性累积增长,进而导致围岩松动圈范围变大。因此研究循环爆破荷载下隧洞围岩的损伤累积演化规律,对隧道长期安全性评估及后期支护设计等均具有重要意义<sup>[8]</sup>。基于此,国内外学者分别从现场及模型试验、理论模型和数值模拟等多方面进行了系统研究,并取得了丰硕的研究成果<sup>[2-15]</sup>。本文拟重点从数值模拟方面针对目前存在问题进行深入研究。

由于数值模拟具有可重复性强、经济性好等优点,因而在隧道爆破围岩累积损伤方面得到了广泛应用。杨建华等<sup>[9]</sup>将Weibull统计损伤演化模型通过二次开发嵌入到LS-DYNA软件实现了对循环爆破下隧道围岩累积损伤的模拟,发现当初始地应力为2~10MPa时,围岩累积损伤范围随地应力的增加而明显减小。蒙国往等<sup>[10]</sup>采用LS-DYNA软件的完全重启动技术研究了小净距隧道5次循环爆破开挖对围岩造成的累积损伤,发现当开挖断面与监测断面之间的距离超过9 m时,围岩损伤基本稳定。Ji等<sup>[11]</sup>采用数值方法分别研究了单次全断面爆破与多次全断面爆破对隧道围岩的累积损伤,发现后者在降低围岩累积损伤范围方面更具优势。Ji等<sup>[12]</sup>建立了Drucker-Prager准则与拉伸损伤准则相结合的爆破损伤模型,并将其嵌入LS-DYNA软件实现了对多次全断面爆破下围岩累积损伤过程的模拟,发现最大损伤出现在隧道仰拱中部。于远祥等<sup>[13]</sup>考虑隧道围岩在静载(如地应力、锚固力)和动载(如爆破荷载)共同作用下的累积损伤特性,发现围岩变形范围随爆破冲击力、周边炮孔数量及损伤变量的增大而增加。左中信等<sup>[14]</sup>依托某海底隧道爆破开挖工程和岩石损伤-渗流模型研究了多次爆破下围岩的损伤及渗透性变化规律,发现随爆破次数的增加,围岩损伤区和增渗区不断扩展,并最终趋于稳定。Lu等<sup>[15]</sup>采用同时考虑拉伸与压剪损伤的本构模型研究了隧道开挖循环爆破对围岩的累积损伤,发现最大的累积损伤深度往往出现在隧道顶部和拱底。

然而尽管前人已采用数值模拟方法对循环爆破下隧道围岩累积损伤效应展开了较为深入的研究,但是由于实际工程中隧道每次循环掘进爆破时布设的炮孔数量均较多,尤其对于大断面隧洞采用全断面施工时更是如此。因此如果真实地逐一模拟所有炮孔的爆炸过程往往会存在着网格划分复杂、计算工作量大等问题,所以目前研究几乎均是多炮孔爆炸后产生的爆炸应力波等效为一个简单的冲击波<sup>[7,11-12,15]</sup>,虽然简化了计算过程和计算工作量,但是却无法考虑爆生气体的作用且存在误差。为此,本研究拟在前人基础上模拟能够考虑爆生气体作用的所有炮孔实际爆炸过程,弥补简化方法的不足,并同时考虑隧道初始地应力的影响,以更真实地刻画循环爆破作用下隧道围岩的爆破累积损伤特征。

## 1 数值模型的合理性验证

以Dehghan等<sup>[16]</sup>开展的室内微型岩体爆破试验为例,通过将数值模拟得到的岩体爆生裂隙空间分布形态、裂纹扩展特征与室内爆破试验结果进行对比分析,以验证所采用的材料本构模型、材料参数、边界条件及求解设置在模拟爆破荷载作用下岩体损伤行为的可行性与适用性。

### 1.1 试验概况与数值模型构建

Dehghan 微型岩体爆破试验模型如图 1<sup>[16]</sup>。试验采用外径为 144mm、高度为 150mm 的圆柱形花岗岩试件作为研究对象，在试件轴向中心位置钻一个直径为 6.45mm 的炮孔。炸药 PETN，药卷直径 1.65mm，外部包裹 1.4mm 厚的聚乙烯护套，并在其外侧紧贴炮孔内壁嵌入一层厚度为 0.6mm 的铜管。



图 1 Dehghan 微型岩体爆破模型试验

Fig.1 The micro-scale rockmass blasting model test of Dehghan

基于上述试验概况，构建二维数值模型对其爆破试验结果进行模拟。数值模型在几何尺寸、结构布置及材料参数上与试验模型保持一致，以确保模拟结果能够真实反映实验条件下的岩体损伤特征。

整个数值模型由岩石、铜管、空气、聚乙烯及炸药等 5 种材料组成，材料属性均与实验所用材料一致，且采用 SOLID164 单元进行网格划分，模型单元数量共计约 3.6 万个。岩石区域采用规则六面体单元进行离散，单元平均尺寸控制为 1.5mm×1.5mm×1.5mm；铜管、空气、聚乙烯及炸药等其余组成部分则采用映射网格划分方式，以兼顾计算精度与计算效率。有限元网格划分结果如图 2，其中  $W$  为外径。

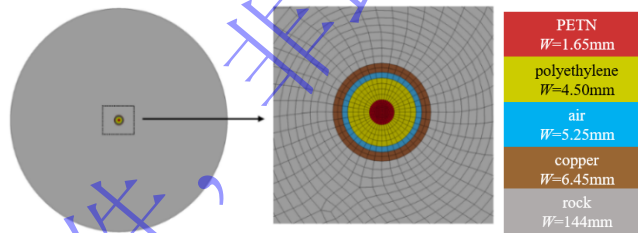


图 2 有限元网格划分示意图

Fig.2 The schematic diagram of finite element meshing

边界条件设置：根据实际情况，将模型前后为对称边界，模型四周设置为自由边界，模拟爆破应力波在试件边界处发生的物理反射。

求解算法设置：为解决爆炸数值模拟过程中炸药起爆及爆轰产物高速膨胀所引起的网格严重畸变问题，采用 ALE 多物质算法进行多介质耦合计算，即岩体及铜管部分采用拉格朗日算法，空气、聚乙烯及炸药部分采用欧拉算法，从而实现爆破载荷与固体介质之间的耦合，有效控制网格畸变。

### 1.2 材料本构模型与参数

为合理描述爆炸作用下岩体动力响应与损伤演化过程，岩石材料采用 RHT 本构模型，以综合考虑高应变率效应、压力相关强度特性以及损伤累积与软化行为，该模型适用于描述爆炸与冲击作用下岩体的非线性力学响应，是目前爆破数值模拟中应用较为广泛的本构模型之一<sup>[17-18]</sup>。针对本试验采用的花岗岩，其物理力学参数与 RHT 本构方程参数取值如表 1。

表 1 岩石 RHT 模型参数

Tab.1 The parameters of the rock RHT model

参数名称	取值	参数名称	取值	参数名称	取值
初始密度 $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	2660	剪切模量 $G/GPa$	17	残余强度参数 $B$	0.01
单轴抗压强度 $f_c/MPa$	135	剪切模量折减系数 $\xi$	0.5	残余强度指数 $N$	0.85
拉压强度比 $f_t^*$	0.05	剪切强度比 $f_s^*$	0.07	压缩屈服面参数 $g_c^*$	0.85
拉压子午比参数 $\rho_0$	0.72	Hugoniot 系数 $A_1$	43.87	拉伸屈服面参数 $g_t^*$	0.4
失效面参数 $A$	2.5	Hugoniot 系数 $A_2$	49.40	损伤参数 $D_1$	0.025
Hugoniot 系数 $A_3$	11.62	最小损伤残余应变 $\epsilon_p^m$	0.01	损伤参数 $D_2$	1.0
压缩应变率增强指数 $\beta_c$	0.025	拉伸应变率增强指数 $\beta_t$	0.045	参考压缩应变率/ $s^{-1}$	3e-5
参考拉伸应变率/ $s^{-1}$	3e-6	压缩应变率/ $s^{-1}$	3e25	拉伸应变率/ $s^{-1}$	3e25

炸药采用\*`MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN` 材料模型和 `JWL` 状态方程对爆轰过程及爆轰产物的压力—体积关系进行描述<sup>[19]</sup>, 即:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中:  $p$  为爆轰产物压力,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 和 $\omega$ 为常数,  $E$ 和 $V$ 分别为爆轰产物的初始内能密度和相对体积, 材料参数选自文献<sup>[16]</sup>, 即密度为  $1320kg/m^3$ 、爆速  $6690m/s$ 、 $A=586GPa$ 、 $B=21.6GPa$ 、 $R_1=5.8$ 、 $R_2=1.77$ 、 $\omega=0.282$ 、 $E=7.38e6GPa$ 。

孔内空气采用\*`MAT_NULL` 材料模型, 结合 `LINEAR_POLYNOMIAL` 状态方程, 其材料参数为: 密度为  $1.29 kg/m^3$ 、 $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=0$ 、 $E=250000J/m^3$ ; 聚乙烯护套同样采用\*`MAT_NULL` 材料模型, 结合 `Grüneisen` 状态方程, 其材料参数为: 密度为  $915 kg/m^3$ 、 $C=0.394$ 、 $S_1=1.489$ 、 $S_2=S_3=0$ 、 $a=0.47$ 、 $e_0=0$ 。铜管材料采用\*`MAT_JOHNSON_COOK` 本构模型, 材料参数如表 2。

表 2 铜材料参数

Tab.2 The material parameters of the copper

参数名称	取值	参数名称	取值	参数名称	取值
密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	8330	抗压强度/MPa	167.8	拉伸应变率相关指数	0.036
杨氏模量 $G/GPa$	17	相对抗剪强度	0.18	压缩屈服面参数	0.53
侵蚀塑形应变	2.0	相对抗拉强度	0.10	压缩屈服面参数	0.70
多项式参数 $EOSB_0$	1.22	参考压缩应变率	3e-5	损伤参数 $D_1$	0.04
多项式参数 $EOSB_1$	1.22	参考拉伸应变率	3e-6	损伤参数 $D_2$	1.0
多项式参数 $EOS T_1/GPa$	25.7	断裂压缩应变率	3e25	Hugoniot 系数 $A_1$	35.27
失效面参数 $A$	1.60	断裂拉伸应变率	3e25	Hugoniot 系数 $A_2$	39.58
失效面参数 $N$	0.61	压缩应变率相关指数	0.032	Hugoniot 系数 $A_3$	9.04

### 1.3 数值模拟结果与试验结果对比

基于前述材料模型及参数设置, 对 `Dehghan` 室内微型岩石爆生裂隙试验进行了数值模拟, 以验证数值模型及材料参数的合理性。炸药爆炸后, 将在装药中心附近形成由破坏程度不同的损伤区, 包括压碎区 ( $D=1$ )、裂隙区 ( $0 < D < 1$ ) 以及弹性震动区 ( $D=0$ )。数值模拟结果与实验结果的对比如图 3, 其中 (a) ~ (c) 为爆破损伤扩展过程, (c) 为爆破过程结束后的完整岩体损伤图, (e) 为 `Dehghan` 室内微型岩石爆生裂隙电镜扫描图。

爆破初期, 炮孔周围岩体受高压爆轰产物作用, 应力迅速达到岩石抗压强度, 形成压碎区, 表现为宏观破裂和微观裂纹密集分布, 如图 3(a)。随着爆轰波的传播, 其能量逐渐衰减并转化为应力波。

由于岩石的抗拉强度远低于抗压强度，应力波对压碎区的岩体造成拉伸损伤，导致径向裂缝萌生和扩展，形成放射状裂隙区。该阶段的损伤主要表现为岩石微裂纹网络的形成，实验观察高度一致，如图3(b)。

当应力波传播至岩体边缘自由表面时发生反射。反射波与入射波相叠加，使边缘岩体产生剥落裂纹，并进一步加大拉裂纹的扩展范围，如图3(c)。数值模拟中压碎区、裂隙区范围和形态与实验结果基本吻合，但边缘剥落区损伤略高于实验，可能因模型未设置外部空气域，导致自由面反射效应强于实际情况。

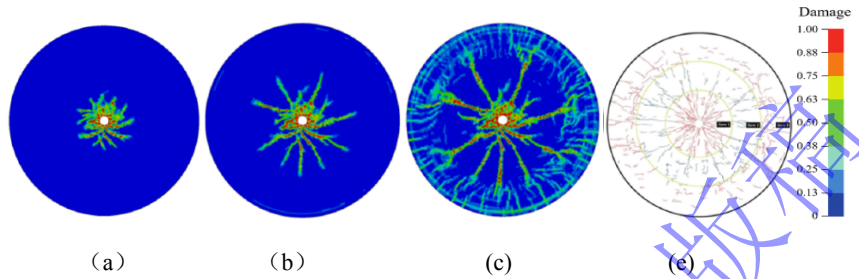


图3 损伤计算结果及与试验结果对比

Fig.3 Comparison of the damage between the calculation results and test ones

总之，数值模拟与实验结果在主要损伤特征、裂纹形态及压碎区范围等方面基本一致，说明所采用的材料本构模型及参数、边界条件、网格划分及ALE耦合算法等是合理，这为后续大断面隧道循环爆破的数值模拟研究提供了可靠的依据。

## 2 考虑初始地应力的隧道开挖循环爆破数值模型

### 2.1 隧道开挖循环爆破数值模型的建立与网格划分

为系统探究初始地应力条件下隧道循环爆破围岩累积损伤演化规律，以图4所示的圆形隧道为例进行研究，隧道直径6.5m，循环进尺3m，钻爆法开挖。采用LS-DYNA软件构建三维隧道开挖循环爆破数值模型。单元类型为SOILD164，根据模型对称性，采用二分之一建模，模型为10m×12m×11.5m的长方体，待开挖岩体范围为围岩。垂直与平行纸面方向分别为X和Y轴，竖直方向为Z轴。

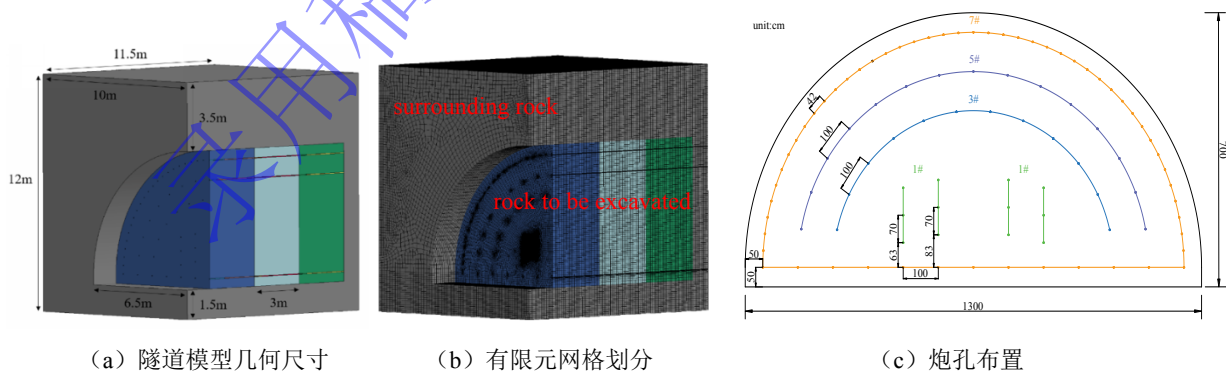


图4 隧道开挖循环爆破数值模型

Fig.4 The numerical model for the tunnel excavation cyclic blasting

在该模型计算中共涉及到岩石、炸药与堵塞等3种材料，岩石和炸药的本构模型和材料参数分别如1.4节所述，堵塞材料采用MAT\_SOIL\_AND\_FOAM本构模型，计算参数为：密度1800kg/m<sup>3</sup>、剪切模量640MPa、体积模量1387MPa、 $A_0=3.4e-8MPa$ 、 $A_1=0.0703MPa$ 、 $A_2=30000MPa$ 、 $p_c=-$

0.0069MPa。

模型中将已开挖区与待开挖区进行区分处理。前方 2.5 m 岩体定义为已开挖区，用以模拟实际施工中已形成的自由面；其后方设置总长为 9 m 的预开挖区，用于后续循环爆破模拟。整个计算域共划分为 3 个连续爆破循环，以自由面为起点，向后依次为第一、二、三次循环开挖岩体。

模型开挖岩体、炸药与堵塞采用映射网格划分，围岩采用自由网格划分，以保证爆破损伤区单元规则、均匀，并在爆源附近适当加密网格，以提高爆破应力波的传播和损伤累积的计算精度。模型共划分 2948570 个单元和 2508904 个节点。

模型采用 ALE 算法进行多介质耦合计算，即岩体采用拉格朗日算法，空气、堵塞材料及炸药部分采用欧拉算法。

## 2.2 爆破孔网布设与边界条件

隧道爆破参数设置参考娄乾星等<sup>[20]</sup>大断面隧道孔网布置方法。炮孔排列如图 4 (c)，采用周边孔、辅助孔和掏槽孔的组合方式，共布置 88 个炮孔，采用微差爆破+光面爆破形式，炮孔参数如表 3。为保证爆炸应力波传播精度，网格划分较细，进而导致稳定时间步长量级很小。若严格采用现场毫秒级微差起爆参数，计算将因耗时过长、存储需求过高而无法实现。因此，为兼顾计算效率与精度，对时间参数进行等比简化，将量纲由毫秒 (ms) 统一调整为微秒 ( $\mu\text{s}$ )，相邻炮孔起爆间隔设为 200 $\mu\text{s}$ ，并将所有炮孔的起爆点统一设置于装药段顶部。

表 3 炮孔参数

Tab.3 The parameters of the blast holes

雷管段别	炮孔类型	孔数	起爆时间	炮孔间距	装药长度	堵塞长度	炮孔直径
1#	掏槽孔	12	0ms	70cm	2.5m	0.5m	40mm
3#	辅助孔	14	200ms	100cm	2.5m	0.5m	
5#	辅助孔	17	400ms	100cm	2.5m	0.5m	
7#	周边孔	45	600ms	42cm	2m	1m	

边界条件设置：预开挖岩体掌子面以及已开挖岩体临空面施加自由边界条件，模型对称面利用 \*CONSTRAINED\_GLOBAL 关键字在坐标原点(X=0, Y=0, Z=0)处设置 X 方向的位移约束以及 Y、Z 方向的旋转约束，以施加对称边界条件来减少计算工作量。其余边界均设置为无反射边界，以消除应力波在截断边界处的反射影响。

## 2.3 初始地应力施加与重启动设置

隧道初始地应力施加通过 dynain 文件实现，其核心思路是：先对初始岩体模型进行静力平衡计算，将获得的初始应力场信息写入 dynain 文件，然后在完整的爆破模型中调用该文件，从而实现初始地应力的准确施加。

对隧道开挖过程中的岩体循环爆破数值模拟采用 LS-DYNA 完全重启动技术实现。该方法能够在保留前一计算阶段应力场、速度场、位移场及损伤变量等历史信息的基础上，连续引入后续爆破荷载，从而真实反映多循环爆破下岩体损伤的继承与累积特征。

## 3 隧道开挖循环爆破围岩累积损伤分析

通过前述方法完成考虑初始地应力的隧道开挖循环爆破数值模型的构建。为了进行对比分析，首先进行一次无地应力下的循环爆破模拟，并验证微差爆破模拟效果，以更加直观地分析多次循环爆破造成的岩体累积损伤演化过程。

需说明的是，隧道钻爆法开挖中的围岩损伤是由爆破作用和开挖卸荷共同造成的，本研究采用

SOLID164 实体单元来模拟被开挖岩体，当岩体破碎失效时，其承担的应力瞬间消失，相邻岩体应力场随之发生变化，LS-DYNA 程序自动计算卸荷损伤。因此，该方法同时考虑了上述两种作用对围岩的累积损伤，符合实际工程情况。

### 3.1 隧道开挖微差爆破计算结果验证

本研究对各起爆段的时间进行了微差设置，以保证爆破效果。第一循环爆破从  $0\mu s$  开始，掏槽孔首先起爆。在随后的  $200\mu s$  内，掏槽孔继续起爆，同时第一排辅助孔开始起爆。掏槽孔和辅助孔依次起爆，可使爆破能量均匀释放，并为后续爆破提供临空面，从而保证良好的破岩效果。当时间达到  $400\mu s$  时，第二排辅助孔开始起爆，进一步增强了爆破作用，并使爆破能量向周围岩体扩散。当时间达到  $600\mu s$  时，周边孔和底孔起爆，如图 5，其主要作用是保证断面轮廓整齐，并减少对围岩的扰动，对围岩的破坏也主要集中在这一阶段。

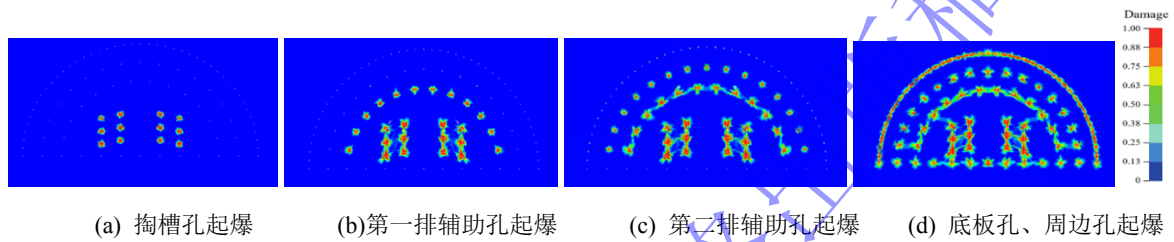


图 5 隧道开挖炮孔微差起爆顺序示意图

Fig.5 The schematic diagram of the micro-differential blasting sequence for tunnel excavation blast holes

### 3.2 岩体累积损伤分析

#### (1) 前序爆破对后序爆破损伤影响

微差爆破损伤计算结果表明所采用的起爆时序设置是合理的，能够达到预期爆破效果。依据上述计算流程开展了后续的爆破数值模拟，并获得第二、三次循环爆破下岩体的爆破损伤云图，如图 6，借鉴相关文献<sup>[11-12]</sup>，采用  $D=0.4$  为破坏阈值，即认为  $D \geq 0.4$  时岩体失去承载能力，为实际开挖轮廓。

第一循环爆破不仅直接破碎了当次循环开挖范围内的岩体及其周围岩体，同时产生的高幅值应力波会在岩体中向前传播。这些应力波会对尚未开挖的第二循环掌子面产生明显的力学扰动，并引发局部岩体损伤，进而扩大第二循环爆破的围岩损伤范围。同样，第二循环爆破产生的应力波和应力重分布效应，亦将对第三循环掌子面产生类似影响。由此可见，隧道循环爆破过程中，各循环之间并非互不影响，而是通过应力波的传播形成损伤累积。这种损伤累积不仅影响后续循环岩体的力学响应，也对隧道整体开挖稳定性产生重要作用。

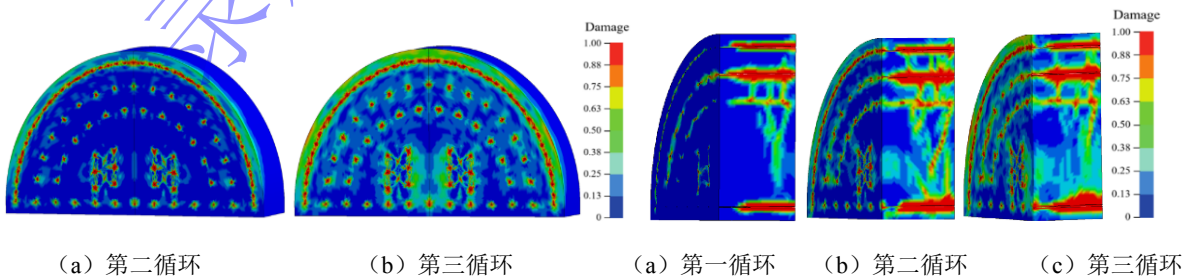


图 6 第二、三循环掌子面岩体损伤图

Fig.6 Damage of the working face rockmass at the second and third cycle

图 7 循环开挖岩体累积损伤

Fig.7 Cumulative damage of the rock mass in cyclic excavation

从力学机理来看, 循环爆破下岩体内部损伤呈现出显著的累积特征, 其演化过程主要表现为原生缺陷与微裂纹的逐步萌生、扩展及相互连通。前一循环爆破所激发的应力波在岩体传播过程中, 一方面会在已开挖区域及其邻近岩体中形成一定范围的破碎区和损伤区, 另一方面还会在尚处于完整状态的未开挖岩体中诱发次生裂纹, 形成不同程度的预损伤区, 即后续循环的潜在破坏源区。

这种预损伤效应使得后续循环中岩体的力学性能发生劣化, 具体表现为岩体动态抗拉强度、抗剪强度及弹性模量降低, 同时裂纹扩展所需的临界应力水平显著下降。在随后的爆破作用下, 既有裂纹更易发生不稳定扩展, 并与新生裂纹相互贯通, 从而加速岩体整体破坏过程, 导致损伤程度进一步加剧, 其累积特征如图7所示。

由上述分析可知, 上一循环爆破会对下一循环掌子面产生一定的预损伤作用, 在此基础上, 各循环之间的影响会逐渐叠加, 围岩损伤范围也不再局限于单次爆破, 而是随着循环次数的增加呈现明显的累积效应, 具体分析如下: ①第一循环爆破后, 围岩损伤主要集中于开挖轮廓附近, 整体呈现出以炮孔为中心向外衰减的分布特征, 如图8(a)所示。损伤区沿隧道轮廓线连续分布, 在拱顶及拱腰处较为明显, 拱脚处较弱, 而围岩深部区域损伤程度较低, 处于弹性响应阶段。炮孔周围形成明显的压碎区, 损伤变量  $D \approx 1$ , 表明岩体在爆破冲击作用下发生了严重破坏。压碎区外侧为裂隙区, 其损伤值  $D \in (0, 1)$ , 裂纹以径向扩展为主, 并沿隧道轮廓方向逐渐连通。裂隙区范围整体较为有限, 尚未向围岩深部大规模扩展。②在第二循环爆破作用下, 围岩损伤在第一循环的基础上进一步发展, 其空间分布特征如图8(b)所示。与第一循环相比, 损伤高值区范围明显扩大, 沿隧道轮廓形成更为连续的损伤带, 且整体向围岩深部推进。第一循环形成的岩体预损伤在第二循环中作为薄弱区域继续承受爆破作用, 使爆破应力波传播范围扩大, 导致损伤程度与损伤范围大于第一循环。原有裂隙区内裂纹数量明显增加, 裂纹连通使裂隙区整体向外扩展。同时可以发现, 裂隙区不再仅局限于轮廓附近, 而是逐步向围岩深部发展, 尤其在拱腰及拱顶处。③第三循环爆破后, 围岩损伤范围进一步扩大, 如图8(c)所示。整体来看, 损伤仍主要集中于隧道轮廓附近, 但裂隙区向围岩深部的扩展趋势趋于缓和, 损伤空间分布逐渐稳定。总之, 从损伤累积特征来看, 第三循环中压碎区范围变化不大, 主要表现为裂隙区的进一步扩展与连通, 相较于第二循环, 新增损伤区域的面积明显减小, 损伤增长幅度呈现递减趋势。损伤云图显示, 围岩深部区域损伤程度变化较小, 裂隙扩展主要受限于前期形成的损伤区附近。这表明在循环爆破作用下, 围岩损伤并非无限扩展, 而是集中于一定空间范围内。综上分析, 在循环爆破的持续作用下, 岩体损伤呈现出明显的累积效应, 这一过程反映了围岩在循环爆破下的累积损伤机制。

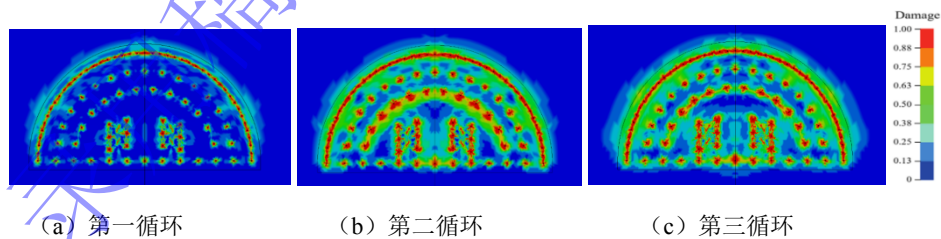


图8 不同爆破循环次数下的掌子面损伤云图

Fig.8 Damage contour of the working face under different blasting cycles

### (2) 后序爆破对前序爆破损伤影响

前文重点分析了前序爆破对后序爆破的损伤累积效应。同理, 后序爆破也会対前序循环已形成的围岩损伤产生再扰动作用。为探究这一影响, 在第一循环掌子面断面处设置4个损伤监测点

(P1~P4), 如图9, 各测点损伤随爆破循环次数的变化情况如图10。可以看出4个测点的损伤均随循环次数增加而增长, 这表明后序爆破对前序爆破已形成的围岩损伤存在一定的累积效应。进一步分析增幅可知, 该累积效应随爆破循环推进而逐渐衰减: 第一至第二循环, 测点1~4的损伤增量分别为0.044、0.046、0.052、0.045; 而第二至第三循环, 各测点增量显著降至

0.013、0.017、0.015、0.014，降幅明显，这说明后序爆破对前序损伤的再扰动作用在三次循环后已影响甚微。

这也证明了本研究选取三次循环爆破作为计算条件是合理性的，既足以揭示各循环之间的累积效应及其衰减现象，完整反映了围岩累积损伤的主要演化过程，又兼顾了计算效率与模型规模。

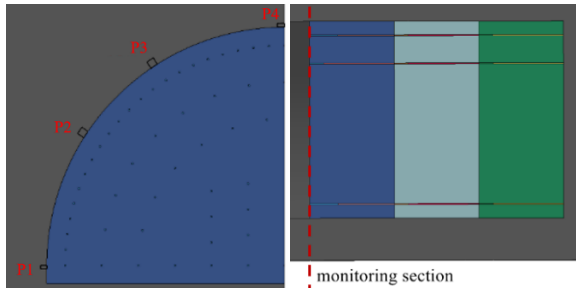


图9 监测点布置图

Fig.9 Layout of the monitoring points

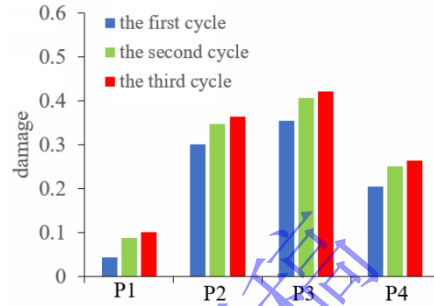


图10 监测点的累积损伤图

Fig.10 Cumulative damage of the monitoring points

## 4 不同初始地应力下隧道开挖循环爆破围岩累积损伤模拟

### 4.1 模拟计算工况

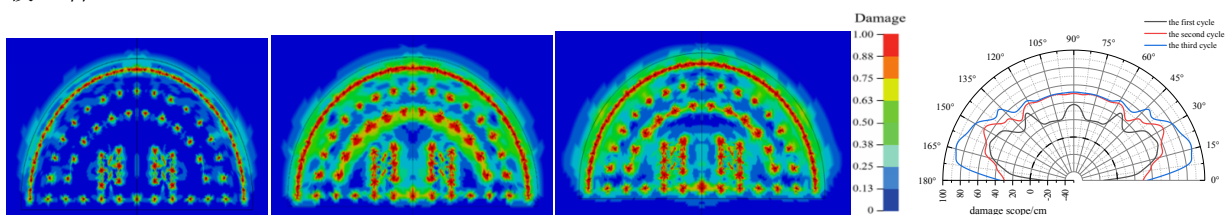
本研究仅考虑各向等压的情况，即 X、Y、Z 方向上的地应力均相等，分别取初始地应力为 0、10、和 20MPa，以研究 3 种工况下爆破作用对围岩累积损伤的影响规律。

下面分别对各工况下隧道开挖循环爆破进行模拟，研究岩体损伤的空间分布特征及累积规律，分析断面均为各循环的掌子面，同时为直观分析掌子面上不同位置处的围岩损伤分布规律，沿隧道掌子面设计轮廓每隔 4°对围岩的损伤深度进行记录，由于模型具有对称性，可仅考虑 0°~90°范围。

### 4.2 模拟结果与分析

#### 4.2.1 无初始地应力工况

在无初始地应力条件下，三次循环爆破损伤云图及围岩累积损伤范围如图 11 所示，可以看出：  
①随着循环爆破次数的增加，围岩损伤范围呈显著扩大趋势，表现出明显的累积损伤效应。完成三次循环爆破后，各监测点的损伤范围均明显超出隧道设计轮廓线。  
②从空间分布来看，损伤主要集中于两侧拱腰处。第三循环时，拱腰 16°至 32°范围内的损伤范围达到 78.94 cm 至 91.16 cm，其中 16°方向最大为 91.16 cm；拱顶附近 84°至 90°损伤为 51.14 cm 至 51.71 cm，略小于拱腰峰值；拱脚附近 0°至 8°损伤为 34.33 cm 至 87.79cm。拱脚区域 0°损伤相对较小，但 4°至 8°损伤急剧增大，表明爆破能量在 0°附近存在较强的应力集中。  
③从损伤累积过程分析，第一循环至第二循环的损伤增量较大，16°方向由 48.95 cm 增至 57.00 cm；第二循环至第三循环的增量更为显著，8°方向由 39.72 cm 增至 87.79 cm，说明随着预损伤的积累，后续爆破对围岩的破坏效应被放大。整体上，爆破能量作用范围广，损伤非均匀分布特征突出，拱腰为损伤最严重区域，拱顶次之，拱脚相对较小但局部 4°至 8°仍较显著。



(a)第一循环爆破损伤云图 (b)第二循环爆破损伤云图 (c)第三循环爆破损伤云图 (d)围岩累积损伤范围

图 11 无初始地应力隧道围岩循环爆破累积损伤

Fig.11 Accumulation damage of the tunnel surrounding rock under cyclic blasting without initial ground stress

#### 4.2.2 10MPa初始地应力工况

当初始地应力为 10 MPa 时，三次循环爆破损伤云图及围岩累积损伤范围如图 12 所示，可以看出：①初始地应力对爆破损伤具有明显抑制作用，围岩损伤范围较无地应力工况显著收敛。第一循环爆破后，大部分监测点损伤范围为负值，即损伤位于设计轮廓线以内，仅 16°至 28°及 56°至 64°区域出现小范围正值，损伤超出轮廓线最大达 14.92 cm。这表明中等地应力削弱了爆破能量向围岩深部的传播。②进入第二循环后，损伤范围整体向外扩展。拱脚区域 0°至 4°仍为负值，范围为-21.24 cm 至-19.19 cm，但 8°至 12°拱脚至拱腰过渡区由负转正，损伤超出轮廓线 6.99 cm 至 7.53 cm；拱腰区域 16°至 36°损伤范围显著增大，由第一循环的 11.0 cm 增至 7.89 cm 至 27.28 cm，其中 24°至 28°方向损伤达到 26.93 cm 至 27.28 cm；拱顶附近损伤超出轮廓线扩大至 7 cm 左右。③第三循环爆破后，累积损伤进一步加剧。拱脚区域 0°至 4°负值减小至-14.44 cm 至-4.89 cm，8°至 12°损伤超出增至 9.60 cm 至 14.35 cm；拱腰 16°至 36°损伤超出大幅增加至 30.00 cm 至 33.41 cm，其中 28°方向最大，达 33.41 cm；拱顶区域损伤超出为 12.70 cm 至 26.01 cm，其中 76°方向达 26.01 cm。④从空间分布看，损伤超出轮廓线的区域主要集中于拱腰和拱顶，而拱脚中心区域 0°至 4°始终为负值，呈现拱脚约束、两帮及顶部释放的损伤分布特征。从累积效应看，各循环间损伤范围的增量小于无地应力工况，表明 10 MPa 地应力在一定程度上减缓了累积损伤的发展速度。

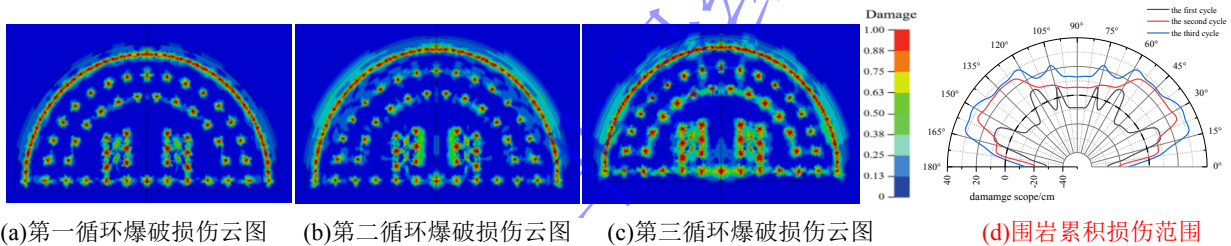


图 12 地应力为 10MPa 时的隧道围岩循环爆破累积损伤

Fig.12 Accumulation damage of the tunnel surrounding rock under cyclic blasting with the initial ground stress 10MPa

#### 4.2.3 20MPa初始地应力工况

当初始地应力为 20 MPa 时，三次循环爆破损伤云图及围岩累积损伤范围如图 13 所示，可以看出：①地应力对爆破损伤的抑制作用进一步增强。第一循环爆破后，所有监测点的损伤范围均为负值，即损伤完全位于设计轮廓线以内，最大轮廓线内深度达-24.10 cm 至-35.52 cm，围岩损伤被限制在轮廓线内侧。②进入第二循环后，损伤范围开始向外扩展。拱脚中心区域 0°至 8°损伤仍位于轮廓线以内，范围为-22.03 cm 至-8.62 cm；拱腰及两侧区域 12°至 76°逐渐转为正值，损伤范围超出轮廓线 7.41 cm 至 16.62 cm，其中 52°方向超出最大，达 16.62 cm；拱顶附近 80°至 90°仍为负值，损伤未超出轮廓线，范围-11.35 cm 至-8.71 cm。③第三循环爆破后，累积损伤进一步扩大。拱脚中心 0°至 4°损伤仍为负值，范围-11.30 cm 至-7.27 cm，但 8°已转为正值，损伤超出轮廓线 12.47 cm；拱腰区域 12°至 76°损伤超出范围增至 10.40 cm 至 25.68 cm，其中 28°方向超出最大，达 25.68 cm；拱顶区域 80°至 90°全部转为正值，损伤超出轮廓线 11.61 cm 至 13.94 cm。④与 10 MPa 工况相比，20 MPa 下第三循环拱腰最大损伤超出范围 25.68 cm 明显小于 10 MPa 下的 33.41 cm，且拱脚中心区域始终未出现损伤超出轮廓线的情况，说明高地应力对损伤累积的抑制作用更为显著。⑤从空间分布看，损伤超出轮廓线的区域仍以拱腰为主，但整体范围较 10 MPa 工况明显收缩；从累积效应看，各循环间损伤范围的增量小于 10 MPa 工况，累积损伤发展速度进一步减缓。

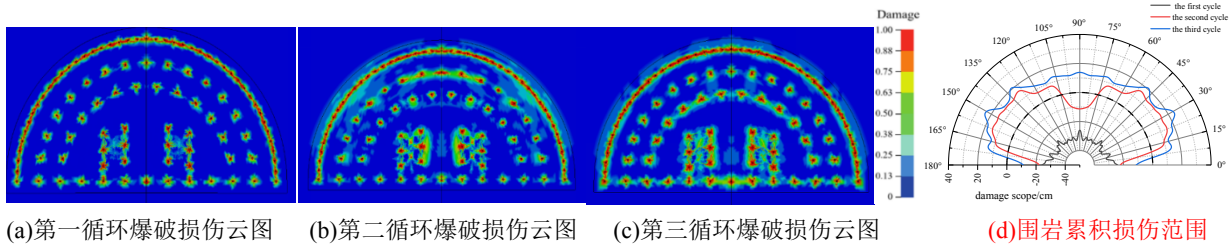


图 13 地应力为 20MPa 时的隧道围岩循环爆破累积损伤

Fig.13 Accumulation damage of the tunnel surrounding rock under cyclic blasting with the initial ground stress 20MPa

#### 4.2.4 围岩累积损伤分析

由图 11~13 可以看出, 在不同初始地应力水平下, 随着爆破循环次数增加, 隧道围岩损伤范围呈逐步扩大趋势, 损伤轮廓整体向外推移, 呈现明显的累积损伤效应。第一循环爆破的损伤主要集中在炮孔周围的压碎区和邻近裂隙区, 裂纹尚未充分扩展。进入第二循环后, 原有裂隙和微损伤区为裂纹扩展提供了弱化路径, 损伤范围明显扩大, 裂纹网络逐渐贯通, 部分位置出现超出轮廓范围的破坏。第三循环后, 累积损伤进一步加剧, 损伤线在大部分角度均向外扩展, 岩体总体上劣化程度加深, 裂纹扩展范围增大, 围岩稳定性下降。

损伤扩展速率呈递减趋势。因为随着损伤区域扩大, 爆破应力波在岩体中的传播距离增加, 部分能量被先前损伤区吸收或耗散, 使后续循环对未破坏岩体的作用减弱, 最终将损伤限制在一定范围内。

下面以图 14 为例说明不同初始地应力水平及循环次数对隧道围岩全断面平均累积损伤范围的影响: ①从爆破循环次数对隧道围岩的累积损伤来看, 以初始地应力为 0MPa 时为例, 随着爆破循环次数的增加, 围岩平均损伤范围由第一次爆破循环的 33.61cm 逐渐增加到 50.38cm 和 64.05cm, 增加幅度分别为 37.6%和 27.1%, 即增加幅度逐渐降低; ②从初始地应力大小对隧道围岩的累积损伤来看, 以第三次循环爆破为例, 随着初始地应力的增加, 围岩平均损伤范围由初始地应力 0MP 时的 64.05cm 逐渐降低到 20.99cm 和 13.34cm, 降低幅度分别为 67.2%和 36.4%, 即降低幅度总体上呈逐渐减缓的趋势。③从围岩累积损伤范围的正负值来看, 当初始地应力为 0 MPa 时, 围岩损伤范围为正值, 而当初始地应力为 10MPa 和 20MPa 时, 围岩损伤范围则为负值, 且随着初始地应力的增加, 围岩损伤范围的负值绝对值越来越大, 这说明围岩出现了欠挖现象, 因此需通过优化爆破参数加以调控。总之, 可以看出循环爆破次数和初始地应力水平对隧道围岩累积损伤均有较大影响, 应予以充分重视。

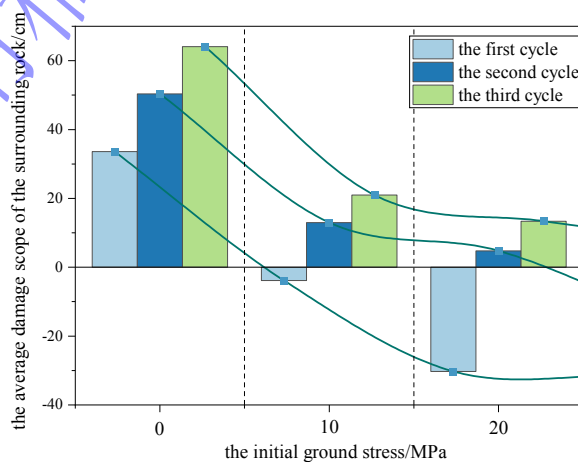


图 14 隧道围岩全断面平均累积损伤范围

Fig.14 The average cumulative damage scope of the whole section of the tunnel surrounding rock

## 5 结论

(1) 基于 Bandaki 微型爆破试验, 发现数值模拟结果与室内试验结果在压碎区、裂隙区及裂纹扩展形态等方面具有较好的一致性, 验证了该数值模型所采用的 RHT 本构模型、ALE 耦合算法及材料参数的合理性, 可用于模拟爆破作用下的岩体动力响应。

(2) 针对目前常采用的多炮孔爆破荷载简化方法的不足, 采用 LS-DYNA 软件真实模拟了三维隧道 88 个炮孔的真实爆破过程, 实现多炮孔显式建模及爆生气体作用的模拟, 弥补了目前简化方法的不足; 同时采用完全重启动技术和初始地应力施加方法很好地模拟了循环爆破与初始地应力耦合作用下隧道围岩的累积损伤机理。

(3) 基于所建立的数值计算模型, 揭示了各向等压初始地应力条件下隧道开挖循环爆破作用下岩体初期累积损伤的演化机制: ①无地应力条件下的三次循环爆破模拟表明, 前一循环爆破产生的应力波对后续循环掌子面形成预损伤, 导致岩体力学性能劣化; 随着爆破循环次数增加, 损伤范围逐步扩大, 爆生裂纹逐渐贯通, 表现出显著的累积损伤效应, 损伤扩展速率呈递减趋势。②对初始地应力分别为 0MPa、10MPa 和 20MPa 等 3 种工况的计算结果表明初始地应力对围岩损伤具有显著抑制作用, 损伤范围随初始地应力增大而减小, 累积损伤效应随初始地应力水平的升高而减弱。

## 参考文献

- [1] 洪开荣, 刘永胜, 潘岳. 钻爆法山岭隧道修建技术发展展望 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61(2): 67-79. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.02.008.  
HONG K R, LIU Y S, PAN Y. Development and prospects of construction technology in drill-and-blast mountain tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(2): 67-79. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.02.008.
- [2] 中国生, 敖丽萍, 付玉华. 循环爆破开挖下隧道围岩振动效应与损伤演化的模型实验 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6): 853-860. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0853-08.  
ZHONG G S, AO L P, FU Y H. Model experimental studies of vibration effect and damage evolution of tunnel's surrounding rock under cyclic blasting excavation [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(6): 853-860. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0853-08.
- [3] 单仁亮, 黄博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 289. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0289-08.  
SHAN R L, HUANG B, GENG H H, et al. Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 289. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0289-08.
- [4] HUANG J, CHEN S H, LIU M L, et al. Physical model test and numerical simulation study of cumulative damage to deep tunnel surrounding rock under cyclic blasting load [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2023, 32(2): 161-184. DOI: 10.1177/10567895221133133.
- [5] 宋肖龙, 高文学, 季金铭, 等. 爆破振动对隧道围岩累积损伤效应的影响 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 54-62. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.24.008.  
SONG X L, GAO W X, JI J M, et al. Influence of blasting vibration on cumulative damage of surrounding rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 54-62. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.24.008.
- [6] 刘永胜, 朱思源, 杨小林, 等. 多次爆破对大跨度洞室围岩的损伤累积及松动圈范围研究 [J]. 爆破, 2022, 39(1): 9-15+35. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.002.  
LIU Y S, ZHU S Y, YANG X L, et al. Study on damage accumulation and broken rock zone range of surrounding rock of large span chamber caused by multiple blasts [J]. Blasting, 2022, 39(1): 9-15+35. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.002.

- [7] LING T L, LI S L, LIU D S, et al. Blasting damage of tunnel rock mass based on cumulative effect [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56: 1679-1695. DOI: 10.1007/s00603-022-03128-8.
- [8] RAMULU M, CHAKRABORTY A K, SITHARAM T G. Damage assessment of basaltic rock mass due to repeated blasting in a railway tunnelling project—a case study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(2): 208–221. DOI: 10.1016/j.tust.2008.08.002.
- [9] 杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 511-518. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.02.030.  
YANG J H, LU W B, HU Y G, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 511-518. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.02.030.
- [10] 蒙国往, 张景龙, 吴波, 等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道围岩累积损伤特性研究 [J]. *爆破*, 2021, 38(4): 52-60. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.008.  
MENG G W, ZHANG J L, WU B, et al. Research on cumulative damage characteristics of surrounding rock of small-clear distance tunnel under cyclic blasting load [J]. *Blasting*, 2021, 38(4): 52-60. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.008.
- [11] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 6393–6411. DOI: 10.1007/s00603-021-02630-9.
- [12] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2021, 147: 104882. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104882.
- [13] 于远祥, 沈鹏, 张永亮, 等. 动静组合荷载下隧道锚固围岩累积损伤效应与支护优化 [J]. *西安科技大学学报*, 2024, 44(6): 1095-1106. DOI: 10.13800/j.cnki.Xakjdxxb.2024.0608.  
YU Y X, SHEN P, ZHANG Y L, et al. Cumulative damage effect and support optimization of tunnel anchored surrounding rock under coupled dynamic-static loads [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024, 44(6): 1095-1106. DOI: 10.13800/j.cnki.Xakjdxxb.2024.0608.
- [14] 左中信, 蔡燕燕, 付晓强, 等. 爆破开挖作用下隧道围岩渗透性响应试验与数值模拟研究 [J]. *工程爆破*, 2025, 31(3): 21-31+38. DOI: 10.19931/j.EB.20230171.  
ZUO Z X, CAI Y Y, FU X Q, et al. Experimental and numerical simulation study on permeability response of tunnel surrounding rock under blasting excavation [J]. *Engineering Blasting*, 2025, 31(3): 21-31+38. DOI: 10.19931/j.EB.20230171.
- [15] LU Y, HE B G, LI Q, et al. Numerical investigation of the cumulative damage effects and safety criterion of deep tunnels in a layered rock mass under full-face blasting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2026, 59: 2063–2087. DOI: 10.1007/s00603-025-04943-5.
- [16] DEGHAN BANADAKI M M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40-41: 16-25. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.010.
- [17] TU Z G, LU Y. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(10): 1072–1082. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.004.
- [18] Wang Z L, Wang H C, Wang J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 135: 104172. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104172.
- [19] 郝博, 刘力维, 姜琦. 基于混合算法计算炸药JWL状态方程参数的研究 [J]. *工程爆破*, 2024, 30(2): 42-48+97. DOI: 10.19931/j.EB.20230165.  
HAO B, LIU L W, JIANG Q. Research on calculating parameters of JWL equation of state for explosive based on hybrid algorithm [J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(2): 42-48+97. DOI: 10.19931/j.EB.20230165.

[20] 娄乾星, 陶铁军, 田兴朝, 等. 大断面隧道爆破减孔布设方法研究 [J]. 工程爆破, 2022, 28(2): 54-61. DOI: 10.19931/j.EB.20210122.

LOU Q X, TAO T J, TIAN X C, et al. Research on blast hole reduction method in large-section tunnels[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2): 54-61. DOI: 10.19931/j.EB.20210122.

(责任编辑 爆炸与冲击)

录用稿件，非最终出版稿