

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.008

## 循环爆破荷载作用下小净距隧道 围岩累积损伤特性研究\*

蒙国往<sup>1</sup>,张景龙<sup>1</sup>,吴波<sup>1,2,3</sup>,徐世祥<sup>1</sup>,李华隆<sup>1</sup>,吴勇<sup>4</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013;  
3. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广州 510925; 4. 中交二公局 第一工程有限公司, 武汉 430056)

**摘要:** 明确多循环爆破推进情况下小净距隧道围岩损伤演化特征有助于施工安全和围岩稳定。依托福州地铁2号线某区段小净距隧道工程,基于LS-DYNA完全重启技术,结合现场中夹岩声波测试结果,研究循环爆破荷载作用下该区段小净距隧道5个开挖进尺内围岩的累积损伤演化过程。结果表明:围岩损伤范围和损伤程度随爆破加载次数增加而增加,每一循环爆破荷载下各段别均对围岩有不同程度损伤,MS7和MS9段爆破荷载对围岩损伤最大;实测和模拟结果表明在多次爆破后中夹岩体损伤沿测孔深度方向呈圆角的斜“L”形状,近爆破处岩体损伤较大于远爆破侧;在同一监测断面内围岩的累积损伤尤以段间爆破加载损伤程度最大,随着隧道开挖推进岩体的损伤范围逐渐趋于稳定,监测断面9 m范围外的爆破扰动基本不再对监测部位围岩造成损伤。研究成果可为现场围岩的加固提供参考,也可为类似工程的提供理论依据。

**关键词:** 循环爆破;小净距隧道;中夹岩;累积损伤;数值模拟

**中图分类号:** U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0052-09

## Research on Cumulative Damage Characteristics of Surrounding Rock of Small-clear Distance Tunnel under Cyclic Blasting Load

MENG Guo-wang<sup>1</sup>, ZHANG Jing-long<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1,2,3</sup>, XU Shi-xiang<sup>1</sup>, LI Hua-long<sup>1</sup>, WU Yong<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology,

Nanchang 330013, China; 3. School of Architectural Engineering, Guangzhou City

Construction College, Guangzhou 510925, China;

4. CCCC-SHEC First Highway Engineering Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** In order to understand the surrounding rock damage evolution characteristics of small clear-distance tunnels in the case of multi-cycle advancing blasting contribute to construction safety and surrounding rock stability. Taking the small-distance tunnel project of a certain section of Fuzhou Line 2, based on the LS-DYNA full restart technology, combined with the shared rock of acoustic wave test results. The cumulative damage evolution process of surrounding rock within five excavation footage of small spacing tunnel in this section under cyclic blasting load was studied. The results show that the damage range and damage degree of surrounding rock increases with the increase of blasting loading times. Each segment has different degrees of damage to the surrounding rock under each cyclic blasting load. The blasting loads of MS7 and MS9 have the greatest damage to surrounding rock. The actual measurement and simulation results show that after multiple blasting, the damage of the middle rock mass is a rounded "L" shape along the depth of the borehole, and the damage of the rock mass near the blasting area is greater than that on the far blasting side. In the same monitoring section, the cumulative damage of surrounding rock is the largest, especially the damage caused by inter-section blasting loading. With the tunnel excavation, the damage range of the surrounding

rock gradually stabilized, and the blasting outside the 9 m range of the monitoring section basically no longer could damage to the surrounding rock at the monitoring location. The research results can provide reference for the reinforcement of surrounding rock on site, and also provide theoretical basis for similar projects.

**Key words:** cyclic blasting; small clear-distance tunnel; share rock; cumulative damage; numerical simulation

近年来,小净距隧道以其防渗性能好、造价相对较低、施工工艺简单、线型规划受限较小等优点,在许多的隧道工程中被广泛采用<sup>[1]</sup>。而在小净距隧道循环爆破推进过程中,爆炸产生的少部分能量用于岩石破碎形成隧道,其他大部分能量以波形式传递给围岩,使保留岩体裂纹开展或产生新的裂纹,进而使得岩体力学强度降低,频繁的爆破扰动会造成小净距隧道结构的破坏失稳问题<sup>[2,3]</sup>。

在岩体爆破损伤方面的研究,许梦飞等提出基于 H-B 准则的岩体弹塑性损伤模型<sup>[4]</sup>,并将该损失模型运用到实际工程中验证模型的适用性;黄佑鹏等采用 HJC 模型研究了三种不同的岩体爆破损伤范围及损伤分布特征<sup>[5]</sup>。胡刚等利用 LS-DYNA 软件结合 HHT 理论研究 4 次隧道掘进爆破施工情况下<sup>[6]</sup>,隧道结构的物理力学性质;钟靖涛等采用模型试验进行爆破损伤累积试验研究<sup>[7,8]</sup>,探讨多次爆破荷载作用下岩体的损伤情况及动力响应问题;Xie 等采用数值模拟研究地应力、侧压力系数不同组合条件下爆破开挖岩体的损伤演化规律<sup>[9]</sup>。宋肖龙等应用地质雷达多循环爆破荷载作用下围岩的累积损伤规律<sup>[10]</sup>,表明循环爆破会对围岩的已有损伤区进一步加剧最终演化严重损伤;曹峰等利用等效集中装药的方式研究小净距隧道在循环爆破荷载作用下中夹岩的累积损伤规律<sup>[11]</sup>。凌天龙基于小净距隧道中夹岩声波测试和振动测试结果<sup>[12]</sup>,研究任意开挖断面上中夹岩的损伤效应及其累积演化规律;章诚采用 CSCM 模型研究深埋隧道连续爆破开挖过程中围岩的损伤演化规律<sup>[13]</sup>,表明在第 2 进尺开挖后隧洞围岩损伤基本稳定,不再随后续开挖推进而明显增加。

综上所述,考虑炸药循环爆破荷载作用下小净距隧道围岩的损伤研究很少,可供借鉴的工程经验较少。现有多数研究针对隧道围岩损伤多采用现场监测、模型试验手段或者等效单孔集中装药研究方法,这对围岩的稳定性评价和加固处理是偏于危险

的。因此本论文基于 ANSYS/LS-DYNA 软件重启技术并结合福州地铁 2 号线某区段小净距隧道工程声波监测,运用现场试验和数值模拟手段研究后行隧道循环爆破推进过程中围岩损伤演化规律,以期优化爆破参数、保证中夹岩的稳定性,为类似工程设计施工提供参考。

## 1 工程概况

福州地铁 2 号线某区段小净距隧道覆土层厚度约 9.0~11.2 m,区间右线隧道正上方 8.9 m 是正在运营的福马路,右线隧道西北侧 20.5 m 为乾达婆王庙。区间隧道均为单洞单线,采用复合式衬砌,隧道采用五心圆断面结构形式,断面内净空宽 5.2 m,轨面以上高 4.6 m,其隧道横断面见图 1 所示。该区间段隧道所穿越地层多分布有中风化和微风化花岗岩,岩性主要为粗粒花岗岩,岩石属于较软的岩体,完整性等级分 II~V 类,围岩条件较好,可以进行爆破开挖。该区段隧道净距较小,同时开挖断面较小,因此隧道 IV~V 级围岩采用上下台阶法开挖,开挖隧道上台阶炮孔布置见图 2 所示。

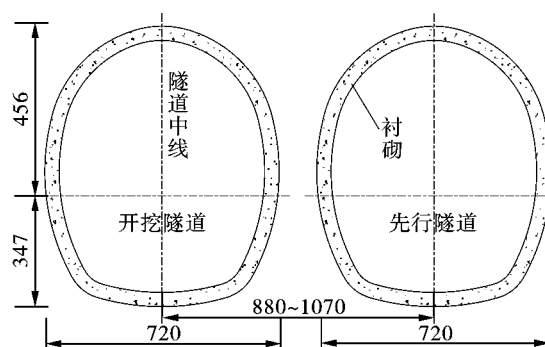


图 1 隧道横断面图(单位:cm)

Fig. 1 Cross-sectional view of the tunnel(unit:cm)

## 2 数值计算模型及参数

### 2.1 数值模型

福州地铁 2 号线该区段小净距隧道净宽为 7.2 m,上下台阶高度分别为 4.77 m、3.87 m,隧道埋深在 9.0~11.2 m 之间,模型计算中取两者中间值 10 m,左右线间距在 1.6~3.5 m 之间,本次模拟中夹岩厚度取固定宽度 2.5 m。采用 ANSYS 前处理建立三维数值计算模型,由圣维南原理知隧道开挖

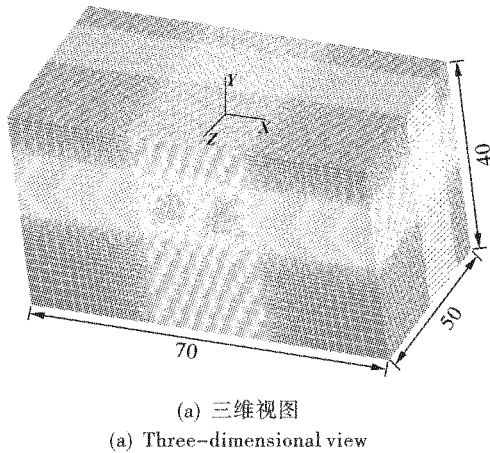
收稿日期:2021-06-23

作者简介:蒙国往(1987-),男,博士,主要从事隧道及地下工程方面的教学与科研工作,(E-mail)878223535@qq.com。

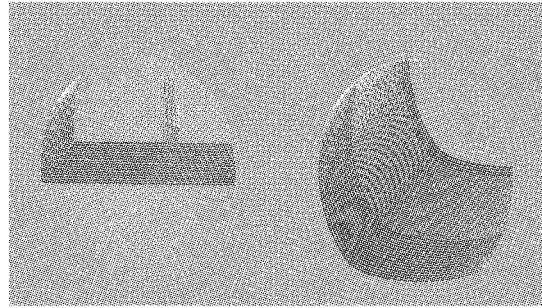
通讯作者:张景龙(1998-),男,硕士研究生,主要从事隧道及地下工程的研究,(E-mail)936191773@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678164);广西自然科学基金项目(2018GXNSFDA138009)

对周围围岩的扰动范围是3~5倍隧道洞径,因此模型边界的X方向(平行于隧道掌子面)长度取70 m, Y方向(竖直向上)高度取40 m, Z方向(隧道掘进方向)取50 m。为保证计算结果的精确性,节约计算时间,采用收敛试算的方法确定网格的划分尺寸,对隧道开挖断面及其周边区域进行网格加密处理,远离开挖断面区域采用渐变网格进行划分,最终确定最小单元尺寸为0.2 m,网格共 $1.3 \times 10^6$ 左右。模型上边界设置为自由面,其余四个侧边设为无反射边界,模型底部设为固定约束,有限元计算模型如图3所示。



(a) 三维视图  
(a) Three-dimensional view



(b) 开挖断面局部网格图  
(b) Partial grid map of excavation section

图3 有限元计算模型(单位:m)

Fig. 3 Finite element calculation model(unit:m)

## 2.2 爆破荷载

采用JWL状态方程固然可以将爆轰的过程较精确地模拟出来,对于少数炮孔起爆的情况下可以实现,但对于隧道断面开挖炮孔数量极多时,给网格的划分及后期计算都带来极大不便,严重时可能导致计算终止。许红涛等提出了一种较为简便的爆破模拟方式<sup>[14]</sup>,即建立模型时不考虑炮孔形状,将爆破时程荷载进行等效,施加在同排起爆炮孔连心线与炮孔轴线所确定的平面上。

目前,爆炸荷载峰值多采用爆轰CJ模型进行计算,装药不耦合系数较小时,炸药起爆后作用在炮孔壁上的平均爆轰压力可以用下式计算<sup>[15]</sup>

$$P_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b}\right)^{2\gamma} \left(\frac{l_e}{l_b}\right)^\gamma n \quad (1)$$

式中: $P_0$ 为炸药爆轰平均初始压力; $\rho_e$ 为炸药密度; $D$ 为炸药爆速; $\gamma$ 为等熵指数,一般取3.0; $d_c$ 为装药直径; $d_b$ 为炮孔直径; $l_e$ 为药柱总长度; $l_b$ 为炮孔装药段长度; $n$ 为压力增大系数,一般取为8~11。

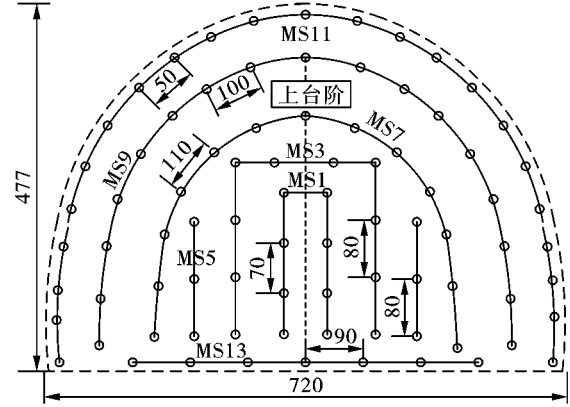


图2 上台阶炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of the upper step blast hole(unit:cm)

当装药不耦合系数较大时,爆生气体的膨胀需经过 $P \geq P_k$ 和 $P < P_k$ 两个阶段,此时炮孔壁处平均压力可由下式计算

$$P_0 = \left[ \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \right]^{\frac{v}{\gamma}} \left(\frac{d_c}{d_b}\right)^{2v} P_k^{\frac{\gamma-v}{\gamma}} \left(\frac{l_e}{l_b}\right)^\gamma n \quad (2)$$

式(2)中的 $P_k$ 为爆生气体临界压力,其中 $P_k = 200$  MPa; $v$ 为等熵指数, $v = 1.4$ ,其余参数与式(1)中意义相同,隧道爆破为2#岩石乳化炸药,密度 $\rho_e = 1100$  kg/m<sup>3</sup>,爆速 $D = 4000$  m/s。

为确定爆破荷载的大小,杨建华等从理论上推求炮孔压力随时间的变化规律和沿炮孔轴向的分布特征<sup>[16]</sup>,认为爆炸荷载持续时间是毫秒量级的。本文将采用Jong等改进后的指数型荷载时程曲线进行加载<sup>[17]</sup>,其荷载归一化压力时程曲线见图4所示。根据文献[14]中等效荷载的施加方法,将等效荷载施加在同排起爆炮孔连心线与炮孔轴线所确定的平面上,指数荷载时程函数为

$$P_w(t) = 4P_0(e^{-\beta t/\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\beta t}) \quad (3)$$

$$\beta = -\sqrt{2} \ln(1/2)/t_r \quad (4)$$

式中: $P_w(t)$ 为炮孔壁上任意时刻压力大小; $\beta$ 为压力衰减系数; $t$ 为爆破加载时间; $t_r$ 荷载峰值对应时间。

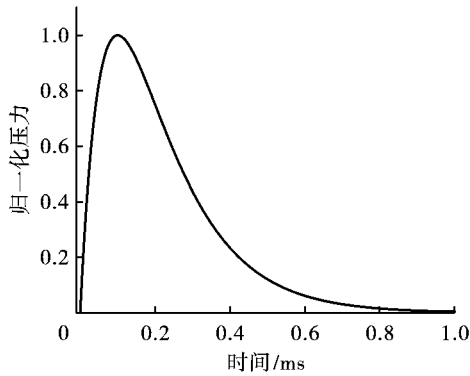


图4 爆炸荷载-压力时程曲线

Fig. 4 Explosion load-pressure time history curve

根据静力学原理,炮孔连心线面上的荷载压力为

$$P_c = \frac{d_b}{a} P_0 \quad (5)$$

式中: $a$ 为相邻两炮孔中心连线间距。

### 2.3 岩石的材料模型

岩石采用 RHT 材料模型,该模型是改进 HJC 模型的拉压损伤关系式,引入了3个极限面,用弹性极限面、失效强度面与残余强度三个极限面描述与

静水压的关系。RHT 模型的失效面强度方程描述为<sup>[18]</sup>

$$Y_{fail} = f_c Y_c(p^*) R_3(\theta) F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (6)$$

$$Y_c(p^*) = A[p^* - p_{spall}^* F_{rate}(\dot{\epsilon})]^N \quad (7)$$

式中: $f_c$ 为材料的单轴抗压强度; $R_3(\theta)$ 为罗德角因子; $F_{rate}(\dot{\epsilon})$ 为应变率强化因子; $A$ 、 $N$ 为材料参数; $p^*$ 为归一化压力; $p_{spall}^*$ 为归一化层裂强度。

RHT 材料模型弹性极限面作为材料塑性变形起始点的一个标志,其通过对剪切破坏区域的最大失效面的缩放和引入体积屈服的盖帽面得到的,材料的弹性极限应力表示为<sup>[19]</sup>

$$\sigma_{el}(p, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_{fail} F_{elastic} F_{cap} \quad (8)$$

式中: $F_{elastic}$ 为弹性缩放因子; $F_{cap}$ 为盖帽函数。

当材料的等效应力强度超出失效应力强度后,材料开始产生损伤累积,损伤变量  $D$  定义为累积等效塑性应变增量与最终失效等效塑性应变的比值

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}} \quad (9)$$

$$\epsilon_p^{failure} = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \quad (10)$$

式中: $D_1$ 、 $D_2$ 为材料的参数; $\Delta \epsilon_p$ 为等效塑性应变增量。根据文献[9]和工程实地资料,将岩体参数统计于表1。

表1 岩体参数

Table 1 Rock mass parameters

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Ga}$	$f_c/\text{MPa}$	$f_t^*$	$f_s^*$	$g_c^*$	$g_t^*$	$Q_0$	$B$	$A$	$N$	$\beta_c$	$\beta_t$	$D_1$	$D_2$	$v$
2620	25	50	0.21	0.04	0.53	0.7	0.68	0.05	2.44	0.76	0.026	0.007	0.04	1.0	0.25

## 3 隧道围岩损伤效应

### 3.1 围岩损伤时间效应

模型计算采用完全重新启动技术,将前一个开挖步的计算结果作为下一开挖步的初始条件,通过 \*STRESS\_INITIALIZATION 关键字实现初始化过程,保证计算过程中信息的连续性。根据我国《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》(DL/T5389—2007)规定,当岩体损伤达到  $D = 0.19$  时,岩体中产生明显的损伤,本次研究同样取岩体损伤阈值为  $D_r = 0.19$ 。结合该区段小净距隧道实际工程,模拟5个连续开挖进尺,见图5所示的 I ~ V 断面所示,选取某一监测断面进行围岩损伤累积的研究,并假定第一次爆破开挖前岩体的损伤  $D = 0$ 。首先研究一个开挖进尺多段爆破荷载作用下围岩的累积损伤演化历程,以图5中第 I 开挖进尺为研究对象。对于该区段小净距隧道台阶爆破,采用底端起

爆的方式破碎岩石,使得爆炸产生的能量沿孔口方向传播,形成一个开口向着自由面的爆破漏斗,岩体爆破损伤沿炮孔轴线近似成梯形分布<sup>[20]</sup>。截面 1-1 是处在自由面上的,其损伤范围较大,而孔底 2-2 截面损伤结果较小,因此通过后处理软件 LS-ProPost 中 Splane 命令截取 1-1 截面与 2-2 截面之间的中间  $a-a$  截面的岩体为分析对象,图6中给出了重复爆破荷载作用下  $a-a$  截面岩体的损伤演化历程。

图6中给出了第 I 进尺爆破后监测面岩体的损伤模拟结果云图,可以看出 MS1 和 MS3 段装药起爆后中夹岩并未产生明显损伤,在 MS5 段装药起爆后,中夹岩开始出现损伤,其损伤深度达 0.5 m。MS7 段和 MS9 段装药起爆后,岩体的损伤有一个很明显的增长过程,在后行隧道开挖轮廓线以外产生拉伸破坏。后行隧道拱顶的损伤深度可达 1.43 m,中夹岩拱腰处基本贯穿,损伤深度为 2.22 m,后行隧道左侧损伤深度较右侧深度较小,损伤深度

1.62 m,分析是先行隧道的“空孔”导向作用引起的,与文献[21]研究结论一致。周边孔 MS11 段起爆后,中夹岩损伤没有明显增长,而 MS13 段起爆后底板损伤有一个较为明显的增长,但对于中夹岩损伤扩张没有明显影响。在 MS1 ~ MS11 段装药爆破后,理想状态下上部岩体可看作被全部挖除,上表面

相当于一个自由面,因此不再限制岩体变形、扩张,对中夹岩的挤压作用等。对比图 6 中(c)和(d)可以看出,在不考虑多段爆破荷载作用下岩体的损伤时,隧道拱顶及拱腰损伤范围仅有 0.22 m,考虑多段爆破荷载作用下围岩的损伤范围和损伤程度均有明显的增长,表明围岩的累积损伤效应明显。

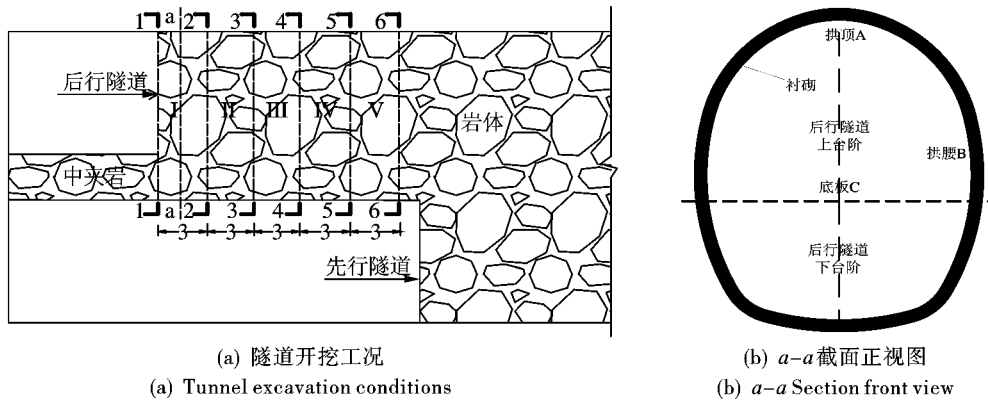


图 5 开挖掌子面推进示意图

Fig. 5 Schematic diagram of excavation face advancement

根据前述分析,累积损伤变量的变化过程可表征围岩的损伤程度,因此对隧道 3 个特征位置(拱顶 A、拱腰 B、底板 C)进行定量分析,表 2 给出了第 I 开挖进尺完成后多段爆破荷载作用下围岩的损伤范围,由于本次重点监测部位是拱腰和拱顶,因此图 7 中仅给出了 A、B 两个位置的损伤变量及损伤范围的时间变化曲线。通过图 7 的损伤变化曲线可以看出,并不是每一次爆破后都可造成拱顶、拱腰处损伤变量的改变,重复爆破加载作用下围岩的累积损伤并不是简单的损伤累积。以拱腰 B 处为例,第 1 次爆破加载(掏槽爆破)后拱腰处岩体并没有产生损伤,因此采用单段等效集中装药爆破分析拱腰处围岩的损伤状态是偏于危险的。第 2 次爆破加载完成后拱腰 B 处开始出现损伤,其损伤大小为 0.126,从第 3 次爆破至第 5 次爆破岩体的损伤有快速增加的过程,但  $\Delta D$  并不是每次都相同,呈现出非线性的趋势。第 6 到 7 次爆破后围岩略有增加,增加的幅度较小,表明围岩存在损伤阈值,当爆破荷载超过岩体的屈服强度时,围岩产生损伤。

表 2 围岩损伤范围

Table 2 Damage range of surrounding rock

加载工况	损伤范围		
	拱顶/m	拱腰/m	底板/m
单次荷载	0.22	0.50	0
重复荷载	1.60	2.32	2.23

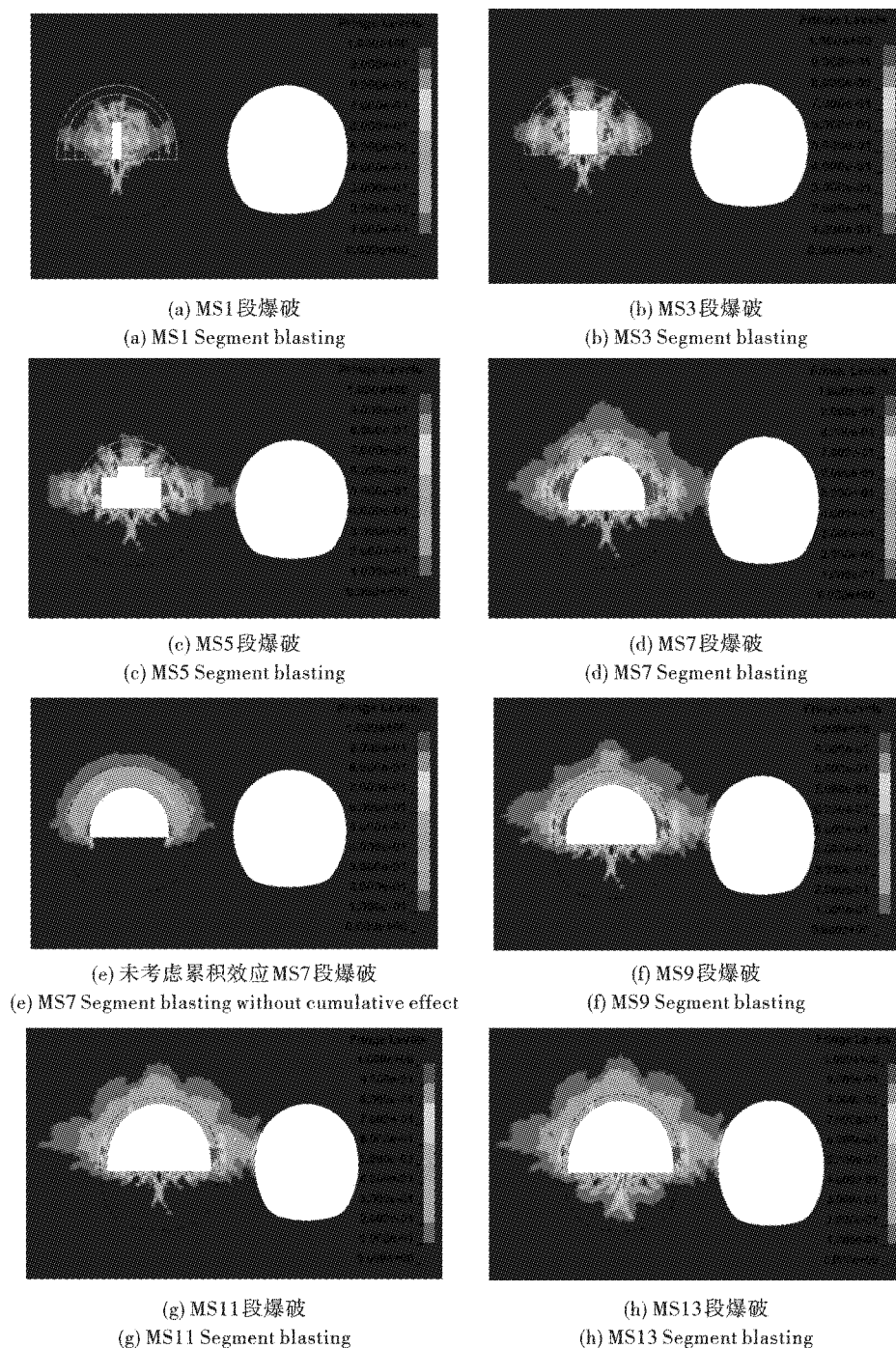
### 3.2 围岩的损伤空间效应

随着循环爆破开挖的连续推进,前后两次爆破推进会造反复扰动等问题,因此在前述考虑雷管段间微差延迟爆破扰动基础上,分析由于爆破开挖推进造成的围岩损伤,沿用段间微差造成围岩损伤的研究思路,结合关键字 \* DELETE\_PART 删除已开挖岩体,实现循环爆破开挖推进。同以 a-a 截面作为监测断面,表 3 中列出了 5 次爆破推进后监测部位岩体的损伤深度,可以看出 3 个开挖进尺完成后,损伤范围不再增加,因此图 8 只给出了循环推进前 4 次的损伤计算云图。对比图 8 中(a)和(b)可知,相邻两开挖进尺之间的扰动是比较明显的,而出在第 III 开挖进尺完成后围岩的损伤基本稳定,不再随后续开挖推进出现明显的损伤增长,因此该区段小净距隧道爆破开挖会对监测断面 a-a 后方 6 m(Z 轴正向)左右范围开挖轮廓线以外的岩体产生扰动影响,随着开挖的推进,爆破会对监测断面 a-a 前方 9 m(Z 轴负向)范围内的岩体产生扰动影响。

表 3 a-a 截面围岩损伤范围

Table 3 Damage range of surrounding rock in section a-a

开挖工况	损伤范围/m		
	拱腰	拱顶	底板
I	2.32	1.60	2.57
II	2.43	1.82	2.68
III	2.45	1.84	2.70
IV	2.45	1.84	2.70
V	2.45	1.84	2.70

图6  $a-a$  截面围岩损伤演化历程Fig. 6 Damage evolution history of surrounding rock in section  $a-a$ 

## 4 现场试验验证

### 4.1 声波测试方案

岩体在爆破荷载作用下力学性能发生变化,导致围岩承载能力及稳定性降低。由惠更斯-菲涅尔原理可知,声波在岩体中传播遇到裂隙、节理等缺陷会改变波的传播路径,传播时间大大增加使得所测波速降低,因此可用岩体中声波速度变化率来反应岩体损伤的演化情况<sup>[22]</sup>。本次采用单孔声波测试

的方法,隧道围岩中的声波传播速度使用 RSM-SY5 (一发双收)智能声波仪检测,测试孔布设在先行隧道迎爆侧拱腰处,其中3#孔与前述后行隧道  $a-a$  截面在一个平面内。本次总共钻取4个测试孔,1#测试孔由于孔内渗水严重,因此在3#孔两侧布设2#孔与对称的4#孔作为测试孔。相邻测试孔间距60 cm,相应孔深分别为2.3 m、2.2 m、2.2 m和2.2 m,每次移距10 cm。为测试方便,测孔均向下倾斜 $5^\circ$ ,测孔布设情况见图9所示。

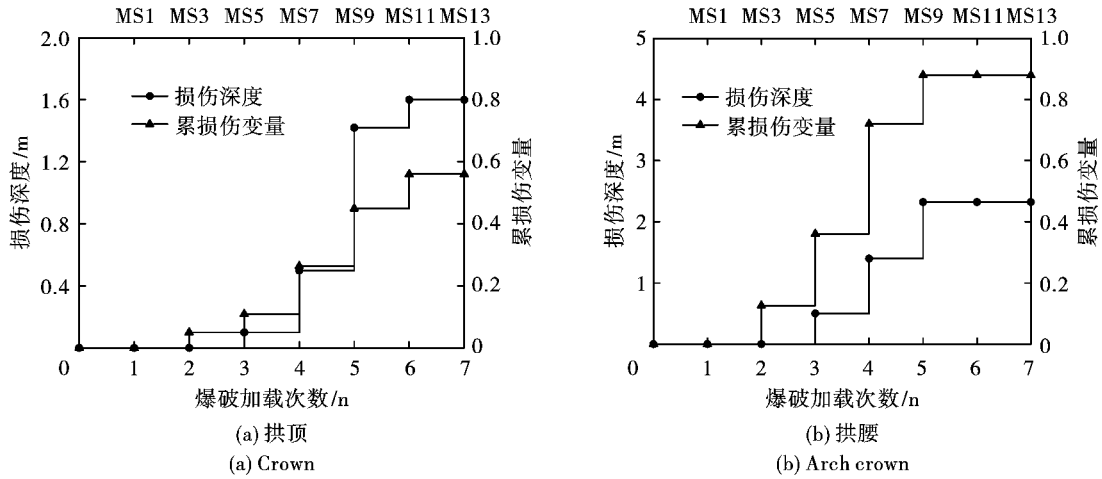


图7 截面 a-a 爆破加载次数与围岩累积损伤变化曲线

Fig. 7 Curves of blasting loading times and cumulative damage of surrounding rock in section a-a

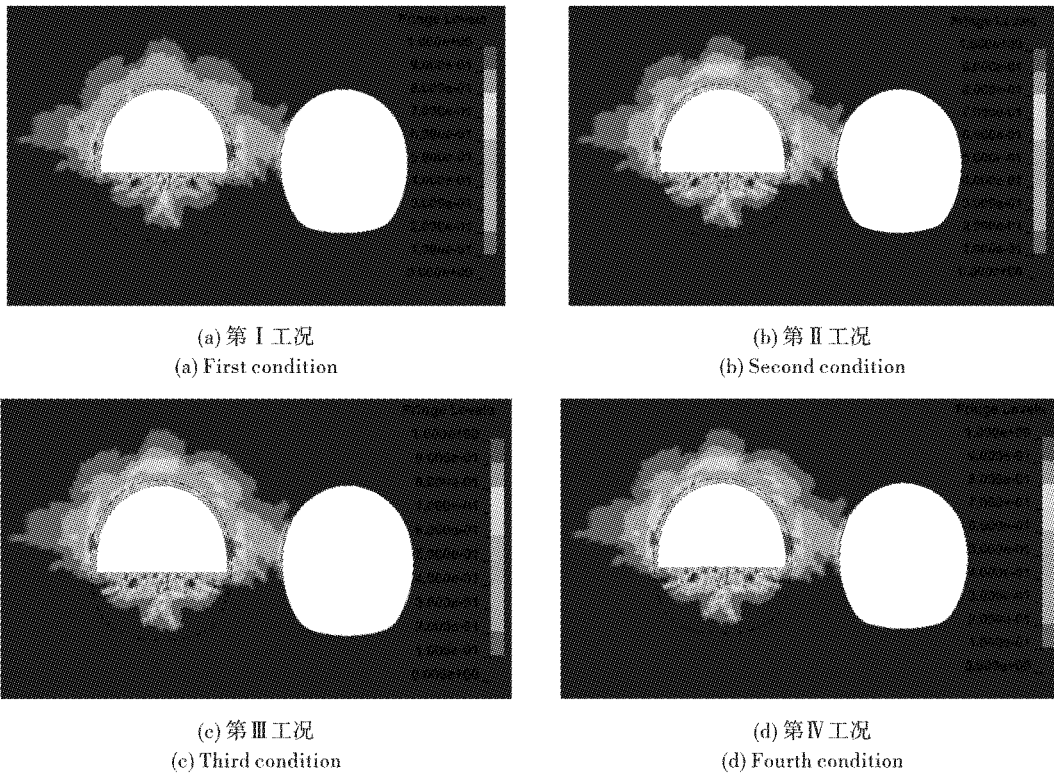


图8 各开挖工况下围岩损伤演化历程

Fig. 8 The evolution history of surrounding rock damage under various excavation conditions

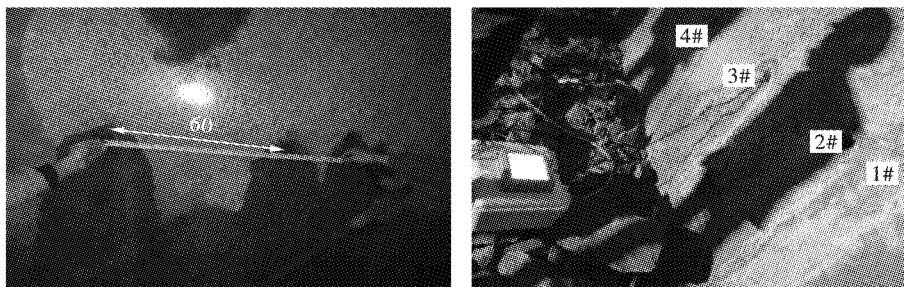


图9 现场测试

Fig. 9 Schematic diagram of field test

循环爆破荷载作用下,岩体损伤度与声速变化的关系为<sup>[23]</sup>

$$D_n = D_0 + \sum_{i=1}^n \left[ 1 - \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中: $n$ 为循环爆破次数; $D_0$ 为岩体初始损伤(原生裂隙及孔洞); $V_i$ 为第*i*次爆破后岩体中的纵波速度; $D_n$ 为*n*次爆破循环后的累积损伤度。

### 4.2 结果对比分析

由于测试孔并非垂直向下,在测试深度小于0.4 m的部分水与孔壁不能完全耦合在一起,因此无法取得有效数据,一共进行5次循环爆破开挖,共收集多组声波测试数据,结合公式(11)得出图10中的典型测孔爆破前后波速与深度曲线、孔深与围岩损伤关系曲线。由图10(a)可以看出,岩体内的纵波速度并非随孔深增加而增加,在孔深0~0.8 m范围内岩体波速与孔深呈正相关,孔深大于0.8 m范围内的岩

体波速变化较小,在第I进尺开挖完成后,岩体波速都有降低,在孔深大于1.4 m处的岩体波速下降的最快,平均声波衰减率达37.6%。由图10(b)可看出,本工程爆破开挖中夹岩损伤沿测孔深度方向呈圆角的斜“L”形状,实测和模拟结果均表明中夹岩中间部分岩体损伤均小于两侧岩体部分,且3#孔所处岩体损伤小于4#孔处岩体的损伤,这与文献[20]研究结论相符。图11(a)和(b)分别反映不同孔深处岩体损伤与开挖工况的关系,随着循环爆破的推进,围岩的损伤都在增加,且这种增长是不可逆的,在第III工况开挖完成后,围岩损伤基本稳定,不再随循环开挖推进而增加。另外从两图中均可看出围岩损伤模拟值基本都小于实测值,分析认为是围岩存在初始的孔隙、裂纹等损伤造成的,模拟假设围岩的初始损伤为0,但不管是实测还是模拟的损伤演化规律趋势相同,因此本文采用的研究方法是可行的。

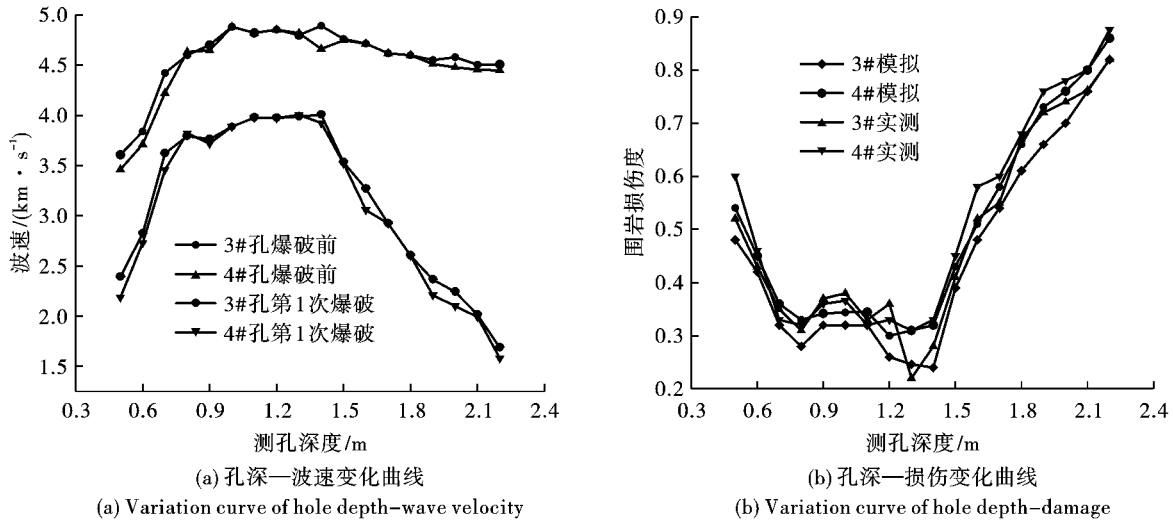


图10 测点处损伤关系曲线

Fig. 10 Damage relationship curve at the measuring point

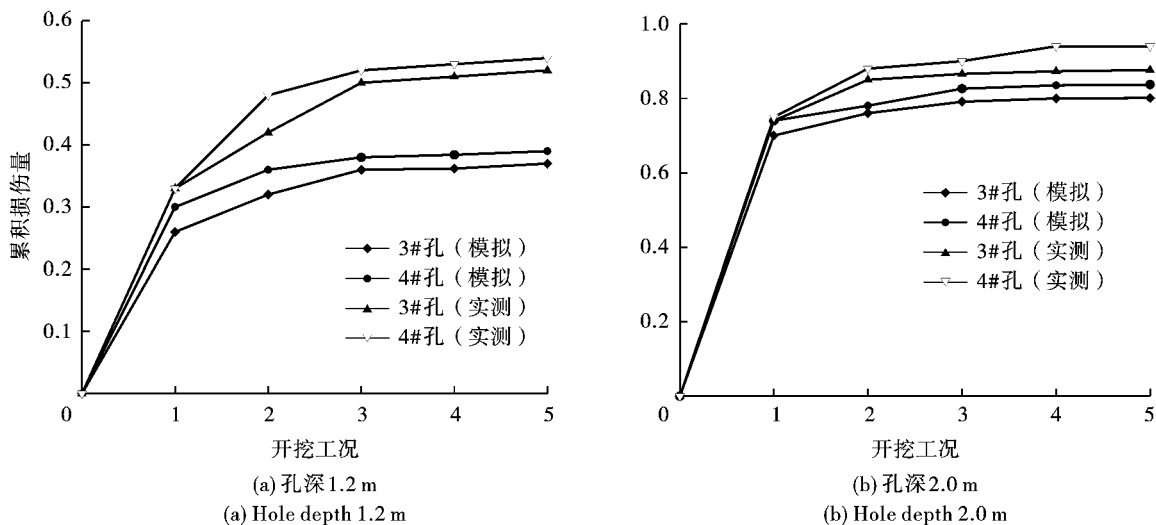


图11 累积损伤与开挖工况关系曲线

Fig. 11 Curve of relationship between cumulative damage and excavation conditions

## 5 结论

通过对福州地铁 2 号线某区段小净距隧道爆破前后的岩体声波变化进行监测,结合数值模拟研究得到如下结论:

(1)并不是每一次爆破加载都会对隧道开挖轮廓线以外的岩体造成损伤,多次爆破荷载作用下应力超过岩体屈服强度时岩体产生损伤,岩体损伤累积与爆破加载次数之间呈非线性,且这种损伤的累积不可逆。

(2)循环爆破荷载作用下中夹岩迎爆侧岩体的最大损伤范围在 2.32 m 左右,爆破扰动在拱腰处造成的损伤范围最大,底板次之,拱顶最小。在同一个监测断面,各段爆破荷载对围岩的损伤均有不同程度的影响,其中 MS7 和 MS9 段爆破对岩体损伤的影响最大,围岩存在明显的累积损伤效应。因此,在隧道掘进过程中应重点监测先行隧道迎爆侧拱腰,并采取相应的加固措施。

(3)小净距隧道爆破开挖过程中,中夹岩的损伤呈圆角的斜“L”的形状分布,中夹岩靠近及远离爆源部分损伤大。隧道多进尺开挖会对掌子面掘进后方 6 m(掌子面掘进前方 9 m)范围外的岩体产生影响,3 个进尺开挖完成后,掌子面掘进后方 6 m 范围外的岩体损伤范围基本稳定,且实测与计算的损伤规律变化趋势基本一致,表明本文所选用的研究方法可行的。

### 参考文献 (References)

- [1] 梁书锋,凌天龙,李 晨. 高铁长城站小净距隧道爆破振动效应研究[J]. 爆破,2021,38(1):116-123,139.
- [1] LIANG S F, LING T L, LI C. Blasting vibration effect of small-spaced tunnel at Great Wall high railway station [J]. *Blasting*, 2021, 38(1):116-123, 139. (in Chinese)
- [2] 徐 钟,邓 辉,卢 平,等. 钻爆施工隧道围岩爆破损伤累积效应研究[J]. 水利水电技术,2018,49(2):70-76.
- [2] XU Z, DENG H, LU P, et al. Study on cumulative blasting damage effect on surrounding rock of tunnel excavated with drilling-blasting method [J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2018, 49(2):70-76. (in Chinese)
- [3] 高宇璠,傅洪贤,季相臣,等. 小净距隧道钻爆施工中夹岩振动规律研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2):3440-3449.
- [3] GAO Y F, FU H X, JI X C, et al. Research and application of interlaid rock vibration law in drilling and blasting construction of small clear distance tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2):3440-3449. (in Chinese)
- [4] 许梦飞,姜谔男,蒋腾飞,等. 考虑循环爆破效应的 Hoek-Brown 弹塑性损伤模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S1):2683-2692.
- [4] XU M F, JIANG A N, JIANG T F, et al. A cumulative blasting damage model of rock based on Hoek-Brown criterion and its engineering application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1):2683-2692. (in Chinese)
- [5] 黄佑鹏,王志亮,毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报,2018(5):95-102.
- [5] HUANG Y P, WANG Z L, BI C C. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5):95-102. (in Chinese)
- [6] 胡 刚,费鸿禄,包士杰,等. 基于 HHT 分析隧道围岩结构爆破累积损伤效应[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1):249-259.
- [6] HU G, FEI H L, BAO S J M, et al. Blasting damage accumulative effect of tunnel surrounding rock structure on HHT [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1):249-259. (in Chinese)
- [7] 钟靖涛,王志亮,田诺成. 花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3):101-107.
- [7] ZHONG J T, WANG Z L, TIAN N C. An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3):101-107. (in Chinese)
- [8] 叶红宇,杨小林,卓越. 基于损伤累积的爆破振动主频衰减规律试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4):92-96.
- [8] YE H Y, YANG X L, ZHUO Y. Experimental study on the attenuation law of main frequency in blasting vibration based on damage accumulation [J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(4):92-96. (in Chinese)
- [9] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 58(Sep.):257-270.
- [10] 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.
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 曹 峰,凌同华,李 洁,等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析[J]. 振动与冲击,2018,37(23):149-156.
- [11] CAO F, LING T H, LI J, et al. Cumulative damage feature analysis for shared rock in a neighborhood tunnel under cyclic explosion loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(23):149-156. (in Chinese)