第39卷 第3期
2022年9月

爆 破
BLASTING

Vol. 39 No. 3
Sep. 2022

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.010

小西库隧道围岩累积损伤演化研究

徐平甲
(中铁十六局集团 路桥工程有限公司,北京 101500)

摘 要: 钻爆法施工隧道中,炸药爆炸产生的能量不可避免地对围岩产生扰动,因而围岩损伤控制对隧道安全稳定至关重要。针对目前同一隧道相同岩性不同等级的围岩损伤演化规律非常少见,作者以西统路小西库隧道工程为依托,借助声波测试技术分别研究了爆破荷载作用下Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级白云岩围岩累积损伤演化规律。研究发现:Ⅲ级白云岩纵波速度高于4200 m/s,当单次爆破药量为180 kg时,围岩最大损伤范围为1.8 m,掌子面向前推进24 m后围岩损伤趋于稳定;Ⅳ级白云岩纵波速度在3300 m/s左右,当单次爆破药量为168 kg时,2.0 m孔深范围内岩体声波速度从3300 m/s下降至1000 m/s以下,掌子面向前推进21 m后围岩损伤趋于稳定;Ⅴ级白云岩纵波速度低于3000 m/s,当单次爆破药量为144 kg时,随着掌子面的向前推进,整孔范围内的岩体均受爆破振动影响,且越深处的岩体受扰动越大;隧道围岩可分为破坏区(0.8 m以内),扰动区和未扰动区(1.8 m以外)三个区域。

关键词: 钻爆法;隧道工程;累积损伤;声波测试;爆破扰动

中图分类号: TU751.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0071-05

Study on Cumulative Damage Evolution of Surrounding Rock of Xiaoxiku Tunnel

XU Ping-jia
(China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 101500, China)

Abstract: In tunnel construction by drilling and blasting method, the energy generated by explosive inevitably disturbs the surrounding rock. Therefore, the control of surrounding rock damage is very important to the safety and stability of the tunnel. At present, the damage evolution law of surrounding rock with different grades in the same tunnel and lithology is very rare. Based on the Xiaoxiku tunnel project of Xitong Road, the author studied the cumulative damage evolution law of grade Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ dolomite surrounding rock under blasting loads with the help of acoustic testing technology. The results show that the P-wave velocity of grade Ⅲ dolomite is higher than 4200 m/s. When the charge per blast is 180 kg, the maximum damage range of surrounding rock is 1.8 m, and the damage of surrounding rock tends to be stable after the face is advanced by 24 m. The P-wave velocity of grade Ⅳ dolomite is about 3300 m/s. When the charge per blast is 168 kg, the acoustic wave velocity of rock mass decreases from 3300 m/s to less than 1000 m/s within the hole depth of 2.0 m. And the damage of surrounding rock tends to be stable after the face is advanced by 21 m. The P-wave velocity of class Ⅴ dolomite is lower than 3000 m/s. When the charge per blast is 144 kg, the rock mass within the entire hole is affected by blasting vibration with the deeper rock more disturbed. The tunnel surrounding rock can be divided into three areas: failure zone (within 0.8 m), disturbed zone and undisturbed zone (beyond 1.8 m).

Key words: drilling and blasting method; tunnel engineering; cumulative damage; acoustic testing; blasting disturbance

收稿日期: 2022-06-25

作者简介: 徐平甲(1988-),男,本科、工程师,主要从事隧道工程方面的研究工作,(E-mail)861414356@qq.com。

对于钻爆法施工隧道而言,炸药爆炸产生的能量不可避免地对围岩产生扰动,因而关于围岩损伤控制的研究一直是国内外学者研究的热点。现场原位试验是评价岩体爆破损伤最为高效可靠的方法,声波测试技术更是得到了学者们的广泛认可[1-3]。

国内外诸多学者已经对隧道围岩损伤进行了大量研究,并得到了许多重要的研究成果。王海龙等利用声波测试技术研究了某钻爆法施工隧道爆破开挖引起的初支混凝土损伤累积规律[4]。中国生等按照相似比理论建立 1∶15 实验模型模拟了隧道爆破开挖方式[5],以同一测点处爆破前后岩体声速变化评价隧道围岩损伤程度。闫长斌等在某地下工程围岩中开展了 10 次小药量爆破岩体损伤声波测试研究[6],结果表明岩体爆破损伤除了影响纵波速度之外,还会造成声波能量衰减和频谱特征的变化。邢东升等研究了巷道开挖过程中多次爆破动荷载对巷道围岩体的累积损伤[7]。曹峰等采用声波测试技术和有限元的方法研究了循环爆破荷载作用对小净距隧道中夹岩的影响[8],结果表明最大损伤范围出现在中夹岩的拱肩;相比单次爆破,循环多次爆破开挖造成的累积损伤范围明显增加,临界损伤峰值质点振速显著降低。凌天龙结合隧道围岩声波测试试验和数值计算方法对八达岭长城站隧道爆破开挖引起的围岩损伤及其累积效应进行了系统深入的研究[9]。李卫通过隧道现场声波测试发现距爆源 0 ~ 0.6 m 范围内围岩破坏严重[10],0.7 ~ 1.7 m 范围内围岩存在损伤扰动区,1.7 ~ 4.7 m 范围内围岩基本保持完整状态。不难发现,采用声波测试技术研究爆破荷载作用下围岩损伤得到了广大学者的认可,但对于同一隧道相同岩性不同等级的围岩损伤演化规律非常少见,且未能充分提取声波速度-孔深曲线信息,对此需要深入开展相关研究工作。

基于以上分析,笔者以小西库钻爆法施工隧道工程为依托,通过现场试验和理论分析的方法分别研究了Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级白云岩围岩累积损伤演化规律,为多次爆破荷载作用下隧道围岩安全稳定提供一定的指导。

1 工程背景

密云区西统路(河北路-密关路)道路工程施工第一标段位于北京市密云区西田各庄镇和溪翁庄镇,工程起点为河北路,终点为密关路,设计标准为一级。小西库隧道是该线路上的一条双线分离式隧道,共计长 1247 m,其中右线 557 m,左线 690 m。隧道上部覆盖层较薄,近 30% 为浅埋;围岩质量较差,以Ⅴ级风化白云岩为主。隧道的断面尺寸为宽 14.1 m,净高 11 m。本隧道采用三台阶法开挖。

2 测试方案

2.1 原理

单孔测试法。采用 RSM-SY5 型声波仪及配套一发双收式换能器进行声波测试,其原理如图 1 所示。测试时,把发射换能器和接收换能器置于同一钻孔中,发射机通过发射探头 F 发射超声波,经水的耦合,到达孔壁并沿孔壁传到两接收探头 S_1 和 S_2,设其初至时间分别为 t_1 和 t_2,这样根据两接收探头的距离 L 就能算出测试点处的岩体纵波速度

$$v_p = \frac{L}{t_2 - t_1} \tag{1}$$

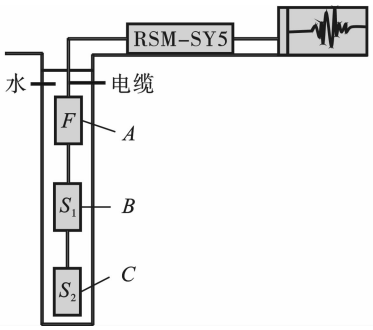


图 1 单孔测试原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single hole test principle

2.2 钻孔

根据隧道现场工程地质条件和施工环境,在隧道右线Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩中分别选择 1 ~ 2 个测试断面,将所有声波测试孔均布置在距离上台阶掌子面后方 9 m 左右(考虑现场工作环境)的中台阶底板以上 1.2 m 处右臂拱腰的位置。测试孔孔径 45 mm,孔深 4.0 m,水平向下倾斜 5°。具体布置形式如图 2 所示。钻孔孔径均一,孔壁完整、光滑,孔内无残渣;钻孔顺直,一径到底;钻完孔后用高压风和清水冲洗干净。

2.3 测试

①借助套杆将声波测试探头置于孔底,连接水管向测孔加水,当看到水从测试孔中缓慢流出时开始进行测试工作,测试过程中保证测试孔内水呈溢出状态,以保证孔内换能器与岩壁通过水介质充分耦合。②把探头外拉 10 cm,重复上边的操作,完成后边的测试,直到外边的接受探头到孔口为止。③每次测试时,每个测孔单独创建一个文件夹来存储数据。④在不影响施工队工作的情况下进行测试。

3　损伤变量

根据损伤力学关于损伤的描述，损伤定义为[11]

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \tag{2}$$

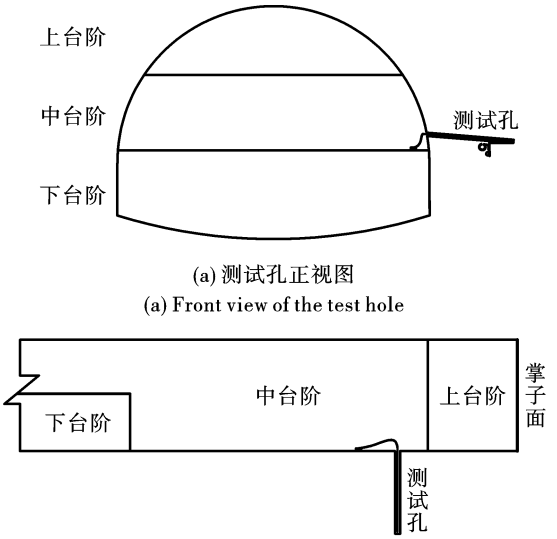
式中：E 为爆破后岩体的弹性模量；E_0 为爆破前岩体的弹性模量。

根据弹性波理论，爆破前后岩体弹性模量可由式(3)和式(4)表示

$$E = \rho C^2 \frac{(1-\mu_0)(1-2\mu)}{1+\mu} \tag{3}$$

$$E_0 = \rho_0 C_0^2 \frac{(1-\mu_0)(1-2\mu_0)}{1+\mu_0} \tag{4}$$

式中：ρ_0 和 ρ 分别为爆破前后岩体的密度；μ_0 和 μ 分别为爆破前后岩体的泊松比；C_0 和 C 分别为爆破前后岩体的纵波波速。



(a) 测试孔正视图
(a) Front view of the test hole

(b) 测试孔俯视图
(b) Vertical view of the test hole

图 2　隧道声波测试孔现场布置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of acoustic test hole in tunnel

在采用光面爆破技术施工的隧道中，爆破前后保留岩体的性质变化不大，一般认为爆破前后岩体的密度和泊松比近似相等，即 $\rho_0 \approx \rho$，$\mu_0 \approx \mu$，因此，联立式(2)～(4)，可以得到

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)^2 \tag{5}$$

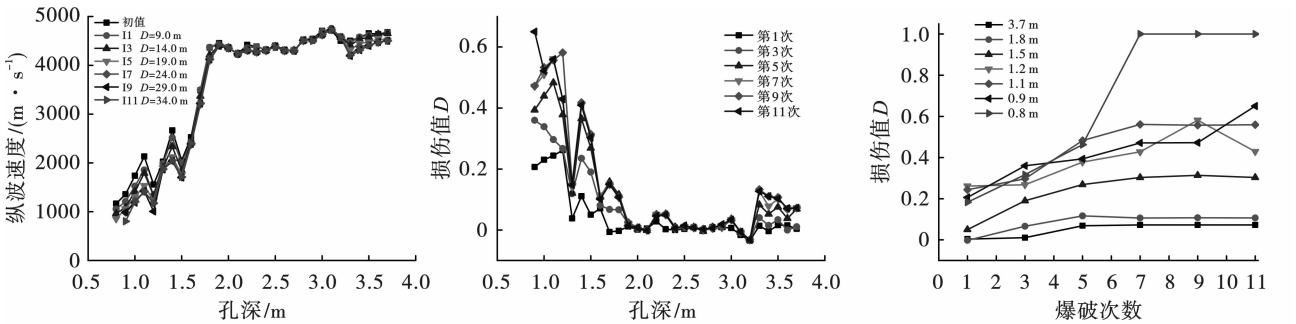
由式(5)可以看出，岩体的损伤变量 D 可以通过爆破前后岩体纵波波速的变化近似表示。故本文据此原理进行现场纵波速度测试及围岩损伤分析。

4　测试结果与分析

4.1　Ⅲ级围岩损伤演化规律分析

图 3 是单次爆破药量为 185 kg，距离掌子面 9～34 m 时 Ⅲ 级白云岩损伤演化相关曲线。图 3(a)表明，1.8～3.7 m 范围内岩体纵波速度较高，且一直稳定在 4200 m/s 左右，说明此范围内岩体相对完整，围岩受爆破荷载影响较小，拟将此声波速度作为Ⅲ级白云岩纵波速度；0.8～1.8 m 范围内围岩纵波速度从 4200 m/s 衰减至 1000 m/s 左右，且出现震荡现象，说明爆破荷载对此范围内的围岩影响较大；0～0.8 m 范围内声波波形太弱，无法计算岩体纵波速度，这是由于该范围内岩体破碎导致声波无法在岩体中传播。

图 3(b)、(c)损伤值 D 是根据式(5)计算得到的，无法测得波型时损伤值取为 1。据图可知：随着孔深的减小，围岩损伤程度呈现变大的趋势，且同一深度处围岩损伤随着爆破次数的增加而不断累积；开挖轮廓面附近的岩体累积损伤更大，说明该范围内的岩体更容易受爆破扰动影响；每次爆破对各孔深处的围岩扰动影响总体较小，呈现缓慢累积的趋势，且在第 7 次爆破后，岩体累积损伤不再增加，尤其是孔深超过 1.8 m 后规律更为明显，这在曲线图上表现为直线形式，与声波波速图相对应。



(a) 岩体纵波速度-孔深曲线
(a) P-wave velocity-hole depth curve of rock mass

(b) 岩体累积损伤值 D-孔深演化曲线
(b) Cumulative damage value D-hole depth evolution curve of rock mass

(c) 岩体累积损伤值 D-爆破次数演化曲线
(c) Cumulative damage value D-blasting times evolution curve of rock mass

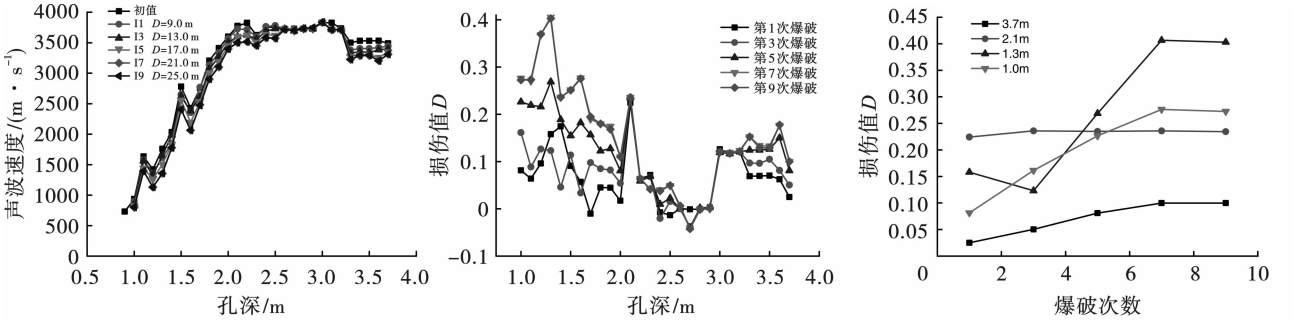
图 3　Ⅲ级围岩损伤演化规律曲线

Fig. 3　Damage evolution curve of grade Ⅲ surrounding rock

4.2 Ⅳ级围岩损伤演化规律分析

图 4 是单次爆破药量为 162 kg,距离掌子面 9 ~25 m 时Ⅳ级风化白云岩损伤演化相关曲线。图 4(a)表明,2.0 ~3.7 m 范围内岩体纵波速度一直稳定在 3300 m/s 左右,将此声波速度作为Ⅳ级白云岩纵波速度;0. 8 ~ 2. 0m 范围内围岩纵波速度从 3300 m/s降至 1000 m/s 左右,但下降速度要比Ⅲ级白云岩慢,且在下降过程中出现波动现象,说明爆破荷载对此范围内的围岩影响较大;0 ~0.8 m 范围分析同上。

据图 4(b)、(c)可知:Ⅳ级围岩大约在第 7 次爆破后损伤不再增加;孔深为 1.3 m 时,第 3 ~7 次爆破对围岩扰动较大,损伤值从 0.12 直线升到 0.42;此外,随着开挖的推进,因爆破导致岩体损伤范围并未变化,根据松动圈理论,可将松动圈厚度确定为 2.0 m。



(a) 岩体纵波速度-孔深曲线
(a) P-wave velocity-hole depth curve of rock mass

(b) 岩体累积损伤值D-孔深演化曲线
(b) Cumulative damage value D-hole depth evolution curve of rock mass

(c) 岩体累积损伤值D-爆破次数演化曲线
(c) Cumulative damage value D-blasting times evolution curve of rock mass

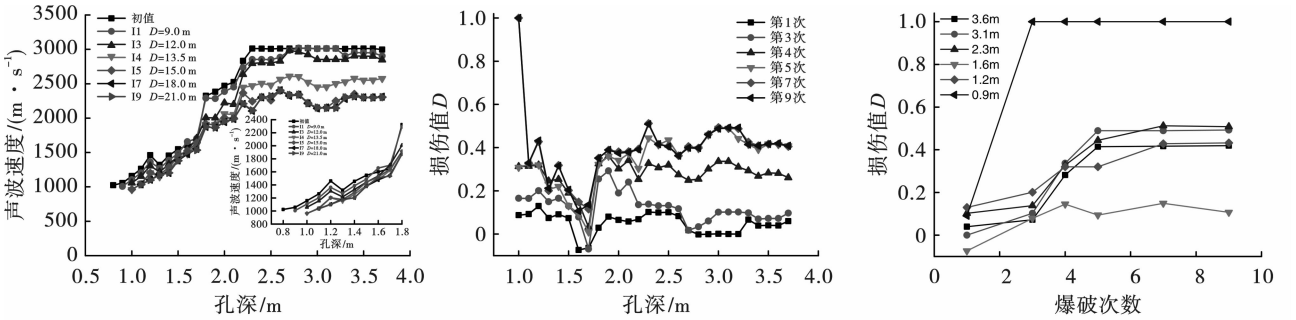
图 4 Ⅳ级围岩损伤演化规律曲线

Fig. 4 Damage evolution curve of grade Ⅳ surrounding rock

4.3 Ⅴ级围岩损伤演化规律分析

图 5 是单次爆破药量为 144 kg,距离掌子面 9 ~21 m时Ⅴ级风化白云岩围岩损伤演化相关曲线。由图 5(a)可知,2.3 m 范围外的岩体相对较为完整,但声波波速较Ⅲ、Ⅳ级围岩显然较低(低于 3000 m/s),这符合岩体分级标准;爆破施工对Ⅴ级围岩的扰动规律同Ⅲ、Ⅳ级围岩略有差异,越深处的岩体受扰动越大,在第 4 次爆破后,由于岩体若面较多、孔隙率大,原生裂隙逐渐扩展甚至贯通,围岩纵波速度出现明显的下降。

据图 5(b)、(c)可知:Ⅴ级围岩损伤在整个孔深范围内分布比较均匀,最小累积损伤在 1.7 m,最大累积损伤在 2.3 m;第 7 次爆破后围岩损伤不再增加,表明在此距离后爆破作用对测孔的损伤影响不大;第 3 ~5 次爆破对图中各孔深损伤影响较为明显,损伤值增幅较大。



(a) 岩体纵波速度-孔深曲线
(a) P-wave velocity-hole depth curve of rock mass

(b) 岩体累积损伤值D-孔深演化曲线
(b) Cumulative damage value D-hole depth evolution curve of rock mass

(c) 岩体累积损伤值D-爆破次数演化曲线
(c) Cumulative damage value D-blasting times evolution curve of rock mass

图 5 Ⅴ级围岩损伤演化规律曲线

Fig. 5 Damage evolution curve of grade Ⅴ surrounding rock

4.4 隧道围岩分区研究

从以上测试分析结果可以看出,孔内声波速度曲线具有明显的区域特性。图 6 为小西库隧道Ⅲ级白云岩围岩声波速度分区特性图,结合岩体质量情况,将其划分为 3 个区域:孔底处声波速度较高且维持在一恒值附近,定义为未扰动区(>1.8 m);孔口

处岩石较为破碎,声波波形微弱,定义为破坏区(< 0.8 m);未扰动区和破坏区之间声波速度呈震荡衰减状态,该范围内岩体受爆破作用影响较大,定义为扰动区。Ⅳ级和Ⅴ级白云岩围岩声波速度-孔深曲线也可以获得相似结论。

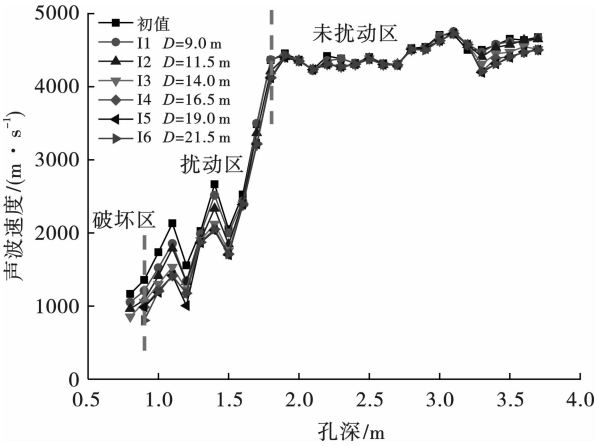


图 6　隧道围岩声波速度分区特性

Fig. 6　Acoustic velocity zone characteristics of tunnel surrounding rock

5　结论

借助声波测试技术,对西统路小西库隧道爆破施工引起的白云岩围岩累积损伤演化规律进行了分析,得出如下结论:

(1)小西库隧道Ⅲ级白云岩纵波速度在 4200 m/s 以上,Ⅳ级白云岩纵波速度约为3300 m/s,而Ⅴ级白云岩纵波速度低于 3000 m/s。

(2)0 ~ 0.8 m 孔深范围内的Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级白云岩围岩声波波形很弱,无法计算出纵波速度;单条纵波速度-孔深曲线上,靠近孔口的纵波速度较低,孔底处纵波速度较高,且在下降阶段会出现波形震荡现象。

(3)单次爆破药量为 180 kg 时,Ⅲ级白云岩围岩最大损伤范围为 1.8 m,0.8 ~ 1.8 m 范围内围岩纵波速度从 4200 m/s 衰减至 1000 m/s 左右,在掌子面向前推进 24m 后围岩损伤趋于稳定;单次爆破药量为 168 kg 时,Ⅳ级白云岩围岩最大损伤范围为 2.0 m,且 0.9 ~ 2.0 m 孔深范围内岩体声波速度从 3300 m/s 下降至 1000 m/s 以下;单次爆破药量为 144 kg 时,整孔范围内的Ⅴ级白云岩岩体均受爆破振动影响,最小累积损伤出现在 1.7 m,最大累积损伤在 2.3 m,且越深处的岩体受扰动越大,但第 7 次爆破后围岩损伤不再增加。

(4)根据岩体声波速度-孔深曲线并结合岩体完整程度,将小西库隧道白云岩围岩分为三个区域:破坏区(0.8 m 以内),扰动区和未扰动区(1.8 m 以外)。因此,在大断面隧道爆破施工时,应充分考虑多次爆破荷载作用对围岩的影响,确保围岩整体稳定。

参考文献(References)

[1]　杨艳国,范　楠. 基于单孔声波法测试巷道围岩松动圈试验研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(3):93-100.

[1]　YANG Yan-guo, FAN Nan. Experimental study on surrounding rock loosing circle by single-hole acoustic wave testing method[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):93-100. (in Chinese)

[2]　刘永胜,朱思源,杨小林,等. 多次爆破对大跨度硐室围岩的损伤累积及松动圈范围研究[J/OL]. 爆破:1-8. [2021-09-23]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20210915.1800.006.html.

[2]　LIU Yong-sheng, ZHU Si-yuan, YANG Xiao-lin, et al. Study on accumulation of surrounding rock damage and range of loose circle in large span chamber by multiple blasting[J]. Blasting: 1-8. [2021-09-23]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.202 10915.1800.006.html. (in Chinese)

[3]　YANG Jian-hua, DAI Jin-hao, YAO Chi, et al. Estimation of rock mass properties in excavation damage zones of rock slopes based on the Hoek-Brown criterion and acoustic testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126(2):1-14.

[4]　王海龙,李　帅,赵　岩. 累积效应下初支混凝土爆破损伤规律研究[J]. 工程爆破,2021,27(4):29-33,50.

[4]　WANG Hai-long, LI Shuai, ZHAO Yan. Research on blasting damage law of initial concrete support under cumulative effect[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4):29-33, 50. (in Chinese)

[5]　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.

[5]　ZHONG Guo-sheng, AO Li-ping, FU Yu-hua. 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. (in Chinese)

(下转第 94 页)