

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.002

## 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<sup>\*</sup>

刘永胜<sup>1</sup>,朱思源<sup>2</sup>,杨小林<sup>3</sup>,褚怀保<sup>3</sup>,王 昌<sup>3</sup>,任志强<sup>3</sup>,陈 真<sup>3</sup>,严少洋<sup>3</sup>

(1. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司,广州 511458;2. 中冶集团 武汉勘察研究院有限公司,武汉 430080;  
3. 河南理工大学 土木工程学院,焦作 454000)

**摘 要:** 为探究多次爆破作用下,损伤累积效应对大跨度硐室围岩松动圈的影响规律,结合某大跨度硐室爆破工程,采用声波法和钻孔窥视法对其爆破开挖过程中硐室围岩松动圈进行监测,利用现场试验结果分析大跨度硐室围岩损伤累积及松动圈变化规律。结果表明:随着爆破次数的增加,超声波波速不断减小;围岩损伤值增大,但增长速率不断降低,最后逐渐趋于稳定。多次爆破作用后,硐室围岩松动圈半径由原来的2.8 m逐步扩大为3.2 m,且硐室顶部的松动圈对比边墙处较大。因此,在大跨度硐室施工中应重点考虑硐室顶部的围岩稳定性,且在围岩支护和安全防护时应充分考虑多次爆破造成的围岩损伤累积效应对围岩松动圈半径变化的影响。

**关键词:** 大跨度硐室;循环爆破;损伤累积;超声波波速;松动圈范围

**中图分类号:** TD235.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0009-07

## Study on Damage Accumulation and Broken Rock Zone Range of Surrounding Rock of Large Span Chamber caused by Multiple Blasts

LIU Yong-sheng<sup>1</sup>, ZHU Si-yuan<sup>2</sup>, YANG Xiao-lin<sup>3</sup>, CHU Huai-bao<sup>3</sup>,  
WANG Chang<sup>3</sup>, REN Zhi-qiang<sup>3</sup>, CHEN Zhen<sup>3</sup>, YAN Shao-Yang<sup>3</sup>

(1. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511458, China;  
2. Wuhan Surveying-Geotechnical Research Institute CO., LTD. of MCC, Wuhan 430080, China;  
3. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to explore the influence law of damage accumulation effect on the surrounding rock of a large span chamber under multiple blasts, acoustic method and borehole imaging method were used in a large span chamber blasting project. The results show that the ultrasonic wave velocity decreases with the increase of blasting times. Besides, the damage value of surrounding rock increases, but the growth rate decreases and finally becomes stable. After several blasts, the radius of the broken rock zone in the surrounding rock of the chamber has gradually expanded from 2.8 m to 3.2 m, and the broken rock zone at the top of the chamber is larger than that at the side wall. Therefore, the stability of the surrounding rock at the top of the chamber must be taken into account in such cases. In addition, the influence of damage accumulation caused by multiple blasts on the radius change of the broken rock zone should be fully considered in surrounding rock support and safety protection.

**Key words:** large span chamber; circulation of blasting; damage accumulation; ultrasonic velocity; broken rock zone range

随着国家经济的快速发展,基础设施建设得到史无前例的发展机会,大断面和超大断面地下工程大量涌现<sup>[1,2]</sup>。爆破技术因其成熟度高,成本低,周期快等优点,广泛应用于隧道开挖、矿井建设、地下洞室、水利工程等领域中<sup>[3-5]</sup>。在隧道开挖施工过程中,爆破作业不可避免的会对围岩产生损伤扰动,影响其稳定性。此外,隧道开挖后围岩原应力平衡状态被打破,在次生应力作用下岩体内部产生微小裂隙并向围岩深部发展,直至围岩应力达到新的平衡状态,此过程中围绕开挖空间产生的应力集中破碎区域称为松动圈<sup>[6]</sup>,松动圈半径及其变化规律的确定对隧道支护方案和参数设计起到了重要保障。现阶段对隧道松动圈的测试手段多以超声波探测、钻孔窥视和地震波探测为主。与其他测试方法相比,超声波探测法以及钻孔窥视法具有便携、明了、高效等优点。

国内诸多专家已经对现场围岩松动圈范围及扩展规律进行了大量研究,并得到了许多重要的研究成果<sup>[7-11]</sup>。刘刚等综述了强度准则法和数学模型法这两种松动圈理论计算方法<sup>[12]</sup>。马其华等结合实际工程<sup>[13]</sup>,采用单孔超声波测试法对隧道围岩松动圈范围进行了测试,并通过 FLAC<sup>3D</sup> 软件对松动圈范围进行了研究,证明了测试方法的实用性和优越性。杨艳国等为确定实际工程中煤巷的松动圈半径以及锚杆支护参数<sup>[14]</sup>,采用单孔声波法得到了煤巷松动圈半径,并通过数值计算优化了其锚杆支护参数。陈亚楠等通过单孔测试技术得到了围岩松动圈随爆破次数增加的变化范围<sup>[15]</sup>,得到了围岩松动圈的变化规律。总体而言,现阶段的研究多数是用超声波测试的方法对围岩松动圈的半径进行测定,且很少考虑多次爆破作用下,围岩损伤累积效应对松动圈半径变化的影响。

本文结合某地下大跨度洞室工程,采用单孔超声波测试以及钻孔窥视法对其松动圈半径进行监测,并分析多次爆破作用下洞室围岩的损伤变化规律,探讨损伤累积效应对洞室松动圈半径的影响。为多次频繁爆破工程中洞室松动圈变化规律的确定和损伤累积危害效应的评判提供现场数据基础。

## 1 松动圈测试原理

隧道、洞室、巷道等地下工程在爆破开挖后,围岩由原来的三向受力变为近似两向受力,原本的应力平衡状态被打破并造成围岩所受应力强度大幅度上升<sup>[16]</sup>。当围岩受到的集中应力小于岩体本身强度时,围岩不发生破坏并保持弹塑性状态维持自身稳定;当次生应力强度大于岩体自身强度时,围岩发生塑性破坏并产生裂隙,裂隙从围岩外部逐渐向内部延伸直至围岩重新达到应力平衡状态,次生应力会使围岩围绕开挖空间形成一个破裂带,这个破裂带即为围岩松动圈<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。现阶段通常采用摩尔库伦准则推导得到的卡斯特纳方程作为判断轴对称圆形隧道松动圈范围的依据<sup>[17]</sup>。

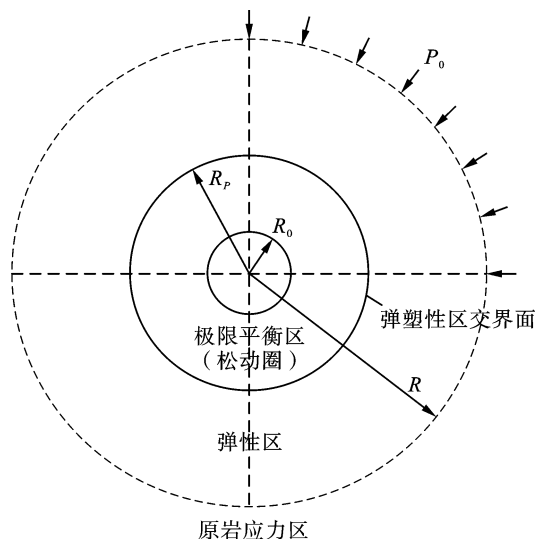


图 1 围岩松动圈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of broken rock zone in surrounding rock

$$R_p = R_0 \left[ \frac{(p_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P + C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: $R_p$  为塑性区半径; $R_0$  为隧道半径; $p_0$  为外荷载; $C$ 、 $\varphi$ 、 $P$  为地层特征常数。

超声波在岩体内部传播的过程中,会因为介质的改变以及结构面的变化产生反射、折射等现象,使其速度发生改变。随着介质内部裂隙的不断发育,岩体密度逐渐降低,声阻抗不断增大,声波波速会逐渐减小。因此,当测量得到的声波波速高时说明岩体较为完整,没有受到破坏,当测得的波速有明显下降时表明所测位置处岩体质量较差,可能已受到破坏并产生裂隙。

单孔声波测试法通过利用一发双收探头在钻孔中发射超声波来达到监测钻孔孔壁围岩完整性的目

收稿日期:2021-09-12

作者简介:刘永胜(1980-),男,湖南湘乡人,正高级工程师、博士,毕业于北京交通大学土木建筑工程学院,主要从事隧道与地下工程、爆破工程相关的工作,(E-mail)249674805@qq.com。

通讯作者:朱思源(1996-),男,河南洛阳人,硕士,毕业于河南理工大学土木工程学院,主要从事隧道与地下工程、爆破工程方面的研究,(E-mail)15537617015@163.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874123)

的<sup>[18]</sup>,根据超声波波速的变化规律得到围岩内部裂隙的分布范围及规律,进而得到洞库围岩松动圈范围,单孔声波测试仪器在钻孔内的布置方式如图2所示。测试中需要通过水或黄油作为耦合剂,根据2个接收换能器的间距以及超声波纵波在2个接受换能器之间传播的时间间隔,得到超声波的纵波波速 $V_p$ ,即

$$V_p = \frac{S}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $V_p$ 为岩体声波波速; $S$ 为两个换能器之间的距离; $\Delta t$ 为发射信号分别到2个接受换能器的时间差。

## 2 现场超声波及钻孔窥视监测

### 2.1 工程概况

试验现场大跨度硐室围岩以Ⅲ级为主。硐室整体为超大跨蛭壳型,底部跨度为40 m,边墙高度为6 m,拱顶高度为12 m,整体采用台阶法开挖。现场采用直孔掏槽、2号岩石乳化炸药分段延时毫秒微差爆破,起爆方式为导爆管雷管起爆。见图2。

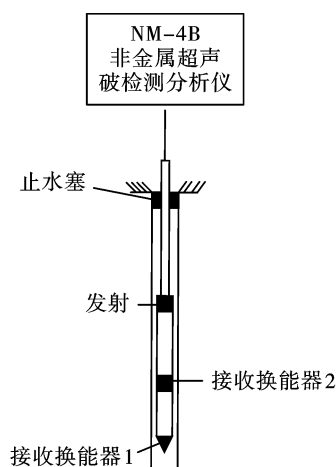


图2 一发双收测试仪器布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of instrument installation using the single and double receiver test method

### 2.2 主要仪器设备

单孔声波测试法的测试仪器包括NM-4B非金属超声波检测分析仪和一发双收探头,如图3所示。



图3 超声波采集系统

Fig. 3 Ultrasonic acquisition system

钻孔窥视仪器采用ZKXG100矿用钻孔成像轨迹仪,钻孔窥视仪主要由测试仪器、摄像头、电线三部分组成,如图4所示。窥视时将摄像头伸入钻孔中,对钻孔孔壁上的裂纹分布情况进行拍摄观测,可对孔深任意位置进行观测,便于更加直观的了解围岩松动圈半径的变化规律;同时该仪器也可转化为录像模式,对钻孔窥视的全过程进行记录。



图4 ZKXG100 矿用钻孔成像轨迹仪

Fig. 4 ZKXG100 mine borehole imaging trajectory instrument

### 2.3 现场测试钻孔的位置

为分析多次爆破作用下大跨度硐室松动圈分布及变化规律,本次现场试验在距离掌子面3 m位置处布置超声波测试钻孔以及窥视钻孔。在硐室拱顶和边墙处进行监测孔布置,钻孔直径均为40 mm,孔深为6 m,具体布置方案示意图如图5所示,并对不同位置的钻孔分别进行超声波测试和围岩内部窥视成像。

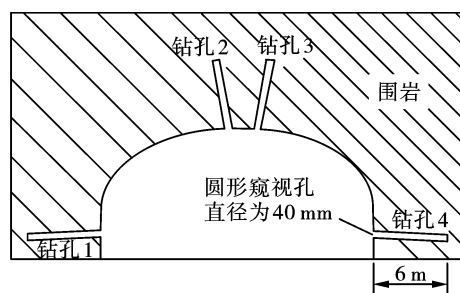


图5 钻孔布置示意图

Fig. 5 Borehole layout diagram

## 3 围岩松动圈测试结果

### 3.1 超声波测试结果

本次现场试验共经历了5次开挖爆破,每次爆破进尺为2 m,具体爆破参数如表1所示。爆破前对钻孔进行超声波测试,了解超声波在围岩内的传播速度和围岩完整性,确定既有爆破开挖造成的围岩损伤范围和扰动情况,波速测试结果如表2所示。

表 1 大跨度硐室爆破参数

Table 1 Blasting parameters of large span chamber

| 爆破次数 | 总药量/kg | 最大单响药量/kg |
|------|--------|-----------|
| 1    | 128    | 32        |
| 2    | 128    | 32        |
| 3    | 132    | 33        |
| 4    | 128    | 32        |
| 5    | 128    | 32        |

表 2 爆破前不同位置处声波速度测试结果

Table 2 Test results of acoustic velocity at different positions before blasting

| 钻孔深度/m | 爆破前 1、2 号钻孔超声波波速/(km · s <sup>-1</sup> ) |       |
|--------|------------------------------------------|-------|
|        | 1 号钻孔                                    | 2 号钻孔 |
| 0.4    | 2.717                                    | 2.500 |
| 0.8    | 2.747                                    | 2.520 |
| 1.2    | 2.809                                    | 2.551 |
| 1.6    | 2.941                                    | 2.632 |
| 2.0    | 3.012                                    | 2.694 |
| 2.4    | 3.123                                    | 2.717 |
| 2.8    | 3.521                                    | 3.012 |
| 3.2    | 4.610                                    | 4.564 |
| 3.6    | 4.615                                    | 4.717 |
| 4.0    | 4.806                                    | 4.813 |
| 4.4    | 4.856                                    | 4.827 |
| 4.8    | 4.817                                    | 4.902 |
| 5.2    | 4.857                                    | 5.065 |
| 5.6    | 5.208                                    | 5.120 |
| 6.0    | 5.199                                    | 5.108 |

为研究多次爆破产生的损伤累积效应对围岩不同位置松动圈变化的影响,在每次爆破后对 1、2 号钻孔均进行了超声波测试,并对所测结果进行了统计,钻孔超声波波速测试结果如表 3 所示。

### 3.2 围岩损伤结果

大跨度硐室的爆破开挖不可避免的会对部分围岩造成一定程度的损伤。随着爆破次数的增加,其产生的损伤累积效应对围岩的稳定性产生较大影响。为探究爆破损伤累积规律,由式(3)计算得到每次爆破后围岩的损伤累积值<sup>[19]</sup>。

$$D = 1 - (v/v_0)^2 \quad (3)$$

式中: $v$  为爆破后围岩的超声波波速,km/s; $v_0$  为爆破前围岩的超声波波速,km/s。根据《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》可知,当爆破前后波速降低率大于 10%,即认为岩体受到爆破损伤破坏,其对应的损伤变量  $D$  的阈值为 0.19。即当损伤变量  $D < 0.19$  时,认为岩体所受损伤极小或未受损伤。然而,当岩体损伤值处于  $0.19 < D < 1$  之间时,围岩的破损状态却暂时没有统一结论<sup>[20]</sup>。

根据表 2、3 所测数据,计算得到硐室拱顶和边墙处围岩的损伤累积值如表 4 所示。

表 3 不同钻孔超声波波速(单位:km/s)

Table 3 Different borehole ultrasonic wave velocities (unit: km/s)

| 钻孔深度/m | 钻孔编号 | 第一次爆破后 | 第二次爆破后 | 第三次爆破后 | 第四次爆破后 | 第五次爆破后 |
|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.4    | 1    | 2.520  | 2.451  | 2.406  | 2.381  | 2.350  |
|        | 2    | 2.381  | 2.273  | 2.252  | 2.246  | 2.240  |
| 0.8    | 1    | 2.377  | 2.275  | 2.201  | 2.192  | 2.189  |
|        | 2    | 2.804  | 2.604  | 2.600  | 2.595  | 2.591  |
| 1.2    | 1    | 2.778  | 2.717  | 2.710  | 2.711  | 2.698  |
|        | 2    | 2.500  | 2.455  | 2.450  | 2.427  | 2.426  |
| 1.6    | 1    | 2.727  | 2.632  | 2.604  | 2.602  | 2.601  |
|        | 2    | 2.551  | 2.496  | 2.451  | 2.425  | 2.417  |
| 2.0    | 1    | 2.504  | 2.486  | 2.468  | 2.449  | 2.440  |
|        | 2    | 2.151  | 2.052  | 2.030  | 2.020  | 2.020  |
| 2.4    | 1    | 3.165  | 3.125  | 3.089  | 2.957  | 2.927  |
|        | 2    | 2.577  | 2.501  | 2.451  | 2.445  | 2.443  |
| 2.8    | 1    | 4.210  | 4.046  | 3.888  | 3.791  | 3.676  |
|        | 2    | 2.833  | 2.809  | 2.778  | 2.767  | 2.757  |
| 3.2    | 1    | 4.345  | 4.221  | 4.167  | 4.032  | 4.028  |
|        | 2    | 4.164  | 3.901  | 3.791  | 3.571  | 3.570  |
| 3.6    | 1    | 4.488  | 4.371  | 4.298  | 4.272  | 4.270  |
|        | 2    | 4.410  | 4.298  | 4.228  | 4.208  | 4.201  |
| 4.0    | 1    | 4.568  | 4.431  | 4.423  | 4.408  | 4.405  |
|        | 2    | 4.515  | 4.325  | 4.305  | 4.292  | 4.291  |
| 4.4    | 1    | 4.590  | 4.532  | 4.509  | 4.501  | 4.497  |
|        | 2    | 4.476  | 4.442  | 4.421  | 4.403  | 4.401  |
| 4.8    | 1    | 4.902  | 4.851  | 4.853  | 4.843  | 4.829  |
|        | 2    | 4.932  | 4.868  | 4.823  | 4.819  | 4.814  |
| 5.2    | 1    | 4.896  | 4.867  | 4.762  | 4.706  | 4.856  |
|        | 2    | 4.786  | 4.767  | 4.692  | 4.686  | 4.655  |
| 5.6    | 1    | 4.786  | 4.745  | 4.706  | 4.695  | 4.692  |
|        | 2    | 4.890  | 4.856  | 4.821  | 4.812  | 4.810  |
| 6.0    | 1    | 5.079  | 5.070  | 5.059  | 5.049  | 5.041  |
|        | 2    | 4.902  | 4.803  | 4.764  | 4.709  | 4.701  |

### 3.3 钻孔窥视测试结果

钻孔窥视仪利用摄像技术对围岩内部情况进行跟踪监测,可更加直观的得到裂隙的发育情况,对松动圈半径做出准确判断。通过对钻孔 3 和 4 进行窥视观测,分别掌握硐室边墙处和拱顶处围岩内部裂隙的发展情况,部分观测结果如图 6 所示。

## 4 围岩松动圈测试结果分析

随爆破作用次数的增加,为得到硐室周围不同位置处超声波波速随钻孔深度的变化规律,根据表 2 和表 3 内相关数据可分别绘制 1、2 号钻孔超声波与钻孔深度关系曲线,如图 7、8 所示。

表 4 洞库不同位置围岩损伤值  
Table 4 Surrounding rock damage values  
at different locations of the cavern

| 钻孔深度/m | 围岩位置 | 第一次爆破后 | 第二次爆破后 | 第三次爆破后 | 第四次爆破后 | 第五次爆破后 |
|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.4    | 拱顶   | 0.093  | 0.173  | 0.259  | 0.330  | 0.359  |
|        | 边墙   | 0.140  | 0.186  | 0.216  | 0.232  | 0.252  |
| 0.8    | 拱顶   | 0.138  | 0.257  | 0.282  | 0.291  | 0.309  |
|        | 边墙   | 0.129  | 0.202  | 0.253  | 0.259  | 0.261  |
| 1.2    | 拱顶   | 0.098  | 0.130  | 0.134  | 0.150  | 0.164  |
|        | 边墙   | 0.149  | 0.186  | 0.190  | 0.190  | 0.198  |
| 1.6    | 拱顶   | 0.199  | 0.234  | 0.261  | 0.277  | 0.281  |
|        | 边墙   | 0.140  | 0.199  | 0.216  | 0.217  | 0.218  |
| 2.0    | 拱顶   | 0.121  | 0.200  | 0.217  | 0.225  | 0.225  |
|        | 边墙   | 0.205  | 0.217  | 0.228  | 0.240  | 0.245  |
| 2.4    | 拱顶   | 0.100  | 0.153  | 0.186  | 0.190  | 0.192  |
|        | 边墙   | 0.192  | 0.212  | 0.230  | 0.295  | 0.309  |
| 2.8    | 拱顶   | 0.115  | 0.130  | 0.149  | 0.156  | 0.162  |
|        | 边墙   | 0.166  | 0.230  | 0.289  | 0.324  | 0.364  |
| 3.2    | 拱顶   | 0.168  | 0.269  | 0.310  | 0.388  | 0.388  |
|        | 边墙   | 0.114  | 0.163  | 0.185  | 0.237  | 0.238  |
| 3.6    | 拱顶   | 0.126  | 0.170  | 0.197  | 0.204  | 0.207  |
|        | 边墙   | 0.128  | 0.173  | 0.200  | 0.210  | 0.211  |
| 4.0    | 拱顶   | 0.120  | 0.193  | 0.200  | 0.205  | 0.205  |
|        | 边墙   | 0.115  | 0.167  | 0.170  | 0.176  | 0.177  |
| 4.4    | 拱顶   | 0.103  | 0.117  | 0.125  | 0.132  | 0.133  |
|        | 边墙   | 0.092  | 0.115  | 0.124  | 0.127  | 0.128  |
| 4.8    | 拱顶   | 0.066  | 0.090  | 0.106  | 0.108  | 0.110  |
|        | 边墙   | 0.076  | 0.095  | 0.094  | 0.098  | 0.103  |
| 5.2    | 拱顶   | 0.107  | 0.114  | 0.142  | 0.144  | 0.155  |
|        | 边墙   | 0.044  | 0.056  | 0.096  | 0.117  | 0.060  |
| 5.6    | 拱顶   | 0.088  | 0.100  | 0.113  | 0.117  | 0.117  |
|        | 边墙   | 0.068  | 0.084  | 0.099  | 0.103  | 0.104  |
| 6.0    | 拱顶   | 0.079  | 0.116  | 0.130  | 0.150  | 0.153  |
|        | 边墙   | 0.012  | 0.015  | 0.019  | 0.023  | 0.026  |

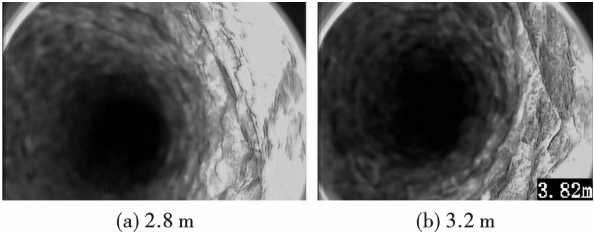


图 6 孔深 2.8 m 和 3.2 m 处的钻孔窥视结果  
Fig. 6 Borehole camera results at hole depth of 2.8 m and 3.2 m

为得到硐室围岩不同位置处以及不同钻孔深度围岩损伤值随爆破次数增加的变化规律,根据表 4 中数据绘制洞库拱顶以及边墙处围岩损伤累积变化曲线,如图 9、10 所示。

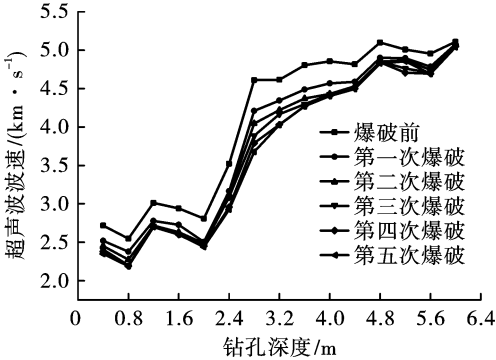


图 7 1 号钻孔超声波与钻孔深度关系图  
Fig. 7 Relationship between ultrasonic wave and borehole depth in borehole No. 1

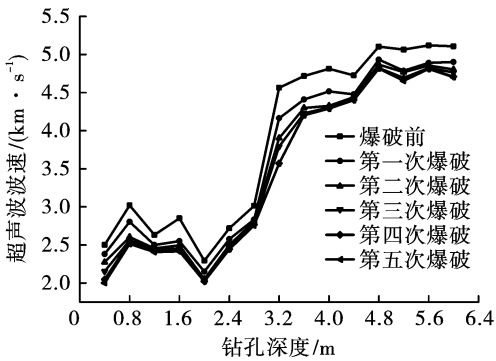


图 8 2 号钻孔超声波与钻孔深度关系图  
Fig. 8 Relationship between ultrasonic wave and borehole depth in borehole No. 2

(1)随着爆破次数的增加,围岩损伤累积不断增大其自身的物理力学性能也有不同程度的衰减,导致围岩的粘聚力系数  $C$ 、内摩擦角都有一定的减小。根据式(1)计算可知  $R_p$  变大即表明松动圈半径随着爆破次数的增加逐渐增大。从图 7 可看出爆破前超声波波速在钻孔孔深 2.4 ~ 2.8 m 处有明显增大,表明在此深度范围内的围岩裂隙情况随着孔深的增加逐渐有所改善,因此爆破前硐室边墙处围岩松动圈半径为 2.4 m。随着爆破次数的增加钻孔深度 2.8 m 位置处测得的超声波波速有明显下降,到 3.2 m 处超声波波速逐渐趋于稳定,说明随着爆破次数的增加,围岩内部裂纹逐渐发育至 2.8 m 附近。结合图 6(a) 钻孔窥视结果可以看到,在孔深 2.8 m 处孔壁围岩有较为明显的裂隙,因此硐室边墙处围岩松动圈从 2.4 m 增至 2.8 m。

由图 8 可看出爆破前超声波波速在钻孔深度为 2.8 ~ 3.2 m 处有明显增大,说明拱顶处围岩松动圈范围为 2.8 m,随着爆破次数的增加,围岩累积损伤逐渐增大,围岩内部裂隙逐渐增加,经过五次爆破作用后钻孔深度 3.2 m 处超声波波速由明显下降,到

3.6 m处超声波波速逐渐稳定。结合图6(b)可知, 硐室拱顶处围岩松动圈从2.8 m增至3.2 m。

(2)通过图7、8可以得出, 硐室围岩在各次爆破后测得的超声波波速与前一次测得的波速相比有明显的降低,但随着爆破次数的增多,超声波波速降低的程度逐渐减小;此外,随着钻孔深度的增加,超声波波速有总体增大的趋势,说明围岩内部岩体完整性较好。在爆破过程中,炸药爆炸产生的冲击波对炮孔周围岩体产生严重破坏,冲击波快速衰减为应力波并作用于岩体,造成部分围岩产生裂隙或使原生裂隙扩展;此外爆破产生的爆轰气体也会作用于岩石裂隙产生气楔作用造成裂隙的进一步扩展,从而造成围岩损伤累积逐渐增大。

裂隙的扩展会使超声波在达到结构面时会产生反射、绕射、衍射等现象,对声波的传播距离造成一定程度的增长;此外超声波在通过裂隙时,由于会在不同介质中进行传递,因此其能量会有部分损耗,以上这些都会导致声速减小。从结果可看出,拱顶位置处超声波波速衰减较快,边墙处超声波波速衰减程度较小,说明爆破振动对硐室拱顶位置处影响较大。

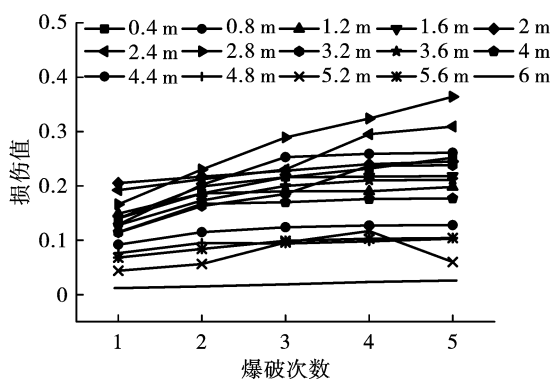


图9 边墙处围岩爆破损伤累积曲线

Fig. 9 Cumulative curve of surrounding rock blasting damage at the side wall

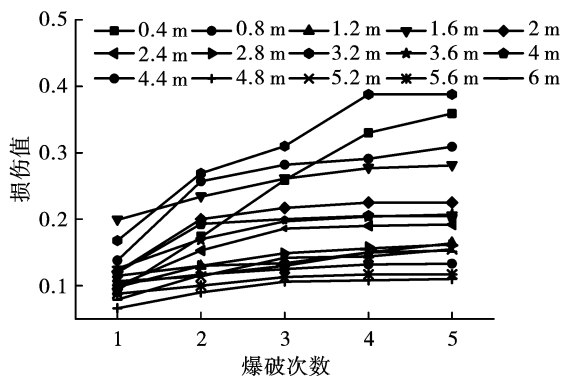


图10 拱顶处围岩爆破损伤累积曲线

Fig. 10 Cumulative curve of surrounding rock blasting damage at arch roof

(3)从图9、10可看出, 钻孔孔深较浅且在松动圈半径范围内的围岩, 及钻孔深度为2.4~3.2 m范围内的部分围岩损伤累积值较高; 钻孔孔深较大且超出松动圈范围的围岩损伤累积值较小, 普遍在0.1左右。

炮孔内药包爆炸时产生的应力波以及爆生气体对炮孔周边岩体造成宏观断裂损伤, 对钻孔深度较浅部位的围岩产生较大程度影响, 使其损伤累积值较大。爆炸应力波在硐室围岩内传播的过程中随着与爆源距离的增加能量被逐渐吸收, 深部围岩受应力波影响快速减小, 同时松动圈半径内的围岩存在较多裂纹和孔隙会使应力波进一步衰减, 故钻孔孔深较大且超出松动圈半径的围岩其损伤较小。每次爆破作用后大跨度硐室围岩的受力平衡状态都会被打破, 围岩应力会重新进行分布, 使围岩松动圈半径内的岩体会进一步产生新的裂隙或使已有裂隙进一步扩展, 直至达到新的受力平衡, 这导致松动圈向围岩深部转移。

随着爆破次数的增加, 围岩损伤累积呈单调递增的趋势, 但增长速率逐渐降低, 最后趋于稳定。在多次爆破载荷和应力波传播过程中, 随着爆破次数的增加裂纹尖端的局部损伤累积引起岩体原有节理裂隙扩张、错动或贯通, 使初始裂纹逐渐扩展形成细观裂隙; 随着爆破次数逐渐增多, 细观裂隙逐渐连接贯通形成宏观裂纹, 对岩石原有结构面进行破坏, 造成岩体损伤逐渐加大, 其物理力学性能进一步劣化。随着爆破工作面与钻孔距离的逐渐增大, 爆破振动效应对远区围岩的影响逐渐减小; 同时由于裂隙的增加以及原有裂隙的进一步扩展, 应力波在传播过程中会产生反射、透射等现象, 造成其携带的能量严重衰减并阻碍其传播, 因此测量位置处的围岩损伤累积增长速率逐渐降低。

## 5 结论

(1)在多次爆破作用下, 大跨度硐室围岩同一位置处超声波波速逐渐减小, 但减小速率逐渐降低。此外钻孔深度小于3.2 m的浅部围岩超声波波速衰减比深部围岩超声波波速衰减更快。

(2)随着爆破次数的增加, 围岩损伤累积逐渐增大, 尤其是在围岩松动圈半径范围内表现得较为明显; 此外随着爆破次数的增加围岩损伤累积的增长幅度逐渐减小, 并逐渐趋于稳定。

(3)围岩松动圈半径会随着爆破次数的增加而逐渐增大。硐室拱顶和边墙经过五次爆破, 其松动圈半径分别由2.8 m和2.4 m扩大至3.2 m和2.8 m。因此, 在大型地下工程安全施工时, 应充分考虑多次爆破作用对围岩松动圈的影响, 且在拱顶

和边墙处应加强相应的支护措施,确保围岩整体稳定性。

### 参考文献 (References)

- [1] 杨小林,李拴杰,褚怀保,等. 多次振动荷载作用下新浇混凝土超声波波速变化规律试验研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2018,37(3):124-128.
- [1] YANG Xiao-lin, LI Shuan-jie, CHU Huai-bao, et al. Experimental study on ultrasonic wave velocity change of fresh concrete under multiple vibration loads[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2018, 37(3): 124-128. (in Chinese)
- [2] 褚怀保,杨小林,叶红宇,等. 隧道衬砌混凝土爆破损伤累积规律试验研究[J]. 铁道学报,2018,40(3):132-136.
- [2] CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, YE Hong-yu, et al. Experimental study on blasting damage accumulation law of tunnel lining concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 132-136. (in Chinese)
- [3] 冯 涵,张学民,王立川,等. 周贤舜. 隧道钻爆法水封装药结构爆破引起振动计算分析[J]. 振动与冲击, 2020,39(7):93-100,124.
- [3] FENG Han, ZHANG Xue-min, QANG Li-chuan, et al. Calculation and analysis for water-sealed charge structure blasting vibration in tunnel drilling and blasting construction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 93-100, 124. (in Chinese)
- [4] 赵立财,余建星. 隧道穿越防护通道受不同钻爆方式作用下岩体动态响应分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2):211-218,233.
- [4] ZHAO Li-cai, YU Jian-xing. Analysis on rock dynamic responses for the tunnel excavation beneath crossing a protection channel under different blasting types[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 211-218, 233. (in Chinese)
- [5] 褚怀保,杨小林,叶红宇,等. 新浇混凝土爆破振动损伤累积规律模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9):2469-2475.
- [5] CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, YE Hong-yu. Simulation experimental research on damage accumulation law of new concrete under multiple blasting vibration loads[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2469-2475. (in Chinese)
- [6] 赵 旭,代志杰,黎若寒,等. 考虑围岩松动圈的隧道抗减震措施[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(9): 1027-1038.
- [6] ZHAO Xu, DAI Zhi-jie, LI Ruo-han, et al. Earthquake mitigation measures for tunnels considering loosen-zone in surrounding rock [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(9): 1027-1038. (in Chinese)
- [7] 单 梁,王 凯,范文昌,等. 特厚松软煤层巷道支护技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 87-92.
- [7] SHAN Liang, WANG Kai, FAN Wen-chang, et al. Study on roadway support technology of extra-thick and soft coal seam [J]. Mining R&D, 2020, 40(9): 87-92. (in Chinese)
- [8] 李允忠,王志亮,黄佑鹏. 循环爆破载荷下岩石累积损伤效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 47-53.
- [8] LI Yun-zhong, WANG Zhi-liang, HUANG You-peng. Numerical study of cumulative damage effect of rock under cyclic blast loading [J]. Blasting, 2019, 36(2): 47-53. (in Chinese)
- [9] 黄伟强,栾龙发,张智宇,等. 某金属矿山的爆破振动监测与分析[J]. 中国锰业, 2016, 34(1): 20-24.
- [9] HANG Wei-qiang, LUAN Long-fa, ZHANG Zhi-yu, et al. Monitoring and analysis on blasting vibration of a metal mine [J]. Chinese Manganese Industry, 2016, 34(1): 20-24. (in Chinese)
- [10] 王宏伟,张登强,姜耀东,等. 巷道围岩破碎区分布特征及其影响因素的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2):377-384.
- [10] WANG Hong-wei, ZHANG Deng-qiang, JIAN Gyao-dong, et al. Investigation on the characteristics of excavation damaged zone and numerical simulation of contributing factors [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 377-384. (in Chinese)
- [11] 陈秋南,黄小城,谢小鱼. 基于 Hoek-Brown 准则对围岩松动圈半径的推导及改进[J]. 应用力学学报, 2015, 32(2): 304-310, 357-358.
- [11] CHEN Qiu-nan, HUANG Xiao-cheng, XIE Xiao-yu. Derivation of the radius of the broken rock zone based on Hoek-Brown criterion and its improvement [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(2): 304-310, 357-358. (in Chinese)
- [12] 刘 刚,肖勇卓,朱俊福,等. 围岩松动圈理论计算方法的评述与展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1-13.
- [12] LIU Gang, XIAO Yong-zhuo, ZHU Jun-fu, et al. Overview and prospect on theoretical calculation method of broken rock zone [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1-13. (in Chinese)
- [13] 马其华,王宜泰. 声波法测试巷道围岩松动圈的现场应用[J]. 煤炭工程, 2009(8): 103-105.
- [13] MA Qi-hua, WANG Yi-tai. Field application of acoustic wave method to test roadway surrounding rock loose zone [J]. Coal Engineering, 2009(8): 103-105. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] YANG Yan-guo, FAN Nan. Experimental study on surrounding rock loosening circle by single-hole acoustic wave testing method [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 93-100. (in Chinese)