

# 爆破开挖过程中厂房围岩松动圈测试与分析

张新辉,尹健民,任贤斌

(长江科学院 岩基研究所,湖北 武汉 430010)

**摘要:**地下洞室在爆破开挖过程中由于围岩卸荷,形成一个沿开挖边界环状分布的松动圈。基于声波测试法,对某地下厂房一典型断面进行松动圈的测试。通过统计和观察岩体声波速度的量值变化和分布规律,讨论了单孔与跨孔声波测试的优缺点。结果表明,跨孔声波测试法受微小裂隙的影响小,能较单孔法更好地反映局部岩体波速。分析了爆破开挖参数对测试区围岩松弛深度的影响,通过调整优化爆破参数,使围岩松弛深度基本小于0.6 m,为岩体的稳定性分析、爆破参数优化及安全加固提供了参考依据。

**关键词:**松动圈;声波测试;松弛深度;爆破参数;爆破开挖

中图法分类号:TV542

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.11.009

地下洞室在施工开挖过程中,爆破造成围岩卸荷,导致洞周围岩松弛,使得洞周岩体出现微裂隙,形成一个沿开挖边界环状分布的松动圈。而围岩松动圈大小,会直接影响地下洞室围岩的稳定性<sup>[1]</sup>。声波的波速随介质裂隙的发育、密度的降低及声阻抗的增大而降低,并随应力和密度的增大而增加。因此,如测得的声波波速较高,则说明围岩完整性好;波速较低则说明围岩存在裂缝,有破坏发生。与未扰动岩层相比,围岩松弛层的波速会降低,可以此作为松弛层划分的标准<sup>[2]</sup>。

目前,通过损伤力学等方法可定性预测爆破对岩体的损伤范围并确定围岩松弛范围,但还未达到实际应用的程度。因此,本文从实际应用的角度,基于声波法对厂房爆破开挖过程中一典型断面的围岩松动圈进行测试和深入分析,为岩体的稳定性分析、爆破参数优化及安全加固提供参考依据。

## 1 松动圈测试及划分方法

松动圈范围的确定目前主要靠现场测试的手段,其中包括声波测试法、多点位移计法、地质雷达法、地震波法、电阻率法和渗透法等<sup>[3]</sup>。本次测试采用声波法来确定松动圈的范围,测试仪器为武汉岩海生产的

RS-ST01C 非金属超声检测仪,主要用于桩基或连续墙完整性检测、地质勘察、锚杆检测、混凝土结构强度和内部缺陷、表面裂缝的评定,具有较高的精度。

声波测试可获得各洞室所揭露岩体的声波速度和岩体声波速度的分布特征,为评价岩体完整性、划定岩体风化界线和卸荷界线及岩体分类提供依据,并确定洞壁的松动圈<sup>[4-6]</sup>。

单孔法是把一发双收换能器放置在钻孔内,通过声波发射换能器向周围介质发射声波,声波沿孔壁岩体传播,由两只接收换能器分别接收同一脉冲声波信号,记录声波在两接收换能器间的传播时间,两只接收换能器的间距除以声波初至时间差,即为接收换能器所在位置孔壁岩体的平均声速。跨孔法是利用相邻的两个钻孔进行声波穿透测试,其中一个钻孔放置发射换能器,另一个放置接收换能器。发射换能器在孔内向周围发射声波信号,在另一只孔内的接收换能器接收声波信号,记录声波传播时间,则两只换能器的间距除以声波传播时间,即为两只换能器间岩体的声速<sup>[7]</sup>。

理论上,要判定围岩松动圈,应在岩体开挖前后进行观测,取岩体开挖前原始状态的波速(本征波速)作为标准波速,则低于该波速的部位为松弛层<sup>[8]</sup>。若无

法获得本征波速,根据松动圈的声波测试原理,马建军基于各种波速曲线分析了松动圈的识别原则<sup>[9]</sup>。一般认为,当存在一个或多个峰值时说明在该处存在应力集中区,峰值波速甚至会超过原岩波速,通常以最高的峰值点对应的测点深度作为松弛层边界,最终通过各点的松弛深度确定洞室的围岩松动圈。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

乌东德水电站地处金沙江下游河段,坝址所处河段的右岸隶属云南省昆明市禄劝县,左岸隶属四川省会东县。本文声波测试位置位于右岸地下厂房,厂房尺寸为 333 m×30.5 m×89.8 m(长×宽×高),洞室拱顶高程 850 m,测试时开挖到 835 m 高程处。在下游侧边墙测试孔附近(桩号 YC1+066)可见一条延伸至拱顶的裂隙,裂隙宽 2~10 cm,中间夹泥层。测试区主要出露岩体为微风化~新鲜、中厚层~厚层灰岩,岩层倾向 175°~185°,倾角 70°~80°,轴线与岩层走向夹角约 20°~30°。

右岸地下主厂房中导洞开挖已完成,需进行第 I、II 层两侧扩挖,测试过程中分别在下流侧和上游侧边墙采用光面爆破开挖掘进,每次掘进深度为 4 m。每次开挖采用相同爆破参数:光爆孔 32 个,孔径 50 mm,孔深 3.8 m,孔距 50 cm,空气间隔装药,单孔药量 0.32 kg;辅助孔 22 个,孔径 50 mm,孔深 3.8 m,孔距 80 cm,耦合装药,单孔药量 1.44 kg;爆破孔 33 个,孔径 50 mm,孔深 3.8 m,孔距 100 cm,耦合装药,单孔药量 2.64 kg。总药量 129.04 kg,设计单响药量 31.68 kg,采用非电毫秒雷管微差起爆网络。

### 2.2 测试方案

测试区位于厂房一典型断面(桩号 YC1+063),布置 3 组声波孔,具体布置方法见图 1。A 组孔位于下游侧边墙,从爆区掌子面钻斜向的声波孔,穿过爆区到达保留壁面,穿过边墙壁面约 5 m,孔径 76 mm,包含 3 个相互平行的钻孔。施工过程中记录钻孔孔斜,孔间距约为 1.2 m,分别采用单孔法和跨孔法进行测试。B 组孔位于上游侧边墙,布置及测试方法与 A 组相似。C 组孔为单孔,布置在拱顶,自排水廊道钻孔进行测试,竖直向下,若出现穿孔现象,在拱顶采用高强度粘合材料进行 30~50 cm 的封堵,保证钻孔的存水能力。三组孔均采用孔内水耦合法进行测试,测试有效深度为孔底至孔口 5 m 处。岩体中裂隙较发育,应注意保水,若出现漏水现象,测试时应持续灌水,保证有效测试深度的存水量。整个测试过程持续 30 d,A

组孔进行了爆前及第 1~5 次爆破循环进尺的声波测试,B 组孔进行了爆前及爆后 5 次声波测试,C 组孔进行了爆后 5 次声波测试。

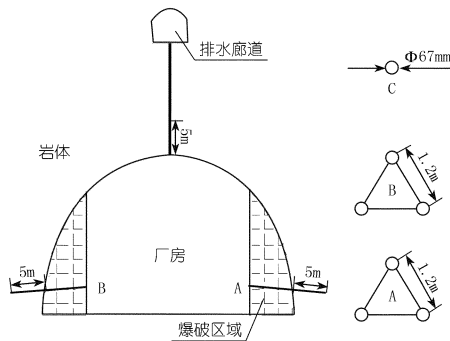


图 1 声波测试孔布置

此次测试主要目的是研究厂房扩挖过程中爆破掘进对测试区松弛深度的影响,以及爆后松弛深度随时间的变化规律,并就单孔法与跨孔法作对比分析,利用声波曲线图对测试区进行松动圈划分。

### 2.3 测试成果分析

#### 2.3.1 声波曲线对比分析

由于测试结果较多,选取了 A、B、C 三组孔中有代表性的数据,如图 2~4 所示。

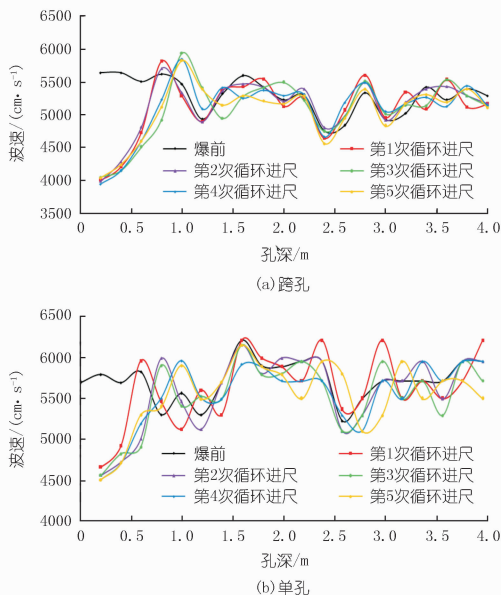


图 2 A 组声波测试曲线

测试结果表明,爆破开挖后波速沿孔深方向逐渐增大,经过应力集中区后又逐渐降低,最终趋于稳定。若测试段声波起伏较多、波速不稳定,则该段微小裂隙比较发育;若声波比较平稳,则该段岩体完整性较好;若声波有较大下降,则此处有较大裂隙或断层存在。如图 2 所示,在 2.2~2.4 m 孔深处岩体波速有较大幅度下降,经现场调查分析,主要是受上述延伸至拱顶的

大裂隙影响。随着爆破开挖振动的逐次影响,测试处裂隙区的波速有所降低,裂纹有所扩展,而应力集中区沿孔深方向有较小程度向内偏移。

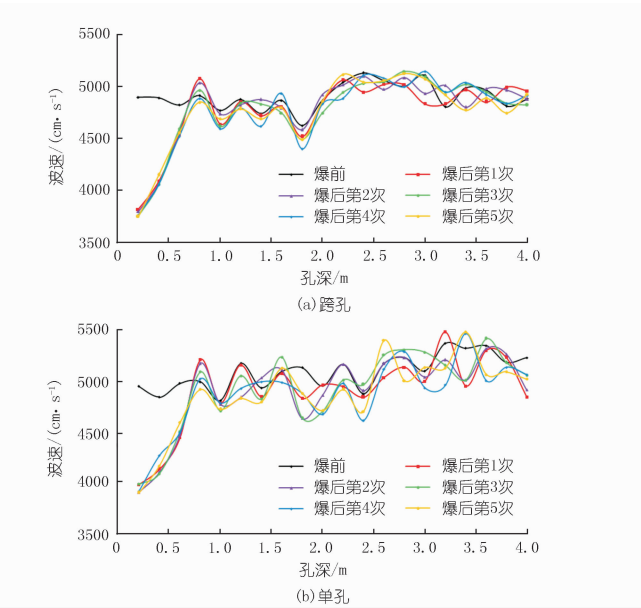


图 3 B 组声波测试曲线

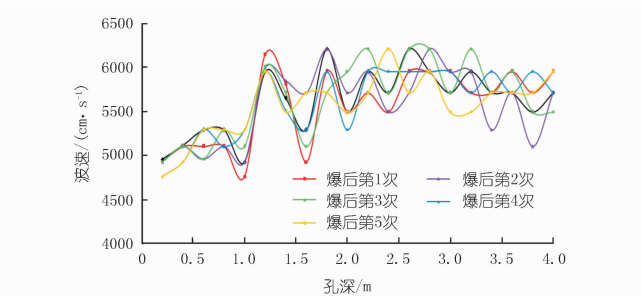


图 4 C 组单孔声波测试曲线

对比各组跨孔和单孔声波测试曲线图,并结合两种测试方法的特点与现场地质情况可知:同位置处单孔法测得的岩体平均波速比跨孔法测得的数值大;单孔法对岩体波速变化较为敏感,能够反映细小变化的影响,但波速起伏较大,前后测试曲线的拟合效果较差,所反映的岩体特征仅为孔壁范围内,受岩体局部不均匀性和局部微小裂隙的影响较大;跨孔法测试的路径较远,可反映较大面积岩体的变化特征,波速起伏相对较小,比较平稳,前后测试曲线的拟合效果较好,但易受区域构造的影响且测试较麻烦。因此,若要对局部的松弛范围进行分析,采用跨孔法更为稳定可靠,而单孔法则对微小变化比较敏感且测试方法简便。

2.3.2 爆破循环与时间对松弛深度的影响

图 2 给出了 A 组孔在爆破开挖过程中随着掌子面的不断推进,其松弛深度的变化情况,爆破前测量的结果代表着隧洞断面开挖前的本征波速。对比爆破开挖过程中 A 组跨孔声波曲线可得,第 1 次循环进尺爆

破成形阶段形成的应力集中区比较靠近厂房侧壁,松弛深度约 0.8 m,第 2 次循环进尺后保持不变,第 3 次循环进尺后往纵深略有偏移,松弛深度约 1 m,并保持在最终位置。对比 A 组单孔曲线可得,第 1 次循环进尺后形成的松弛深度约 0.6 m;第 2 次循环进尺后略有偏移,松弛深度约 0.8 m;第 3 次循环进尺后保持不变;第 4 次循环进尺后松弛深度增长至 1 m 左右,并保持在最终位置,其后的爆破施工不再影响松动圈的形态,这一规律可作为围岩松动圈测量位置和时机选择的依据。因此,对于该侧边墙,根据声波曲线图,4 次循环进尺后松弛深度基本保持不变,一般情况下只要保证测孔离掌子面大于 12 m 就可以测得最终的松动圈形态。

图 3 给出了 B 组孔在一次爆破开挖后随着时间的不断增长,其松弛深度的变化情况。对比 B 组跨孔爆破前后声波曲线可得,松弛深度基本稳定在约 0.8 m,受时间变化的影响很小,但随着时间增长,应力集中区的应力逐渐释放,岩石波速有所下降并在爆后第 3 次之后(爆后第 12 天)基本达到稳定。B 组单孔松弛深度最终稳定在约 0.8 m,跨孔变化规律与之类似。

图 4 给出了 C 组孔在开挖完成较长时间后松弛深度随着时间的变化情况。拱顶的松弛深度与波速在最初测量时已达到稳定,基本保持不变,深度约为 1.2 m。

2.3.3 松动圈的界定

根据上述单孔法与跨孔法的测试结果,在围岩松动达到稳定后,A 组孔的松弛深度为 1 m,B 组孔的松弛深度为 0.8 m,C 组孔的松弛深度为 1.2 m。由 A、B、C 三组声波孔所确定的松弛深度,可近似得到厂房典型断面的围岩松动圈:平均松弛深度为 1 m,其中拱顶松弛深度最大,边墙次之,与大量工程实践中总结的洞室岩体松弛规律基本相符。

2.3.4 开挖爆破参数的调整

根据开挖设计的要求,考虑松弛效应对下一层开挖的影响,围岩的松弛深度应维持在 0.6 m 以下。在测试完成后,参考测试结果,施工单位对爆破参数进行了适当调整:减小了单响药量;增加了光爆孔的个数,同时缩小了其间距;重新设计了更为合理的起爆网络。对调整后爆破开挖的围岩松弛进行测试,其松弛深度基本小于 0.6 m,达到了参数优化的目的。

3 结 论

(1) 相对于单孔法,用跨孔法测得的两孔之间岩体波速的波动相对较缓,受微小裂隙的影响较小,能更

为精确地反映局部岩体的波速,爆破前后测试曲线的拟合效果更好,而单孔法仅测试了孔壁较浅部分的岩体波速,有一定局限性,因此针对本文局部松弛范围的有效分析,应优先选取跨孔声波数据作为松动圈最终的界定依据。

(2) 厂房围岩的松弛深度主要受爆破开挖的影响,由测试结果可知,下游侧边墙在经过 4 次循环进尺后,松弛深度基本保持不变,其后的爆破施工不再影响松动圈的形态,这一规律可作为围岩松动圈测量位置和时机选择的依据。松弛深度随着时间的变化很小,但随着时间的推移,应力集中区的应力逐渐释放,岩石波速有所下降并达到稳定。

(3) 在围岩松动达到稳定后,A、B、C 三组声波孔所确定的松弛深度分别为 1,0.8,1.2 m,平均松弛层厚度为 1 m,其中拱顶松弛深度最大,边墙次之,符合大量工程实践中岩体的松弛规律。

(4) 通过对爆破参数的合理调整,后续爆破开挖围岩松弛深度基本小于 0.6 m,达到了参数优化的目

的。

参考文献:

[1] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001:1-3.

[2] 赵君. 巷道围岩松动圈测试技术与应用[J]. 矿业快报,2004,(12):17-18.

[3] 刘康和. 浅析声波测试中的几个问题[J]. 人民长江,1995,26(8):21-24.

[4] 李月,刘立,梁伟,等. 岩石松动层声波测试技术[J]. 西华大学学报:自然科学版,2006,25(2):107-108.

[5] 蔡成国,孟照辉,熊昌盛. 围岩松动圈地球物理方法检测[J]. 西部探测矿工程,2004,(7):90-92.

[6] 郝守玲. 声波速度测量的频率和尺度效应分析[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(5):15-19.

[7] 程武伟,沈方铝. 洞室声波测试及数据处理技术[J]. 物探化探计算技术,2010,32(1):18-19.

[8] 肖国强,章毅宝,王法刚. 声波法在三峡工程永久船闸边坡岩体卸荷松弛监测中的应用[J]. 岩土力学,2006,27(10):1236-1239.

[9] 马建军. 软岩巷道在周边爆破作用下的稳定性研究[D]. 北京:北京理工大学,2004.

(编辑:郑毅)

Test and analysis of loose circle of powerhouse’s surrounding rock in blasting excavation

ZHANG Xinhui, YIN Jianmin, REN Xianbin

(Rock foundation Research Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In the underground cavern’s excavation, blasting will bring about unloading on the surrounding rock and form a loose circle in annular distribution along the excavation border. Based on sonic wave testing, the loose circle of a typical cross section in an underground powerhouse was tested. By counting and observing the quantitative changes and distribution law of the acoustic velocity of rock mass, we discussed the advantages and disadvantages of sound wave test in single – hole and cross – hole respectively. It demonstrates that the wave test in cross – hole test could better reflect the rock wave velocity than that in single – hole test, as the influence of micro fissures of rock is smaller. Also we analyzed the impact of blasting excavation on relaxation depth of rock mass in the test areas, and successfully controlled the relaxation depth less than 0.6m by optimizing the blasting parameters, thus providing basis for stability analysis of rock mass, optimization of blasting parameter and safety strengthening in rock excavation construction.

**Key words:** loose circle; sound wave testing; relaxation depth; blasting parameter; blasting excavation