

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.02.011

循环爆破作用下岩体的不同步累积损伤测试方法*

赵春生^① 费鸿禄^② 胡刚^②

① 中铁十八局集团第二工程有限公司(河北唐山,064000)

② 辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

[摘要] 为了提高循环爆破载荷作用下岩体累积损伤测试方法的精确度、预测结果的可信值以及控制标准的规范化,提出不同步累积损伤测试方法。采用理论分析与现场实践相结合的方法,基于5次循环爆破载荷作用下不同测孔深度处声波速度的变化规律,依据损伤度与声波速度的关系式,对比分析2种测试方法的累积损伤效应。研究表明:循环爆破载荷仅对测孔孔口至1.6 m处岩体区域产生损伤效应,并且垂直于掌子面的剖面区域所受的累积损伤最为严重;不同步测试方法所得的岩体累积损伤效应更加明显,且累积损伤-爆破次数关系曲线更加光滑,由此证明,不同步累积损伤测试方法能够提高测试精度,增加拟合曲线的可信程度,不仅为支护厚度提供依据,而且为支护方向提供参考。

[关键词] 爆破;隧道;不同步;累积损伤;循环;测试方法

[分类号] TD235.1;O382+.2

Asynchronous Accumulative Damage Testing Method of Rock under Cyclic Blasting

ZHAO Chunsheng^①, FEI Honglu^②, HU Gang^②

① No. 2 Engineering Co., Ltd., China Railway Eighteenth Bureau Group (Hebei Tangshan, 064000)

② Institute of Blasting Technique, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT] In order to improve the accuracy of accumulative damage testing method for rock under cyclic blasting load, the credibility of prediction results and the standardization of control standards, a testing method of unsynchronized accumulative damage was proposed. In combination of theoretical analysis with field practice, the variation rule of acoustic velocity at different depths of measuring hole was clarified under the five cyclic blasting loads. Based on the relation between damage degree and acoustic velocity, the accumulative damage effects of the two testing methods were compared. The results show that the cyclic blasting load only produces failure on the rock area from the hole opening extending to 1.6 m, and the accumulative damage is the most serious in the 2[#]-3[#] section area. The accumulative damage effect of rock obtained by unsynchronized testing method is more significant and the accumulative damage versus blasting time curve is smoother, which proves that unsynchronized accumulative damage testing method can improve the testing accuracy and increase the credibility of fitting curve. The testing method of unsynchronized accumulative damage not only provides the basis for the support thickness, but also offer the reference for the support direction.

[KEYWORDS] blasting; tunnel; asynchrony; accumulative damage; cyclic; test method

引言

钻爆法广泛应用于矿山煤炭开采、铁路隧道开挖、水利工程建设等领域^[1],在破碎和抛掷岩体的同时,不可避免地会对周围岩体产生扰动和破坏^[2],循环爆破累积作用是导致岩体损伤并最终失

稳的主要原因^[3]。

针对循环爆破载荷作用下岩体的累积损伤效应,国内外学者进行了大量研究^[4-10]。杨国梁等^[11]利用超声波测试技术对巷道侧壁的损伤规律进行研究,揭示了爆破振动下岩体的损伤累积规律,发现工作面推进到10~20 m时损伤度急剧增长;闫长斌^[12]基于快速傅里叶变换探讨了声波在爆破损伤

* 收稿日期:2018-10-08

第一作者:赵春生(1969-),男,高级工程师,主要从事桥梁和隧道方面的技术与管理工。E-mail:blgsd10htd@163.com

通信作者:胡刚(1990-),男,博士研究生,主要从事岩土工程与爆破工程方面的研究。E-mail:1125019679@qq.com

岩体中传播时的衰减特性,分析了声波主频等声学参数随爆破次数的变化特性;费鸿禄等^[13]结合岩体声速和爆破振动测试数据的对比分析表明,多次爆破振动随岩体声速的降低呈指数关系衰减,并确定了边坡的损伤阈值;邢东升等^[14]运用智能声波仪测试了巷道围岩在爆破振动作用下的累积损伤,结果发现,多次爆破振动的累积损伤作用仅增加围岩体的破碎程度,并未扩大损伤范围;中国生等^[15]按照相似比理论建立 1 : 15 的试验模型,通过模拟隧道爆破开挖方式,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。以上研究全部依据声速变化分析岩体在循环爆破载荷下的累积损伤效应,但针对累积损伤测试方法适用性及精确度的研究却鲜有报道。

本文中,根据 5 次循环爆破载荷作用下不同测孔深度处的损伤效应规律,对比传统累积损伤测试方法,证明不同步累积损伤测试方法的合理性及准确性。

1 工程概况

新建铁路福州至平潭段新鼓山隧道穿越福州市鼓山风景区,进口位于福州市东山村东侧,距离东山村约 400 m^[4],出口位于福州市东山村北侧的山坡上;隧道穿越的山岭近南北走向,中线左侧山峰陡峭,右侧为马尾城区,最大埋深为 393 m;新鼓山隧道起讫里程 DK5 + 095 ~ DK13 + 294,全长 8 199 m,具体平面图见图 1。

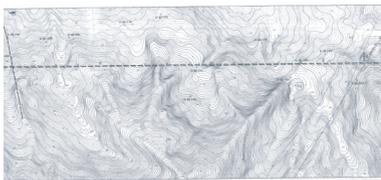


图 1 隧道平面图
Fig. 1 Tunnel plan

新鼓山隧道在Ⅲ级、Ⅳ级围岩处采用台阶法进行爆破掘进,使用 2 号岩石乳化炸药,药卷直径 32 mm,1 ~ 15 段毫秒导爆管雷管;炮孔施工采用气腿凿岩机,孔径为 42 mm,孔深为 2.0 ~ 2.5 m,且考虑 10% ~ 15% 的超深,具体炮眼布置如图 2 所示。

2 现场声波测试试验

采用 NM-4A 非金属超声检测分析仪在距离隧

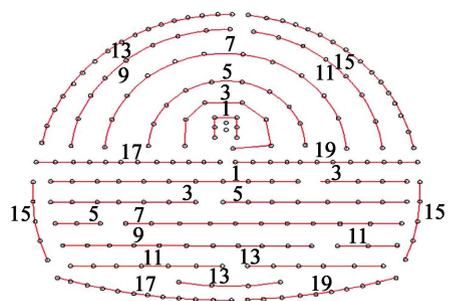


图 2 炮眼布置图
Fig. 2 Blasting holes layout

道掌子面 5 m 处进行声波测试试验;本次试验中共布置 3 个测孔,按照“┌”、“└”、“┐”和“┑”形式分布,由于篇幅有限,仅根据“┑”布孔形式进行循环爆破作用下岩体累积损伤效应分析^[16],具体声波试验测孔布置如图 3 所示,所取平面为隧道侧壁。

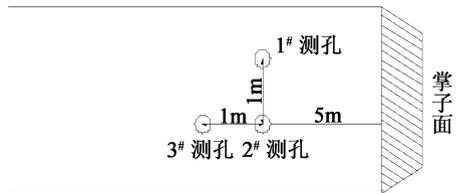


图 3 声波试验测孔示意图
Fig. 3 Holes arrangement of acoustic test

声波试验测孔孔深为 3.4 m,测孔 1# 与测孔 2#、测孔 2# 与测孔 3# 间距为 1.0 m,由此测孔 1# 与测孔 3# 间距约为 1.4 m。其中,1#-2# 剖面平行于掌子面;2#-3# 剖面垂直于掌子面;1#-3# 剖面与掌子面呈 45° 夹角。依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—99),满足声波测试试验要求^[17],测孔内应注满水,且测孔与隧道侧壁呈 65° ~ 75° 夹角。

2.1 传统测试方法

声波测试技术是循环爆破载荷作用下岩体累积损伤效应分析最简便、经济的方法之一^[18],传统测试方案的步骤如下:

- 1) 为了控制声波测试标准,消除初始损伤对循环爆破作用下岩体累积损伤效应分析的影响,需要增加首次爆破前声波测试;
 - 2) 选定相邻 2 个测孔,将声波发射器和接收器分别放入测孔的孔底;
 - 3) 测定测孔所在剖面区域的孔底声波速度,为了减少试验误差,声波测试数据不得少于 3 个,且取其平均值为最终声速;
 - 4) 沿孔深将声波发射器和接收器从孔底同步向上提升 0.2 m,再进行步骤 3),直至孔口为止。
- 依据测孔孔深和提升间距,任意 2 个测孔剖面

区域共进行16次声波测试,具体测试如图4所示。

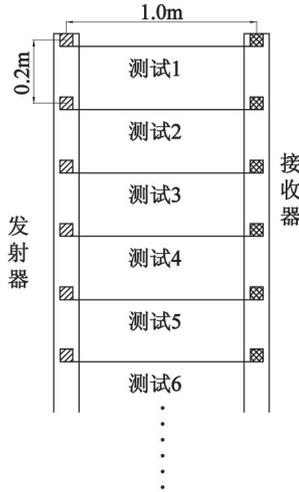


图4 传统声波测试方法

Fig.4 Old method of acoustic test

2.2 不同步声波测试方法

隧道掘进过程中,爆破载荷近似以球面波的形式向外传播,由于声波试验测点距离爆源较近,测孔剖面所在区域所受的损伤效应不应该简化为垂直于掌子面或平行于掌子面,而是以上方向损伤效应的叠加;由此,在传统声波测试方法的基础上,提出不同步声波测试技术。因为采用相同的测试仪器,且超声波发射为球形传播,所以忽略仪器方向性误差带来的影响。

不同步声波测试方法步骤如下:

1) ~3) 同传统声波测试方法;

4) 沿孔深将声波接收器向上提升0.2 m,声波发射器位置保持不变,测量声速;

5) 声波发射器向上提升0.2 m,同声波接收器位置水平,此时声速测量同传统声波测试方法;

重复步骤4)~步骤5),直至孔口为止;具体测试示意图如图5所示(不同提升间距或提升顺序能够改变测试示意图)。

3 岩体损伤效应分析

3.1 孔深与声速规律分析

按照以上的测试方案,针对测孔所在区域共进行了5组循环爆破载荷作用下声波测试试验,所得声速与孔深的关系曲线如图6所示。

通过分析特定剖面不同爆破次数的孔深与声速曲线,可以得出:

1) 在孔口段区域,声速与孔深呈现正相关关系,但当孔深达到某一特定数值时,随着孔深的增

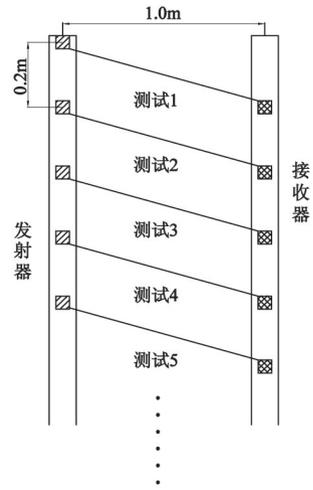
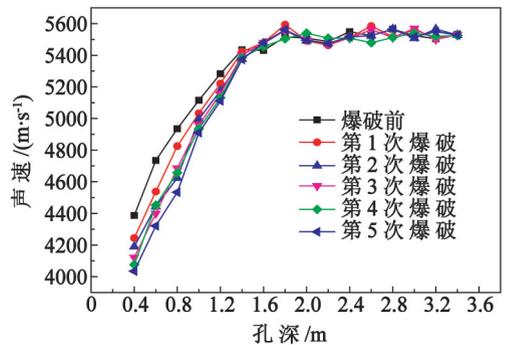
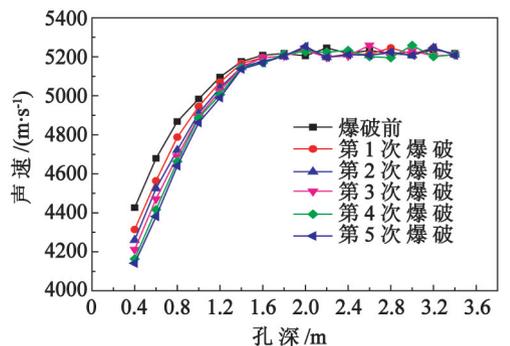


图5 不同步声波测试方法

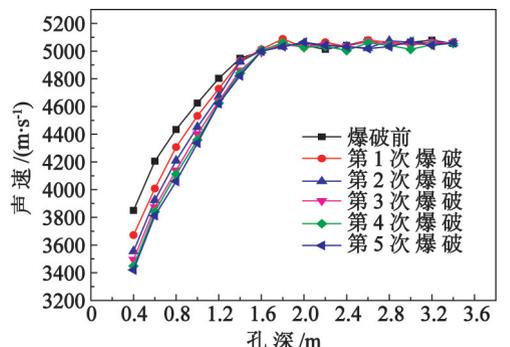
Fig.5 Asynchronous method of acoustic test



(a) 1#-2#剖面



(b) 1#-3#剖面



(c) 2#-3#剖面

图6 声速与孔深的关系

Fig.6 Relationship between acoustic velocity and hole depth

加,声速却不再增长,而是呈现小幅度震荡性的平稳变化。

2) 从 1[#]-2[#]剖面声速-孔深曲线的可知,当孔深达到 1.6~1.8 m 时,声速不再随孔深增加而增加;1[#]-3[#]剖面在孔深为 1.4~1.6 m 时出现拐点,2[#]-3[#]剖面的拐点为 1.6~1.7 m。

3) 随着循环爆破次数的增加,声速呈现下降趋势,但在孔深拐点处之后,声速不再因爆破次数的变化而变化。

3.2 岩体损伤规律分析

循环爆破载荷作用下,岩体损伤度 D 与声速降低率 η 之间的关系^[19]为

$$D = 1 - \frac{E_{i+1}}{E_i} = 1 - \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \right)^2 = 1 - (1 - \eta)^2. \quad (1)$$

式中: E_i 为此次爆破前岩体的弹性模量, GPa; E_{i+1} 为此次爆破后岩体的等效弹性模量, GPa; v_i 为此次爆破前岩体的声速, m/s; v_{i+1} 为此次爆破后岩体的声速, m/s。

按照式(1)可以计算测孔特定剖面岩体在爆破载荷后的损伤度;根据上述分析,当孔深达到拐点 1.6 m 之后,声速趋于特定数值,也就是损伤度趋于特定数值,由此可以得出,循环爆破载荷作用不会对大于 1.6 m 孔深处的岩体造成损伤破坏。

因此,重点研究孔口至孔深拐点处岩体的损伤效应,由于篇幅有限,仅依据孔深 1 m 处的损伤度进行分析。图 7 为孔深 1 m 处特定剖面岩体损伤度与爆破次数的关系曲线。

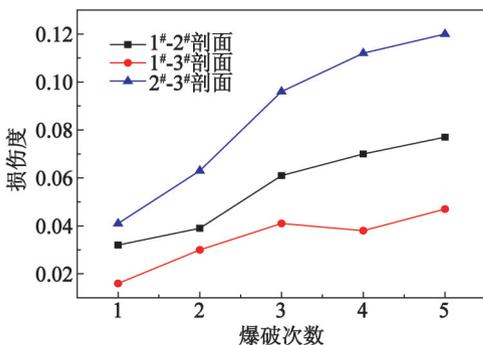


图 7 1 m 孔深处岩体损伤度与爆破次数的关系

Fig. 7 Relationship between damage degree and blasting times in depth of 1m

通过分析图 7 可以得出:在同一次爆破载荷作用下,2[#]-3[#]剖面岩体的损伤度明显大于 1[#]-2[#]、1[#]-3[#]剖面岩体的损伤度,说明爆破载荷对垂直于掌子面岩体的损伤破坏程度最为严重,进一步说明爆破载荷对岩体的损伤呈现各向异性;1~3 次爆破作用下损伤度曲线的斜率明显大于 3~5 次爆破作用后的

损伤度曲线斜率,由此说明随着爆破次数的增加,同等炸药能量的爆破作用对岩体的损伤程度在减弱。

4 不同步累积损伤测试方法

鉴于以上的研究内容:测孔孔口至孔深拐点 1.6 m 处岩体会承受爆破载荷的损伤作用,并且 2[#]-3[#]剖面所受的损伤破坏程度最为严重;由此按照不同步声波测试方法对孔深 0~1.6 m 的 2[#]-3[#]剖面进行循环爆破载荷的声波数据测试。

岩体在循环爆破载荷作用下的累积损伤 D_a 的计算公式为

$$D_a = 1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^2. \quad (2)$$

式中: v_0 为循环爆破前岩体的声速, m/s; v_n 为第 n 次爆破载荷作用后岩体的声速, m/s。

为了便于分析岩体在循环爆破载荷作用下的累积损伤效应,将自变量孔深改为距孔底距离,并且按照式(2),对 2[#]-3[#]剖面由传统测试方法(旧方法)与不同步声波测试方法(新方法)所得的声速进行计算,所得岩体累积损伤^[20]如表 1 所示。

为了进行传统累积损伤测试方法与不同步累积损伤测试方法的对比分析,5 次爆破作用后岩体的累积损伤如图 8 所示。由于篇幅有限,仅分析孔深 1.0 m(距孔底距离 2.4 m)岩体累积损伤与爆破次数的规律,具体如图 9 所示。

通过表 1 及图 8 可以得出:岩体在 5 次循环爆破作用后,岩体累积损伤随距孔底距离的增加呈现递增的趋势,且 2 种累积损伤测试方法变化趋势相同,但是不同步测试方法所得的岩体累积损伤明显大于传统测试方法所得的累积损伤,说明采用不同步累积损伤测试方法可以提高测试精度,获得更加准确的岩体累积损伤效应,优化隧道施工安全评价标准。

通过表 1 及图 9 可以发现:随着爆破次数的增加,声速会呈现递减趋势,但累积损伤依然会呈现递增趋势;并且不同步累积损伤测试方法所得曲线更加光滑,说明拟合曲线可信度较高,可以更加精准地预测累积损伤效应。

5 结论

1) 当测孔孔深超过 1.6 m 时,声波速度趋于常数,损伤度近似为零,由此得出循环爆破载荷仅对测

表1 2种方法测试的岩体累积损伤

Tab. 1 Accumulative damage tested by the two methods

距孔底 距离/m	第1次爆破		第2次爆破		第3次爆破		第4次爆破		第5次爆破	
	旧方法	新方法								
1.8	0.002	0.002	0.003	0.004	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012
2.0	0.003	0.004	0.013	0.015	0.028	0.030	0.034	0.036	0.035	0.038
2.2	0.032	0.033	0.062	0.063	0.078	0.081	0.089	0.090	0.088	0.092
2.4	0.045	0.046	0.091	0.094	0.120	0.124	0.132	0.139	0.147	0.152
2.6	0.076	0.077	0.110	0.113	0.163	0.166	0.188	0.191	0.181	0.187
2.8	0.101	0.102	0.141	0.144	0.196	0.199	0.223	0.227	0.211	0.225
3.0	0.128	0.129	0.183	0.188	0.220	0.225	0.256	0.261	0.262	0.277

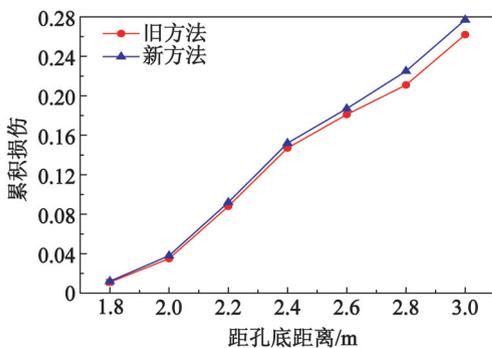


图8 累积损伤与距孔底距离的关系

Fig. 8 Relationship between accumulative damage and distance from the bottom of the hole

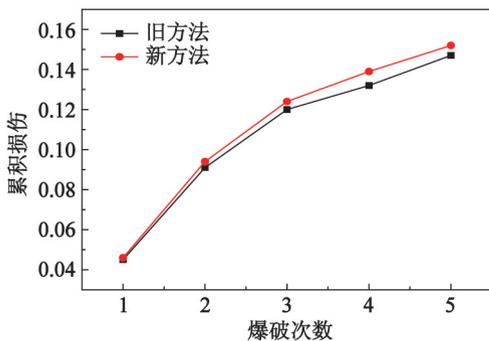


图9 累积损伤与爆破次数的关系

Fig. 9 Relationship between accumulative damage and blasting times

孔口至1.6 m所在区域产生累积损伤效应,也为隧道施工支护厚度提供参考依据。

2) 同等条件爆破载荷作用下,垂直于掌子面的剖面区域所受的累积损伤明显大于平行于掌子面的剖面区域,损伤效应的各向异性为隧道施工支护方向提供重点。

3) 相比于传统累积损伤测试方法,不同步累积损伤测试方法具有较高的精确度,不仅可以增加累积损伤预测的可信度,而且能够优化累积损伤控制标准。

参考文献

- [1] 褚怀保,叶红宇,杨小林,等. 基于损伤累积的爆破振动传播规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 173-177.
CHU H B, YE H Y, YANG X L, et al. Experiments on propagation of blasting vibration based on damage accumulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 173-177.
- [2] 罗忆,李新平,徐鹏程,等. 考虑累积损伤效应的围岩变形特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3041-3048.
LUO Y, LI X P, XU P C, et al. Characteristic study of surrounding rock mass deformation considering accumulative damage effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3041-3048.
- [3] 孟凡兵,林从谋,蔡丽光,等. 小净距隧道爆破开挖中夹岩累积损伤计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1491-1494,1499.
MENG F B, LIN C M, CAI L G, et al. Cumulative damage evaluation of clip rock in small-distance tunnels caused by blasting excavation and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1491-1494, 1499.
- [4] 费鸿禄,张超逸,洪陈超,等. 全断面与台阶法爆破作用下围岩的振动特征[J]. 爆破器材, 2017, 46(3): 52-56.
FEI H L, ZHANG C Y, HONG C C, et al. Dynamic response of surrounding rock under full face or bench blasting excavation[J]. Explosive Materials, 2017, 46(3): 52-56.
- [5] 胡帅伟,陈士海. 考虑爆破瞬态卸荷的深部岩巷损伤范围研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 936-944.
HU S W, CHEN S H. Study on damage zone of deep rock tunnel considering transient blasting unloading effect

- [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 936-944.
- [6] RATHORE S S, BHANDARI S. Damage assessment in splittable limestone blocks by laboratory scale blast design[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2007, 55(6): 165-171.
- [7] 潘城, 赵光明, 孟祥瑞. 爆炸荷载作用下围岩累积损伤效应的数值分析[J]. 爆破, 2016, 33(1): 30-33, 44.
PAN C, ZHAO G M, MENG X R. Numerical analysis of surrounding rock cumulative damage under explosion loading[J]. Blasting, 2016, 33(1): 30-33, 44.
- [8] MEGLIS I L, CHOW T M, MARTIN C D, et al. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 25-34.
- [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.
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.
- [10] 刘红岩, 王根旺, 刘国振. 以损伤变量为特征的岩石损伤理论研究进展[J]. 爆破器材, 2004, 33(6): 25-29.
LIU H Y, WANG G W, LIU G Z. Research development of rock damage theory characterized by damage variable[J]. Explosive Materials, 2004, 33(6): 25-29.
- [11] 杨国梁, 杨仁树, 车玉龙. 周期性爆破振动下围岩的损伤累积效应[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增1): 25-29.
YANG G L, YANG R S, CHE Y L. Damage accumulative effect of surrounding rock under periodic blasting vibration[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Suppl. 1): 25-29.
- [12] 闫长斌. 基于声波频谱特征的岩体爆破累积损伤效应分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2721-2727, 2745.
YAN C B. Analysis of cumulative damage effect of rock mass blasting based on acoustic frequency spectrum characters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2721-2727, 2745.
- [13] 费鸿禄, 赵昕普. 爆破振动对岩质边坡累积损伤影响实验研究[J]. 爆破, 2009, 26(4): 1-3, 21.
FEI H L, ZHAO X P. Experimental study on cumulative damage in rock slope caused by blasting vibration[J]. Blasting, 2009, 26(4): 1-3, 21.
- [14] 邢东升, 王李管, 刘晓明. 基于声波测试的爆破震动对巷道围岩体累积损伤分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 108-114.
XING D S, WANG L G, LIU X M. Using sonic testing method to study cumulative damage of surrounding rock under blasting vibration[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2): 108-114.
- [15] 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.
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.
- [16] 费鸿禄, 张国辉. 多次爆破荷载作用下大荒沟小净距隧道围岩岩体位移响应[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(1): 91-97.
FEI H L, ZHANG G H. Displacement response of Da-huanggou surrounding rock with small clearance under blast loads[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(1): 91-97.
- [17] 中华人民共和国电力工业部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—99[S]. 1999.
Ministry of Power Industry of PRC. Standard for tests method of engineering rock masses: GB/T 50266—99[S]. 1999.
- [18] 费鸿禄, 苑俊华. 基于爆破累积损伤的边坡稳定性变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3868-3877.
FEI H L, YUAN J H. Study of slope stability based on blasting cumulative damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl. 2): 3868-3877.
- [19] 张丽华, 陶连金, 李晓霖. 节理岩体地下洞室群的地震动力响应分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(2): 158-162.
ZHANG L H, TAO L J, LI X L. Dynamic response analysis of large underground excavation in jointed rock[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(2): 158-162.
- [20] 费鸿禄, 杨卫风, 杨智广, 等. 金属矿山回采巷道围岩在多次爆破下的损伤规律研究[J]. 爆破, 2012, 29(4): 38-41, 94.
FEI H L, YANG W F, YANG Z G, et al. Damage law research of stoping surrounding rock under repeated blast loading[J]. Blasting, 2012, 29(4): 38-41, 94.