

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.004

水下爆炸荷载下类岩石材料的累积损伤试验研究*

司剑峰^{a,b}, 钟冬望^{a,b}

(武汉科技大学 a. 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室; b. 理学院, 武汉 430081)

摘要: 水下爆破工程施工中, 炸药爆炸产生的水中冲击波会对临近的预保留岩体或周边桥墩等建构物产生一定损伤, 这种损伤在多次循环作业过程中会产生损伤积累。为研究水下类岩石材料的损伤累积机理及规律, 采用小当量药量水下爆炸产生的冲击荷载, 循环作用于高强石膏粉浇模成型的标准试样上。通过高速摄影机及水下冲击波测试系统记录和测定了荷载作用于试样上的高速时程变化过程, 并对损伤后的试样进行了单轴压缩试验, 通过 σ - ε 曲线, 分析了试样随损伤次数的累积损伤演化过程及机理, 得到了水下类岩石材料在水下冲击波循环荷载下的累积损伤规律。可为水下爆破中对预保留岩体或建构物安全防护提供参考。

关键词: 水下爆破; 高速摄影; 水下冲击波测试; 累积损伤; 单轴压缩

中图分类号: O625 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0021-05

Experimental Study on Cumulative Damage of Rock-like Materials under Underwater Explosion Loading

SI Jian-feng^{a,b}, ZHONG Dong-wang^{a,b}

(a. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process;

b. College of science, Wuhan University of science and technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In the construction of underwater blasting engineering, structures such as pre-reserved rock masses or surrounding bridge piers will be damaged under the impact of water shock waves generated by the explosion. This kind of damage will be accumulated during multiple cycles of operations. In order to study the damage accumulation mechanism of underwater rock like materials, the impact loads produced by underwater explosions with small equivalent explosive charges were used to circularly act on the standard specimen casted by high-strength gypsum powder. The high-speed time history curves of the load acting on the specimens were recorded by a high-speed camera and an underwater shock wave test system, and uniaxial compression tests were carried out on the samples after damage. Through the σ - ε curve, the cumulative damage evolution process and mechanism of the specimen with the number of damages were analyzed and the cumulative damage law of underwater rock-like materials under the cyclic shock wave loads is obtained. It can provide reference for the safety protection of pre-reserved rock mass or buildings in underwater blasting.

Key words: underwater blasting; high speed photography; underwater shock wave test; cumulative damage; uni-axial compression

收稿日期: 2020-04-19

作者简介: 司剑峰(1987-), 男, 湖北省武汉人, 工程师、硕士, 主要从事爆炸动力学及其应用方向研究, (E-mail) 674824263@qq.com。

通讯作者: 钟冬望(1962-), 男, 湖北省武汉人, 教授、博士, 主要从事工程爆破、爆破安全方向研究, (E-mail) 1057831589@qq.com。

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20181109); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室(武汉科技大学)开放基金(Y201717)

水下爆破是水下基础建设的重要方法, 广泛应用于航道疏浚、基坑开挖等。在爆破过程中, 炸药爆炸产生的水中冲击波是水下爆破工程中最重要危害效应^[1]。由于水介质密度远大于空气, 水中冲击

波在传播过程中不易衰减,其危害作用远高于空气冲击波,其作用于预保留岩石或水下桥墩等建构物时会产生较强的损伤破坏。在多次爆破荷载作用下,水中冲击波造成的损伤持续叠加,对保留岩体或者保护对象而言其所受载荷形式也演变为间断的多次循环爆炸荷载,其损伤过程也变成了一个累积的损伤过程^[2]。因此研究水下类岩石材料在循环爆破冲击荷载作用下的累积损伤效应具有重要意义。

多次循环爆破作用下的水下岩石或类岩石材料的损伤累积是一个复杂的过程。在爆炸冲击波作用下一方面会产生新的裂纹,同时原有裂纹也得到扩展延伸;在冲击波多次循环作用下,材料内部的裂纹数量、长度均不断增加,裂纹之间也可能逐渐贯通连接,形成大的主裂缝和裂缝群,造成材料的损伤程度逐渐增加^[3]。此外,冲击波在裂纹处会发生不同方向的透射、反射等,裂纹在冲击波作用下也会产生不同程度的闭合对冲击波具有一定的吸能作用。岩石或类岩石材料裂缝中由于水介质的作用会使该过程变得更为复杂。针对该问题,国内外学者对岩石材料在爆炸荷载作用下的累积损伤和水中爆炸冲击波的传播、损伤作用及防护方面做了大量工作,然而对岩石或类岩石材料在水下爆破荷载下的累积损伤方面研究较少。安徽理工大学陈亚楠等在现场利用单孔声波测试仪和地质雷达对芦岭矿完成了10次爆破生产测试,同时结合数值模拟方法对多次爆破振动下岩体的累积损伤效应进行了研究^[4]。李允忠、王志亮等通过数值计算方法研究了岩石循环爆破荷载下的累积损伤演化与单次爆破的异同,并得出在损伤区中部范围内,岩石累积损伤增量受循环爆破荷载叠加作用的扰动较大^[5]。金解放、李夕兵等系统、深入地探索了静载荷与循环冲击组合作用下岩石疲劳力学性能及其影响因素,建立了岩石损伤累积演化模型,并探索了静载荷对岩石损伤累积的影响^[6]。李裕春等有限元软件模拟和水中实爆实验研究了浅层水中冲击波与混凝土墩的相互作用,对冲击波作用下混凝土墩的内部应力分布、墩面压力特性以及混凝土材料破坏等与结构动态响应相关的方面进行了分析^[7]。彭亚雄等通过现场试验研究了水下钻孔爆破水击波特性及传播规律和气泡帷幕削压效果^[8]。

根据相似理论及模型材料选取原则,模型试验的材料应选用低弹性、低强度、高容重材料,但有时也不能完全满足相似条件^[9]。爆破类试验研究中常用水泥或石膏浇铸模型用以模拟类岩石脆性材料^[10]。采用高强石膏粉浇模形成标准柱形试样,

并以0.5 g炸药水下爆炸产生的冲击波荷载循环作用在试样一端,通过高速摄影机及水下冲击波测试系统测定并记录冲击损伤过程,最后通过分析不同次数冲击荷载损伤作用后试样的单轴压缩应力应变曲线,得到了其损伤演化规律。

1 损伤理论

在单轴压缩条件下,根据Lemaitre的应变等效原理和有效应力概念^[11],定义损伤变量为

$$D = 1 - \bar{E}/E \quad (1)$$

式中: E 和 \bar{E} 分别为岩石始状态时的弹性模量和有效弹性模量。如果由试验得到了岩石的 σ - ε 曲线,损伤变量可表示成如下形式

$$D = (\varepsilon/\varepsilon_s)^n \quad (2)$$

根据应变等效假定,可得到考虑损伤的岩石单轴本构关系式为

$$\sigma = E(1 - D)\varepsilon = E[1 - (\varepsilon/\varepsilon_s)^n]\varepsilon \quad (3)$$

式中: ε_s 为材料常数;指数 n 是表征材料脆性的特性参数, n 值越大反映材料越脆。 ε_s 和 n 可由单轴压缩应力应变曲线的峰值点 $P(\sigma_p, \varepsilon_p)$ 条件: $d_\sigma/d_\varepsilon|_p = 0$

$$\text{求得为 } \varepsilon_s = \varepsilon_p \sqrt[n]{n+1}$$

$$n = \sigma_p / (E\varepsilon_p - \sigma_p) \quad (4)$$

2 试验方案

2.1 试验装置

试验模型采用GRG高强石膏粉以1:0.4加水快速搅拌浇模而成,尺寸为 $\phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,模型制作完成后在阴凉通风条件下保持3 d后脱模。如图1所示,将模型至于刚性底座固定在边长为60 cm的立方体钢架底面中心,传感器、爆源分别用细钢丝进行固定于同一水平面,距离试样上表面为5 cm,传感器距离药包中心为15 cm。整个装置置于 $200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 的水池中,水深80 cm。

2.2 测试方法

为获得爆炸冲击波作用过程,采用日本NAC公司GX-8型高速摄影机,最高拍摄速率为600 000 fps,本次拍摄速率为20 000 fps,画幅大小为 384×384 ,快门速度为 $48.6 \mu\text{s}$ 。爆炸荷载为电力起爆黑火药,配以冲击波测试系统测其爆炸压力。水下爆炸冲击压力传感器采用美国PCB公司生产的A138系列A25型传感器。冲击波信号采集系统为HBM采集系统,最高采样率为 $2 \times 10^6 \text{ ps}$,本试验根据测试信号特点反复试验,最终取100 k。

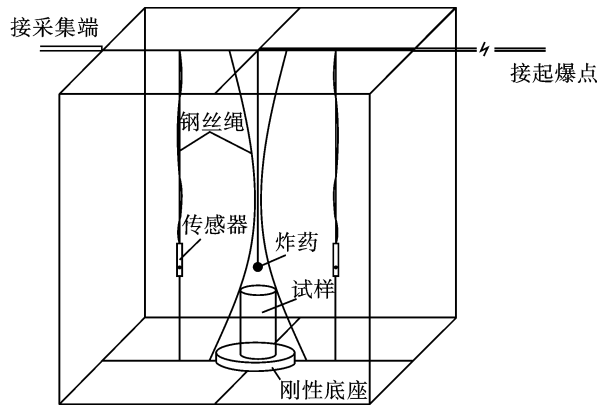


图 1 药包、试样及传感器布置装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of arrangement device of charge, sample and sensor

试验共采用 8 个试样, 分为 4 组, 每组 2 个试样做重复性试验, 其中第一组做对比试验, 不做任何处理, 剩余 3 组分别冲击 1 次, 3 次, 5 次。每次冲击荷载药量为 0.50 ± 0.001 g, 爆炸中心距离试样上表面距离为 5 cm。药包、试样及传感器布置装置如图 1, 整个爆破测试系统如图 2。

3 结果分析

3.1 冲击波作用过程高速摄影及压力测试

典型冲击波时程曲线如图 3 所示, 压力峰值为 0.817 MPa, 上升沿约 100 μ s, 下降沿约 180 μ s, 整个

波形持续约 16 ms。通过高速摄影拍摄视频分幅处理后的图片可以看出, 传感器在爆炸冲击波以及气泡脉动作用下有轻微晃动, 因此从冲击波压力时程曲线上可以观测到曲线尾部与“0 线”有一定飘移后再回到“0 线”, 但对测试峰值结果的观测影响不大。

一定深度水下爆炸近场冲击波压力衰减规律可根据 Cole 经验拟合公式, 见式(5)

$$P_m = 52.4 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha \quad (5)$$

式中: P_m 为冲击波峰值压力, GPa; K 为 52.4, α 为衰减系数取 1.1 ~ 1.5; W 为炸药当量, kg; R 为爆心距, mm。

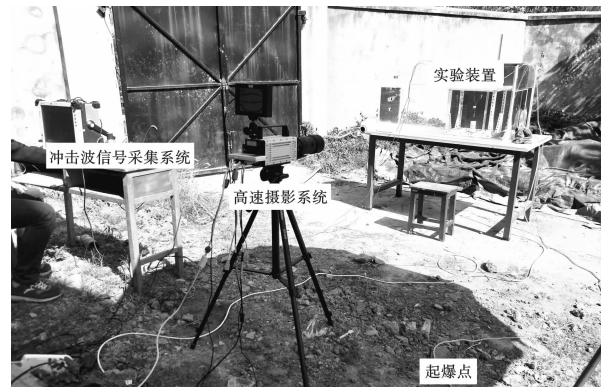


图 2 测试、起爆系统
Fig. 2 Test and initiation system

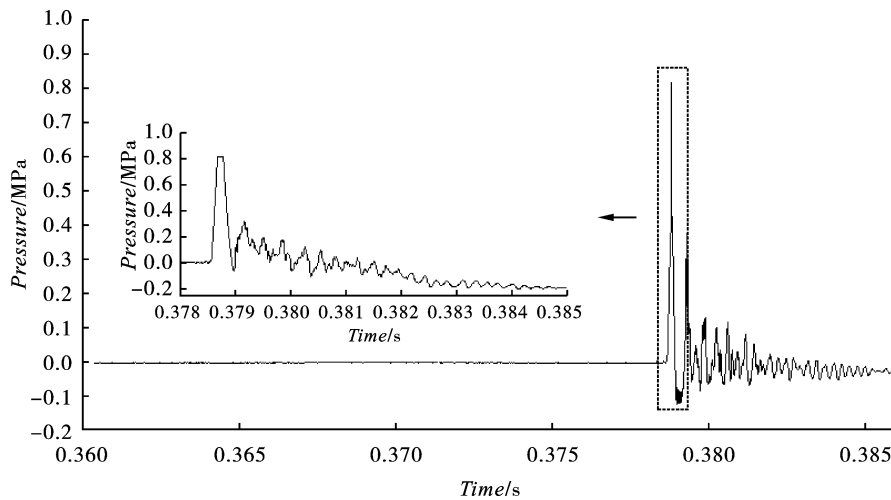


图 3 典型冲击波时程曲线
Fig. 3 Typical shock wave time history curve

根据以上公式, 结合本试验测试 15 cm 处压力峰值为 0.817 MPa, 可计算出 $\alpha = 1.3697$, 进而可得作用在试样上表面的冲击波压力峰值约为 5.05 MPa。

通过高速摄影机对药包爆炸作用到试样上的全过程进行拍摄, 对拍摄结果进行原速率分幅处理, 并

提取部分图片拼接得到总体过程, 如图 4。从炸药爆炸到气泡脉动爆轰产物基本消失, 整个过程共拍摄 384 张照片, 约 19 200 μ s, 其中气泡脉动的第一个周期作用约持续 11 ms, 由高压爆生气体形成的外表面光滑的球形气泡由小变大(约 5.4 ms)再渐

小(约5.5 ms)。在第一次脉动气泡接近试样上表面时,受试样上表面的影响,气泡底部逐渐被压缩成一个平面并出现一个局部的尖端凸起,同时试样上表面也出现边缘向下向内翻起的饼状压缩层。随着气泡的逐渐变大,气泡底部的压缩区域逐渐变大,尖端凸起与试样上表面的压缩层逐渐靠近至融合,随后球体部分与压缩层完全融合。当气泡膨胀至最大

状态时开始收缩,此时试样上表面压缩层受力改变逐渐被拉伸。由于气泡收缩速度高于底部拉伸速度,因此压缩层被拉伸过程中出现间断层导致多层叠加饼状层出现。当气泡进一步收缩,下端饼状压缩层逐渐消失,直至整个气泡破裂,形成外表面极其不规则的椭球状爆生产物,爆生产物再膨胀收缩1~2次后整体扩散消失。

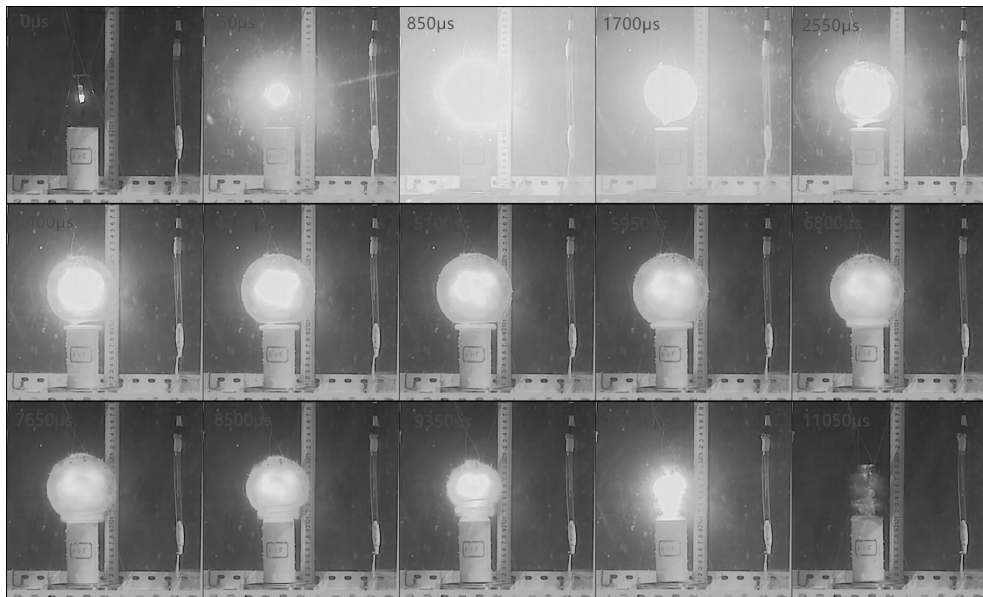


图4 爆炸冲击波作用过程

Fig. 4 Process of blast wave action

结合高速摄影画面时间及冲击波压力测试波形,药包爆炸对试样的破坏主要集中在冲击波及气泡的第一次脉动作用过程。在作用过程中试样先受压再受拉,呈现出压拉交替的作用形式。

3.2 单轴静压实验分析

采用万能材料试验机对损伤后的试样进行单轴压缩实验,加载试验机型号为美特斯公司 CMT5105 型,量程 100 kN,加载速率为 0.002 mm/s,得到应力应变曲线如图 5 为 A 组 4 个试样的单轴压缩应力应变曲线,曲线呈“S”型,从曲线形状看主要分为三个阶段。第一阶段为压密阶段,随着损伤程度的增加,压密阶段的应变逐渐增大,曲线斜率逐渐减小,说明损伤微观裂隙随着损伤次数也逐渐增大;第二阶段为近弹性阶段,从曲线斜率可以看出,随着损伤次数增加,斜率逐渐减小;第三阶段为达到强度极限值后的破坏阶段。

如图 6,试样在静压作用力下破坏形式为以拉伸为主的脆性破坏,随着损伤次数的增加,试样受损端出现局部(高约 20 mm)崩落导致端面由圆形向不规则形状变形程度加重。分析其原因,主要在于

药包爆炸产生的冲击波及气泡脉动作用在试样上表面,在压缩及拉伸的多次交替作用下产生了不同程度的细微损伤,且损伤随作用次数的增加愈加明显,导致试样局部发生剪切破坏。

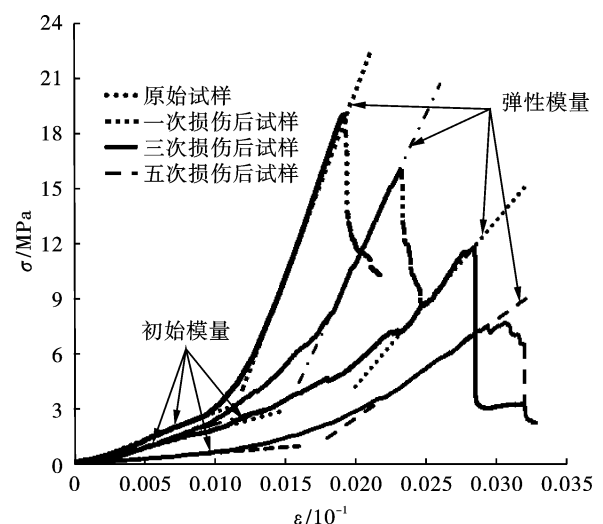


图5 单轴压缩 σ - ε 曲线

Fig. 5 σ - ε curve of uni-axial compression

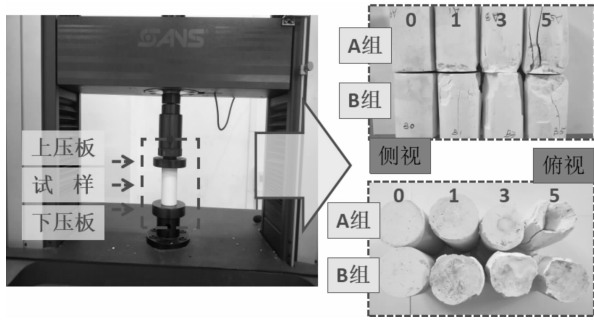


图 6 单轴压缩实验后试样破坏形式

Fig. 6 Specimen failure mode after uni-axial compression test

3.3 累计损伤分析

根据式(1)可计算出各试样损伤变量,如图 7。

表 1 单轴压缩实验数据

Table 1 Experimental data of uniaxial compression

损伤次数	试样编号	初始模量/MPa	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
未损伤	A0	2946	20150	18.94
	B0	2838	22312	17.63
1	A1	2360	16168	15.95
	B1	2445	14872	16.22
3	A3	2051	8995	11.78
	B3	1963	8356	11.56
5	A5	621	5349	7.69
	B5	772	5766	7.87

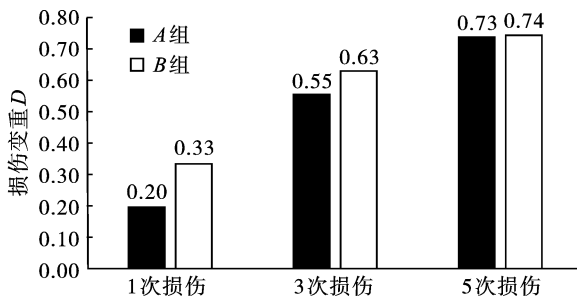


图 7 损伤变量随损伤次数变化趋势

Fig. 7 Change trend of damage variable with damage times

从以上分析可以看出试样的损伤变量均随损伤次数的增加而增大。A 组试样损伤 3 次后的损伤变量比 1 次损伤后的损伤变量增大 $\frac{0.55 - 0.20}{0.20} \times 100\% = 175\%$; 5 次损伤后的损伤变量比 3 次损伤后的损伤变量增大 $\frac{0.73 - 0.55}{0.55} \times 100\% = 33\%$ 。同理, B 组的损伤变量增长率分别为 91% 和 17%。且 A 组和 B 组损伤次数从 3 次增加到 5 次产生的损伤度均小于损伤次数由 1 次增加到 3 次, 证明前期损伤会对后期损伤增长率有抑制, 损伤产生积累, 可能

产生的原因是前期损伤产生的微观裂隙对能量有一定的吸收和存储作用。

4 结论

(1) 在本试验条件下, 采用高速摄影机拍摄速率 20 000 wfps 可以较好记录下气泡脉动过程, 通过分幅处理分析后可得到气泡脉动周期及冲击波和气泡脉动总作用时间。

(2) 数采采用 100 k 采样率可以完整记录水下冲击波时程曲线, 根据可测点峰值及经验公式可粗略计算爆炸近区冲击波压力峰值。

(3) 冲击波对试样的作用主要表现为超压力破坏, 气泡脉动则主要表现为压拉交替破坏, 主要破坏周期为前两次脉动。

(4) 通过对损伤后试样单轴抗压强度和弹性模量的分析, 随着爆破次数的增加试样的损伤变量逐渐增大, 损伤产生积累且前期损伤会对后期损伤增长率有一定抑制。

参考文献 (References)

[1] 李新平, 侯潘, 罗忆, 等. 白鹤滩水电站地下厂房爆破累积损伤效应研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 14-20, 54.

[1] LI Xin-ping, HOU Pan, LUO Yi, et al. Study on cumulative damage effect of blasting in underground powerhouse of Baihetan Hydropower Station [J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 14-20, 54. (in Chinese)

[2] 代显华. 水下钻孔爆破水中冲击波有害效应对周围环境影响研究[J]. 中国水运, 2018(3): 76-77.

[2] DAI Xian-hua. Study on the harmful effects of underwater drilling and blasting on the surrounding environment [J]. *China Water Transport*, 2018(3): 76-77. (in Chinese)

[3] 金解放. 静载荷与循环冲击组合作用下岩石动态力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.

[3] JIN Jie-fang. Study on dynamic mechanical properties of rock under combined static load and cyclic impact [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)

[4] 陈亚楠. 多次爆破振动下岩体开挖累积损伤的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.

[4] CHEN Ya-nan. Study on cumulative damage of rock excavation under multiple blasting vibration [D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2016. (in Chinese)

[5] 李允忠, 王志亮, 黄佑鹏, 等. 循环爆破荷载下岩石累积损伤效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 47-53.

[5] LI Yun-zhong, WANG Zhi-liang, HUANG You-peng, et al. Study on cumulative damage effect of rock under cyclic blasting load [J]. *Blasting*, 2019, 36(2): 47-53. (in Chinese)