

共和隧道页岩饱水软化试验研究

滕宏伟¹, 任松¹, 姜德义¹, 杨春和^{1,2}

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 渝湘高速公路共和隧道地质条件十分复杂, 隧道施工遇到很大困难, 隧道开挖后初期支护多处纵向开裂。隧道开裂段围岩为页岩, 现场实际监测资料表明页岩层理、节理发育, 易风化, 亲水性较强, 有水软化倾向。页岩的这些性质对隧道初期支护结构的效果及隧道长期稳定可靠性具有重要影响。针对这一施工难题, 先进行页岩基本力学试验, 获得页岩基本力学参数; 然后采用声波探测与单轴抗压试验相结合的方法进行页岩的饱水软化试验, 得到页岩动弹模量及强度的饱水软化方程。试验结果表明共和隧道页岩弹性模量及强度均较低; 弹性模量和强度随饱水时间的增加而逐渐减小, 服从负指数函数变化规律, 饱水软化方程能很好的反应页岩的实际饱水软化规律; 用声波探测和单轴抗压试验相结合的方法进行页岩饱水软化试验, 可以大量减少岩石试样的数量, 同时可以提高试验精度。试验成果为共和隧道高地应力大变形破坏段的初期支护结构重新设计及隧道衬砌结构的长期可靠性分析提供基本参数。

关键词: 隧道工程; 共和隧道; 页岩; 纵向开裂; 饱水软化

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 2657 - 06

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF WATER-SATURATED WEAKEN SHALE IN GONGHE TUNNEL

TENG Hongwei¹, REN Song¹, JIANG Deyi¹, YANG Chunhe^{1, 2}

(1. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The geological condition of Gonghe tunnel of Chongqing—Changsha highway is very complex. There are many difficulties when the tunnel is being constructed. There are many vertical cracks in the primary support after the tunnel is excavated. The surrounding rock of the cracking position is shale, which is easily weathered, and strong hydrophilic and water-softening have identified beddings and joints. All these characteristics have an important impact on the primary support and the long-term stability of the tunnel. At first, the basic mechanical parameters of the shale are gotten from the basic mechanical test of the shale. And then, the water-saturated softening experiment of the shale is carried out with the combination of sound wave test and uniaxial compression test, and the water-saturated softening equations of the shale are obtained. The test results show that both strength and elastic mould are low; the strength and elastic modulus will be lower in the process of water-saturated time, which meets the rule of a negative exponential function, and can agree well the actual water-saturated softening rule of the shale. The combination of sound wave test and uniaxial compression test can significantly reduce the

收稿日期: 2008 - 12 - 03; **修回日期:** 2009 - 04 - 08

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50334060); 国家自然科学基金资助项目(50674108); 国家创新研究群体基金项目(50621403)

作者简介: 滕宏伟(1964 -), 男, 2008年于重庆大学安全工程专业获博士学位, 现为正高级工程师, 主要从事交通安全及隧道工程等方面的研究工作。

E-mail: rs_rwx@cqu.edu.cn

need of rock samples, and also can improve test accuracy. The research achievements provide the basic parameters for re-designing the primary support structure and analyzing the long-term stability of the tunnel lining structure.

Key words: tunnelling engineering; Gonghe tunnel; shale; vertical cracks; water-saturated weakening

1 引言

共和隧道是西部大开发省际公路通道重庆至长沙高速公路彭水—武隆段的控制性工程,右洞长4 779 m,左洞长4 745 m。其穿越的页岩地层部分地段岩石层理、节理发育,隧道开挖后围岩变形严重,最大水平收敛速度为16 mm/d,最大拱顶下沉速度14 mm/d,累计最大收敛及拱顶下沉量分别达到310和200 mm,导致隧道初期支护纵向开裂,支护结构扭曲破坏,初期支护严重侵线,给施工带来了巨大难题^[1](见图1)。



图1 共和隧道支护变形

Fig.1 Distortion of primary support in Gonghe tunnel

隧道穿越岩层发生支护变形破坏一直是工程难题,岩石力学特性研究是解决这一工程难题的基础。国内外学者在破碎岩体及软岩的力学性质研究方面做了大量研究工作。同时对于水与岩石相互作用方面的研究也较多,但均集中研究灰岩、板岩、泥岩、砂岩等饱水后的力学性质变化规律^[2~6]。对于饱水状态的页岩强度、弹性模量影响方面的试验研究则相对较少,同时在进行试验研究时基本采用岩石力学破坏性试验,不同岩石试件个体的较大差异给试验结果带来较大的误差^[7, 8]。

鉴于此,本文针对共和隧道页岩饱水易软化、水对页岩力学性质具有较大影响、饱水状态下页岩强度及弹性模量均大幅度降低的宏观现象,先进行页岩基本力学试验,然后采用声波探测与单轴抗压试验相结合的方法进行页岩的饱水软化试验,研究页岩在饱水状态下力学性质的变化规律,为共和隧

道高地应力大变形破坏段的初期支护结构重新设计及隧道衬砌结构的长期可靠性分析提供依据。

2 共和隧道页岩基本力学性质试验

2.1 试验系统

岩体力学性质室内试验采用重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室从美国MTS(mechanical testing and simulation)系统公司购置的MTS815电液伺服岩石试验系统(见图2)。MTS815电液伺服岩石试验系统是目前世界上最先进的岩石伺服试验系统,可采用 $\phi 50$ mm标准试件对岩石进行单轴、三轴及孔隙压力加载试验,卸下三轴箱后,可进行 $\phi 300$ mm大试件混凝土等材料的单轴加载试验。同时增配环境箱和高温箱后,可以进行恒温 and 高温条件下的岩石力学试验。



图2 MTS815 岩石试验机

Fig.2 Rock test machine MTS815

2.2 单轴试验及分析

在共和隧道高地应力大变形破坏段取现场页岩岩样,利用岩石取芯机、切割机和打磨机加工成 $\phi 50$ mm \times 100 mm的标准试样(见图3),利用上述MTS815试验系统进行页岩的主要力学参数测试。试验分组进行,每组3个试件,第一组试件力学参数测试结果见表1,加载与变形关系见图4,5。

2.3 三轴试验及分析

单轴试验只能得到岩石部分力学参数,需要对页岩进行三轴试验来获得更多的参数。岩石的三轴力学试验可以根据具体情况加载不同的围压,根据现场实际情况确定加载6种不同围压: $\sigma_2 = \sigma_3 = 1$,

5, 10, 15, 20 和 25 MPa, 分别就 6 种情况加工一组试件, 每组 3 个。



图 3 共和隧道页岩试样

Fig.3 Shale samples of Gonghe tunnel

表 1 岩石力学参数测试结果表

Table 1 Rock mechanical parameters

试件 编号	直径 /mm	高度 /mm	加载速率 /(mm·min ⁻¹)	弹性模量 /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa
1-1	51.90	101.10	0.08	26 530	0.363	47.35
1-2	51.90	101.10	0.08	28 060	0.483	46.04
1-3	51.81	101.38	0.08	27 550	0.470	46.26
平均值				27 380	0.438	46.55

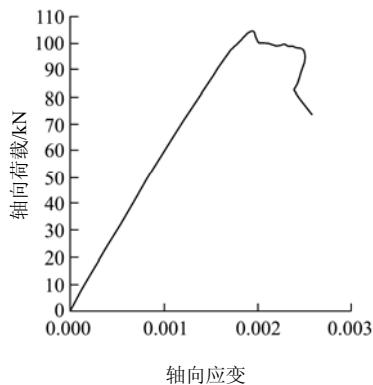


图 4 试件轴向荷载与轴向应变关系曲线

Fig.4 Relationship curve of axial load and axial strain

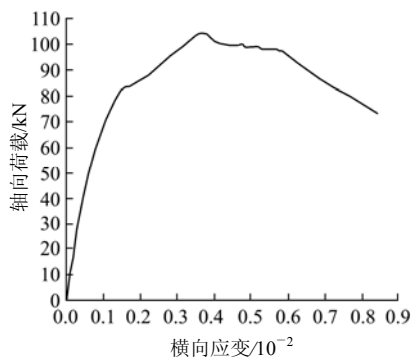


图 5 试件轴向荷载与横向应变关系曲线

Fig.5 Relationship curve of axial load and lateral strain

图 6 为试件 3-3 在围压为 20 MPa 时的全应力 - 应变曲线图。

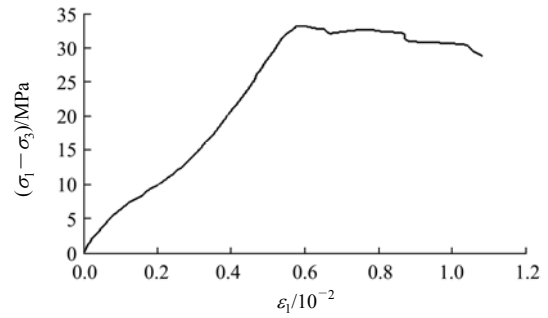


图 6 围压为 20 MPa 试件 3-3 全应力 - 应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of sample 3-3 when the confining pressure is 20 MPa

分析每组数据的 σ_{max} 和围压, 画出 $\sigma - \tau$ 曲线(莫尔圆, 见图 7), 得出页岩黏聚力为 2.35 MPa, 内摩擦角为 25°。

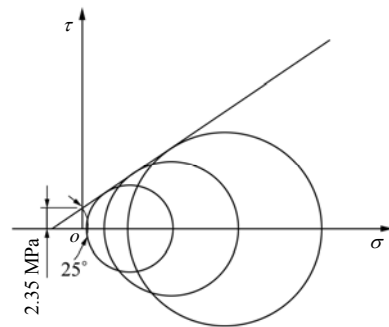


图 7 $\sigma - \tau$ 曲线

Fig.7 Curve of $\sigma - \tau$

通过以上单轴和三轴试验得到了共和隧道高地应力大变形破坏段页岩的基本物理力学参数(见表 2)。

表 2 共和隧道页岩物理力学参数

Table 2 Physico-mechanic parameters of Gonghe tunnel shale

重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
26.365	27 380	0.438	46.55	2.35	25

3 共和隧道页岩饱水软化试验

3.1 试验方案

试验分 2 个阶段, 第一阶段为试探性试验, 采用非破坏性的声波测试方法, 在高频率、长时间采样情况下测得岩石动弹模量与饱水时间的关系; 第二阶段为岩石饱水软化单轴抗压试验, 根据试探性

试验的测试结果，确定岩石饱水软化单轴抗压试验的试验频度(间隔时间)及试验次数，通过单轴抗压试验得到岩石强度随饱水时间的变化规律。

声波试探试验流程见图 8，岩石饱水软化单轴抗压试验流程见图 9。由于采用了声波试探性试验，整个试验的试件需求数量大大减少，避免了大规模页岩试件制作，解决了以下难题：

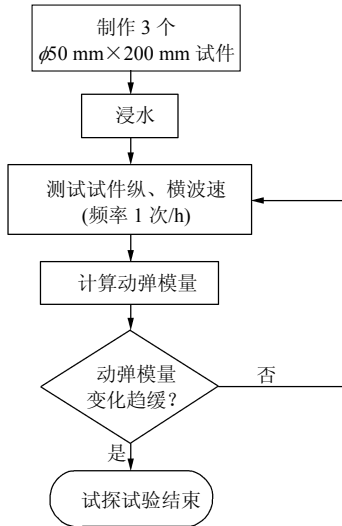


图 8 声波试探试验流程图
Fig.8 Flow chart of try test by a sound wave

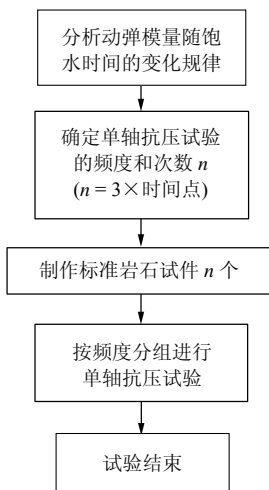


图 9 饱水软化单轴抗压试验流程图
Fig.9 Flow chart of uniaxial compression test of water-saturated rock

(1) 页岩层理、节理发育，遇水很易惊裂崩解，大规模试样制作十分困难。

(2) 试样制作过程中的扰动对试样力学性质影响很大，导致不同页岩试件具有较大的个体差异。

(3) 单轴抗压试验是破坏性试验，由多个个体差异较大的页岩试件获得的页岩饱水软化规律具有较大的误差。

3.2 声波测试系统参数选择及误差分析

本文应用武汉中科智创 RSM-SY5 声波检测仪(见图 10)，用超声波脉冲穿透法测定岩石试件纵、横波速，纵波换能器的主频选择 700 kHz，横波主频选择 250 kHz。



图 10 RSM - SY5 声波检测仪
Fig.10 RSM - SY5 sonic apparatus

(1) 测量原理

测得岩石试件的纵波波速和横波波速后，可以用下式计算出被测试件的动弹模量 E 、动剪切模量 G 及动泊松比 μ 等参数^[9]：

$$\left. \begin{aligned} G &= V_s^2 \rho \\ \mu &= \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \\ E &= 2G(1 + \mu) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： V_s 为横波波速， ρ 为岩体密度， V_p 为纵波波速。

(2) 误差分析

脉冲穿透法测定试件速度的最大系统误差 ΔV ^[10] 可表示为：

$$\Delta V = \frac{\Delta L}{t_M - t_T} + L \left| \frac{\Delta t_M}{(t_M - t_T)^2} \right| + L \left| \frac{\Delta t_T}{(t_M - t_T)^2} \right| \quad (2)$$

式中： t_M 为所测样品初波走时； t_T 为换能器对接时间(纵波为 15 μ s，横波为 28 μ s)； Δt_M ， Δt_T 为系统采样率(均为 0.04 μ s)； ΔL 为样品长度测量误差(0.05

mm)。

试验中最大纵波波速 4 700 m/s, 最大横波波速为 2 480 m/s。纵波初至波到时差 $(t_M - t_T) = 27 \mu s$, 则纵波速度测量的绝对误差值为 ± 12 m/s, 其测量的相对误差为 0.25%。横波初至波到时差 $(t_M - t_T) = 54 \mu s$, 则横波速度测量的绝对误差值分别为 ± 4 m/s, 其测量的相对误差分别为 0.16%。

如式(2)所示, 系统误差 ΔV 明显受样品长度 L 的影响, 在 L 增加的同时, 初至波到时差 $(t_M - t_T)$ 增加的幅度更明显, 致使 ΔV 减小, 相对系统误差也减小。因此, 可认为速度测量的相对系统误差的量级纵波约为 0.3%, 横波约为 0.2%。

偶然误差对速度测量的影响主要在于纵、横波初至时间的读取, 这一点对于高衰减页岩影响较大, 为便于对试验结果进行对比, 在试验中统一选取纵、横波波列的第一个有效波峰值读取初至时间, 减小偶然误差。

从上面的分析可见纵波换能器的主频采用 700 kHz, 横波主频采用 250 kHz, 可以满足测量精度需求。

3.3 试验结果及分析

图 11 是页岩试件纵波波速测试的图片。



图 11 声波测试

Fig.11 Testing by a sound wave

表 3 给出了部分声波测试数据, 以页岩浸水时间为横坐标, 页岩动弹模量为纵坐标, 将各测点绘于坐标平面上(见图 12), 回归可以得到页岩饱水软化的动弹模量随浸水时间变化的软化方程, 其回归相关系数为 0.997 221 4。

$$E = 14\ 380.939 + 15\ 950.976e^{-0.066t} \quad (3)$$

根据页岩水软化的动弹模量随浸水时间的变化规律, 可以确定单轴抗压试验的频度和次数, 选择几个有代表性的浸水时间点进行单轴抗压试验。

选择的时间点共 6 个, 分别为 0, 2, 12, 36, 60 和 84 d, 每个时间点需要 3 个岩石试件, 总计试件数量为 $3 \times 6 = 18$ 个。

表 3 给出了全部单轴抗压试验的试验数据, 以

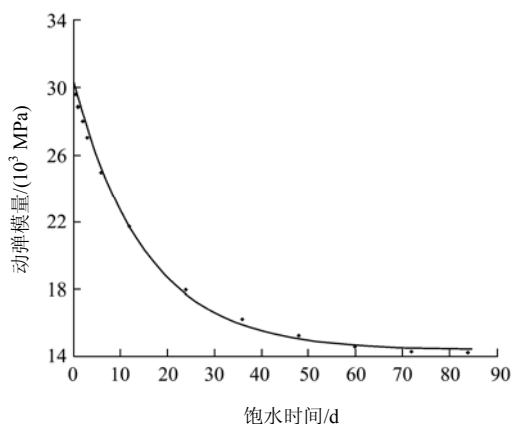


图 12 页岩动弹模量随饱水时间的变化规律

Fig.12 Change rule of shale's dynamic elasticity modulus with waterlogged time

表 3 页岩水软化试验结果数据表

Table 3 Table of test data of water-saturated weaken shale

浸水时间/d	声波测试				单轴抗压试验	
	纵波波速 / $(m \cdot s^{-1})$	横波波速 / $(m \cdot s^{-1})$	动弹模量 /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa	极限应变 / 10^{-6}
0.0	4 575	2 070	31 730	0.372	46.55	1 072
0.5	4 380	2 000	29 555	0.368	-	-
1.0	4 185	1 985	28 828	0.355	-	-
2.0	4 295	1 945	28 007	0.371	43.99	1 095
3.0	4 150	1 915	27 026	0.365	-	-
6.0	3 995	1 840	24 962	0.365	-	-
12.0	3 745	1 715	21 717	0.367	33.02	1 158
24.0	3 415	1 560	17 979	0.368	-	-
36.0	3 270	1 480	16 219	0.371	21.71	1 209
48.0	3 180	1 435	15 258	0.372	-	-
60.0	3 005	1 410	14 588	0.359	19.01	1 237
72.0	3 000	1 395	14 313	0.362	-	-
84.0	2 995	1 390	14 217	0.363	18.43	1 290

页岩浸水时间为横坐标, 页岩抗压强度为纵坐标, 将各测点绘于坐标平面上(见图 13), 回归可以得到页岩饱水软化的抗压强度随浸水时间变化的软化方程, 其回归相关系数为 0.999 857 5。

$$\sigma_c = 18.005 + 28.772e^{-0.055t} \quad (4)$$

从上面的试验结果可以看到共和隧道页岩动弹模量和强度随浸水时间的增加逐渐减小, 服从负

指数函数变化规律,页岩试验数据回归的饱水软化方程相关系数最小为 0.997 221 4,表明回归所得方程能够很好反应页岩的实际软化规律。在浸水初始阶段页岩动弹模量及强度下降较快,以后逐渐趋缓,

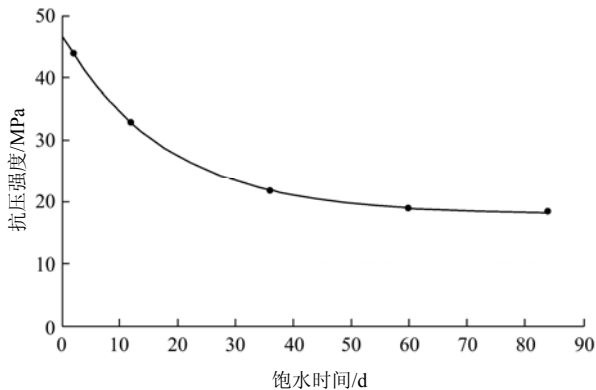


图 13 页岩抗压强度随饱水时间的变化规律

Fig.13 Change rule of shale's compressive strength with waterlogged time

当浸水时间达到 60 d 以后变化趋于稳定。在饱水状态下共和隧道页岩单轴抗压强度最大下降 60.40%,动弹模量最大下降 55.19%,软化效果十分明显,软化结果对隧道衬砌结构的效果及隧道长期稳定性、可靠性影响巨大。

4 结 论

本文针对共和隧道页岩饱水易软化、水对页岩力学性质具有较大影响、饱水状态下页岩强度及弹性模量均大幅度降低的宏观现象,先进行页岩基本力学试验,然后采用声波探测与单轴抗压试验相结合的方法进行页岩的饱水软化试验,得到了以下一些结论:

(1) 获得了共和隧道开裂段页岩的基本力学参数,其弹性模量和强度均较低,弹性模量为 27 380 MPa,单轴抗压强度为 47.35 MPa。

(2) 用声波探测和单轴抗压试验相结合的方法进行页岩饱水软化试验,可以大量减少岩石试样的数量,同时可以提高试验精度。

(3) 纵波换能器的主频采用 700 kHz,横波主频采用 250 kHz,在试件长度为 200 mm 时可以达到较高的测量精度,速度测量的相对系统误差的量级纵波约为 0.3%,横波约为 0.2%。

(4) 共和隧道页岩动弹模量和强度随浸水时间的增加逐渐减小,服从负指数函数变化规律。

(5) 在饱水状态下共和隧道页岩单轴抗压强度最大下降 60.4%,动弹模量最大下降 55.19%,软化效果十分明显。

(6) 试验获得的页岩动弹模量和强度的饱水软化方程与页岩的实际软化规律吻合良好。

参考文献(References):

- [1] 谷柏森. 特殊地质条件下隧道围岩大变形的应对策略——共和隧道特殊围岩结构设计[J]. 铁道标准设计, 2007, (11): 77 - 80.(GU Bosen. Countermeasures for large deformations of tunnel surrounding rocks in special geological conditions—scheme for structural design of special surrounding rocks in Gonghe tunnel[J]. Railway Standard Design, 2007, (11): 77 - 80.(in Chinese))
- [2] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2 324 - 2 332.(GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study of influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 324 - 2 332.(in Chinese))
- [3] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(YANG Chunhe, MAO Haijun, WANG Xuechao, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(in Chinese))
- [4] HADIZADEH J. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1991, 28(5): 431 - 439.
- [5] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机制研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866 - 870.(HUANG Hongwei, CHE Ping, Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(7): 866 - 870.(in Chinese))
- [6] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394 - 400.(ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394 - 400.(in Chinese))
- [7] 汤连生, 王思敬. 岩石水化学损伤的机制及量化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 314 - 319.(TANG Liansheng, WANG Sijing. Analysis of mechanism and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 314 - 319.(in Chinese))
- [8] 闫长斌, 徐国元, 杨飞. 爆破荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 88 - 93.(YAN Changbin, XU Guoyuan, YANG Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 88 - 93.(in Chinese))
- [9] 刘斌, 王宝善, 席道瑛, 等. 水饱和和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 702 - 710.(LIU Bin, WANG Baoshan, XI Daoying, et al. The effects of water saturated

- cracks on seismic velocity and anisotropy in crustal rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(5): 702 - 710.(in Chinese)
- [10] 邓继新, 史 譔, 刘瑞珣. 泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 862 - 868.(DENG Jixin, SHI Ge, LIU Ruixun. Analysis of the velocity anisotropy and its affection factors in shale and mudstone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 862 - 868.(in Chinese))