

# 岩块波速 - 应力关系及其卸荷效应

陈 祥<sup>1</sup>, 孙进忠<sup>2</sup>, 谭朝爽<sup>3</sup>, 张杰坤<sup>2</sup>, 许兆义<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083; 3. 长江三峡勘测研究院有限公司, 湖北 武汉 443003)

**摘 要:** 当岩块从原有的地质环境中取出时, 它在原位岩体中受到的应力将被解除, 其物理力学性质亦会发生变化, 从而产生卸荷效应。通过自行设计的岩块波速 - 应力试验, 研究了岩块的波速 - 应力关系。研究发现: 波速 - 应力关系曲线可以较清楚地反映出岩石受荷过程中体积变形的 3 个阶段; 波速 - 应力关系曲线基本上以  $s = s_c = (1/4 \sim 1/3)R_c$  为界, 当  $s < s_c$  时, 岩样波速随应力增大迅速增加, 波速 - 应力关系符合幂函数曲线, 当  $s > s_c$  时, 岩样波速逐渐达到峰值, 随后迅速下降, 波速 - 应力关系符合二次函数曲线; 波速 - 应力试验过程中, 当应力增加到岩样在原位状态下同试验加荷方向下所受的应力时, 波速增加速度急剧变缓。根据岩块的波速 - 应力关系提出了岩样的卸荷指标, 并将其定义为岩块在原位所受应力对应的波速与未受荷时的波速之比, 通过试验和计算得到黄岛地下水封石油库场区片麻岩和闪长岩的卸荷指标分别为 1.13 和 1.08。

**关键词:** 岩块; 卸荷效应; 波速 - 应力关系; 卸荷指标

中图分类号: TU459 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2010)05 - 0757 - 05

**作者简介:** 陈 祥(1980 - ), 男, 江西九江人, 博士, 讲师, 从事地质工程、岩土工程教学和研究工作。E-mail: chx1120@126.com。

## Relation between P-wave velocity and stress of rock samples and their unloading effect

CHEN Xiang<sup>1</sup>, SUN Jin-zhong<sup>2</sup>, TAN Chao-shuang<sup>3</sup>, ZHANG Jie-kun<sup>2</sup>, XU Zhao-yi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Three Gorges Exploration and Survey Company, Wuhan 443003, China)

**Abstract:** When a rock sample is extracted from the underground rock mass, the interior stress of the rock sample will release and its mechanical properties will change. The unloading effect will happen. According to the experiments on P-wave velocity and stress designed by the authors, it is found that the P-wave velocity vs. stress curves (V-S curves) of rock samples can reflect the three stages of the bulk distortion during the loading process. The total V-S curve can be divided into two parts. When the stress is less than  $s_c$ , that is, one third to one fourth compression capacities of rock samples, the P-wave velocities of rock samples increase rapidly with the stress and the V-S curves can be fitted with power function. When the stress is larger than  $s_c$ , the P-wave velocities of rock samples gradually reach the peak value, then they dramatically decrease. The V-S curves can be fitted with conic function. During the V-S experiments, the increasing velocity of the P-wave velocities will dramatically decrease if the stress reaches the stress which is undergone by rock samples in the field. The unloading effect index which is the ratio of the P-wave velocity with the initial geo-stress to that without stress is put forward according to the V-S relation. After the rock samples of gneiss and diorite from Huangdao water sealed underground oil tank are tested, the calculated unloading effect indexes of the gneiss and the diorite are 1.13 and 1.08 respectively.

**Key words:** rock sample; unloading effect; relation between P-wave velocity and stress; unloading effect index

## 0 引 言

岩体作为一种地质体受长期复杂的地质活动作用, 在其内部通常形成一定的应力状态, 这种应力称为地应力或原岩应力。地应力的方向和大小对岩体的物理力学性质和稳定性都有显著影响, 同样, 作为构成岩体的重要组成部分——岩块, 当其从原有的地质

环境中取出时, 它在原位岩体中受到的应力将被解除, 其物理力学性质亦会发生变化, 将这种变化称为岩块卸荷效应。在实际工程中可以经常发现岩块卸荷效应的存在, 如笔者在南水北调工程与陕京管道交叉穿越

改造易县段隧道工程岩体质量评价中发现岩样波速小于原位岩体波速的现象,在排除了仪器和试验操作方面的原因,我们分析认为这是由于岩体卸荷效应所致。易县段隧道工程岩体为薄层板岩,其层理结构属于原生结构,与次生的构造(破碎)结构面不同,在未经扰动的原位状态下,板岩中的岩层与结构面紧密结合,因此,原位钻孔测试所得的岩体波速( $V_{pm}$ )较高。当岩芯从原位岩体中取出后,岩芯必然发生卸荷作用,卸荷效应使得岩芯中的薄层结构紧密程度降低,从而所测得的岩块波速( $V_{pr}$ )比原位岩体的波速( $V_{pm}$ )还要低。同样,李晓昭等人在润扬大桥声波测试中<sup>[1]</sup>,以及边智华等人在南京长江大桥二桥基岩波速测试中都发现相同的现象<sup>[2]</sup>。

介质波速是反映介质物理力学状态的一个综合性指标。波速高,说明介质弹性强,结构致密,力学强度高;波速低,反映介质弹性差,结构疏松,力学强度低。通过测定物体纵波波速即可知道物体内部的状态,因此,研究岩块在受荷状态下波速的变化情况(波速-应力关系),可以定量地评价其卸荷程度。

国内对波速-应力关系的研究始于20世纪70年代:高龙生对中国大陆岩石标本在高围压下进行了超声波速研究<sup>[3]</sup>;蔡忠理对花岗岩在三轴压缩过程中进行了声学特性研究<sup>[4]</sup>;黄承贤通过实验研究了围压下岩石弹性波速<sup>[5]</sup>;刘维国等通过对砂岩进行加温三轴实验,分析了超声波速度与应力的关系<sup>[6]</sup>;施行觉等研究了循环应力作用下松散介质的波速和衰减特性<sup>[7]</sup>;丁梧秀<sup>[8]</sup>、刘盛东等<sup>[9]</sup>已对岩石或岩体弹性波速与应力的关系进行了一定的研究;吴德伦、赵明阶建立了岩块的简易裂隙模型<sup>[10-11]</sup>,并根据断裂力学的公式推导出了波速与应力的理论关系。这些都表明岩石波速与应力有明显的关系,在岩石受荷初期,波速随着应力的增加而变大。

本文以黄岛地下水封油库工程为例,对从现场取得的两种岩石利用自行设计的试验装置进行岩石波速-应力关系试验,获得岩块在受荷过程中波速的变化情况,并定义了岩块卸荷指标,从介质波速变化方面对岩块卸荷效应进行了初步研究。

## 1 工程概况

黄岛地下水封石油洞库库址位于山东省东南部,隶属于青岛市黄岛区管辖。场区在区域上位于华北板块与扬子板块结合带之胶南—威海造山带,主要发育韧性剪切带及脆性断裂构造,褶皱构造不甚明显,区域内较大构造体系为牟(平)—即(墨)断裂带,工程区域位于该断裂带南缘。受牟(平)—即(墨)断

裂的影响,区域内发育较多小规模断裂,库址区位于这些断裂所包围的范围内,在构造上形成“安全岛”。

库址区主要发育新元古代花岗质片麻岩,少量第四纪残坡积物分布在山前地带,偶见少量荆山群变质地层包体状产于片麻岩套中。库址区断裂不发育,仅有几条节理破碎带显示不明显的断裂特征。

为了准确了解库址区的地应力状态,对黄岛地下水封石油洞库场区内zk#17钻孔进行水压致裂应力测量。测试过程中,成功完成了8个测段的压裂测试,其中对3段进行了印模定向测试。根据测试结果可知,在测量深度范围内,最大水平主应力值( $S_H$ )为5.73~16.74 MPa,一般为10.0 MPa左右,最小水平主应力值( $S_h$ )为3.70~9.71 MPa,一般为6.0~6.5 MPa。从应力与深度的关系看,应力随深度变化的趋势不明显。垂直主应力( $S_v$ )可以按其上覆岩层的重力进行估算,则三向主应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$ ,说明场区的现今地壳构造应力作用较为明显。根据3个压裂段的定向印模,最大水平主应力方向为NWW向。

## 2 试验装置及过程

岩块波速-应力试验在岩石三轴试验机上进行,需在对岩样进行加压的同时测量岩样的波速,整个试验装置可以分为两个部分:力学试验装置和波速测量装置,示意图见图1,装置主要由岩石三轴试验机、压力传递筒、波速探头和工程多波参数分析仪组成。岩石三轴试验机可施加压力和测量应力;压力传递筒材质为钢,置于岩样两端,其主要作用是避免固定于岩样两个端面上的波速探头在加压过程中受到压力而损坏,在钢筒的底部挖出一个小孔,便于波速探头的电缆线引出;岩石的上下表面与两个压力传递筒之间各放置一块钢板,以便岩样表面受力均匀;紧贴上下两块钢板分别放置激发和接收探头,探头由弹簧支撑,并用黄油使之与钢板紧密接合;岩样的变形用引伸计来测量,可同时测量岩样的径向变形和轴向变形;波形的存储分析设备为DB4型工程多波参数分析仪,由湘潭天鸿电子研究所研制,可以即时记录并存储波形。

整个试验装置安装完成后,即可进行常规单轴抗压强度试验,与此同时,每隔一定间隔压力时(本次试验间隔为2~5 kN)测量一次波速,存下每次测量的波形,试验完成后计算各个压力下岩样的波速(纵波速度)。正式试验前,首先进行系统走时确定,即预先测得超声波穿过两块钢板所花的走时作为系统走时,正式试验所测的超声波走时减去系统走时即得超声波穿过岩块所用的走时。

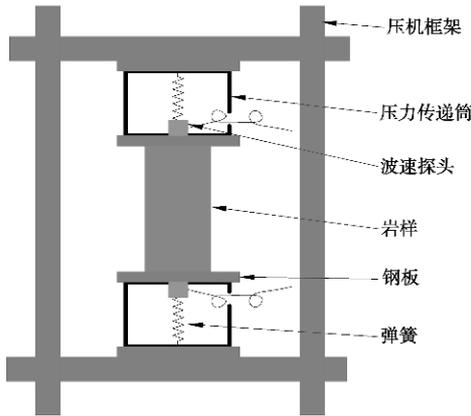


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental equipments

选取两种岩样进行波速 - 应力试验, 其中一种为场区普遍存在的花岗质片麻岩, 另一种为闪长岩, 属于岩脉, 它们的物理及波动参数如表 1 所示。

表 1 应力 - 波速试验岩块参数

Table 1 Parameters of rock samples

序号	样品编号	取样深度/m	密度 / (g · cm <sup>-3</sup> )	纵波速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	横波速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	备注
1	16-1	193.00	2.61	4490.47	2696.51	中细粒花岗片麻岩
2	17-3	156.00	2.90	5277.08	2814.86	闪长岩

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 波速 - 应力关系

一般情况下, 岩石的应力 - 应变试验过程中, 体积应变曲线 (如图 2) 可以分为 3 个阶段<sup>[12]</sup>。

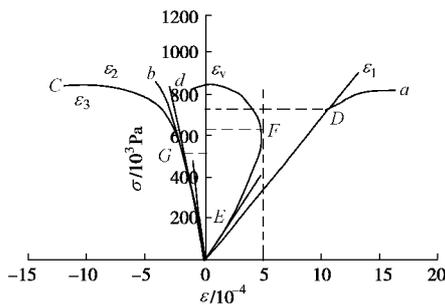


图 2 岩石应力 - 应变曲线<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Stress-strain curves of rock samples

(1) 体积变形阶段: 体积应变在弹性阶段随应力增加而呈线性变化 (体积压缩), 可以理解为岩石内微裂隙的压密阶段, 在这阶段波速随应力的增加而增加。

(2) 体积不变阶段: 在这一阶段, 岩石虽有变形, 但体积大小几乎没变化, 岩石波速维持为一常数。

(3) 扩容阶段: 当应力继续增加时, 微裂纹开始

扩展, 岩石的体积会大幅增加直至破坏, 岩石波速将会迅速降低。

将两种岩样的波速 - 应力试验数据绘成波速 - 应力关系曲线, 如图 3 和图 4 所示, 每幅曲线都记录至达到破坏荷载前 5~10 kN 时刻, 从这些波速 - 应力关系曲线可以较清楚地分辨出岩石变形的两个阶段, 第三个阶段在整个波速变化趋势上有所体现, 但是波速下降的幅度不大, 这可能与本次试验所采用的岩样都是脆性岩石有关, 其破坏过程多在一瞬间完成, 以致于无法捕捉到破坏前瞬间的岩样波速。图 5 为花岗质片麻岩岩样对应的破坏前应力 - 应变曲线, 从曲线可以看出在岩石发生破坏前, 岩样的应变随应力的变化过程与波速随应力的变化过程相似, 尤其在受荷初期阶段。

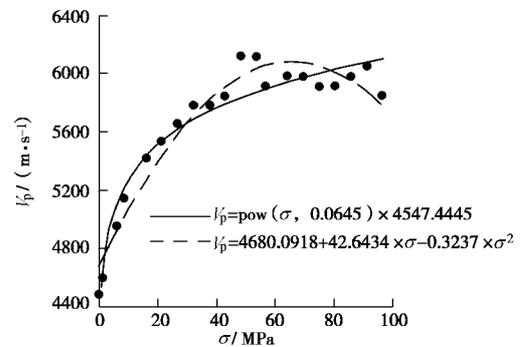


图 3 片麻岩岩样波速 - 应力关系曲线

Fig. 3 P-wave velocity vs. stress curves of gneiss rock sample

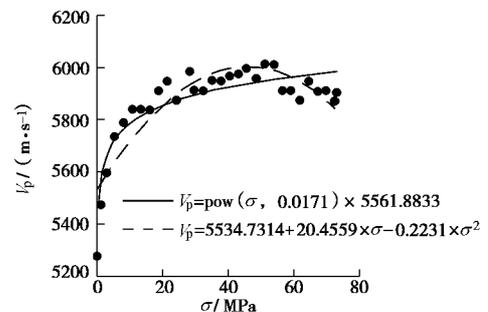


图 4 闪长岩岩样波速 - 应力关系曲线

Fig. 4 P-wave velocity vs. stress curves of diorite rock sample

如图 3, 4 所示, 用幂函数曲线和二次函数曲线可以较好地两种岩样的波速 - 应力关系曲线进行拟合。从图中可以看出, 两种曲线的交点基本上为波速增加阶段向波速恒定阶段的过点, 其对应的  $s$  值约为  $(1/4 \sim 1/3)$  倍抗压强度 ( $R_c$ ), 记为  $s_c$ 。当  $s < s_c$  时, 幂函数可以较准确地拟合加荷初期岩块波速随应力迅速增加和随后增加速度变缓的过程 (拟合相关系数分别达到 0.96 和 0.97); 当  $s > s_c$  时, 二次函数可以拟合岩样波速达到峰值和随后迅速下降的过程 (拟合相关系数分别达到 0.94 和 0.93)。将波速 - 应力试验

中各个压力下岩样波速除以未受压时岩样的波速, 可得到波速比  $R$  与岩样所受应力之间的关系, 各个岩样的波速比  $R$  随应力的变化关系与波速随应力的变化关系相同。通过拟合分析, 岩块的波速比  $R$  与应力的关系同样在应力低于  $s_c$  时服从幂函数, 大于  $s_c$  时服从二次函数。

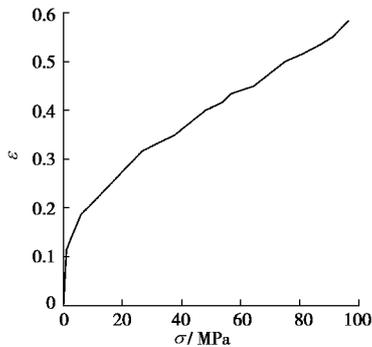


图5 片麻岩岩样应力 - 应变关系曲线

Fig. 5 Strain vs. stress curve of gneiss rock sample

在研究岩块的卸荷问题时, 除了极高地应力区(地应力场最大主应力与岩石抗压强度之比大于  $1/4$ <sup>[13]</sup>)的岩体外, 我们对应力小于  $s_c$  范围内的波速 - 应力关系更感兴趣, 根据片麻岩岩样和闪长岩岩样的波速比 - 应力关系曲线, 可得在应力小于  $s_c$  范围内片麻岩和闪长岩的波速比与应力的关系表达式:

$$R_p = 1.0127 \times s^{0.0645}, \quad s \leq s_c, \quad (1)$$

$$R_s = 1.054 \times s^{0.0171}, \quad s \leq s_c, \quad (2)$$

式中,  $R_p$ 、 $R_s$  分别为片麻岩和闪长岩的波速比。

此外, 我们还发现, 在  $s=4\sim 5$  MPa 时, 岩样波速增加速度急剧变缓, 如果将岩样的密度按  $2.7 \text{ g/cm}^3$  考虑, 各个岩样在其原位深度所受的自重应力恰好为  $4\sim 5$  MPa, 也就是说, 波速 - 应力试验过程中波速增加速度急剧变缓的点对应的应力可以看作岩样在原位状态下在试验加荷方向所受的应力(注: 本次原位取芯钻孔均为竖直孔, 而室内波速 - 应力试验的加荷方向亦为轴向, 因此室内试验加荷方向与竖直方向一致), 这种现象类似于 Kaiser 效应。

我们将波速 - 应力关系曲线中波速增加速度急剧变缓点对应波速称为原位波速, 本文试验中两种岩样原位波速对应的应力与岩样在原位状态下在试验加荷方向下所受的应力具有较好的一致性, 但是, 在其它方向上, 这种一致性还需进一步验证。

### 3.2 卸荷指标

岩块从原位岩体中取出时, 必然会经历卸荷过程, 岩块的内部结构和性质会发生变化, 而岩块的波速变化能较好地反映这种变化。我们对岩块进行加荷, 同时测定其波速, 得到岩块的波速 - 应力关系, 并将岩

块在原位所受应力对应的波速与未受荷时的波速之比定义为卸荷指标, 记为  $I_U$ , 则卸荷指标可按照下式计算:

$$I_U = \frac{V_{pr}(s_1)}{V_{pr0}}. \quad (3)$$

式中  $V_{pr}(s_1)$  为岩块在受原位地应力作用下的波速, 即为原位波速;  $V_{pr0}$  为岩块在未受荷载的条件下测得的波速;  $s_1$  为岩块在原位所受的与加荷方向一致的地应力分量。场区片麻岩和闪长岩的卸荷指标可以分别根据式 (1) 和式 (2) 得到:

$$I_{Up} = R_p(s_1) = 1.0127 \times s_1^{0.0645}, \quad (4)$$

$$I_{Us} = R_s(s_1) = 1.054 \times s_1^{0.0171}, \quad (5)$$

式中,  $I_{Up}$  和  $I_{Us}$  分别为片麻岩和闪长岩的卸荷指标。

式 (3) ~ (5) 中所选波速 - 应力试验加荷方向需与原位地应力方向一致, 本文试验岩样都是从这些现场垂直勘探钻孔中取出, 室内波速 - 应力试验的应力亦是沿岩样轴向施加, 即波速 - 应力试验加荷方向与原位垂直地应力方向一致。根据地应力实测结果及岩样的取样深度可知片麻岩岩样和闪长岩岩样在原位所受的垂直地应力大小分别为 5.21 MPa 和 4.21 MPa, 将其分别代入式 (4) 和式 (5) 中可得片麻岩和闪长岩的卸荷指标分别为 1.13 和 1.08。

## 4 结论与建议

岩芯从钻孔中取出后, 岩芯因其在钻孔内周边所受的原位地应力被解除而必将发生卸荷效应, 本文通过对从黄岛地下水封石油库场区钻孔取回的岩样进行波速 - 应力试验, 揭示库址区岩样的波速 - 应力关系: ①波速 - 应力关系曲线可以较清楚地分辨出岩石变形的两个阶段, 即体积变形阶段和体积不变阶段, 而扩容阶段在整个波速变化趋势上有所体现, 但是波速下降的幅度不大; ②波速 - 应力关系曲线基本上以  $s = s_c = (1/4 \sim 1/3)R_c$  为界, 当  $s < s_c$  时, 岩样波速随应力迅速增加, 波速 - 应力关系符合幂函数曲线, 当  $s > s_c$  时, 岩样波速逐渐达到峰值, 随后迅速下降, 波速 - 应力关系符合二次函数曲线; ③波速 - 应力试验过程中, 当应力增加到岩样在原位状态下同试验加荷方向所受的应力时, 波速增加速度急剧变缓。

根据岩样的波速 - 应力关系, 提出岩样的卸荷指标, 并将其定义为岩块在原位所受应力对应的波速与未受荷时的波速之比, 通过试验计算可知黄岛地下水封石油库场区片麻岩和闪长岩的卸荷指标分别为 1.13 和 1.08。

通过波速 - 应力试验, 发现试验过程中, 当岩样所受压力达到其在原位状态下在试验加荷方向所受的

应力时, 岩样波速增加速度急剧变缓, 将这时的波速定义为原位波速。今后的工作可以对不同方向的定向岩样进行波速-应力试验, 验证其它方向的原位波速与原位地应力对应的可靠性, 如可靠可以进一步提出在波速-应力试验过程中根据原位波速确定地应力的方法。

#### 参考文献:

- [1] 李晓昭, 安英杰, 俞 缙, 等. 岩芯卸荷扰动的声学反应与卸荷敏感岩体[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(12): 2086 - 2092. (LI Xiao-zhao, AN Ying-jie, YU Jin, et al. Acoustic responses to rock core unloading-disturbance and unloading-sensitive rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(12): 2086 - 2092. (in Chinese))
- [2] 边智华, 李维树. 南京长江二桥基岩的工程力学性质试验研究[J]. 长江科学院院报, 1999, **16**(4): 42 - 45. (BIAN Zhi-hua, LI Wei-shu. Research on engineering mechanics properties of rock foundation under second Changjiang bridge in Nanjing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, **16**(4): 42 - 45. (in Chinese))
- [3] 高龙生, 葛焕称. 中国大陆岩石标本在高压下的弹性波速的初步研究[J]. 地球物理学报, 1975, **18**(1): 26 - 38. (GAO Long-sheng, GE Huan-cheng. A preliminary study of P- and S-wave velocities under high pressure of rock samples from the mainland of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1975, **18**(1): 26 - 38. (in Chinese))
- [4] 蔡忠理, 刘 克, 吴锦拔, 等. 单轴压缩过程中花岗岩声学特性的研究[J]. 岩土力学, 1986, **7**(2): 27 - 36. (CAI Zhong-li, LIU Ke, WU Jin-ba, et al. The research on acoustic properties of granite under uni-axial compression condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, **7**(2): 27 - 36. (in Chinese))
- [5] 黄承贤, 宋大卫. 在围压下岩石弹性波速的研究[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(2): 32 - 41. (HUANG Cheng-xian, SONG Da-wei. Study on elastic wave velocity of rock under confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **13**(2): 32 - 41. (in Chinese))
- [6] 刘维国, 单钰铭, 徐国盛, 等. 加温三轴试验中砂岩的微裂纹与横波速度[J]. 成都理工学院学报, 1999, **26**(4): 392 - 395. (LIU Wei-guo, SHAN Yu-ming, XU Guo-sheng, et al. Relationship between S-wave velocities and macroracks in sandstone during the heating triaxial test[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, **26**(4): 392 - 395. (in Chinese))
- [7] 施行觉, 孙道远. 循环应力作用下松散介质的波速和衰减特性[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 114 - 116. (SHI Xing-jue, SUN Dao-yuan. Wave velocity and attenuation in the incompact medium under cyclic stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 114 - 116. (in Chinese))
- [8] 丁梧秀. 岩石(体)弹性波波速与应力关系新探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, **8**(3): 43 - 47. (DING Wu-xiu. A recent study on the relation between elastic wave velocity and stress of rock (rockmass)[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, **8**(3): 43 - 47. (in Chinese))
- [9] 刘盛东, 杨玉岷, 胡绍龙. 岩石受力状态对弹性波传播速度影响的初步研究[J]. 中国煤田地质, 1996, **8**(3): 48 - 51. (LIU Sheng-dong, YANG Yu-min, HU Shao-long. Experiment on influence of stress states on elastic waves velocity[J]. Coal Geology of China, 1996, **8**(3): 48 - 51. (in Chinese))
- [10] 吴德伦, 赵明阶. 岩石细观力学参数的反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(增): 433 - 439. (WU De-lun, ZHAO Ming-jie. An inverse study on micromechanical parameters of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(S): 433 - 439. (in Chinese))
- [11] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(1): 50 - 54. (ZHAO Ming-jie, WU De-lun. Ultrasonic velocity and attenuation of rock under uniaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(1): 50 - 54. (in Chinese))
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国水利部. GB 50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB50218—94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese))