第14卷 第3期　　地　震　学　报　　Vol. 14, No. 3
1992年8月　(356-362)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Aug., 1992

岩石变形特征及物理特性的现场试验研究*

陈大元[1)]　许东俊[2)]　陆阳泉[3)]　曹其平[1)]
陈　峰[1)]　罗荣祥[4)]　关华平[5)]

1) 中国北京 100871 北京大学地球物理系
2) 中国武汉 430071 中国科学院武汉岩土力学研究所
3) 中国兰州 730000 国家地震局兰州地震研究所
4) 中国武汉 430071 国家地震局地震研究所
5) 中国北京 100036 国家地震局分析预报中心

摘　要

在从化南昆山脉蚀变花岗岩岩体试洞中，用刚性承压板法进行大尺度试件现场试验. 承压板直径 50 cm. 蚀变带宽约 1-2 m. 测量了岩石的变形特征、视电阻率和声发射以及试洞地坪的倾斜变化. 与室内小试件实验对比可以看出：(1) 在水溶液网络导电机制适用的范围内，大试件和小试件的电阻率随应力应变变化的基本形态都是相似的；(2) 大试件电阻率对应力的滞后效应更为明显；3) 大试件可在较小的应力差下获得较大的电阻率变化；4) 电阻率变化值与应力差之间没有简单的线性关系.

关键词　现场试验；岩石；变形特征；视电阻率；声发射

一、引　言

岩石试件尺度效应是关系到实验室小样品的试验结果能否正确应用于地学研究和工程设计的重要问题. 此问题近年来受到关注(Brace, 1981; Стаховский, 1983). 1987年9月中国地震学会构造物理专业委员会第二届学术讨论会期间，举行了一次大尺度试件岩石力学实验座谈会(耿乃光, 1987). 与会者认为，我国大尺度试验已有一良好开端，如：兰州地震研究所作过 $1\times1\times1.5\,m^3$ 混凝土的视电阻率及声发射的试验(陆阳泉, 1980)；武汉岩体土力学研究所和国家地震局地球物理研究所作过 $0.5\times0.6\times0.3\,m^3$ 岩石试件的剪裂和摩擦试验(许东俊等, 1989)；此外还有人作过 $1\,m^3$ 花岗岩张裂前兆物理量的观测(陆阳泉等, 1990). 与会者还倡议，应结合工程项目进行多种物理量及力学量的观测试验.

本课题结合工程项目，在测量岩石力学变形特征的同时，测量岩石视电阻率及其声发射，以及试洞地坪的倾斜变化. 类似的试验尚未见过报道.

* 本研究为地震科学联合基金会资助项目.
1990年7月30日收到本文初稿，1991年5月31日决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

二、试验环境和方法

广东从化抽水蓄能电站，位于广州市从化县吕田镇南的南昆山脉北侧. 山脉大体呈东西向分布，主峰高程 1200 m. 上、下水库相距 3 km，最大水头约 535 m. 电站主体工程洞群位于燕山三期中粗粒黑云母花岗岩岩基内. 受北西向断裂带 F_1 控制，富含挥发性组份的热气热液沿断裂及节理裂隙侵入花岗岩基，与围岩产生不同程度的交代蚀变，形成力学强度较低的蚀变带，带宽一般为 1－2 m. 为获得蚀变花岗岩体比较可靠的力学参数，武汉岩土力学研究所受广东水电勘测设计院地勘总队的委托，在现场进行刚性承压板法变形特性试验和三轴试验. 探洞平行于引水隧道，相距 70 m. 三个试验支洞离探洞洞口分别为 703、760 和 817 m，编号分别为 PD2-8、PD2-9 和 PD2-10. 本文仅介绍刚性承压板法试验，三轴实验另文介绍.

刚性承压板直径约 50 cm. 将试验点洞底刮平，起伏不大于 5 mm，打孔后预先埋设测量电阻率用的电极，再用加了速凝剂的高标号水泥砂浆填平，然后放上承压钢板、千斤顶及其它传力元件，最后在顶板浇铸混凝土座，需保证混凝土座面与承压板平行（参看图 1）. 为测量位移，在板上对称分布了 4 个测点，在板外沿支洞轴向及其横向各埋设 2 个测点，此二测点与板缘的距离分别为 10 和 20 cm. 承压板边缘至岩壁的距离不少于 1.5 倍承压板直径，以减少岩体的约束. 塑料布和油毛毡被放在承压板与水泥之间起绝缘作用，使承压板及加压装置不影响岩石电阻率的测量.

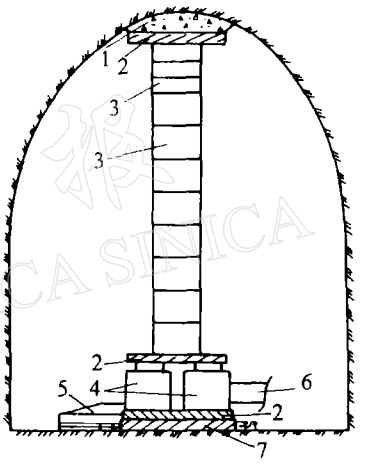


图 1　刚性承压板法现场试验安装示意图　1. 混凝土顶座；2. 钢垫板；3. 传力柱；4. 千斤顶；5. 板外位移传感器测点；6. 接液压手动泵；7. 刚性承压板

试验点均在 PD2-9 支洞内. 一个试点离支洞口 14.65 m，编号为 PD2-9-5，是微弱蚀变的中粗粒花岗岩，局部有高岭石化或绿泥石化，裂隙很少，岩石较完整坚硬. 裂隙 J_1（N40°W，SW∠60－65°）微张填充高岭土，宽约 0.2 mm，如图 2a 所示. 另一试点编号 PD2-9-2，离支洞洞口 7.5 m，为中度蚀变的中粗粒花岗岩，所含粘土矿物稍湿且粘手，表层 3－6 mm 松软，强度较低，有一组裂隙 J_2（N75°E，SE∠75－80°）延伸不长，微张且填充宽达 0.5 mm 的高岭土，如图 2b 所示. 岩石电阻率测量用的是对称四极装置，图 2 中还给出了电极位置. A_i 和 B_i 为第 i 测道的供电电极，M_i 和 N_i 为第 i 测道的测量电极. PD2-9-5 试点布置了两个相互垂直的测道，与支洞轴线均为 45°，如图 2a 所示. AB 极距均为 100 cm，MN 均为 30 cm. PD2-9-2 试点也布置了两个方向的测量，只是在每个方向上有三种不同的极距. 第 5 和 6 测道极距最长（AB=135 cm，MN=45 cm），第 1 和 3 测道最短（AB=45 cm，MN=15 cm），第 2 和 4 道居中（AB=90 cm，MN=15 cm），如图 2b 所示. 在两个试点上各作了一次刚性承压板试验，图 2a

http://www.dizhenxb.org.cn

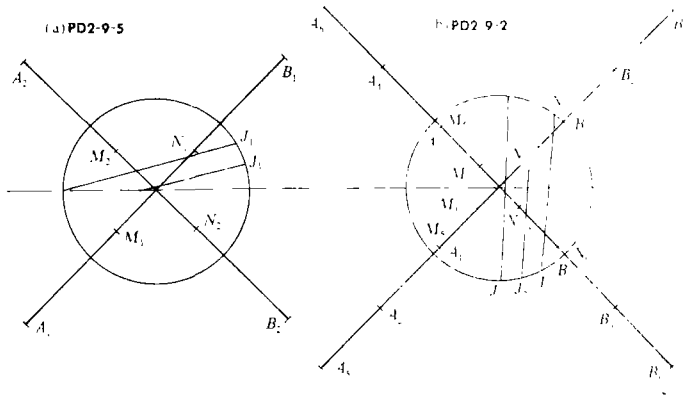


图2 试验点裂隙及电极分布

—·—·— 为试验支洞轴线；J_1、J_2 为裂隙；A_1、B_1 为供电电极；M、N 为测量电极

和图2b中的圆圈表示的是承压板所放置的位置. 声发射测量用的是S3207单通道声发射综合参数测试仪. 接收声发射的压电晶体探头放在承压板上记录声发射脉冲及其累计总数. JB型金属水平摆倾斜仪，放置在PD2-9支洞尽头东南角，测量支洞地坪沿支洞轴线及其横向的倾角变化.

三、主要结果

1. 按照均匀各向同性半无限介质表面受局部荷载的Boussinesq公式

$$E=\frac{\pi(1-\nu)^2\sigma d}{4W} \tag{1}$$

计算岩体的变形模量和弹性模量. 其中 σ 为承压板平均压力，d 为承压板直径，ν 为岩石泊松比，W 为受压面积的平均位移，即承压板上4个测点的平均值. 当用总变形 W_d 代入上式中的 W，则计算所得为岩石的变形模量 E_d；当用弹性变形 W_e 代入，则为弹性模量 E_e.

根据不同荷载下的位移测值，绘制了荷载位移 σ-W 曲线. 总变形和弹性变形的取值分别为加荷割线法和卸荷割线法，如图3所示. 考虑到试点岩石，表面加工后已吸水膨胀软化，使低压下的变形很大，故把 $\sigma=0.5$MPa 以下的变形作为预压密变形. 在PD2-9-5及PD2-9-2两试点上所测得的荷载位移 σ-W 曲线分别绘在图4a，b中. 由此计算的结果列于表1.

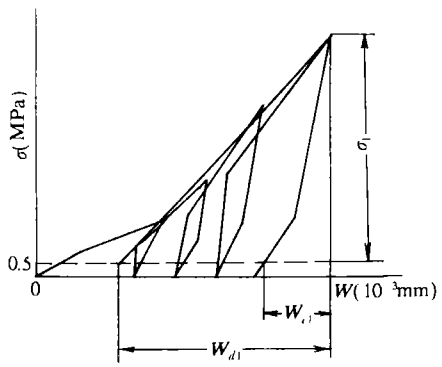


图3 变形取值示意图

2. 按均匀半无限空间对称四极法的视电阻率公式计算视电阻率 ρ_s

$$\rho_s=K\Delta V/I \tag{2}$$

其中

$$K=\pi/(r_{AM}^{-1}-r_{AN}^{-1}) \tag{3}$$

http://www.dizhenxb.org.cn

表 1　蚀变花岗岩的弹性模量和变形模量(MPa)

试点编号	应力范围	变形模量 E_d	弹性模量 E_s	平均变模 $\overline{E}_d$	平均弹模 $\overline{E}_s$	回弹率 $\overline{E}_d/\overline{E}_s$
	0.5－7.46	58	3.32×10^3			
PD2-9-2	0.5－5.60	73	2.42×10^3	68	2.4×10^3	3%
	0.5－3.73	73	1.44×10^3			
	0.5－14.3	6.56×10^3	25.9×10^3			
	0.5－11.8	5.88×10^3	21.2×10^3			
PD2-9-5	0.5－9.30	5.88×10^3	23.3×10^3	5.98×10^3	22.2×10^3	27%
	0.5－7.44	5.83×10^3	22.5×10^3			
	0.5－5.58	5.76×10^3	18.2×10^3			

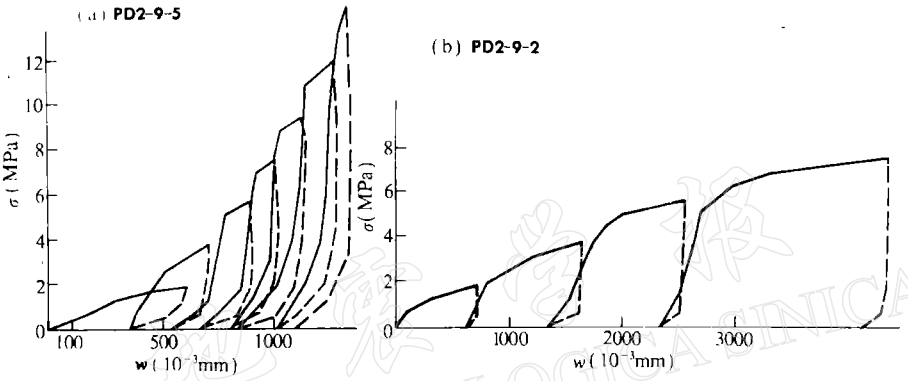
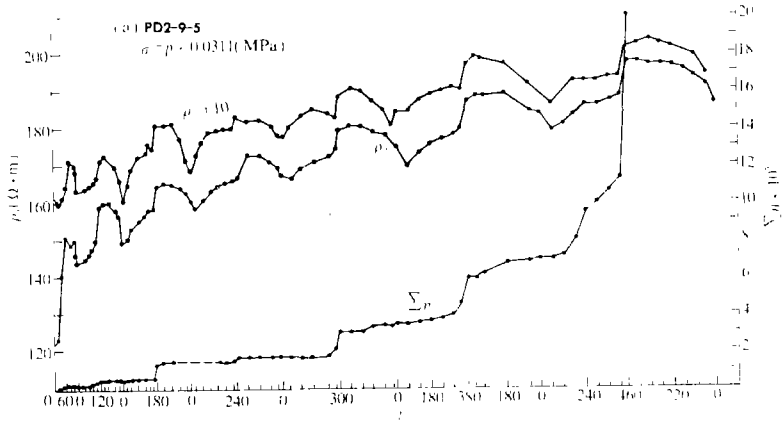


图 4　试点底板变形曲线

ΔV 为 MN 电位差，I 为 AB 供电电流，r_{AM} 为 A 和 M 两点间的距离，r_{AN} 为 A 和 N 两点间的距离. 图 5a 和图 5b 绘的是按上面式子计算得到的结果. 纵轴为视电阻率 ρ_S. 横轴上的数字表示未经换算的油压千斤顶压力表的读数 p，若乘以 0.0311 即为承压板上的平均压力(MPa). 横轴上数字的顺序，表示加卸载的时间顺序. 声发射的累计总数 $\sum n$ 随加卸载的变化也绘在图 5 中.

3. 试验支洞PD2-9尽头 SE 角落处，安置了 JB 型水平摆倾斜仪，记录支洞地坪沿支洞轴线倾角 φ_N 及其横向倾向 φ_S 的变化. PD2-9-5 试点离倾斜仪过近，记录出格，而 PD2-9-2 试点离得过远，仪器灵敏度不够，均未有记录. 仅记到了离仪器 3m 处(PD2-9-4 试点)加卸载的影响. 记录到一个很特殊的现象，好像存在一个"倾斜应力阀值 σ_t". 最大应力 σ_m 低于 σ_t 的前三轮加卸载过程中(σ_m=2.65、4.0 和 5.3 MPa)，沿洞轴横向角 φ_S 不变. 而 $\sigma_m>\sigma_t$ 的后两轮 φ_S 才随应力线性变化，φ_S/σ 突然变为 0.063″/MPa. 在 σ_m=8.6 MPa 的最后一轮，沿洞轴方向的倾角 φ_N 发生不可恢复的变化，卸载后 φ_N 基本没有恢复. 但在 σ_m=8.6 MPa 的最后一轮，φ_N 随应力仍为线性变化. 但 φ_N/σ 已由原来的 0.19″/MPa 变为 0.14″/MPa，好像发生了加工强化(详情另文介绍). 上述现象似乎表明在第三轮和第四轮加载过程中，岩石结构发生了某种不可恢复的变化，以致影响到倾角对应力变化的灵敏度. 这一现象在地震预报中的意义值得注意.

http://www.dizhenxb.org.cn



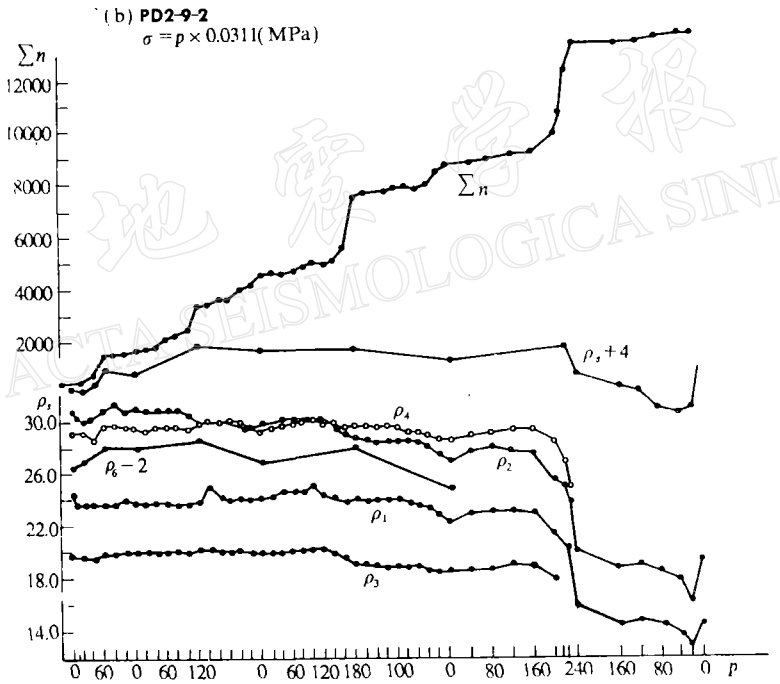


图5 岩石视电阻率和声发射总数在加卸载过程中的变化

四、分析和讨论

1. 在PD2-9-5试点处，岩石为微弱蚀变花岗岩，其平均弹性模量为22.2 GPa. 普通花岗岩的平均弹性模量为100 GPa. 在此试点上，岩石视电阻率(以下简称电阻率)随时间的变化示于图5a. 从图中可以看到多次加卸载的结果. 每轮加载后电阻率均升高，每轮中电阻率的极大值也随每轮最大压力的升高而升高. 这个特征和我们以前做过的花岗岩小试

http://www.dizhenxb.org.cn

件的结果相比，相当于高水饱和度时初始加压阶段的特征，请参看陈大元等(1987)文中的图3a. 但也有与小试件结果不相同之处：(1)从图5a可以看到，电阻率的极大值与极小值常常与应力的极值不同步，电阻率的变化落后于应力. 为了更清楚地表示出电阻率与应力的这种关系，特取 ρ_1 为例，作 σ-ρ_1 曲线，绘于图6a. 把它与图4a中所绘该点岩石的应力-位移(σ-W)曲线相比，可以看到两曲线形态十分相似. 特别是每轮最大压力过后压力已降低一些时，位移才达到极大值(除第一轮外)，而电阻率的变化与之完全一样. 因此可以认为两种滞后相互有关，位移滞后是电阻率滞后的可能原因之一，但还不是唯一的原因. 因为电阻率除了在最大压力附近有滞后外，在零压力附近有更明显的滞后. 这从图6a中看得很明显，电阻率的极小值并不在零压力处. 而位移则不同，从图4a中可以看到零压力时位移恰恰是极小值. 所以在零压力附近，电阻率变化滞后于应力，已不是位移造成的. 这种滞后可以解释如下：当岩石是裂隙水溶液网络导电时，水溶液排出和流进裂隙总是滞后于压力的变化. 特别是在低压力下滞后应更为明显. 因为压力低则压力差也小，水流动也会更为缓慢. 此外试件尺度的加大必然增大了水流动的困难. 所以大尺度的试件比起小尺度试件来这种滞后效应更为明显，在低压力下尤为突出. (2)加卸载所加最大压力，从第一轮的1.86 MPa逐轮增加，最后一轮已达到14.0 MPa，几乎相差一个数量级. 但每轮最大压力时的电阻率与该轮完全卸载后的电阻率相比下降仅在3%到6%之间. 各轮之间电阻率的下降相差很小，与压力差的大小没有明显的关系. 这一特征是与完整岩石制成的小标本的结果很不相同. 大尺度现场试件的不完整性或非均匀性引起应力集中，使局部地段

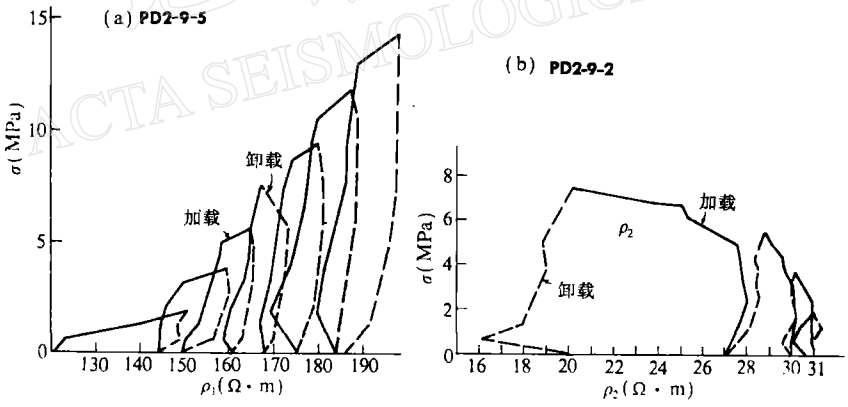


图6　视电阻率随荷载变化曲线

应力超过弹性极限进入塑性阶段，可能是产生这一特征的原因. 因为只有弹性变形才是变形的可恢复部分，故而最大压力虽然差别近一个量级，但可恢复的弹性变形随总压力变化不大(可从图4a关于位移-应力曲线中得到证实)，因此电阻率的变化值才相差不多. 这个事实使我们想到：在复杂的地质条件下，不能简单地把电阻率的变化幅度与压力变化幅度相联系. 这也有助于说明地震震级与地电阻率异常幅度关系甚小的观测事实.

2. 在PD2-9-2试点处岩石为中度蚀变花岗岩，表面有一松软层，其成份中的粘土矿物较湿，岩石的完整性也差. 其平均弹性模量为2.4 GPa、平均变形模量为68 MPa，分别为PD2-9-5试点处的1/9和1/86，岩性很差. 其电阻率也比PD2-9-5试点处低一个数量级. 在

http://www.dizhenxb.org.cn

此试点上增加了不同极距的视电阻率测量，如图2b所示. ρ_1、ρ_2和ρ_5是在同一方向测量的. 其中测量ρ_1的供电电极A_1和B_1间距最小，全在刚性承压板之下. 而测量ρ_2和ρ_5的供电电极A_2、B_2、A_5和B_5则在承压板之外. 从测量结果(图5b)看，ρ_1和ρ_2的变化形态总体相似. 至于极距最大的ρ_5，虽然只在最高荷载及完全卸载的稳压下进行了测量(这是由于电阻率测量跟不上力学变形测量的速度，在加压过程中只好放弃对它的测量). 但仍可看出ρ_5变化的总趋势与极距较小的观测结果是一致的. 另一个方向的测量也与此类似. 从图5b中可以看出电阻率随压力增加先上升，大约在2.5 MPa附近达到极大值，然后降低. 特别是在最后一轮，σ约为6.0 MPa时电阻率发生急剧下降，同时声发射数也急剧增加. 除了第一轮加压时电阻率一开始有些降低然后升高外，余下几轮加压时电阻率均呈升高－平稳－下降的形态. 卸载时电阻率并不回升而是下降. 为了更清楚地看出这一特征，以ρ_2为例作σ-ρ_2曲线绘于图6b. 其次随着逐轮最大压力的增加，电阻率的极大值一轮比一轮下降(第一轮压力过小除外). 上述电阻率随压力变化的特征与实验室中高水饱和度花岗岩小标本的变化特征基本相似，请参看陈大元等(1987)文中的图4a. 只是大尺度试件的破坏强度比起完整小标本低很多. 完整小标本在压力约100 MPa左右电阻率急剧下降，而在PD2-9-2试点上压力仅在6 MPa左右电阻率就急剧下降.

综上所述，(1)在水溶液网络导电机制适用的范围内，大试件和小试件的电阻率随应力变化的基本形态都是相似的；(2)大试件电阻率对应力的滞后效应更为明显；(3)大试件可在较小的应力下获得较大的电阻率变化；(4)电阻率变化值与应力之间没有简单线性关系.

参加本项工作的还有国家地震局兰州地震研究所王玉祥、准淑琴同志. 中国科学院武汉岩土力学研究所和广东水电勘测设计院地勘队曾给予大力支持. 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

陈大元、陈峰、贺国玉，1987. 岩石受压过程中"应力反复"对电阻率的影响. 地震学报，**9**，303－311.

耿乃光，1987. 大尺度试件岩石力学实验座谈会概况. 国际地震动态，12，25.

陆阳泉，1980. 三向压缩下大型混凝土标本的电学特性. 西北地震学报，**2**，4，55－60.

陆阳泉、钱家栋、刘建毅，1990. 大型花岗岩体缓慢膨胀破裂过程中电阻率和声发射前兆特征的实验研究. 西北地震学报，**12**，1，45－49.

许东俊、耿乃光，1989. 岩石和断层泥摩擦特性的现场大尺度试件实验研究. 地震学报，**11**，424－430.

Brace, W. F., 1981. The effect of size on mechanical properties of rocks. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 651－652.

Стаховский, И. Р., 1983. Деформационный предвестники разрушения крупномасштабных образцов горных пород. *Физики Земли*, **10**, 90－94.

http://www.dizhenxb.org.cn