

施行觉, 赵闯, 李成波, 温丹. 2010. 岩石蠕变破裂过程及其响应比变化的实验研究. 地震学报, 32(3): 332-339.
Shi Xingjue, Zhao Chuang, Li Chengbo, Wen Dan. 2010. Experimental study on rock creep fracture and its Load/Unload response ratio. *Acta Seismologica Sinica*, 32(3): 332-339.

岩石蠕变破裂过程及其响应 比变化的实验研究^{*}

施行觉^{*} 赵 闯 李成波 温 丹

(中国合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学学院)

摘要 对花岗岩样品进行逐次加载的蠕变实验, 得到了加载过程中的蠕变曲线和蠕变破裂的全过程曲线. 对加载过程中的杨氏模量、蠕变量、蠕变速率等参数用加卸载响应比方法进行了分析, 认为有二种不同形态的响应曲线. 在中低应力的弹性阶段其响应比都近似为1, 而在高应力的膨胀阶段其响应比都随应力而增加. 对应力不变时的蠕变破裂全过程曲线进行了分解, 在蠕变破裂过程中, 瞬态、稳态和加速3个阶段的持续时间分别为全部时间的18%, 75%和7%; 在加速蠕变阶段蠕变速率及其响应比明显增加. 这一结果是预测蠕变破裂的明显指标.

关键词 岩石蠕变 蠕变破裂 加卸载响应比

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.03.008 中图分类号: P313.3 文献标识码: A

Experimental study on rock creep fracture and its Load/Unload response ratio

Shi Xingjue^{*} Zhao Chuang Li Chengbo Wen Dan

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology
of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Creep experiments with a granite sample were performed by using graded loading method. The creep curve during the gradual loading process and creep fracture curve under uniform stress were obtained. The parameters, such as Young's modulus, creep value and creep rate, were analyzed with Load/Unload response ratio (LURR) method. There are two different types of response ratio curves, but the LURR value was near 1 at low stress or in elastic deformation phase, then the LURR was increasing at high stress or in rock dilation phase. The whole creep fracture curve under uniform stress was decomposed to three phase: instantaneous, steady and accelerating creep, with the ratio of duration time of each phase over whole time being about 18%, 75% and 7% respectively. The creep rate was increasing remarkably in accelerating phase and

* 基金项目 国家自然科学基金项目(40774096)资助.

收稿日期 2009-07-06 收到初稿, 2009-09-25 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: sxj@ustc.edu.cn

it was a useful parameter for predicting the creep fracture.

Key words: rock creep; creep fracture; Load/Unload response ratio

引言

应力的持续增加可以使岩石产生破裂。但恒定不变的高应力, 也可以使岩石突然失去强度, 产生蠕变破裂。完整的蠕变破裂过程曲线包含了瞬态蠕变、稳态蠕变和加速蠕变等3部分(陈颤, 黄庭芳, 2001)。蠕变破裂所需要的时间与应力水平(定义为加载应力与破裂强度之比)有关, 要在有限的实验时间内观测到蠕变破裂, 应力水平大概在95%以上(Li, Xia, 2000; Shin *et al*, 2005)。相对于岩石的加载破裂, 蠕变破裂的过程较长, 应变速率增加非常明显, 在实验时可以根据蠕变曲线速率变化来预测岩石蠕变破裂的发生。对于岩石的蠕变实验已有较多的研究(马胜利, 马瑾, 2003; 杨恒, 白武明, 2000; 施行觉等, 2006), 但对于蠕变破裂全过程的研究相对较少, 主要因为应力水平的控制较难, 在有限的实验时间内, 不易记录到岩石的蠕变破裂的全过程曲线。

岩石蠕变与所含的矿物晶体、胶结物、微裂隙和孔隙等因素有关, 并表示了岩石内部的位错、微裂纹的扩展(周蕙兰, 1990)。吕培苓等(1991)进行了单轴加压下岩石蠕变时的声发射实验, 将蠕变破坏3个阶段中声发射活动与地震孕育过程中某些地震活动图象变化进行了联系。在加速蠕变阶段, 声发射活动水平明显增强, 可以有多次较大的起伏变化。并认为岩石蠕变破坏可能较容易形成前-主-余型的地震序列。

蠕变实验方法很多(孙钧, 2007), 本文采用逐次加载的方式来增加应力, 共进行了15次蠕变实验。前14次实验是加载过程, 有蠕变, 但没有破裂, 最后的第15次得到了蠕变破裂的全过程曲线。岩石蠕变过程也是材料损伤导致的弱化过程, 加卸载响应比理论对岩石破裂实验数据处理已取得很好效果(余怀中等, 2003; 许昭永等, 2002; 施行觉等, 1994), 但对蠕变破裂过程(一种可能的发震机制)的响应比的变化尚缺乏研究。本文将实验数据分成加载过程和破裂过程二部分, 用加卸载响应比理论来分别研究有关参数的变化。

1 实验仪器和过程

实验样品采用郯庐断裂带附近安徽怀远花岗岩。该花岗岩由呈中粗颗粒状的不同矿物晶体组成, 矿物经X射线粉晶衍射方法鉴定, 其主要矿物成份为: 钙长石约60%, α -石英约30%, 黑云母10%, 密度为 2.579 g/cm^3 。用电子显微镜和光学显微镜观察岩石标本的表面形貌, 均发现有许多微裂纹存在, 长度约 $100\text{--}2400\text{ }\mu\text{m}$, 宽度约 $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ 。加工成 $32\text{ mm}\times32\text{ mm}\times70\text{ mm}$ 长方体样品, 6个面磨平, 且相互平行。在样品两侧贴电阻应变片, 同时在另1块相同的花岗岩上贴相同的应变片, 组成全桥连接电路, 以进行温度补偿, 降低温度对蠕变的影响。与数字应变仪(WS-3811)联接。将岩石样品置于全自动伺服液压试验机(YAW4605)上, 在设定的应力水平下进行蠕变实验。应力和应变的测量值由计算机以每秒一次的速率自动采样, 存入文件保存。用钢块进行了系统的稳定性试验, 应力和应变测量值是二条平行的直线, 测量误差分别为 $\pm 0.01\text{ MPa}$ 和 $\pm 1\text{ 微应变}$ (施行觉等, 2009)。

每次的蠕变实验除了加载力以外, 其它条件保持不变。岩石的应力加卸载过程和相应

的形变过程如图 1 所示, 图中标出的 1 和 2 分别表示恒定应力的起始和结束。以 100 N/s 的速率加载到设定的压力, 然后保持应力在 1 天的时间内不变, 再以相同速率卸载到 0。第一次设定加载力为 20 kN, 然后对同一样品, 逐次增加 20 kN 直到 120 kN, 以后逐次增加 10 kN 直到 210 kN。与常用的蠕变逐级连续加载实验不同, 每次蠕变实验之间有 1 天的间隔, 用于测量样品在自由状态下的蠕变恢复过程。为了突出蠕变过程, 在图 1b 中没有显示加卸载过程中的应变。同一块样品经过 15 次不同的蠕变压力, 得到了 15 条蠕变曲线。前 14 条曲线是加载过程中的蠕变曲线, 但没有破裂; 最后 1 条曲线是蠕变破裂曲线, 在压力 210 kN(相当于 202.92 MPa)保持不变的情况下, 经过 16 051 s 后, 得到了包含 3 个阶段的蠕变曲线, 而最终破裂。

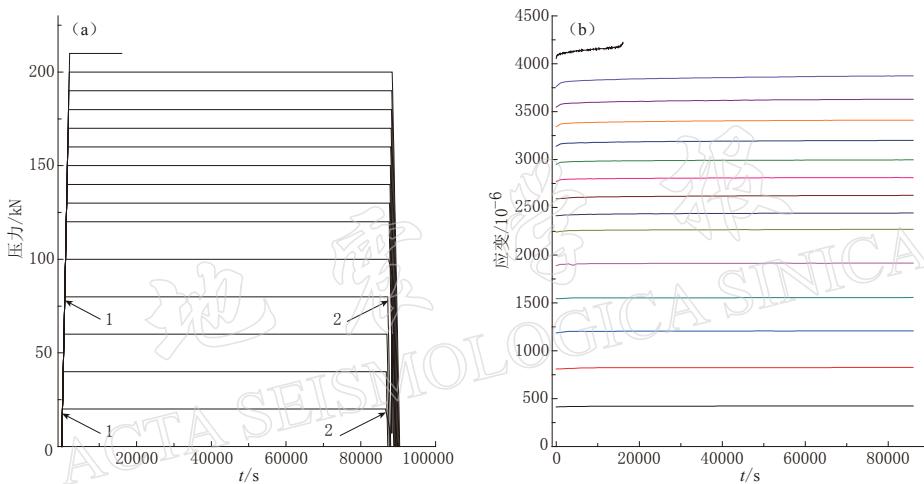


图 1 (a) 同一块样品 15 次实验的加载过程; (b) 实验得到的相应的蠕变曲线

Fig. 1 (a) Loading process of 15 experiments for one sample; (b) strain curves obtained from the 15 experiments

2 加载过程中的参数及其响应比

在数据处理时为了方便比较, 以达到设定压力的时刻(即图 1a 中的点 1)为时间零点, 每条蠕变曲线的时间是 86 400 s, 但最后 1 条蠕变曲线除外。各次实验的具体测量值和相应的计算值列于表 1。表中应变 ϵ_1 和 ϵ_2 是测量值, 分别是蠕变的起始和终止值; $\epsilon_{12} = \epsilon_2 - \epsilon_1$ 是 24 小时的蠕变值; 初始模量 $E_1 = \sigma / \epsilon_1$, 渐近模量 $E_2 = \sigma / \epsilon_2$, 模量亏损 $\Delta E = E_1 - E_2$; 速率是各条蠕变曲线的稳态蠕变的速率(如图 6 中稳态蠕变直线部分的斜率)。

岩石蠕变过程也是材料损伤导致的弱化过程, 因此用加卸载响应比来研究有关参数的变化(尹祥础等, 2008a, b, 2009)。

响应的定义

$$X = \lim_{x \rightarrow \infty} (\Delta R / \Delta P) \quad (1)$$

加卸载响应比的定义

$$Y = X_+ / X_- \quad (2)$$

考虑到岩石的不均匀性引起的曲线扰动和蠕变的响应量变化较小, 将加卸载响应比修改为

响应比

$$Y = \lim_{x \rightarrow \infty} [(\Delta R / \Delta P) / (\Delta R / \Delta P)_1] \quad (3)$$

式中, 下标 1 是第一个响应的值, 其响应比在低应力时的值仍近似为 1. Y 依然表示了曲线的非线性上升趋势和材料损伤程度. 对于加速阶段的蠕变破裂曲线, 应力是没有变化的, 如将压力 P 修改为时间 t , 则响应比的实质和形式都没有变化.

表 1 蠕变实验过程中参数随压力的变化

Table 1 Parameter variation with stress increase during creep experiment

压力 /kN	应力 /MPa	ϵ_1 $/10^{-6}$	ϵ_2 $/10^{-6}$	ϵ_{12} $/10^{-6}$	E_1 /GPa	E_2 /GPa	ΔE /GPa	速率 $/10^{-10} \cdot s^{-1}$
20	19.33	414	425	11	46.68	45.47	1.21	0.37
40	38.65	810	827	17	47.72	46.74	0.98	0.50
60	57.98	1188	1209	21	48.80	47.96	0.84	0.62
80	77.30	1546	1558	22	50.00	49.30	0.70	0.75
100	96.63	1894	1917	23	51.02	50.41	0.61	0.88
120	115.96	2242	2268	26	51.72	51.13	0.59	1.0
130	125.62	2411	2440	29	52.10	51.48	0.62	1.12
140	135.28	2589	2625	36	52.25	51.54	0.72	1.25
150	144.94	2770	2810	40	52.33	51.58	0.74	1.37
160	154.61	2950	2996	46	52.41	51.61	0.80	1.5
170	164.27	3142	3199	57	52.28	51.35	0.93	1.63
180	173.93	3342	3411	69	52.04	50.99	1.05	1.96
190	183.60	3546	3629	83	51.78	50.60	1.18	2.63
200	193.26	3762	3874	112	51.38	49.89	1.49	4.13
210	202.92	4055	4223	168	50.05	48.06	1.99	36.5

在 15 次的加载过程中, 将模量 E_1 和 24 小时的蠕变量 ϵ_{12} 看成是应力的响应. 它们随应力的变化如图 2 所示. 杨氏模量与蠕变速率是两种不同类型的响应曲线. 杨氏模量是先上升再下降的曲线, 分别表示了岩石的压缩和膨胀. 模量在第 10 次加载(即 76% 的破裂强度)后开始下降, 表示岩石已有大量裂纹产生, 岩石弱化, 模量下降; 而蠕变量始终是单调的上升曲线.

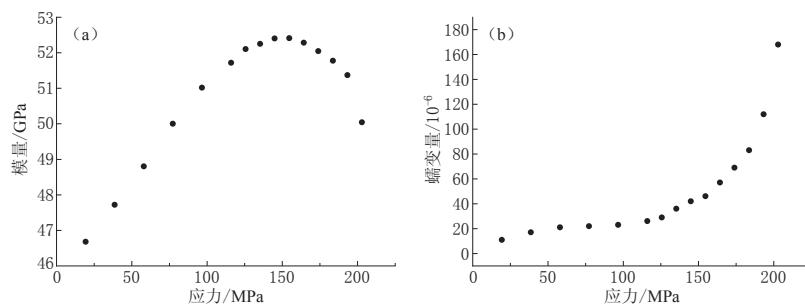


图 2 两种不同类型的响应曲线

(a) 模量 E_1 对应力的响应曲线; (b) 蠕变量 ϵ_{12} 对应力的响应曲线

Fig. 2 Two different response curves

(a) Modulus E_1 versus stress; (b) creep value ϵ_{12} versus stress

模量响应曲线与典型的本构曲线有所不同, 但其加卸载响应比规律仍保持不变, 见图

3. 图中除第 9 个点处于响应曲线的拐点, 变化量极小, 测量误差相对很大外, 其余的点变化均符合加卸载响应比的规律.

蠕变量的响应比曲线见图 4. 尽管二者的响应曲线形状不同, 但其响应比变化规律是相同的. 在弹性阶段其值近似为 1, 在高应力的膨胀阶段其值不断上升, 表示了岩石的损伤程度.

稳态蠕变速率(不含蠕变破裂曲线的数据)及其响应比随应力的变化, 见图 5 所示.

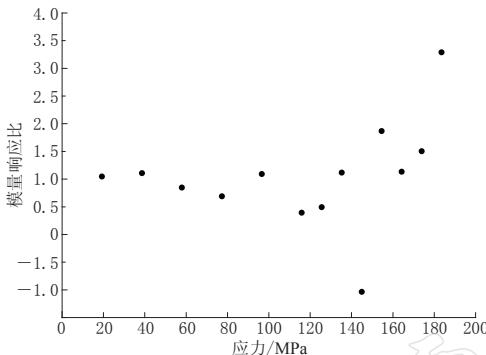


图 3 加载过程中模量 E_1 的响应比曲线

Fig. 3 Variation of loading and unloading response ratio of modulus E_1 with stress increase

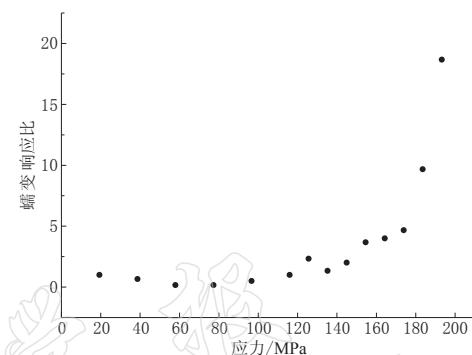


图 4 加载过程中蠕变量 ϵ_{12} 的响应比曲线

Fig. 4 Variation of loading and unloading response ratio of creep value ϵ_{12} with stress increase

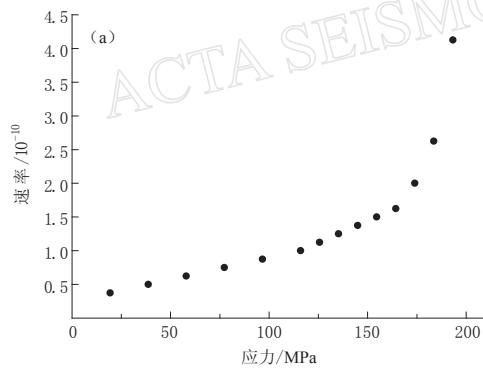


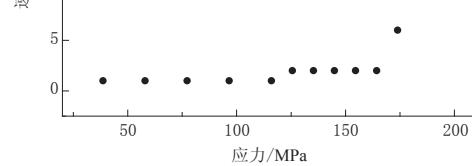
图 5 加载过程中稳态蠕变速率(a) 及其响应比 (b) 随应力的变化

Fig. 5 Variation of stable creep rate (a) and its response ratio (b) with stress increase

以上响应比曲线显示, 在第 10 次加载(即 76% 的破裂强度)以前, 响应参数随应力的变化基本上是线性均匀的, 其响应比近似为 1. 但其后由于岩石膨胀裂纹加速扩张, 其响应比就有较快的增加. 由于多次受到蠕变应力的长期作用, 14 次的蠕变已经产生了总共 592 $\mu\epsilon$, 材料已有很大损伤, 因此在长期力的作用下, 蠕变使岩石的膨胀比应力连续增加的实验更明显.

3 蠕变破裂过程全曲线的分解

以上的 14 次蠕变实验, 加载应力是逐次增加的. 第 15 次实验时, 在 210 kN(即 202.92 MPa)稳定的压力下(图 1a, b)得到了岩石蠕变破裂的全过程曲线. 其全部应变为



$$\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_1(t) + Vt + \epsilon_3(t) \quad (4)$$

式中, 右方分别为弹性应变、瞬态蠕变、稳态蠕变和加速蠕变。为了突出蠕变过程, 以蠕变起始点作为坐标系的原点, 作图 6。在 16 051 s 前压力始终保持不变, 其后由于岩石蠕变破裂, 强度突然下降, 压力机立即自动停止工作。

将该实测曲线分解成 3 部分: 从 0—2 900 s 为第一部分的瞬态蠕变; 从 2 091—14 934 s 为稳态蠕变; 从 14 935—16 051 s 为加速蠕变阶段。各个阶段的持续时间分别为全部时间的 18%, 75% 和 7%, 与理论估算的值(24%, 72% 和 3%)大致相近(Boukhariwv *et al*, 1995)。

对稳态蠕变部分用直线拟合可得稳态蠕变速率 $V=36.5 \times 10^{-10} / \text{s}$, $\epsilon_2=Vt$, 即图 6 中的斜直线。

对瞬态蠕变用

$$\epsilon_1(t) - \epsilon_2 = \epsilon_\infty + a \times \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

$$t < 2 900 \text{ s}$$

进行反演, 得到渐近应变 $\epsilon_\infty = 63$, $a = 49$, 驰豫时间 $\tau = 711$ 。用此公式和参数将时间外延 16 051 s, 得到图 6 中的 ϵ_1 曲线。

对加速蠕变部分用

$$\epsilon_3 = \epsilon(t) - \epsilon_1(t) - \epsilon_2 = A + B \times \exp(t/\tau) \quad (6)$$

$$t > 14 934 \text{ s}$$

进行反演, 得到图 6 中的曲线 ϵ_3 , 也即图 7a 中的实测曲线, 而 $A + B \times \exp(t/\tau)$ 即为图 7a 中的指数拟合曲线。

在蠕变破裂的整个过程中, 应力是恒定不变的, 变化的只是时间。因此将响应看成是时间的函数, 在稳态蠕变阶段蠕变速率的响应比是近似为 1 的一条直线。在加速蠕变阶段,

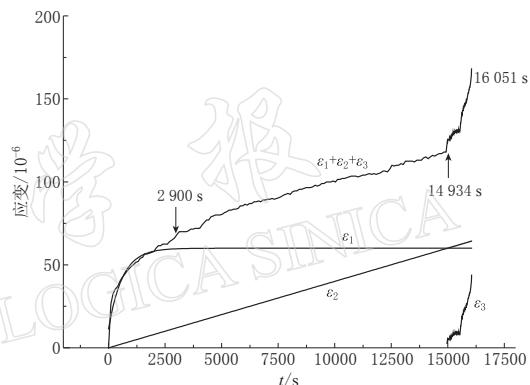


图 6 蠕变破裂全过程曲线及其分解

Fig. 6 Strain curve for the whole creep fracture process and its decomposition

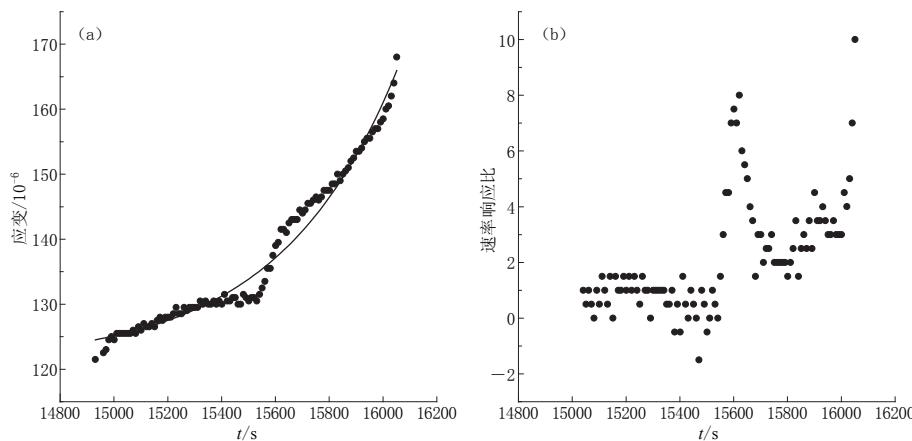


图 7 (a) 加速蠕变曲线及其指数拟合曲线; (b) 加速蠕变阶段蠕变速率的响应比

Fig. 7 (a) Accelerating creep data and fitted exponential curve; (b) response ratio of creep rate in accelerating creep phase.

用公式(3)计算的蠕变的响应比如图 7b 所示。在应力不变的情况下, 应变的增加引起模量的下降, 加速蠕变阶段的模量响应比曲线与图 7b 是完全一致的。由于岩石的不均匀性, 它不是一条光滑的曲线, 而有 2 个峰值。第一个峰值的出现表示蠕变速率的突然增加, 然后响应比值保持在较高的水平; 再次增加直到破裂。这一结果与声发射在加速蠕变阶段可以有多次较大的起伏变化相一致(吕培苓等, 1991)。

4 讨论与结论

实验室中岩石失稳大致可分为 3 类: 岩石裂缝的黏滑、连续加载中的破裂和应力不变的蠕变破裂。蠕变破裂的本质是位错的运动引起的微裂纹的扩展与连通(Lei *et al*, 2000), 在宏观上则表现出材料的弱化, 因此也可以用响应比来描述。

地壳中应力的增加过程可能是连续的, 也可能是不连续的。发震前应力可能是增加的, 但也可能是保持不变的。本文通过实验数据讨论了应力增加阶段和应力保持阶段的响应比变化。

在应力增加阶段, 杨氏模量的下降和亏损表示了裂纹扩展引起的岩石弱化, 蠕变速率也表示了岩石的弱化。作为应力的响应参数, 虽然它们是二种不同类型的响应曲线, 但加卸载响应比的变化规律是大致相同的。实验数据表明当应力大于破裂强度的 76%, 材料弱化明显加快, 使响应比曲线明显上升。

在应力保持阶段, 蠕变破裂 3 个阶段的持续时间分别为全部时间的 18%、75% 和 7%。即稳态蠕变时间最长, 而加速蠕变时间最短。尽管加速蠕变阶段的时间约为 7%, 但比连续加载的岩石破裂时间要慢得多。在加速蠕变阶段, 蠕变量和蠕变速率, 或杨氏模量等参数的响应比有明显的上升。同时声发射也大量产生(Lei *et al*, 2000), 表示了岩石的弱化或损伤也在加速, 速率的增加则预示了岩石的蠕变破裂即将发生。如有流体进入扩展的裂纹, 将可能引起多种参数的响应比变化, 但这种弱化是与时间相关的。

蠕变破裂是否可能是地震余震的一种机制, 与加载破裂的地震机制有何异同, 还需要进行深入研究。

参 考 文 献

- 陈颙, 黄庭芳. 2001. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社: 185-187.
- 吕培苓, 吴开统, 焦远碧. 1991. 岩石蠕变过程中声发射活动的实验研究[J]. 地震学报, 13(1): 104-112.
- 马胜利, 马瑾. 2003. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展[J]. 地震学报, 25(5): 528-534.
- 施行觉, 李成波, Aydin A, 黄建华, 赵闯. 2009. 地球介质在低应力水平时的非定常参数粘弹模型[J]. 地球物理学报, 52(1): 50-56.
- 施行觉, 温丹, 包雪阳, 李成波, 黄耘. 2006. 岩石蠕变实验在地球介质粘弹性参数计算中的应用[J]. 中国科学: D 辑, 36(3): 219-224.
- 施行觉, 许和明, 万永中, 卢振刚, 陈学忠. 1994. 模拟引力潮作用下的岩石破裂特征: 加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. 地球物理学报, 37(5): 633-638.
- 孙钩. 2007. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 26(6): 1081-1106.
- 许昭永, 赵晋明, 杨润海. 2002. 负坡段加卸载响应比的物理意义及预测效能[J]. 地震学报, 24(1): 42-49.
- 杨恒, 白武明. 2000. 岩石圈流变实验研究的进展[J]. 地球物理学进展, 15(2): 79-89.
- 尹祥础, 张浪平, 张晖辉. 2008a. 加卸载响应比 20 年及其展望[J]. 国际地震动态, (4): 1-17.
- 尹祥础, 张浪平, 尹琳玉. 2008b. 加卸载响应比理论的近期进展[G]//中国地震预报探索. 北京: 地震出版社: 397-407.

- 尹祥础, 张浪平, 张永仙. 2009. 汶川 8 级地震前加卸载响应比的大尺度异常[J]. 地震, 29(1): 53-59.
- 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙梦. 2003. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 19(1): 58-66.
- 周蕙兰. 1990. 地球内部物理[M]. 北京: 地震出版社: 218-238.
- Boukharouw G N, Chanda M W, Boukgrov N G. 1995. The three processes of brittle crystalline rock creep[J]. *Int J Mech Min Sci and Geomech*, 32(4): 325-335.
- Lei X, Kusunose K, Rao M V M S, Nishizawa O, Satoh T. 2000. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rocks under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. *J Geophys Res*, 105(B3): 6127-6139.
- Li Y, Xia C. 2000. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 37(3): 467-475.
- Shin K, Okubo S, Fukui K, Hashiba K. 2005. Variation in strength and creep life of six Japanese rocks[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 42(2): 251-260.

地 球 动 植 狐
ACTA SEISMOLOGICA SINICA