

地壳不同深度温压条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征*

蒋海昆 张流 周永胜

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所, 中国地震局构造物理开放实验室)

摘要 不同深度温压条件下的三轴压缩实验结果表明, 花岗岩强度随深度持续增加直至 30 km 左右. 在地壳浅表部位, 岩石破坏表现为低压突发或准突发失稳, 破坏前后有分布大体均匀的声发射(acoustic emission, 以下简称 AE)事件发生; 向下进入以渐进式破坏为特征的深度范围时, 破坏前基本没有或仅有很少的、随时间逐渐稀疏的 AE 分布, 破坏后也仅有极少的 AE 被记录到; 在更深的以高压准突发失稳为特征的深度范围, 破坏前依然 AE 极少, 但破坏后伴随不等周期粘滑应力降的产生而有较多的 AE 被记录到; 在更高的温压条件下(约 26 km), 破坏形式为高压突发失稳, 破坏前即有逐渐密集、累积频次呈指数增加的 AE 活动; 在 35 km 深度附近, 岩石强度急剧降低, 样品表现为半延性、延性渐进式破坏, 无 AE 记录. 声发射 b 值随深度增加似有减小的趋势, 并且 b 值在岩石破坏前略小于破坏后. 声发射时间序列奇异性强度因子 α 的数值分布范围在 18 km 左右深度的温压条件下最宽, 表明其标度类型最多, 结构最为复杂、无序; 在浅部及更深部位的温压条件下均变窄. 因而, 当温压条件模拟真实的地壳深度向下改变时, 微破裂时间序列奇异性强度因子 α 的分布范围可能会经历“由窄变宽、再由宽变窄”的变化过程.

关键词 高温高压 花岗岩 变形破坏 声发射 标度指数谱

中图分类号: P315.3 文献标识码: A

引言

板内浅源强震震源深度主要分布于由花岗岩、闪长岩等的流变曲线所控制的岩石高强度区域内 (Brace, Kohlstedt, 1980; Sibson, 1982; Meissner, Strehlau, 1982; Chen, Molnar, 1983), 这显然与岩石变形性质随深度的变化有关, 因而在研究地震问题时同时考虑该深度范围内岩石的破坏方式(破裂或流动)及其力学失稳形式(突发失稳或渐进式破坏)是有益的. 在实验室模拟地下深部温压环境, 通过监测岩石受外力变形过程中内部群体微破裂 AE 事件的时空演化, 是研究深部岩石性状及其在构造应力作用下失稳、破坏过程的重要方法. 由于岩石破裂过程的尺度无关性质 (Brady, 1974), 这对类比认识地震震源过程、特别是地震序列的时间演化具有启迪意义.

* 中国地震局“九五”重点攻关项目 95-04-02-01 和山东省自然科学基金项目 Y97E02079 的部分成果以及中国地震局构造物理开放实验室共同资助. 中国地震局地质研究所论著 2000B0012.

1999-09-09 收到初稿, 2000-02-28 收到修改稿并决定采用.

已有的关于 AE 时序特征的研究,大多是在常温、单轴条件下着重研究介质、结构、加力方式等对 AE 序列特征的影响(蒋海昆,张流,1998;刘力强等,1999).少数涉及加温的实验,也基本是在单轴条件下,研究温度或升温速率对岩样波速场和岩石热开裂 AE 的影响(马瑞等,1996;李纪汉等,1986;刘祝萍等,1994;安镇文等,1987).系统地模拟地壳深度温压环境条件下的工作,未见有系统报道.

在前期对围压及温度单因素影响进行初步研究的基础上(蒋海昆等,2000a,b),本研究通过温度和围压的不同组合形式,模拟地壳不同深度的温压环境,着重研究了花岗岩在不同深度温压条件下的变形破坏和微破裂时序特征.

1 实验条件和方法

实验在中国地震局构造物理开放实验室高温高压三轴实验系统^①上进行.以 NaCl 作传压介质,对围压介质的摩擦影响作了修正(王威等,1988).实验中实际温度与设定温度的最大偏差约为 10°C.对应力-应变曲线统一进行了高温高压下的岩样半延性-延性变形改正(蒋海昆等,2000c),实验的升温、升压方式为:前期以 5°C/min 匀速升温,最后 30°C 以 2°C/min 匀速升温.同时,轴、围压以静水压的比例缓慢地增加,基本同时达到预定的温度和围压.稳定 30 min,使样品温度分布均匀之后,恒定温度和围压,轴压以 2×10^{-4} /s 的等应变速率继续加载.实验样品为北京居庸关花岗岩,矿物组分为:钾长石 10%~15%,斜长石 45%~50%,石英 30%~35%,黑云母 5%,平均粒度 0.8 mm,样品为高(20±0.2) mm、直径(10±0.2) mm 的圆柱体.装样方式如图 1 所示,装样前样品在 60°C 的烘箱内长时间干燥.

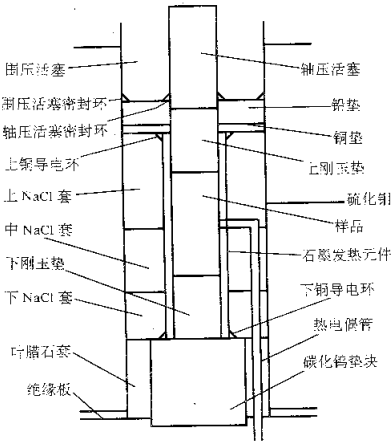


图 1 固体围压加温实验装样示意图

AE 探头的频率响应为 5 MHz,采样间隔 0.2 μs,采样长度 2 048 点,8 位采样精度.为避免加温系统电压变化的误触发,用 502 胶在容器下底座的固定位置粘贴一片载玻片,探头用硅油耦合于其上,对 AE 信号进行间接记录. AE 强度的计算方法如蒋海昆等(2000a)所述.

围压与温度的组合方式及与该温压环境大体对应的地壳深度列于表 1,由 Neville 等(1987)的结果以及高平等(1994)以冀中-渤中坳陷为代表的地壳温压曲线,并参考汪集旻和黄少鹏(1990)在华北地区的热流及温度梯度数据汇总而成.需要指出的是:① 实验温压条件换算出的仅是粗略的平均深度,不能完全等同于特定地区的深度条件;② 由于实验是用花岗岩样品进行的,因而文中所述各项特征,均指花岗岩在某深度温压条件下的性质,与实际地壳相同深度的岩性不一定吻合,因为实际地壳中介质的垂向不均匀性是明显的.因而,本文着重讨论的是岩石变形破坏和 AE 特性随深度变化的趋势.

① 何昌荣,刘树山,1997. 高温高压岩石三轴固体介质实验装置改造. 国家地震局“八五”重点项目报告.

2 实验结果分析

2.1 不同深度温压条件下花岗岩的变形破坏特征和系统稳定性

在 30 km 以上,岩石强度随深度增加而增大(表 1)。在更深的温压条件下,强度明显下降。依据差应力曲线(图 2)及破坏后样品的显微分析结果(周永胜等,2000),从介质微观破裂机制、宏观破坏形式及其力学行为来看,花岗岩在 3 km 深度的温压条件下,表现为张剪性破裂和低压准突发失稳破坏,破坏时有较小幅度的应力降;在大约 6~10 km 深度范围内,为渐进式破坏,样品宏观上形成贯通的主剪切破裂面。其中,在约 10 km 深度的温压条件下,样品破坏后在显微镜下显示两条共轭的剪切破裂带。较宽主破裂带的主体方向与 σ_1 方向夹角约 30° ,另一条细小破裂带终止于主破裂带上。主破裂带内的石英和长石碎裂细粒化,在带外两侧出现石英和长石的粒内和粒间脆性破裂;14~22 km 深度范围,具有准突发失稳破坏的某些特征,为半脆性破裂。显微观察可见两条与 σ_1 夹角约 40° 的共轭剪切主破裂,每条主破裂由几段斜列的分支裂纹组成。除破碎带外,样品整体存在石英和长石的粒内和粒间脆性破裂,大量石英出现波状消光,长石破裂部位出现绢云母化或高岭石化;在约 26 km 深度时,岩石强度明显增加,破坏表现为突发失稳。显微观察表明,破坏后样品主体以石英和长石的脆性破裂与石英波状消光、亚颗粒和长石机械双晶等塑性变形共存为特征;在 35 km 深度附近,尽管由于极高的温压条件导致压机振荡,使差应力曲线出现密集的高频抖动,但其总的变化趋势是峰后平缓、降低,显示“松弛”特征,破坏强度低,为典型的渐进式破坏。显微观察表明,此时以晶体塑性变形为主,局部含脆性微破裂。

表 1 不同深度温压条件下花岗岩变形破坏特征及系统稳定性

实验编号	温度/°C	围压/MPa	相当深度/km	岩石强度/MPa	变形破坏特征	系统稳定性
Htp30	室温	100	3	375.2	脆性张剪破裂	准突发失稳
Htp15	150	200	6	796.7	脆性剪切破裂	渐进式破坏
Htp16	150	200	6	444.9	脆性剪切破裂	渐进式破坏
Htp07	250	300	10	1 025.2	脆性剪切破裂	渐进式破坏
Htp12	250	300	10	1 030.9	脆性剪切破裂	渐进式破坏
Htp09	350	400	14	1 202.4	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp17	350	400	14	1 165.2	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp13	450	500	18	1 471.9	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp14	450	500	18	1 550.4	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp18	550	600	22	1 507.3	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp19	550	600	22	1 522.5	脆性剪切破裂	准突发失稳
Htp29	650	700	26	1 824.0	脆性剪切破裂	突发失稳
Htp32	850	900	35	434.9	塑性变形、半延性 破坏、局部脆性破裂	渐进式破坏

2.2 不同深度温压条件下花岗岩变形破坏过程中的 AE 时序特征

借助 AE 实验对地震问题进行类比研究,主要缘于 AE 时间序列与地震活动的某些可类比特性。图 2 为典型实验的 AE 时间序列及差应力曲线。为方便比较,差应力曲线均按破坏强度进行归一化。破坏前 AE 累计频次随时间的变化如图 3 所示。图中横轴为按破坏强度归一化的差应力,左轴为 AE 强度,右轴为 AE 累积频次,并给出了拟合函数及相应

的相关系数. 在 AE 强度的计算中虽然考虑了振幅及持续时间的影响, 但由于观测系统 8 位测量精度的限制, 使得波形的振幅分布最大只能跨越两个数量级, 因而部分大事件限幅严重; 同时, 由于 2 048 点采样长度的限制, 对大事件而言, 当采样结束时波形尚未衰减到背景噪声水平, 无法得到完整的持续时间. 因而对大事件而言, 计算强度可能较实际强度偏低, 而这也可能是图 2, 3 中 AE 强度大体分布在 3~6 之间、而无特别突出者的主要原因.

从 AE 序列来看, 其变化较单纯改变围压或温度的实验结果(蒋海昆等, 2000a, b)更为多样、复杂. 一个基本的特征是: 以低压准突发失稳为特征的深度范围内(约 3 km 附近), 样品破坏前后有时间分布大体均匀的 AE 发生(图 2a), 破坏前 AE 累计频次随归一化差应力基本上线性增长(图 3a); 以渐进式破坏为特征的深度范围内(约 6~10 km), 破坏前没有或仅有少数随时间逐渐稀疏的 AE 活动(图 2b, c), 随破坏的临近, AE 累计频次呈增速趋缓的对数函数分布(图 3b); 随温度和围压的进一步提高, 在以准突发失稳为特征的深度范围内(约 14~22 km 附近), 破坏前依然没有或仅有个别的 AE 活动, 但破坏后 AE 活动较其上部有明显的增加, 伴随有不等周期粘滑应力降的释放而有较多的 AE 被记录到(图 2d); 在更深部位(约 26 km)的温压条件下, 样品破坏以半脆性破裂的突发失稳为特征, 与其上部的明显差异是, 破坏前即有逐渐密集、累计频次随归一化差应力指数增长的 AE 活动(图 2e, 3c); 在 35 km 深度附近, 样品半延性—延性渐进式破坏, 破坏前后基本上

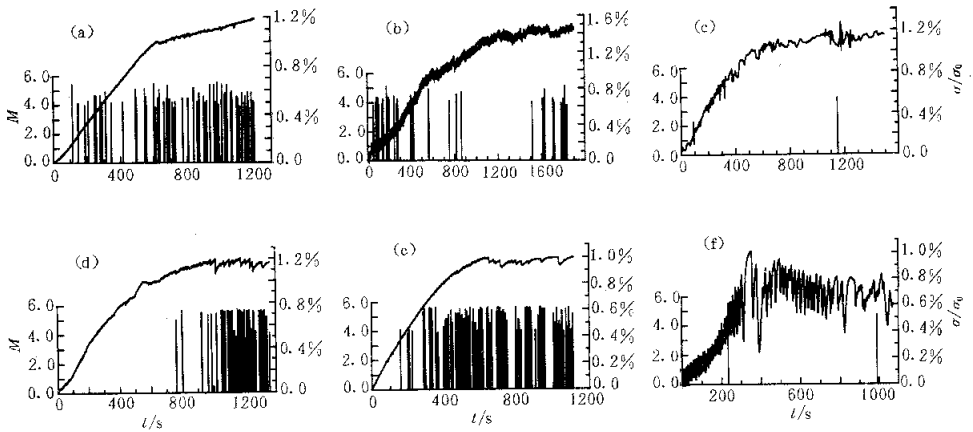


图 2 不同深度温压条件下花岗岩变形破坏过程中差应力曲线及 AE 时间序列

(a) Htp30; (b) Htp16; (c) Htp07; (d) Htp14; (e) Htp29; (f) Htp32

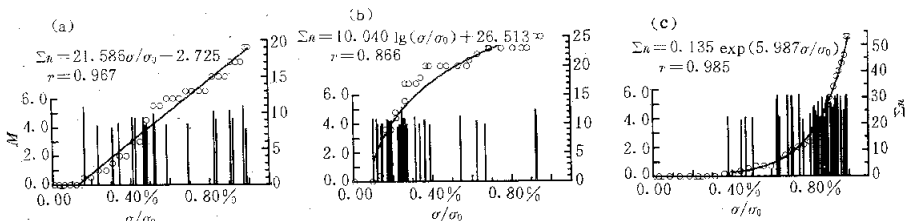


图 3 不同深度温压条件下花岗岩变形过程中破前 AE 时间分布及其累积频次曲线

(a) Htp30; (b) Htp16; (c) Htp29

无 AE 记录(图 2f).

2.3 不同深度温压条件下 AE 序列的 b 值特征

地震研究中, b 值表征大小地震的比例关系, 由于 b 值在中强地震前表现出一定的规律性变化, 因而关于 b 值物理本质和变化规律的研究, 始终在天然地震、理论及实验 3 个方面积极进行着. 由于条件的限制, 以往大多数声发射 b 值的实验研究基本上是在常温及单轴条件下着重研究介质或应力状态对 b 值的影响. 早期的研究可追溯到 Mogi(1962)的结果, 认为 AE 频度-幅值关系的 m 值($b = m - 1$)决定于材料的不均匀性; 而后 Scholz(1968)通过系统研究, 认为 b 值由岩体所处的应力状态所决定. 20 世纪 80 年代, 中国科学家所开展的一系列 b 值模拟实验表明, 虽然 b 值主要决定于应力状况和介质性质, 但还受构造条件、温度、流体、加力方式等诸多因素的影响(耿乃光, 1986), 其中涉及加温的实验并不多见(安镇文等, 1987), 而系统地模拟地壳深度温压条件下的工作, 未见有报道.

本研究结果表明, 不同深度温压条件下, 无论破坏前、破坏后或是全时段, 只要有足够的 AE 数目, 则其频次-强度分布符合幂律的 G-R 标度关系. 尺度无关的标度范围一般仅跨越两个数量级, 少数甚至仅跨越一个数量级. 如前所述, 这主要由于记录系统测量精度的限制. 由于 AE 能量正比于微破裂扩展尺度(曾正文, 1993), 因而 b 值实际上表征了微破裂数目随微破裂尺度的分布特征.

以岩样破坏强度为界划分破坏前和破坏后两个阶段, 不同深度温压条件下的 b 值结果列于表 2. 由表可见, 破前 b 值略小于破后, 二者平均值分别为 1.561 和 1.747. 只有在这种与实际较为一致的、模拟随深度改变的温压条件下, 破坏前后的 b 值变化才与天然地震序列中主震前 b 值较低、主震后 b 值相对较高这一较为普遍的观测事实相吻合, 而与固定温度(室温)单纯改变围压或固定围压(400 MPa)单纯改变温度的结果(蒋海昆等, 2000a, b)不同, 后面两种条件下的结果均显示破前 b 值大于破后 b 值. 由于破前 AE 主要为脆性微破裂事件产生、而破后 AE 主要由宏观破裂面摩擦滑动过程中的微小粘滑事件产生(蔡戴恩等, 1987), 因而随深度改变的温压条件下, 脆性破裂的 b 值小于粘滑 b 值, 这也与焦文捷等(1991)在室温下的结果有异.

表 2 不同深度温压环境条件下 AE 序列的 b 值

实验编号	围压 /MPa	温度 / $^{\circ}$ C	相当深度 /km	破前 b 值	破后 b 值	全部 b 值
Htp30	100	20	3	1.707	1.769	1.665
Htp16	200	150	6	2.273	2.748	2.527
Htp07	300	250	10			
Htp09	400	350	14		0.504	0.504
Htp14	500	450	18		0.369	0.369
Htp19	600	550	22		1.420	1.420
Htp29	700	650	26	0.704	0.724	0.718
Htp32	900	850	35			

从表 2 来看, 不论破前还是破后, 声发射 b 值随深度增加都有减小的趋势, 从破后的结果来看, 又以约 14~18 km(围压 400~500 MPa, 温度 350 $^{\circ}$ C~450 $^{\circ}$ C)条件下的 b 值为最低. 其变化趋势与固定围压(400 MPa)、单纯改变温度的结果(蒋海昆等, 2000b)类似, 表明温度和围压两个因素中, 温度对 b 值的控制影响作用相对较强, 而温度的影响又主要是通过改变岩石性态来实现的. 因而, 本项实验的结果似乎表明, 在影响地震 b 值的诸多因

素中,介质性质起更为重要的作用.

2.4 不同深度温压条件下 AE 时间序列的局域标度谱特征

多标度分形理论,对描述和理解诸如地震或破裂这样的非线性动力学过程所产生的复杂时空结构,具有重要意义(黄立基,丁菊仁,1991).地震领域的工作显示,群体地震事件的时、空分布在一定的标度范围内显示自相似分形特征.这种特征已被尝试运用多标度分形理论予以描述(Hirabayashi *et al.*, 1992; 朱令人,周仕勇,1992).实验方面,平田隆幸(1990)的工作表明,AE 在时、空、强方面都具有分形结构;Lei 等(1992)曾针对两种不同粒度花岗岩在常温、三轴条件下的 AE 定位结果,探讨了 AE 空间分布的容量维与岩石粒度之间的关系.

AE 时间序列多标度分形奇异性指数 $\alpha(q)$ 和局域标度指数谱 $f(\alpha)$ 的计算方法如蒋海昆等(1999a)所述.若 AE 序列时间结构具有尺度无关的标度特性,则 $f(\alpha)$ - α 谱一定表现出一些普适的几何特征: $f(\alpha)$ 对 α 轴上凸,在 $q=0$ 处取得极大值,在 $q=\pm\infty$ 处具有无穷大的斜率.定性地,这些普适特征可以作为判断时间序列是否具有多标度分形特性的依据.

本研究着重考察不同深度温压条件下 AE 时间序列 $f(\alpha)$ - α 谱形态的差异,因而不区分破前或破后阶段.几个不同深度温压条件下 AE 序列的标度指数谱 $f(\alpha)$ - α 曲线($-4\leq q\leq 4$)示于图 4,图中横轴为标度指数 α ,纵轴为 $f(\alpha)$ 谱.其它条件下由于 AE 数目太少而不能得到统计可信的结果.物理学中对分维计算的样本量要求十分巨大,地震、岩石破裂等观测学科的数据量基本上无法满足.但对一维序列而言,当样本数达 60~80 时,一般可达到 1%~5%量级的精度(朱令人,1997).

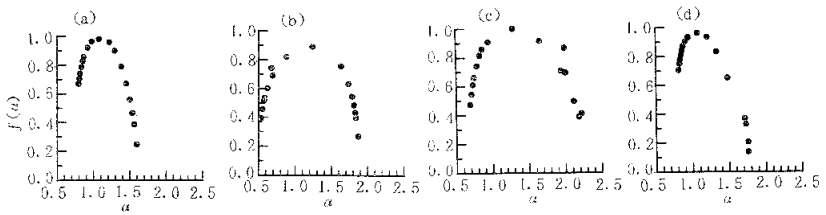


图 4 不同深度温压条件下花岗岩破坏失稳过程中 AE 时间序列的局域标度谱

(a) Htp30; (b) Htp16; (c) Htp14; (d) Htp29

由图 4 可见, $f(\alpha)$ - α 谱对 α 轴上凸,在统计误差范围内 $f(\alpha)$ 在 $\alpha(0)$ 处取极大值,表现前述的普适特征,因而不同深度温压条件下的 AE 时间序列具有指数型的多标度分形特征.

较浅及较深部位(3 km 左右及 26 km 左右)的温压条件下, $f(\alpha)$ - α 谱两端不对称, $f(\alpha_{\min})$ 一端相对较高(图 4a, d).由于 $f(\alpha)$ 表征 α 在某个子集上的取值概率,因而这表明,AE 时间结构诸多标度类型中,靠近 α_{\min} 一端所占比例较大;由于 $\alpha(q)$ 随 q 增大而单减, α_{\min} 相应于 $q_{\max}>1$,主要反映分布概率 P_i 较大(密集)子集的性质(黄立基,丁菊仁,1991),因而较浅及较深部位的温压条件下,AE 时间序列的多标度分形性质主要决定于其时间密集特征.6~18 km 左右深度的温压条件下, $f(\alpha)$ - α 谱两端大体对称(图 4b, c),意味着该深度温压条件下,AE 时间序列的时间密集及相对平静特性共同决定其标度性质.

奇异性强度因子 α 的数值分布范围($\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$)在 18 km 左右深度的温压条件下最宽,在浅部及更深部位的温压条件下均变窄(图 4,表 3).这表明在 18 km 左右深度的温压条

件下, AE 时间序列的标度类型最多, 结构最为复杂、无序; 而在较浅及较深部位的温压条件下, 其标度类型相对减少, 结构趋于简单、有序. ($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) 随深度温压条件的变化是由于 α_{\min} , α_{\max} 分别向左、右两端扩展或收缩所至, 表明 AE 时间序列的密集或平静特性与不同深度的温压环境有关. 但总的来看, α_{\max} 随深度的变化相对显著.

安镇文等(1999)曾指出, 在大震前两年左右, 震中附近地区标度指数谱有变窄且谱的右端(即 α_{\max} 一端)左移的现象, 认为这反映了密集区内地震活动明显的涨落. 他们还进一步指出, 根据固体力学的研究, 谱的这种变化揭示出介质密度由低向高的过渡, 因而表征了应力的集中增强程度. 他们的震例研究及理论解释与室温下单纯改变围压的实验结果(蒋海昆等, 2000a)相符. 事实上, 围压的增加定性表征了地壳内部向下的迁移, 更高围压条件下的 AE 定性等同于更深部位的微破裂事件, AE 序列的标度指数谱随围压的变化在一定深度范围内可粗略地类比于其随深度的变化. 另一方面, 朱令人和周仕勇(1992)曾指出, 中强地震前 α 的分布范围有变宽的趋势. 结合前面实验结果的讨论, 我们认为, 安镇文等以及朱令人和周仕勇的结果可能分别描述了完整孕震过程的两个不同阶段. 但更为重要的原因却可能是, 震前标度指数谱究竟是“变宽”还是“变窄”, 与震前中小地震群体活动的分布深度有关.

3 讨论与结论

模拟地壳不同深度的温压环境, 对花岗岩的变形破坏特征、AE 时序特征、频次-强度特征以及时间结构等进行了研究, 结果表明:

(1) 从强度随深度的变化来看, 30 km 以上花岗岩强度持续增加, 在更深部位的温压条件下(35 km 左右), 强度急剧降低.

(2) 从样品破坏性质、力学特征和 AE 时间分布看, 在 3 km 附近的地壳浅部, 岩体为脆性、准(低压)突发性失稳破坏, 破裂为张剪性, 破坏前后有时间分布大体均匀的 AE 事件发生; 在约 6~10 km 的深度范围内, 岩体为脆性、渐进式破坏, 以剪切破裂为主, 破前没有或仅有少量、且时间分布逐渐稀疏的 AE 活动, 破后也仅有个别或数量不多的 AE 被记录到; 在约 14~22 km 深度范围内, 介质变形主要为脆性破裂并伴有粘滑, 样品破坏以准(高压)突发失稳为特征, 破前依然很少有 AE 活动, 但破后 AE 活动较其上部明显增加, 伴随着粘滑的发生而有较多的 AE 被记录到; 在以(高压)突发失稳为破坏特征深度范围内(26 km 附近), 样品破坏前即有逐渐密集的 AE 活动; 在更深部位(35 km 左右)的温压条件下, 样品转向半延性或延性渐进式破坏, 无 AE 发生.

(3) 样品变形过程中, 声发射 b 值破前略小于破后, 与天然地震序列中主震前 b 值较低、主震后 b 值相对较高这一较为普遍的观测事实具有可比性. 结果还表明, 微粘滑事件 b 值一般略大于脆性微破裂 b 值; 随深度的增加, b 值似有减小的趋势, 从破后的结果来看, 又以大约 14~18 km 附近温压条件下的声发射 b 值为最低.

表 3 不同深度温压条件下
AE 序列 $f(\alpha)$ - α 谱特征

实验编号	深度/km	α_{\min}	α_{\max}	$\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$
Htp30	3	0.798	1.598	0.800
Htp16	6	0.530	1.870	1.340
Htp14	18	0.690	2.222	1.532
Htp29	26	0.815	1.757	0.942

(4) AE 序列时间结构具有指数型的多标度分形特征. 奇异性强度因子 α 的分布范围

在 18 km 左右深度的温压条件下最宽, α 的分布范围在浅部及更深部位的温压条件下均变窄, 因此当温压条件模拟真实的地壳深度向下改变时, 微破裂事件时间序列奇异性强度因子 α 的分布范围可能会经历“由窄变宽、再由宽变窄”这样一个演化过程。

实验工作得到何昌荣研究员和刘树山高级工程师的精心指导和大力帮助, 谨致谢意!

参 考 文 献

- 安镇文, 朱传镇, 李纪汉. 1987. 单轴压缩下岩石热破裂声发射 M 值及其破裂扩展特征[J]. 地震学报, 9(增刊): 407~412
- 蔡戴恩, 方亚茹, 隋旺华, 等. 1987. 岩石破裂全过程的声发射 b 值[J]. 地震学报, 9(增刊): 401~406
- 高平, 刘若新, 马宝林, 等. 1994. 绿泥石片岩和斜长角闪岩在高温高压下的物理力学性质及其应用[J]. 地震地质, 16(1): 83~88
- 耿乃光. 1986. b 值模拟实验的进展和我国 b 值模拟实验的开端[J]. 地震学报, 8(3): 330~333
- 黄立基, 丁菊仁. 1991. 多标度分形理论及进展[J]. 物理学进展, 11(3): 269~329
- 焦文捷, 马瑾, 吴秀泉, 等. 1991. 围压下岩石破坏声发射测试系统及震级频度关系的实验研究[J]. 地震地质, 13(1): 54~59
- 蒋海昆, 张流. 1998. 岩石微破裂时空分布特征及其动态演化过程的声发射研究进展[J]. 世界地震译丛, (5): 1~10
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000a. 室温及不同围压条件下的声发射序列特征及其地震学意义[J]. 地球物理学报, 待刊
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000b. 温度环境对花岗岩变形破坏过程中声发射序列特征的影响[J]. 地震, 待刊
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000c. 三轴实验中样品出现半延性—延性变形时应力应变关系修正[J]. 岩石力学与工程学报, 待刊
- 李纪汉, 刘晓红, 郝晋升. 1986. 温度对岩石弹性波和声发射的影响[J]. 地震学报, 8(3): 293~300
- 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 1999. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. 地震地质, 21(4): 377~386
- 刘祝萍, 吴小燕, 楚泽涵. 1994. 岩石声学参数测量及研究[J]. 地球物理学报, 37(5): 659~666
- 马瑞, 卢民杰, 杨晓东. 1996. 不同温压条件下弹性波在岩石中传播速度的实验研究[J]. 地震地质, 18(3): 259~268
- 平田隆幸著. 1985; 许晏平译. 1990. 通过破裂实验观察地震现象[A]. 数理地震学[M]. 北京: 地震出版社, 57~65
- 汪集旸, 黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. 地震地质, 12(4): 351~366
- 王威, 崔效峰, 王绳祖. 1988. 固体围压介质岩石三轴实验装置的压力标定: 一种自检标定方法[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会高温高压岩石力学专业委员会编. 第一届高温高压岩石力学学术讨论会文集[C]. 北京: 学术期刊出版社, 179~185
- 曾正文. 1993. 典型不连续岩体变形与滑动过程的声发射实验研究[D]: [学位论文]. 国家地震局地质研究所. 17, 38~39
- 周永胜, 张流, 蒋海昆, 等. 2000. 不同温压条件下居庸关花岗岩变形破坏与失稳形式的实验研究[J]. 中国地震, 待刊
- 朱令人, 周仕勇. 1992. 地震多重分形标度指数谱 $f(\alpha)$ 的研究[J]. 西北地震学报, 14(2): 30~35
- 朱令人. 1997. “八五”期间非线性科学应用于地震科学基础研究的进展[J]. 国际地震动态, (10): 1~10
- Hirubayushi T, Ito K, Yoshii T 著. 1990; 洪时中译. 1992. 数理地震学[J]. 世界地震译丛, (5): 60~70, 80
- Brace W T, Kohlstedt D L. 1980. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments[J]. *J Geophys Res*, 85: 6 248~6 252
- Brady B T. 1974. Theory of earthquakes. I. A scale independent theory of rock failure[J]. *Pure Appl Geophys*, 112: 149~168
- Chen W P, Molnar P. 1983. Focal depths of intracontinental and intraplate earthquake and their relation for thermal and mechanical properties of the lithosphere[J]. *J Geophys Res*, 88: 4 183~4 214
- Lei X L, Nishizawa O, Kusunose K, et al. 1992. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes[J]. *J Phys Earth*, 40: 617~634
- Meissner R, Strehlau J. 1982. Limits of stresses in continental crust and their relationship to the depth frequency

distribution of shallow earthquake[J]. *Tectonics*, **1**: 73~79

Mogi K. 1962. Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **40**: 831~853

Nevillel C, Michael C T. 1987. Flow properties of continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, **136**: 27~63

Sibson R H. 1982. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **72**: 151~163

Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **58**: 399~415

GRANITE DEFORMATION AND BEHAVIOR OF ACOUSTIC EMISSION SEQUENCE UNDER THE TEMPERATURE AND PRESSURE CONDITION IN DIFFERENT CRUST DEPTHS

Jiang Haikun Zhang Liu Zhou Yongsheng

1) *Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China*

2) *Opening Laboratory of Tectonophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China*

Abstract: Results of triaxial compression experiment results show that granite rock strength increases with the depth until 30 km. In shallow crust, rock failure exhibits abrupt or quasi-abrupt instability under lower pressure. Acoustic Emission (AE for short) distributed almost uniformly before and after failure. Go through downwards into the depth range with progressive failure feature, there are no or only a few number of AE before and after failure. In deeper range, rock failure shows some feature of quasi-abrupt instability under high pressure. There are still few AE before failure, but with the stick-slip, much more AE events were detected after failure. Under the temperature and pressure condition of more deep crust (about 26 km), rock failure takes abrupt instability under high pressure as main feature, there are dense AE activities before failure and cumulated frequency of AE increases exponentially before the failure. In about 35 km depth range, rock strength decreases quickly with the depth and sample exhibits semi-ductile or ductile progressive fails, there are no AE being detected before and after failure. The b value of AE sequence before failure seems a little smaller than that after failure, and b value roughly decreased with depth. The numerical range of index a is the widest in about 18 km depth and becomes narrow in the condition of more shallow or more deep crust. So, when the temperature and pressure condition simulating the real environment of focal depth changes from shallow to deep in the crust, the range of a of microfracture sequence would undergo such an evolvement process that a changes from narrow to wide and then to narrow again.

Key words: high temperature and high pressure; granite; deformation and failure; acoustic emission; local scale index spectra

地壳不同深度温压条件下花岗岩变形破坏及声发射 时序特征

作者: [蒋海昆](#), [张流](#), [周永胜](#), [Jiang Haikun](#), [Zhang Liu](#), [Zhou Yongsheng](#)
作者单位: [中国北京, 100029, 中国地震局地质研究所, 中国地震局构造物理开放实验室](#)
刊名: [地震学报](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [ACTA SEISMOLOGICA SINICA](#)
年, 卷(期): 2000, 22(4)
引用次数: 10次

参考文献(31条)

1. [安镇文](#), [朱传镇](#), [李纪汉](#) [单轴压缩下岩石热破裂声发射M值及其破裂扩展特征](#) 1987(ZK)
2. [蔡戴恩](#), [方亚茹](#), [隋旺华](#) [岩石破裂全过程的声发射b值](#) 1987(ZK)
3. [高平](#), [刘若新](#), [马宝林](#) [绿泥石片岩和斜长角闪岩在高温高压下的物理力学性质及其应用](#) 1994(01)
4. [耿乃光](#) [b值模拟实验的进展和我国b值模拟实验的开端](#)[期刊论文]-[地震学报](#) 1986(03)
5. [黄立基](#), [丁菊仁](#) [多标度分形理论及进展](#)[期刊论文]-[物理学进展](#) 1991(03)
6. [焦文捷](#), [马瑾](#), [吴秀泉](#) [围压下岩石破坏声发射测试系统及震级频度关系的实验研究](#) 1991(01)
7. [蒋海昆](#), [张流](#) [岩石微破裂时空分布特征及其动态演化过程的声发射研究进展](#) 1998(05)
8. [蒋海昆](#), [张流](#), [周永胜](#) [室温及不同围压条件下的声发射序列特征及其地震学意义](#) 2000
9. [蒋海昆](#), [张流](#), [周永胜](#) [温度环境对花岗岩变形破坏过程中声发射序列特征的影响](#) 2000
10. [蒋海昆](#), [张流](#), [周永胜](#) [三轴实验中样品出现半延性-延性变形时应力应变关系修正](#) 2000
11. [李纪汉](#), [刘晓红](#), [郝晋升](#) [温度对岩石弹性波和声发射的影响](#)[期刊论文]-[地震学报](#) 1986(03)
12. [刘力强](#), [马胜利](#), [马瑾](#) [岩石构造对声发射统计特征的影响](#)[期刊论文]-[地震地质](#) 1999(04)
13. [刘祝萍](#), [吴小燕](#), [楚泽涵](#) [岩石声学参数测量及研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 1994(05)
14. [马瑞](#), [卢民杰](#), [杨晓东](#) [不同温压条件下弹性波在岩石中传播速度的实验研究](#) 1996(03)
15. [平田隆幸](#), [许晏平](#) [通过破裂实验观察地震现象](#) 1990
16. [汪集旸](#), [黄少鹏](#) [中国大陆地区大地热流数据汇编](#) 1990(04)
17. [王威](#), [崔效峰](#), [王绳祖](#) [固体围压介质岩石三轴实验装置的压力标定:一种自检标定方法](#) 1988
18. [曾正文](#) [典型不连续岩体变形与滑动过程的声发射实验研究](#) 1993
19. [周永胜](#), [张流](#), [蒋海昆](#) [不同温压条件下居庸关花岗岩变形破坏与失稳形式的实验研究](#) 2000
20. [朱令人](#), [周仕勇](#) [地震多重分形标度指数谱 \$f\(\alpha\)\$ 的研究](#) 1992(02)
21. [朱令人](#) [“八五”期间非线性科学应用于地震科学基础研究的进展](#) 1997(10)
22. [Hirubayushi T](#), [Ito K](#), [Yoshii T](#), [洪时中](#) [数理地震学](#) 1992(05)
23. [Brace W T](#), [Kohlstedt D L](#) [Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments](#) 1980

24. [Brady B T Theory of earthquakes. I. A scale independent theory of rock failure](#) 1974
25. [Chen W P. Molnar P Focal depths of intracontinental and intraplate earthquake and their relation for thermal and mechanical properties of the lithosphere](#) 1983
26. [Lei X L. Nishizawa O. Kusunose K Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes](#) 1992
27. [Meissner R. Strehlau J Limits of stresses in continental crust and their relationship to the depth frequency distribution of shallow earthquake](#) 1982
28. [Mogi K Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes](#) 1962
29. [Nevillel C. Michael C T Flow properties of continental lithosphere](#) 1987
30. [Sibson R H Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States](#) 1982
31. [Scholz C H The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes](#) 1968

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [刘海龄. 王子江. 施小斌. 丘学林. 张伯友. 阎贫. 夏斌 古特提斯缝合带澜沧江段花岗岩高温高压实验模拟—热带海洋学报2004, 23\(2\)](#)

对古特提斯主体遗迹的云南西部昌宁-孟连构造混杂缝合带、临沧花岗岩基、澜沧江韧性变形变质带进行了岩石高温高压三轴变形实验模拟研究,以期对该构造带形成时期所处的构造物理环境作出判断。实验岩样取自紧邻澜沧江韧性剪切变形变质带西侧的临沧花岗岩基。实验后样品产生了一系列新生显微构造,对应的地壳深度环境相当于中下地壳(13-18km)。澜沧江韧性变形变质带花岗岩的显微结构以动力重结晶颗粒极为发育为特征,表明其形成时的环境远比实验深度更深。综合考虑临沧花岗岩基现在的厚度(达15km)和花岗岩浆流动的上限深度(8-10km)以及风化剥蚀量,可以认为临沧花岗岩基的形成深度可大于25km,原始岩浆源于下地壳下部,接近莫霍面的顶部。澜沧江韧性变形变质带的形成与临沧岩基向东逆冲相关,它直抵古特提斯俯冲板块下插滑动顶部。研究表明,昌宁-孟连古特提斯曾发生过真正意义上的大规模洋壳俯冲,是一个具有较大规模的大洋盆。

2. 期刊论文 [李福春. 朱金初. 饶冰. 金章东. 张林松 富锂氟花岗岩成因: 高温高压实验证据—中国科学D辑2003, 33\(9\)](#)

为模拟富锂氟花岗岩的形成过程并解释其形成机制,进行了一系列熔化-结晶实验。在 1×10^8 Pa和 $570 \sim 700^\circ\text{C}$ 的浅色花岗岩-HF-H₂O体系中发现了石英+碱性长石+萤石+锂白云母(铁白云母)±锡石的矿物组合,从而证明了:(1)从富锂氟花岗质熔体中可以结晶出萤石、锡石和浅色云母,石英+碱性长石+萤石+锂白云母/铁白云母+锡石的组合可以是岩浆环境下形成的稳定矿物组合;(2)暗色的黑云母与浅色的铁白云母和锂白云母的同时出现说明岩浆条件下可以形成白云母花岗岩和二云母花岗岩,环带状云母的发现说明云母的环带状结构不是热液成因云母所独有;(3)随着结晶作用的进行,残余熔体中SiO₂含量降低,Al₂O₃和F含量以及A/CNK和NKA/Si比值升高,这些结果与富锂氟花岗岩中常见的垂直分带现象一致,并为富锂氟花岗岩岩浆成因提供了非常有说服力的实验证据。

3. 期刊论文 [赵金昌. 万志军. 李义. 赵阳升. 董付科. 冯子军. 李根威. ZHAO Jinchang. WAN Zhi jun.](#)

[LI Yi. ZHAO Yangsheng. DONG Fuke. FENG Zijun. LI Genwei 高温高压条件下花岗岩切削破碎试验研究—岩石力学与工程学报2009, 28\(7\)](#)

为了达到最接近实际工程的试验效果,采用中国矿业大学的“20 MN 伺服控制高温高压体三轴试验机”,设计了精确的加压和旋转系统,操作控制比较方便,测量数据准确。利用大尺寸($200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$)花岗岩试样和工程钻头(30 mm 的PDC钻头),使试验条件更加接近实际工程情况,开创了该类大试样试验的先河。通过正交试验研究花岗岩在高温高压状态下的切削破碎规律,得出以下结论:(1) 高围压状态(100 MPa)下,随着温度升高,花岗岩的可切削性逐渐增强,在超过一定的钻压时,切削速度随着温度的升高而明显增大,在755 N钻压下,300 °C的切削速度比室温时增大30%~50%;(2) 高围压状态(100 MPa)下,随着温度升高,单位破岩能耗明显降低,在钻压为755 N时,300 °C时的单位破岩能耗比室温时降低20%~30%;(3) 在高温高压环境下,切削速度随着钻压或转速的增

大而增大;单位破岩能耗随着转速的增大而增大,随着钻压的增大而减小,与室温无围压状态下的切削破碎规律基本一致;(4) 由于花岗岩在此温压范围内属于渐进破坏,抗压强度下降缓慢,如果钻压太低则切削速度和单位破岩能耗受温度影响很小,为了在高温下取得对花岗岩的良好切削效果,钻压需要超过一定的值。

4. 期刊论文 [周永胜, 蒋海昆, 何昌荣](#) 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究 - 中国地震2002, 18 (4)

为研究花岗岩的脆塑性转化和失稳型式,在固体围压介质三轴实验系统上进行了3组高温高压实验。结果表明,温度小于300°C时花岗岩为脆性破裂,大于800°C时为塑性变形,在300~600°C,花岗岩为半脆性破裂和碎裂流动,在600~800°C,花岗岩为半脆性流动。花岗岩的渐进破坏发生在低压区域;突发失稳发生在室温高压(≥ 300 MPa)和高温高压(550°C/600MPa~650°C/700MPa)两个区域;在突发失稳与渐进破坏区域之间存在大范围的准突发失稳区。在实验温压范围内,影响花岗岩脆塑性转化的首要因素是温度,其次是围压;而花岗岩的失稳型式同时取决于围压和温度。

5. 期刊论文 [李福春, 朱金初, 漆亮, 饶冰, 潘根兴](#) 富氟花岗岩体系岩浆流体内稀土元素演化规律的实验研究 - 高校地质学报2002, 8 (1)

高温高压实验结果表明,随着富氟过铝花岗岩岩浆分离结晶作用的进行,在与熔体相共存的流体相中,REE浓度呈有规律地变化:当温度从750°C下降至接近固相线(570°C)时,流体相中REE浓度逐渐降低,这一规律与REE在稀有金属花岗岩体上部岩相带中REE含量贫化的地质事实相一致。在富氟过铝花岗岩体系中,REE易于分散进入某些造岩矿物(如黑云母等)和副矿物(如萤石和锡石等)中,从而不利于REE形成热液矿床。

6. 学位论文 [李福春](#) 华南富锂氟花岗岩成矿熔体和成矿流体形成与演化的实验研究 2000

该文以高温高压实验为主要手段,研究了含氟花岗岩体系在结晶过程中成矿熔体和成矿流体的形成与演化规律、晶体-熔体-流体三相共存体系中的液态分离作用以及碱性长石和石英的结晶动力学等问题。

7. 期刊论文 [柳江琳, 白武明, 孔祥儒, 朱茂旭](#) 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征 - 地球物理学报2001, 44 (4)

通过在高压(1.0~2.5GPa)和高温(563~1173K)条件下,取得花岗岩、玄武岩和辉橄岩三种岩石的一些电导率实验结果。讨论了这几种岩石电导率随温度的变化趋势,结果表明:电导率随温度升高而显著变化,在温度为563~1173K的范围内,电导率发生了3~5个量级的变化,这种变化可能同岩石的部分熔融过程有关。

8. 会议论文 [李福春, 饶冰, 朱金初](#) 花岗岩-H₂O-HF体系中石英结晶动力学高温高压实验研究

2001

花岗岩-HF-H₂O体系中石英结晶动力学的实验研究证明:石英的成核速率和生长速率不仅与岩浆过冷度有关,而且与结晶时间有关,即它们在整个结晶过程中并非常数。文中提出了把成核延滞时间引入到成核速率和晶体生长速率计算公式中的新思路,并由此获得了石英的成核速率、晶体生长速率与温度结晶和时间的关系曲线。

9. 期刊论文 [李福春, 饶冰, 朱金初, 吴志强](#) 高温高压实验产物中出现的流动构造及其岩石学意义 - 岩石矿物学杂志2002, 21 (3)

在高温高压实验产物中发现了长石和云母定向排列以及球粒被拉长并定向排列的现象。这种与野外常见的地质事实相一致的现象说明,某些花岗岩体边缘部钾长石的定向排列可能是岩浆流动造成的。

10. 期刊论文 [赵阳升, 邵保平, 万志军, 张昌锁, ZHAO Yangsheng, XI Baoping, WAN Zhi jun, ZHANG](#)

Changsuo 高温高压下花岗岩中钻孔变形失稳临界条件研究 - 岩石力学与工程学报2009, 28 (5)

采用自主研发的“20 MN伺服控制高温高压岩体三轴试验机”,运用光学原理钻孔变形观测仪器,对(200 mm×400 mm花岗岩体内含(40 mm)的钻孔在6 000 m埋深静水应力及600 °C以内恒温恒压下钻孔变形规律及其临界失稳条件进行深入细致的试验研究和理论分析。研究结果表明:(1) 高温高压下花岗岩中钻孔变形随温度和应力的增大表现为明显的不同阶段。4 000 m埋深静水应力及400 °C以内恒温恒压下,钻孔变形表现为明显的黏弹性变形阶段,钻孔直径虽有减小但仍处于稳定状态,并不发生破坏;4 000~5 000 m埋深静水应力及400 °C~500 °C时恒温恒压下,钻孔变形表现为黏弹-塑性变形阶段,钻孔围岩有破坏的趋势,孔径开始增大;5 000 m埋深静水应力及500 °C以上时,钻孔围岩塑性区的块裂状围岩颗粒逐渐从孔壁脱落下来,钻孔发生破坏。(2) 花岗岩中钻孔围岩在超过应力阈值和温度阈值后,即5 000 m埋深静水应力及500 °C以外时,钻孔破坏,发生塌孔现象,花岗岩颗粒从孔壁脱落下来,钻孔直径增大。(3) 钻孔围岩在高温静水应力下,岩体最终发生破坏的应力条件为5 000~6 000 m埋深静水应力(即125~150 MPa)及500 °C~600 °C,其破坏形式为压裂破坏、压剪破坏或两者相结合。(4) 高温高压下花岗岩中钻孔变形失稳临界条件为4 000~5 000 m埋深静水应力,400 °C~500 °C。同时,根据试验研究结论,运用黏弹塑性力学习理论给出高温高压下钻孔变形的分析理论,建立4 000 m埋深静水应力及400 °C以内恒温恒压下钻孔变形的黏弹-塑性理论模型,为我国高温岩体地热(HDR)开发与利用中钻孔稳定性及维护问题、大陆科学钻探工程(CSSD)在深孔和超深孔施工过程中遇到的钻孔稳定性问题提供科学依据和理论指导。

引证文献(13条)

1. [蒋海昆, 吴琼, 董祥, 苗青壮, 宋金](#) 不同温压条件下声发射应变能释放特征——加速模型参数物理含义的初步讨论 [期刊论文] - 地球物理学报 2009 (8)

2. [何建平, 王宁](#) [用AE时序参数特征预测岩体失稳的研究](#) [期刊论文]-[矿业安全与环保](#) 2007 (1)
3. [黄梅](#) [岩石破坏等间距现象研究](#) [学位论文] 硕士 2006
4. [李涛, 王宗秀](#) [塔里木盆地及邻区岩石圈拆离解耦与盆山格局关系的天然地震分析](#) [期刊论文]-[地学前缘](#) 2005 (3)
5. [李涛, 王宗秀](#) [塔里木盆地及邻区岩石圈拆离解耦与盆山格局关系的天然地震分析](#) [期刊论文]-[地学前缘](#) 2005 (3)
6. [谢新生](#) [盐源-宁蒍地震共轭破裂及极限主应力随地壳深度变化](#) [期刊论文]-[地质力学学报](#) 2003 (2)
7. [蒋海昆, 马胜利, 张流, 曹文海, 侯海峰](#) [含障碍体平直断层标本变形过程中群体微破裂事件的时空演化特征](#) [期刊论文]-[地球物理学报](#) 2003 (2)
8. [马胜利, 马瑾](#) [我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展](#) [期刊论文]-[地震学报](#) 2003 (5)
9. [李世愚, 陈运泰](#) [地震震源的研究](#) [期刊论文]-[地震学报](#) 2003 (5)
10. [蒋海昆, 马胜利, 张流, 曹文海, 侯海峰, 冯志军](#) [共线不连断层标本变形过程中群体微破裂事件的时空演化](#) [期刊论文]-[地震](#) 2003 (3)
11. [周永胜, 蒋海昆, 何昌荣](#) [不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究](#) [期刊论文]-[中国地震](#) 2002 (4)
12. [蒋海昆, 张流, 周永胜, 侯海峰, 晁文海](#) [基于高温高压岩石破裂实验结果对中强地震前震中附近区域部分地震学现象的初步解释](#) [期刊论文]-[西北地震学报](#) 2002 (2)
13. [李涛, 周世卿](#) [华北中地壳滑脱面及其活动分区的天然地震研究](#) [期刊论文]-[现代地质](#) 2009 (6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dizhen200004008.aspx

下载时间: 2010年5月28日