

岩石错动面上阶梯形凸起的破裂 过程与失稳型式研究

李建国 石桂梅 王绳祖

(国家地震局地质研究所)

摘 要

本文介绍了三轴压缩下花岗岩试件内阶梯形错动面凸起部位破裂过程和失稳型式的实验。结果显示,当差应力量值($\sigma_1 - \sigma_3$)达到 $0.15 - 0.17(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ 。(试件发生首次粘滑时的峰值应力)时,在阶梯形凸起的底部发生宏观破裂,其应力—位移关系呈线性变化,且破裂随应力量值的增加而继续扩展。在 $(\sigma_1 - \sigma_3) \geq 0.3(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ 时,发生破裂贯通,凸起被剪断。断层面上次级凹凸体发育。当 $(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)_c$ 时,原阶梯形错动面被铲平,其后沿该面发生了伴随大应力降和强烈振动的突发性失稳。

上述结果表明,在断层滑动过程中,断层面上的凹凸体破裂直至被铲平的过程仅能导致微震、前震和声发射等事件的发生,而主震则系由平直断裂的粘滑引起的。

一、前 言

岩石破裂面通常是凹凸不平的,破裂面的摩擦强度和摩擦滑动性状都要受到凹凸体的几何形态、尺寸和力学性质的强烈影响。一些地震学者据此将断层面上凹凸体的破裂作为构造地震的成因之一,因此,凹凸体的存在通常被视为潜在震源的重要地质特征^[1-8]。但是,不少地震也曾发生在相对平直的活动断裂带上,或者,尽管断层面凹凸不平,但所发生的地震频度不高,震级不大^[1-8]。由此可见,构造地震发生条件与断层几何结构关系比较复杂。本文采用固体三轴装置,对岩石错动面内阶梯形凸起的破裂过程和失稳型式进行了实验研究,进一步了解在活动断裂带滑动过程中凹凸体的破裂过程和破裂方式,深入认识构造地震特别是中、强地震形成条件和发震机制。

二、试件结构与实验方法简介

实验样品系北京居庸关花岗岩,其矿物组成为:长石60%,石英35%,云母5%,平均

粒度为0.8mm。试件直径 $d=10\text{mm}$ ，长20mm。其结构如图1所示。试件的斜切面（错动面）由金刚石锯片加工而成，倾角 $\theta_D=60^\circ$ 。阶梯形凸起高度 $h=0.5-2.4\text{mm}$ ，阶面与错动面正交。错动面间分别充填厚度为0.15mm铜箔和0.4mm的蒙脱石。试验表明，其错动面为光滑切面的花岗岩试件在 $\sigma_3 \geq 100\text{MPa}$ 时即发生突发失稳。而错动面内充填有铜箔和蒙脱石的花岗岩试件即使在 $\sigma_3=500\text{MPa}$ 时，仍表现为稳定滑动特征。因此，用铜箔等充填物不仅可以模拟断层物质的低强度和流动变形特征，而且有利于鉴别破裂面错动过程中凸起的破裂和失稳型式。

采用分阶段取样法对岩石试件内错动面上凸起部位破裂发展状况和破裂机制进行直接观测。将开始出现声发射时（声发射接收系统增益为60db）的差应力定为凸起的初始破裂应力（ σ_f ），根据应力—位移曲线在出现峰值后的下降变化趋势判定失稳型式。

固体三轴装置系统性能见文献〔4〕，围压 $\sigma_3=300-500\text{MPa}$ ，应变速率 $\dot{\epsilon}_1=10^{-6}/\text{S}$ ， ϵ_1 为纵向应变。

三、实验结果

花岗岩试件内错动面上的阶梯形凸起的破裂过程和失稳型式观测结果见表1。表中 σ 为取样时的差应力； Δu 为取样时纵向位移分量； ΔL 为凸起的破裂长度，以虚线表示； θ_{EA} 和 θ_{EB} 为凸起的破裂传播方向（或倾角）； $\sigma_c=(\sigma_1-\sigma_3)_c$ 为发生首次突发失稳前峰值差应力； $\Delta\sigma$ 为与突发失稳（伴随有撞击声）对应的应力突降； $\Delta\sigma'$ 为与较大能量声发射事件（但无撞击声）对应的应力突降； ΣN 为应力突降累计次数； $\Delta u'$ 为与应力突降对应的（纵向）位移率突变； $\Delta\epsilon_1$ 为与应力突降对应的应变率突变。

试件切片图象（照片1—6，均系正交偏光）显示了在不同差应力和位移条件下与凸起有关的破裂发展过程。图象表明，因错动面上存在凸起而引起的破裂分布状况和破裂机制均比较复杂，对此将另文讨论。本文主要研究与错动面形成有关的破裂扩展过程、结构特征和沿错动面发生的失稳型式。现将观测结果归纳如下。

1. 当差应力 $\sigma=\sigma_f=(0.15-0.17)\sigma_c$ 时，试件开始出现声发射事件，错动面上阶梯形凸起开始发生破裂，应力随位移增加呈线性上升，应变率和位移率保持常数，未发生任何失稳现象。

2. 随着破裂应力逐步增加，声发射事件频度也相应增加，凸起部位的破裂增长。当 $\sigma=0.24\sigma_c$ 时，破裂由凸起根部或在一定高度上沿 θ_{EA} 或 θ_{EB} 方向传播，并与原错动面（图1中13）或试件侧面斜交（图1中15），形成贯通试件的破裂面（图2a）。破裂面上次级凹

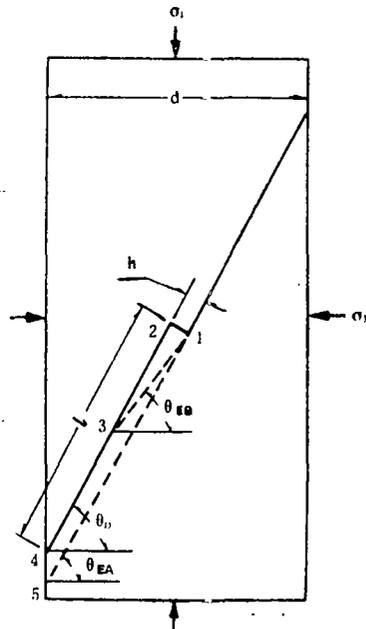
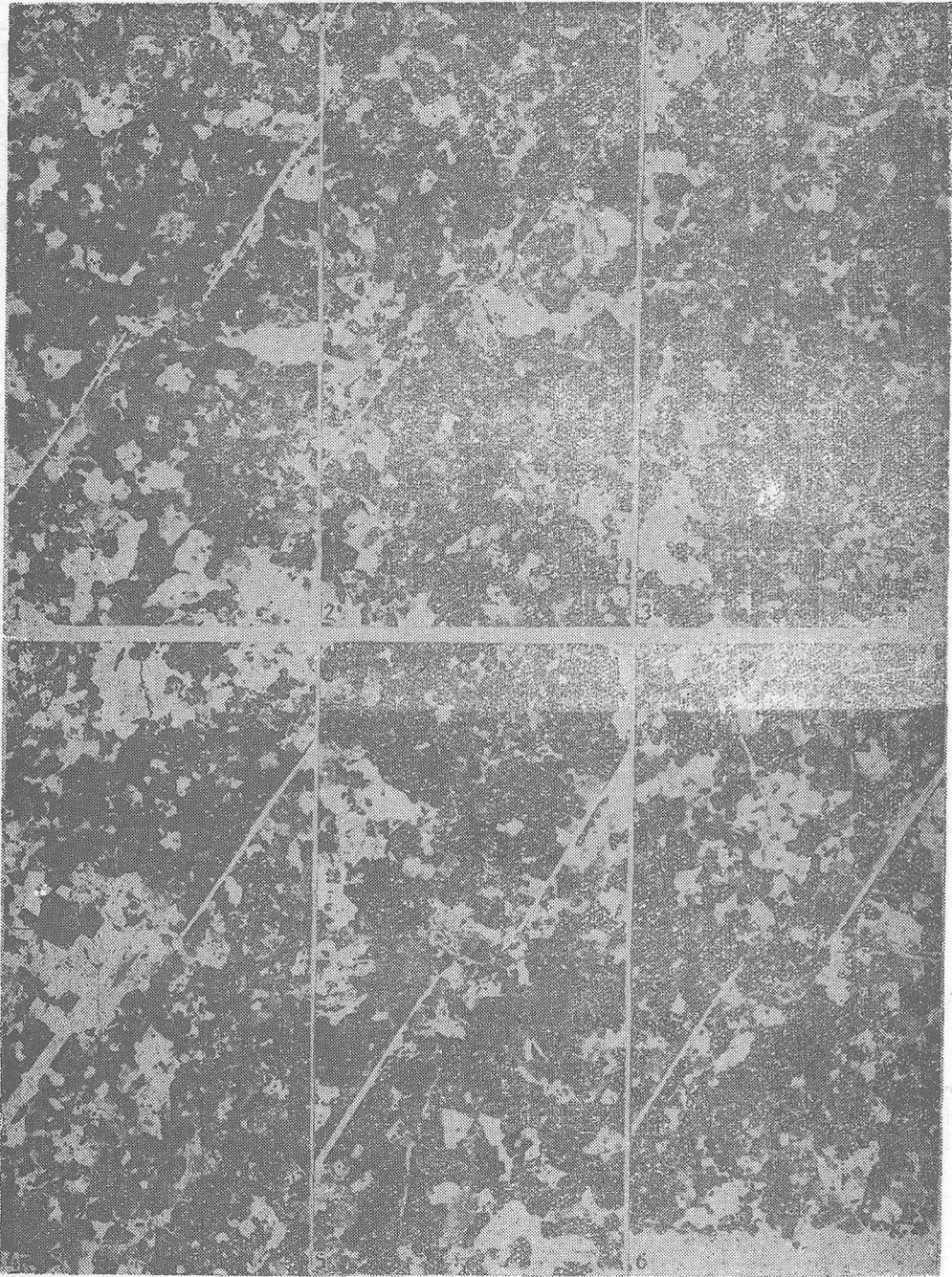


图1 试件结构

Fig. 1 Structure diagram of specimen



照片 在差应力下，含阶梯形凸起部错动面的破裂分布状态

凸体发育。应力—位移以及 e_1-t 和 $\Delta u-t$ 关系仍呈线性上升，同时也无任何失稳现象。破裂应力进一步增加，破裂面上次级凹凸体和粗粒碎屑物质相继发生再破裂(图2b—e)，错动面因此向相对平直状态转化，部分试件的应力—位移关系呈非线性上升(图2e)。当 $\sigma = 0.95 \sigma_c$ 时，破裂面和错动面几何结构趋于稳定，应力—位移曲线的非线性特征更趋明显，尽管声发射事件频度和能量显著增长，但仍未发生明显的突发失稳现象。

表1 花岗岩试件切面凸起的破裂过程与失稳型式

NO	h (mm)	切面填充物	取样条件			观测内容											
			σ_3 (MPa)	σ (MPa)	Δu (mm)	$\Delta l'$ (mm)	θ°	AE	$\Delta\sigma'$ (MPa)	$\Delta\epsilon_1$	$\Delta u'$ (mm)	突发失稳	ΣN	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\epsilon_1$	$\Delta u'$ (mm)	
1	0.75	蒙脱石	300	195	0.05	5.56	52	有	无	无	无	无	无	无	无	无	无
2	0.89	蒙脱石	300	270	0.11	2.38	44	有	无	无	无	无	无	无	无	无	无
3	1.44	蒙脱石	300	690	0.37	4.56	39	有	无	无	无	有	1	75	有	0.03	
4	1.25	蒙脱石	500	345	0.12	4.72	52	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
5	1.39	蒙脱石	500	525	0.26	4.00	42	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
6	1.14	蒙脱石	500	750	0.40	4.10	44	有	15	有	0.02	有	1	75	有	0.06	
7	1.39	铜箔	500	195	0.05	3.11	48	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
8	0.89	铜箔	500	480	0.30	1.72	30	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
9	1.33	铜箔	500	570	0.30	3.72	35	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
10	0.92	铜箔	500	645	0.40	3.89	45	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
11	0.86	铜箔	500	735	0.84	4.22	47	有	45	有	<0.02	无	无	无	无	无	
12	1.44	铜箔	500	780	0.76	5.56	42	有	无	无	无	无	无	无	无	无	
13	1.39	铜箔	500	825	1.10	6.28	47	有	45	有	0.02	有	1	165	有	0.08	
14	1.64	铜箔	500	825	1.48	5.83	40	有	15	有	<0.02	有	1	45	有	0.04	
15	1.64	铜箔	500	810	1.30	4.61	38	有	45	有	<0.02	有	10	≥ 50	有	≥ 0.04	

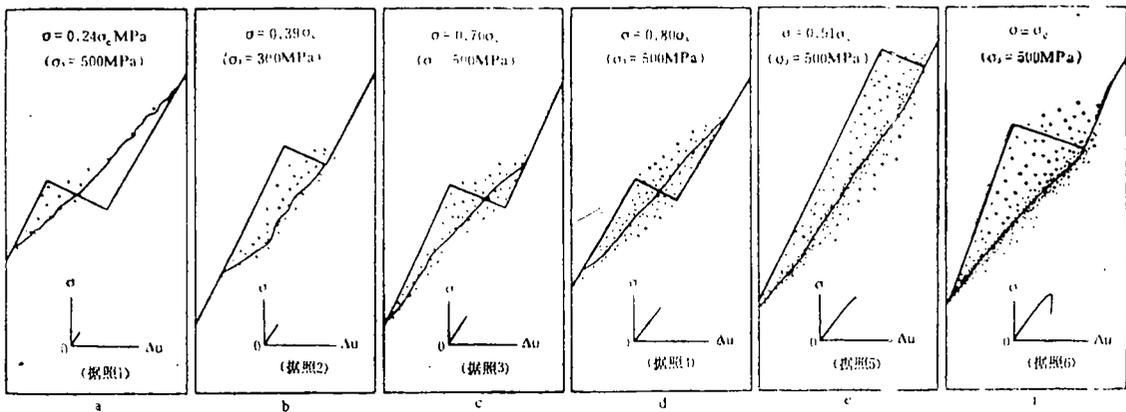


图2 在差应力下含阶梯型凸起的错动面的破裂过程和平直演化

Fig. 2 Rupture process and flattening evolution of sliding plane with step-like asperity at differential stress

3. 当 $\sigma > 0.95\sigma_0$ 后, 声发射频度和能量剧增, 部分试件在发生大能量声发射事件时可能伴随有应力突降 ($\Delta\sigma' \leq 45\text{MPa}$) 以及相应的应变率和位移率突变, 但未出现碰撞声。当 $\sigma \approx \sigma_0$ 时, 部分试件的应力—位移曲线可能出现斜率为零的预滑移 (滑移量约0.02mm), 并在预滑移中发生突发失稳 (图2f), 伴随失稳事件的碰撞声清晰可辨, 失稳应力降 $\Delta\sigma \geq 150\text{MPa}$, 应变率和位移率急剧增大。随着失稳事件相继发生, 错动面更趋平直, 突发失稳

释放的能量亦逐次增大。

4. 在凸起断裂和断裂面被铲平过程中，既有张性断裂，也有剪切断裂。张性断裂多沿长石解理和矿物晶粒界面发育，剪切断裂既沿解理面同时也切穿晶粒传播。张性断裂与剪切断裂并存可能是断裂面上形成次级凹凸体的原因。次级凹凸体断裂机制与凸起断裂相同。就发生突发失稳的错动面几何特征而言，虽然试件错动面上尺度较大和坡度较陡的阶梯形凸起已被铲断、削平，但平直程度仅是相对的，错动面与（贯通）断裂面交接部位走向仍可能有较大变化（图 3），其倾角变化范围为

$$\Delta\theta = \theta_D - \theta_{EA} \text{ (或 } \theta_{EB}) = 0 \sim 21^\circ. \tag{1}$$

贯通裂面上局部碎屑的走向变化范围为

$$\Delta\theta = -20 \sim 28^\circ. \tag{2}$$

与 $\Delta\theta$ 对应的最大高度为

$$\Delta h_{max} = 0.16 \text{ mm}. \tag{3}$$

方程（1）—（3）表示了有利于发生突发性失稳的花岗岩错动面的结构条件。

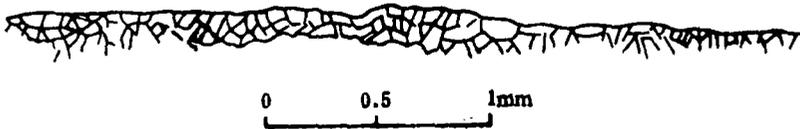


图 3 突发失稳前错动面的几何特征

Fig. 8 Geometrical feature of sliding plane before sudden instability

按错动面形成过程、失稳型式和其他特征，可将上述凹凸体断裂过程分为 4 个阶段（表 2）。

表 2 阶梯型错动面断裂过程的四个阶段划分以及 $\sigma-\Delta u$, $\epsilon-t$, $\Delta u-t$ 和失稳型式的阶段性变化

阶段	凹凸面破裂和演化	应力、声发射事件能量 (E) 随位移的变化	应变随时间的变化	位移随时间的变化	基本特征
I					破裂扩展 $\sigma_1-\Delta u$, ϵ_1-t 和 $\Delta u-t$ 呈线性变化，但声发射事件开始出现，阶梯形凸起部发生破裂和破裂扩展
II					破裂贯通 阶梯形凸起部与原切面或试件侧面贯通形成贯通破裂面，声发射频率增加， $\sigma_1-\Delta u$, ϵ_1-t 和 $\Delta u-t$ 仍呈线性变化，未出现失稳现象
III					破裂面铲平 破裂面次级凹凸结构和碎屑进一步破裂，破裂面向平直状况转化，声发射频率明显增加， $\sigma_1-\Delta u$ 呈非线性变化，但未发生失稳现象
IV					突发失稳 随着平直错动面形成，沿该面发生了整体错动非稳定摩擦滑动，并伴随有 ϵ_1-t , $\Delta u-t$ 突变和强烈撞击声

第一阶段，阶梯型凸起（或大尺度凹凸体）在较低差应力下开始破裂，有声发射事件发生，但无突发性失稳。第二阶段，大尺度凹凸体断裂，形成贯通试件且相对平直的破裂面，声

发射事件频度增加,但仍未发生失稳现象。第三阶段,次级凹凸体和粗粒碎屑进一步碎裂并被铲平,同时声发射频度和能量明显增加,应力—位移关系由线性转为非线性变化;部分试件可能发生小能量释放事件,但应变—时间和位移—时间关系不变。第四阶段,沿平直错动面发生突发性失稳,在失稳过程中伴随有应变率和位移率突变。阶段 I—IV 清楚表明,错动面上凹凸体的破裂过程或铲平过程是稳定的,突发性失稳则是被铲平的错动面的非稳定摩擦滑动即粘滑的结果。

四、结论和讨论

1. 含异行阶梯形错动面的两种破裂方式

根据图 2 和文献〔6〕,岩石错动面上阶梯形凸起有两种破裂方式(图 1)。方式 A:凸起的破裂面与试件侧面贯通形成新裂面,即图 1 中 15;方式 B:凸起的破裂面与试件错动面贯通形成新裂面,即图 1 中 13,新裂面起点不一定是“1”,可以是 12 段上任一点。破裂面倾角分别为 θ_{EA} 和 θ_{EB} 。下面讨论两种破裂方式的力学条件。

设 W 为试件的两种破裂方式的强度比,即

$$W = (\sigma_1 - \sigma_3)_{EB} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{EA} \quad (4)$$

当 $W > 1$ 时试件以 A 方式破裂并错动;当 $W < 1$ 时则以 B 方式破裂、错动。

$$W = \frac{\frac{\beta/180 + a \cos \beta / \pi}{\cos \theta_{EB} (\sin \theta_{EB} - \mu \cos \theta_{EB})} + k \frac{1 - \beta/180 - a \cos \beta / \pi}{\cos \theta_D (\sin \theta_D - k \mu \cos \theta_D)}}{\frac{1/2}{\cos \theta_{EA} (\sin \theta_{EA} - \mu \cos \theta_{EA})} + k \frac{1/2}{\cos \theta_D (\sin \theta_D - k \mu \cos \theta_D)}} \quad (5)$$

式中 $a = (2h/d) \cos \theta_{EB} / \cos (\theta_D - \theta_{EB})$; $\beta = \sin^{-1} a$; k 为原错动面摩擦阻力修正系数。考虑原错动面充填物性质以及错动时张离作用的影响,设原错动面的摩擦常量为 $k\mu$ 。

θ_{EA} 和 θ_{EB} 可由试件薄片观测确定,亦可由下式求得:

$$\theta_{EA} = 90^\circ - \frac{1}{2} \tan \left(\frac{1}{\mu} \right), \quad (6)$$

$$\tan \theta_{EB} = \frac{-1 + \mu \tan \theta_D + \sqrt{(1 - \mu \tan \theta_D)^2 + (\tan \theta_D - \mu)^2}}{\tan \theta_D - \mu} \quad (7)$$

根据 (5) — (7) 式,设 $\mu = 0.45, 0.50, \dots, 0.75$, $\theta_D = 60^\circ$, $h/d = 0.05, 0.075, \dots, 0.25$ 和 $k = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$, 可以得到如表 3 所示的结果(表中仅列出了部分计算值)。

由表 3 所列结果可以看到,当 μ 值一定时, W 值随 k 和 h/d 增加而增大,与实验中得到的凸起部位破裂面的倾角随 h/d 增加而增大的结果一致(图 4)。由实验结果可见,当 $h/d < 0.1$ 时,试件按 B 方式破裂;当 $h/d > 0.16$ 时,试件按 A 方式破裂;而当 $h/d = 0.10 - 0.16$ 时,试件的破裂方式则为 A、B 两种方式的过渡,其所对应的 k 值约为 0.95,这表明错动面摩擦阻力略有下降,即为原错动面摩擦阻力的 95%。

含阶梯形凸起的岩石是异行阶雁列断层的简化。由实验和分析得到的破裂方式判据不仅用来对具有相似结构断层的潜在破裂段进行预测,同时还有助于了解断裂面上物质充填状况和相应的摩擦常量 μ 。

表3 W 计算值

h/d	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250
k=1.0	1.015	1.023	1.031	1.038	1.046	1.054	1.061	1.069	1.077
0.9	0.943	0.956	0.969	0.980	0.993	1.005	1.016	1.027	1.039
0.8	0.871	0.887	0.905	0.920	0.937	0.953	0.968	0.983	1.000
0.7	0.794	0.814	0.836	0.856	0.877	0.899	0.919	0.937	0.959
0.6	0.712	0.737	0.765	0.789	0.816	0.841	0.865	0.889	0.915
0.5	0.626	0.656	0.689	0.717	0.750	0.780	0.810	0.830	0.869
0.4	0.536	0.568	0.607	0.642	0.679	0.715	0.750	0.781	0.820
0.3	0.445	0.481	0.525	0.564	0.607	0.649	0.690	0.632	0.770
0.2	0.338	0.373	0.434	0.478	0.528	0.576	0.623	0.668	0.715
0.1	0.231	0.264	0.342	0.392	0.448	0.502	0.555	0.603	0.659

$\mu = 0.60, \theta_{EA} = 60.5^\circ, \theta_{EB} = 46.0^\circ$

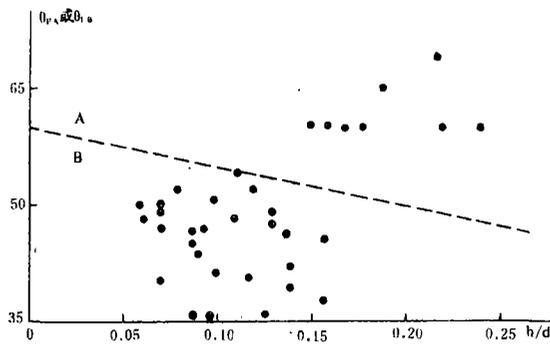


图4 破裂面倾角 θ_{EA} 或 θ_{EB} 随h/d比值的变化

Fig. 4 Dip angle, θ_{EA} or θ_{EB} , of fracturing plane as a function of ratio of h/d

2. 错动面的两类失稳

实验结果表明，岩石试件中含凹凸体的错动面在破裂和错动过程中存在着两类失稳，一类为与声发射事件对应的破裂失稳，另一类为非稳定摩擦滑动失稳。前者发生于凹凸体破裂和平直错动面形成过程之中，摩擦失稳则发生于平直错动面形成之后。两类失稳所释放的能量可相差0.5—1.0量级以上。从失稳事件波及范围看，破裂失稳是局部位发生的失稳，反应失稳的参数（如应变）变化范围也是局部的〔7〕，对总体弹性能量的聚积过程影响不大。摩擦失稳则是全局的。破裂失稳释放的能量较小，其原因主要与凹凸面引起的附加阻力分布不均，凹凸面阻挡刚度对错动的抑制和破裂强度与摩擦强度间的差异等多种因素有关〔8〕。随着破裂面逐步被铲平，错动面附加阻力和阻挡刚度逐步下降，破裂失稳将向摩擦失稳转化。当满足方程（1）—（3）的条件时，整体错动失稳就发生了。若不能满足上述条件，即使伴随声发射的局部破裂大量出现，但却不一定能发生突发性失稳。因此，仅由破裂发展过程和活动特征来研究构造地震活动规律，将难以准确揭示中强地震的发生条件或发展过程。

3. 由含阶梯型凸起的错动面失稳型式看凹凸面模型的局限性

凹凸面模型 (Asperity model) [9-12] 是目前一些地震学者颇为重视的模型之一, 它在阐明板块边缘俯冲带的地震成因时曾被广泛应用, 并且也有人将断层带上凹凸体的存在作为潜在震源的地质标志之一。本实验研究结果表明, 凹凸体破裂所释放的能量均相对较小, 它只能是诸如地声、浅层微震和中、深部微弱地震的成因。平直破裂面的整体错动失稳才能发生中、强地震。破裂面愈平直, 错动失稳释放的能量愈大, 从而发生地震的震级越大。由此可见, 用凹凸面模型解释中、强地震发生条件有一定的局限性。没有考虑破裂失稳与错动失稳两者在发生序次、失稳条件、失稳机制和释放能量大小等多方面的差异是凹凸面模型在理论和应用上出现局限性的关键所在。障碍体模型 (Barrier Model) [13-15] 在解释中、强地震成因时也存在类似缺陷。但必须强调指出: 错动面平直程度是相对的。另外, 错动失稳并非都是发生于岩质完整断面的粘滑, 就异行阶凹凸面而言, 则多发生于由凹凸体碎砾组成的滑动面上, 因此, 将破裂面错动失稳改称为碎砾断面的摩擦失稳可能更切合实际情况。

(本文1988年3月1日收到)

参 考 文 献

- [1] 国家地震局地质研究所, 中华人民共和国地震构造图, 地图出版社, 1979.
- [2] 国家地震局地质研究所, 欧亚地震构造图, 地图出版社, 1981.
- [3] 国家地震局, 中国地震烈度区划工作报告, 地震出版社, 1981.
- [4] 王威, 固体围压三轴的压力标定——一种自检标定方法, 第一次全国高温高压岩石力学论文集, 1988.
- [5] 王绳祖、施良琪、张流, 环境刚度效应—影响震源应力降的重要因素, 地震地质, Vol. 5, No. 3, 1983.
- [6] 李建国、石桂梅、马瑾, 雁列裂纹的破裂与失稳特征研究, 现代地壳运动研究 (待出版).
- [7] 刘力强、马瑾、吴秀泉, 雁列式断裂变形与失稳过程的实验研究, 地震学报, Vol. 8, No. 4, 1986.
- [8] 王绳祖、施良琪, 岩石错动面的凹凸不平及两类突发失稳, 地震地质, Vol. 7, No. 3, 1985.
- [9] Lay, T. and Kanamori, H., An asperity model of great earthquake sequences, Earthquake Prediction, an International Review. AGU., Washington, DC. 1981.
- [10] Lay, T., Kanamori, H. and Ruff, L., The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes, EPR., Vol. 1, No. 1, 1982.
- [11] Ruff, L. and Kanamori, H., The rupture process and asperity distribution of three earthquakes from long-period diffracted P-waves, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 31, No. 3, 1983.
- [12] Habermann, R. E., Spatial seismicity variations and asperities in the New Hebrides seismic zone, JGR, Vol. 89, No. B7, 1984.
- [13] Papageorgiou, A. and Aki, K., A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion, 1, Description of the model, BSSA, Vol. 73, 1983a.
- [14] Papageorgiou, A. and Aki, K., A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion, 2, Applications of the model, BSSA, Vol. 73, 1983b.
- [15] Aki, K., Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction, JGR, Vol. 89, No. B7, 1984.

STUDY OF RUPTURE PROCESS AND INSTABILITY MODE OF STEP-LIKE ASPERITY ON SLIDING PLANE IN ROCK

Li Jianguo, Shi Guimei, Wang Shengzu
(*Institute of Geology, SSB*)

Abstract

The rupture process and instability mode of step-like asperity located on sliding plane in granite specimen were studied under triaxial compression at confining pressures of 300-500 MPa. The main experimental results are as follows:

when differential stress $(\sigma_1 - \sigma_3)$ reaches $0.15 - 0.17(\sigma_1 - \sigma_3)_c$, where $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ is the peak stress level of the first event of stick-slip, macroscopic fracture takes place along the base of step-like asperity and the linear relation between stress and displacement is kept; with increasing stress level fracture propagates and cuts through the original asperity at $(\sigma_1 - \sigma_3) \geq 0.3(\sigma_1 - \sigma_3)_c$, and in the meanwhile, some new lower asperities are formed; as $(\sigma_1 - \sigma_3) \approx (\sigma_1 - \sigma_3)_c$, the sliding plane originally with asperity has been flattened relatively, and after that, the sudden instability with large stress drop and violent shock occurs.

The results indicate that the failure of asperity can only cause micro- or fore-shocks and acoustic emission, and the main shock of earthquake is induced by stick-slip along a flattened fault zone. In other words, the mechanism of strong earthquake is not the fracturing of asperities, but the unstable sliding along relatively flatten fault zone.