

粘滑位移的直接测量和剪切破裂能的修正

施 行 觉
(中国科学技术大学)

王 其 允
(美国 加州 大学)

摘要

从滑动弱化模型剪切破裂能 G 的计算公式出发, 对三轴实验中常用位移测量方法作简要分析, 认为改用弹簧应变片式位移计直接测量断层位移比用位移传感器在容器外部测量更能真实地反映粘滑的动态过程。作如此技术上的改进以后, 当频率响应和采样速率比粘滑动态过程高得多时, 就能直接得到 $\tau(\Delta u)$ 积分曲线而无需进行弹性修正。对同一粘滑事件, 分别用弹簧应变片式位移计和位移传感器在高压容器的内外同时进行位移测量, 在各种条件下, 前者得出的 G 值总比后者高得多, 约为 3—10 倍。初步的分析表明, 后者偏低的主要原因在于容器外的位移计不能及时地反映粘滑时的位移变化, 而新的方法在一定程度上克服了这一缺点, 因而更接近于用地震学方法所得到的 G 值。

关键词 剪切破裂能; 粘滑位移; 直接测量; 动态过程

一、引言

剪切破裂能是地震学、岩石力学和断裂力学的一个重要参数, 它表示在剪应力作用下, 断层失稳扩展单位面积所需要的能量, 它是材料本身固有的特性, 与断层长度, 加载速率和测量方法无关^[1]。

然而在不同学科中, 测得的剪切破裂能的值却存着 7 个数量级的巨大差异^[2]。近来由于计算方法的改进和统一, G 值差异虽有所缩小, 但从天然地震测出的 G 值仍比实验室测出的高三个量级^[2]。初步认为岩石性质, 断层深度, 温度等因素能使 G 值产生一个量级的变化, 那末依然存在的二个量级的差异, 就需要地震和岩石力学工作者的共同努力, 以便对断裂过程有一个更好的了解。

本文从滑动弱化模型中的 G 值计算公式出发, 先对三轴试验中位移测量作简要分析, 指出它的不足, 从而对位移测量作技术上的改进, 对断层位移进行直接测量; 当采样速率 (4000 Hz) 比粘滑过程快得多时, 就能得出积分曲线, 无需修正就可求出 G 值, 比原先的计算增加近一个量级。

1987 年 8 月 7 日收到本文初稿, 1987 年 12 月 15 日决定采用。

滑动弱化模型^[3]是地震学和岩石力学用于计算 G 值的共同基础, 它将地震断层看作一条剪切裂纹, 当裂纹尖端剪应力达到 τ^p 时, 断层失稳扩展, 应力随滑动距离 Δu 而下降, 直到残余应力 τ^r 时停止, 此时最大位移值是 Δu^* 。剪切破裂能 G 就是图 1 中阴影区的面积, 即

$$G = \int_0^{\Delta u^*} [\tau(\Delta u) - \tau^r] d(\Delta u) \quad (1)$$

在实验室中, 将岩石粘滑现象看成是天然地震^[4], 也常用(1)式来求 G 值, 为此必须测量出轴向应力和位移在粘滑过程中的变化关系 $\tau(\Delta u)$, 或称动态过程。换言之 G 的计算必须测量出初始和终止两个状态和一个动态过程。在此基础上将轴向应力降转换成沿断层走向的剪应力降

$$\Delta \tau = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \sin 2\theta \quad (2)$$

将轴向位移 Δl 转换成断层两盘的相对位移 Δu ,

$$\Delta u = \Delta l / \cos 2\theta \quad (3)$$

式中 θ 是裂纹平面与主应力方向的夹角, 见图 2。

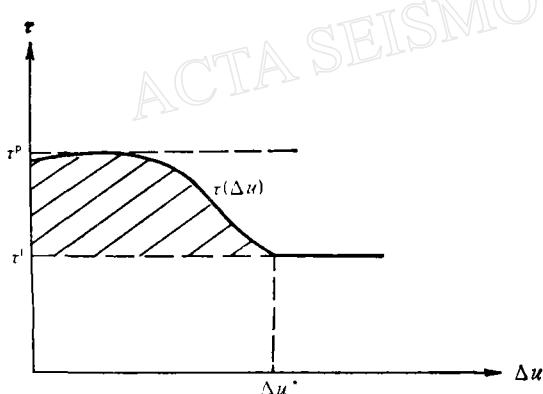


图 1 滑动弱化模型中的剪切应力与滑动位移关系
(阴影区代表剪切破裂能)

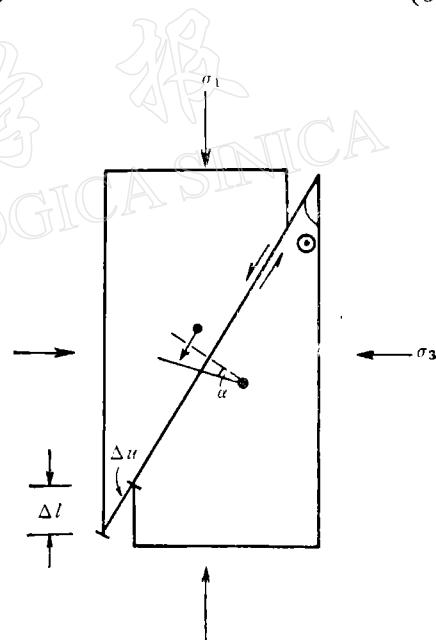


图 2 轴向数据的转换和弹簧应变片式位移计的安装

这样就确定了图 4 中粘滑前后的状态 AB 之间的相对位置, 但两个状态之间的过程曲线只有当频率响应和采样速率比粘滑过程快得多时, 才能准确得出。

二、实验装置和方法

1. 位移测量值的修正

实验装置如图 3 所示, 轴向位移可用安放在容器外部的 DCDT 来测量。当岩样破

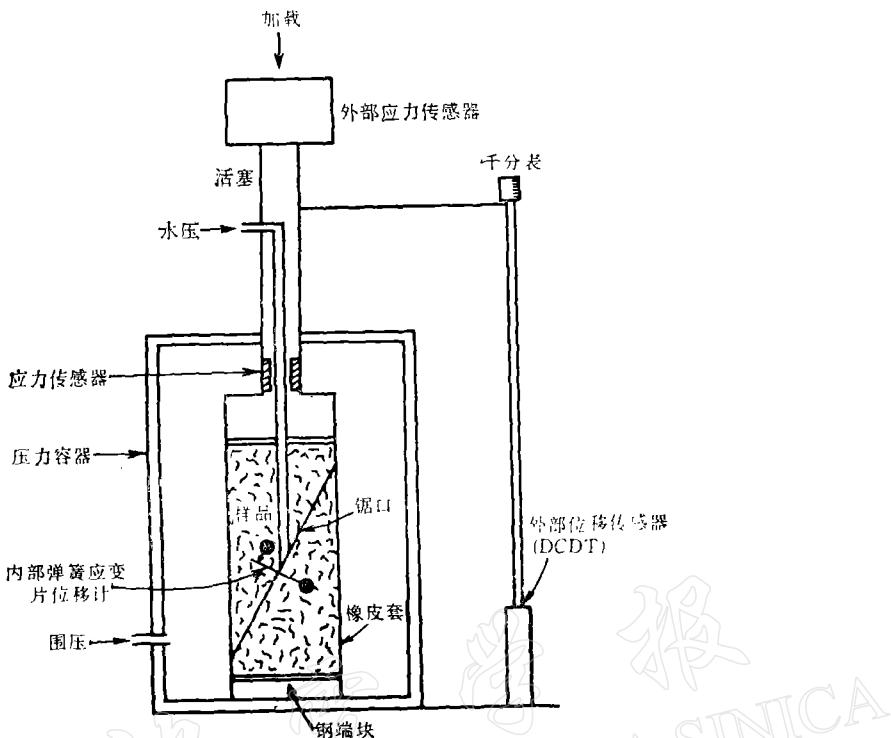


图 3 实验装置简图

裂和粘滑时, 测得的轴向位移 Δu_m 应表示为

$$\Delta u_m = \Delta l + \frac{\Delta \sigma}{E_R} \cdot l_R + \frac{\Delta \sigma}{E_s} \cdot l_s + \Delta \quad (4)$$

式中 $\Delta \sigma$ 是正应力降, E_R, l_R 分别为岩石的杨氏模量和长度, E_s 是钢的杨氏模量, l_s 是钢垫块厚度和钢活塞长度之和, Δ 是非弹性因素引起的位移, 如当整体岩石破裂前产生膨胀, 向上伸长, Δ 规定为负值; 岩样接触面处产生局部破碎, Δ 向下规定为正值。

等式右面第一项表示向下滑移量恒为正值, 第二, 第三项表示岩石和钢活塞由于应力下降而引起的弹性伸长, 恒为负值, 而第四项则可正可负。因此这四项之和 Δu_m , 即测量到的垂直向位移, 在不同条件下可以表现出正值, 负值或零值, 如图 4 中的 B, C 和 D 点。应力位移过程曲线就产生了不同的形状, 锐角、直角或钝角。

用传感器在容器外部测量位移, 方便易行。但它的缺点是离断层太远, 不能准确反映位移真实情况, 除了对位移值产生影响外, 也对积分曲线产生影响^[5], 这两者都对 G 值的计算产生不利的影响。

2. 位移的直接测量

为了尽可能真实反映裂纹位移情况, 测量位置应选择在裂纹附近, 为此设计了弹簧应变片式位移计。在弹簧薄片的两面贴上应变片, 一端固定于岩样下盘, 另一端与固定在上盘的钢针相接触, 当滑动时, 位移与 α 角变化成正比 (见图 2)。标定时, 岩样用橡胶套密封, 但弹簧片仍在高压介质油中, 为使上盘稳定下滑, 向裂纹中注入压力水, 有效围压接近

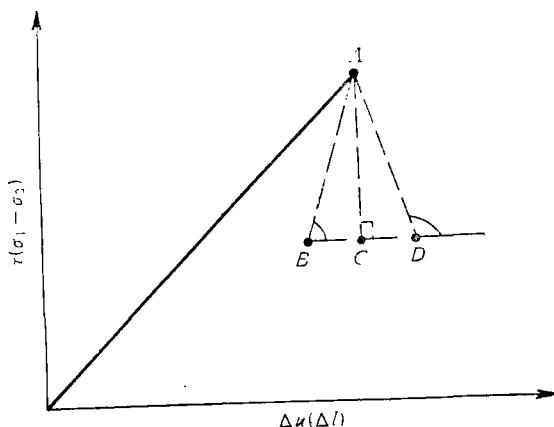


图 4 粘滑后用位移计测得的三种可能状态的相对位移值

于零, 少量的轴应力就能使上盘下滑, 位移计则在高压中得到了标定。此时(4)式中的 $\Delta\sigma = 0$, 非弹性影响 $\Delta = 0$, 因此 $\Delta u_m = \Delta l$, 测量值直接反映了裂纹位移值而无需进行修正。

用千分表同时标定位于高压介质中的弹簧应变片式位移计和位于外部的位移传感器, 标定结果见图 5, 两者表现出很好的线性关系。

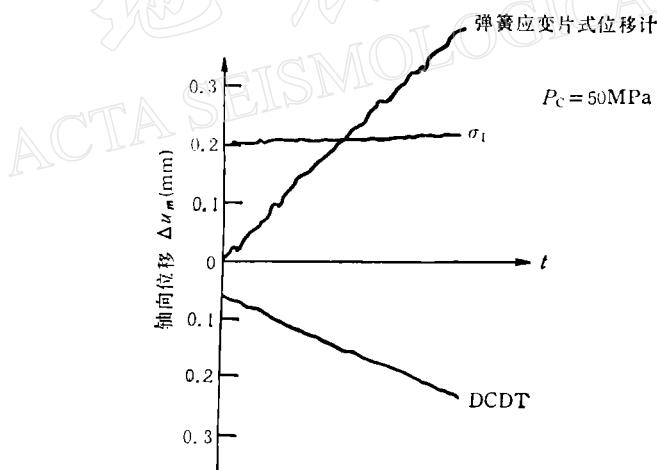


图 5 弹簧应变片式位移计和位移传感器的标定

对于同一个粘滑事件, 用以上两种原理和安放位置皆不相同的位移计同时测量, 典型结果如图 6 所示。

在不同条件下产生粘滑, 上述方法的多次测量结果如表 1 所示。

3. 应力过程 $\tau(\Delta u)$ 的测量

如果采样速率比粘滑过程(约几个毫秒)慢, 只能测得粘滑前后的两个状态即 AB 两个点, 但是 AB 两个点之间的联线 $\tau(\Delta u)$ 是 G 值的积分路径, 不同路径对 G 值的积分影响极大, 为此必须采用高速采样。

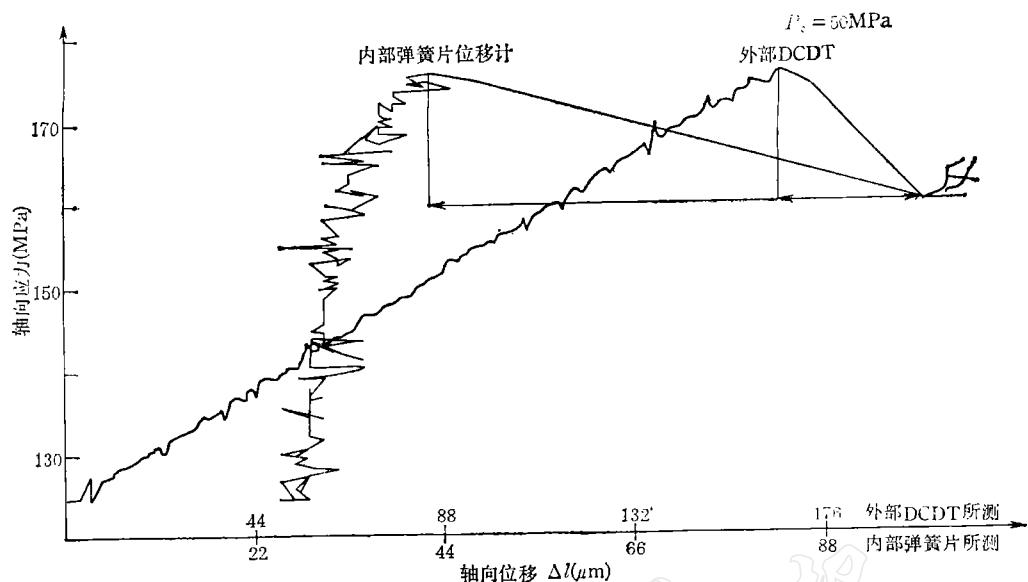


图 6 用弹簧应变片式位移计和位移传感器测量同一粘滑事件的典型结果

表 1 两种位移计对同一粘滑事件的不同测量结果

测量仪器	事件	测量结果 (μm)					
		1	2	3	4	5	6
内部弹簧应变片式位移计		73	94	59	57	58	200
外部位移传感器		22	35	32	26	29	30

高速采样时, 外部的位移传感器测得的应力位移曲线如图 7 所示。

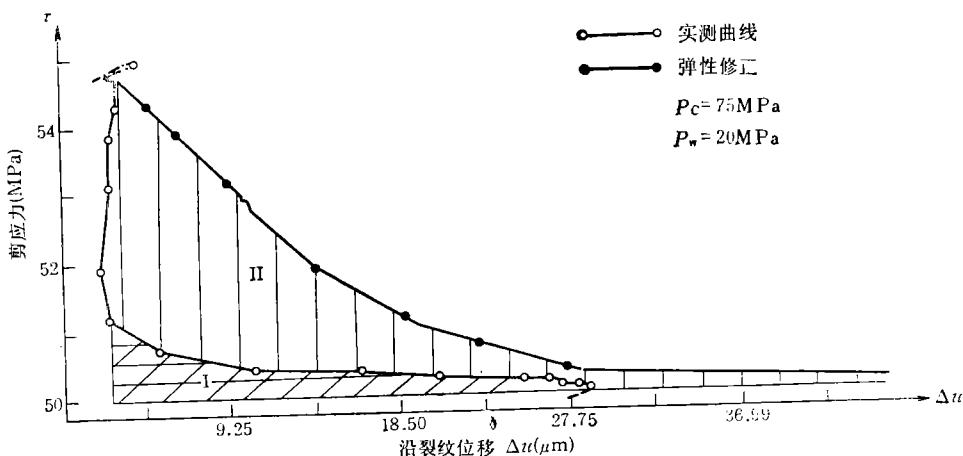


图 7 外部位移传感器测得的粘滑动态过程和剪切破裂能的积分计算以及弹性修正

如果用安放于裂纹两侧的弹簧应变片式位移计来测量位移, 则应力位移过程曲线如

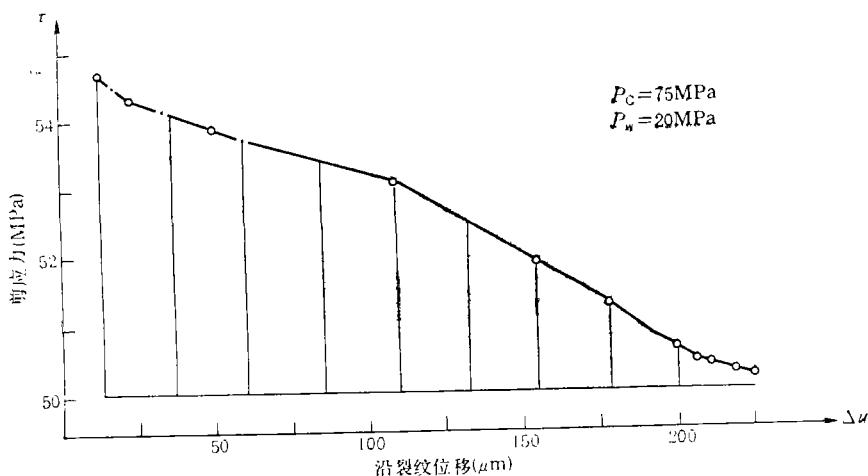


图 8 内部弹簧片式位移计所测得的粘滑动态过程和剪切破裂能的积分计算

图 8 所示。

值得注意的是,两者位移不但存在着测量值的差异,也存在着过程曲线的差异,但都与滑动弱化模型所预测的情况相一致,即应力随位移的增加而下降,位移最大时应力降到最小值。

由于弹簧片式位移计横跨断层安放,位移测量与应力测量原理相同,信号经过的仪器相同(应变仪),就保证了同步和真实,其结果较外部传感器所测得的值更为可信。

三、剪切破裂能的计算

快速采样得到了图 7 和图 8 的曲线。利用(2)式进行轴应力和剪应力的转换,利用(3)式进行轴向位移和断层位移的转换,根据(1)式就可以求出 $\tau-\Delta u$ 曲线下的面积,从而得到 G 值。下面分三种情况来进行估算:

1. 将图 7 中的实测曲线看成是 $\tau-\Delta u$ 曲线,不进行弹性修正,认为应力下降时,断层位移近于零,故磨擦力和位移的乘积为零。只将面积 I 看成是积分区域,如此求得的 G' 值约为

$$G' = 7.8 \text{ J/m}^2$$

2. 考虑弹性修正,即目前通用的估算方法。由图 6 的曲线斜率求得修正系数是 $3.4 \mu\text{m}/\text{MPa}$,对下降过程中的实测点进行弹性修正,即(4)式右面的第二,三项之和。得到修正后的 $\tau-\Delta u$ 曲线,增加的面积是 II,总的面积是 I + II,求得的 G 值约为 50 J/m^2

$$G = G_I + G_{II} = 7.8 + 42.3 = 50.1 \text{ J/m}^2$$

可以看出弹性修正起了很大的作用。

3. 图 8 中的 $\tau-\Delta u$ 曲线是对通用方法作了改进之后得出的,它直接反映了裂纹的滑动情况,原则上无需进行弹性修正。它的积分面积比图 7 的要大得多。计算得出的 G 值约为 $G = 541.8 \text{ J/m}^2$ 。

多次实验和计算的结果表明, 用内部弹簧片式位移计测得的 G 值要比用外部位移传感器测得的大得多, 前者比后者在不同条件下增加 3—10 倍, 因而与地震学方法所测得的 G 值更接近。

四、讨 论

直接测量所得的 G 值要比传感器测得的大得多, 主要原因有两个: 其一是直接测量的位移值总比传感器的实测值与弹性修正值之和来得大; 其二是两者的过程曲线形状完全不相同。后者的 $\tau(\Delta u)$ 过程曲线近于字母 “ L ”。^{[6],[5]} 对应力下降位移不变的垂直部分能根据 (4) 式进行弹性修正, 但对位移增加应力不变的水平部分, 不论位移值多大, 由于应力不变, 其乘积总是零, 对 G 值计算无法起作用。而前者对这部分的贡献给予准确充分的考虑。正是这一点造成了两者 G 值的巨大差异。

本实验中粘滑的产生是向裂纹中注入压力水使有效围压降低而产生的^[7], 因此 G 值可能比增加轴应力所测得的值稍低。

粘滑位移的直接测量, 更真实地反映了粘滑的动态过程, 直接测出了应力随位移的过程曲线, 更方便利用滑动弱化模型所提出的剪切破裂能的计算公式, 由此得出的 G 值也与地震学方法所得出的更为接近。但是 G 值的差异依然存在, 这个问题的解决, 还需进行各方面的大量工作。

参 考 文 献

- [1] 褚武扬, 1979. 断裂力学基础, 48. 科学出版社.
- [2] Wong, T. f., 1982. Shear fracture energy of westerly granite from post-fail behavior. *J. G. R.*, **87**, 990—1000.
- [3] Rice, J. R., 1980. The mechanics of earthquake rupture. *Proc. Int. Sch. Phys., Enrico Fermi*, **78**, 555—649.
- [4] Brace, W. F., and J. D. Byerlee, 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, **153**, 990—992.
- [5] Shi X. J., Z. Q. Guo, C. Y. Wang, and T. Hasegawa, 1986. Direct measurement of stick slip and shear fracture energy of granite at elevated pressures. *G. R. L.*, **13**, 1027—1030.
- [6] 国家地震局地球物理研究所第三研究室译, 1979. 地震理论与实验译文集, 173—183. 地震出版社.
- [7] Shi X. J. and C. Y. Wang, 1985. Instability on a weakening fault. *Pageoph*, **22**, 478—495.

DIRECT MEASUREMENT OF DISPLACEMENT AND ESTIMATE OF SHEAR FRACTURE ENERGY

SHI XINGJUE

(University of Science and Technology of China)

WANG QIYUN

(University of California, Berkeley, U. S. A)

Abstract

Based on the equation used to estimate the shear fracture energy in slipweakening model, the method of displacement measurement in triaxial test is analysed. Displacement measured across the rock fracture by using a transducer mounted directly on the rock specimen is compared with piston displacement measured outside the pressurized vessel. We show that the former method is more precise and reliable than the latter. As the sampling rate is much faster compared with the stick slip process, the relation between stress and displacement can be obtained directly. Both internal and external transducers are used at same time to measure the same stick slip event. There are important differences between the results from these two types of transducers. The shear fracture energy (G) estimated by the former is much higher, from three to ten times, than the latter, and therefore is much closer to the seismologically inferred values. The reason of the lower value obtained by the external transducer is also briefly discussed.