

# 断层摩擦系数及其演化定量研究的新途径<sup>\*</sup>

郑文卿, 陈 瑶, 袁道阳

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 在活断层的力学性质参数中, 摩擦系数有着特别重要的意义. 它是建立活断层运动学与动力学之间物理力学关系进而促进地震地质研究沿着“由静到动、由定性到定量”方向深入发展的关键性参数之一, 也是建立活断层重新滑动准则从而定量评估断层稳定性或地震危险性不可缺少的物理参数. 目前, 断层摩擦系数主要是应用双剪法对采自断层的断层泥进行实验室测试和研究而取得的, 这样取得的结果很难说能够代表断层实际摩擦系数, 尤其很难反映断层深部摩擦性状, 采用实验室方法是无法测知不同地质时期断层活动所显示的摩擦性状及其演化特征的. 因此, 必须寻找定量确定断层摩擦系数及其演化特征的新途径. 通过理论研究和实际应用提出了根据对活断层运动学实测资料的分析并结合年代学测试定量确定断层摩擦系数和动力学主要参数及其演化特征的新途径.

**关键词:** 活断层; 摩擦系数; 定量研究

**中图分类号:** P313.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-0844(2000)02-0160-07

## 0 引言

断层稳定性(或地震危险性)评估是地质学家、地震学家和建筑设计师等共同关注的课题. 研究表明, 断层活动实际上是断层面上剪应力达到并超过其抗剪强度而引起的失稳现象. 因而, 如果已知断面上的应力状态, 又了解断层重新滑动准则, 就可以定量评估断层的稳定性. 断层展布区和断面上的应力状态一般可以通过地震地质和工程地质调查与研究, 结合原地应力测量和数学模拟来加以确定. 关于断层滑动准则的建立, 目前主要来自岩土破坏理论的引伸或实验室研究结果. 例如, 引伸莫尔-库仑-纳维叶破坏准则建立了断层滑动准则<sup>[1~3]</sup>, 而 Patton(1966)滑动准则和 Byerlee(1978)摩擦定律<sup>[4]</sup>则是通过总结实验室大量观测和实验结果归纳出来的. 但是, 无论何种途径所建立的滑动准则, 其断层面的抗剪强度都设定由两部分组成: 其一, 断层面固有强度, 相当于胶结物的内聚力, 对于活断层而言, 此部分强度可以忽略; 其二, 断层面的摩擦阻力, 它决定于断面上的摩擦系数和正应力. 断面上的正应力可以确定, 那么, 要确定断层面摩擦阻力唯一需要加以确定的参数就是断层的摩擦系数. 目前, 断层摩擦系数的确定主要是通过实验室应用双剪法对采自断层的断层泥摩擦系数进行测试而获得的. 研究表明, 断层泥的摩擦性状并不是决定断层摩擦性状的唯一因素, 至少还应当考虑断层

收稿日期: 1999-08-17

<sup>\*</sup> 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000010

作者简介: 郑文卿(1942-), 男, 副研究员, 从事地应力和构造应力场理论与应用及地震预报研究工作.

面粗糙度和吻合度等诸因素对断层面抗剪强度的影响<sup>3</sup>. 虽然目前还很难评判实验室测试结果与实际断层摩擦系数之间的差别程度, 但是, 探索直接的定量确定天然状态下的断层摩擦系数及其在不同地质时期的演化特征的新途径无疑是有其实际意义的工作.

随着地震地质研究的深入以及活断层调查和研究工作的普遍开展, 已拥有不少关于活断层在不同地质时期的运动学的实测资料, 应当加以利用. 这是本文探索定量确定断层摩擦系数及其演化新途径的切入点和出发点.

## 1 关于断层重新滑动准则

研究表明, 强地震, 尤其特大地震 ( $M_s \geq 7.5$ ) 的地震断层滑动位移绝大多数以走向滑动位移分量为<sup>6</sup>. 因而, 断层活动遗留的地表形迹也以走向滑动位移形迹最为清晰, 且不易受外力所破坏. 这里将主要讨论活断层走向滑动准则以进一步揭示断层摩擦系数与断层走向滑动位移和应力状态之间的特殊关系.

已经指出, 断层重新滑动是断层面的剪应力达到并超过其抗剪强度而引起的. 据此, 断层临界滑动判定准则通常采用类似于库仑-纳维叶破坏准则的形式:

$$\tau_n = \tau_0 + f \cdot \sigma_n = \tau_0 + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

其中,  $\tau_n$  和  $\sigma_n$  分别为作用于断面上的剪应力和正应力;  $f$  和  $\varphi$  分别为断层摩擦系数和摩擦角, 且  $f = \operatorname{tg} \varphi$ ;  $\tau_0$  为断层面固有剪切强度, 对于活断层,  $\tau_0 = 0$ ;  $f \cdot \sigma_n$  为断层面摩擦阻力, 与  $\tau_0$  叠加, 合称为断层抗剪强度. (1) 式在  $\tau - \sigma$  直角体系中为一直线方程, 如图 1(a) 中直线  $PQR$  所示. 当断层面应力状态为应力圆上点  $D$  时, 断层不会滑动; 应力圆上的  $Q$  和  $R$  两点所对应的断层面则处于临界状态; 当应力状态位于应力圆的  $QR$  弧上任意一点时, 其所对应的断层面已经滑动. 据此, 可以推导出任意倾角的活断层在二向或三向应力作用下的走向滑动准则.

(1) 在水平面应力场 ( $\sigma_H, \beta; \sigma_h$ ) 作用下, 直立活断层走向滑动准则为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_H}{\sigma_h} &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = [f + \sqrt{1 + f^2}]^2 \\ \sigma_H - \sigma_h &= (\sigma_H + \sigma_h) \cdot \sin \varphi \\ \beta &= \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

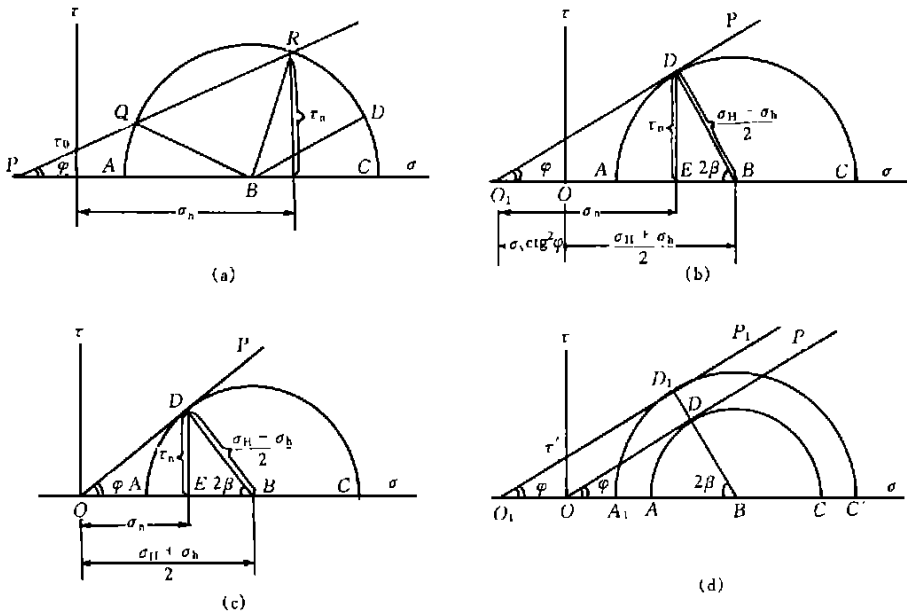
或写成差应力形式  
且

其中,  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  分别是最大和最小水平主应力;  $\beta$  为  $\sigma_H$  方向与断层走向之夹角. 当  $\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$  时, 断层面首先达到临界滑动状态, 并随着应力强化而滑动, 释放应力. 于是其它方向的断层就难以滑动. 此断层常被称为最有利方位断层. (2) 式所代表的断层滑动准则如图 1(c) 中直线  $ODP$  所示.

(2) 在三维应力场作用下, 任意倾角 ( $\varphi$ ) 的活断层走向滑动准则简示如下

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_H - S_h}{S_H + S_h} &= \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H + \sigma_h + 2\sigma_v \operatorname{ctg}^2 \varphi} = \sin \varphi \\ \beta &= \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $S_H = \sigma_H + \sigma_v \operatorname{ctg}^2 \varphi$  和  $S_h = \sigma_h + \sigma_v \operatorname{ctg}^2 \varphi$  分别为最大和最小水平主应力;  $\sigma_v = \rho g z$  为垂直应力,  $\rho$  为岩石容重,  $g$  为重力加速度,  $z$  为深度. (3) 式所代表的滑动准则如图 1(b) 中直线  $O_1DP$  所示.



(a) 断层滑动一般准则; (b) 一般断层滑动准则;  
 (c) 活断层滑动准则; (d) 断层与活断层滑动准则的比较

图1 断层重新滑动准则

Fig. 1 Reslipping criteria of faults.

如果考虑孔隙水压力对断层滑动准则的影响, 可设标准静水压力  $P_0 = gz$ , 孔隙水压力  $P_k = k P_0$ ,  $k$  为比例系数, 则有效应力分别为:  $S_H \equiv S_H - P_k$ ,  $S_h \equiv S_h - P_k$  和  $\sigma_v \equiv \sigma_v - P_k$ . 代入(2)和(3)式, 滑动准则仍然成立. 在滑动准则图上, 只将应力圆向左移动  $P_k$  距离即可.

将(2)与(3)式作比较, 并用图1(d)表示. 可见, 高倾角断层易于孕育和发生强地震. 综合上述讨论可知, 如果断层几何学及摩擦性状已经确定, 则其重新滑动准则就可建立. 一旦测知其应力场状态, 就可以定量评估其稳定性和地震危险性. 可见, 断层摩擦系数的测定是一项极其重要的工作.

## 2 断层走向滑动位移与摩擦系数的关系

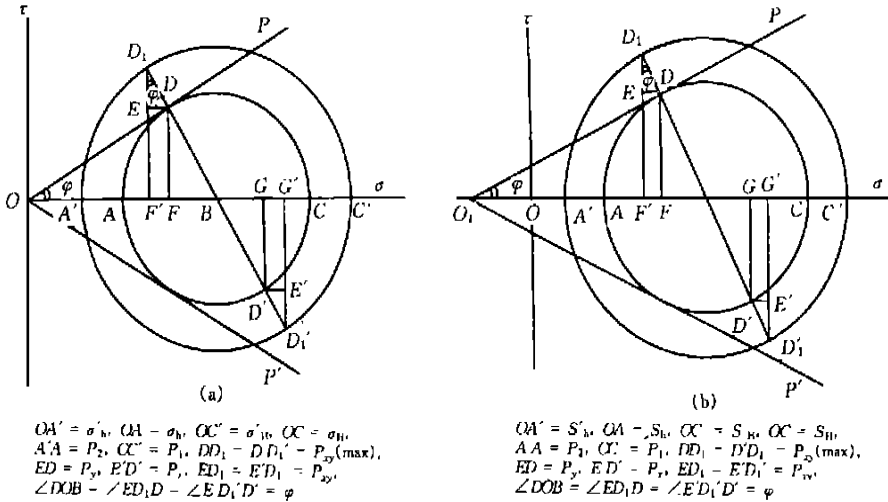
考察表明, 任何地块及其边缘都存在着规模不等、方向不一的劈理、节理和断层等构造. 在一定应力场作用下, 并不是所有的构造都显示出同样的活动性, 只有有利方位的构造才显示相应的活动性, 而发育成为主活动构造. 在现今应力场作用下的主活动断层通称为现今活动断层. 已经指出, 有利方位的断层其走向与最大水平主应力  $S_H(\sigma_H)$  方向的夹角为  $\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ . 这是研究活动断层走向滑动位移与其摩擦系数定量关系的基本前提之一.

前面已讨论, 欲使断层滑动, 首先使之处于临界滑动状态, 即其面上剪应力与其抗剪强度相等. 于是, 在此意义下, 断层处于无约束状态, 犹如断裂力学所研究的自由裂纹一样. 因此, 如果加载应力进一步强化, 断层即可滑动. 在滑动过程中, 断层面的剪应力始终与其摩擦阻力相平衡. 也就是说, 断层滑动所损耗的应力与强化的那部分应力在量值上相等, 只是符号相反. 当应力场不再强化时, 断层也就停止滑动, 而断层面应力状态仍处于临界应力状态. 观测和研究表明, 临界应力状态在经过一定时间衰减之后, 将逐步过渡到正常状态. 由此推断, 推动断层滑动位移并在量值上相当于超过临界应力状态的那部分应力与断层滑动位移特征应当是相匹

配的. 于是, 这部分应力场  $[P_1, \beta; P_2]$  与强化应力场  $[S_H^1, \beta; S_h^1]$  和临界应力场  $[S_H, \beta; S_h]$  之间的关系可表示为

$$[P_1, \beta; P_2] = [S_H^1, \beta; S_h^1] - [S_H, \beta; S_h] \quad (4)$$

(4)式可用应力圆加以表示(图 2). 那么, 在应力场  $[P_1, \beta; P_2]$  作用下, 断层运动行为就类同断裂力学所研究的自由裂纹的运动行为. 正因如此, 可以直接引进断裂力学的有关结果来建立断层摩擦系数与其走向滑动位移之间的关系方程. 于是, 我们寻找到一条重要线索.



(a)活断层滑动引起的应力降; (b)一般断层滑动引起的应力降

图 2 断层滑动引起的应力降图解

Fig. 2 Demonstration of stress drop caused by fault slip.

根据用断裂力学处理同类问题的习惯, 建立如图 3(b)所示的断层坐标系和动力学系统. 图 3(a)则用来表达图 3(b)动力学系统与应力场  $[P_1, \beta; P_2]$  之间的关系, 其数学表达式为

$$\begin{aligned} P_x &= P_1 \sin \varphi \\ P_y &= -P_1 \sin \varphi \\ q_{xy} &= P_1 \cos \varphi \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $P_1 = -P_2, q_{\max} = P_1$ . 称应力场  $[P_1, \beta; P_2]$  为降落应力场, 而以往我们仅注意剪应力降  $q_{xy}$ , 却忽略了正应力降  $P_x$  和  $P_y$ , 这是不完整的. 如果以  $u$  表示断层一盘内侧沿  $x$  轴的位移, 根据断裂力学的结果<sup>[7]</sup>, 位移  $u$  与降落应力场  $[P_1, \beta; P_2]$  各应力张量之间的关系为

$$u = \pm \sqrt{a^2 - x^2} \frac{2q_{xy}}{E'} + \frac{2(P_x - P_y)}{E'} x$$

或写成下列形式

$$u = \pm \sqrt{a^2 - x^2} \cdot \frac{2q_{xy}}{E'} + \frac{2P_x}{E'} x \quad (6)$$

其中,  $a$  为断层走向滑动位移段的半长度; 对于平面应力状态,  $E' = E, E$  为断层围岩的弹性模量; 这里规定, 水平滑动位移以反时针方向为正, 压应力为正. 根据(6)式, 为求得断层中部滑动位移  $u_0$  和断层端部滑动位移  $u_a$  与应力降的关系, 分别令  $x = 0$  和  $x = a$  即可得到

$$u_0 = \frac{2a}{E}q_{xy} \text{ 或 } q_{xy} = \frac{u_0 E}{2a} \tag{7}$$

$$u_a = \frac{2a}{E}P_x \text{ 或 } P_x = \frac{u_a E}{2a} \tag{8}$$

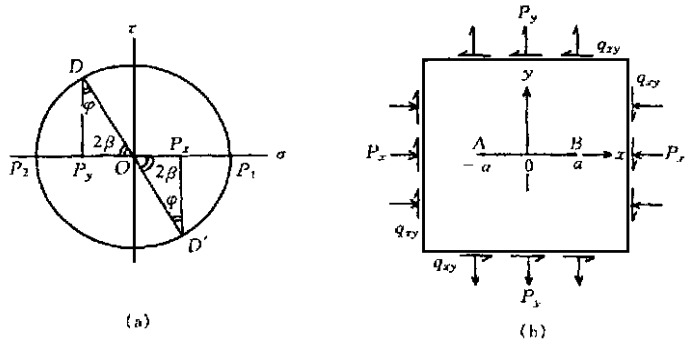
由上述可知,正应力  $P_x$  和  $P_y$  对断层走向滑动位移是有贡献的;断层端部走向位移  $u_a$  并不为零,只不过该位移有多种表现形式,在实测时必须加以考察.于是,由图3和(5)式可得

$$\frac{P_x}{q_{xy}} = \text{tg } \varphi = f$$

代入(7)和(8)式,即可得到

$$f = \text{tg } \varphi = \frac{u_a}{u_0} \tag{9}$$

由(9)式可知,只要进行实地测量和研究断层运动学特征,并结合年代学测试,就可以定量确定活断层不同活动时期的摩擦系数、摩擦角及其演化特征,进而根据(2)和(3)式建立活断层现今重新活动准则,以及定量确定不同地质时期断层动力学基本特征及其演化特征.这对于地震地质研究的深入发展和断层稳定性的客观定量评估将有推动作用.



(a) 断层滑动时有效应力状态;  
(b) 断层坐标系及有效应力分量

图3 活断层滑动动力分析

Fig. 3 Dynamic analysis on slip of an active fault.

### 3 应用实例

这里以老虎山断层为例,来评估上述从理论上推导出的定量确定断层摩擦系数及演化特征新途径的科学性和实用性.

老虎山断层位于横跨甘肃省景泰县和天祝县的老虎山的北麓,东起景泰县的喜集水,西止于天祝县的黑马圈河附近.其总体走向为  $N82^\circ W$ , 倾向为  $NNE$ , 倾角大体为  $70^\circ$ , 总长度约为  $61 \text{ km}$ , 中心位于阿门岷,即1990年10月20日  $M_s 6.2$  地震的震中.该断层虽呈分段性特征,但从宏观上和动力学角度来看,仍具有整体性.袁道阳等人通过野外考察、卫片解译和航片判读得到了老虎山断层不同地质时期的位移分布状况<sup>8</sup>.这些位移分布具有明显的分组现象,在  $Q_3^1 \sim Q_4^3$  期间大致可划分出12个活动期.老虎山断层展布特征及I期的断层走向滑动位移分布状况如图4所示.经分析和计算得到每一活动期次走向滑动位移中的特征位移量  $u_0$  和  $u_a$ ,进而确定了断层摩擦系数、摩擦角和最大水平主应力  $S_H$  的方向(表1).表1中还分别列出了老虎山断层走向滑动速率和兰州地区垂直运动速率,以及刘晓红等人(1986)所测定的海原断层泥摩擦系数<sup>9</sup>,并作简图5以求直观.

表1中所列兰州地区垂直运动速率系由兰州大学地理科学系朱俊杰等人所提供黄河阶地测量及测年结果<sup>10</sup>计算得到的,目的在于与老虎山断层运动强度作对比.结果表明,相邻地区不同时期地壳运动强度相当一致.由表1和图5可见,晚更新世期间,老虎山断层摩擦系数较大,滑动速率低;其后,断层摩擦系数较小,滑动速率高.看来,摩擦系数与滑动速率两者相反相

成. 老虎山断层区应力场在  $Q_3^1 \sim Q_4^3$  期间, 最大水平主应力  $S_H$  方向作左旋旋转, 但幅度仅为  $7^\circ$ , 基本稳定在  $N68^\circ \sim 76^\circ E$  之间. 老虎山断层近期摩擦系数为 0.688, 与相邻的海原断层泥摩擦系数 0.697 相近, 也与张伯崇等人在实验室里得到的一般结果 0.66 相接近<sup>[11][12]</sup>. 由此可以认为, 本文所提出的利用活动断层运动学实测资料定量确定断层摩擦性状和有关动力学特征及其演化的方法具有实用价值.

表 1 老虎山断层摩擦系数及有关参数定量计算结果

年代	期次	水平位移/cm		摩擦性状		最大水平 主应力方向	运动速率		备注
		$u_0$	$u_a$	$f$	$\varphi$		$v_h/(mm \cdot a^{-1})$	$v_v/(mm \cdot a^{-1})$	
$Q_4^3$	I	800	550	0.688	$34.50^\circ$	$70.26^\circ$	6.69	1.39	实测结果: 海原断层 $f = 0.697^{[9]}$
	II	450	300	0.667	$33.70^\circ$	$69.85^\circ$			
$Q_4^2$	III	550	350	0.636	$32.47^\circ$	$69.24^\circ$			
	IV	600	350	0.583	$30.24^\circ$	$68.12^\circ$			
$Q_4^1$	V	2 100	1 450	0.690	$34.62^\circ$	$70.31^\circ$			
	VI	1 400	1 100	0.786	$38.16^\circ$	$72.08^\circ$			
$Q_3^3$	VII	3 000	3 000	1.000	$45.00^\circ$	$75.50^\circ$			
	VIII	2 600	2 500	0.962	$43.88^\circ$	$74.94^\circ$			
$Q_3^2$	IX	1 900	1 800	0.947	$43.45^\circ$	$74.73^\circ$	3.04	0.97	
	X	2 000	1 900	0.950	$43.53^\circ$	$74.77^\circ$			
$Q_3^1$	XI	3 000	2 800	0.933	$43.03^\circ$	$74.51^\circ$			
	XII	2 000	2 000	1.000	$45.00^\circ$	$75.50^\circ$	0.20	0.63	

注: 海原断层摩擦系数为断层泥实测结果,  $v_h$  为老虎山断层水平运动速率,  $v_v$  为兰州地区垂直运动速率.

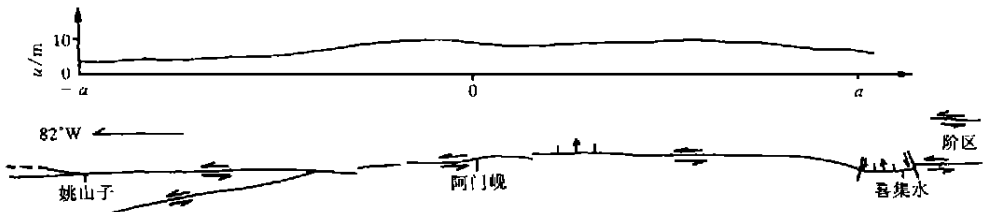
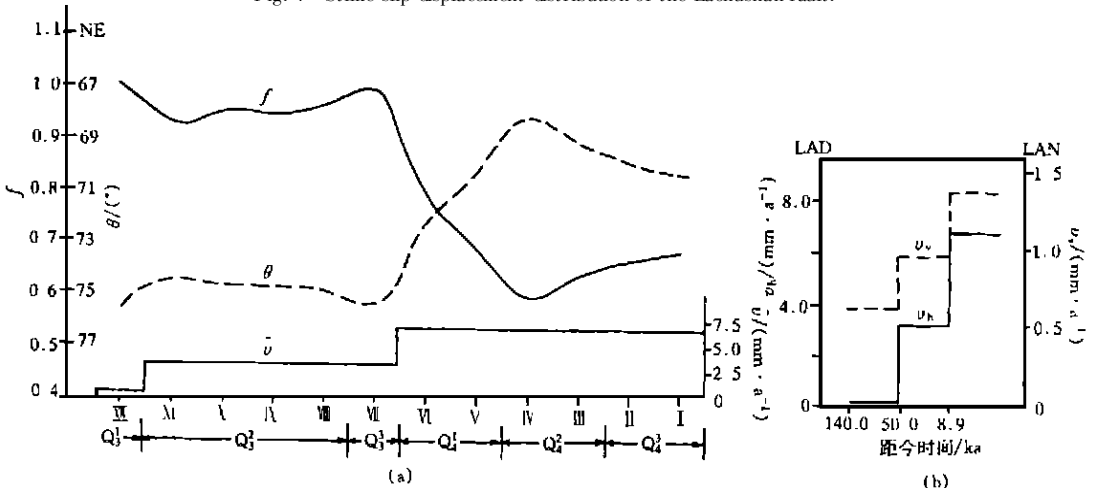


图 4 老虎山断层展布与走向滑动位移分布

Fig. 4 Strike slip displacement distribution of the Laohushan fault.



(a) 老虎山断层摩擦系数 ( $f$ )、断层区最大水平应力方向 ( $\theta$ ) 和断层水平运动速率 ( $\bar{v}$ ) 演化状况;  
(b) 老虎山断层 (LAD) 与兰州地区 (LAN) 历史地壳运动速率对比

图 5 老虎山断层摩擦系数及其演化曲线

Fig. 5 Friction coefficient evolution curve of the Laohushan fault.

### 4 结语

经实际应用证明, 本文通过理论推导所开发的利用地震地质学关于活断层运动学实测资料 and 研究成果定量确定断层摩擦系数和摩擦角及其演化特征的新途径具有严谨的科学性和明显的实用性, 其应用结果具有客观性和低成本特点. 因此,

本文得到博士生导师、研究员 刘百 麓先生的帮助和支持, 作者在此深表谢意.

[ ]

[1] . [ M] . : , 1986. 108 ~ 123.

[2] . [ M] . : , 1987. 69 ~ 75.

[3] , , . [ M] . : , 1979. 71 ~ 76.

[4] Byerlee J. Friction of rocks[ J] . Pageoph., 1978, 116: 613 ~ 626.

[5] . JRC—JMC 新模型[ J] . , 1998, 17(4): 349 ~ 357.

[6] , , . [ J] . , 1994, 16(4): 455 ~ 462.

[7] . [ M] . : , 1976. 112 ~ 121.

[8] , , , . [ J] . , 1994, 3: 151 ~ 159.

[9] , , . [ J] . , 1986, 8(3): 50 ~ 54.

[10] , , . [ J] . ( : , CCP 攀登丛书: , ) , 1994. 77 ~ 90.

[11] , . [ A] . . [ C] . : , 1987. 136 ~ 145.

[12] . [ A] . . [ C] . : , 1991, 159 ~ 166.

$$(ii) / (vi)8 \quad 8 (ii) \quad 0(vii) \quad 2 \quad 6(ii) / \quad 5(x5(ii))5(x7(vi)) \quad 4 \quad 5 \quad 6(v) \quad 0 / \quad 5(ix)(vi) \quad (viii)ii)6 = 5 \quad (vii)3 \quad (xii)v)5(x) /$$

$$(iv)0 \quad (viii)iii)ii(xiv)(xvi) / \quad 5 \quad (ii) / (v) \quad (x5)4 \quad (vi)7 \quad 0 = 6 \quad 5(x) /$$

ZHENG Wen-qing, CHEN Yao, YUAN Dao-yang  
(Lanzou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Of the mechanical parameters of active faults, friction coefficient holds special importance in establishing the kinematic and dynamic relationships of active faults and in establishing the criteria of fault reslipping. Now, the friction coefficient is generally got from gouge test by using the double-shear method. It is difficult to detemine whether the result from this test can reflect the real situation of the faults. So it is necessary to find out a new way for quantitatively determining the fault friction coefficient and its evolution. Based on theoretical study and practice, such a new method is put forward by using fault kinematic and dating data.

Friction coefficient; Quantitative study