

断层泥极限粒度存在的可能机理及其意义

皇甫岗

(云南省地震局)

马 瑾

(国家地震局地质研究所)

摘 要

通过对济南辉长岩的双剪摩擦实验发现,在一定的正压力下,存在着相应的断层泥极限粒度。应用颗粒破碎理论及破裂表面能密度进行分析,并结合对模拟断层带的显微观察,作者认为,摩擦功的消耗由颗粒磨细向形成 R_1 等剪裂面的转变是断层泥极限粒度存在的可能机理。另外,文中还对应用断层泥极限粒度反演其主要形成期围压值的可行性作了初步论证。

关键词: 双剪摩擦实验 断层泥极限粒度 断层位移破裂表面能密度 围压

随着断层的滑移,断层间的角砾或断层泥将不断被磨细。但是,当断层位移达到一定程度时,在其它环境条件不变的情形下,存在着断层泥粒度不随断层的滑移而变化的可能。通过岩石的双剪摩擦滑动实验及对岩样切片的显微观察,上述现象的存在得到证实。在对断层泥极限粒度存在的可能机理的分析中,作者还论证了用断层泥极限粒度反演断层泥主要形成期围压值的可行性。

一、实验系统、岩样制备及分析方法

本研究所采用的双剪实验装置如图1所示。正压力、轴向力分别由小型活动式和固定式压力机提供。实验岩样由三块济南辉长岩组成,中间块的尺寸为 $40 \times 40 \times 80 \text{cm}^3$,侧块的尺寸均为 $40 \times 50 \times 20 \text{cm}^3$ 。不平行度一般小于 0.02mm 。中间岩块的厚度是两侧岩块的两倍,这样可以减小垂直荷载导致的块内垂向弹性位移的差异^[1]。岩块滑 动 面

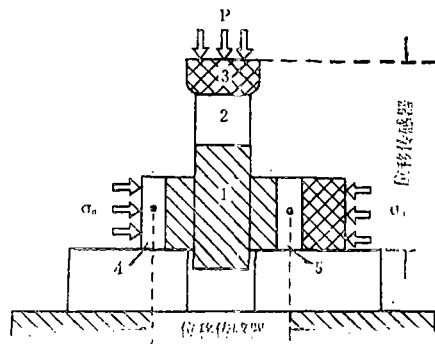


图1 双剪实验装置示意图

- 1. 岩样 2. 淬火钢块 3. 应力传感器
- 4. 薄钢片 5. 润滑油膜

Fig. 1 Diagram of the sample assembly

间夹入一薄层方解石岩粉，其粒径约为75—90 μm 。岩粉厚度用称重量法确定。

在实验前，将岩块及岩粉都置于烘箱中，在60 $^{\circ}\text{C}$ 温度下作连续24小时的烘干，尽量保持滑动面的干燥，以减小孔隙水的影响。

对于在相同条件下经不同滑移量的岩样，首先将其切成薄片，再通过图象识别系统确定断层泥的粒径及分布特点。

二、实验结果及分析

1. 断层位移 (d) 与断层泥平均粒度 (M) 的关系

在辉长岩滑动面之间夹一层粒度约为80 μm 、厚0.5mm的方解石岩粉，使岩块以2.5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的速率作稳定滑动，观察方解石岩粉粒度的变化特点。实验发现，在3.5mm的滑移量范围内，在10MPa和25MPa两种正应力的情形下，方解石粉的平均粒度随位移的增加而迅速下降，其粒径为初始时的0.02倍(图2)。根据图2可将d—M关系大致分为三个阶段：Ⅰ. 粒度陡降段(d=0—3.5mm)；Ⅱ. 粒度缓降段(d=3.5—9.0mm)；Ⅲ. 粒度稳定段(d>9.0mm)。随着岩块的滑移，方解石岩粉粒度变化逐渐趋于稳定，即当达到某一值时，粒度不再下降。在25MPa的正应力下，该值为0.25 μm ；而在10MPa的正应力下，该值为0.5 μm 。

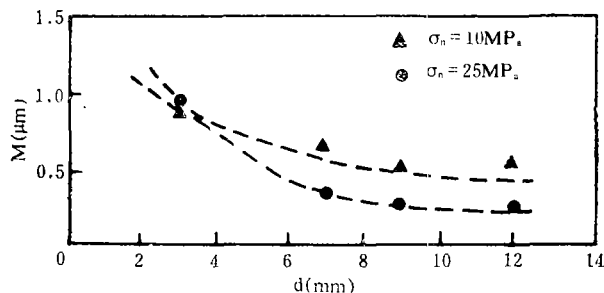


图2 随断层滑移量的增大断层泥的平均粒度的变化
($M_0 = 80\mu\text{m}$, 滑移速率: 2.5 $\mu\text{m}/\text{s}$)

Fig. 2 Change of the mean gouge grain size with displacement

根据上述实验结果，并综合Engelder和Byerlee等人的研究〔2〕〔3〕〔4〕，可以得到如下认识：

(1) 在一定的正应力下，断层泥的粒度不会随断层位移的增大而无限变小，而是在趋于某一个极限值后逐渐稳定。

(2) 压力愈大，断层泥的粒度极限值愈小。

2. 断层泥极限粒度存在的可能机理

断层泥的粒度随断层的摩擦滑动逐渐变细的机制主要是局部应变达临界点之上所产生的粒表破裂造成的颗粒破坏。换句话说，颗粒变细的本质是颗粒不断地被分裂所致。

设颗粒的破碎总是由中部裂开，依次下去直到颗粒粒径达到一定的值为止。若初始粒径 $M_0 = D$ 的颗粒经n次破碎后，终极粒径 $M_c = D/2^n$ 。应用邦德破碎理论〔5〕，该过程耗能：

$$W = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{M_c}} - \frac{1}{\sqrt{M_0}} \right); \quad (1)$$

$$C_B = 10W_1。$$

式中 W_1 为功指数,即将一吨无限大的颗粒破碎,使其80%的颗粒的粒径达 $100\mu\text{m}$ 时所消耗的能量。方解石的功指数约为14。

再设此功仅耗于产生使颗粒分裂为二的新裂面。由(1)式估算不同尺度颗粒的新裂面表面能量密度

$$e_s = W/A。 \quad (2)$$

其中A为破裂面积。

(1)当粒径由 $D \rightarrow D/2$ 时的能量密度

$$e_{s1} = (\sqrt{2} - 1)J。 \quad (3)$$

其中 $J = 4D^{3/2}C_B/\pi$ 。

(2)当粒径由 $D/2^{(n/1)} \rightarrow D/2^n$ 时的能量密度

$$e_{sn} = 2^{(5n/2-3)}(2 - \sqrt{2})J。 \quad (4)$$

比较(3)、(4)两式,有

$$e_{sn} > e_{s1}, \quad (n > 1)。 \quad (5)$$

就趋势而言,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} e_{sn} = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^{(5n/2-3)}(2 - \sqrt{2})J \rightarrow \infty。 \quad (6)$$

事实上,只要取不大的 n 值, e_{sn} 值就非常大。对于我们的实验结果, $M_0 = 80\mu\text{m}$, $M_c = 0.5\mu\text{m}$ (当 $\sigma_n = 10\text{MPa}$ 时)。按上述考虑,

$$n = \log(M_0/M_c) / \log 2 \approx 7。 \quad (7)$$

将 $n = 7$ 代入(4)式,有

$$e_{s7} = 2^{29/2}(2 - \sqrt{2})J。 \quad (8)$$

显然

$$e_{s7} \gg e_{s1}。 \quad (9)$$

在本实验中,尺寸为 $400 \times 500 \times 0.5\text{mm}^3$ 的方解石岩粉层,由粒径为 $80\mu\text{m}$ 的方解石颗粒约 3.7×10^8 颗或粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒 1.5×10^{15} 颗组成。而相应的破裂总面积分别为 $1.85 \times 10^6\text{mm}^2$ 和 $3.0 \times 10^8\text{mm}^2$ 。这意味着在岩粉颗粒达极限粒径时,使所有的颗粒进一步破裂所形成的裂面面积比初始粒度时颗粒破裂形成的裂面面积高出两个数量级。总之,对这样细小的颗粒进行分裂将耗功甚大。

平田隆幸(1987)曾认为破裂的分维可能存在一个上限值(约1.6),其可能反映由耗能最小原则制约的非均质介质的变形协调[6]。从整个断层摩擦滑动过程来看,断层间矿物颗粒的破碎仅为耗能的一个方面,即为摩擦功的部分。其它诸如颗粒的移动和旋转、摩擦热、凸凹体作用等将共同分配整个摩擦滑动过程中的摩擦功[7]。在滑动初期,矿物的颗粒大,因而易于吸收能量而破碎。由于颗粒不断变细,其破碎所需耗功愈来愈大。因此,断层滑动摩擦的耗能形式将发生转变,主要以新的组构(如P叶理、 R_1 剪裂面)的形成逐渐取代颗粒细化而继续耗能。实验中这一现象表现明显。在 25MPa 的正应力下,当方解石岩粉的粒度达到极限粒度阶段($d > 9\text{mm}$)时,岩粉层中出现一组 R_1 剪裂面,并具有一定的等间距性(图3),而在 $d < 9\text{mm}$ 的所有岩样中都未观察到类似的组构,通常以颗粒的均匀分布为特征。可以认为,这种局部应变的出现消耗了大部分摩擦功,使作用于断层泥颗粒并使之破碎的摩擦功大大减小。当然不排除沿 R_1 裂面有少数颗粒进一步变细,这与断层泥极限

粒度的概念并不矛盾。

3. 断层泥极限粒度与围压的关系

如前所述，断层泥粒度与围压、断层位移量密切相关。围压愈大，粒级愈小；位移愈长，则颗粒愈细〔2〕。通常可用下式表示粒度 (M)、围压 (P_c) 和位移量 (d) 的关系：

$$M = f(P_c, d) \quad (10)$$

当围压恒定时， $M = f(d)$ 。令 $dM/dd = 0$ (或 $\rightarrow 0$) 得到极限粒度 $M_1 = M_c = C$ (常数)。由于在达到极限粒度时，断层泥的粒径就不再随位移的增加而减小，故有

$$M_1 = f(P_c) \quad (d \geq \delta) \quad (11)$$

或

$$P_c = f^{-1}(M_1) \quad (11)'$$

其中 δ 为达到断层泥极限粒度的最小位移量。这就是说，有可能通过断层泥极限粒度反演断层泥主要形成期的围压值。

在野外断层的研究中，要通过 (11) 式来确定背景围压值，首先应了解断层泥是否达到极限粒度阶段。统计颗粒分布是一种确定断层泥极限粒度的方法。随着断层的滑移，不仅颗粒变细的速率迅速变小，而且方差值亦逐渐变小。在低压力下，断层泥的粒度基本上为正态分布，但分布的峰态值和对称度随位移有下降趋势¹⁾。在 25MPa 正应力下，以上两指标在 d—M 关系的第 III 阶段基本恒定，且呈较良好的正态分布 (图 4)。

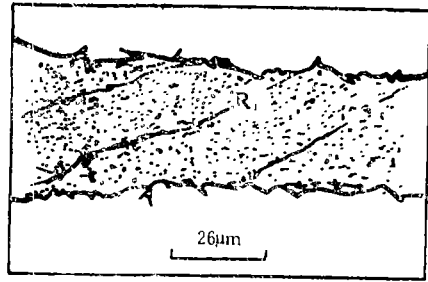


图 3 断层泥带中发育的 R₁ 剪裂面 (d = 9 mm, $\sigma_n = 25\text{MPa}$)

Fig. 3 R₁ shear fracture developed within fault zone

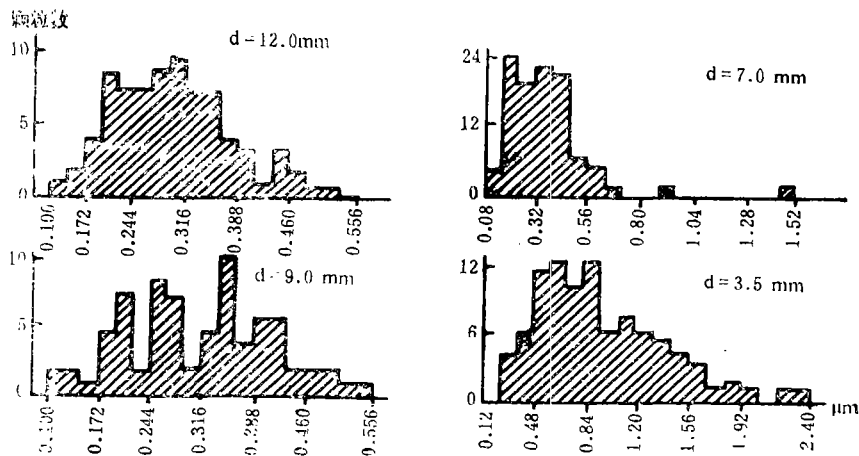


图 4 不同滑移阶段岩粉终极粒度与颗粒数直方图

$$(M_0 = 80\mu\text{m}, t_0 = 0.5\text{mm}, d = 2.5\mu\text{m/s.})$$

Fig. 4 Histograms of calcite powder grain size and number at different slip step

1) 皇甫岗, 断层带摩擦滑动性状及断层泥(带)几何特征与错距的关系, 硕士论文, 1988.

一般断层泥主要形成于地壳内一定深度处,即存在一稳定的围压值。随着地表的剥蚀作用或其它方面的原因,断层泥才不断接近地表,因此其围压也相应下降,从而不利于断层泥的进一步碾细。也就是说,地表断层泥的粒度不会比初始围压下所固有的极限粒度更小。故可以认为断层泥的极限粒度相应于断层泥主要形成期的最高围压值。而于地表所作的断层泥粒度统计并不能反演其现今所处的压力状态。

另外,在用于粘土断层泥时,必须充分考虑流体的化学蚀变的影响〔8〕。

三、结 束 语

断层泥极限粒度的存在是断层泥(带)几何特征与断层错距关系研究中发现的一个新现象。由于本项工作只是一个开端,故仅能提出几点粗浅认识:

(1) 在一定的正应力下,存在着断层极限粒度。

(2) 由于过细的断层泥的进一步磨细将耗功巨大,因此断层摩擦功主要耗于非颗粒细化方面,如R,剪裂面的形成。这可能是断层泥极限粒度存在的机理。

(3) 极限粒度与围压值有着一定的对应关系。在理论上可以应用极限粒度反演断层泥主要形成期的围压值。但要应用于野外断层研究,尚有许多问题有待解决。

参 考 文 献

- 〔1〕Dieterich, J.H., Constitutive properties of faults with simulated gouge, Geophysical monograph, No. 24, p103-120, 1981.
- 〔2〕皇甫岗, 断层泥的厚度、粒度与断层错距的关系, 四川地震, No. 1, 1988.
- 〔8〕Engelder, J.T., Cataclasis and the generation of fault gouge, Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 85, p1515-1522, 1974.
- 〔4〕Byerlee, J.D. and Summers, R., A note of the effect of faule gouge thickness on fault stability, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 13, p35-36, 1976.
- 〔5〕Bond, F.C., The third theory of comminution, Mining Engineering, Vol. 4, No. 5, p484-494, 1952.
- 〔6〕平田隆幸, 新しい地震とフヨタル, 地震, Vol. 40, p459-467, 1987.
- 〔7〕皇甫岗、马瑾, 非粘土断层泥带厚度与断层错距关系的实验研究, 中国地震, 待刊.
- 〔8〕F.T. Wu et al., Clay gouges in the San Andreas fault system and their possible implication, Pageoph., Vol. 113, p87-95, 1975.

A POSSIBLE MECHANISM OF FAULT GOUGE LIMIT GRAIN SIZE AND ITS SIGNIFICANCE

Huang Fugang

(Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming, China)

Ma Jin

(Institute of Geology, SSB, Beijing, China)

Abstract

In order to study the change characteristics of gouge size with fault displacement, a set of double direct shear apparatus was used in our experiments. According to the analysis of experimental results, an important fact was discovered, that is, the gouge grain size tended to a limit with the increasing fault displacement under a fixed normal stress. It was proved in this paper that the level of pressure during main fault gouge generation was obtained from the limit because there was a certain relation between the limit grain size and pressure.

关于罩子效应

工业排放二氧化碳引起气候变暖的问题现正在热烈讨论。主要观点有五个。一个是温室效应说，认为二氧化碳可吸收地面反射走的那部份太阳光能，因之使气候变暖。一个是太阳活动说，认为近一二十年来太阳活动增强，给大地带来较多能量，因之气候变暖不只是由二氧化碳的温室效应引起，待太阳活动转入低潮后，二氧化碳的增温效应是有限的。另一个是阳伞效应说，认为工业烟尘和气溶胶微粒可挡住部份太阳光能，因之会使大气温度降低。这样二氧化碳的增温效应也不会太高。再有一个观点是测温局限说，认为大气增温的测量大都在城市或附近进行，它们并不代表全球范围的升温。最后是我们的观点，就是二氧化碳使气温升高后，它使地下热流变小，因热流密度 F 与温度梯度成正比，即：

$$F = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (1)$$

式中 λ 为导热系数， $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 为温度梯度。由(1)式可知，二氧化碳的增温效应可使温度梯度减小，因之地下给大气的供热量减小，这会使二氧化碳的增温效应受到抑制。我们称此为罩子效应，即二氧化碳导致的增温层像一个罩子一样罩住固体地球表面，使其热流受到抑制。我们的这个观点是基于以下的事实，即大气温度 T 是由地下进入大气的热量 Q_1 和太阳供给大气的热量 Q_2 共同决定的：

$$T = S(Q_1 + Q_2) \quad (2)$$

式中 T 为大气的热容倒数。

根据以上二氧化碳增温效应的争论可知，在复杂的大自然界各种因素是互相联系的，有促进的联系，也有制约的联系，两者都存在，不可能一种因素无限制的发展。我们通俗地称此点为“红绿灯并存关系”。

(郭增建 秦保燕 李革平)