

doi:10.3799/dqkx.2016.519

细颗粒粘滑运动的能量耗散与释放试验

崔德山^{1,2}, 项伟^{1,3}, 陈琼¹, 王顺²

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 奥地利维也纳农业大学岩土工程所, 维也纳 1180

3. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 近年来, 利用断层产物以及其中的颗粒来研究断层或地震带的能量耗散与释放, 已引起大家的重视。在围压分别为 30 kPa、60 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 和 600 kPa 的条件下, 采用直径为 0.6~0.8 mm 的玻璃珠以 0.02 mm/min 的轴向应变速率进行干燥、松散细颗粒材料的固结不排水三轴压缩试验。为了减少轴向应变过大时主应力轴旋转产生的误差及其对做功的影响, 试验只分析加载后轴向应变为 10% 时试样变形破坏过程中的能量耗散与能量释放特性。试验结果表明: 随着围压的增大, 主震频率减小、偏应力降幅增大, 但偏应力降幅与最大偏应力的比值逐渐趋于稳定。粘滑运动过程中, 在偏应力骤降瞬间, 声发射强烈、试样体积收缩, 说明能量控制着试样的变形与破坏特征, 耗散结构能量越大, 系统发生滑动的频率越小, 粘滑运动过程可以表示为能量耗散与能量突然释放。最后, 从热力学的角度分析滑动过程的 3 个阶段, 得出粘滑运动为不可逆耗散能与可释放应变能共同作用的结果。

关键词: 钠钙玻璃珠; 粘滑运动; 能量耗散; 能量释放; 工程地质。

中图分类号: P642.2

文章编号: 1000-2383(2016)09-1603-08

收稿日期: 2016-02-11

Experiment of Energy Dissipation and Energy Release during Stick-Slip within Glass Beads

Cui Deshan^{1,2}, Xiang Wei^{1,3}, Chen Qiong¹, Wang Shun²

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geotechnical Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna 1180, Austria

3. Three Gorges Research Center for Geo-Hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The energy dissipation and energy release of fault gouge could be explained by analyzing the characteristics of stick-slip of glass beads. The glass beads of 0.6–0.8 mm were used to conduct the test from CVP company. The triaxial tests of dry and loose glass beads were carried out under the cell pressure of 30, 60, 100, 200, 400 and 600 kPa with axial strain rate of 0.02 mm/min. The energy dissipation and energy release in the process of failure are discussed with the axial strain rate of 10% in order to decrease the errors due to the rotation of principal stress. The results show that with increasing of cell pressure, the frequency of main shock decreases, the deviatoric stress drop increases, the ratio of deviatoric stress drop to maximum deviatoric stress becomes stable gradually. The volume of sample shrinks and acoustic emission appears in the moment of deviatoric stress drop. The energy controls the deformation and failure properties of the sample during stick-slip: the more the dissipation is, the less the frequency of sliding becomes. Stick-slip can be expressed as the process of energy dissipation and energy release. Finally, the three stages of sliding during stick-slip are discussed from the aspect of thermodynamics. The stick-slip motion is a combined effect of irreversible dissipated energy and releasable strain energy.

Key words: soda-lime glass bead; stick-slip; energy dissipation; energy release; engineering geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41002102, 41272308)。

作者简介: 崔德山 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土体工程性质的教学与研究。E-mail: cuideshan@cug.edu.cn

引用格式: 崔德山, 项伟, 陈琼, 等, 2016. 细颗粒粘滑运动的能量耗散与释放试验. 地球科学, 41(9): 1603–1610.

0 引言

近年来,利用断层产物以及其中的颗粒来研究断层或地震带的能量耗散与释放,已引起大家的重视(Tanaka *et al.*, 2006).大地震之后,研究者通过开挖断层剖面发现,许多断层在发生滑动时,断层带内的剪应力并不大;另外,由于当断层快速滑动时,断层带中的摩擦阻力大部分已转换成热能,研究者通过红外遥感资料可以获得断层附近的热异常分布(Brune *et al.*, 1969; Tanaka *et al.*, 2006; 赵海军等, 2008; 张元生等, 2010). Lachenbruch and Sass (1980)通过对著名的圣安德烈亚斯断层带内 100 个热流数据进行分析得出,在粘滑运动过程中能量耗散占总能量的 95%. Brown (1998a)通过对岩石开展轴向扭转试验,得出能量耗散占总能量约 90%. Fulton and Rathbun (2011)采用玻璃珠(直径为 0.12 mm)进行直剪试验,用 4 支 T 型热电偶监测粘滑过程中产生的热,发现约 90% 以上的总能量转化成了颗粒的内能.

以花岗岩断层为例,在断层滑动时,断层内逐渐形成破碎颗粒,如安德烈亚斯断层带中部分深度的颗粒粒径为 0.04~200.00 μm (Wilson *et al.*, 2005),并且其形状是规则碎片.因此,许多学者都采用不同粒径钠钙玻璃珠(soda lime glass beads, 其 SiO_2 含量高达 73%)来模拟断层破碎颗粒进行双剪试验、三轴试验和环剪试验等(Volfson *et al.*, 2004; Elk-holy and Khonsari, 2008; Krim *et al.*, 2011; Daniels *et al.*, 2014; Doanh *et al.*, 2014; Lieou *et al.*, 2015),并据此研究颗粒粘滑运动规律,用以解释地震发生机理(Doanh *et al.*, 2012).

断层的滑动产生断层破碎物,可以认为其变形破坏过程是一个能量耗散的不可逆过程,也可认为其在能量驱动下的一种状态失稳现象.本文采用钠钙玻璃珠开展三轴试验,根据冲量定理、能量守恒定律和热力学定律,基于试样变形破坏过程中的能量耗散与释放,从能量的角度解释粘滑运动过程,从而进一步揭示粘滑运动机理,为颗粒材料粘滑震动进一步研究提供基础数据.

1 试验设备与材料

本次试验是在奥地利维也纳农业大学岩土工程研究所开展的,所采用的试验仪器为德国 Wille-



图 1 静三轴仪

Fig.1 Static electromechanical triaxial testing system

Geotechnik 公司生产的静三轴仪,如图 1 所示.该仪器可以通过位于试样顶部的轴向压力传感器精确测量颗粒材料发生粘滑运动时的轴向应力.通过反压-体积控制器,笔者可以精确测量试样在粘滑过程中的体积变化.

本次试验所采用的颗粒材料为法国 CVP (Crestive Vision of Packaging) 公司生产的钠钙玻璃珠,主要矿物成分为 SiO_2 、 Na_2O 、 CaO 和 MgO .玻璃珠直径为 0.6~0.8 mm,比重 2.5,颗粒最小直径与最大直径比为 0.9,比较均匀,磨圆度较好,属于粒径比较单一的均匀颗粒,有利于粘滑运动的发展,关于颗粒的粒径分布参见文献(Doanh *et al.*, 2012).

为了与前人的研究成果进行对比(Adjemian and Evesque, 2004; Doanh *et al.*, 2012),本次试验玻璃珠试样直径为 50 mm,高为 100 mm.参考中华人民共和国国家标准——土工试验方法标准(GB/T 50123-1999) 9.2 中砂的最小干密度试验制样,控制试样干密度为 1.57 g/cm^3 ,孔隙比为 0.58.

制样过程中,为了使干燥、松散的玻璃珠试样在橡皮膜中保持圆柱形,需要从试样顶部的排气管抽气,并保持真空压力为 20 kPa,从而保证试样自稳.当三轴室内充满脱气水后,开始对试样施加 20 kPa 的围压,同时,缓缓打开试样顶部的排气阀,使试样内部压力恢复为大气压力,此时,试样所受的围压仍为 20 kPa.然后施加不同围压对试样进行固结,当体变和位移都稳定后,采用 0.02 mm/min 的轴向应变速率对试样进行加载,当轴向应变达到 10% 时停止加载.因为当轴向应变超过 10% 以后,主应力轴开始产生偏转,从而影响试验结果的真实性(沈扬等, 2006).

试验数据采集软件为 Wille 公司开发的 GEO-

sys 8.7.8, 数据记录时间间隔为 1 s. 为了更精确地观察应力应变曲线中粘滑滑动时间效应, 局部采样间隔设置为 0.25 s.

2 试验结果与分析

2.1 粘滑运动过程中应力特征

试样在 30 kPa、60 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa 和 600 kPa 的围压下, 轴向应力和应变关系如图 2 所示. 为了减少轴向应变过大时, 主应力轴旋转产生的误差及其对粘滑运动的影响, 本次试验只分析轴向应变为 10% 时, 试样变形破坏过程中能量耗散与能量释放特性.

在滑动阶段, 偏应力的释放为 Δq , 轴向应变的增量为 $\Delta \epsilon$. 随着应变的增加, 应力的积累与释放为一次粘滑运动(图 3). 可见, 与普通砂在较高轴向应变速率下绘出的平滑应力-应变曲线相比, 粒径比较单一的干燥、松散细钠钙玻璃珠(0.6~0.8 mm)在低轴向应变(0.02 mm/min)条件下的偏应力-轴向应变曲线表现出大量的粘滑运动, 而且随着围压的增加, 粘滑运动出现的频率减小. 以 10% 的轴向应变为统计区间, 当围压分别为 200 kPa 和 400 kPa 时, 出现粘滑运动的次数分别为 28 次和 14 次. 但出现粘滑运动的次数并不是无限的减小, 当围压为 600 kPa 时, 粘滑运动出现的次数亦为 14 次, 也就是说当围压超过 400 kPa 时, 决定出现粘滑运动次数的因素已经不只是围压了, 此时可能是颗粒的直径、摩擦系数等决定出现粘滑运动的次数.

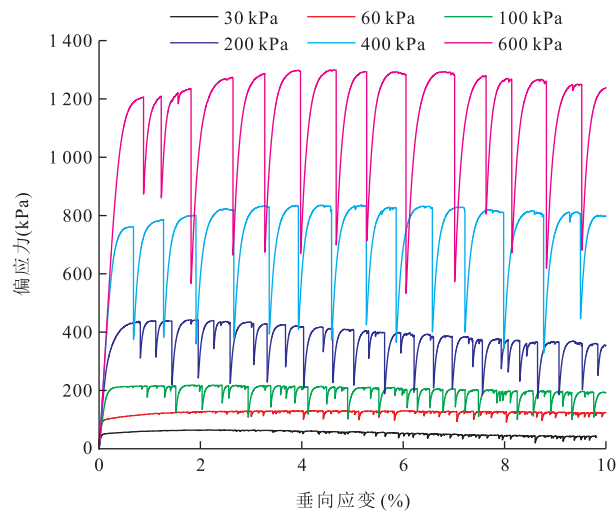


图 2 不同围压条件下偏应力与轴向应变关系
Fig.2 Deviatoric stress versus axial strain

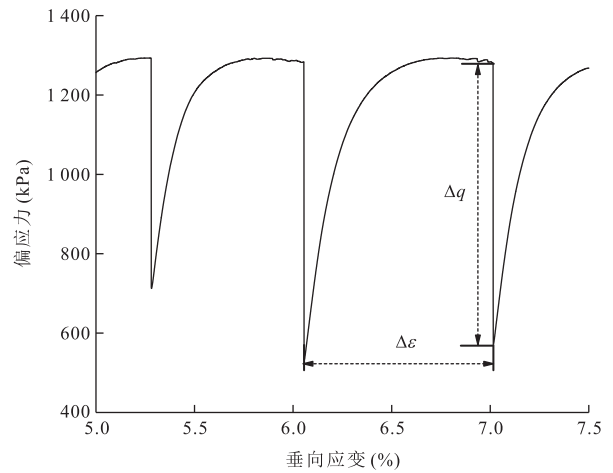


图 3 一次粘滑运动的定义
Fig.3 Stick-slip definition

借用地震的分类来说明应力-应变曲线中的滑动, 即能量释放的情况(图 4). 将每一次大的滑动定义为主震(II), 其前微小滑动定义为前震(I), 其后微小滑动定义为余震(III), 则主震应力的降幅为 Δq , 2 个主震之间的应变差为 $\Delta \epsilon$ (主震出现间隔). 那么从图 3 中可以看出, 较低的围压条件下(30 kPa、60 kPa), 偏应力达到峰值强度之前, 前震和主震震动幅度较小, 难以区分. 而在偏应力达到峰值强度后, 前震和主震的震动差别才变得越来越明显. 当围压在 100 kPa、200 kPa、400 kPa 和 600 kPa 时, 偏应力达到峰值强度之前, 前震和主震已经容易区分. 为了说明围压对耗散能量的影响, 绘制最大偏应力降幅与围压的关系, 如图 5a 所示. 从图 5 中可见随着围压的增大, 最大偏应力降幅也逐渐增大, 并呈线性上升. 但是最大偏应力的降幅与最大偏应力

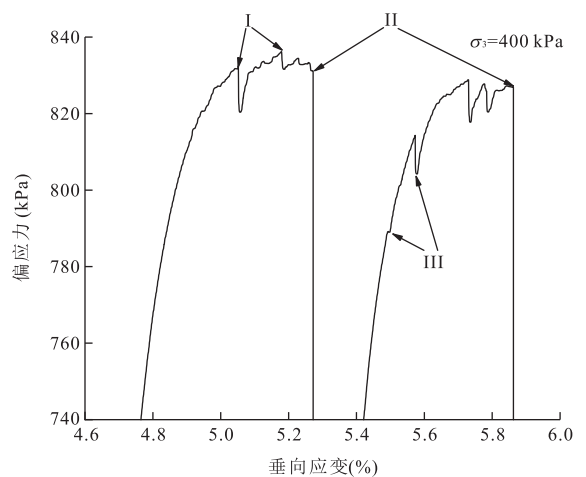


图 4 应力-应变曲线中前震、主震和余震
Fig.4 Foreshock, main shock and aftershocks

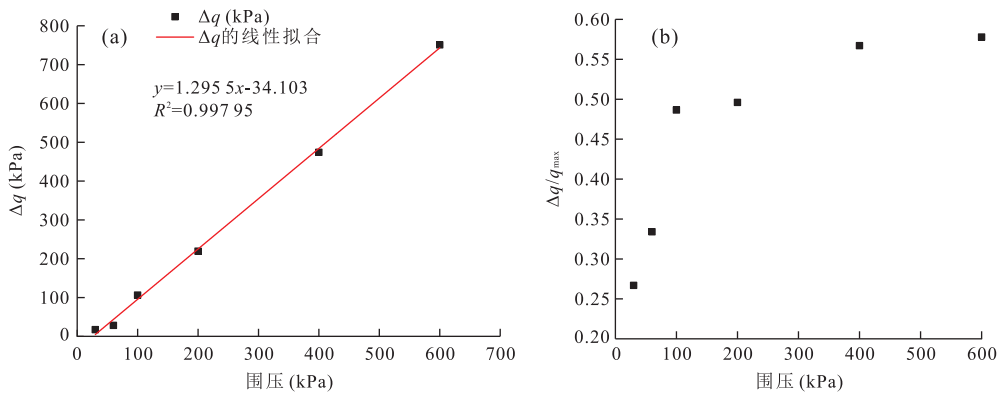


图 5 最大偏应力降幅($\epsilon=10\%$)(a)、 $\Delta q/q_{\max}$ (b)与围压关系

Fig.5 Relationships between $\Delta q/q_{\max}$ and cell pressure (a), Δq_{\max} and cell pressure (b)

表 1 不同围压条件下试样的峰值强度和摩擦角

Table 1 Peak strengths and friction angles of glass beads within different cell pressures

编号	高度(mm)	直径(mm)	围压(kPa)	峰值强度(kPa)	内摩擦角($^{\circ}$)
UU_D1	100	50	30	64.62	31.23
UU_D2	100	50	60	130.67	31.42
UU_D3	100	50	100	218.45	31.47
UU_D4	100	50	200	442.43	31.68
UU_D5	100	50	400	836.18	30.73
UU_D6	100	50	600	1299.31	31.32

的比值与围压却不是线性关系,如图 5b 所示.因此,试样临界能量耗散值为材料常数,与应力状态无关(谢和平等,2005).

表 1 给出了不同围压条件下试样偏应力峰值及其所对应的内摩擦角.可以看出,当围压小于 200 kPa 时,内摩擦角随着围压的增加而增大,而且粘滑运动规律性逐渐增强;当围压为 400 kPa 和 600 kPa 时,内摩擦角反而减小,但是此时粘滑运动更明显且具有一定的周期性,而且偏应力降逐渐增加.

由于颗粒的剪切强度主要受摩擦强度的影响(龚晓南,2000),其物理过程包括 2 个组成部分:(1)颗粒之间脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦(能量耗散);(2)颗粒之间滑动时产生的滑动摩擦(能量释放).粘滑运动可以看成是这 2 种摩擦作用的宏观体现,在偏应力增加过程中,即颗粒系统能量耗散过程中,咬合摩擦逐渐增大,试样的体积增大.当咬合的颗粒从原来的位置被抬起跨越相邻颗粒后,偏应力突然释放,这是颗粒系统能量释放的过程.

2.2 粘滑运动过程的热力学分析

当从热力学角度出发考察玻璃珠试样产生粘滑运动过程时,首先确定研究对象为干燥、松散的玻璃珠试样,其与外力组成耗散系统(Kondepudi and

Prigogine,1998).试样在粘滑运动过程中始终不断与外界交换着能量,即输出着次声波、热辐射等(郭泉等,2014;李献瑞等,2014).因此,根据非平衡态热力学理论(戴振东等,1998),能量耗散是研究不可逆过程的热力学理论.在三轴加载条件下,试样粘滑运动的发展,实际上是外荷载机械能不断转化为试样的机械能和内能,从而使其偏离初始平衡状态.

根据能量守恒定律,试样的内能将随外力的增大而升高,这种定态相对于试样初始平衡态是不稳定的.在外力较小时,试样定态偏离平衡态较小,属线性非平衡区,可称为亚稳定态.在亚稳定态下,微缺陷、微裂纹的形成可能出现在试样中的任意位置,这种微缺陷的数量较少、尺寸较小(谢和平等,2004;赵忠虎和谢和平,2008).在亚稳定状态下,轴向力和围压所做的功主要以弹性势能的形式储存在试样内部,同时这部分外力做功或弹性势能释放会引起温度变化、声发射等能量耗散.因此,即使在外力较小时,粘滑运动在宏观上表现为能量耗散的特点,特别是在滑动阶段,表现出较强的能量释放;在外力较大时,试样定态远离平衡态,属非线性非平衡区,对应试样的失稳破坏.在临界态,微缺陷的形成会表现出某些规律,主要集中在剪切破裂面附近,具有一定的自组织性,通过不断地与外界交换能量,在试样

内部继而诱发宏观破裂面的产生,使试样从失稳态向破坏后的新稳定态发展.这时,粘滑运动在宏观上表现为能量释放的特点,内部储存的弹性势能释放出来,引起试样中颗粒产生碰撞.

综上所述,颗粒材料粘滑运动的实质是,当试样受到轴向压力和围压时,其内部的微缺陷不断发展、演化,从无序分布逐渐向宏观有序结构发展,逐渐形成宏观破裂面导致整体失稳.按照耗散结构理论,试样在粘滑运动过程中的热辐射、声辐射、塑性应变、微缺陷的形成与发展等不可逆过程属于能量耗散以及非线性动力学机制.

2.3 粘滑运动过程中外力做功研究

以施加 600 kPa 围压为例,三轴试验测得的偏应力与轴向应变曲线,体变与轴向应变曲线如图 6 所示.可见,试样在初始加载阶段,体积会有少量收缩,使体变小于零(图 6 中虚线表示初始体积).随着外力对试样做功的增加,为了克服咬合摩擦,通过能量耗散,试样的体积开始膨胀,直至试样发生第 1 次滑动.但是要注意,滑动并未使试样继续膨胀,而是突然收缩.

轴向应力为轴向载荷传感器测量的压力 F 除以试样的横截面积 A ;轴向应变为轴向位移 S 除以试样的高度 H .试验过程中,某一时刻试样的体积等于初始体积 V_0 .加上体积增量 d_v ,则体变为体积增量 d_v 与试样初始体积 V_0 之比.外力对试样所做总功 $W_{\text{总}}$ 分为 2 部分:第 1 阶段为试样固结阶段,此时围压和轴向应力相等,均对试样做正功,记为 W_1 ;第 2 阶段为试样加载阶段,此时轴向偏应力对试样做正功,试样初始收缩时,围压对试样做正功,试样开始膨胀后,围压对试样做负功,记为 W_2 .则试样加载阶段总功可以表示为: $W_{\text{总}} = W_1 + W_2$.

由此可以计算在不同围压状态下,外力对试样所做的总功,计算结果见表 2.在三轴仪内,对试样固结时,采用等压固结,故试样径向位移大于轴向位移,计算得出的围压做功大于轴向力做功.而在试样

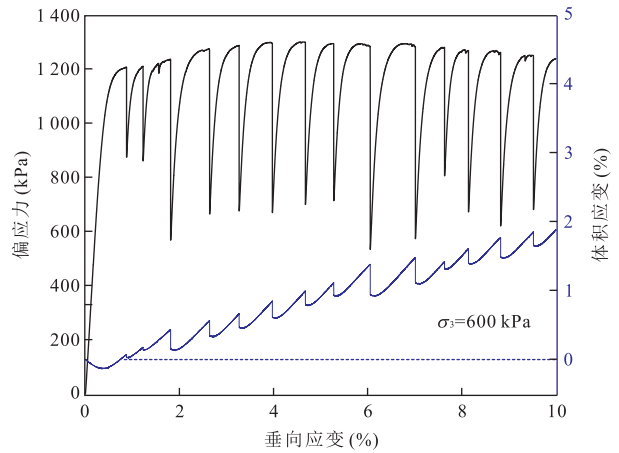


图 6 偏应力、体变与轴向应变的关系

Fig.6 Deviatoric stress and volumetric strain versus axial strain

加载阶段,由于采用的是轴向应变加载,加载速率为 0.02 mm/min,试样的轴向位移大于径向位移,计算得出的轴向力做功大于围压做功.需要说明的是,在计算轴向力对试样做功时,由于考虑的是灰色阴影部分的面积(图 7),所以计算出来的轴向力做功包括滑动过程中释放的能量.

2.4 粘滑运动过程中能量释放研究

粘滑运动的典型特征是,在粘滞阶段偏应力随着轴向应变逐渐增大,系统耗散能量.而一旦进入滑动阶段,系统释放能量,偏应力会在短时间内迅速降低,同时试样会发出一声“巨响”.推测颗粒和颗粒之间可能产生碰撞,而这种碰撞一般会使机械能不守恒,总有一部分机械能转化为其他形式的能量,比如热能.

Fulton and Rathbun(2011)认为,在断层滑动过程中,外力所做的功 W_s 可以定义为剪切应力沿着滑动面所做的功和滑动导致体积收缩或膨胀所做的功,定义如下:

$$W_s = A \int_0^D \tau d\delta + A \int_0^L \sigma_n d\tau_w = A\bar{\tau}D + A\bar{\sigma}_n L, \quad (1)$$

表 2 不同围压条件下外力对试样所做的功

Table 2 The work of external force on the samples

试样编号	围压(kPa)	固结阶段做功(N·m)	加载阶段做功(N·m)	外力总功(N·m)
UU_D1	30	0.002	1.469	1.471
UU_D2	60	0.034	2.170	2.203
UU_D3	100	0.207	5.571	5.778
UU_D4	200	0.457	11.147	11.604
UU_D5	400	7.311	23.214	30.525
UU_D6	600	11.638	37.879	49.517

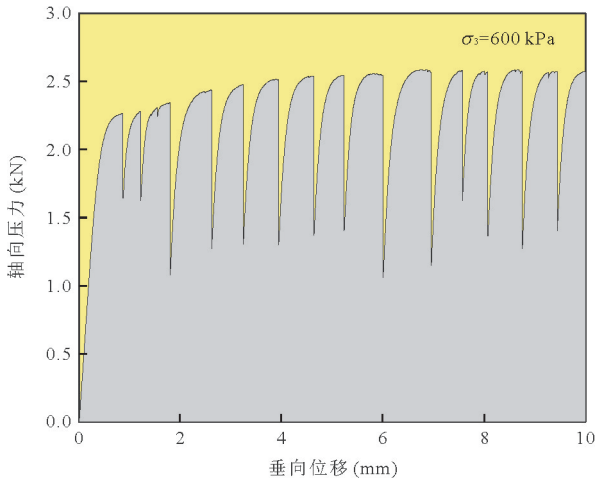


图 7 轴向力做功积分区间

Fig.7 Integrating range for the work of axial force

式中： A 是断层截面面积； $\bar{\tau}$ 和 $\bar{\sigma}_n$ 分别是滑动面上剪应力和正应力的平均值； D 为总的滑动位移； L 为在滑动过程中由于体积压缩或膨胀导致的位移。从定性的角度来讲，粘滑阶段的总功等于耗散能量与释放能量之和。

以围压为 600 kPa 为例，发现一个非常有趣的现象：以一次应力的积累与释放（一次粘滑运动）为研究对象，在最大的滑动点上，释放的应力比本次积累的应力大，如图 8a 所示。为了计算最大滑动能量和本次积累能量的关系，笔者取偏应力降幅最大的一段来进行计算。计算时，假设 0 点为上一次滑动能量释放的终点，通过公式(2)计算出最大滑动能量占本次粘滑运动积累能量的比值 k ，

$$k = \frac{\bar{A}_2 \Delta q_2 D_2}{\bar{A}_1 \Delta q_1 D_1} \quad (2)$$

式中： \bar{A}_1 和 \bar{A}_2 分别为本次能量积累阶段和滑动阶段

剪切面平均面积，由于滑动发生的时间非常短，轴向位移也很小，平均面积相差不大，故 $\frac{\bar{A}_2}{\bar{A}_1} \approx 1$ 。 D_1 和

Δq_1 为达到最大滑动之前积累的位移和应力增幅； D_2 和 Δq_2 为发生最大滑动时的位移和应力降幅，据上式可以得出 $k = 0.113\%$ ，与 Brown(1998)得出的结果相似，但是其应力释放量却是应力积累量的 1.32 倍。

2.5 滑动过程中颗粒内能增量研究

以围压为 600 kPa 为例，可以计算出在达到最大滑动之前系统总的能量 $W_{\text{总}}$ 为 40.187 J。然后试样开始出现滑动，如图 8b 所示，滑动过程持续 2 s，轴向位移为 0.000 66 mm。

滑动过程中颗粒内能增加分为 3 个阶段(图 9)：第 1 阶段为克服摩擦力阶段，从能量的角度解释就是颗粒可释放应变能达到破坏所需的表面能。从上一次主震发生之后，剪切面上的剪应力和摩擦力不断增加，这个阶段外力所做的功，除了一部分转化为颗粒的弹性能之外，另一部分以摩擦的方式向颗粒提供内能；第 2 阶段为主震发生阶段，最大压力为 2 551.189 N，此时试样剪切面上、下部分分别沿着滑动面产生微小的滑动，根据 Doanh *et al.* (2014) 研究成果，颗粒从发生滑动到产生碰撞的时间只有 0.003 5 s，这时剪切面两侧的颗粒在如此短的碰撞过程中，由于相互碰击的内力很大，所以可忽略系统受到的重力或摩擦力等外力，认为系统的总动量守恒。根据冲量定量， $F \cdot \Delta t = m \cdot v$ ，可得剪切面上、下相对滑动速度为 14.605 m/s，则接触面上由此产生的动能的增量为 23.11 J；第 3 阶段为剪切面两侧的颗粒产生碰撞并一起收缩运动，相当于非弹性碰撞，从碰撞到停止的时间大约 2 s。由于玻璃的恢复冲量为

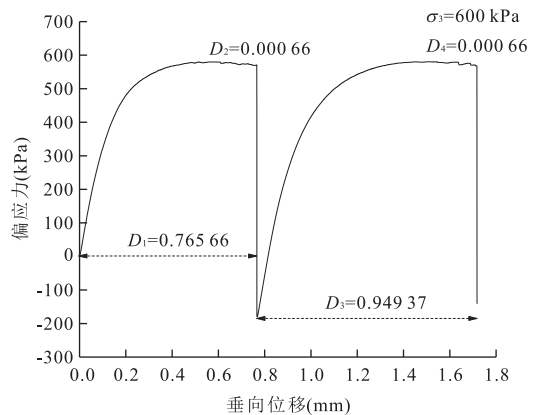
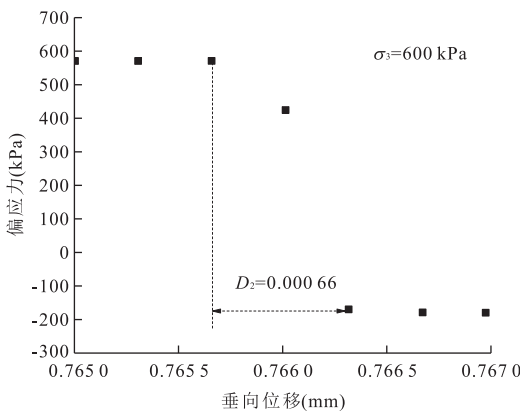


图 8 典型的粘滑运动过程中能量耗散与释放

Fig.8 Energy dissipation and release of typical stick-slip motions

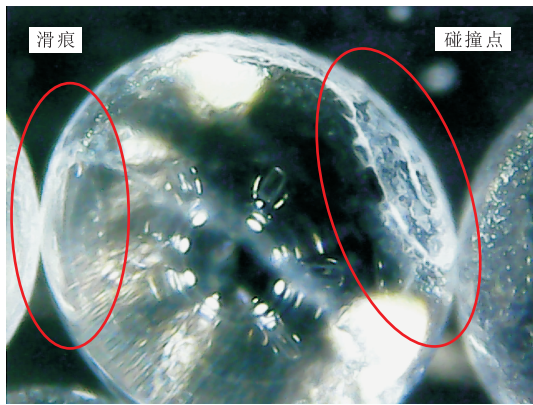


图 9 颗粒表面不同形式擦痕

Fig.9 Different Scratches of the granular surface

0.94 N · s, 所以从第 3 阶段开始, 剪切面两侧的颗粒开始相对运动, 颗粒重新排列, 宏观表现为体变突然减小。

忽略非弹性碰撞过程中损失的能量和颗粒的破碎能 (Rockwell *et al.*, 2009), 如果第 2 阶段产生的动能最后全部转化为颗粒的内能, 根据能热转换公式 $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$, 这些内能会使接触面两侧的单层颗粒 (0.7 mm) 温度升高 4.33 K。但是由于碰撞瞬间发生, 玻璃珠的热导率为 1.129 W/K · m, 23.11 J 的热量在 0.003 5 s 内有可能使接触点处的瞬间温度上升数百开尔文。碰撞后, 由于接触点位置保持相对不变, 外界不断输送能量, 则接触点应力又开始增加, 直至下一次能量释放。综上所述, 粘滑运动是指不可逆耗散能与可释放应变能共同作用的结果。

3 结论

(1) 当轴向应变速率为 0.02 mm/min 时, 干燥、松散的均匀细颗粒材料表现出粘滑运动特征。随着围压的增大, 偏应力滑动的频率减小, 偏应力降幅增大。最大偏应力降幅与偏应力最大值的比值不仅受围压的影响, 还与颗粒的大小、摩擦系数有关。

(2) 试样从固结到加载阶段, 外力对试样所做的总功包括: 固结阶段围压和轴压所做的功和加载阶段围压和轴压所做的功。

(3) 上一次主震发生之后, 随着系统应变的增加, 能量耗散也随着增加, 当能量积累到可以克服剪切面两侧的滑动摩擦时, 系统将发生下一次主震, 并且其释放的应力可能超过自上一次主震发生之后增加的应力。

(4) 滑动过程中颗粒系统内能的增加分为 3 个

阶段: 第 1 阶段, 克服摩擦力, 系统能量释放; 第 2 阶段, 剪切面两侧颗粒发生碰撞, 系统能量内部转移; 第 3 阶段, 剪切面两侧颗粒由于碰撞内能增加, 体积收缩。

References

- Adjemian, F., Evesque, P., 2004. Experimental Study of Stick-Slip Behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(6): 501–530. doi: 10.1002/nag.350
- Brown, S.R., 1998. Frictional Heating on Faults: Stable Sliding versus Stick Slip. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 103 (B4): 7413–7420. doi: 10.1029/98jb00200
- Brune, J. N., Henyey, T. L., Roy, R. F., 1969. Heat Flow, Stress, and Rate of Slip along the San Andreas Fault, California. *Journal of Geophysical Research*, 74 (15): 3821–3827. doi: 10.1029/jb074i015p03821
- Dai, Z.D., Xue, Q.J., Wang, M., 1998. Non-Equilibrium Thermodynamical Study of Friction and Wear Processes. *Nature Magazine*, 20(4): 220–228 (in Chinese).
- Daniels, K. E., Bauer, C., Shinbrot, T., 2014. Correlations between Electrical and Mechanical Signals during Granular Stick-Slip Events. *Granular Matter*, 16 (2): 217–222. doi: 10.1007/s10035-013-0471-3
- Doanh, T., Hoang, M. T., Roux, J. N., et al., 2012. Stick-Slip Behaviour of Model Granular Materials in Drained Triaxial Compression. *Granular Matter*, 15(1): 1–23. doi: 10.1007/s10035-012-0384-6
- Doanh, T., Le Bot, A., Abdelmoula, N., et al., 2014. Liquefaction of Immersed Granular Media under Isotropic Compression. *EPL (Europhysics Letters)*, 108 (2): 24004. doi: 10.1209/0295-5075/108/24004
- Elkholly, K. N., Khonsari, M. M., 2008. Experimental Investigation on the Stick-Slip Phenomenon in Granular Collision Lubrication. *Journal of Tribology*, 130 (2): 021302. doi: 10.1115/1.2842244
- Fulton, P.M., Rathbun, A.P., 2011. Experimental Constraints on Energy Partitioning during Stick-Slip and Stable Sliding within Analog Fault Gouge. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1–2): 185–192. doi: 10.1016/j.epsl.2011.05.051
- Gong, X.N., 2000. Prospects for the Development of Geotechnical Engineering in the 21st Century. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 22(2): 238–242 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q., Yang Y.C., Lü, J., et al., 2014. Observation of Local Infrasonic Coupled by Seismic Wave on Wide Spread

- Infrasound Network. *Earth Science*, 39 (12): 1807 — 1817 (in Chinese with English abstract).
- Kondepudi, D., Prigogine, I., 1998. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons, Chichester.
- Krim, J., Yu, P. D., Behringer, R. P., 2011. Stick-Slip and the Transition to Steady Sliding in a 2D Granular Medium and a Fixed Particle Lattice. *Pure and Applied Geophysics*, 168 (12): 2259 — 2275. doi: 10.1007/s00024-011-0364-5
- Lachenbruch, A. H., Sass, J. H., 1980. Heat Flow and Energetics of the San Andreas Fault Zone. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 85 (B11): 6185 — 6222. doi: 10.1029/jb085ib11p06185
- Lieou, C. K. C., Elbanna, A. E., Langer, J. S., et al., 2015. Stick-Slip Instabilities in Sheared Granular Flow: The Role of Friction and Acoustic Vibrations. *Physical Review E*, 92(2): 022209. doi: 10.1103/physreve.92.022209
- Li, X. R., Zeng, Z. X., Zhou, Q., et al., 2014. Seismogenesis of Badong Earthquake ($M_s 5.1$) in Three Gorges Reservoir Area and Infrasound Anomaly. *Earth Science*, 39(12): 1793 — 1806 (in Chinese with English abstract).
- Rockwell, T., Sisk, M., Girty, G., et al., 2009. Chemical and Physical Characteristics of Pulverized Tejon Lookout Granite Adjacent to the San Andreas and Garlock Faults: Implications for Earthquake Physics. *Pure & Applied Geophysics*, 166 (10): 1725 — 1746. doi: 10.1007/978-3-0346-0138-2_9
- Shen, Y., Zhou, J., Gong, X. N., 2006. Experimental Progress Research on Influence of Principal Stress Rotation on Soils Characteristics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25 (7): 1408 — 1416 (in Chinese with English abstract).
- Tanaka, H., Chen, W. M., Wang, C. Y., et al., 2006. Frictional Heat from Faulting of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 33(16): 373 — 386. doi: 10.1029/2006gl026673
- Volfson, D., Tsimring, L. S., Aranson, I. S., 2004. Stick-Slip Dynamics of a Granular Layer under Shear. *Physical Review E*, 69 (3): 287 — 316. doi: 10.1103/physreve.69.031302
- Wilson, B., Dewers, T., Reches, Z., et al., 2005. Particle Size and Energetics of Gouge from Earthquake Rupture Zones. *Nature*, 434 (7034): 749 — 752. doi: 10.1038/nature03433
- Xie, H. P., Ju, Y., Li, L. Y., 2005. Criteria for Strength and Structural Failure of Rocks Based on Energy Dissipation and Energy Release Principles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24 (17): 3003 — 3010 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., Peng, R. D., Ju, Y., 2004. Energy Dissipation of Rock Deformation and Fracture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(21): 3565 — 3570 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Guo, X., Zhong, M. J., et al., 2010. Wenchuan Earthquake: Brightness Temperature Changes from Satellite Infrared Information. *Chinese Science Bulletin*, 55 (10): 904 — 910 (in Chinese).
- Zhao, H. J., Ma, F. S., Li, G. Q., et al., 2008. Fault Effect Due to Underground Excavation in Hangingwalls and Footwalls of Faults. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30 (9): 1372 — 1375 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Xie, H. P., 2008. Energy Transfer and Energy Dissipation in Rock Deformation and Fracture. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 40(2): 26 — 31 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴振东, 薛群基, 王珉, 1998. 摩擦磨损过程的非平衡态热力学研究. *自然杂志*, 20(4): 220 — 228.
- 龚晓南, 2000. 21 世纪岩土工程发展展望. *岩土工程学报*, 22 (2): 238 — 242.
- 郭泉, 杨亦春, 吕君, 等, 2014. 基于广域次声传感器网络的地震本地次声波监测. *地球科学*, 39(12): 1807 — 1817.
- 李献瑞, 曾佐勋, 周强, 等, 2014. 三峡库区巴东地震 ($M_s 5.1$) 成因机制及次声波信号. *地球科学*, 39(12): 1793 — 1806.
- 沈扬, 周建, 龚晓南, 2006. 主应力轴旋转对土体性状影响的试验进展研究. *岩石力学与工程学报*, 25 (7): 1408 — 1416.
- 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 2005. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则. *岩石力学与工程学报*, 24(17): 3003 — 3010.
- 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 2004. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析. *岩石力学与工程学报*, 23(21): 3565 — 3570.
- 张元生, 郭晓, 钟美娇, 等, 2010. 汶川地震卫星热红外亮温变化. *科学通报*, 55(10): 904 — 910.
- 赵海军, 马凤山, 李国庆, 等, 2008. 断层上下盘开挖引起岩移的断层效应. *岩土工程学报*, 30(9): 1372 — 1375.
- 赵忠虎, 谢和平, 2008. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 40(2): 26 — 31.