

孙金山,李正川,刘贵应,等. 间歇性动态剪切作用下泥质夹层剪切流变特性[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1724-1731. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1181

Sun Jinshan, Li Zhengchuan, Liu Guiying, et al. Rheological characteristic of argillaceous weak intercalation under intermittent dynamic shear loads[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1724-1731. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1181

## 间歇性动态剪切作用下泥质夹层剪切流变特性

孙金山<sup>1,3</sup>, 李正川<sup>2</sup>, 刘贵应<sup>2</sup>, 易兵<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023; 3. 重庆城市综合交通枢纽开发投资有限公司, 重庆 400023)

**摘 要:** 动力反复扰动作用是驱动岩体渐进失稳的重要影响因素, 为研究爆破振动对岩体软弱结构面的影响, 进行了动态剪切力间歇性循环作用下泥质软弱夹层的扰动流变试验, 对比分析了试样的单纯剪切流变、单纯循环动态剪切和间歇性动态剪切作用下流变变形特征。研究表明, 软弱夹层试样在流变过程中, 受动态剪切力间歇性循环扰动时, 若初始剪应力水平和动态循环剪切应力峰值均较低, 动力扰动对试样流变过程可能无明显的影响。而若初始剪应力水平较接近其剪切强度时, 微弱且长期作用的动力扰动也可以加速其流变变形过程。循环动态剪切间歇性扰动作用下试样最终发生流变破坏时, 存在一应力状态门槛值, 该值由静态剪应力和动态剪应力峰值之和确定。对于受泥质夹层等流变性软弱结构面控制且受爆破振动长期影响的岩质边坡, 应进行瞬态动力稳定性和长期动力稳定性的综合评价。

**关键词:** 爆破; 动态剪切; 泥质夹层; 流变

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2017)07-1724-08

## Rheological characteristic of argillaceous weak intercalation under intermittent dynamic shear loads

SUN Jin-shan<sup>1,3</sup>, LI Zheng-chuan<sup>2</sup>, LIU Gui-ying<sup>2</sup>, Yi Bing<sup>3</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Chongqing Survey, Design and Research Institute Co. Ltd. of CREEC, Chongqing 400023, China; 3. Chongqing City Comprehensive Transportation Hub (Group) Co., Ltd., Chongqing 400023, China)

**Abstract:** The cyclic dynamic load is one of the key factors making rock mass be damaged gradually. In order to investigate the influence of blasting vibration on the weak intercalation of rock mass, laboratory experiments were conducted to study the rheological characteristic of argillaceous intercalation under cyclic dynamic load. The static rheological characteristic, cyclic dynamic shearing characteristic and rheological characteristic with dynamic disturbance of specimens were comparatively analyzed. The analysis results show that when the specimens were disturbed by intermittent dynamic shearing stress in its rheological process, the dynamic disturbance might have no remarkable influence on the rheological deformation process of the specimens if the initial shearing stress and dynamic shearing stress were comparatively low. However, low-intensity dynamic disturbance might accelerate the rheological deformation process of the specimens remarkably if the initial shearing stress was close to its shearing strength. There was a stress threshold when the specimen was failure under the static shearing stress and intermittent dynamic shearing stress, which is determined by the sum of static shear stress and dynamic shear stress. For rock slopes controlled by rheological weak structural

收稿日期: 2016-08-18 修回日期: 2016-11-11 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379194, 41102196); 重庆市科技计划资助项目(cstc2014yykFB30003)

作者简介: 孙金山(1980—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士。E-mail: sun99001@126.com

planes and influenced by long-term blasting vibration, the transient dynamic stability and long-term dynamic stability should be analyzed.

**Key words:** blasting; dynamic shearing; argillaceous intercalation; rheology

岩质边坡中往往存在一定数量的软弱结构面,在岩体自重和降雨、地震等外在因素的作用下边坡常沿此类软弱结构面发生滑动,进而导致滑坡灾害。软弱结构面一般都具有显著的流变性,致使受其控制的边坡也呈现出典型的流变变形和渐进失稳特征。边坡在承受静荷载的同时还常常受到动荷载的影响,例如爆破作业产生的人工地震波使软弱结构面承受附加动应力的作用,进而使其力学性能劣化,且爆破地震效应对边坡的影响有时还具有长期性,如矿山开采爆破往往持续几十年甚至上百年,大型建筑基坑或水电站大坝基坑的爆破开挖也可持续数月甚至数年。

总体而言,爆破开挖引起的动荷载对软弱结构面的影响主要体现在瞬时损伤的累积和长期变形特征的改变两个方面。对于动力扰动所造成的瞬时损伤累积问题,许多学者分别在损伤机制和损伤特征等方面进行了研究,如马建军<sup>[1]</sup>和 N. Erarslan<sup>[2]</sup>等许多学者采用声波速度测试方法研究了多次爆破扰动下岩体损伤的演化规律。张国华等<sup>[3]</sup>和郭志杏<sup>[4]</sup>等则通过理论分析方法研究了多次爆破作业对巷道围岩的累积损伤过程。在结构面的动力损伤研究方面,王思敬和张菊明<sup>[5]</sup>采用试验的方法研究了地震动荷载对岩体结构面强度的影响,提出了岩质边坡的地震永久位移算法。倪卫达等<sup>[6]</sup>通过循环剪切试验研究了结构面的劣化特征,并在岩质边坡的动力稳定分析中考虑了结构面震动劣化效应。

另一方面,由于岩体软弱结构面的流变对岩土工程的稳定性影响较大,许多学者<sup>[7-10]</sup>对软弱结构面的流变特征进行了系统研究,但目前对动力扰动下岩体流变问题的研究很少,如高延法<sup>[11]</sup>和王波<sup>[12]</sup>等已对岩石和岩体的扰动流变特征进行了试验和理论研究。随着岩土体动力失稳问题日益突出,该方面的研究也逐渐得到重视。

综上所述,大型露天矿山、水利工程、大型建筑基坑等所形成的岩质边坡往往受到爆破地震效应的长期扰动。但目前动力扰动对边坡软弱结构面流变过程影响方面的研究却很少,以致当前评价岩质边坡长期稳定性时仍主要采用静态评价方式,而评价边坡动力稳定性时又仅采用瞬时稳定性分析方法。为此,本文针对爆破开挖长期扰动条件下受软弱结构面控制的岩质边坡,开展了初步的室内试验研究,对泥质软弱夹层在间歇性循环动荷载作用下的剪切流变特性

进行了分析。

## 1 爆破振动对软弱结构面应力状态的影响

软弱结构面一般是指断层破碎带、软弱夹层等结合程度很差且抗剪强度极低的地质结构面。软弱结构面类型多且性质复杂,其中,充填性软弱结构面分布广、强度低、流变性显著且对爆破振动较为敏感,为此选取薄层状泥质夹层型软弱结构面进行研究。

在岩质边坡中,边坡软弱结构面始终承受上覆岩层的重力作用,并由此可导致结构面上承受法向应力与切向应力。在如图1所示的边坡中进行生产爆破时,爆破地震波将使结构面上覆岩体承受两个水平方向和一个竖直方向的地震惯性力,地震惯性力作用于软弱结构面后可形成法向和切向的附加动应力(图2)。

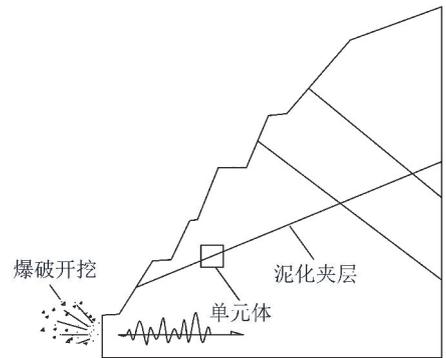


图1 爆破影响下含泥化夹层的边坡

Fig. 1 Slope with argillaceous intercalation under blasting influence

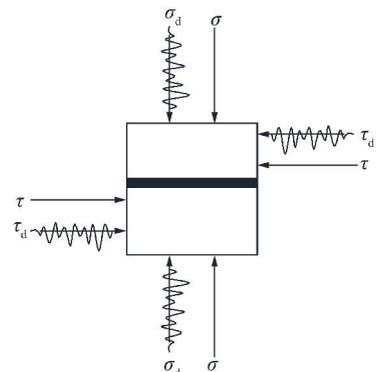


图2 爆破影响下含泥化夹层的边坡单元体

Fig. 2 Element with argillaceous intercalation under blasting influence

$\sigma$ —初始正应力; $\sigma_d$ —附加动正应力; $\tau$ —初始剪应力;  
 $\tau_d$ —附加动剪应力

地震惯性力和附加动应力主要受爆破振动所引起的岩体振动速度和加速度影响。目前我国《爆破安全规程(GB 6722—2014)》规定,永久岩质边坡的安全允许质点振动速度值为 5 ~ 15 cm/s(振动频率 10 ~ 100 Hz),根据振动速度  $v$  与加速度  $a$  的理论换算关系:

$$a = 2\pi f v \quad (1)$$

相应的安全允许质点加速度值应在 3 ~ 15 m/s<sup>2</sup>。一般而言,实际工程中为了保证边坡的稳定性,对爆破药量进行控制后,边坡上实测的加速度值一般在 0 ~ 3 m/s<sup>2</sup>(距离爆源较远区域),即附加的地震惯性力为上覆岩体质量的 0 ~ 0.3 倍,因此法向和切向的附加动应力的峰值也为静态法向和切向应力的 0 ~ 0.3 倍。由于爆破振动影响区距离爆源较远其法向和切向的加速度并无固定的相位对应关系,而总体呈随机性,因此工程实践中往往仅考虑水平方向的加速度对边坡的影响。

## 2 试验方案

为了研究爆破振动对软弱结构面的影响,制作了圆饼状饱和泥化夹层试样,通过附加了动力荷载的直剪流变仪,对试样进行静态流变、循环剪切和循环动荷载扰动条件下的流变试验。

### 2.1 试验仪器

试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZLB-1 型三联流变直剪试验仪。该仪器在土样上施加一定法向压力,同时在剪切面上施加一定的剪切力,对土样的剪切变形量进行测试。该仪器的试样尺寸为  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,最大剪切力 1.8 kN,最大法向力 1.8 kN。仪器砝码底部装有信号发生器控制的电磁铁以施加简谐振动荷载,在试样上施加附加动态剪应力。



图3 ZLB-1型流变直剪试验仪

Fig. 3 ZLB-1 creep shear apparatus

### 2.2 试样制备

试样取自武汉一石英砂岩地层中 5 ~ 20 cm 厚的

黏土状泥质夹层。夹层的各项物理力学指标见表 1。

表 1 试样基本参数

Table 1 Parameters of specimen

天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比	含水 率/%	饱和 度/%	黏聚 力/kPa	摩擦 角/( $^{\circ}$ )
1.85	0.82	24.8	81.9	5.0	14

### 2.3 试验内容

制作直径为 61.8 mm,厚 20 mm 标准剪切试验试样,分别进行试样的静态剪切流变、循环剪切和附加间歇性动荷载条件下的剪切流变试验。试验前先在流变直剪仪的剪切盒中施加压力进行固结,固结时间为 24 h。

(1)静态剪切流变实验:制作 3 个土样,试样上下透水石浸水,透水石与试样间夹橡胶膜。试样在法向压力 150 kPa 剪应力 22.5 kPa 的应力状态下固结 24 h 后,剪应力增大至 25,32,38 kPa,此时剪应力分别为其极限剪应力的 60%,75% 和 90%。试样施加荷载后保持不变,观测其流变变形特征。

(2)循环剪切试验:制作 3 组,每组 3 个,共 9 个土样。在法向压力 150 kPa,剪应力 22.5 kPa 的应力状态下固结 24 h 后,3 组试样的剪应力分别加至其极限剪应力的 60%,75% 和 90%,每组的 3 个试样再分别施加频率 30 Hz 峰值为 2.1,4.2,8.5 kPa 的动态剪切应力,波形呈正弦波,动荷载引起的峰值剪切应力约为其极限剪应力 5%,10% 和 20%。动荷载每施加 30 s 后暂停 30 s 测量最大变形量。

(3)间歇性动态剪应力作用下剪切流变试验:制作 3 组,每组 3 个,共 9 个土样。在法向压力 150 kPa,剪应力 22.5 kPa 的应力状态下固结 24 h 后,3 组试样的剪应力分别加至其极限剪应力的 60%,75% 和 90%,每组中的 3 个试样每间隔固定时间施加频率 30 Hz 峰值为 2.1,4.2,8.5 kPa 的简谐剪切应力,波形呈正弦波。工程实际中爆破动力扰动一般每日 1 次,为缩短试验时间动力扰动每日 5 次,时间为每天的 9:00,12:00,15:00,18:00 和 21:00,每次扰动时间为 1 s。

## 3 静态剪切流变变形特征

根据试验方案,试样在法向压力和剪应力作用下固结 24 h 后,剪应力增大后进行变形量测,此时应变量为 0。因此,剪切变形曲线中(图 4)包含了试样的弹性变形增量。但试验过程中,在剪应力突然增大后,3 个试样剪切应变也快速增大,但由于剪应力增

量均很小,突然增加的变形增量在 0.03 mm 以内,剪切应变在 0.5% 以内,因此弹性变形增量很小,在图 4 中显示不显著。因此,图中可显示的主要为试样的流变变形量。

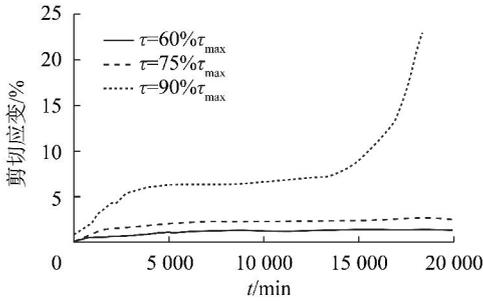


图4 静态剪切应变曲线

Fig. 4 Strain of specimens under static shear stress

在发生弹性变形阶段后,2个剪应力  $\tau$  为  $60\% \tau_{\max}$  和  $75\% \tau_{\max}$  的试样,在前 5 000 min 内,变形随时间的流逝而逐渐增大,剪切应变不到 2%。

5 000 min 后,变形增加量不显著,土样在试验期间没有发生破坏,因此其变形可能主要是黏弹性变形。

而试样剪应力  $\tau$  为  $90\% \tau_{\max}$  时,前 5 000 min 试样的剪应变持续增大,以黏弹性变形为主,在 5 000 ~ 15 000 min 期间应变增加幅度较低,而在 15 000 min 后应变快速增大直至试样破坏,该阶段的变形主要是塑性变形。

根据剪切流变曲线,每 10 min 统计试样的变形增量,得到试样的流变速率曲线(图 5)。由于弹性变形较小,将其含在前 10 min 的变形增量中一起统计。统计结果表明,3 种试样在前 1 000 min 以内的变形速率均相对较快,且  $\tau$  为  $90\% \tau_{\max}$  的试样变形速率最快, $\tau$  为  $60\% \tau_{\max}$  的试样变形速率最慢。

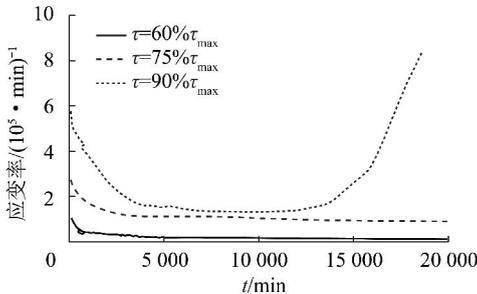


图5 静态剪切流变应变速率变化曲线

Fig. 5 Rheological strain rate curves of specimens under static shear stress

随后试样的流变速率迅速减小,在 10 000 min 后, $\tau = 60\% \tau_{\max}$  的试样流变速率已经接近 0,而  $\tau = 75\% \tau_{\max}$  和  $\tau = 90\% \tau_{\max}$  的试样流变速率仍较高且变得较为接近,15 000 min 后剪应力  $\tau = 90\% \tau_{\max}$  的试样应变速率快速增大且在破坏前一直处于加速变形

状态,而  $\tau = 75\% \tau_{\max}$  试样的应变速率则持续下降。

从试验结果可初步推断,在法向应力为 150 kPa 时,该土样长期抗剪强度可能是介于  $75\% \tau_{\max}$  与  $90\% \tau_{\max}$  之间的某个值,即

$$75\% \tau_{\max} < \tau_{cr} < 90\% \tau_{\max} \quad (1)$$

但受试验样本数量和仪器静态加载能力的限制,无法进一步准确确定该值。当所受剪应力小于该临界值时,只发生衰减蠕变,而当荷载大于该值时则会最终破坏。

#### 4 循环动态剪切变形特征

循环剪切试验中,对处于不同剪应力状态的试样分别施加不同强度的附加动态剪应力,土样的应变随振动次数的增加而呈现不同的变化趋势。且土样的剪切应变与其承受的循环动态剪切应力水平和其初始剪应力状态密切相关。

当试样的初始剪应力水平较低时,例如其初始剪应力为极限强度的 60% 时,即  $\tau = 60\% \tau_{\max}$  (图 6(a)),循环动剪应力为其极限剪切强度的 5%,10% 时,即  $\Delta\tau_p = 5\% \tau_{\max}$  和  $\Delta\tau_p = 10\% \tau_{\max}$ ,土样的剪切应变在前几次循环加载后应变快速增大,随后总体保持稳定,基本不再增大。而当  $\Delta\tau_p = 20\% \tau_{\max}$ ,应变增量先快速增加,随后增加缓慢,在施加了 120 000 次扰动后仍未发生破坏,其应变仍不到 1%。

当试样的初始剪应力水平较高时,例如其初始剪应力为极限强度的 90% 时,即  $\tau = 90\% \tau_{\max}$ ,即使循环剪切应力峰值  $\Delta\tau_p$  较小,如为其极限剪切强度的 5% ( $\Delta\tau_p = 5\% \tau_{\max}$ ) (图 6(c)),土样在经历约足够振动次数后也会发生破坏,且其应变先缓慢增大随后快速增大。而当动应力水平较高时,如  $\Delta\tau_p = 20\% \tau_{\max}$  (图 6(c)),应变则基本保持持续加速增长趋势。

当试样的初始剪应力水平处于时中高水平时,例如其初始剪应力为极限强度的 75% 时(图 6(b)),即  $\tau = 75\% \tau_{\max}$ ,土样应变变化对循环动应力的变化更为敏感。当动剪应力较小时(如  $\Delta\tau_p = 5\% \tau_{\max}$ ),土样应变增长缓慢,最终应变率可能降低至 0。而当动剪应力较高时(如  $\Delta\tau_p = 20\% \tau_{\max}$ ),土样可能快速发生剪切破坏。

试验结果表明,当动应力的频率相同,且试样的初始静应力与动应力峰值之和接近时,试样的变形特征也类似。如  $\tau = 60\% \tau_{\max}$ ,  $\Delta\tau_p = 20\% \tau_{\max}$  和  $\tau = 75\% \tau_{\max}$ ,  $\Delta\tau_p = 5\% \tau_{\max}$  的试样,在 120 000 次振动加载后,其应变量分别为 0.66% 和 0.82%;  $\tau = 75\% \tau_{\max}$ ,  $\Delta\tau_p = 20\% \tau_{\max}$  和  $\tau = 90\% \tau_{\max}$ ,  $\Delta\tau_p = 5\% \tau_{\max}$  的试样,分别在 37 800 次和 33 000 次振动加载后发

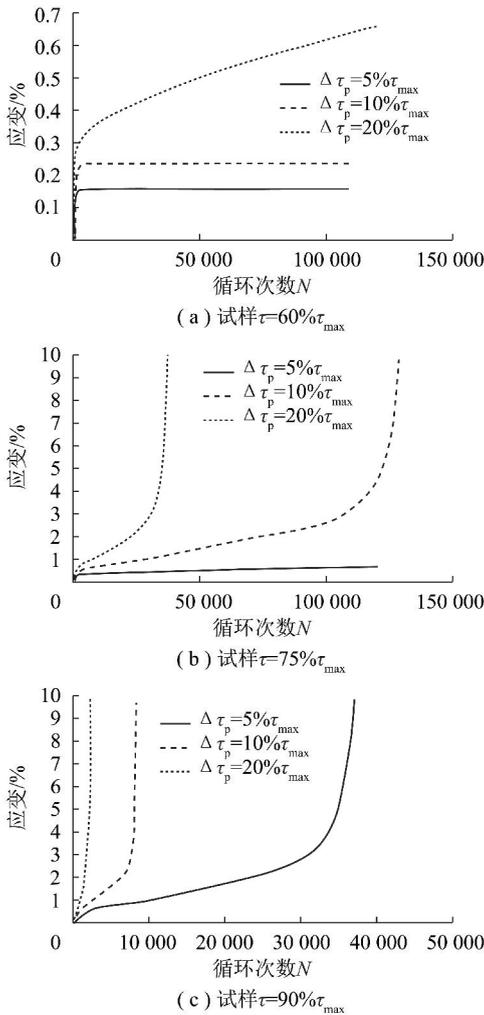


图6 循环剪切条件下试样剪应变随循环次数的变化

Fig. 6 Rheological shearing strain curves under cyclic dynamic shear load

生破坏,且其应变变化过程也相似。

其次,循环动态剪切作用下试样的破坏同样存在一定的应力状态临界值,大于该应力状态临界值试样才能在附加动应力作用下发生破坏。本土样的应力临界值(静态剪应力与动态剪应力峰值之和)应当在70%~80%剪切强度间,即:

$$70\% \tau_{\max} < (\tau + \Delta\tau_p)_{cr} < 80\% \tau_{\max} \quad (2)$$

## 5 间歇性动态剪切作用下流变变形特征

对不同应力状态下试样每日施加5次间歇性动态剪切荷载,观测其流变变形特征。

### 5.1 变形过程特征

与静态流变过程相比,间歇性动态剪切作用后试样的变形过程发生了显著的改变。

(1)初始静态剪应力与循环动态剪应力值均相对较低时,试样流变过程仍与静态流变过程相似,如图7(a)中 $\tau=60\%\tau_{\max}$ 且 $\Delta\tau_p=5\%\tau_{\max}$ 的试样,在初

始阶段应变快速增大后,随时间增加和动力扰动次数的增加,试样的剪应变无明显增加趋势。初始静态剪应力较低,但动态剪应力峰值较高时,如图7(a)中 $\tau=60\%\tau_{\max}$ 且 $\Delta\tau_p=10\%\tau_{\max}$ 和 $\Delta\tau_p=20\%\tau_{\max}$ 的试样,随着流变时间和动力扰动次数的增加,应变持续增大,并最终发生破坏,而与之对应的静态流变和循环剪切试验的试样则未发生破坏,这表明循环动态剪切作用改变了试样的整体变形趋势。

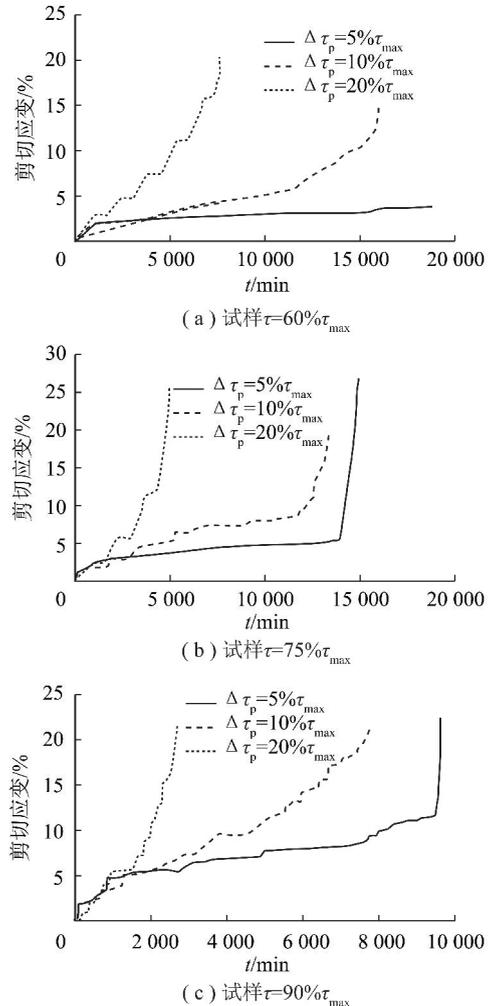


图7 间歇性动态剪切作用下试样流变曲线

Fig. 7 Rheological strain curves under intermittent dynamic shear load

(2)当初初始静态剪应力处于中等应力水平时,例如 $\tau=75\%\tau_{\max}$ 工况,其流变变形过程对动力扰动较为敏感,在动态剪应力峰值较低时,如图7(b)中 $\Delta\tau_p=5\%\tau_{\max}$ 试样,其前期变形速率缓慢增长,但在持续较长阶段后快速增大,与静态流变和循环剪切试验曲线相比,呈现典型的3阶段变形特征。

(3)当初初始静态剪应力接近其极限强度时,例如 $\tau=90\%\tau_{\max}$ 工况,其流变变形过程对动力扰动很敏感,即使在动态剪应力峰值较低时,如图7(c)中 $\Delta\tau_p=5\%\tau_{\max}$ 试样,其变形速率持续快速增长,表明接近极限平衡时,微弱的动荷载也可快速破坏其平

衡状态。

(4)对比图 7 各试样的变形曲线可发现,动态剪应力还改变试样的局部流变过程。承受较低静态剪应力和动态剪切应力的试样变形曲线是相对平顺的,在变形曲线上难以直观分辨出扰动的时刻,而分别承受较高静态剪应力或较高动态剪切应力时,试样变形的跃升特征显著,变形曲线呈现较明显的阶梯状。

## 5.2 应变速率特征

通过统计扰动前后的应变量和扰动持续时间,对扰动流变过程中平均流变速率进行分析。在初始静态剪应力较小或动态剪应力峰值较小时(图 8(a)),试样的流变速率在初始阶段较高,随后保持较低水平并在某些时刻有无规律的突变,在接近破坏阶段流变速率增加至较高的水平。随着初始剪应力或动态剪切应力峰值的提高(图 8(b)),应变率在初始阶段和动力扰动时刻较高且逐渐显示出一定的规律性。

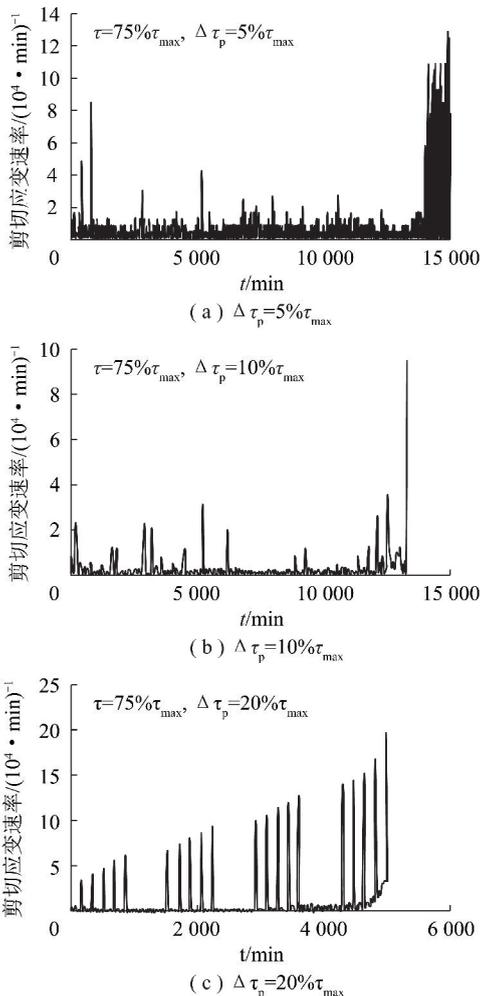


图 8 间歇性动态剪切作用下试样流变速率变化曲线( $\tau=75\% \tau_{\max}$ )

Fig. 8 Rheological strain rate curves of specimens under intermittent dynamic shear load ( $\tau=75\% \tau_{\max}$ )

而当初始剪应力接近极限强度或动态剪切应力峰值较高时(图 8(c)),试样的流变速率将逐渐增大,且在扰动过程中应变速率陡增,从流变速率曲线可清晰的辨识动态扰动的时刻和次数。

另外,当试样的循环动态剪应力相对较大时(图 8(c)),在其扰动流变初期,相邻两次扰动间的静态流变速率基本不变,呈稳定流变状态,而在扰动流变过程后期,试样变形速度加快时,扰动时的动态流变速率逐次增大,且相邻两次扰动时刻间的静态流变速率亦会显著增加,这与扰动强度较小的情况有所不同(图 8(a))。

## 5.3 变形增量特征

对试样临近破坏时某一时刻的应变增量进行统计,在相同初始应力状态下,使间歇性动态剪切流变实验的应变增量,与静态流变和循环剪切应变增量之和进行对比。例如,统计初始剪应力  $\tau=60\% \tau_{\max}$  且循环动态剪应力峰值  $\Delta \tau_p=5\% \tau_{\max}$  的试样的在 17 280 min 时的应变,此时试样变形共历时 12 d,承受 1 800 次动态扰动,因此对应统计相同初始应力状态下静态流变试样在 17 280 min 的应变量和循环动态剪切实验试样 1 800 次循环后的应变值,并将二者相加与间歇扰动流变的应变值进行对比。

统计结果表明(图 9),应力状态、流变时间和动力扰动次数相同时,循环动态剪切间歇性扰动作用下试样的变形量大于单纯静态剪切流变与单纯循环动态剪切变形量之和。且当试样最终发生破坏时,间歇扰动流变应变增量是后者的数倍,而越接近破坏的时刻,其差距越显著。

这表明流变变形和循环动态剪切变形相互影响相互促进,在趋近于破坏时,流变和动态剪切均促进了土体的损伤,降低了其强度,进而使二者的“加速变形”效应更为强烈。可见,微小而短暂的动力扰动可能对泥质软弱结构面的流变过程产生显著的推动作用,且扰动荷载越大其影响越强烈,而试样越接近其极限承载状态时对动力扰动越敏感。

## 5.4 流变寿命特征

将试样流变至完全失效的时间定义为试样的流变寿命  $t_f$ 。试验过程中,由于试样破坏时变形量不同,因此,当其加速流变阶段的应变量达 15% 时,认为试样达到其流变寿命。

试样流变寿命  $t_f$  与恒定荷载和扰动荷载的关系曲线显示(图 10),试样的流变寿命  $t_f$  随其恒定剪应力和循环动态剪应力的增大而总体呈折线状降低,这表明扰动流变实验过程中同样存在某一控制试样能否最终破坏的临界应力状态。由图 7(a)和图 10 可

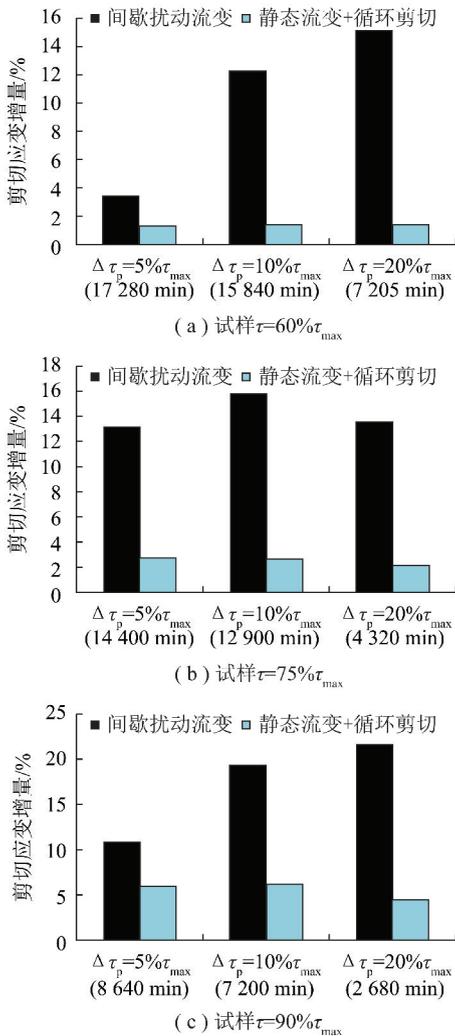


图9 不同试验的流变应变增量对比

Fig. 9 Compare of rheological strain increment of different experiments

发现,本实验土样的静态剪应力与动态剪应力的峰值在65%~70%左右的剪切强度时,试样可能最终发生破坏,即

$$65\% \tau_{\max} < (\tau + \Delta \tau_p)_{\text{Mc}} < 70\% \tau_{\max} \quad (3)$$

该组合应力门槛值可能要略低于纯静态流变实验和循环动态剪切实验试样的应力门槛值。当然由于试样性质的离散性,该组合应力门槛值还应进行大量实验验证。

## 6 讨 论

本文的实验结果表明,间歇性循环扰动作用下泥质夹层的长期强度和蠕变寿命都存在降低的可能。因此爆破开挖引起的动力扰动可能对受泥质夹层控制的岩质边坡滑动面参数、整体稳定性和局部稳定性都具有显著影响。

然而,目前对大型矿山和水利水电工程及其它工程中存在的大型岩质边坡进行爆破动力稳定性分析

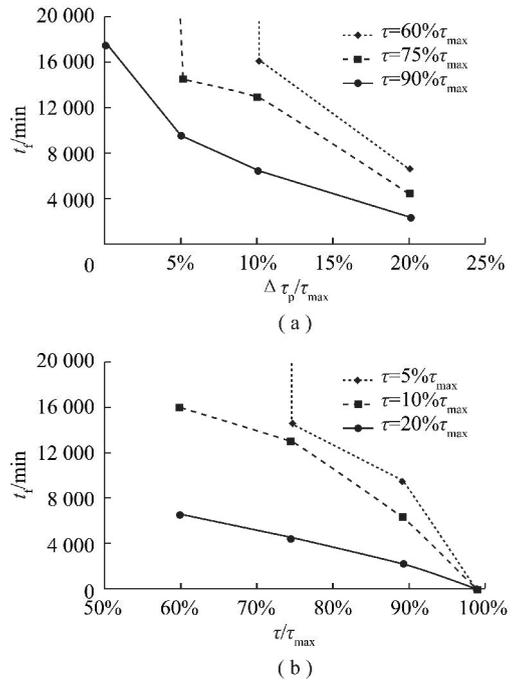


图10 流变寿命与恒定剪应力和动态剪应力峰值关系曲线

Fig. 10 Rheological life of specimens VS static shear stress and peak value of dynamic stress

时,主要以分析某一时刻的稳定性为主<sup>[13]</sup>,这在动力扰动微弱且边坡的静态安全系数较高时是合理的,但在边坡受流变性软弱结构面或滑动面控制且其静态安全系数较低时,仅分析边坡某一时刻的稳定性显然是不合适的。因此,对于受泥质夹层等流变性软弱结构面控制的,且受爆破振动效应显著影响的岩质边坡,应同时进行瞬态动力稳定性和长期动力稳定性的综合分析。

## 7 结 论

(1) 单纯循环剪切作用下,泥质夹层试样的应变随振动次数的增大呈现不同的变化趋势。初始剪应力水平和循环动态剪应力峰值均较低时,动力扰动对其变形影响不显著。当试样的初始剪应力水平较高时,即使循环动态剪应力较小,土样应变也可能随扰动次数的增加而快速增大。

(2) 泥质夹层试样在流变过程中受到间歇性动态剪切扰动时,若初始剪应力水平和循环动态剪应力峰值均较低,动力扰动对试样流变变形过程无显著影响。若初始剪应力水平接近其剪切强度,微弱的动力扰动也可显著促进其流变变形的快速增长。

(3) 相同初始静态应力状态下,试样间歇性动态剪切扰动作用下的流变变形量大于单纯静态剪切流变与单纯循环剪切变形增量之和。

(4) 相同初始应力状态下,间歇性动态剪切扰动

作用下试样的流变寿命可能低于单纯静态剪切流变情况。

(5) 土样最终发生扰动流变破坏时,存在一应力门槛值,该值由静态剪应力和动态剪应力峰值之和确定。

(6) 对于受爆破开挖长期影响且受泥质夹层等流变性软弱结构面控制的岩质边坡,建议进行瞬态动力稳定性和长期动力稳定性的综合评价。

## 参考文献 (References):

- [1] 马建军. 岩石爆破的相对损伤与损伤累积计算[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 961-964.  
Ma Jianjun. Relative damage and computation of damage cumulation for blasting in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 961-964.
- [2] Erarslan N, Williams D J. The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 56: 15-26.
- [3] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610-1619.  
Zhang Guohua, Chen Libiao, Xia Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1610-1619.
- [4] 郭志杏. 冬瓜山铜矿采场大直径深孔爆破损伤效应研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.  
Guo Zhixing. Research on large-diameter deephole blasting damage effect in dongguashan copper mine[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [5] 王思敬, 张菊明. 边坡岩体滑动稳定的动力学分析[J]. 地质科学, 1982(2): 162-170.  
Wang Sijing, Zhang Juming. On the dynamic stability of block sliding on rock slopes[J]. Scientia Geologica Sinica, 1982(2): 162-170.
- [6] 倪卫达, 唐辉明, 刘晓, 等. 考虑结构面震动劣化的岩质边坡动力稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 492-500.  
Ni Weida, Tang Huiming, Liu Xiao, et al. Dynamic stability analysis of rock slope considering vibration deterioration of structural planes under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 492-500.
- [7] 曹运江, 黄润秋, 唐辉明, 等. 某水电站高边坡煤系软弱结构面流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3732-3739.  
Cao Yunjiang, Huang Runqiu, Tang Huiming, et al. Experimental research on rheological characteristics of weak structural planes of high slopes in coal strata in a hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S2): 3732-3739.
- [8] 董卫军. 软土流变特性室内试验研究及长期强度的确定[D]. 南京: 河海大学, 2007.  
Dong Weijun. Study on the laboratory test of rheological characteristic of soft clay and long-term strength[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [9] 侯宏江, 沈明荣. 岩体结构面流变特性及长期强度的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2003, 6: 324-326, 353.  
Hou Hongjiang, Shen Mingrong. Rheological properties of rock mass discontinuities and trial research of its long-term strength[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003, 6: 324-326, 353.
- [10] 杨天鸿, 芮勇勤, 朱万成, 等. 炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度[J]. 试验力学, 2008, 5: 396-402.  
Yang Tianhong, Rui Yongqing, Zhu Wancheng, et al. Rheological characteristics and long term strength of siltized intercalation interbedded in peat mudstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 5: 396-402.
- [11] 高延法, 肖华强, 王波, 等. 岩石流变扰动效应试验及其本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 3180-3185.  
Gao Yanfa, Xiao Huaqiang, Wang Bo, et al. A rheological test of sandstone with perturbation effect and its constitutive relationship study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 3180-3185.
- [12] 王波, 高延法, 王军. 流变扰动效应引起围岩应力场演变规律分析[J]. 煤炭学报, 2010, 9: 1446-1450.  
Wang Bo, Gao Yanfa, Wang Jun. Evolution law analysis on surrounding rock stress field by rheology disturbed effected[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 27(1): 3180-3185.
- [13] 李宁, 姚显春, 张承客. 岩质边坡动力稳定性分析的几个要点[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 873-881.  
Li Ning, Yao Xianchun, Zhang Chengke. Several point in dynamic stability analysis of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 873-881.