文章编号:1000-5773(2011)03-0207-06

冲击下花岗岩界面动态摩擦特性实验研究*

徐松林,郑 文,刘永贵,郑 航

(中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽合肥 230027)

摘要:为研究岩石界面动态摩擦性能,对房山花岗岩进行了冲击速度 42.2～130.6 m/s、倾斜角为 20°和 30°的横剖试样斜撞击实验。倾斜角为 20°的为对比实验,研究不发生滑动时的界面性能;在倾斜角为 30°的实验中,靶和飞片撞击界面发生相对滑动,用于研究发生界面滑动时的动态摩擦性能。基于此,研究了正应力在 317～685 MPa、界面相对滑移速度在 2.76～24.88 m/s 时花岗岩界面滑动态摩擦状态。其结果可以初步揭示地震过程板块动态摩擦过程摩擦强度急剧降低的现象。

关键词:冲击动力学;实验研究;压剪联合冲击;动态摩擦;界面滑动

中图分类号:O347.4;TU45 **文献标识码**:A

1 引 言

岩石界面动态摩擦性能的研究一直是地震机理研究的重要内容之一。地震的形成和发展都是与板块的摩擦滑动紧密联系的,摩擦滑动中伴随板块强度降低、板块破碎,以及大量的能量释放等等复杂的过程,地震过程中的板块摩擦具有非常复杂的特性[1-2]。对地震过程中板块动态摩擦现象的研究,已经成为预报地震、揭示地震发展规律的主要途径之一。

现在较成熟的工作集中在准静态和低速摩擦的情况。如 Scholz[3]、Marone[4]、Gerde[5]、Maede[6]等分别研究了岩石、节理带、复合材料等的摩擦特性,主要研究对象为两个物体的简单表面摩擦,应力状态单一。地震过程实际上是一个复杂的动态作用过程,它包括短时间的板块冲击摩擦与长时间的板块滑动摩擦。前者揭示的是地震初期的发展趋势,主导中后期板块破裂、能量释放的方向;后者则是地震能量释放过程板块的运动。因此,动态摩擦研究显得尤为重要。动态摩擦研究也主要集中于这两个方面:Xia 等[7]主要关注于前者,通过冲击过程岩体动态断裂性能来研究地震初期及其发展;Toro[8]、Sone[9]等则关注于后者,通过大位移的滑动摩擦研究板块运动过程的摩擦性能。揭示了很多的实验现象,但对这两个过程的整体认识存在较大争议[1]。

本工作应用轻气炮压剪联合冲击实验技术,对房山花岗岩进行两种倾斜角度、不同冲击速度的平板斜撞击实验,研究在不同正压力、不同界面滑移速度下岩石的动摩擦特性。初步讨论地震过程板块动态摩擦过程摩擦强度的变化趋势。

2 压剪联合冲击实验与冲击过程的界面摩擦与滑动

2.1 压剪联合冲击实验

实验主要基于 Tang 等[10]提出的剪切波跟踪技术(SWT)进行。实验示意图见图 1,相应的波系分析见图 2(a)。当飞片与靶发生斜碰撞时,在试样中将依次传播 4 道主要波阵面:加载压缩纵波(P^+)、加

* **收稿日期**:2010-05-04;**修回日期**:2010-06-09

基金项目:国家自然科学基金(40874093);中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:徐松林(1971—),男,博士,副教授,主要从事材料冲击响应的理论与实验研究. E-mail:slxu99@ustc.edu.cn

载剪切横波(S^+)、卸载纵波(P^-)和卸载剪切波(S^-),它们使靶经受较复杂的应力状态。研究飞片和靶接触界面的动态摩擦特性,主要集中于图 2(a)的"*OI*"段。

在"*OI*"段,界面依次经受了 5 个状态:(1) 零应力状态;(2) P^+作用;(3) P^+和 S^+共同作用;(4) 由于压缩波卸载,只有 S^+作用;(5) 由于剪切卸载,处于零应力状态。本研究集中在状态(3),探讨岩石界面的冲击摩擦和滑动性能。另外,在图 2(a)的波系图中须注意,界面上横波的存在与压缩纵波相关,当界面上压缩纵波发生卸载,必然伴随着横波卸载。因此,研究此过程可以得到加卸载过程接触界面的摩擦特性。

实验在中国科学技术大学轻气炮实验室口径为 57 mm 的一级轻气炮上进行。斜碰撞实验靶内部粒子速度利用双磁场 IMPS 粒子速度测量系统进行测量,粒子速度计采用电磁粒子速度计[10]。输出信号的记录采用美国 Tektronix 公司生产的高采样率四通道示波器:TDS640A(频响 500 MHz,采样速率 2 GS/s)、TDS654C(频响 500 MHz,采样速率 5 GS/s)等。本实验的实验误差约为 5%。

实验测试采用水平磁场,得到的理论电动势波形见图 2(b)中的实线。

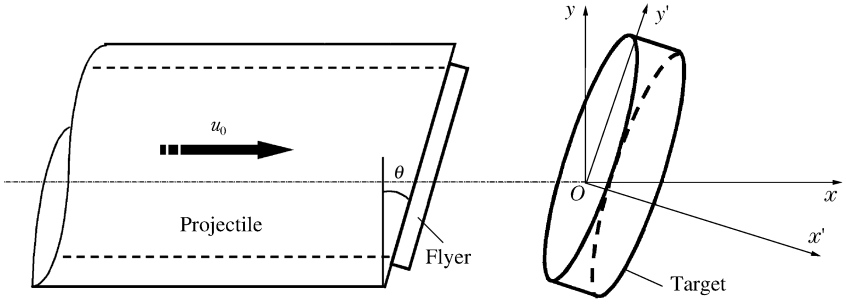
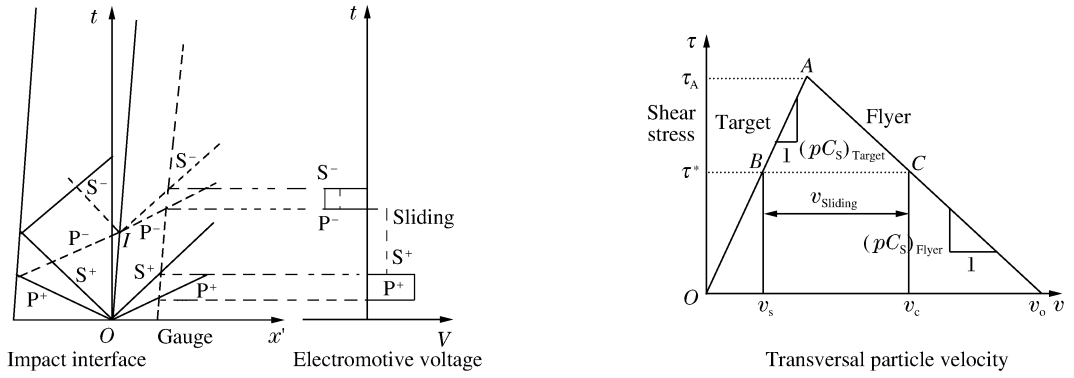


图 1 平板斜碰撞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an inclined plate impact



(a) Wave propagation (b) Wave profiles of EMV (c) Diagram of τ-v at impact interface

图 2 斜碰撞过程波传播示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of wave propagation of inclined plate impact

2.2 界面摩擦与滑动

在上述压剪联合冲击加载实验中,飞片和靶在碰撞界面容易发生滑动。为了使界面不发生滑动,实验中试件的倾斜角(图 1 中 x 轴与 x'轴的夹角)比较小,一般控制在 15°以下。本实验为研究界面摩擦特性,对比研究滑动和不滑动两种状态,须调整飞片和靶的倾斜角度。

图 2(b)和图 2(c)对比分析了界面发生滑动和不滑动时测试计电动势波形和剪应力-横向粒子速度状态。当界面不发生滑动时,测试计电动势波形为图 2(b)的实线,此时 4 道波阵面的电动势幅值一样;

相应的界面剪应力和横向粒子速度与图 2(c)中 A 点的状态一致。当界面发生滑动时,测试计电动势波形为图 2(b)中的虚线,此时加载剪切横波(S^+)的幅值由于界面滑动而低于理论值,图 2(c)中 B 点和 C 点分别为靶和飞片稳定滑动时达到的状态。

产生这种状态是由于发生撞击的材料接触面的摩擦力是有限的,当剪切方向的作用力超过界面的极限摩擦力后,界面将发生相对滑动。这样,飞片和靶的平衡点不在 A 点,而是分别在 C 和 B 点达到剪切应力(τ^*)的平衡。界面的相对滑动速度为[11]:$v_{\text{sliding}}(t)=v_C-v_B$,相应地可定义两个参数:(1) 系数 α,为界面剪切应力与法向应力的比值,即:$\alpha=\tau(t)/\sigma(t)$,它包括界面未发生滑动和发生相对滑动等各个阶段;(2) 动态摩擦系数 μ,为界面和发生相对滑动时界面剪切应力与法向应力的比值,即:$\mu(t)=\tau(t)/\sigma(t)$。在此过程还有一个重要的参数,即静摩擦系数,与界面从未发生滑动向发生相对滑动过渡时的 α 值对应。

3　花岗岩斜碰撞过程界面动摩擦性能

所采用的岩石为房山花岗岩,其密度为 2.67 g/cm^3,靶和飞片均为直径 50 mm 花岗岩圆片,分别进行了倾斜角 20°和 30°,冲击速度 42.2～130.6 m/s 的平板撞击实验,实验结果统计见表 1。其中 0711# 靶由一个厚 10.12 mm 的圆片构成,两个粒子速度计均贴在自由表面。其它的靶都是由 3 个圆片构成,第 1 片和第 2 片厚度在 4～6 mm,第三片厚约 9～10 mm,两个粒子速度计分别夹在第 1 片和第 2 片,及第 2 片和第 3 片之间。斜碰撞过程除 0711# 试验倾斜角为 20°而未发生滑动外,其它的试验均发生了滑动。

表 1　平板斜撞击实验结果统计

Table 1　Summary of experimental results of inclined plate impact

No.	Thickness of flyer /(mm)	Thickness of target /(mm)	Impact velocity /(m/s)	Inclined angle /(°)	Slid velocity /(m/s)	Friction coefficient		Peak state	
						Static	Dynamic	Stress p /(MPa)	Shear τ from S^+ /(MPa)
0712	6.64	25.66	42.2	30	2.76	0.42	0.247	317	78
0713	7.80	22.68	64.3	30	6.21	0.38	0.227	462	105
0720	6.10	19.34	69.1	30	18.07	0.32	0.137	521	71
0723	5.84	19.42	90.1	30	24.88	0.28	0.130	685	89
0711	9.24	10.12	130.6	20	0	>0.18	—	1049	189

3.1　花岗岩斜碰撞过程

图 3 为 0711# 的斜撞击实验结果,此时飞片与靶接触界面未发生相对滑动。图 3(a)为靶的自由表面实测波形,此时加载 P 波和剪切横波的电压信号幅值基本一致。由此进行 P 波和 S 波的分解,得到 P 波和 S 波的粒子速度波形,如图 3(b)所示。根据 P 波的粒子速度波形,由靶与飞片的对称碰撞,可以得到斜碰撞的 S 波粒子速度的理论值,如图 3(b)中虚线所示。由此可见,在碰撞界面未发生相对滑动时,S 波粒子速度的理论值与实测值基本一致。

但图 3(b)中 S 波粒子速度的理论值与实测值在卸载阶段存在一定差异。理论上,界面的 P 波和 S 波加卸载过程应该是同步进行的。但由于实验过程很难进行碰撞面上的直接测试,尤其是碰撞面上的剪切信号的测试,因此,本实验过程碰撞面的信号是通过非常接近碰撞面的位置来获得的。要保证 P 波和 S 波信号的完整,以及考虑到岩石试样的加工难度,测试信号通过距离碰撞面约 5 mm 的位置测试得到(除 0711# 试件外)。由于岩石介质的复杂性,冲击波经过约 5 mm 的传播后,P 波和 S 波的波形都要产生一定的弥散,尤其是 S 波波形的影响更甚。因此,在此位置测试得到的 P 波和 S 波加卸载过程无法保证完全同步。这是造成 S 波粒子速度的理论值与实测值在卸载阶段存在差异的主要原因。

飞片与靶接触界面未发生相对滑动时,界面剪切应力与法向应力的比值 α 随时间的变化见图 3(c)。与界面碰撞过程相对应,比值 α 的发展分为 3 个阶段:(1) 加载阶段,随正压力增加,α 缓慢增

加;(2) 荷载维持阶段,α 维持在 0.18;(3) 卸载阶段,α 缓慢减小,这种减小不是界面发生滑动的结果,而是剪切应力和正应力卸载速度存在差异造成的。

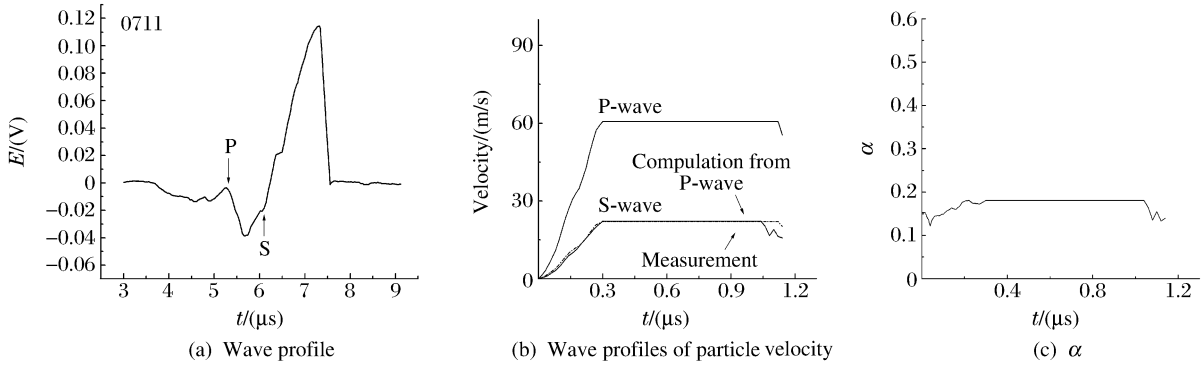


图 3 界面未发生滑动时实验结果(No. 0711)

Fig. 3 Experimental results for specimen without interface sliding

图 4 为 0723# 的斜撞击实验结果,此时飞片与靶接触界面发生相对滑动。图 4(a)为靶内距撞击面 5 mm 处的电压信号,参照图 2(b)的分析,界面发生相对滑动,此时 S 波的电压信号比 P 波的幅值小。进行 P 波和 S 波的分解,得到 P 波和 S 波的粒子速度波形,如图 4(b)所示。参照图 2(c)的分析,可以得到靶与飞片接触界面的相对滑移速度如图 4(b)中虚线"OAB"所示。须注意的是,相对滑移速度的发展并不是一直按照图 2(b)和 2(c)的分析结果进行的,当接触界面的 P 波卸载时,靶和飞片的 P 波和 S 波均同步进行卸载,而且幅值一样,这样接触界面将保持原有的相对滑移速度运动,即沿图 4(b)中 BC 的方向发展。

飞片与靶接触界面发生相对滑动时界面剪切应力与法向应力的比值 α 随时间的变化见图 4(c)。与界面碰撞过程相对应,比值 α 的发展分为 3 个阶段:(1) 加载阶段,随正压力增加,α 逐渐增大,直至达到峰值 0.28,然后突然减小,表明界面开始发生滑动,因此,0.28 即为相应的界面静摩擦系数;(2) 荷载维持阶段,α 维持在 0.13,此即界面的动态摩擦系数;(3) 卸载阶段,α 缓慢减小。

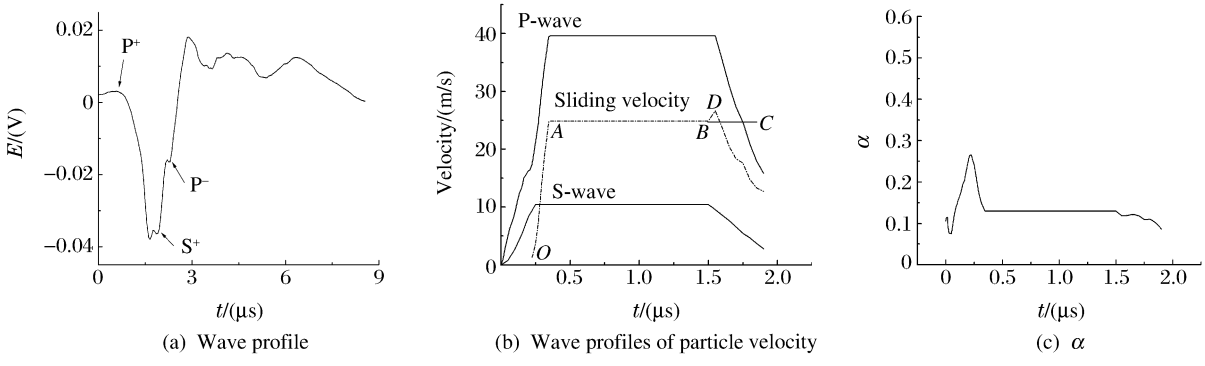


图 4 界面发生滑动时实验结果(No. 0723)

Fig. 4 Experimental results for specimen with interface sliding

3.2 冲击下花岗岩界面动态摩擦特性

冲击下花岗岩界面在滑动过程中,界面剪切应力与法向应力的比值 α 的变化及相应的静摩擦系数和动摩擦系数分别见表 1 和图 5。

比值 α 随加载过程的变化见图 5(a)。比较图中不同冲击速度和不同倾斜角度的实验结果可知,α 的发展可以分为 3 个阶段。

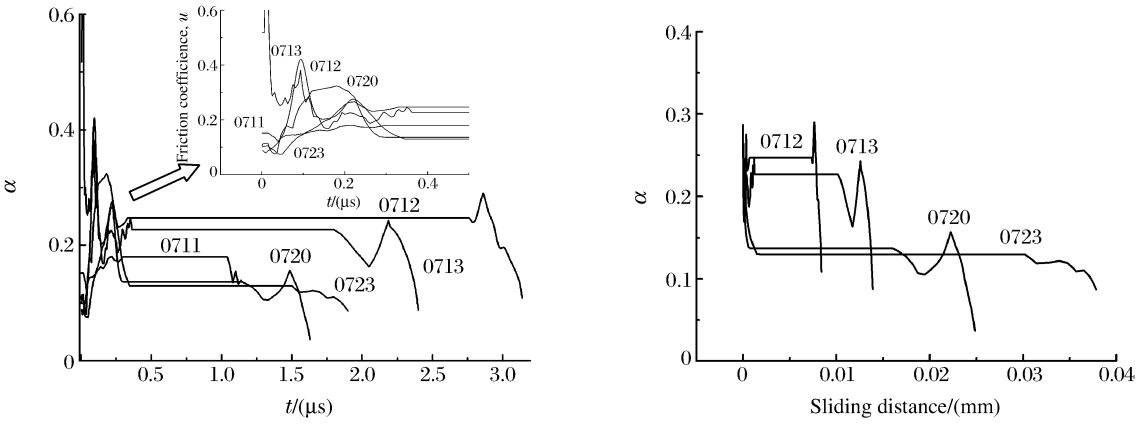
(1) 加载阶段,随正压力增加,α 基本上有一个先增加然后减小的过程,但是增加的过程和达到的最

大比值,即界面静摩擦系数,却不尽相同,见表 1,这反映了试件表面加工的差异性和岩石材料的非均匀性。

(2) 荷载维持阶段,当倾斜角为 30°时,冲击速度从 42.2 m/s 增加到 90.1 m/s,相应压应力从 317 MPa增加到 685 MPa,界面滑移速度从 2.76 m/s 增加到 24.88 m/s,相应地动态摩擦系数从 0.247 减小到 0.130,此时的界面极限摩擦力维持在 70～100 MPa。分析这些数据,需综合考虑以下事实:冲击过程是一个绝热过程,绝热过程产生的热量可促使表面局部结构发生变化,甚至发生相变,花岗岩中 α-石英相向 β-石英相发生相变的温度约为 560 ℃。Toro 等[8]就花岗岩中由于摩擦产热而致相变的现象专门在旋转圆盘上进行过研究,结果表明:摩擦产热对界面性能有很大的影响。另外,此阶段对于材料剪切性能研究也有重要作用,高分子材料的热塑失稳、表面熔化等过程[12-13],脆性材料的表层破裂[11]等现象都影响界面剪切信号的传播,也影响界面的摩擦性能。现有的研究表明,这些局部失稳现象主要发生在接触面的浅层,推测在约几微米的位置[11-13]。这种发生在浅层的局部失稳也使得发生滑动时的界面摩擦力不会很高。

(3) 卸载阶段。随正压力增加,α 有一个先增加后减小的趋势。卸载时,剪切卸载要发生剪切方向的转变,在剪切方向的调整过程一般表现为强度的暂时增加。一旦调整完成,剪切强度降低。同时,由于 P 波加载过程已在岩石界面产生损伤,P 波卸载时,剪切强度更难维持,因此,S 波卸载很快,表现为 α 急剧减小。此阶段不能简单看作前面加载阶段的逆过程。

根据界面滑移速度,整理出 α 与界面相对滑动位移的关系见图 5(b)。图中有一个总体的趋势:随着相对滑动位移的增加,α 减小,此时 α 表征的是界面动态摩擦性能的减弱。这是准静态和低速、大位移的界面摩擦时的一般结论。但是,本实验无法下这个结论。根据前面的分析,产生这种趋势是由于界面经历了 3 个加载阶段。由于界面滑动位移太小,图中 0723# 最大滑移位移只有 0.035 mm。尚无法反映动态摩擦系数与滑动位移的关系。



(a) Relation of α to time　　(b) Relation of α to sliding distance

图 5　界面滑动过程 α 的变化

Fig. 5　Development of α during interface sliding

4　结　论

采用轻气炮压剪联合冲击技术,对房山花岗岩的界面摩擦特性进行了研究。在本实验研究的正压力和相对滑移速度的情况下,界面剪切应力与法向应力的比值 α 的发展可以分为 3 个阶段:(1) 加载阶段,随着正应力的增加,α 基本上有一个先增加然后减小的过程;(2) 荷载维持阶段,当倾斜角为 30°时,压应力从 317 MPa 增加到 685 MPa,界面滑移速度从 2.76 m/s 增加到 24.88 m/s,相应动态摩擦系数从 0.247 减小到 0.130,此时的界面极限摩擦力维持在 70～100 MPa;(3) 卸载阶段,α 有一个先增加后减小的趋势。此过程基本揭示了短时间冲击下岩石的动态摩擦性能。相对于实际地震过程而言,本研究方法可用于探索地震初期的发展,为后期大位移的摩擦滑动、板块碰撞、板块的破碎等研究提供一个

初始条件。

拟解决的问题还很多:(1) 需获得冲击过程更大的滑移位移,考虑到地震过程板块的碰撞运动,可以采用 SHPB 冲击加载技术,以获得较低的冲击压力和较大的滑移位移;(2) 需考虑碰撞界面的实际粗糙状况,进行一定的分析计算。这对于表面摩擦的研究非常重要。

References:

[1] Rice J R. Heating and Weakening of Faults during Earthquake Slip [J]. J Geophys Res, 2006, 111(B05311): 148-227.

[2] Chen Y, Huang T F. Rock Physics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2001. (in Chinese)
陈 颙, 黄庭芳. 岩石物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.

[3] Scholz C H. Earthquake and Friction Laws [J]. Nature, 1998, 391: 37-42.

[4] Marone C. The Effect of Loading Rate on Static Friction and the Rate of Fault Healing during the Earthquake Cycle [J]. Nature, 1998, 391: 69-72.

[5] Gerde E, Marder M. Friction and Fracture [J]. Nature, 2001, 413: 285-288.

[6] Maeda N, Chen N H, Tirrel M, et al. Adhesion and Friction Mechanisms of Polymer-on-Polymer Surfaces [J]. Science, 2002, 297: 379-382.

[7] Xia K W, Rosakis A J, Kanamori H. Laboratory Earthquake: The Sub-Rayleigh-to-Supershear Rupture Transition [J]. Science, 2004, 303: 1859-1861.

[8] Toro G D, Goldsky D L, Tullis T E. Friction Falls towards Zero in Quartz Rock as Slip Velocity Approaches Seismic Rates [J]. Nature, 2004, 427: 436-439.

[9] Sone H, Shimamoto T. Frictional Resistance of Faults during Accelerating and Decelerating Earthquake Slip [J]. Natural Geosciences, 2009, 2: 705-708.

[10] Tang Z P, Xu S L, Dai X Y, et al. S-Wave Tracing Technique to Investigate the Damage and Failure Behavior of Brittle Materials Subjected to Shock Loading [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31: 1172-1191.

[11] Okada M, Liou N S, Prakash V, et al. Tribology of High-Speed Metal-on-Metal Sliding at Near-Melt and Fully-Melt Interfacial Temperatures [J]. Wear, 2001, 249: 672-686.

[12] Gupta Y M. Determination of the Impact Response of PMMA Using Combined Compression and Shear Loading [J]. J Appl Phys, 1980, 51(10): 5352-5361.

[13] Li T, Tang Z P, Cai J. Micro-Observation of Shear Wave Attenuation Mechanism in Nylon-66 [J]. Materials Letter, 2007, 61(6): 1436-1438.

Experimental Investigation on Interface Dynamic Friction of Granite under Combined Pressure and Shear Impact Loading

XU Song-Lin, ZHENG Wen, LIU Yong-Gui, ZHENG Hang

(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: To investigate the dynamic friction behaviors of rock interface, series of experiments including oblique planar impact with inclination angle 20° and 30°, impact loading velocity ranging from 42.2 m/s to 130.6 m/s for Fangshan granite, are carried out. Experiments with inclination angle 20° were carried out to study interfacial properties for specimen without interfacial sliding, and those with inclination angle 30° were used to study the dynamic friction behaviors for specimens with interfacial sliding. Experimental results preliminarily revealed the dynamic friction behaviors of granite surface under the pressures range from 317 MPa to 685 MPa and the surface sliding velocities range from 2.76 m/s to 24.88 m/s. The preliminary results indicated a complicated process of the dynamic friction, which is helpful for the understanding of the earthquake slip.

Key words: impact mechanics; experimental study; combined pressure and shear impact loading; dynamic friction; interfacial sliding