

# 冲击加载条件下材料之间摩擦系数的确定

林玉亮, 卢芳云, 崔云霄  
(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 尝试利用自制分离式霍普金森压剪装置对聚氨酯泡沫塑料、硅橡胶和 MDF 水泥材料与铝合金在冲击加载条件下的摩擦系数进行测试. 结果表明: 在冲击加载条件下, 聚氨酯泡沫塑料、硅橡胶和 MDF 水泥与铝杆之间的摩擦系数与材料的性质关系不大, 其摩擦系数测试结果存在一定的分散性, 摩擦曲线出现抖动, 且与加载条件有关, 摩擦系数比通常意义下所得到的摩擦系数小; 不同加载条件对所测试材料与铝压杆之间的摩擦系数数值影响不大, 只是曲线的走势稍有不同. 在冲击加载条件下硬质聚氨酯泡沫塑料与铝杆之间的静摩擦系数为 0.29, 动摩擦系数为 0.25; 硅橡胶与铝杆之间的静摩擦系数为 0.285, 动摩擦系数为 0.24; MDF 水泥与铝合金杆之间的静摩擦系数为 0.28~0.29, 动摩擦系数约 0.23.

**关键词:** 摩擦系数; 压剪; 冲击加载

**中图分类号:** O339; TH117.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2007)01-0064-04

摩擦定律是法国物理学家库仑于 1781 年建立的, 摩擦系数在数值上等于两物体之间的摩擦力  $F$  与物体间的正压力  $N$  之比, 这是一个近似定律, 其简单表达式远不能反映出摩擦的复杂性. 物体间的摩擦是一个非常复杂的表面物理化学现象<sup>[1]</sup>, 简单的摩擦理论不能深入揭示摩擦机理. 而在冲击加载条件下, 物体之间的摩擦系数很难确定. Popov 等<sup>[2]</sup> 利用数值分析方法分析了车轮与轨道之间滑动摩擦系数与材料及载荷的关系, Zhang 等<sup>[3]</sup> 研究了相对滑动速度为 2~6 m/s 下材料的摩擦系数, 并给出相对滑动速度与摩擦系数的变化曲线. Prakash 等<sup>[4~6]</sup> 利用改进的霍普金森扭杆装置测试得到金属材料之间的摩擦系数.

本文介绍利用自制分离式霍普金森压剪装置 (SHPSB) 对冲击加载条件下硅橡胶、硬质聚氨酯泡沫塑料和 MDF (Macro-Defect-Free) 水泥材料与铝合金之间的动摩擦系数进行测试的方法.

## 1 实验部分

对传统分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置进行改进: 将入射杆的末端由原来的平面改为与轴线成 45° 角的楔形面 (如图 1 所示). 由于试验装置两侧对称, 因此图中只给出其中一部分. 利用斜面几何

效应和端面摩擦效应将在斜面上的入射波分解为压缩和剪切载荷加载到试样上, 实现对试样的平面压

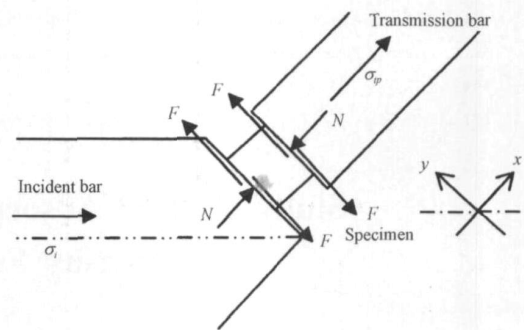


Fig 1 Schematic of the specimen forced in the pressure-shear set

图 1 压剪加载装置中试样受力示意图

剪加载, 通过入射杆和透射杆上的测试信号反推试样的应力应变情况. 图 1 还标出了该压剪装置中试样的受力示意图, 用箭头分别标出了试样与压杆界面受力的方向, 按照牛顿第三定律 (作用力与反作用力), 在同一界面上压杆与试样所受力相反. 试验过程中, 分别利用应变片与剪应力计测试进入透射杆的压应力  $\sigma_p$  与剪应力  $\tau$ , 若试样在测试过程中没有发生损坏, 则可以认为剪应力  $\tau$  等于界面摩擦力. 利用库伦摩擦理论:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10276038, 10172092).

收稿日期: 2006-01-10; 修回日期: 2006-08-10; 联系人林玉亮, e-mail: ansen\_liang@163.com

作者简介: 卢芳云, 女, 1963 年生, 教授, 博导, 目前主要从事材料动力学性能研究.

$$F = A = \mu N \tag{1}$$

式中： $F$ 为试样与压杆界面之间的摩擦力， $A$ 为透射杆横截面积， $\mu$ 为摩擦系数， $N$ 为作用在界面上的压力，且

$$N = p \cdot A \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)可以得到摩擦系数  $\mu$  的计算公式

$$\mu = \frac{F}{p \cdot A} \tag{3}$$

试验中采用分离式霍普金森压剪杆，入射杆选用优质合金钢作为压杆材料，以便对试样施加较大的冲击载荷，压杆直径为 38 mm，长度为 1 600 mm；透射杆采用 LC4 铝合金以获得较大输出信号，杆径 20 mm，长度 1 000 mm。

试验选取硅橡胶、硬质聚氨酯泡沫塑料及 MDF 水泥为对象，所用硅橡胶是代号为 W SXJ-208 的改性硅橡胶，密度 1.180 g/cm<sup>3</sup>，属于超弹性体，MDF 水泥的密度为 2.30 g/cm<sup>3</sup>，硬质聚氨酯泡沫塑料为闭孔型泡沫，密度为 0.171 g/cm<sup>3</sup>。试验过程中将 3 种试样分别加工成尺寸  $\phi 14.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 、 $\phi 14.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  和  $\phi 10.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$  的圆柱体。其中，硅橡胶与硬质聚氨酯泡沫塑料试样由普通机械加工得到，表面未进行任何处理，MDF 水泥试样表面粗糙度  $R_a$  不大于 1.6  $\mu\text{m}$ ；铝合金杆与试样接触表面用 600 目的砂布打磨至  $R_a$  值不低于 6.3  $\mu\text{m}$ 。

为了准确得到测试材料与铝杆表面的摩擦系数随加载变化的情况，试验过程中将试样的一端与钢入射杆端面粘结到一起，另一端与透射铝杆间保持自然紧密接触。这样，只要试验过程中试样不从钢杆表面脱落，即可认为透射杆中测出的剪应力等于试样与铝杆间的摩擦力。同时，对 3 种试样施加相同冲击载荷，即保持同样的撞击杆以相同速度撞击入射杆，对 3 种试样所用撞击杆撞击速度均为 8.5 m/s。

## 2 结果与讨论

图 2 给出了撞击杆撞击速度为 8.5 m/s 时，利用分离式霍普金森压剪装置测得 MDF 水泥的透射压应力 (P-Stress) 与剪应力 (S-Stress) 曲线，并给出 MDF 水泥材料与铝杆间摩擦系数  $\mu$  的变化曲线。由于 MDF 水泥试样在试验过程中没有损坏，且试样在试验后仍粘贴在钢杆表面上，因此可以认为图中的摩擦系数随时间的变化曲线可以真实反映 MDF 水泥与铝合金材料在冲击加载条件下的变化规律。

由图 2 可见：开始加载阶段的摩擦系数在 0.29 左右，出现抖动但范围不大；当持续加载 20  $\mu\text{s}$  左右

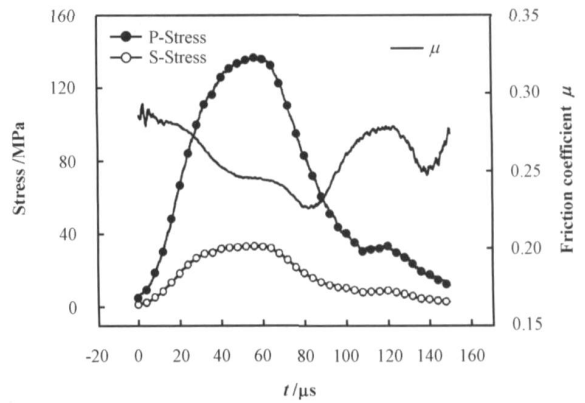


Fig 2 Pressure-shear experimental result of MDF  
图 2 MDF 试样的压剪测试结果

时摩擦系数开始下降，这是由于试样与铝杆之间产生了相对滑动，两者之间由静摩擦转化为动摩擦，摩擦系数降低（按照一般的摩擦理论，两物体间相对速度越大，动摩擦系数越小<sup>[11]</sup>）；而加载 84  $\mu\text{s}$  后摩擦系数又开始随时间上升，这是因为此时入射加载脉冲已进入卸载阶段，入射应力下降使得试样与铝杆间的相对滑动逐渐停止，动摩擦过程结束，试样与铝杆间恢复为静摩擦，当加载 120  $\mu\text{s}$  左右时摩擦系数达到 0.28，与起始摩擦系数接近。由此可以看出，在冲击加载条件下，MDF 水泥试样与铝合金杆之间的静摩擦系数在 0.28 ~ 0.29 之间，而动摩擦系数约为 0.23。

图 3 所示为撞击杆撞击速度为 8.5 m/s 时硬质

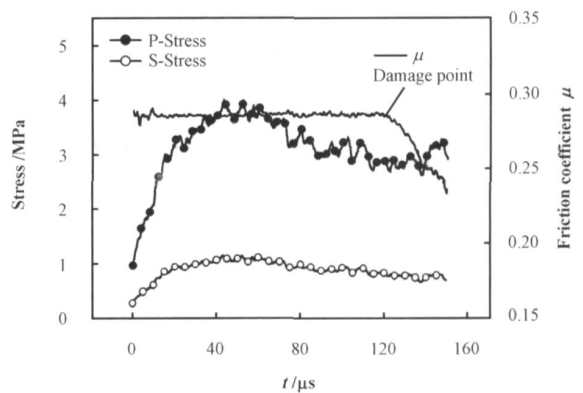


Fig 3 Pressure-shear experimental result of rigid polyurethane foam

图 3 硬质聚氨酯泡沫试样的压剪测试结果

聚氨酯泡沫塑料的压剪测试结果。测量完后试样已部分破裂，残余部分粘结于钢杆表面。可以看出，从加载开始至 120  $\mu\text{s}$  时，摩擦系数约为 0.29。当加载持续 120  $\mu\text{s}$  后摩擦系数开始降低，这是由于材料破

碎造成的,测量出的剪应力已不等于压应力与摩擦系数的乘积.因此,损伤点后面的数据不具有摩擦系数含义.

图 4给出了撞击杆撞击速度为 8.5 m/s时硅橡

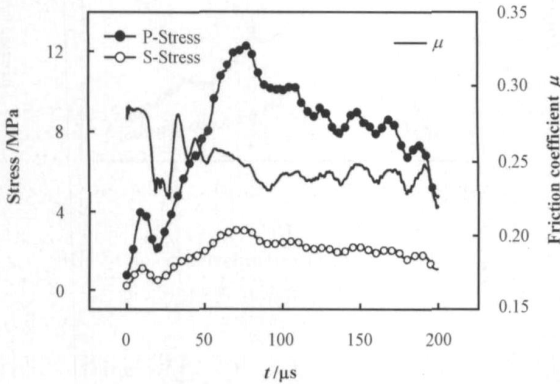


Fig 4 Pressure-shear experimental result of rubber

图 4 硅橡胶试样的压剪测试结果

胶试样的测量结果.试验后,试样表面完好无损,仍粘结于钢杆表面,但胶层已松动.从图 4可以看出,摩擦系数在整个加载过程中均存在一定的抖动,静摩擦与动摩擦之间不像 MDF水泥那样容易区分.硅橡胶与铝合金的接触静摩擦系数为 0.28,动摩擦系数为 0.24.

图 5给出了撞击速度为 8.5 m/s和 12.0 m/s

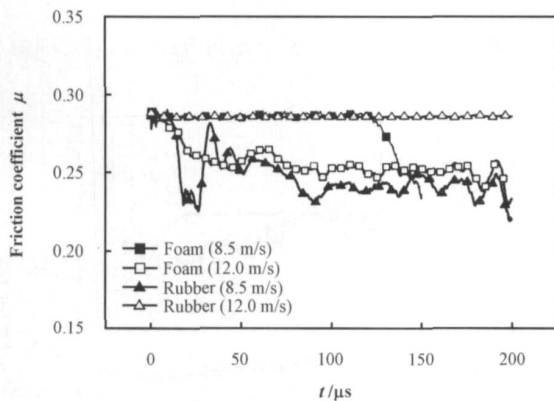


Fig 5 Pressure-shear experimental result of rigid polyurethane foam and rubber

图 5 硬质聚氨酯泡沫与硅橡胶试样的压剪测试结果

时,硬质聚氨酯泡沫塑料、硅橡胶与铝杆之间摩擦系数随时间变化的关系曲线.可见,在 2种撞击速度下,2种材料的摩擦系数变化曲线呈现出相反走势:在 12.0 m/s下,硬质聚氨酯泡沫塑料与铝杆间的摩擦系数曲线出现抖动,由最初的 0.29开始下降,逐渐稳定在 0.25附近;而硅橡胶与铝杆的摩擦系数基

本稳定在 0.29;在 8.5m/s下聚氨酯泡沫塑料的摩擦系数曲线较平稳,硅橡胶的摩擦系数曲线抖动较大.但 2种加载条件下的摩擦系数值变化不大.

### 3 结论

a 在冲击加载条件下,MDF水泥、硬质聚氨酯泡沫塑料及硅橡胶材料与铝杆之间的摩擦系数测试结果存在分散性,曲线存在抖动,且与加载条件有关,摩擦系数比通常意义下所得到的摩擦系数小.

b 不同加载条件对所测试材料与铝压杆之间摩擦系数的数值影响不大,只是曲线的走势稍有不同.在冲击条件下,硬质聚氨酯泡沫塑料与铝杆之间的静摩擦系数为 0.29,动摩擦系数为 0.25;硅橡胶与铝杆之间的静摩擦系数为 0.285,动摩擦系数为 0.24; MDF水泥与铝合金杆之间的静摩擦系数为 0.28~0.29,动摩擦系数约为 0.23.

### 参考文献:

- [1] 陈雁生.摩擦学基础[M].北京:航空航天大学出版社,1986
- [2] Popov V L, Psakhie E V, Shilko E V. Friction coefficient in "rail-wheel" contacts as a function of material and loading parameters [J]. Physical Mesomechanics, 2002, 5 (3): 17-24.
- [3] Zhang H, Patanella A, Espinosa H D, et al. Dynamic friction of nano-materials [J]. Shock Compression of Condensed Matter, 1999: 1 225-1 228.
- [4] Prakash V. Time resolved friction with applications to high speed machining[J]. Tribology Transactions, 1998, 41 (2): 189-198.
- [5] Rajagopalan S, Prakash V. A modified torsional Kolsky bar for investigating dynamic friction [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39 (4): 295-303.
- [6] Espinosa H D, Patanella A, Fischer M. A novel dynamic friction experiment using a modified Kolsky bar apparatus[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40 (2): 138-153.
- [7] 机械设计手册(第二版)[M].北京:化学工业出版社,1989.

## Testing of Friction Coefficients of Material Loaded by Shock Wave

L N Yu-liang, LU Fang-yun, CUI Yun-xiao

(*Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

**Abstract:** Three materials an MDF concrete, rigid polyurethane foam, and rubber were selected to investigate their friction behavior when they were loaded by compressive pulse. A new developed split Hopkinson compression-shear bars were built up, which can test specimens in pressure and shear loading. The results showed that the friction coefficients among three materials were all time dependent, and were sensitive to the loading amplitude. At impacting condition, rigid polyurethane foam, rubber, and MDF concrete exhibited static friction coefficient of 0.29, 0.285, 0.28~0.29, and dynamic friction coefficient of 0.25, 0.24, 0.23 respectively when running against aluminum lever.

**Key words:** friction coefficients, SHPB, shock pulse

**Author:** LU Fang-yun, female, born in 1963, Professor, e-mail: ansen\_liang@163.com