

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.06.001

界面摩擦过程黏滑行为特征研究*

龚中良

(中南林业科技大学机电工程学院 湖南长沙 410004)

摘要: 通过建立界面摩擦系统动力学模型, 并利用原子力显微镜测试云母、石英以及单晶硅片界面摩擦条件下的黏滑行为特征, 探讨摩擦系统内外因素对黏滑频率、幅值的影响。结果表明: 同一实验条件下, 不同材料的黏滑频率与黏滑波动幅值不同; 缓慢滑动时, 黏滑的频率主要取决于表面势场的频率, 波动幅值取决于表面势场强度, 随着滑动速度逐渐增大, 黏滑频率同时取决于表面势场频率和探针系统的固有频率, 波动幅值取决于表面势场强度和探针系统结构; 滑动速度较大时, 黏滑频率及波动幅值主要取决于探针系统, 且随着滑动速度增大, 波动幅值逐渐减小。

关键词: 黏滑; 界面摩擦; 原子力显微镜

中图分类号: TH117.2 文献标识码: A 文章编号: 0254-0150(2011)6-001-3

Dynamic Study on Stick-slip Friction Based on Non-continuous Energy Dissipation

Gong Zhongliang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: By establishing interfacial friction dynamic model, and using the atomic force microscope to test the stick-slip friction behavior of mica, quartz and silicon chips under interfacial friction, the influence of friction system external factors was explored. The results show that the stick-slip frequency and amplitude are different from the materials under the same experimental condition. The stick-slip frequency depends mainly on the frequency of surface potential field, and the stick-slip amplitude on the potential strength under the slow sliding. As the sliding velocity increasing, the stick-slip frequency depends on the surface potential field frequency and the natural frequency of probe system, the stick-slip amplitude depends on the surface potential field strength and probe system structure. When the sliding velocity is large, the stick-slip frequency and amplitude depend primarily on the probe system, and the fluctuation amplitude decreases gradually with the sliding velocity increasing.

Keywords: stick-slip friction; interfacial friction; atomic force microscope

自1930年S Thomas揭示摩擦振动现象以来, 人们对滑动摩擦过程中的黏滑行为进行了较为深入的研究。人们普遍认为摩擦过程中摩擦因数的变化是导致摩擦系统出现黏滑行为的根本原因^[1-3]。如董云开等^[4]实验研究了小载荷湿度环境下表面的微摩擦行为, 认为高湿度下是否出现黏滑现象取决于这种界面间力的竞争关系。随着纳米技术的发展, 人们试图从微观角度研究摩擦的起因, 进而探讨黏滑行为产生的机制。自从Mate等^[5]首次用原子力显微镜观测到探针在云母表面存在黏滑行为以来, 越来越多的研究者

利用原子力显微镜、分子动力学模拟和简化模型等^[6-13]方法对微观机制下的黏滑行为进行研究分析, 并得到了许多有价值的成果。研究发现, 在微观状态下, 摩擦界面粗糙峰的犁沟效应极其微弱, 因而能量耗散机制与宏观状态有明显的不同, 且黏附作用成为引起摩擦黏滑行为的主要因素。本文作者利用本原4000原子力显微镜, 分别测量探针在硅片、石英、云母表面的摩擦力变化情况, 探讨不同条件下界面摩擦黏滑行为的规律。

1 黏滑行为动力学模型

假设原子力显微镜探针系统的刚度系数为 k , 系统质量为 m , 界面势能场激励为正弦激励, 即 $F(t) = H\sin\omega t$, 其中 H 为激励力幅, ω 为激励频率。则探针的动力学方程为

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = H\sin\omega t \quad (1)$$

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(50875087); 中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金资助项目(104-0151)。

收稿日期: 2010-12-23

作者简介: 龚中良(1965—), 男, 博士, 教授, 目前主要从事摩擦润滑技术及理论研究。E-mail: gzlaa@163.com。

解式(1)得

$$x(t) = \frac{H}{(\omega^2 m + k)} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t - \sin \omega t \right) \quad (2)$$

式中: $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为探针系统固有频率。

设云母的晶格常数为 a , 则表面势场激励频率 $\omega = v/a$, 探针波动幅值为

$$A(v) = \frac{Ha^2}{v^2 m + ka^2} \quad (3)$$

取 $a = 1 \times 10^{-8} \text{ m}$, $H = 1 \times 10^{-10} \text{ N}$, $m = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$, $k = 5 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, 对式(3)仿真计算, 结果如图1所示。可以看出, 当滑动速度较低时, 探针系统的波动幅值基本不变, 而当滑动速度达到一定值后, 波动幅值迅速下降, 当滑动速度较大时, 波动幅值趋近于0, 表明提高滑动速度可以有效减轻滑动过程中的黏滑行为。

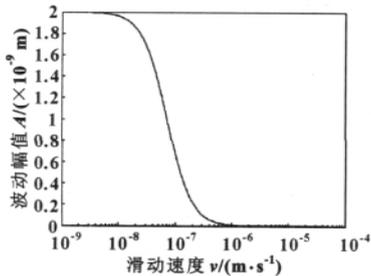


图1 波动幅值随滑动速度变化的计算曲线
Fig 1 The curve of fluctuation amplitude with the changing of sliding velocity

图2为根据式(2)计算得到的不同滑动速度下系统波动状态。可以看出, 在滑动速度很低时, 系统的波动主要是由表面势场变化而引起的强迫振动, 随着滑动速度的增大, 探针的波动为系统的自由响应与强迫响应复合运动, 当滑动速度很大时, 主要表现为探针系统的自由响应。由于在滑动速度发生改变时, 引起黏滑行为的主导因素发生改变, 因为系统黏滑的行为随滑动速度变化的频谱中存在一峰值区域。

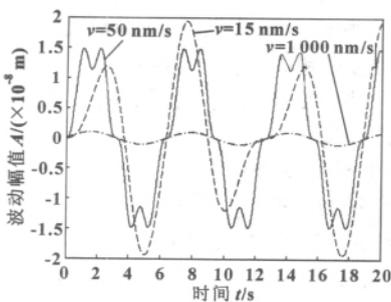


图2 不同滑动速度下系统波动状态分析图
Fig 2 The curve of fluctuation under different sliding velocity

2 实验仪器及试样

本实验采用本原纳米仪器公司生产的 ~~CSPM4000 原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, 简称 AFM)~~ 作为测量设备。实验中控制湿度基本恒定, 以减小湿度对实验结果的影响。

为了实现隔振, 原子力显微镜制造厂家已配备有光学气垫平台用于隔振。该隔振平台的固有频率为 $5 \sim 10 \text{ Hz}$, 这对于常规大扫描范围的测试已经足够, 但本实验扫描范围很小, 要求的精度很高, 为了尽可能减小外部机械振动对测试造成的影响, 在原子力显微镜底座和气势平台之间增加软泡沫垫和橡胶垫, 以进一步隔离地面传来的机械振动。另外, 在原子力显微镜外部加密封罩, 以减小空气中声波对测试造成的影响。实验过程中, 相对湿度控制在 $RH40\% \sim 60\%$ 。

在本实验中, 选用优质白云母 (Mica)、石英 (Quartz) 以及单晶硅片 (Si) 作为试样材料。其中, 云母和石英均为具有层状结构的晶体材料, 很容易解理得到新鲜的表面, 其表面达到分子级光滑, 可以避免粗糙峰的作用对滑动摩擦的影响, 是用于微观摩擦学研究的理想材料。另外, 云母和石英的化学性质稳定, 可以减小表面氧化层的影响。实验中, 石英和云母的洁净表面通过试样解理得到, 单晶硅的洁净表面通过用无水乙醇擦拭清洗得到。为避免表面污染, 每组实验限制在试样解理或清洗后 1 h 内完成。

原子力显微镜的探针有多种类型, 大部分是用硅制成, 有不同的尺寸和覆盖层, 其物理性质如刚度系数等也有所不同, 需要根据具体的测试要求选择适当的探针。常用的有2种类型: 三角形探针和矩形探针。三角形探针比较稳定, 适合测量表面形貌, 而矩形探针对横向力更敏感, 且其机械性能参数的计算比较简单和精确, 适合力的测量。本实验主要进行摩擦力测量, 因此选用 Mikromasch 公司制造的单晶硅矩形探针。

3 不同材料表面摩擦力波动分析

分别选取石英、硅、云母3种材料作为表面摩擦力测试实验, 每个试样在同一实验条件下重复3次, 取平均值作为实验的结果。图3~5分别示出了石英、硅、云母材料表面摩擦力变化曲线。实验参数为: 扫描频率 1 Hz , 扫描范围 5 nm 。

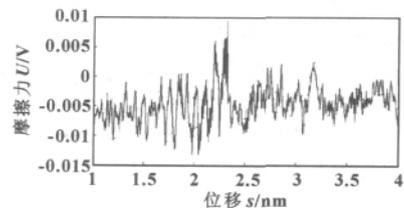


图3 石英表面摩擦力变化曲线
Fig 3 The changing of friction force on quartz surface

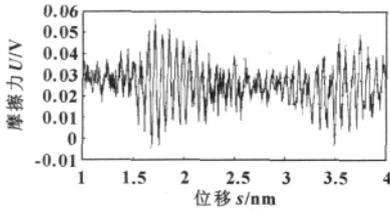


图4 硅表面摩擦力变化曲线

Fig 4 The changing of friction force on silicon surface

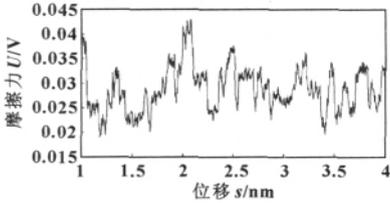


图5 云母表面摩擦力变化曲线

Fig 5 The changing of friction force on mica surface

从图中可以看出, 3种材料表面其摩擦力是非恒定的, 均呈现出周期变化的趋势。其中石英表面摩擦力波动频率约 180 Hz, 摩擦力波动范围约为 0.015 V; 硅表面摩擦力波动频率约 150 Hz, 摩擦力波动范围约为 0.050 V; 云母表面摩擦力波动频率约 75 Hz, 摩擦力波动范围约为 0.020 V。显然, 在相同实验条件下, 不同材料表面的摩擦力变化趋势不同。摩擦力波动特性显然与材料结构有关。

4 不同滑动速度下表面摩擦力波动分析

选取云母作为实验试样, 在不改变扫描频率前提下, 分别测试不同扫描范围(滑动速度)时, 云母表面摩擦变化情况。表1为扫描范围从 5~2 500 nm 变化时云母表面的摩擦力波动实验结果。

表1 扫描速度变化时云母表面的摩擦力波动实验结果
Table 1 The experimental results of friction force fluctuation on mica surface with the changing of scanning velocity

滑动速度 $v / (\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	波动频率 f / Hz	波长 λ / nm	波动幅值 A / V
10	75	0.133	0.020
20	50	0.400	0.030
50	90	0.556	0.040
100	220	0.455	0.035
200	540	0.370	0.025
1 000	550	1.818	0.021
2 000	500	4.000	0.007
5 000	320	15.625	0.005 5

图6示出了表面摩擦力波动频率、幅值随滑动速度变化的曲线。为了更大范围表达摩擦力波动频率及波动幅值随滑动速度的变化, 在图中滑动速度采用对数坐标。

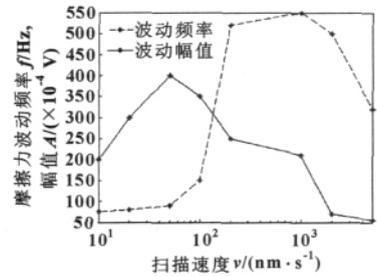


图6 摩擦力波动频率、幅值随滑动速度变化
Fig 6 The changing of fluctuation amplitude and frequency with the sliding velocity

在缓慢滑动阶段, 随着滑动速度增大, 摩擦力波动频率迅速增加, 当滑动速度达到一定值后, 其波动频率基本不再增加, 当滑动速度很大时, 表面摩擦力波动频率迅速减小, 显然实验结果与理论分析结论一致。

同样, 在缓慢滑动阶段, 摩擦力波动幅值随滑动速度增大而增大, 当达到一定值后, 波动幅值迅速减小, 当滑动速度很大时波动幅值趋于0, 即黏滑现象逐渐消失。显然, 理论曲线与实验曲线在缓慢滑动阶段存在一定的差异, 这是因为实验过程中, 当滑动速度较低时, 在低频激励作用下, 振动幅值由于系统阻尼作用影响了系统的输出。当扫描速度较大时, 理论分析结论与实验结果一致。

5 结论

(1) 界面摩擦过程中, 不同材料的黏滑频率与黏滑波动幅值不同, 表面滑动摩擦过程中的黏滑行为与材料的表面势能场、晶体结构及探针系统结构等因素有关。

(2) 在缓慢滑动时, 黏滑的频率主要取决于表面势能场的频率, 黏滑的波动幅值取决于表面势能场的强度。随着滑动速度逐渐增大, 黏滑的频率取决于表面势能场频率和探针系统的固有频率, 黏滑的波动幅值取决于表面势能场强度和探针系统结构,

(3) 当滑动速度较大时, 黏滑的频率及黏滑波动的幅值主要取决于探针系统固有频率, 且随着滑动速度的增大, 波动幅值逐渐减小。

参考文献

【1】温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 3版. 北京: 清华大学出版

- 3234 primary knee arthroplasties implanted over a 26-year period: a study of eight different implant designs [J]. *Knee* 2006, 13(1): 7-11.
- 【3】葛世荣, 王成焘. 人体生物摩擦学的研究现状与展望 [J]. *摩擦学学报* 2005 25(2): 186-191.
Ge Shirong, Wang Chengtao. State-of-the-art and prospect of biotribology in human body [J]. *Tribology* 2005 25(2): 186-191.
- 【4】Unsworth A. Recent developments in the tribology of artificial joints [J]. *Tribology International* 1995 28(7): 485-492.
- 【5】陈立奇, 张德坤, 张劲松. 聚乙烯醇基复合水凝胶的力学性能及摩擦系数评价 [J]. *生物医学工程学杂志* 2009 26(5): 1021-1024.
Chen Liqi, Zhang Dekun, Zhang Jinsong. The appraisal of mechanical properties and friction coefficient of PVA hydro-gel [J]. *Journal of Biomedical Engineering* 2009 26(5): 1021-1024.
- 【6】胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45[#]钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究 [J]. *摩擦学学报* 2010 30(1): 46-52.
Hu Tianchang, Hu Litian, Ding Qi. Tribological properties of laser textured surfaces of 45[#] steel under dry friction [J]. *Tribology* 2010 30(1): 46-52.
- 【7】钱善华, 王庆良. 牛膝关节软骨的摩擦行为研究 [J]. *摩擦学学报* 2006 26(5): 397-401.
Qian Shanhua, Wang Qingliang. Research on friction behavior from bovine knee articular cartilage [J]. *Tribology* 2010 26(5): 397-401.
- 【8】沈艳秋, 张德坤, 钱善华, 等. 聚乙烯醇/纳米羟基磷灰石复合水凝胶溶胀机制和启动摩擦性能研究 [J]. *润滑与密封*, 2009 34(5): 42-46.
Shen Yanqiu, Zhang Dekun, Qian Shanhua, et al. Research on the swelling mechanism and friction properties of start-up for polyvinyl alcohol/hydroxylapatite composite hydrogel [J]. *Lubricant Engineering* 2009 34(5): 42-46.
- 【9】闫普选, 朱鹏, 黄丽坚, 等. 聚酰亚胺多孔含油材料的摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报* 2008 28(3): 272-276.
Yan Puxuan, Zhu Peng, Huang Lijian, et al. Study on tribological properties of porous polyimide containing lubricants [J]. *Tribology* 2008 28(3): 272-276.
- 【10】闫普选, 朱鹏, 谷和平, 等. 热塑性聚酰亚胺多孔材料制备工艺的探讨 [J]. *润滑与密封* 2007 32(1): 79-82.
Yan Puxuan, Zhu Peng, Gu Heping, et al. Study of preparation technology for thermoplastic polyimide porous material [J]. *Lubricant Engineering* 2007 32(1): 79-82.
- 【11】任靖日, 赵德金, 蔡荣勳. 微小交叉凹槽型表面的摩擦特性 [J]. *润滑与密封* 2009 34(9): 29-32.
Ren Jingri, Zhao Dejin, Cai Youngxun. Friction properties of micro-crosshatch grooved surface pattern [J]. *Lubricant Engineering* 2009 34(9): 29-32.
- 【12】胡宁宁, 葛世荣. 多孔阵列阳极氧化铝膜润滑性能的 Stribeck 研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2009 38(6): 851-855.
Hu Ningning, Ge Shirong. Study of the lubrication state of nano porous anodic aluminum oxide template based on stribeck curves [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2009 38(6): 851-855.
- (上接第3页)
- 【2】李春波. 摩擦振动(二): 动摩擦力与滑动速度的关系 [J]. *润滑与密封* 1983 8(6): 49-55.
- 【3】Li Chunbo, Pavelescu D. The friction-speed relation and its influence on the critical velocity of stick-slip motion [J]. *Wear*, 1982 82(3): 277-289.
- 【4】董云开, 刘莹, 张向军, 等. 环境湿度下硅材料表面的黏滑行为及其抑制 [J]. *润滑与密封* 2007 32(4): 1-5.
Dong Yunkai, Liu Ying, Zhang Xiangjun, et al. Control of stick-slip phenomenon on silicon interface under relative humidity conditions [J]. *Lubrication Engineering* 2007 32(4): 1-5.
- 【5】Mate C M, McClelland G M, Erlandsson R. Atomic-scale friction of tungsten tip on a graphite surface [J]. *Phys Rev Lett*, 1987 59(17): 1942-1945.
- 【6】Albert I, Tegzes, Albert R. Stick-slip fluctuations in granular drag [J]. *Phys Rev E* 2001 64: 031307.
- 【7】Riedo E, Ghecco E, Benaewitz, et al. Interaction potential and hopping dynamics governing sliding friction [J]. *Phys Rev Lett* 2003 91: 084502.
- 【8】Schinneisen A, Jansen L, Fuchs H. Tip-jump statistics of stick-slip friction [J]. *Phys Rev B* 2005 71: 245403.
- 【9】Reimann P, Evstigneev M. Nonmonotonic velocity dependence of atomic friction [J]. *Phys Rev Lett* 2004 93: 230802.
- 【10】Rozman M G. Origin of slick-slip motion in a driven two-wave potential [J]. *Phys Rev E* 1996 54: 6485.
- 【11】Mulliah D, Kenny S D, Smith Roger. Modeling of stick-slip phenomena using molecular dynamics [J]. *Phys Rev B* 2004, 69: 205407.
- 【12】Sills S, Ovmey R M. Creeping friction dynamics and molecular dissipation mechanisms in glassy polymers [J]. *Phys Rev Lett* 2003 91: 095501.
- 【13】罗彬宾. 原子尺度下黏滑的研究 [J]. *机械* 2008 35(1): 14-15.
Luo Binbin. Research on stick-slip at atomic scale [J]. *Machinery* 2008 35(1): 14-15.