



龚中良

界面摩擦过程热力耦合行为实验研究

龚中良¹, 黄平²

(¹ 中南林业科技大学 机电工程学院, 长沙 410004;

² 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 利用原子力显微镜, 分别以硅片、石英及云母作为实验样本, 测试不同载荷和不同滑动速度下的摩擦力变化, 探讨界面摩擦过程中各参数对系统摩擦学性能的影响规律。实验表明: 摩擦力随载荷的增加而增大, 而不同材料的摩擦力随载荷增加而增大的趋势不一致, 界面摩擦过程中的摩擦学行为与材料的微观结构密切相关。缓慢滑动时, 滑动摩擦系数随相对滑动速度的增加而增大; 当滑动速度超过某一区域后, 其滑动摩擦系数随相对滑动速度的增加而减小。

关键词: 界面摩擦; 热力耦合; 滑动摩擦系数

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2011)04-0652-04

Experimental Research on the Thermo-dynamic Coupling Behavior on Contact Surface Friction

Gong Zhongliang¹, Huang Ping²

(¹ College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004;

² School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Using silicon, quartz and mica as experimental samples, the changing of friction force were tested by an atomic force microscope (AFM). The experimental results show that the load-friction force curves are different for silicon chip, quartz and mica. This means that the tribology behaviors have close relation with the microscopic structure of the material during the contact surface friction. The friction force increases with the increase of the load; the sliding friction coefficient increases with the increase of the relative sliding velocity when the sliding velocity is slow, but decreases slowly with the increase of the velocity when the sliding velocity is greater than a certain value.

Key words: contact surface friction; thermo-dynamic coupling; sliding friction coefficient

长期以来,人们在摩擦起因方面进行了大量的研究,提出各种摩擦成因理论,如克拉盖尔斯基^[1,2]提出了分子—机械摩擦理论,英国学者 Bowden^[3]等提出了摩擦的粘着学说:在外载荷的作用下,两表面的微凸体之间的接触压力很大,造成接触点冷焊。当相对滑动时,粘着的点被剪断。如果两表面的硬度不同,硬的微凸体还会在软表面上产生犁沟。剪切力与犁沟作用的总和就构成了摩擦阻力。Ed-

wards 和 Halling^[4]在粘着理论的基础上进一步提出“微凸体相互作用理论”,从而适用于具有实际微凸体高度分布并考虑加工硬化影响的表面摩擦。目前多数研究者认为,摩擦的起源主要与表面粗糙度的存在有关,涉及粗糙峰的啮合、变形、粘着、剪切和犁沟等,在此基础上形成了当前宏观摩擦理论的基本框架。然而,人们发现,即使把负荷引起的塑性变形、粘着和粗糙度的影响抑制到最低限度,实现原子级光滑表面的分子接触时,即达到所谓的“界面摩擦^[5]”状态时摩擦依然存在,但是其规律却与宏观摩擦有明显的不同^[6]。显然此时分子和原子间力的相互作用成为摩擦的主要起因。为此,研究者们先后提出了微观摩擦能量耗散的“鹅卵石”模型^[7]、

收稿日期: 2009-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875087)和清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目(SKLTkF08B04)资助

作者简介: 龚中良(1965-),教授,博士,研究方向为摩擦润滑技术及理论, gzlzla@163.com

Independent Oscillator (IO) 模型^[8]、Frenkel-Kontorov (FK) 模型^[9]和 FK-Tomlinson (FKT) 模型^[10]及电子激励摩擦模型^[11], 并利用上述模型对界面摩擦过程能量耗散进行了大量的研究。

研究表明, 在界面摩擦状态, 影响摩擦学过程的主要因素为摩擦材料微观结构、表面能、表面形貌、相对滑动速度及摩擦系统温度等。然而, 摩擦过程中各因素对系统摩擦学性能的耦合作用机理仍未清楚, 致使现有的摩擦理论只能解释结果而不能准确预测结果^[12]。因此, 在工程上, 往往通过实验获得各种材料的摩擦系数。近年来, 随着原子力显微镜和摩擦力显微镜的广泛使用, 人们对原子尺度摩擦的微观机理有了更进一步的认识^[13], 部分学者试图从摩擦成因上来研究摩擦系数的计算模型。如许中明等^[14]根据独立振子模型, 利用接触界面势垒方法, 分别推导了滑动摩擦系数与静摩擦系数的计算公式, 分析了表面能、晶格常数、比例参数等对摩擦系数的影响。文献[15]作者从热力耦合角度推导了界面摩擦条件下滑动摩擦系数计算模型, 并分析了摩擦系统中各微观参数对滑动摩擦系数的影响规律。由于各种模型在建立时均进行了简化和假设, 因此, 计算模型所得出的结论有待实验验证。

笔者利用原子力显微镜对三种典型材料的摩擦力进行测试, 从实验角度探讨界面摩擦过程中系统各参数对摩擦的影响规律, 并结合文献[15]所建立的模型, 分析理论模型结论与实验结果存在差异的原因。

1 实验仪器及试样

本实验采用本原纳米仪器公司本原公生产的 CSPM4000 原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, 简称 AFM) 作为测量设备。在大气环境下, 样品表面很容易吸附水膜和其它吸附物, 由于任何表面吸附物都有可能影响测量结果。因此, 定量测量需要在精确控制的环境中进行, 最理想的条件是在超高真空 (UHV) 系统中。然而超高真空系统实现很困难且费用非常高, 因此本实验将在大气环境中进行, 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 Hz ~ 10 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氛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 RH 为 40% ~ 60%。如果环境湿度超过这一范围, 在密封罩内用干燥剂无水 CaCl₂ 来调节湿度。实验时的温度和湿度值用 Oregon Scientific 公司生产的 JB913R 型数字温湿度计测量。

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酒精擦拭清洗得到。为避免表面污染, 每组实验限制在试样解理或清洗后 1 小时内完成。

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, 其物理性质如弹性常数等也有所不同, 需要根据具体的测试要求选择适当的探针。常用的有两种类型: 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。

2 摩擦系统参数对摩擦学性能的影响

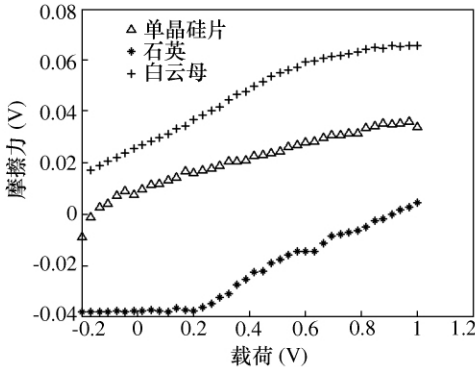
根据文献[15]理论模型的分析结论, 影响系统摩擦学性能的主要参数有: 相互摩擦表面间的相对滑动速度及反映摩擦材料微观结构的特征参数如晶格常数、原子质量等。因而选取具有不同晶体结构的硅片、石英、云母三种材料, 通过固定扫描范围增加扫描频率和固定扫描频率扩大扫描范围的方式改变相对滑动速度, 分别测试三种试样的滑动摩擦力变化。实验的环境温度为 26 °C, 相对湿度为 56%。为了尽量做到实验数据的准确性, 每种实验条件下均进行五次重复实验, 取同点数据的平均值作为实验结果值。

2.1 载荷-摩擦力关系

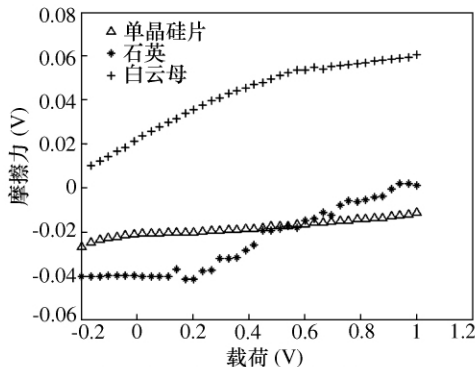
实验中, 设定扫描频率 1 Hz, 扫描范围分别为 100 nm、1000 nm、2500 nm, 测试在三种不同滑动速度 (100 nm/s, 1000 nm/s, 2500 nm/s) 下三种试样的载荷-摩擦力关系。

图 1 为相同扫描频率不同扫描范围下三种材料的摩擦力实验测试结果。从图中可以看出, 所选三

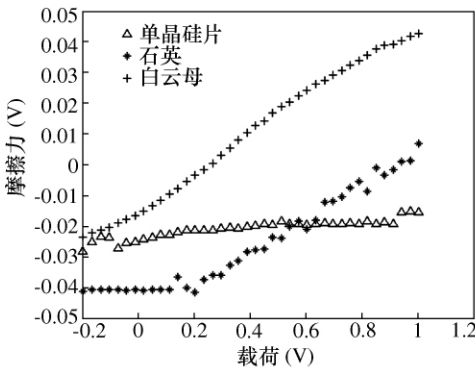
种材料的载荷-摩擦力曲线总体上为摩擦力随载荷的增加而增大,而不同材料的摩擦力随载荷增加而增大的趋势不一致。



(a) 扫描频率为 1 Hz,扫描范围为 100 nm



(b) 扫描频率为 1 Hz,扫描范围为 1000 nm



(c) 扫描频率为 1 Hz,扫描范围为 2500 nm

图1 载荷-摩擦力曲线

对于云母材料,在载荷较小时,摩擦力随载荷增加而呈线性增加,表明此时的摩擦系数基本不变,而当载荷较大时,摩擦力随载荷增加而增大的趋势逐渐减小,表明此时的摩擦系数随载荷增大而减小。出现这种现象的原因与探针和材料表面的接触有关。当载荷较小时,接触面积与载荷的增加成正比,而随着载荷的进一步增加,实际接触面积与名义接触面积接近。因此,实验结果与文献[15]中载荷与摩擦系数之间的关系模型所得出的结论基本一致。

对于硅材料,在载荷较小时,摩擦力随载荷增加

而迅速增加,随着载荷进一步增加,摩擦力与载荷的增加成正比关系。这表明,在较小的载荷时,摩擦系数为一较大值,随着载荷的增加,摩擦系数逐步减小并趋于稳定值。上述结论表明,载荷很小时,由于探针也为硅材料,说明了材料的相称度愈高,摩擦时的摩擦系数愈大。而当载荷较大时,其变化规律与文献[15]文中建立的理论模型所得结论一致。

对于石英材料,在实验给出的三中滑动摩擦速度下,其摩擦力曲线均表明呈现出一种趋势,即在载荷较小时,如载荷 < 0.2 V 时,摩擦力不随载荷的增加而增大,表明在此时滑动摩擦系数随载荷增加而减小;当载荷 > 0.2 V 时,滑动摩擦力随载荷增加而呈线性增加,表明此时摩擦系数基本保持不变。

显然,三种试样的实验结果与理论分析(当实际接触面积接近名义接触面时)结论遵守相同的规律,即滑动摩擦系数随载荷的增加而呈减小。但由于材料不同,其变化趋势有所不同。

2.2 相对滑动速度-摩擦力关系

图2~图4分别为三种材料在不同相对滑动速度下摩擦力随滑动速度的变化的曲线。本实验中相对滑动速度改变是通过改变扫描范围而不改变扫描频率而实现的。由于云母试样在较低的滑动速度时摩擦力上升很快,为了更直观地表示实验结果,图4中的速度坐标采用对数分度。

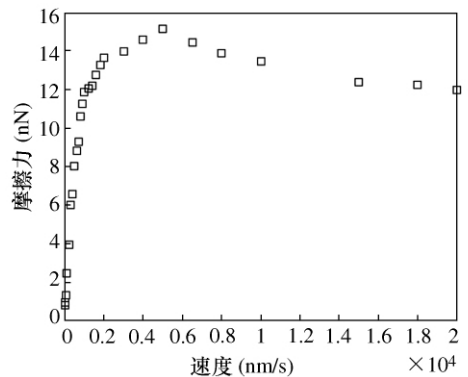


图2 硅片试样摩擦力随速度变化曲线

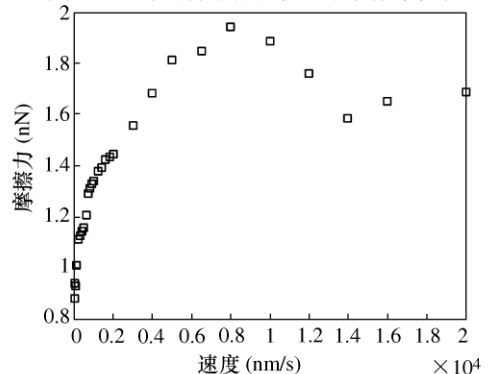


图3 云母试样摩擦力随速度变化曲线

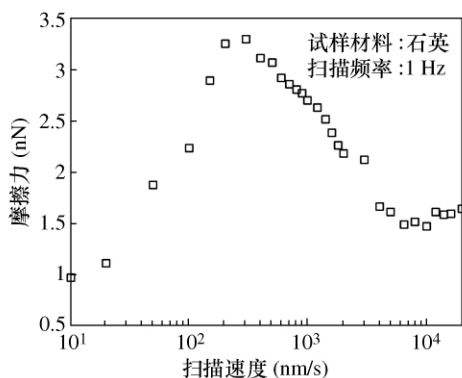


图4 石英试样摩擦力随速度变化曲线

显然,三种材料的摩擦力随速度变而变化的趋势不完全一致,因此,必须针对不同的材料进行实验结果的分析。

在文献[15]中,我们基于热力耦合建立了滑动摩擦系数的计算模型,探讨了滑动摩擦系数与相对滑动速度之间的关系,理论研究表明滑动摩擦系数随相对滑动速度增加而增大。虽然在本实验中,三种材料的摩擦系数与速度的关系呈现不同的趋势。但三种材料在滑动速度较低时,摩擦力均随滑动速度的增大而增加。显然在此阶段实验结果的趋势与理论分析结论基本一致。但当速度超过一定的范围后,滑动摩擦力(反映了滑动摩擦系数)随滑动速度的增加而逐渐减小,在此阶段的实验结果与笔者前述的理论模型所得的结论存在一定的差异。

从图2可以看出:对于晶体硅材料,当滑动速度 <6000 nm/s的区域,滑动摩擦系数随速度的增加而迅速增大,当滑动速度 >6000 nm/s时,滑动摩擦力随速度增加而缓慢减小。对于云母而言,当滑动速度 <8000 nm/s的区域,滑动摩擦系数随速度的增加而迅速增大,当滑动速度 >8000 nm/s时,滑动摩擦力随速度增加而缓慢减小,见图3。而对石英材料,在滑动速度 <400 nm/s的区域,滑动摩擦系数随速度的增加而迅速增大,当滑动速度 >400 nm/s时,滑动摩擦力随速度增加而减小,见图4。显然,材料不同其滑动摩擦系数随相对滑动速度变化的趋势不同,因而必须进行具体的分析。

3 实验结果与理论模型结论差异分析

首先,在前述的理论模型中,影响滑动摩擦系数的参数是多样的,实际上,这些参数往往不是独立的,彼此间具有一定的内在联系,这些联系不仅取决于材料的微观结构,而且与材料的物理性质及热力学性质密切相关。因此,在研究各参数对摩擦系数影响时不

能独立地考虑单一因素的作用。文献[15]中图3-2为其他参数不变时,相对滑动速度变化对滑动摩擦系数的影响规律,因而不能完全反应摩擦过程的真实情况,应根据不同的摩擦工况进行修正。

其次,在理论模型中只考虑了摩擦界面表面层原子的能量耗散,而实际上,在摩擦过程中,表面层原子与其基体层原子互相作用,因而存在能量的传递,进而影响表面原子的能态。作者在文献[16]中通过对界面摩擦过程中能量的非连续耗散分析表明,表面原子能态愈低,其吸收能量的能力愈弱,即摩擦功耗愈少。显然,在滑动速度较小时,表面层原子由于能较充分地向周围的原子传递能量,因此摩擦界面处于低能态状态,随着滑动速度的增加,表面能态不断增高,吸收能量的能力愈强,因此,在一定的滑动速度范围内,表现为摩擦系数随滑动速度增加而增大。但当滑动速度较大时,由于滑动过程中单位时间内进入摩擦区域的低能态原子数增多,从而导致摩擦区域内原子平均吸收能量的能力减弱,因而表现出摩擦系数随滑动速度增加而逐渐降低的趋势。

由于不同材料的晶格类型、原子质量及原子间结合力不同,因而在相同的激励力场作用下所表现出的运动状态也不同。因此不同的材料对于界面能量的吸收不尽相同,表现为如石英在较低的速度时就出现摩擦力随滑动速度增加而呈减少的趋势。因此,必须针对具体的摩擦工况,对于文献[4,15]所建立的理论模型进行修正,尤其在摩擦速度较大的时候,必须结合摩擦材料微观结构及材料的热力学性质进行修正。

4 结论

界面摩擦时滑动摩擦系数大小与材料的微观结构及材料的热力学性质有关;摩擦力随载荷增加而增大,不同材料的摩擦力随载荷增加而增大的趋势不一致,摩擦系数随载荷变化而变化;缓慢滑动时,由于系统的热效应不明显,滑动摩擦系数随相对滑动速度的增加而增大,表明基于经典力学和非连续耗散理论建立的滑动摩擦系数计算模型在缓慢滑动时能较好地反映系统的摩擦状态;当滑动速度较大时,其滑动摩擦系数随相对滑动速度的增加而减小,表明文献[15]中所建立的理论模型在较大的滑动速度时存在一定的局限性,在滑动速度较大时,摩擦热对摩擦学过程的激活作用变得不可忽视。因此,在理论建模时应充分考虑材料的微观结构及热力学性质。

(下转第660页)

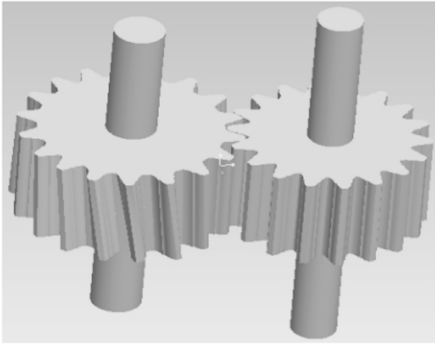


图6 弧齿直齿轮和斜齿轮的啮合图

5 结论

(1) 基于《齿轮啮合原理》和《微分几何》的知识推导了弧齿直齿轮和斜齿轮的齿面方程。

(2) 通过对齿面方程的求解,分别得出了弧齿直齿轮和斜齿轮的凸凹齿面的点阵参数,通过对点阵参数的分析得到用此点阵参数进行实体建模具有可行性。

(3) 运用 Pro/E 建模软件结合点阵参数分别建立了弧齿直齿轮和斜齿轮的左右齿面,在左右齿面的基础上运用实体造型方法分别得到了弧齿直齿轮和斜齿轮的实体模型,通过对该实体模型的研究结果表明:该齿轮传动的齿面方程的推导过程和结果的正确性,也进一步印证了该齿轮传动的理论可行性。

[参考文献]

- [1] Anderson N E, Loewenthal S H. Design of spur gears for improved efficiency[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1982, 104: 767 ~ 774
- [2] Timmerman D N. **How to Select Process Equipment Gear Drives**[S]. E/MJ-June, 1971 7
- [3] Naruse C, et al. Influence of tooth profiles upon limiting load for scoring and frictional loss of spur gear[J]. *Bulletin JSME*, 1984, 27(25)
- [4] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 机械工业出版社, 1982
- [5] 卢贤缙, 尚俊开. 圆弧齿轮啮合原理[M]. 机械工业出版社, 2003
- [6] 唐余勇. 微分几何讲义[M]. 高等教育出版社, 1985
- [7] 吴越, 杨宏斌. MATLAB 在弧齿锥齿轮齿接触分析中的应用[J]. *机械传动* 2004 (6): 33 ~ 35
- [8] 谭雪松. PRO/E2001[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004

(上接第 655 页)

[参考文献]

- [1] 克拉盖尔斯基著, 汪一麟等译. 摩擦磨损计算原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [2] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008
- [3] Bowden F P, Tabor D. **The Friction and Lubrication of Solids** [M]. Oxford: Oxford university Press, 1954
- [4] J. 霍林. 摩擦学原理[M]. 上海交通大学摩擦学研究室. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [5] Robbins M O, Krim J. Energy dissipation in interfacial friction [J]. *MRS Bulletin*, 1998, 23(6): 23 ~ 26
- [6] Krim J. Friction at the atomic scale [J]. *Scientific American*, 1996, 275: 74 ~ 80
- [7] Israelachvili J N. **Microtribology and Microrheology of Molecularly Thin Liquid Film** [M]. Modern Tribology Handbook. Bhushan B eds, New York: CRC Press LLC, 2001
- [8] Buldum A, Ciraci S. Atomic-scale of dry sliding friction [J]. *Physical Review B*, 1997, 55: 2606 ~ 2611
- [9] Van Erp T S, et al. Pinning and phonon localization in frenkel-kontorova models on quasiperiodic substrates [J]. *Physical Review B*, 1999, 60: 6522 ~ 6528
- [10] Weiss M, et al. Dry friction in the Frenkel-Kontorova-Tomlinson model: static properties [J]. *Physical Review B*, 1996, 53: 7539 ~ 7549
- [11] Popov V L. Electronic and phononic friction of solids at low temperatures [J]. *Tribology International*, 2001, 34: 277 ~ 286
- [12] Yoshitsugu K. Accuracy in tribology [A]. **Proceedings of the International Tribology Conference** [C], Nagasaki: Japanese Society of Tribologists, 2000, 3 ~ 8
- [13] 张向军, 孟永钢, 温诗铸. 原子力显微镜探针耦合变形下的微观扫描力研究[J]. *物理学报*, 2004, 53(3): 728 ~ 733
- [14] 许中明, 黄平. 考虑接触界面材料微观结构与势能参数的滑动摩擦计算研究[J]. *摩擦学学报* 2006, 26(2): 159 ~ 163
- [15] 龚中良, 黄平. 基于热力耦合的滑动摩擦系数模型与计算分析. *华南理工大学学报(自然科学版)* 2008, 36(4): 10 ~ 13
- [16] 龚中良, 黄平. 界面摩擦过程非连续能量耗散机理研究[J]. *物理学报* 2008, 57(4): 362 ~ 366