

DOI: 10.16078/j.tribology.2016.06.016

一种分析手指接触摩擦的新型试验装置

张猛, 莫继良*, 徐敬业, 周仲荣

(西南交通大学摩擦学研究所, 四川成都610031)

摘要: 手指接触摩擦行为的研究对人类生产生活具有重要的意义, 鉴于影响这一行为的因素众多, 到目前为止手指接触摩擦特性还未被深入认识. 针对当前手指接触摩擦试验中的试验变量难以控制和试验可靠性较差等问题, 设计出一种新型的试验装置并对受试者手指进行了接触摩擦重复性试验, 得出新型装置能确保手指与样品间的法向力、接触角度的稳定性, 使得试验结果具有很好的可比性和可靠性, 并证实了该试验装置能准确地考察粗糙度、接触角度等因素对手指接触摩擦过程的影响. 该装置的研制将对系统深入揭示手指接触摩擦学行为具有重要的意义.

关键词: 手指摩擦; 试验装置; 法向力; 接触角度; 摩擦系数

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2016)06-0776-05

A Newly Developed Experimental Device for Friction Analysis of Finger Touch

ZHANG Meng, MO Jiliang*, XU Jingye, ZHOU Zhongrong

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: The study on friction behavior of finger touch is significant for the human life and production. The properties of finger friction has not been recognized deeply due to the fact that the process of finger touch is influenced by a lot of factors. A newly developed experimental device was used to solve the phenomenon of un-control parameters occurred and improve the poor reliability in the current experiments, and repeated tests of finger friction were conducted by using this new-developed device. It is found that the stability of normal force and contact angle can be ensured, which made the test results of good comparability and reliability. Furthermore, the newly-developed device was also validated to accurately investigate the influence of different factors, e.g. surface roughness and contact angle, on friction behavior of finger touch. The development of this experimental device is important to further investigate and understand the friction behavior of finger touch.

Key words: finger friction; experimental device; normal force; contact angle; friction coefficient

人类通过手指触摸物体来感知物体的纹理、材质、温湿度等信息, 手指接触摩擦过程随处可见, 因此手指的摩擦学研究对工业设计、产品包装、生活和体育用品、手持式设备、人工智能装备等的设计具有重要的指导意义. 从生物力学角度而言, 手指部

位皮肤具有复杂的生理结构和力学特性^[1-2], 影响手指接触摩擦的因素众多, 这导致手指摩擦学试验的稳定性、可靠性较差, 因此设计出新型试验装置用以提高手指接触摩擦试验的可靠性, 对手指摩擦学的相关研究具有重要的意义.

Received 27 June 2016, revised 14 July 2016, accepted 22 August 2016, available online 28 November 2016.

*Corresponding author. E-mail: jlmo@swjtu.cn, Tel: +86-28-87600601.

The National Natural Science Foundation of China (51675448, 51375408) and the Program for New Century Excellent Talents in Universities of the Ministry of Education of China (NCET-13-0974).

国家自然科学基金项目(51675448, 51375408)和教育部新世纪优秀人才支持计划基金(NCET-13-0974)资助.

目前国内外关于手指接触摩擦的试验研究报道较多,其试验装置有各自的特点,Liu等^[3-4]将样品置于样品台上,手指在样品上自由滑动,利用两个力传感器分别测量手指接触摩擦过程中的法向力和摩擦力的大小.Skedung等^[5-7]直接将不同粗糙度的纸张、不锈钢、玻璃等样品置于三向力传感器上,手指在样品上自由滑动,通过传感器测量接触摩擦过程中各个方向力信号的变化.Fagiani等^[8]利用柔性机构驱动样品作直线运动,手指静止放置在样品上,从而产生相对运动,其法向力和接触角度均由试验者自行控制.Han等^[9-12]利用导向块或指套支撑手指,样品在驱动装置的驱动下作相对摩擦运动,实现了试验过程中手指接触摩擦角度的固定.总的来说,这些试验装置可大致归为两大类:(1)样品固定于力传感器上,手指在样品表面自由滑动;(2)手指自由或通过固定角度的支撑块与样品表面接触,样品和传感器由机械装置驱动与手指产生相互运动.这些研究为揭示手指的接触摩擦学行为及机理提供了重要的基础,但可以看出这些装置都存在一些共性的问题:a、手指在静止的样品上自由滑动,试验中手指施加的法向力和摩擦角度完全由受试者自行控制,导致试验中的变量难以保持唯一性;b、样品在静止的手指上滑动,虽然摩擦角度可以得到一定的控制,但法向力的大小依然由人为控制,随着摩擦运动的进行,无法保证法向力在较小的范围内波动,十分不利于试验数据的准确性.

基于此,设计出一种新型的手指接触摩擦试验装

置,实现了手指接触摩擦过程中法向力和手指角度的固定,极大提高了手指接触摩擦试验的可靠性,从而能更准确地考察各种因素对手指接触摩擦学行为的影响.

1 试验装置结构及工作原理

图1示出了试验装置的结构简图,法向力加载装置(1)安装并固定在卡槽(2)上,手指放置在手指托架(3)上.法向力加载装置及手指托架安装在可调节高度的支撑架(4)上.法向力加载装置可在卡槽内移动及固定,实现不同加载条件,手指托架可以旋转并固定,实现不同接触角度条件.接触摩擦样品(5)通过样品台(6)固定在应变式两向力传感器(7)上,力传感器通过支架(8)安装在滚珠丝杠驱动装置(9)上.滚珠丝杠驱动装置及支撑架安装在底座(10)上.

试验前将手指第三指节(或拇指第二指节)放于圆弧形的手指托架上,旋转托架达到预定的试验角度后锁紧螺钉将其固定.在卡槽内向下移动法向力加载装置,使其下端圆弧处与手指第一指节相接触,对手指进行加载,并通过数据采集系统(11)读出法向力的大小,当法向力达到预设值时锁紧螺钉固定加载装置.此时,手指与接触摩擦样品之间的法向力及接触角度均固定.滚珠丝杠驱动装置驱动接触摩擦样品与固定的手指之间形成直线摩擦运动.测试系统实物图见图2,手指和样品表面接触角度定义为 θ ,设置好试验装置后在手指上做标记1和标记2,以保证手指在每个样品表面的接触区域相同.

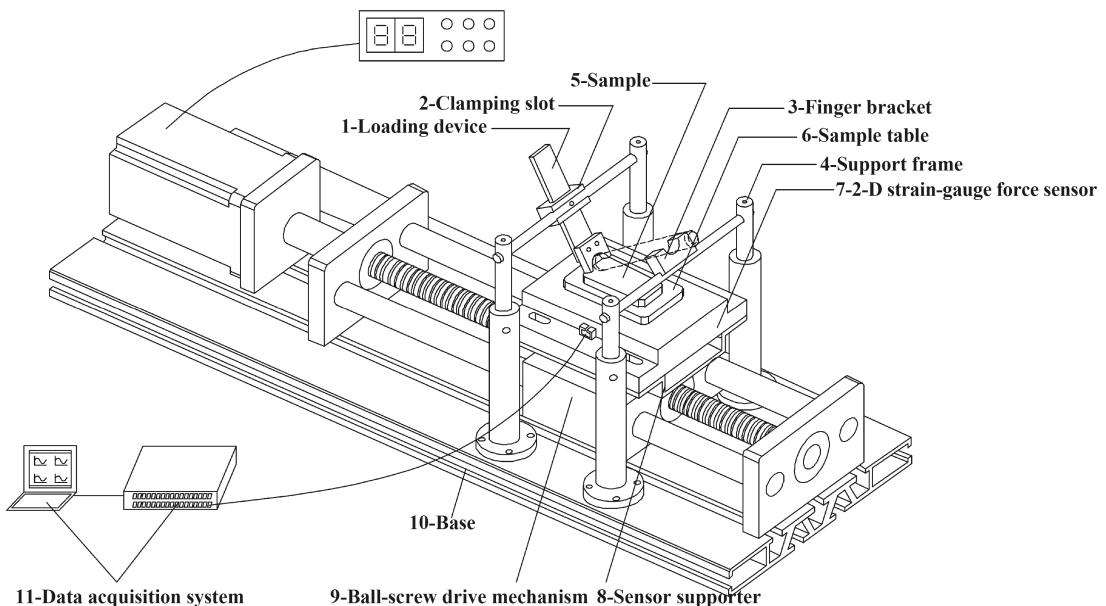


Fig. 1 The structure of experimental device

图1 试验装置的结构示意图

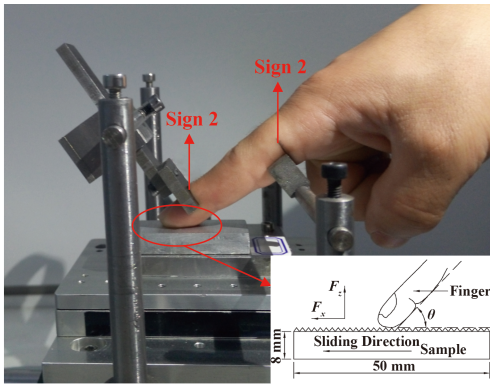


Fig. 2 Physical diagram of testing system

图2 测试系统的实物图

2 试验部分

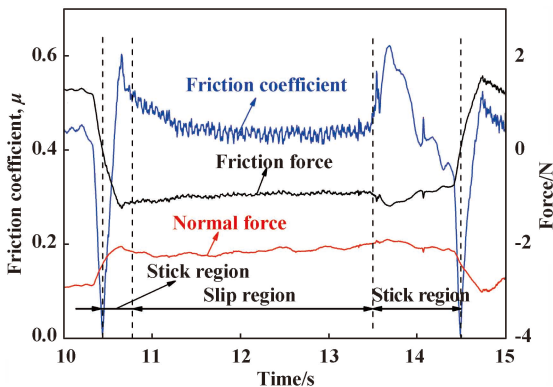
2.1 试验材料

为了验证试验装置的可靠性,选取日常生活中常用的6061型铝镁合金作为手指接触摩擦试验材料,加工成尺寸为50 mm×20 mm×8 mm的试样块,并分别采用目数为36、80、240、400、800的砂纸沿着一个方向对其表面进行打磨,从而样品表面形成沿着一个方向均匀分布的犁沟,对应样品编号分别为a、b、c、d、e.使用NanoMap500DLS轮廓仪测量样品表面粗糙度(R_a),探针扫描方向垂直于样品表面犁沟,结果见表1.考虑到日常生活中人体触摸物体时右手食指的使用频率较高,故选取健康青年无损伤的右手食指作为试验对象,试验前分别用酒精擦拭手指指尖皮肤和样品表面,试验中手指滑动方向与犁沟方向垂直.

表1 样品表面粗糙度

Table 1 The roughness of sample surface

| Sample number | a | b | c | d | e |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Roughness (R_a) | 4.056 | 2.367 | 0.750 | 0.461 | 0.286 |



(a) By using the new device

2.2 试验参数

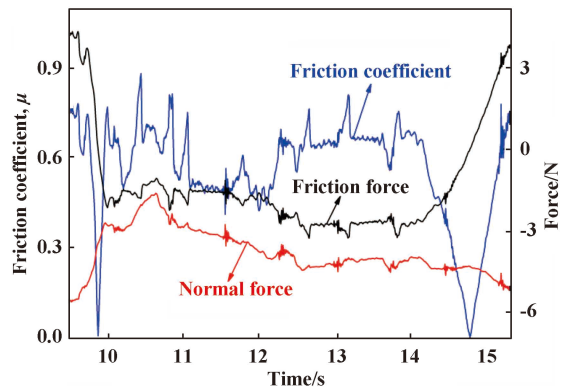
试验中样品的滑动速度为10 mm/s,环境温度为 20 ± 2 °C,空气相对湿度为 $60\%\pm 5\%$,施加的法向力为 2.0 ± 0.1 N.应变式双向力传感器测量范围为0~100 N,灵敏度为0.005 N,采样频率为200 Hz.对于粗糙度对手指接触摩擦影响的试验,选用上述5种不同粗糙度的样品(a、b、c、d、e),手指和样品表面之间的接触角度 θ 设置为 25° ;对于接触角度对手指接触摩擦影响的试验,选用样品b,手指和样品表面接触角度 θ 分别为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° .为验证及确保试验的重复性,每种工况下均进行5次重复试验,每组试验间隔10 min.

3 结果分析

3.1 对比试验

为验证所设计的新型手指接触摩擦试验装置在研究手指接触摩擦学行为方面的优越性,选用样品a,在接触角度 θ 为 25° 条件下,将使用新型试验装置得到的试验结果与手指处于自由状态下滑动得到的常规试验结果相对比.图3示出了两种试验条件下一个周期内的法向力、摩擦力、摩擦系数曲线.可以看出使用新型试验装置测量的法向力在手指与样品的相对滑动摩擦过程中一直保持了非常稳定的状态,所测得的滑动摩擦力曲线也较为稳定,对应的摩擦系数曲线也很稳定[图3(a)].相比之下,处于自由滑动状态下的手指没有托架支撑,法向力、接触角度由受试者自行控制,其法向力曲线波动较大,所测得的滑动摩擦力及摩擦系数曲线也波动较大[图3(b)],导致试验结果具有一定的随机性,非常不利于试验数据的分析.

此外,从新型试验装置试验测得的摩擦力及摩擦系数曲线可以看出[图3(a)],单个周期内手指皮肤在样



(b) By finger sliding on sample freely

Fig. 3 Typical variations of normal force, friction force and friction coefficient with time in one cycle for two kinds of test

图3 两种试验条件下一个周期内法向力、摩擦力和摩擦系数随时间的变化

品上滑动经历了三个阶段: 从黏着阶段到相对滑动阶段再到黏着阶段. 相比之下, 手指处于自由状态下试验测得的摩擦力及摩擦系数曲线波动较大, 难以分辨出黏着阶段和相对滑动阶段[图3(b)]. 综上可知, 所设计的新型手指接触摩擦试验装置测量结果可靠稳定, 能较好的反映出手指接触摩擦过程中的接触状态, 在研究手指摩擦学行为方面具有一定的优越性.

3.2 样品粗糙度对手指接触摩擦的影响

为了进一步验证所设计的新型试验装置测量结果的准确性, 进行了粗糙度对手指接触摩擦影响的试验. 选取手指处于相对滑动阶段的数据, 并计算出摩擦系数平均值. 图4示出了手指在5种不同粗糙度样品上滑动的摩擦系数平均值, 可以看出随着样品粗糙度的降低, 手指和样品之间的摩擦系数逐渐增加, 这与众多研究者得到的试验结果相一致^[6-7]. 在相同的试验条件下, 随着粗糙度的降低, 手指皮肤表面和样品表面的接触面积增加, 摩擦系数和接触面积在一定范围内呈正相关^[9], 则摩擦系数升高. 此外, 从图4中可以看出, 不同粗糙度表面上多次重复试验测得的摩擦系数值相差较小, 表明了试验具有良好的重复性以及设备具有较高的可靠度.

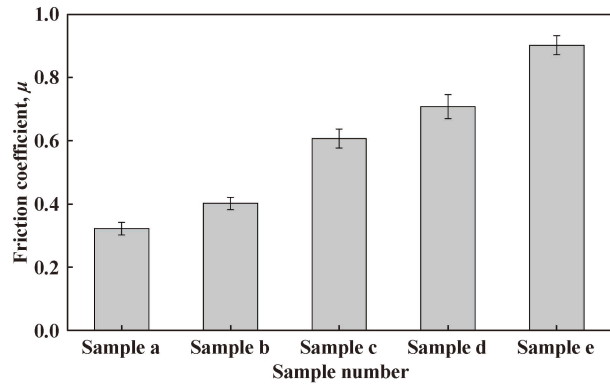


Fig. 4 Friction coefficient of finger sliding on the five samples with different roughness

图 4 手指在5种不同粗糙度样品上滑动的摩擦系数值

3.3 接触角度对手指接触摩擦的影响

由于手指特殊的生理结构, 当其在不同角度条件下与物体摸触时, 手指指尖与样品表面的接触区域有所不同. 所设计的新型试验装置中的手指托架可以旋转及固定, 用以改变手指和样品表面之间的接触角度 θ , 来研究接触角度对手指接触摩擦行为的影响. 图5示出了受试者手指在5种接触角度下滑动阶段的摩擦系数平均值, 可以看出随着接触角度从10°增加到40°, 手指和样品之间的摩擦系数逐渐降低, 但当接触角度

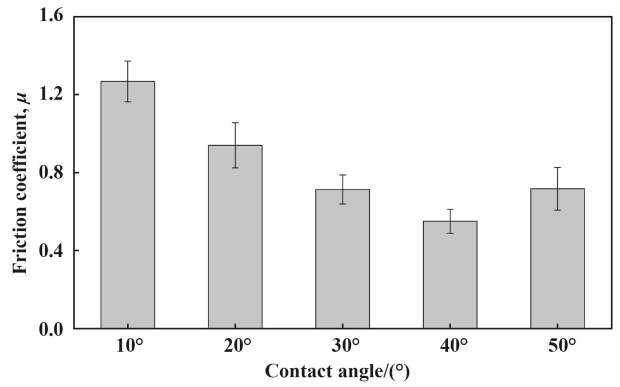


Fig. 5 Friction coefficient values of finger sliding at five different contact angles

图 5 手指在5种不同接触角度下滑动的摩擦系数值

进一步增大到50°, 摩擦系数反而增加.

通过精确测量定位, 可确定出5种接触角度下手指与样品表面的接触区域, 如图6所示. 可以看出在接触角度小于50°的情况下, 随着接触角度的增加, 接触区域由接近于平面的指腹区域向弧面的指尖区域逐渐过渡, 导致接触面积下降, 因此摩擦系数逐渐降低(见图6). 当接触角度增大到50°, 手指与样品表面的接触区域主要集中在指尖部位. 观察得出指尖处的指纹较指腹处的指纹更接近于直线分布, 在相同的法向力条件下, 近似直线分布的指纹滑过犁沟时会产生更大的阻力, 因此当手指与样品之间的接触角度增大到50°, 摩擦系数增加.

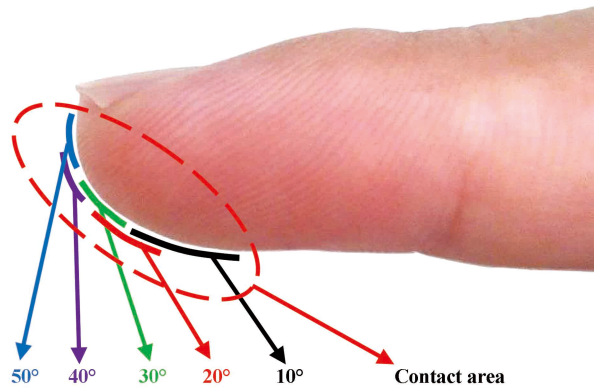


Fig. 6 The contact area between finger and sample surface on five different angles

图 6 手指在5种接触角度下和样品表面的接触区域

4 结论

a. 研制的新型手指接触摩擦试验装置结构简单、加工方便, 可以很好地控制手指接触摩擦试验中的法向力和接触角度, 为手指接触摩擦学特性的研究提供了可靠的设备支持.

b. 通过手指接触摩擦测试可以观察到, 手指皮肤和样品间的法向力和摩擦力变化稳定, 且试验结果有很好的可比性和可靠性, 证实了该试验装置能准确地考察各种因素对手指接触摩擦学行为的影响。

参考文献

- [1] Li Wei. Tribological behavior of skin under reciprocating sliding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006(in Chinese)[李炜. 皮肤的往复滑动摩擦特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006].
- [2] Li Yuanfeng. Experimental research on frictional and elastic properties of human skin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(in Chinese)[李远峰. 人体皮肤摩擦和弹性性能的试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008].
- [3] Liu X, Lu Z, Lewis R, et al. Feasibility of using optical coherence tomography to study the influence of skin structure on finger friction[J]. Tribology International, 2013, 63: 34–44.
- [4] Kim M S, Kim I Y, Park Y K, et al. The friction measurement between finger skin and material surfaces[J]. Wear, 2013, 301(1): 338–342.
- [5] Skedung L, Danerlöv K, Olofsson U, et al. Finger friction measurements on coated and uncoated printing papers[J]. Tribology letters, 2010, 37(2): 389–399.
- [6] Derler S, Gerhardt L C, Lenz A, et al. Friction of human skin against smooth and rough glass as a function of the contact pressure[J]. Tribology International, 2009, 42(11): 1565–1574.
- [7] Masen M A. A systems based experimental approach to tactile friction[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2011, 4(8): 1620–1626.
- [8] Fagiani R, Massi F, Chatelet E, et al. Contact of a finger on rigid surfaces and textiles: friction coefficient and induced vibrations[J]. Tribology Letters, 2012, 48(2): 145–158.
- [9] Han H Y, Shimada A, Kawamura S. Analysis of friction on human fingers and design of artificial fingers[C]. In: Robotics and Automation, 1996. Proceedings, IEEE International Conference on. IEEE, 1996, 4: 3061–3066.
- [10] Pasumarty S M, Johnson S A, Watson S A, et al. Friction of the human finger pad: influence of moisture, occlusion and velocity[J]. Tribology Letters, 2011, 44(2): 117–137.
- [11] Zhang Bingyu, Li Wei, Shi Lei, et al. Investigation on perception of fingertip skin under different normal force and texture spacing[J]. Tribology, 2014, 34(4): 452–458(in Chinese)[张冰玉, 李炜, 石磊, 等. 不同法向力和纹理间距下的手指皮肤感知能力研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 452–458].
- [12] Lin H T, Hong T F, Li W L. Grip performance affected by water-induced wrinkling of fingers[J]. Tribology Letters, 2015, 58(3): 1–9.