

便携式人体皮肤摩擦性能测试仪的研制

李宏凯^{1,2}, 樊鸣鸣^{1,2}, 弓娟琴³, 戴振东²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2 南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所, 江苏 南京 210016;

3 中国医学科学院 中国协和医科大学 皮肤病研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 随着对人体皮肤摩擦学特性研究的展开, 目前还没有适用的设备对脸颊、额头等不规则形状部位进行测试, 本文研制了一种便携式的摩擦性能测试仪, 并在不损害皮肤情况下进行人体皮肤摩擦性能测试, 结果表明: 该测试仪使用方便、性能可靠. 在 0.2~2 N 的接触正压力和 10~60 mm/s 的滑行速度范围内, 皮肤摩擦系数与施加的接触正压力及滑行速度无关. 自然状态下, 手背、手掌、前臂屈侧、前臂伸侧、前额部位皮肤摩擦系数在性别间的差距较小, 但脸颊部位皮肤摩擦系数女性却远大于男性. 护肤品处理后, 各测试部位皮肤摩擦系数在性别间的差距都有所缩小.

关键词: 人体皮肤; 摩擦性能测试仪; 正压力; 滑行速度; 摩擦系数

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2009)06-0489-05

皮肤是人体的最大器官, 是人体直接和外界接触的器官, 具有屏障、吸收、分泌、排泄、感觉及体温调节等功能. 人体皮肤的状态涉及到心理、美学和功能实现等方面. 例如抚摸皮肤的感受包含了对皮肤弹性和摩擦性能的感受. 手抓握其他物体的能力与手上皮肤与物体间的摩擦有密切关系. 穿衣、穿袜、穿鞋的舒适性及功能的体现也和上述界面的摩擦性能密切相关. 食物在喉道的下咽过程也涉及到食物和喉道间的摩擦性能. 组织学上, 人体皮肤由表皮、真皮和皮下组织构成, 其中表皮进一步分为角质层、透明层(掌、趾处明显)、粒层、棘层和基层. 随皮肤受到的摩擦和力学作用的变化, 在掌、趾等受力和摩擦大的部位, 角质层就厚而硬, 在躯体的屈侧部位, 则较薄且柔软^[1]. 人体皮肤是生物摩擦学的研究对象之一, 相关研究内容包括人体皮肤摩擦学特性, 人体皮肤与日用器具间的摩擦, 毛皮的生物组织结构与表面粘附和摩擦学行为的关系等^[2]. 前期研究表明, 皮肤摩擦行为与性别、个性差异、人体部位、化妆品使用和皮肤病理状态等密切相关.

实验方法及设备是研究皮肤摩擦性能的关键. 近来用于测试皮肤摩擦的仪器主要有: Asserin 等开

发的用于测量人体前臂皮肤与接触材料间摩擦性能的往复直线式皮肤摩擦试验装置^[3]; Zhang 等改进后的旋转式皮肤摩擦计^[4]; 国内西南交通大学研制的新型皮肤摩擦性能测试装置^[5]以及具有较高精度的美国 CETR 公司的 UMT 摩擦磨损试验机. 另外, Derler^[6]和 Ramalho^[7]利用将接触材料直接贴于三维传感器的方法测试皮肤摩擦性能, 试验时, 由受试者本人提供皮肤与接触材料的往复运动. 这些设备和仪器在特定条件和特定部位测试皮肤摩擦性能取得了较好的效果, 但对于如脸颊、额头、躯体等不规则形状部位或者难于放置到前述测试仪上的部位的测试, 目前还没有适用的设备. 本文针对当前皮肤性能测试的需求, 设计了 1 种便携式人体皮肤摩擦性能测试方法并开发了相应的手持设备^[8], 该设备可以测试人及动物各个部位活体皮肤和离体皮肤的摩擦性能测试, 操作简单方便, 满足了绝大多数测试场合, 为相关领域的研究提供了 1 种新的测试手段.

1 实验部分

1.1 便携式人体皮肤摩擦性能测试设备

如图 1 所示便携式人体皮肤摩擦性能测试设备

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-10-26; 联系人: 戴振东, e-mail: zddai@nuaa.edu.cn

基金项目: 2007 年中华医学会-欧莱雅中国人健康皮肤/毛发研究项目(S10); 国家自然科学基金项目(30770285, 50975140); 固体润滑国家重点实验室开放基金.

作者简介: 戴振东(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事仿生学, 生物力学, 生物摩擦学的研究.

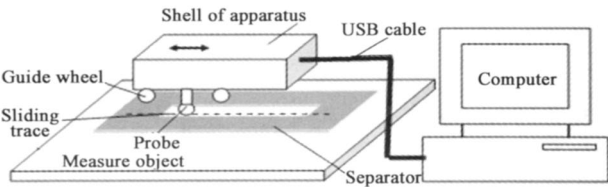


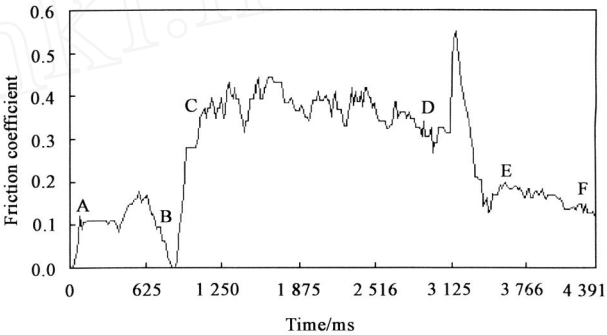
Fig 1 The construction schematic diagram of portable skin frictional testing apparatus
图 1 便携式皮肤摩擦测试仪原理图

示意图,主要由二维力传感器^[9]及保护装置、传感器信号调理、数据采集和传输系统、摩擦测试头、导向轮和测试标识膜组成.该二维力传感器量程为 0~5 N,分辨率为 2 mN,固有频率为 1 397 Hz,非线性度达 0.02% F·S 二维力传感器及保护装置和数据采集系统封装于壳体中,保护装置保证力传感器在其线性变化范围内的变形而不至于超出量程而损坏.测试头为一半球形,材料根据需要调整,通过一连杆固定在力传感器上,测试头可根据不同的测试情况和需要更换;导向轮固定在壳体上,保持试验过程中运动的平稳.使用时,设备通过 USB 电缆与计算机相连,由上位机软件操作数据采集的开始、停止、数据的处理、存储及图线的实时显示.

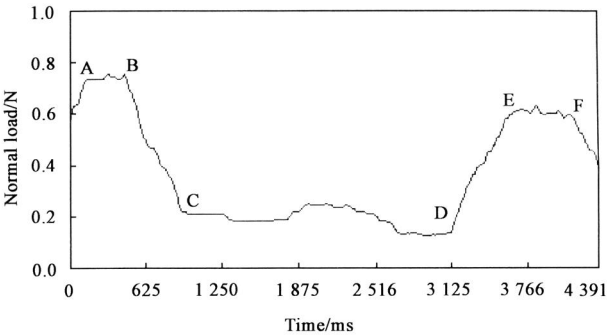
该设备中选用的 ADC 为低功耗、无误码、高线性度、高精度的 16 位数据采集芯片 AD7705.摩擦系数测试中信号属于低频信号,设备中的数据采样速率控制在 300~500 Hz 之间,远远满足了摩擦系数测试的需求.

测试系统中压力信号为单向信号,摩擦力信号为双极性信号,而 AD7705 为单极性输入.为了使摩擦力输出信号范围调整到 ADC 的模拟输入信号范围之内,二维力传感器的两路输出信号经放大器放大后给摩擦力信号提供 1 个正的偏移电位,使输出的负向的摩擦力输出信号提升到非负值,从而使输出信号在 AD7705 的模拟信号输入范围之内.该便携设备采用了 USB 通信方式与计算机相连,由于数据量不是很大,采用了 USB - UART 桥电路进行数据的传输,通过上位机软件自动寻获并连接设备,使其具有了 USB 设备所具有的功能.同时 USB 为整个系统,包括电路模块和传感器模块提供电源.通常的摩擦学试验中,速度是一个主要由试验系统保障的参数,本设备由操作者提供相对运动的速度,为监控试验条件,测试仪设计了标识膜实现参考速度的测定.标识膜是该设备的配件,由单面带黏性的材料制成,中间有一段固定长度和宽度的矩形镂空缺口,缺

口部分的尺寸根据具体实验条件和需要确定,一般宽 5~15 mm,长 10~40 mm.试验前黏性面标识膜贴于被测对象上,以标识膜中间的矩形镂空缺口选定受测部位,试验过程中,测试头从标识膜的一端沿着矩形镂空缺口滑到另一端.被测表面沿摩擦测试头运动轨迹方向可以分成第一段标识膜材料段、未覆标识膜材料的待测表面段、第二段标识膜材料段,因此在整个测试过程中会由于被测试表面的高度差或材料的显著不同而产生法向力和摩擦系数的显著变化,如图 2 所示,其中图 2 (a) 为试验过程中摩擦



(a) Variation of friction coefficient with time



(b) Variation of normal load with time

Fig. 2 The variations of friction coefficient and normal load when probe slides from beginning to end
图 2 测试头从起始滑至终端对应的摩擦系数和正压力的变化

系数随时间的变化;图 2 (b) 为正压力随时间的变化.图中 AB 阶段为摩擦测试头经过第一段标识膜材料段的测试结果,CD 阶段为未覆标识膜的待测表面段测试结果,EF 阶段为第二段标识膜表面测试结果.根据结果中法向力和摩擦系数的变化趋势,系统自动分离出未覆标识膜材料的待测表面段的测试数据,同时确定摩擦测试头在未覆标识膜材料的待测表面段通过的时间,并计算出测试头的运动速度.考虑到运动速度的连续性和待测表面距离较短,认为

在该段距离上速度均未变化,作为评价皮肤摩擦性能的一项参考值。

在试验过程中,将标识膜贴于处理过的待测表面,把设备通过 USB 电缆接入计算机,打开上位机软件,设置好数据保存文件,并点击开始按钮,压力和摩擦力的曲线和数值都显示在上位机界面上。手握设备开始在待测部位滑动,同时观察力曲线的变化,对满意的数据可通过软件按钮进行清除或保存数据操作,在保存过程中,软件分离出在待测表面的数据,计算出相应的摩擦系数以及速度,并保存在数据文件中进行细化处理。

在保证电路部分的精度和采样频率的情况下,本测试仪的性能主要取决于二维力传感器,文中所采用的传感器精度高,重复性好。数据显示测试仪已达到了设计的采样频率和精度,从结果变化曲线中能明显区分出隔离膜标识区域和待测区域,实现了测试仪的预期功能。

1.2 试验方法及测试部位

采用球-面接触模式,摩擦测试头选用直径为 8 mm 的不锈钢半球。如图 3 所示的前臂屈侧测试过程,使用本仪器时,测试人员需做培训以保证操作的平稳性,手握测试仪在包括测试区在内的一段直线上划过,同时观察操作界面中正压力的变化。为了不损伤皮肤,正压力控制在 $0.2 \sim 2$ N 之间。

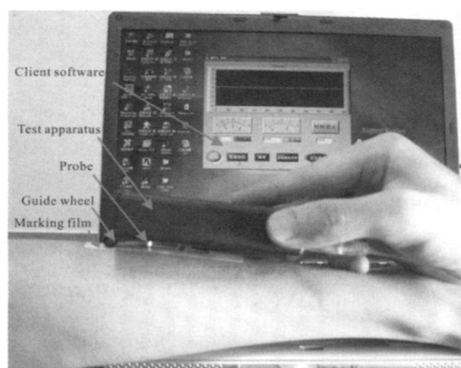


Fig 3 Measure proceeding of forearm flexure aspect
图 3 前臂屈侧测试过程

试验过程中,测试人员按正常操作使用该测试仪,由于滑行距离较短,单次试验中正压力的变化很小。对单次试验的正压力点进行线性拟合和方差分析,发现拟合直线斜率都能小于 0.05,而且能保证拟合前后数据在显著水平 0.05 无明显差异。

选取 60 名年龄在 20~30 岁的健康男女作为志愿者参加试验,男女均各占一半。所有受试者受试部

位的皮肤均无异常。调查显示志愿者使用化妆品的情况如下:对于女性,经常使用者占 74%,偶尔使用者和从不使用者各占 13%;而对于男性,经常使用者占 3%,偶尔使用者占 17%,从不使用者占 80%。试验前用酒精棉球清洁志愿者 6 个待测部位(手背中心、手掌中心、前臂屈侧、前臂伸侧、前额、脸颊)皮肤,待酒精挥发干,贴上内有 $10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 方孔的标识膜,并让志愿者在恒定环境中静坐 5 min,然后测试这 6 个部位在无人干预的自然状态下皮肤的摩擦特性;测试结束 20 min 后将硅油乳膏定量均匀($0.01\text{ mL}/300\text{ mm}^2$)地涂抹在 6 个待测部位上,再过 20 min 后开始测试经化妆品处理后皮肤表面的摩擦特性。

2 结果与分析

2.1 正压力和滑行速度对皮肤摩擦系数的影响

在摩擦特性试验中,由操作者手控施加正压力和滑行速度,不同志愿者各测试部位施加的接触正压力、滑行速度均为随机。图 4 为志愿者前额皮肤在护肤品处理前后摩擦系数与接触正压力和滑行速度的关系,其中:图 4(a)为自然状态下前额皮肤的测试正压力与摩擦系数的关系;图 4(b)为自然状态下前额皮肤的测试滑行速度与摩擦系数的关系;图 4(c)为护肤品处理后前额皮肤的测试正压力与摩擦系数的关系;图 4(d)为护肤品处理后前额皮肤的测试滑行速度与摩擦系数的关系。对各图标中数据做回归分析后可以看出,无论男性还是女性,无论自然状态还是护肤品处理状态,各正压力和滑行速度对应的摩擦系数值回归曲线的斜率几乎均为零。由此可得出:当接触正压力在 $0.2 \sim 2$ N,滑行速度在 $10 \sim 60\text{ mm/s}$ 范围内,皮肤摩擦系数与施加的接触正压力、滑行速度无关联。在运动范围内,试验结果与唐玮^[10]等用 UMT 摩擦磨损试验机测试人体手背皮肤的摩擦学特性得到的结论一致。因此,分析在一定正压力和滑行速度范围内测出的摩擦系数时,可以忽略正压力和滑行速度的影响。

2.2 护肤品处理前后被测部位的摩擦系数

在自然状态和护肤品状态下分别测试男、女性 6 个测试部位的摩擦系数,测试结果如表 1 所示。自然状态下,手背、手掌、前臂屈侧、前臂伸侧部位皮肤摩擦系数在性别间的差距较小,前额部位的皮肤摩擦系数还出现了在不同性别间大小相等的情况。Elsner^[11]等测试了前臂和阴部摩擦系数后得出性别对皮肤摩擦特性无显著影响,Raja 等^[12]测试了前臂

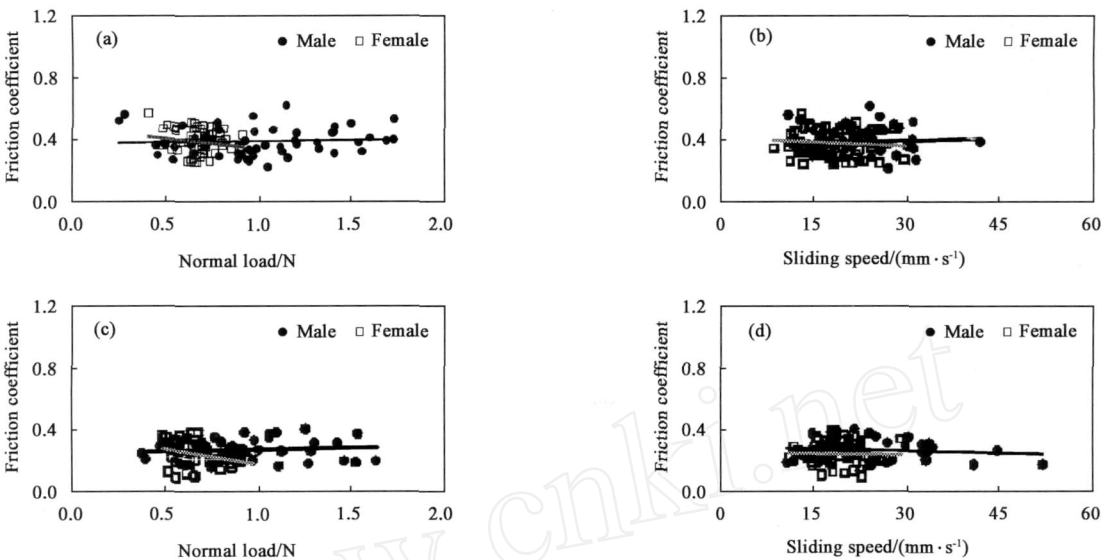


Fig 4 Dependence of friction coefficient on the applied load and sliding speed for skin on forehead at nature status and cosmetics status

图 4 护肤品处理前后前额摩擦系数与接触正压力和滑行速度的关系

表 1 6 个被测部位在护肤品处理前后的摩擦系数

Table 1 Friction coefficient of six measured parts of body at nature status and cosmetics status

Status	Cheeks	Foreheads	Dorsum manus	Extensor aspect of arms	Flexor aspect of arms	Palms
Nature status, male	0.468 ±0.167	0.395 ±0.085	0.351 ±0.082	0.313 ±0.077	0.342 ±0.069	0.428 ±0.193
Nature status, female	0.723 ±0.282	0.395 ±0.078	0.349 ±0.078	0.262 ±0.052	0.290 ±0.053	0.560 ±0.204
Cosmetics status, male	0.322 ±0.108	0.276 ±0.066	0.393 ±0.118	0.323 ±0.099	0.339 ±0.133	0.320 ±0.093
Cosmetics status, female	0.425 ±0.158	0.251 ±0.073	0.378 ±0.127	0.365 ±0.098	0.374 ±0.134	0.241 ±0.072

摩擦系数后也得出了相同的结论,但他们没有对脸颊部位皮肤进行相关研究.由表 1 中测试结果可以看出,脸颊部位女性皮肤摩擦系数 (0.723) 远大于男性 (0.468). 结合前面调查分析,这可能由于女性平时比男性更注意皮肤保养,面部用了较多补水、保湿的化妆品,从而使女性脸颊皮肤含水量高,细腻滋润,表层的水分使皮肤表面呈“黏着”状态.另外,含水量高的皮肤,其角质层会更软,使测试头与皮肤的实际接触面积增大,从而导致摩擦系数增大.护肤品处理后,各测试部位皮肤摩擦系数在性别间的差距都有所缩小,其中脸颊部位皮肤性别间差距的缩小最为显著,差距从 0.255 降至 0.103. 原因可能是因为护肤品处理 20 min 后,护肤品薄膜仍然覆盖于皮肤表面,相同薄膜的存在使摩擦系数差距有所减小.在自然状态下,无论男、女性,所测 6 个部位的皮肤摩擦系数由大到小依次为:脸颊、手心、额头、手背、手臂屈侧、手臂伸侧.

3 结论

a 所研制的便携式皮肤摩擦测试仪结构小巧,

操作方便,可靠性高,能够测试人体包括脸颊在内的形状不规则部位皮肤,并能根据数据曲线的变化计算平均速度.

b 当接触正压力在 0.2~2 N,滑行速度在 10~60 mm/s 范围内时,皮肤摩擦系数与施加的接触正压力、滑行速度无关联.

c 自然状态下,手背、手掌、前臂屈侧、前臂伸侧及前额部位皮肤摩擦系数在性别间的差距较小,但是脸颊部位皮肤摩擦系数女性却远大于男性.护肤品处理后,各测试部位皮肤摩擦系数在性别间的差距都有所缩小.在自然状态下,无论男、女性,所测 6 个部位的皮肤摩擦系数由大到小依次为:脸颊、手心、额头、手背、手臂屈侧、手臂伸侧.

参考文献:

[1] 杨国亮. 皮肤病学 [M]. 上海:上海医科大学出版社, 1992.
[2] 周仲荣. 关于我国生物摩擦学研究的思考 [J]. 机械工程学报, 2004, 40 (5): 7-10.
Zhou Z R. On bio-tribology in china [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (5): 7-10.

- [3] Asserin J, Zahouani H, Humbert Ph, *et al* Measurement of the friction coefficient of the human skin in vivo quantification of the cutaneous smoothness [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2000, 19: 1 - 12.
- [4] Zhang M, Mak A F T. In vivo friction properties of human skin [J]. *Prosthetics and Orthotics International*, 1999, 23: 135 - 141.
- [5] 李炜,石心余,吴乐轩,等. 新型皮肤摩擦特性测量装置的实验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (2): 102 - 107.
- Li W, Shi X Y, Wu L X, *et al* A new skin frictional property testing apparatus [J]. *Tribology*, 2006, 26 (2): 102 - 107.
- [6] Derler S, Schrade U, Gerhardt L C. Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles [J]. *Wear*, 2007, 263: 1 112 - 1 116.
- [7] Ramalhoa A, Silva C L, Pais A A C C, *et al* In vivo friction study of human skin: Influence of moisturizers on different anatomical sites [J]. *Wear*, 2007, 263: 1 044 - 1 049.
- [8] 戴振东,李宏凯,樊鸣鸣,等. 便携式摩擦系数测试方法及系统 [P]. 中国: 200910030778. 6, 2009.
- [9] 戴振东,文智平,吉爱红. 二维小量程力传感器 [P]. 中国: 200710132017. 2, 2007.
- [10] 唐玮,朱华,丁璐颖,等. 人体手部皮肤的摩擦特性实验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (5): 494 - 497.
- Tang W, Zhu H, Ding L Y, *et al* Tribological testing of human hand skin [J]. *Tribology*, 2006, 26 (5): 494 - 497.
- [11] Elsner P, Dorothea W, Maibach H I. Friction properties of human forearm and vulva skin: influence of age and correlation with trans - epidermal water loss and capacitance [J]. *Dermatology*, 1990, 181: 88 - 91.
- [12] Raja K S, Gabriel W, Norm V G, *et al* Tribological testing of skin products: gender, age, and ethnicity on the volar forearm [J]. *Skin Research and Technology*, 2003, 9: 299 - 305.

Design and Manufacture of a Portable Human Skin Frictional Property Apparatus

LI Hong - kai^{1,2}, FAN Ming - ming^{1,2}, GONG Juan - qin³, DA I Zhen - dong²

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Institute of Bio - inspired Structure and

Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

3. Institute of Dermatology, Chinese Academy of Medical Science and Peking Union Medical College, Nanjing 210042, China)

Abstract: With the development of research on the frictional properties of the human skin, there was still lack of a suitable friction tester to measure the frictional properties of irregular part of human body, such as cheek, forehead etc. A portable frictional property testing apparatus was designated in this paper and measurements on frictional properties of human skin were conducted without hurting the skin. The results showed that the apparatus was easy to use and had good reliability. The friction coefficient didn't follow general relationship with normal load and sliding speed when normal load ranged from 0.2 to 1.2 N and sliding speed ranged from 10 to 60 mm/s. Friction coefficients of the skins on dorsum manus, palm, forehead, extensor and flexor aspects of forearm didn't show significant difference between male and female in nature status, however, the friction coefficient of cheek of female was much higher than that of male. Differences of friction coefficients of all measured parts between male and female were lower than that after cosmetics treatment.

Key words: human skin, frictional property apparatus, normal load, sliding speed, friction

Author: DA I Zhen - dong, male, born in 1962, Ph.D., Professor, e - mail: zddai@nuaa.edu.cn