

汗液对皮肤摩擦特性的影响研究

李 炜¹, 孔 梅¹, 刘夕东², 周仲荣¹

(1. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室 摩擦学研究所, 四川 成都 610031;

2. 四川省肢体伤残康复中心, 四川 成都 610021)

摘要: 采用人工汗液模拟人体汗液, 在连续和间歇式往复摩擦运动模式下研究汗液对正常人体皮肤、穿戴假肢皮肤以及残肢疤痕皮肤摩擦性能的影响, 并模拟假肢穿戴环境研究汗液对皮肤摩擦舒适度的影响。结果表明: 在法向载荷为 0.2 N 和 0.7 N 的连续和间歇式往复摩擦运动模式下, 汗液均通过改变皮肤表面的物理化学性能而对皮肤的摩擦行为产生影响; 在汗液逐渐干燥的过程中, 皮肤的摩擦行为从粘着向相对滑移状态转变, 摩擦系数变化经历从小到大再减小、最后达到稳定的过程; 在法向载荷为 8.0 N、模拟假肢穿戴环境的连续式往复摩擦运动模式下, 汗液环境中的正常小腿皮肤、穿戴假肢皮肤和残肢疤痕皮肤的摩擦系数均大于干燥环境。根据皮肤在摩擦过程中的疼痛感、牵扯感和灼热感等同时提出皮肤摩擦舒适度概念, 与干燥的假肢穿戴环境相比, 汗液均加强了不同皮肤的摩擦不舒适感。

关键词: 人体皮肤; 摩擦性能; 人工汗液; 舒适度

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2008)01-0088-06

皮肤具有新陈代谢的功能而发汗, 尤其在运动或热的环境中更容易出汗。汗液通常会改变皮肤的摩擦特性, 从而影响到皮肤与衣物、鞋袜、劳动和体育用品等的摩擦接触舒适度。在残疾患者的假肢穿戴中, 汗液加剧了残肢与假肢接受腔摩擦接触界面的不舒适感。Omeara 等^[1~3]研究了不同湿度的手部皮肤的摩擦性能, 发现皮肤在潮湿(稍微湿)状态下的摩擦系数大于在湿度较大状态下的摩擦系数, 而汗液对皮肤摩擦行为过程的影响尚不清楚。在汗液对皮肤的摩擦舒适度影响方面, 国内外主要集中于纺织面料的吸汗性与皮肤舒适度的关系研究^[4], 而汗液环境中的摩擦行为对皮肤舒适度的影响尚不清楚。鉴于此, 本文作者选用人工汗液模拟人体汗液, 在较低法向载荷的连续式和间歇式往复摩擦运动模式下研究了汗液的逐渐干燥过程对皮肤摩擦行为的影响, 并模拟假肢连续穿戴环境研究了连续式往复摩擦运动模式下汗液对正常小腿皮肤、穿戴假肢皮肤和残肢疤痕皮肤摩擦特性和舒适度的影响。

1 实验部分

1.1 汗液的配制

人体分泌的汗液中含有皮肤的各种废物组分,

其中水分占 99.2%~99.7%, 固体组分包括钠、氯、钾及钙等, 还有少量尿素、葡萄糖、乳酸和氨基酸等^[5]。汗液按照生物统计多数人的酸性汗液配制。按照 ISO-105-E04 人造酸性汗液配方, 每升溶液含 0.5 g/L 组氨酸盐酸水合物、5.0 g 氯化钠、2.2 g 磷酸二氢钠二水合物, 采用 0.1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 值至 5.5^[6]。

1.2 试验样品及方法

试验采用球面接触方式。平面试样为人体前臂掌侧皮肤、正常小腿皮肤、穿戴假肢的残肢皮肤和残肢疤痕皮肤。在前臂掌侧皮肤上研究汗液的逐渐干燥过程对皮肤摩擦行为的影响。而残肢与假肢接受腔的接触界面通常有正常皮肤、穿戴假肢皮肤和残肢疤痕皮肤 3 种, 选用以上 3 种皮肤研究汗液对残肢与假肢接受腔接触界面摩擦特性的影响。人体前臂掌侧皮肤试验部位为距志愿者前臂末端约 12 cm 处, 人体下肢或残肢试验部位为小腿胫骨外侧(LT)距膝盖约 10 cm 处。试验前一天要求志愿者在测试部位不涂抹任何护肤品, 每次试验前用温肥皂水和水清洗测试部位并干燥。球面试样为假肢接受腔材料聚乙烯特软板材, 将其加热弯成半球形壳体, 外径为 $\phi 20$ mm, 厚度为 2.7 mm, 用强力胶粘结在特制的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475110, 5053050)。

收稿日期: 2006-11-14; 修回日期: 2007-03-06 联系人周仲荣, e-mail: zrzhou@home.swjtu.edu.cn

作者简介: 周仲荣, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事摩擦学及表面工程等方面的研究。

铜圆柱触头上. 聚乙烯特软板材和皮肤的表面粗糙度见表 1.

试验前,采用微型注射器在 30 mm ×30 mm 的前臂掌侧皮肤表面滴加 50 μL 的汗液并涂抹均匀,

表 1 样品的表面粗糙度
Table 1 Surface roughness of samples

Samples	Polythene plate	Skin samples			
		Volar forearm skin	Normal skin	Prosthetic skin	Scar skin
Surface roughness $R_a/\mu\text{m}$	1. 428	29. 21 $\pm$ 2. 71	28. 31 $\pm$ 3. 45	40. 94 $\pm$ 4. 24	46. 27 $\pm$ 3. 21

2 min 后进行摩擦试验. 为了模拟假肢连续穿戴中的汗液环境,小腿和残肢皮肤每隔 5 min 滴加 50 μL 汗液,使皮肤始终保持在汗液环境下. 摩擦试验装置采用 UMT-II 型多功能摩擦磨损试验机. 运动模式采用连续式和间歇式往复滑动 2 种. 试验参数为:法向载荷 F_n 分别为 0. 2 N、0. 7 N 和 8 N,往复位移 D 为 ± 5 mm,频率 f 为 0. 5 Hz,最大循环次数 N 为 1 800 次. 试验温度 20~25 °C,相对湿度为 $RH = 60\% \sim$

70%. 连续式往复摩擦运动模式下连续记录摩擦系数随时间或循环次数变化的情况,在间歇式往复摩擦运动模式下每隔 5 min 测量 1 次摩擦系数变化. 相同条件下的试验重复 3 次.

2 结果与分析

2.1 汗液对皮肤摩擦行为的影响

图 1 所示为在前臂掌侧皮肤涂抹汗液后连续往

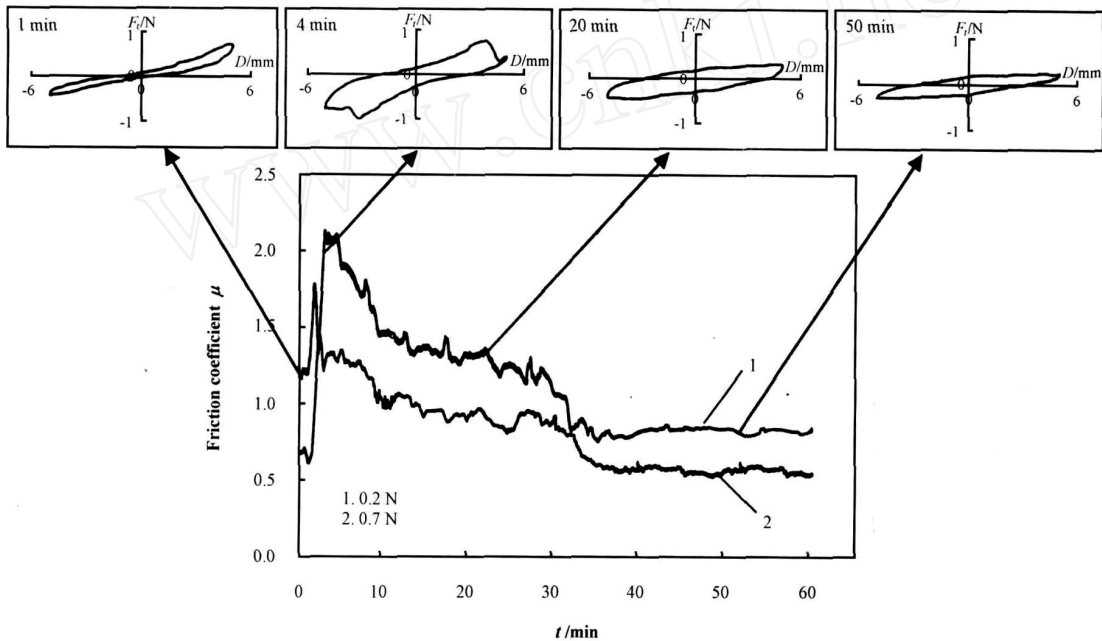


Fig 1 Effects of the perspiration on friction coefficients of skin under continuous reciprocal sliding frictional mode ($f=0.5\text{ Hz}$, $D=\pm 5\text{ mm}$)

图 1 连续式往复滑动模式下汗液对皮肤摩擦系数的影响 ($f=0.5\text{ Hz}$, $D=\pm 5\text{ mm}$)

复滑动 60 min (1 800 次循环) 过程中的摩擦系数变化曲线,图中法向载荷分别为 0. 2 N 和 0. 7 N. 可见,在整个过程中,低载荷下的摩擦系数大于高载荷,且 2 种载荷下摩擦系数开始较小,几分钟后突然增加,随后随着时间的延长逐渐降低,直至稳定状态. 图中以法向载荷 0. 2 N 为例研究了不同摩擦时间段,汗液对皮肤的摩擦力-位移 (F_t - D) 曲线的影响. 可见,在往复摩擦开始 1 min 内,皮肤的 F_t - D 曲

线呈半闭合形,汗液在皮肤与上试件之间形成了层间力,使皮肤与上试件发生粘着,基本没有相对滑动,位移通过皮肤的弹性变形协调,因此摩擦系数 (实际上为摩擦阻力与法向载荷之比) 较低. 随着时间的延长,约在 4 min 时摩擦系数突增至峰值并维持 2 min 左右, F_t - D 曲线呈现不规则的四边形,皮肤处于粘着和少量滑移的中间过渡状态,这时汗液使皮肤的角质层发生水合作用并伴随皮肤角质蛋白的

部分溶解,使汗液呈“明胶状”,降低了皮肤与上试件的层间力,使皮肤表面出现少量滑动,上试件在皮肤上滑动要克服皮肤表面的粘着阻力,此时的摩擦系数最大.在 6~35 min 时,随着皮肤表面汗液的逐渐干燥,皮肤与上试件之间的粘着力减小,往复摩擦克服的粘着阻力逐渐减小,摩擦系数逐渐降低, F_t-D 曲线从不规则形状逐渐过渡到椭圆形(参见 20 min 时的 F_t-D 曲线),此时皮肤处于中间过渡状态,但相对滑移量逐渐增多.在 35 min 后摩擦系数达到皮肤干燥时的稳定状态,50 min 时的 F_t-D 曲线呈平行四边形,上试件与皮肤处于相对滑移状态.所有志愿者皮肤上的汗液从湿润到干燥过程中的摩擦行为基本一致.

图 2 所示为前臂掌侧皮肤涂抹汗液后在间歇式

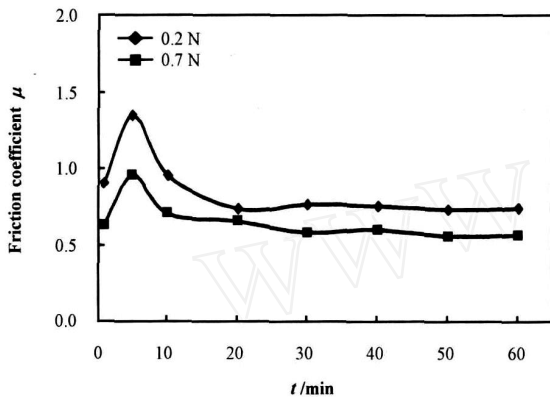


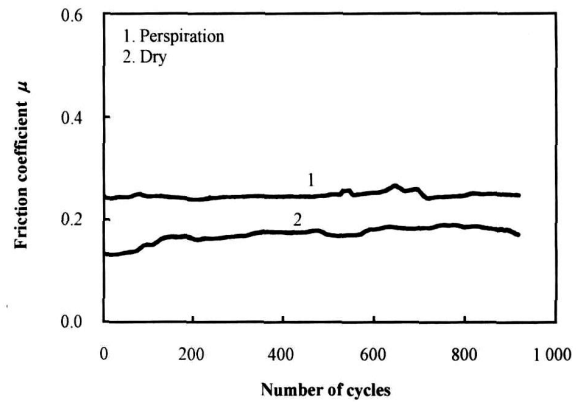
Fig 2 Effects of the perspiration on friction coefficients of skin under intermissive reciprocal sliding frictional mode ($f=0.5 \text{ Hz}$, $D=\pm 5 \text{ mm}$)

图 2 间歇式往复滑动模式下汗液对皮肤摩擦系数的影响 ($f=0.5 \text{ Hz}$, $D=\pm 5 \text{ mm}$)

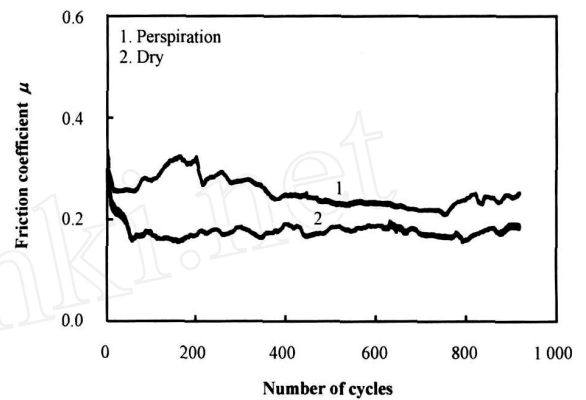
往复滑动过程中的摩擦系数变化曲线.可见,2种载荷下摩擦系数在开始时均较小,在 5 min 左右达到最大值,随后又开始下降,在 20 min 后达到皮肤干燥时的稳定值.由于摩擦是间歇式测量,不测试时皮肤暴露于空气中,皮肤上的汗液蒸发较快,摩擦系数比连续测量时低,且达到稳定状态的时间比连续测量时短.

通过以上结果表明,汗液会影响皮肤表面的物理化学性能,从而对皮肤的摩擦行为产生影响.在汗液逐渐干燥的过程中,皮肤的摩擦状态从粘着向相对滑移转变,摩擦系数的变化经历从小到大再减小,最后达到干燥时的稳定的过程.

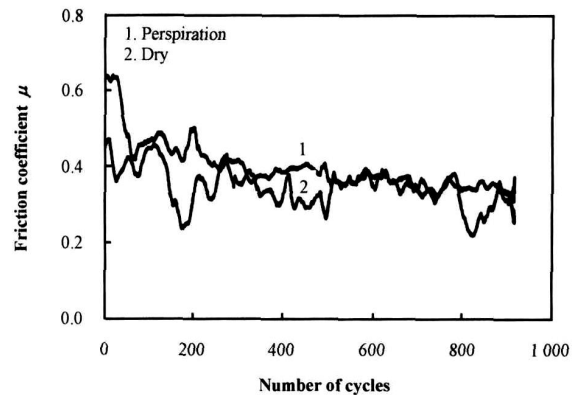
图 3 所示为模拟假肢穿戴工况下干燥和汗液环境对正常小腿皮肤、穿戴假肢的残肢皮肤和残肢疤



(a) Normal skin



(b) Prosthetic skin



(c) Scar skin

Fig 3 Variation of friction coefficients of different skin with cycles under perspiratory and dry conditions

图 3 不同皮肤在干燥和汗液环境下摩擦系数随循环次数变化的关系曲线

痕皮肤摩擦系数的影响.可见在汗液环境下不同皮肤的摩擦系数均大于干燥环境.这是由于处于汗液环境中的皮肤角质层发生了水合作用,增加了皮肤与上试件的粘着力,使得上试件在皮肤上的往复摩擦运动需要克服更大的摩擦阻力.从图 3 还可见,干燥和汗液环境下的穿戴假肢皮肤和残肢疤痕皮肤的摩擦系数在整个试验过程中波动较大.这是因为假

肢穿戴者的残肢已有明显肌肉萎缩,皮肤变薄,表面干燥、多皱,尤其是疤痕皮肤,结缔组织增生,外形不规则且高低不平,这些对于摩擦系数的稳定性均有一定影响.

2 2 汗液对皮肤舒适度的影响

与传统的摩擦行为不同,人体皮肤具有生物活性,在摩擦过程中会有一些生理反应,而摩擦舒适度是评价皮肤摩擦生理反应的重要因素^[7,8].在试验过程中志愿者感觉到摩擦部位的皮肤有疼痛感、牵

扯感和灼热感等,但至今还没有参数可用于定量描述这些感觉.在本研究中,我们提出了皮肤摩擦舒适度的概念^[4],即从感觉角度来评价在不同摩擦条件下人体皮肤的舒适感.对志愿者在不同试验条件下的皮肤感觉程度进行定量确定,用无感觉(-)、轻微(+)、显著(++)和严重(+++)来描述皮肤的疼痛、牵扯和灼热等 4 种感觉表示.

图 4 所示为在模拟假肢穿戴工况下干燥和汗液环境对皮肤舒适度的影响.可见,在干燥环境下,3

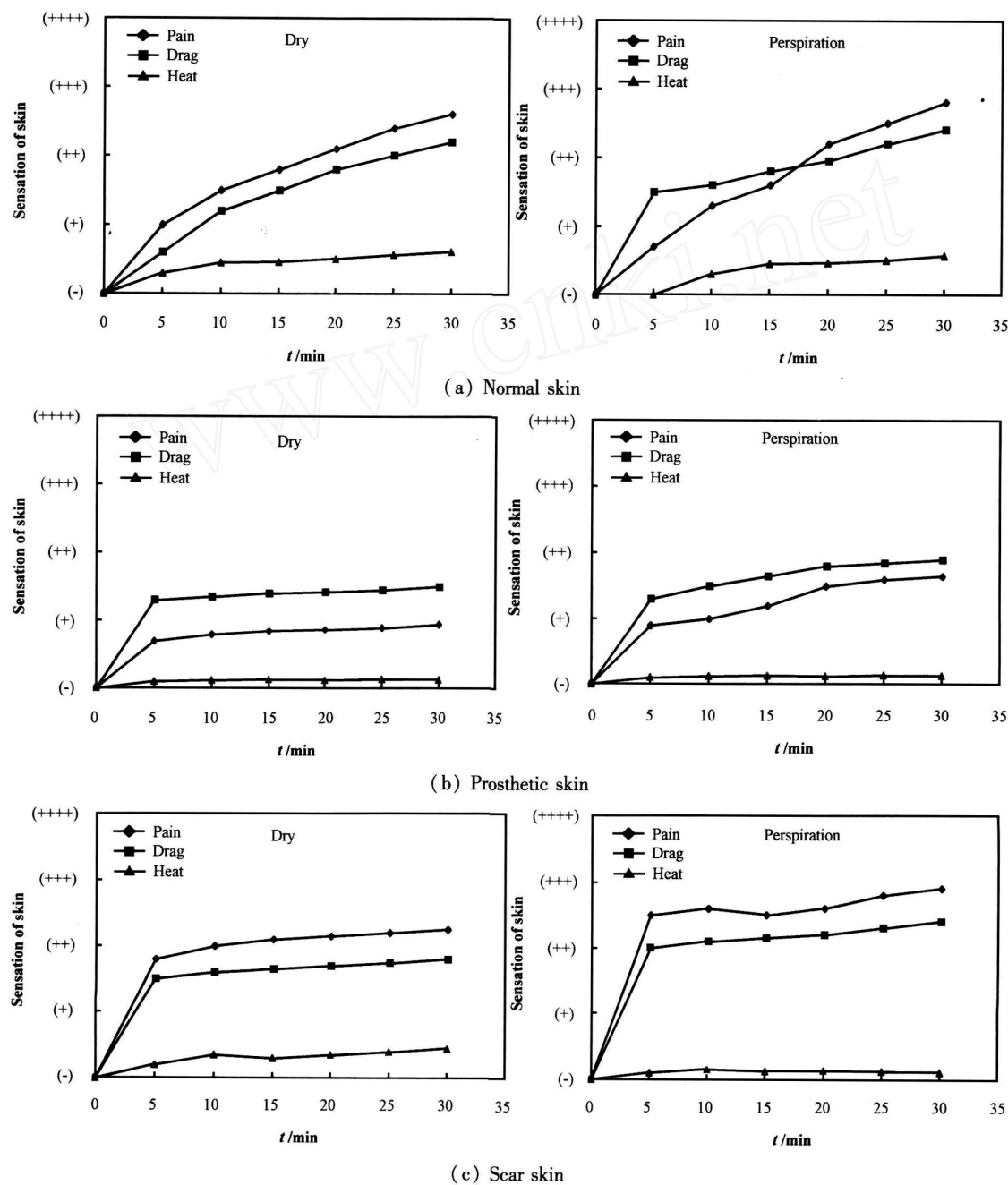


Fig 4 Variation of comfortness sensations of different skin with time under perspiratory and dry conditions

图 4 干燥和汗液环境下不同皮肤的舒适度随时间变化的关系曲线

种皮肤均有胀痛感、牵扯感和灼热感。正常皮肤和疤痕皮肤的胀痛感和牵扯感随时间延长变得显著,穿戴假肢皮肤胀痛感和牵扯感较轻微。正常皮肤和疤痕皮肤的灼热感均较轻微,穿戴假肢皮肤基本上感觉不到灼热感。在汗液环境下,3种皮肤的胀痛感和牵扯感均有所增强,灼热感减轻。正常皮肤的胀痛感在 20 min 后较严重,疤痕皮肤的胀痛感在 5 min 后很严重,穿戴假肢皮肤胀痛感和牵扯感由轻微变得显著。

事实上,皮肤在假肢穿戴恶劣的往复摩擦工况下已经造成了皮肤表面角质层等损伤,而汗液中的氯化钠和磷酸二氢钠等成分会增加对损伤皮肤表面刺激,造成皮肤的疼痛感增强。另外在汗液环境中,皮肤发生的水合作用增强了皮肤与上试件的粘着力,使往复摩擦运动的牵扯感增强。因此,汗液使假肢穿戴环境中的不舒适感增强。另外,从不同皮肤感觉上的差异可见,疤痕皮肤和正常皮肤对因摩擦造成的不适感觉较敏感,穿戴假肢皮肤对摩擦造成的不适感觉的耐受性最强。

从汗液对皮肤产生的不舒适感考虑,在设计假肢接受腔内衬套材料时,应尽量选用闭汗性强的材料如硅橡胶等,或者吸汗性强的材料如棉质袜套等^[10,11],以改进残肢患者穿着舒适性。

3 结论

a 汗液通过改变皮肤表面的物理化学性能而对皮肤的摩擦行为产生影响。在汗液逐渐干燥的过程中,皮肤的摩擦状态从粘着向相对滑移转变,摩擦系数的变化经历从小到大再减小,最后达到稳定的过程。

b 汗液环境下不同皮肤的摩擦系数均大于干燥环境。

c 与干燥的假肢穿戴环境相比,汗液增强了皮肤的不舒适感。

参考文献:

- [1] Omeara D M, Smith R M. Static friction property between human palmar skin and five grab-rail materials[J]. *Ergonomics*, 2001, 44(11): 973-988.
- [2] Blichmann C W, Serup L. Assessment of skin moisture[J]. *Acta Derm Venereol*, 1988, 68: 284-290.
- [3] Denda M. Dry skin and moisturizers: Chemistry and function[C]. CRC Press, Loden M, Maibach H, Eds. Boca Raton, Fla, 2000: 147-153.
- [4] 潘志娟. 纤维及湿度对织物与皮肤间摩擦力的影响[J]. *国外丝绸*, 1992, (3): 14-19.
Pan Z J. The effects of fibre and humidity on friction force between textile and skin[J]. *Overseas Silk*, 1992, (3): 14-19.
- [5] 刘京龙, 王芳, 涂连梅, 等. 汗液浸泡对皮革性能的影响[J]. *中国皮革*, 2003, 34(3): 8-12.
Liu J L, Wang F, Tu L M, et al. Influence of sweat on the performance of leathers[J]. *China Leather*, 2003, 34(3): 8-12.
- [6] ISO-105-E04: Textile-tests for colour fastness-Part E M: colour fastness to perspiration, 1994.
- [7] Wong A S W, Li Y. Relationship between thermophysiological responses and psychological thermal perception during exercisewearing aerobic wear[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29: 791-796.
- [8] Olausson H, Wessberg J, Kakuda N. Tactile directional sensitivity: peripheral neural mechanisms in man[J]. *Brain Research*, 2000, 866: 178-187.
- [9] Li W, Qu S X, Zhou Z R. Reciprocating sliding behavior of human skin in vivo at low number of cycles[J]. *Tribology Letters*, 2006, 23: 165-170.
- [10] 刘夕东. 硅凝胶内衬套对有瘢痕残肢的影响[J]. *中国康复*, 2002, 17(4): 228-229.
Liu X D. The effects of silica gel inner lining on amputation with scar[J]. *Zhongguo Kangfu*, 2002, 17(4): 228-229.
- [11] 苏强, 赵正全. 硅胶压力疗法治疗疤痕增生临床报道[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2003, 25(6): 384.
Su Q, Zao Z Q. Clinic report: Scar hyperplasia curing by means of silica gel pressure method[J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2003, 25(6): 384.

Effect of Artificial Perspiration on Tribological Properties of Human Skin

L I Wei¹, KONG Mei¹, L U Xi-dong², ZHOU Zhong-rong¹

(1. Tribology Research Institute, Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials (Ministry of Education),
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Director of Sichuan Province Orthopedic Center, Chengdu 610021, China)

Abstract: The artificial perspiration was used to simulate human sweat. The effects of the artificial perspiration on the frictional properties of healthy human skin, wearing prosthetic socket skin and residual limb scar skin were investigated by using the continuous and intermissive reciprocal sliding frictional modes. The effect of the perspiration on the comfortness sensations of the limb skin was also investigated by simulating the prosthetic socket wearing conditions. The results showed that the artificial perspiration had the effects on the friction behavior of skin by modified the physicochemical properties of skin surface at the normal loads of 0.2 N and 0.7 N under the continuous and intermissive reciprocal sliding frictional modes. The friction behavior transited from sticking regime to relative sliding regime in the process of the perspiration drying out. The friction coefficient changed from small to peak value, then decreased until it reached stable value. At normal load of 8.0 N of continuous reciprocal sliding frictional modes, the friction coefficients of healthy limb skin, wearing prosthetic socket skin and residual limb scar skin in the perspiration condition were higher than that in the dry condition. The concept of comfortness sensations of the skin concerning the pain, drag and heat was proposed and investigated. The perspiration brought more comfortless sensations to the volunteers comparing with the dry prosthetic socket condition.

Key words: human skin, friction behavior, artificial perspiration, comfortness sensations

Author: ZHOU Zhong-rong, male, born in 1965, Ph. D., Professor, email: zrzhou@home.swjtu.edu.cn