

皮肤往复摩擦条件下的损伤研究

石磊, 谢旭辉, 徐萍, 李炜*

(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)

摘 要: 选用成年健康活体兔皮肤替代残肢皮肤, 在 UMT-II 多功能摩擦磨损试验机上通过模拟残肢皮肤/接收腔界面间的黏着和中间过渡摩擦行为, 对兔皮肤的摩擦系数、 F_t-D 曲线、能量损耗以及这两种摩擦行为所引起的兔皮肤摩擦损伤机理进行了研究. 结果表明: 在 0.5 或 3.5 N 法向力作用下, 随着往复摩擦位移从 ± 2.5 mm 增加到 ± 5 mm, 兔皮肤的摩擦行为从黏着状态转变到中间过渡状态, 往复摩擦过程中的能量损耗增加; 由于中间过渡状态下的兔皮肤摩擦系数较高, 能量损耗较大, 因而造成的皮肤损伤程度比黏着状态严重; 与人体手掌或脚掌皮肤相比, 兔皮肤的角质层较薄, 很难形成摩擦水泡.

关键词: 兔皮肤; 摩擦行为; 能量耗散; 损伤; 组织病理

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2015)01-0066-08

Skin Traumas under Reciprocating Friction Conditions

SHI Lei, XIE Xu-hui, XU Ping, LI Wei*

(Tribology Research Institute, Key Laboratory for Advanced Technology

of Materials of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Healthy adult rabbit skin was used instead of stump skin. By using an UMT-II tribometer to simulate stump skin / prosthetic socket interface under friction behaviors of the sticking and the intermediate regimes, the friction coefficient, F_t-D curve, energy dissipation and traumas mechanism of rabbit skin were investigated. The results show that under the normal force of 0.5 N or 3.5 N, the friction behavior of rabbit skin changed from the sticking regime to the intermediate regime with the reciprocating displacement from ± 2.5 mm to ± 5 mm, consequently, energy dissipation in the process of reciprocating friction increased. Because the rabbit skin friction coefficient and energy dissipation in the intermediate regime were higher than that in the sticking regime, the degree of skin traumas was more severe. Compared with human hands or feet skin, the cutin layer of rabbit skin was thin, so it is difficult to form a friction blister.

Key words: rabbit skin, friction behavior, energy dissipation, traumas, histopathology

皮肤与外界材料在特定条件下摩擦作用, 会伴随红斑、水肿、水泡、出血甚至溃烂的形成, 严重影响到人们的日常生活, 如皮肤与劳动生产工具、体育用品等摩擦导致的起水泡现象, 临床常见瘫痪病人的褥疮等. 残疾患者穿戴假肢遇到的皮肤摩擦损伤问题通常较为严重, 残肢皮肤与假肢接受腔界面反复

摩擦会导致皮肤发热、红肿, 甚至会产生水泡和溃烂^[1-3], 已严重影响到残肢患者的功能康复. 国内外在皮肤的摩擦损伤方面做了一些研究: 李炜根据皮肤在摩擦过程中的疼痛感、牵扯感和灼热感等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^[4]. 卢天

Received 26 February 2014, revised 14 April 2014, accepted 22 May 2014, available online 28 January 2015.

* Corresponding author. E-mail: liweijiani@home.swjtu.edu.cn, Tel: +86-28-87634270.

The project was supported by National Natural Science Foundation of China (51175440 and 51290291).

国家自然科学基金项目(51175440 和 51290291)资助.

健^[5]研究了皮肤的刚度随热损伤度的提高而下降. Brennan 等^[6]对在伊拉克执行任务的军人脚部摩擦水泡的患病率和相关因素做了统计和分析,得出脚部摩擦水泡的患病率为33%,其中11%必须要进行医疗护理;女性的发病率高于男性. Cortese 等^[7]在猕猴的手掌和脚掌进行了水泡摩擦试验,证实可以用猕猴皮肤替代人体皮肤模拟摩擦水泡的产生. Sulzberger 等^[8]研究了人类手掌皮肤摩擦水泡的形成,得出没有角质层的部位一般不会有摩擦水泡的产生. 我们前期的研究结果指出皮肤与接触物体之间处于相对滑移和黏着的中间过渡状态时最易引起皮肤损伤^[9];施加在兔皮肤表面的法向载荷和往复滑动频率越大,在相同的时间内对皮肤造成的损伤就越严重^[10]. 另外,残肢患者穿戴假肢时残疾皮肤的微划痕损伤与残肢袜套织物的针织参数、表面特征及材料成分等有关^[11].

以上国内外文献从皮肤的病理学或从生物摩擦学角度研究了皮肤摩擦损伤的基本规律,为皮肤的损伤研究奠定了一定基础,但是皮肤的摩擦学运行条件与皮肤损伤规律的对应关系尚不清楚,人体生物摩擦学行为和机理研究是生物摩擦学研究的重要科学问题^[12]. 鉴于此,本文作者选用活体兔皮肤替代残肢皮肤,通过模拟假肢穿戴时残肢皮肤/接收腔界面的两种摩擦行为,结合生物摩擦学和组织病理学等方法,对皮肤的摩擦运行状态及损伤机理进行了研究,以期对残疾患者穿戴假肢时减少残肢皮肤摩擦损伤的风险提供参考依据,也为假肢接受腔的舒适性设计提供试验依据.

1 实验部分

1.1 材料

为了模拟残肢皮肤与假肢接受腔之间的接触界面,摩擦副设计为面-面接触. 上摩擦副为假肢接受腔材料丙烯酸树脂,将厚度为2.7 mm的丙烯酸树脂板加热弯曲成直径为15 mm的圆柱形壳体,边缘倒角1 mm,用强力胶粘结在特制的铜圆柱探头上. 下摩擦副材料应用活体兔皮肤模拟残肢皮肤,选用健康的新西兰大耳兔(四川大学实验动物养殖中心提供)4只,体重 2.0 ± 0.2 kg. 试验24 h前除去兔背部脊柱两侧约10 cm×15 cm试验部位被毛,要求脱毛部位皮肤无损伤. 在兔脊柱两侧脱毛部位各选3个试验部位,其中5处为摩擦试验部位,1处作为对照部位. 试验前对兔采用耳缘静脉注射戊巴比妥钠麻醉.

1.2 试验方法

1.2.1 摩擦试验

摩擦试验在 UMT-II 多功能摩擦磨损试验机上进行,采用面-面接触的往复滑移模式. 该设备可模拟残疾人穿戴假肢时皮肤与假肢接受腔之间的往复摩擦运动,并可全程记录试验过程中不同法向载荷、位移以及频率下的摩擦力、摩擦系数随时间的变化. 试验前将麻醉的兔子固定在设备下部的试验台上,并固定好摩擦部位的皮肤. 试验参数如下:法向载荷 F_n 为0.5和3.5 N,根据 Zhang 等^[1-3]对接受腔与残肢皮肤间的力学分析确定;往复滑动频率 f 为0.5 Hz,往复位移 D 分别为 ± 2.5 mm和 ± 5 mm,模拟穿戴假肢患者行走时步频及皮肤与接收腔的上下窜动距离;往复运动时间均为10 min. 试验温度为 20 ± 2 °C,空气相对湿度为 $50\% \pm 5\%$. 试验分为4组,各组试验参数如表1所示. 每组参数在同一只兔皮肤5个试验部分各进行1次.

1.2.2 皮肤往复运动中的能量耗散

皮肤是一种黏弹性非线性材料,往复摩擦过程中存在能量损耗^[13]. 在一个往复摩擦周期内的摩擦力-位移曲线(F_t-D)呈不闭合形状,如图1所示. 不闭合图形的面积值即为一个往复摩擦试验循环内能量的耗散值,面积值应用定积分进行求解.

表1 试验参数
Table 1 Test Parameters

Test number	Normal force/N	Displacement /mm	Frequency /Hz	Time /min
1	0.5	± 2.5	0.5	10
2	0.5	± 5	0.5	10
3	3.5	± 2.5	0.5	10
4	3.5	± 5	0.5	10

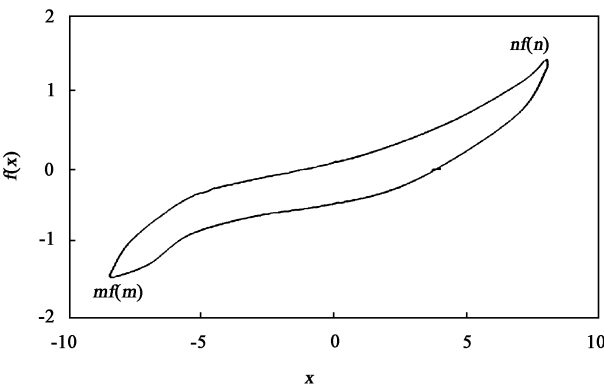


Fig. 1 F_t-D curve of skin in one reciprocating cycle friction test

图1 皮肤在一个往复摩擦循环内的 F_t-D 曲线

设函数 $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$,在区间 $[m,n]$ 上恒为正时,定积分 $S = \int_m^n (ax^3 + bx^2 + cx + d) dx = \left(\frac{ax^4}{4} + \frac{bx^3}{3} + \frac{cx^2}{2} + dx\right)\Big|_m^n$ 的几何意义是在区间 $[m,n]$ 上以曲线 $f(x)$ 为曲边的曲边梯形的面积,一般情况定积分 $\int_m^n f(x) d(x)$ 的几何意义是介于 x 轴、函数 $f(x)$ 的图像以及 $x = m, x = n$ 之间各部分的面积代数和,在 x 轴上方的面积取正号,在 x 轴下方的面积取负号. 两曲线两端分别相交在点 $[m, f(m)]$ 和点 $[n, f(n)]$,围成的不规则形状同时分布在 x 轴上方和下方,当需要求围成的不规则形状的面积,只需将曲线 $f(x)$ 往上移动 $f(m)$ 个单位,使曲线方程由 $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 变为 $f(x) + f(m) = ax^3 + bx^2 + cx + d$,这样围成的不规则形状全部位于 x 轴上方,再利用积分公式分别求出两曲线在区间 $[m, n]$ 上与 x 轴围成图形的面积,两面积相减的绝对值即为两曲线围成的不规则形状的面积.

1.3 皮肤表面损伤评价

根据国际标准 ISO 10993 - 10: 1995 医疗器械生物学评价第 10 部分: 皮肤刺激与致敏试验,对皮肤摩擦过程中出现的红斑和水肿反应通过记分进行评价,见表 2.

表 2 皮肤刺激反应评价表^[14]
Table 2 Evaluation of skin irritation response^[14]

Skin irritation	Scoring
Erythema	-
No erythema	0
Very slight erythema, barely perceptible	1
Well defined erythema	2
Moderate to severe erythema	3
Severe erythema, beet redness to slight eschar formation, injuries in depth	4
Edema	-
No edema	0
Very slight edema, barely perceptible	1
Slight edema, edges of area well defined by definite raising	2
Moderate edema, area raised approximately 1 mm	3
Severe edema, raised more than 1 mm, and extending beyond area of exposure	4
Maximum scoring	8

1.4 皮肤病理学评价

试验结束 24 h 后采用静脉推入空气法处死兔子,及时切取摩擦部位厚约 3 mm,大小约 1.0 cm × 1.0 cm 的皮肤组织,10% 中性甲醛固定,逐级酒精脱水,二甲苯透明,石蜡浸透,包埋,切片,苏木精 -

伊红(HE)染色,制成 5 μm 石蜡切片. 在光学显微镜(OLYMPUS, BX63)低倍和高倍镜下分别观察不同摩擦工况下的皮肤损伤组织 HE 染色切片,并在 10 倍物镜下测量每张 HE 切片上皮肤的痂皮厚度,连续测量 5 个部位,取平均值.

1.5 统计学处理

对每组参数下的 5 次试验进行皮肤表面的损伤评价记分、HE 切片中的痂皮厚度测量和摩擦过程中的能量耗散计算,所得结果均用 $\bar{x} \pm s$ 表示,并用成组 t 检验进行统计学分析, $P < 0.05$ 表示组间差异具有统计学显著.

2 结果与分析

2.1 皮肤摩擦特性分析

图 2 所示为 4 组不同往复摩擦条件下的兔皮肤平均摩擦系数随时间的典型变化曲线. 可见在法向

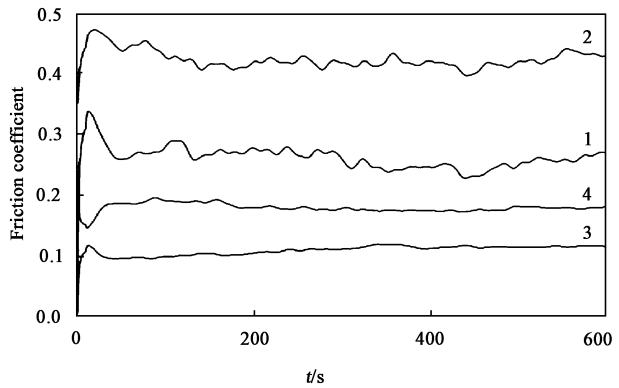


Fig. 2 Typical friction coefficient with time under different frictional conditions

图 2 兔皮肤不同摩擦条件下摩擦系数随时间的典型变化曲线

载荷 0.5 N 时的 1、2 组兔皮肤摩擦系数整体大于法向载荷 3.5 N 时的 3、4 组;而在同一法向载荷作用下,往复摩擦位移为 ± 5 mm 的第 2 组兔皮肤摩擦系数大于往复摩擦位移为 ± 2.5 mm 的第 1 组,第 4 组兔皮肤摩擦系数大于第 3 组. 由于处于麻醉状态的兔子具有呼吸和心跳,使试验部分的皮肤不能保持静止状态,因此兔皮肤的摩擦系数随时间的变化有所波动,但其不影响摩擦系数的整体变化趋势.

图 2 中当摩擦系数达到稳定状态时,4 组不同往复摩擦条件下的兔皮肤在一个往复循环周期内的典型摩擦力 - 位移 ($F_t - D$) 曲线见图 3,图 3 中 (a)、(b)、(c) 和 (d) 依次对应 1、2、3 和 4 组摩擦工况下的兔皮肤 $F_t - D$ 曲线. 可见,图 3 (a) 和 (c) 的

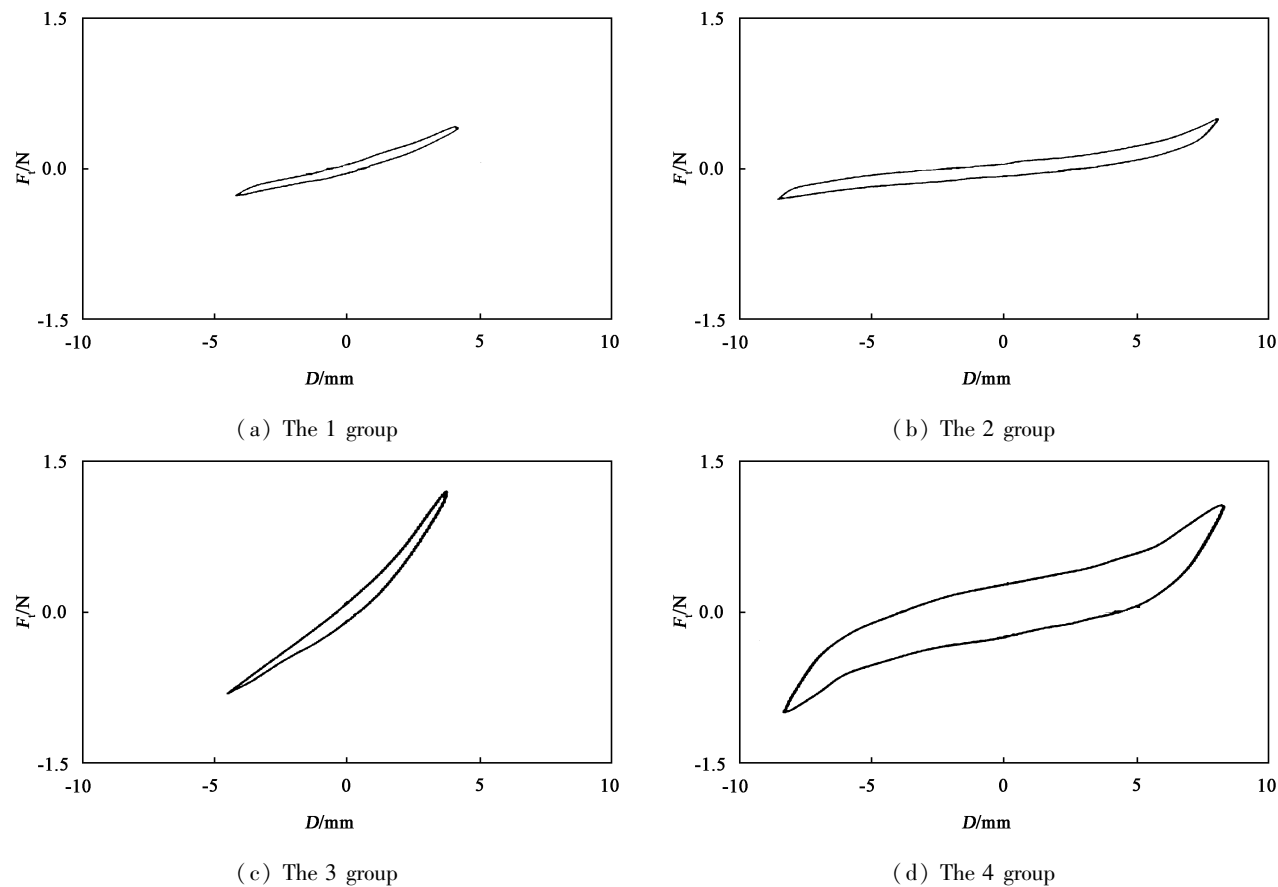


Fig. 3 Typical $F_t - D$ curves under different frictional conditions

图3 兔皮肤不同摩擦条件下的典型 $F_t - D$ 曲

$F_t - D$ 曲线基本上呈半闭合形状,图 3(b)和(d)的 $F_t - D$ 曲线上呈不规则的椭圆形. 根据我们前期的研究结果^[9]:皮肤在不同往复滑动摩擦条件下可得到平行四边形、椭圆形和半闭合形三种 $F_t - D$ 曲线,根据 $F_t - D$ 曲线形状的不同,皮肤的摩擦行为可分为相对滑移状态、相对滑移与黏着同时存在的中间过渡状态和黏着状态. 从试验观察和 $F_t - D$ 曲线形状可知,1、3 组的试验条件使兔皮肤与上摩擦副之间处于黏着状态,往复摩擦位移主要是由皮肤的弹性变形来协调;2、4 组的试验条件使兔皮肤与上摩擦副之间处于相对滑移与黏着同时存在的中间过渡状态,往复摩擦位移由兔皮肤与上摩擦副之间的相对滑动和兔皮肤的部分弹性变形来协调. 因此,在法向力为 0.5 和 3.5 N,往复位移为 ± 2.5 mm 时,兔皮肤的摩擦行为均处于黏着状态,而当往复位移增大到 ± 5 mm 时,兔皮肤与上摩擦副之间出现相对滑动,兔皮肤的摩擦行为均处于中间过渡状态.

图 3 中兔皮肤在一个往复摩擦循环内的两条 $F_t - D$ 曲线不闭合,说明有能量损耗. 按照 1.2.2 节摩擦过程中的能量损耗定积分算法,分别得到 4 组

不同往复摩擦条件下一个往复摩擦循环内的平均能量损耗,如图 4 所示. 可见,往复摩擦过程中,相同往复位移的 3.5 N 法向载荷作用下的能量损耗显著大于 0.5 N;而相同法向载荷作用下,往复位移增大到 ± 5 mm 时处于中间过渡状态的能量损耗显著大于往复位移 ± 2.5 mm 时的黏着状态($P < 0.05$). 兔皮肤与上摩擦副处于黏着状态时,其往复运动的位移

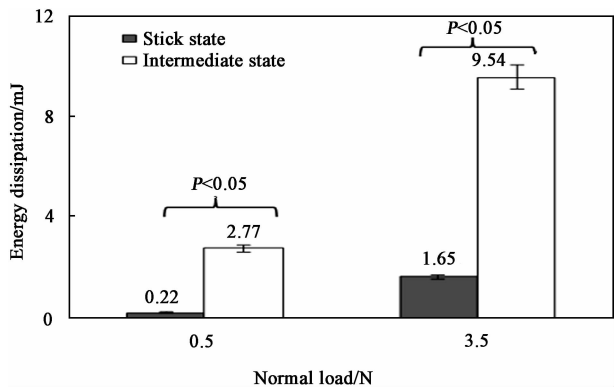


Fig. 4 Energy dissipation under different frictional conditions

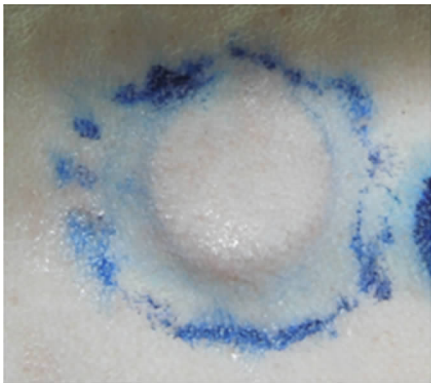
图4 兔皮肤不同摩擦条件下的能量耗散损耗

往复位移 $\pm 2.5\text{ mm}$ 时的黏着状态 ($P < 0.05$). 兔皮肤与上摩擦副处于黏着状态时,其往复运动的位移主要通过皮肤的弹性变形来协调,能量损耗主要是促使皮肤发生弹性变形的能量,能量损耗相对较小;而兔皮肤与上摩擦副处于中间过渡状态时,往复摩擦位移由兔皮肤与上摩擦副之间的相对滑动和兔皮肤的部分弹性变形来协调,能量损耗是克服兔皮肤与上摩擦副相对滑动的摩擦阻力和兔皮肤弹性变形的能量两部分总和,因此,能量损耗显著大于黏着状态. 能量损耗大说明在往复滑动过程中需要克服的摩擦阻力较大,因此,如图 2 所示,相同法向力作用下处于中间过渡状态的兔皮肤摩擦系数显著大于黏着状态.

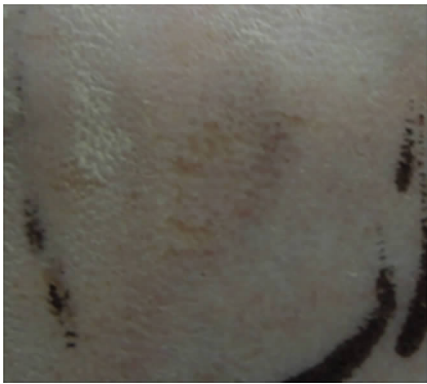
2.2 皮肤组织损伤分析

2.2.1 皮肤表面损伤

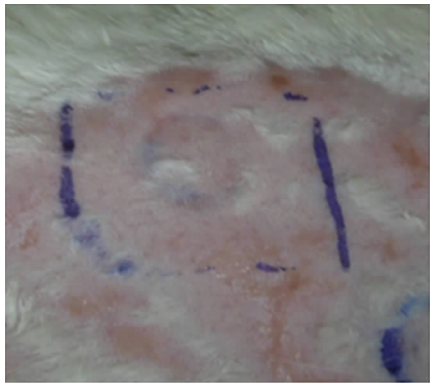
图 5 为在不同条件下往复摩擦后的兔皮肤表面损伤照片,图 5(a~d)依次对应着 1、2、3、4 组的摩擦工况. 表 3 是根据皮肤刺激与致敏试验的国际标准(1.3 节),对兔皮肤摩擦部位出现的红斑和水肿进行的记分. 兔皮肤在不同往复摩擦条件下,皮肤表面的角质层及表皮易撕裂,组织液会渗出,局部的压力易造成血液循环受阻,摩擦过后均会出现不同程度的红斑和水肿. 在相同法向力作用下,处于 2、4 组的中间过渡状态的兔皮肤角质层及表皮破损、组织液渗出、红斑、水肿等出现的时间较短,对应的损伤记分较高,损伤较严重;而 1、3 组的黏着状态对应的



(a) The 1 group



(b) The 2 group



(c) The 3 group



(d) The 4 group

Fig. 5 Rabbit skin irritation friction response under different conditions

图 5 不同状态下的兔子皮肤摩擦反应

表 3 不同摩擦条件下的皮肤刺激反应记分 ($p < 0.05$)

Table 3 Skin irritation scores under different friction testing conditions

Test number	Control	1	2	3	4
Erythema	0 ± 0.0	1.35 ± 0.48	3.55 ± 0.53	2.64 ± 0.51	3.85 ± 0.65
Edema	0 ± 0.0	0.58 ± 0.50	2.50 ± 0.50	2.43 ± 0.56	3.74 ± 0.46
Maximum irritation score	0 ± 0.0	1.93 ± 0.49	6.05 ± 0.52	5.07 ± 0.535	7.59 ± 0.56
<i>p</i>			< 0.05		

兔皮肤损伤相对较轻. 因此,随着法向载荷及往复位移的增大,处于中间过渡状态的兔皮肤损伤程度增大.

2.2.2 皮肤病理性变化

图 6(a) 为对照组未摩擦的兔皮肤 HE 染色后的光镜照片. 可见,兔表皮厚度约 2~3 层细胞. 表皮上覆盖很薄的一层角质层,基底细胞整齐排列在基底膜内侧,清晰可见. 真皮层包括致密的胶原纤维、

毛囊、皮脂腺和毛细血管等. 摩擦后的兔皮肤表皮会破损,局部的毛细血管扩张,管壁渗透性增强,血浆中的白细胞、吞噬细胞以及抗体等多种成分渗出,形成炎性渗出物,渗出物干燥,破损面收缩,形成痂皮. 炎性渗出物越多,形成的痂皮就越厚,说明损伤越严重. 图 6(b~d)、(e) 依次为 1、2、3、4 组摩擦条件下兔皮肤 HE 染色后的光镜照片,可以观察到在 10 倍物镜下兔皮肤表面形成不同厚度的痂皮. 表 4 列出

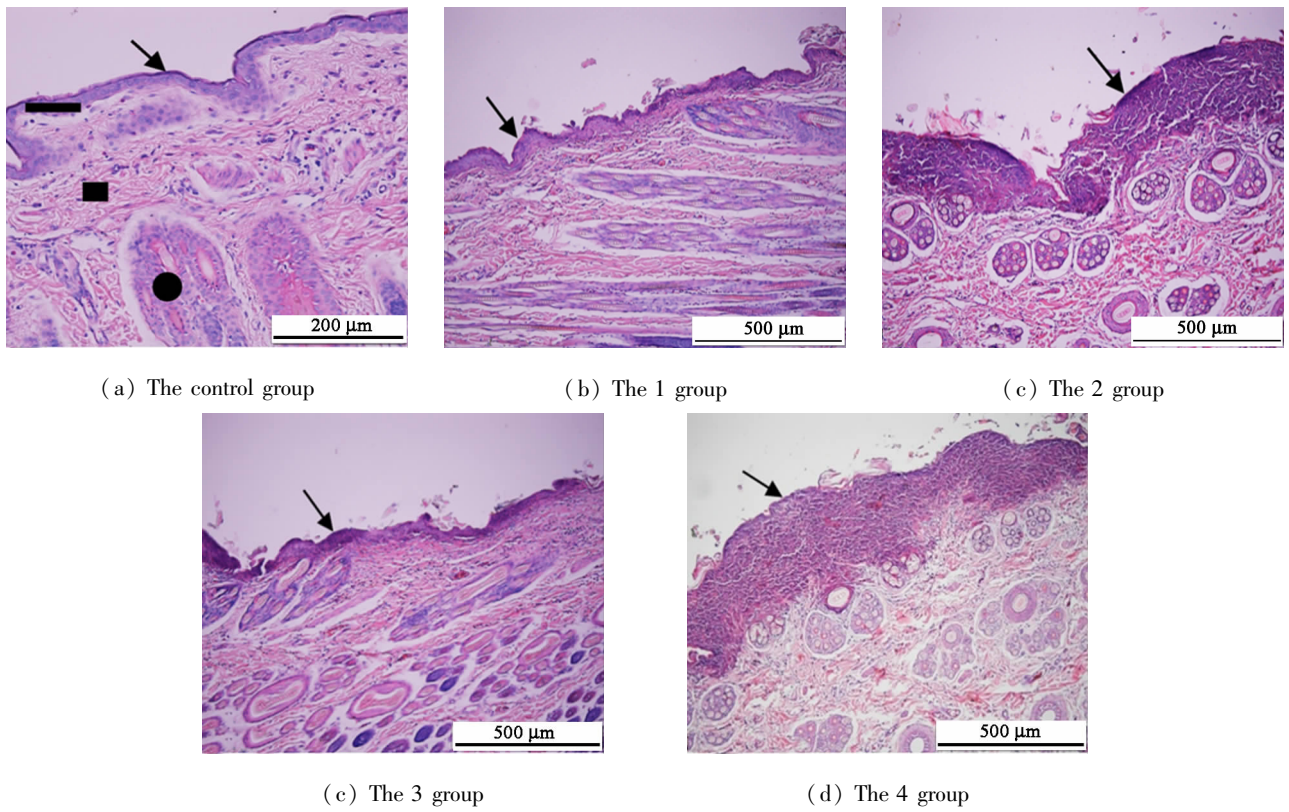


Fig. 6 Histological photomicrographs of rabbit epidermis under different friction testing conditions(HE0.63×10)
图 6 不同摩擦条件下兔表皮组织学变化(HE0.63×10)

表 4 不同摩擦状态下痂皮厚度及显著性分析		
Table 4 Scab thickness of traumatic skin for different friction testing states and statistical significance analysis		
Test number	Scab thickness/ μm	P
1	112.3 ± 5.3	<0.05
2	200.9 ± 4.6	
3	150.6 ± 4.4	
4	293.9 ± 4.7	

了不同摩擦条件下的痂皮平均厚度及方差. 在相同法向力作用下,1、3 组黏着状态下兔皮肤表面痂皮平均厚度分别为 112.3 和 150.6 μm ;2、4 组中间过渡状态下痂皮平均厚度分别为 200.9 和 293.9 μm ;中间过渡状态下的兔皮肤表面痂皮平均厚度显著大

于黏着状态. 因此,随着法向载荷及往复位移的增大,处于中间过渡状态的兔皮肤表面炎性渗出物增多,形成的痂皮厚度增加,损伤程度增大.

从上述的兔皮肤表面损伤及组织学结果可以得出,兔皮肤摩擦行为处于相对滑移和黏着的中间过渡状态时损伤最为严重,这一结果与我们的前期研究结果相一致^[9]. 黏着状态下,上摩擦副与兔皮肤完全黏着无表面相对滑动,往复位移主要由皮肤的弹性变形来协调, F_t-D 曲线基本上呈半闭合形状,摩擦系数较低,摩擦力做功较少,能量耗散少. 由于上、下摩擦副之间无表面滑动,表皮不易破损,皮肤整体损伤较轻. 相比之下的中间过渡状态,兔皮肤和上摩擦副之间既有相对滑动又有黏着,往复摩擦位

移由表面相对滑动和兔皮肤的部分弹性变形来协调,摩擦系数较大,摩擦力做功和能量耗散相对较多,因此角质层及表皮易破损,表面组织液渗出、红斑、水肿的形成所需时间较短,炎性渗出物较多,痂皮厚度增加,皮肤整体损伤较为严重。

兔皮肤的角质层很薄,没有透明层,仅有 3~5 层的表皮基底细胞整体排列在角质层和基底膜之间,如图 6(a)所示,根据本文以及我们前期的皮肤往复滑动摩擦下的自适应研究结果^[15],发现摩擦后兔皮肤表面没有形成水泡。不同的摩擦运行状态下,兔皮肤摩擦损伤的机理:一定的外界力作用在兔皮肤上,导致皮肤局部血液循环障碍,皮肤表面可观察到压痕和红斑。由于兔皮肤角质层较薄,若皮肤表面处于摩擦滑动状态时,表面的摩擦力引起表皮层之间的剪切效应^[16],主要表现为表皮的角质层很快被撕裂或脱落;若皮肤表面处于黏着滑动状态时,法向载荷容易引起液体静压力^[17]的增大,毛细血管扩增或破损,主要表现为组织液或血浆渗出形成红斑。因此,在黏着状态下,表皮层的剪切效应较弱,角质层有轻微的撕裂,表皮基底细胞坏死较少,液体静压力使得毛细血管内压升高,通透性增强,有大量的组织液渗出,基底膜基本完整,最后形成的痂皮厚度较薄;但在中间过渡状态下,兔皮肤的整体形变较大,除了有黏着状态下的损伤机理,同时还存在摩擦探头和皮肤表面的摩擦滑动,剪切效应容易引起角质层磨破,有大量的表皮基底细胞坏死,液体静压力使毛细血管扩增或磨损,通透性增强,大量的组织液或血浆渗出,基底膜受损严重,真皮层有轻微的炎性渗出物,和黏着状态相比,痂皮厚度有明显增加。水泡形成具备两个条件^[16]:第一,表皮层之间牢固的相互黏附,表面的摩擦力可以通过角质层和颗粒层传播,产生剪切效应,使颗粒层和棘层分离;第二,当有较厚的角质层或角质层和颗粒层有较强的耐磨性完全可以抵抗摩擦力引起深度损伤,此时就会形成水泡。否则,表皮可能会被磨破而不会产生水泡。这就解释了为何兔皮肤在摩擦条件下很难形成水泡,而人体的手掌或脚掌则较容易摩擦产生水泡,但是皮肤具有较强的自适应性^[15],不排除在长时间(如几个月)的反复摩擦下,皮肤的角质层会增厚,形成水泡。

兔皮肤处于中间过渡状态,法向载荷和往复位移的增大会加大这种损伤程度。因此在假肢接受腔的设计过程中应考虑减小接受腔与残肢界面的上下滑动,减小残肢的承载压力,避免残肢皮肤损伤的

形成。

3 结论

a. 在 0.5 或 3.5 N 相同法向力作用下,随着往复摩擦位移从 ± 2.5 mm 增加到 ± 5 mm,兔皮肤的摩擦行为从黏着状态转变到中间过渡状态,往复摩擦过程中的能量损耗增加。

b. 由于中间过渡状态下的兔皮肤摩擦系数较高,能量损耗较大,因而造成的皮肤损伤程度比黏着状态严重,主要表现为痂皮厚度的增加。

c. 与人体皮肤相比,兔皮肤较松弛,整个表皮层较薄,不能满足水泡形成的条件,因此在正常摩擦情况下,兔皮肤易磨破,很难有水泡形成。

参考文献:

- [1] Zhang M, Mak A F T. A finite element analysis of the load transfer between an above-knee residual limb and its prosthetic socket - roles of interface friction and distal-end boundary conditions [J]. *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 1996, 4(4): 337-346.
- [2] Zhang M, Turner-Smith A R, Roberts V C. The reaction of skin and soft tissue to shear forces applied externally to the skin surface [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 1994, 208(4): 217-222.
- [3] Zhang M, Mak A F T. In vivo friction properties of human skin [J]. *Prosthetics and Orthotics International*, 1999, 23(2): 135-141.
- [4] Li W, Kong M, Liu X D, et al. Effect of artificial perspiration on tribological properties of human skin [J]. *Tribology* 2008, 28(1): 88-93 (in Chinese) [李伟, 孔梅, 刘夕东, 等. 汗液对皮肤摩擦特性的影响研究 [J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(1): 88-93].
- [5] Lu T J, Xu F. Mechanical behavior of thermally-damaged skin tissue under compression [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2009, 30(5): 433-443 (in Chinese) [卢天健, 徐峰. 皮肤组织压缩行为与热损伤的相关性 [J]. *固体力学学报*, 2009, 30(5): 433-443].
- [6] Brennan F H, Jackson C R, Olsen C, et al. Blisters on the battlefield: the prevalence of and factors associated with foot friction blisters during Operation Iraqi Freedom I [J]. *Military Medicine*, 2012, 177(2): 157-162.
- [7] Cortese T A, Griffin T B, Layton L L, et al. Experimental Friction Blisters in Macaque Monkeys [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1969, 53(2): 172-177.
- [8] Sulzberger M B, Cortese T A, Fishman L, et al. Studies on blisters produced by friction [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1966, 47(5): 456-465.
- [9] Li W, Qu S X, Zhou Z R. Reciprocating sliding behaviour of

human skin in vivo at lower number of cycles [J]. Tribology Letters,2006,23(2): 165 – 170.

[10] Li W,Qu S X,Kong M,*et al.* Effects of frictional properties on traumas of rabbit skin [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2008,25(2):351 – 356(in Chinese)[李炜,屈树新,孔梅,等. 摩擦对兔皮肤损伤的研究[J]. 生物医学工程学杂志,2008, 25(2): 351 – 356].

[11] W Li,X D Liu,Z B Cai,*et al.* Effect of prosthetic socks on the frictional properties of residual limb skin [J]. Wear, 2011 (271):2 804 – 2 811.

[12] Ge S R, Wang C T. State – of – the – art and prospect of biotribology in human body[J]. Tribology,2005,25(2): 186 – 191(in Chinese)[葛世荣,王成焄. 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].

[13] Meyers M A,Chen P Y,Lin A Y M,*et al.* Biological materials: structure and mechanical properties[J]. Progress in Materials Science,2008,53(1): 1 – 206.

[14] Biological Evaluation of Medical Devices – Part 10: Tests for Irritation and Sensitization, ANSI/AAMI/ISO 10993 – 10 – 1995.

[15] Li W,Qu S X,Zheng Y J,*et al.* Skin self – adaptation to friction trauma under reciprocal sliding conditions [J]. Tribology International,2011,44(12): 1 782 – 1 789.

[16] Sulzberger M B, Cortese T A, Fishman L, *et al.* Studies on blisters produced by friction [J]. Journal of Investigative Dermatology,1966,47(5): 456 – 465.

[17] Knapik J J,Reynolds K L,Duplantis K L,*et al.* Friction blisters [J]. Sports Medicine,1995,20(3): 136 – 147.