

摩擦学学报

TRIBOLOGY



不同尖锐度纹理形状的摩擦触觉感知与表征研究

唐玮, 张梅梅, 刘瑞, 杨雷, 余闯, 朱华

Tactile Perception of Texture Shape with Different Sharpness from Finger Friction to Brain Activation

TANG Wei, ZHANG Meimei, LIU Rui, YANG Lei, YU Chuang, ZHU Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020114>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高速列车制动闸片摩擦块形状对制动界面摩擦学行为的影响

Effect of Brake Pad Friction Block Shape on Tribological Behavior of Brake Interface of High-Speed Train

摩擦学学报. 2021, 41(1): 95 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020038>

不同分子量和交联密度对形状记忆聚酰亚胺摩擦学性能的影响机制研究

Effects of Molecular Weight and Crosslinking Density on the Tribological Properties of Shape Memory Polyimides

摩擦学学报. 2019, 39(5): 547 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019043>

食品口腔摩擦学研究进展

Progress of Oral Tribology in Food

摩擦学学报. 2019, 39(1): 118 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018058>

表面织构钛合金的干摩擦和全氟聚醚油润滑下的摩擦学性能研究

Tribological Property of Titanium Alloy Surface with Different Texture Structure under Dry Friction and Perfluoropolyether Lubrication

摩擦学学报. 2018, 38(6): 658 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018111>

两种水基摩擦改性剂对轮轨黏着和损伤性能的影响

Effects of Two Kinds of Water-Based Friction Modifiers on Wheel-Rail Adhesion and Damage

摩擦学学报. 2021, 41(2): 176 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020109>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020114

不同尖锐度纹理形状的摩擦触觉感知与表征研究

唐 玮*, 张梅梅, 刘 瑞, 杨 雷, 余 闯, 朱 华
(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 通过开展触觉感知不同尖锐度纹理形状的接触摩擦特性、主观认知行为和功能核磁共振试验, 从皮肤的“感”、大脑的“知”和主观的“评”全面系统地对不同纹理形状的摩擦触觉感知进行了量化表征研究. 研究表明: 接触摩擦力、主观评价、激活脑区面积和强度是表征摩擦触觉感知的有效参数. 触摸不同纹理表面的摩擦力中黏着摩擦力比形变摩擦力占比大, 触摸平角纹理的摩擦力最大, 尖角纹理的摩擦力最小. 黏着感主要受接触面积和黏着摩擦力的影响; 尖锐感主要受触觉感受体所受应力和形变摩擦的影响; 而舒适感受到表面摩擦机制和触觉感受体所受应力综合影响. 触觉感知纹理形状激发的大脑功能区以躯体感觉皮层为主, 激活脑区主要位于中央前回和后回. 触摸过程的舒适感与激活脑区大小和强度成反比, 舒适感差的纹理激发的脑区范围和强度大, 且存在负激活现象.

关键词: 黏着摩擦; 形变摩擦; 触觉感知; 纹理形状; 大脑认知

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)03-0373-09

Tactile Perception of Texture Shape with Different Sharpness from Finger Friction to Brain Activation

TANG Wei*, ZHANG Meimei, LIU Rui, YANG Lei, YU Chuang, ZHU Hua

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to systematically study the tactile perception of texture shape from finger friction to brain response, skin friction, brain fMRI, and subjective cognitive experiment were carried out during fingers exploring textured surfaces. Samples with different texture shape were chosen. The results indicated that friction, subjective evaluation, activated brain range and intensity are effective parameters to represent tactile perception. The friction was constituted by adhesive friction and deformation friction during perceived the textures. The adhesive force was larger than deformation force. The order of friction force perceived different texture shape was flat shape>round shape> sharp shape. The stickiness was mainly affected by contact area and adhesive friction. The sharpness was mainly affected by stress on the tactile receptors and deformation friction. The comfortableness was affected by the surface friction and stress on the tactile receptor. During feeling the shape texture, somatosensory cortex region were significantly activated which included precentral gyrus and postcentral gyrus. The comfortable feeling was inversely proportional to the brain range and intensity. The texture with poor comfortable feeling stimulated large brain range and intensity, meanwhile there was negative activation phenomenon.

Received 14 June 2020, revised 30 August 2020, accepted 27 September 2020, available online 28 May 2021.

*Corresponding author. E-mail: tangwei@cumt.edu.cn, Tel: +86-13776586885.

The project was supported by the Natural Science Foundation of China (51875566, 51775546) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, and technically helped by Dr. Bai Shengjie, Huchunai and Shi Yibing in the nuclear magnetic resonance test section of Xuzhou central hospital.

国家自然科学基金面上项目(51875566, 51775546)和江苏省高校优势学科建设工程项目资助; 徐州市中心医院白胜杰、胡春爱、师毅冰医生在核磁共振试验部分给予技术帮助.

Key words: adhesion friction; deformation friction; tactile perception; shape texture; brain cognitive

材料的触觉质感是人体皮肤接触材料表面所形成的感觉印象,相较于视、听觉,人们对于触觉的认知还非常有限,原因在于触觉的形成是1个复杂的神经传导与加工过程.在触觉感知过程中,皮肤与接触表面的摩擦振动给予皮肤内触觉感受体以机械刺激,并将机械能量信号转化为神经电位信号,经传入神经、脊髓和脑干,最终传递至大脑皮层相应的加工区域,大脑经过加工认知形成触感认识,再经脑干、脊髓、传出神经传导至相应的效应器,做出触感的反馈与判断^[1-2],如图1所示.所以,摩擦振动是触感的“激发器”,在触觉感知过程中起到了关键作用,触觉感知涉及到皮肤的“感”、大脑的“知”和主观的“评”,材料触觉质感的研究三者缺一不可.

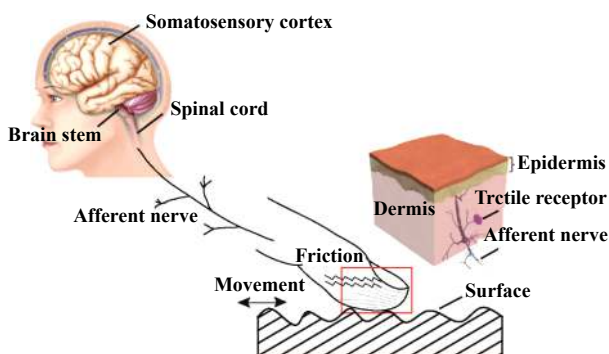


Fig. 1 Schematic diagram of tactile perception process
图1 摩擦触觉感知过程示意图

目前对于材料质地的触觉感知研究多针对砂纸、织物、玻璃等特定材质开展,材料表面形貌特性主要通过表面粗糙度进行表征.例如:Li等^[3]研究了手指触摸不同粗糙度砂纸时的触觉感受,发现摩擦触觉感知与EEG脑电信号有显著的相关性. Bhatia等^[4]利用fMRI方法研究了人体触摸不同表面粗糙度织物时的大脑反应,研究表明初级躯体感觉区与织物表面粗糙度相关,次级躯体感觉区与织物接触的愉悦舒适感相关,而大脑额叶与不舒适感有关. Tang等^[5]通过分析38种不同类型材料的触觉感知振动信号和摩擦信号,提取出了感知细致度、感知粗糙度和感知滑溜度共3大类8个触觉感知表征特征参数.

然而材料的表面形貌特征是由纹理的宽度、高度、形状和密度等构成的^[6],表面粗糙度是这些纹理特征的综合表征参数,经常会出现表面粗糙度相同但是纹理特征不同的情况,因此研究人体对材料表面的触

觉质感形成机理,实现对材料触觉质感的量化评价,仅通过粗糙度对材料的形貌特性进行表征是不够的,有必要对材料表面的纹理特征进行细化,开展纹理特征参数对触觉感知影响的系统研究.目前文献已有关于纹理高度、宽度和密度特征对触感影响的相关研究,例如:Tomlinson等^[7]研究了皮肤接触具有规则间隔光栅表面的摩擦行为,发现纹理特征高度会影响皮肤与接触表面的粘附与互锁接触特性.刘陶峰等^[8]研究了纹理表面特征高度对触觉感知的影响,分析了手指皮肤摩擦过程中的黏着、滞后和互锁作用机制的对摩擦感知的影响程度. Tang等^[9]采用摩擦学、有限元和事件相关电位方法研究了条纹状纹理的密度和宽度对触觉感知的影响,分析了皮肤机械感受体受力、摩擦系数和脑电响应与纹理特征的关系.纹理形状也是材料表面形貌的重要特征之一,是影响触感的1个重要特征参数,尚未见纹理形状特征与触感关系的研究报道.

触觉感知是1个相当复杂的过程,其相关研究涉及到生理心理学、认知神经学、生物摩擦学及生物力学等多种学科范畴.目前,对于材料触觉质感的研究大多集中在采用生物摩擦学方法研究皮肤与材料表面的摩擦接触特性^[10-11],采用功能核磁共振(fMRI)^[12-13]和脑电图(EEG)方法^[14-15]的大脑触感激活方式研究,采用认知行为学方法的触感主观评价研究^[16].涉及的触觉感知包括粗糙感、软硬感、冷暖感、尖锐感和黏着感等^[17-18],现有的文献有基于fMRI方法对软硬感^[19]、黏着感^[20]、粗糙感^[21]的研究,以及基于摩擦学和EEG方法对粗糙感的研究^[9,22],很少有将皮肤的“感”、大脑的“知”和主观的“评”结合起来展开研究.

因此,本文作者研究了手指皮肤触摸不同尖锐度形状纹理表面的摩擦接触特征,同时将fMRI方法和认知行为学引入材料摩擦触觉质感的表征评价中,从表面摩擦接触特性、大脑激活方式以及人的主观评价三方面对材料表面纹理的摩擦触觉感知与量化表征进行全面研究,研究成果可为材料表面的触觉再现、纺织品等触肤产品的粗糙度和质感的识别以及量化表征提供理论和技术支撑.

1 试验部分

1.1 试验材料及制备

亚克力属于日常生活中常见的接触性材料,且易

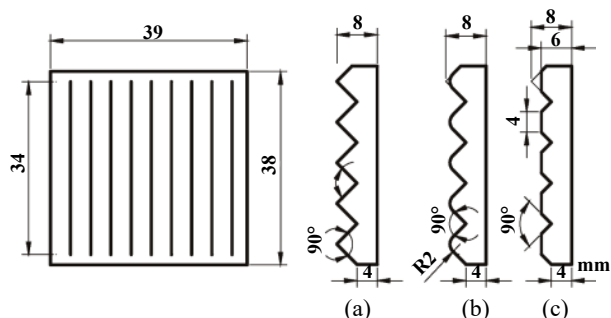


Fig. 2 Samples with different shapes (a) sharp shape, (b) round shape, and (c) flat shape

图2 不同形状纹理试样示意图 (a) 尖角; (b) 圆角; (c) 平角

于加工成型,因此采用经激光加工的具有不同纹理形状的亚克力板作为触感试样.试样尺寸为38 mm×39 mm×5 mm,纹理形状分为尖角、圆角和平角三类,具体形状特征如图2所示.

1.2 志愿者选取

手指是人体触觉最为敏感的部位之一,是人体感知外界环境的重要器官,因此选择右手食指为感知部位.试验招募10名年龄在22~25岁(23.6±1.1岁)的男性志愿者进行摩擦触觉感知试验,所有志愿者均为右利手且手部无伤病.

1.3 试验方法

1.3.1 触觉感知的摩擦学试验

采用自主设计的三轴力试验台进行摩擦学试验,试验台结构如图3所示.三分力传感器用来采集手指触摸试样时施加的正压力(z 轴方向)和触摸过程中的摩擦力(x 轴方向),其中 z 轴方向的量程为0~10 N, x 、 y 轴方向的量程为0~5 N.传感器上方通过螺钉固定1个带有凹槽的试样台,试样放置于凹槽中.使用CoCo80(Crystal Instruments, California, USA)信号采集仪记录并保存摩擦试验过程中的正压力信号和摩擦力信号,采样频率为1 kHz.

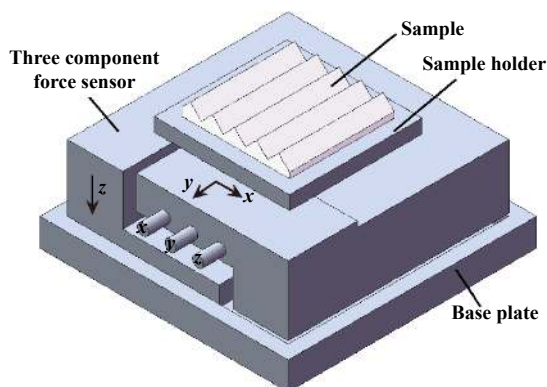


Fig. 3 Schematic diagram of triaxial force test bed

图3 三轴力试验台结构示意图

试验采用主动触摸方式,为保证试验中手指触摸试样表面能够保持基本恒定的触摸压力和速度,试验前对所有志愿者进行训练.训练时,志愿者将右手食指放置于试样上方,使用均匀力度,2 s时间在试样表面滑过20 mm的距离,即滑动速度控制在10 mm/s左右,其中触摸力可通过试验台上的压力传感器监控.正式试验采用和训练时一样的触摸条件,每组试验志愿者重复触摸10次,单次触摸间隔1 s,每组试验间隔3 min.

1.3.2 触觉感知的认知行为学试验

不同于摩擦力、摩擦系数和磨损量等传统的摩擦学性能评价指标,在皮肤摩擦学中,感觉即人的心理反应是评价其摩擦学行为的1个重要因素^[23-24],其中舒适感是1个非常重要的摩擦学性能指标,该指标主要用来评价纺织品、假肢、运动器材和劳动用品等触肤产品与人体皮肤摩擦接触过程中人体感觉是否舒适,但是,由于影响人体感觉的因素众多,因此到目前为止尚无关于皮肤摩擦感觉的规范评价标准^[25].在本研究中,受试者触摸纹理形状表面时,对于尖锐纹理主要感受到的是尖锐感,对于平角纹理主要感受到的是黏着感,由于至今还没有参数可用来定量地描述这些感觉,因此在本研究中,从心理反应角度采用尖锐感、黏着感和舒适感对皮肤摩擦过程中的这些感觉要素进行了表征,其中舒适感是尖锐感和黏着感等感觉的综合表征.

触觉感知的主观认知试验与摩擦试验同步进行,志愿者完成所有摩擦试验后在评分表上对三种试样的尖锐感、黏着感和舒适感3个触感维度进行评分.评分区间为1~10,较高的分数代表较强的尖锐感、较大的黏着感和较好的舒适感.

1.3.3 触觉感知的fMRI试验

fMRI技术能够精确定位触觉感知时大脑各功能区的激活位置和强度,以无创、直接的方式观察人脑对外界刺激的感知反应.该技术是以新陈代谢的血液动力学方法为基础,通过血氧水平变化(blood oxygenation level-dependent, BOLD)对大脑神经活动进行成像^[26].试验在医用GE 3.0T DISCOVERY MR750w (General Electric company, Boston, US)磁共振测试系统上进行,试验采用组块设计法.组块设计法是将多次同样的刺激组成1个刺激组块,即一种刺激在一定的时间内连续呈现,之后在规定的时序列下以刺激组块为单元逐个呈现.组块设计由于刺激持续的时间较长,因此容易得到高信噪比的大脑反应信号,此外考虑到

触觉感知的特殊性,即人体通常需要较长时间的直接接触才能获得更精确的触觉,因此本试验采用组块设计.其中单次刺激组块的频率为0.33 Hz,即在30 s内完成10次刺激.一种试样的试验共包含6个刺激任务组块和6个无刺激任务的静息组块,其中每个组块的时间均为30 s,即1组试验的时间为360 s.

由于主动触摸的肢体动作会干扰试验结果,因此刺激方式为被动刺激,由一名助理手持试样,将试样的纹理面在受试的右手食指上做单向摩擦运动,运动方向为手指内侧向指尖外侧.由于试验助理的操作会影响整个试验的刺激间隔,因此在正式试验前对试验助理进行训练,使其能够在正式试验中按照要求的刺激间隔、以基本均匀的力度和滑动速度完成试验操作.

2 结果与讨论

2.1 触摸不同纹理形状的摩擦机制

分别在0.5、1.0、1.5、2.0和2.5 N的触摸压力下开展试验,所有志愿者触摸三种试样时的实际触摸压力如图4所示.可以看出通过试验前的训练,志愿者在正式试验中能够保持要求的压力进行触摸.

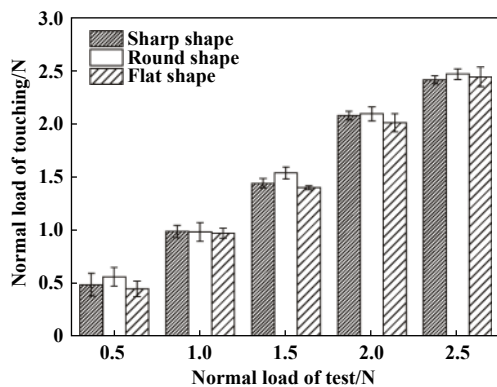


Fig. 4 Average touching normal load during tactile perception
图4 触摸过程中的平均触摸压力

不同触摸压力下感知纹理表面的摩擦系数结果如图5所示.从图5中可以看出在五种触摸载荷下,三种试样的摩擦系数大小均为平角>圆角>尖角.同时,三种试样的摩擦系数随着触摸压力的增加均有不同程度的下降,其中平角试样的摩擦系数下降幅度最大,圆角和尖角试样的摩擦系数下降趋势并不明显.

2.1.1 摩擦分量

人体皮肤属于黏弹性材料,在无润滑条件下,手指触摸纹理试样表面的摩擦力主要来源于皮肤和材料表面的黏着力以及皮肤软组织的形变,即总摩擦力 F 等于黏着摩擦力 F_a 与形变摩擦力 F_d 之和:

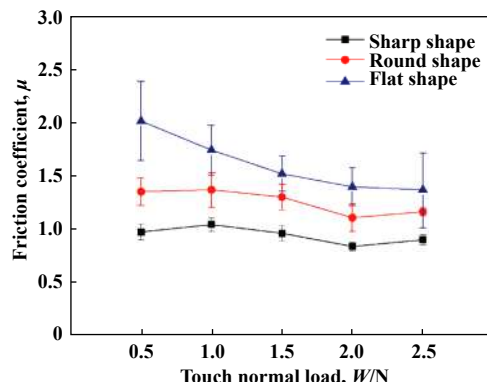


Fig. 5 Friction coefficient of samples under different touching load

图5 不同触摸压力感知纹理表面的摩擦系数

$$F = F_a + F_d \quad (1)$$

根据文献[27],黏弹性材料的黏着摩擦系数 μ_a 为

$$\mu_a = \frac{\pi}{2} \left(\frac{A_r}{W} \right) \tau_a \tan \delta \quad (2)$$

式中: W 为载荷, $\tan \delta$ 为弹性体的正切模量, A_r 为实际接触面积, τ_a 为剪强度.从式(2)可以看出,在触摸载荷一定的情况下,黏着摩擦系数与实际接触面积成正比,接触面积是影响黏着摩擦的1个重要因素.为此,通过在试样表面涂抹颜料,测量按压试样后手指染色区域面积的方法,可估算出触摸不同纹理试样时手指皮肤与试样的近似接触面积,结果如图6所示.从图6中可以看出,触摸时的接触面积大小为平角>圆角>尖角,据此可知,触摸过程中黏着摩擦力的大小为平角>圆角>尖角.

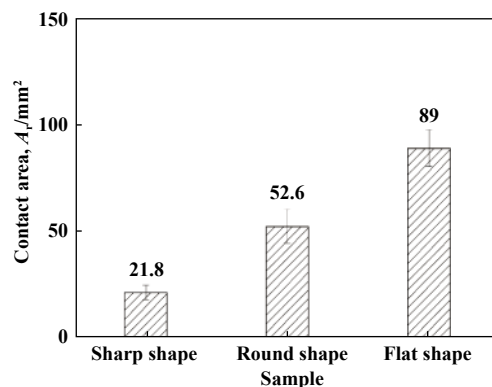


Fig. 6 Contact area of fingers with different samples
图6 手指触摸不同纹理试样的接触面积

同时手指皮肤在触摸纹理表面时,也会产生较大的变形,形变摩擦通常包含犁削摩擦和滞后摩擦.根据产生犁削摩擦的模型可以得到犁削摩擦力 F_p 的计算公式:

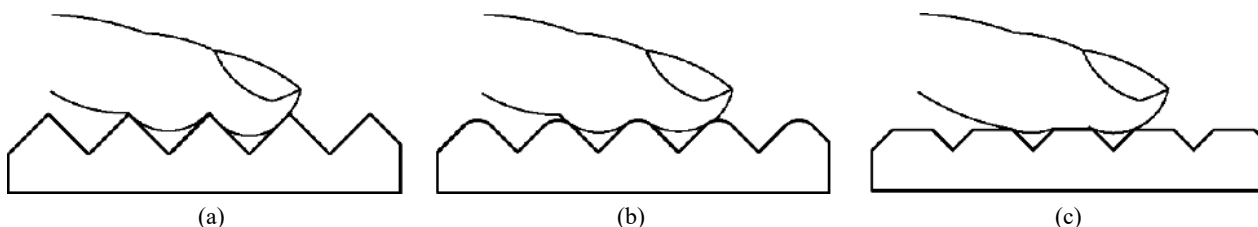


Fig. 7 Surface deformation of finger during touching (a) sharp shape, (b) round shape, and (c) flat shape

图7 手指触摸不同纹理形状试样的表面形变示意图

$$F_p = \sigma A_p \quad (3)$$

式中: A_p 为犁削面积; σ 为材料的屈服极限. 图7示意了摩擦感知过程中手指与不同试样的接触. 从图7中可以看出, 手指触摸不同纹理形状试样的皮肤变形程度为尖角>圆角>平角, 据此可知, 触摸过程中犁削摩擦力的大小为尖角>圆角>平角.

对于黏弹性材料, 变形还会导致材料在滞后恢复过程中产生能量损耗, 通常称这部分因素为滞后摩擦. 在不考虑黏着作用的情况下, 滞后摩擦系数 μ_h 为

$$\mu_h = k_h \frac{p_a}{E'} \tan \delta \quad (4)$$

式中: k_h 为微凸体形状和接触长度有关的常数; p_a 为接触面上的名义应力; E' 为存储模量. 根据公式(4), 滞后摩擦系数同接触面名义应力成正比. 当触摸压力相同时, 接触面应力随着接触面积的减小而增大, 因此触摸过程中滞后摩擦力的大小关系为尖角>圆角>平角.

综上, 触摸过程中形变摩擦力的大小为尖角>圆角>平角.

2.1.2 摩擦分量占比

根据以载荷 W 为函数的摩擦系数 μ 公式:

$$\mu = k \cdot W^{n-1} \quad (5)$$

对公式(5)两边取对数, 得到摩擦系数的对数方程

$$\log(\mu) = \log(k) + (n-1) \cdot \log(W) \quad (6)$$

指数 $n-1$ 可用来讨论手指触摸不同纹理试样时摩擦系数的压力依赖性, 进而讨论相应的摩擦机制^[28]. 为了进一步验证上述理论分析的准确性, 对图5的摩擦系数取对数, 对数图曲线结果如图8所示, 将对数图曲线进行线性拟合得到指数 $n-1$ 的近似值, 结果列于表1中.

Wolfram^[28]推导出摩擦力中黏着摩擦系数 μ_a 的表达式

$$\mu_a \propto W^{-1/3} \cdot E^{-2/3} \quad (7)$$

式中: W 为载荷; E 为皮肤的弹性模量.

Johnson^[29]推导出的皮肤变形对形变摩擦 μ_h 的贡

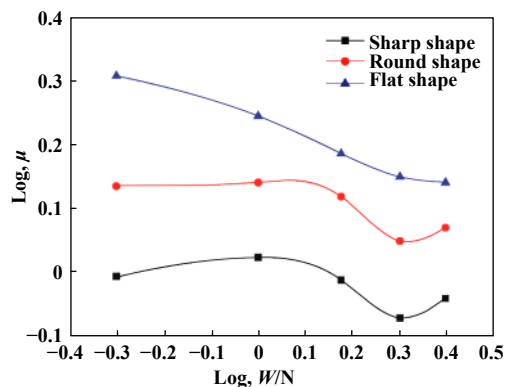


Fig. 8 Logarithmic graph of friction coefficient

图8 不同纹理试样摩擦系数对数图

表1 触摸不同纹理试样时的指数 $n-1$ Table 1 Exponent $n-1$ during touching different samples

Sample shape	Exponent $n-1$
Sharp	-0.05
Round	-0.08
Flat	-0.24

献, 其表达式为

$$\mu_h \propto W^{+1/3} \cdot E^{-1/3} \quad (8)$$

根据公式(7~8), 不同的摩擦机制对应着不同的指数, 其中黏着摩擦的指数为 $-1/3$, 形变摩擦的指数为 $+1/3$, 说明指数越小其黏着摩擦的贡献越大, 而指数越大其形变摩擦的贡献越大. 从表1可以看出, 对于平角试样的指数为 -0.24 , 与文献[27]中皮肤触摸光滑表面的指数 -0.3 接近, 数值接近黏着摩擦指数, 可见黏着摩擦为主要贡献因素. 随着纹理尖锐度的增强, 手指滑动时的变形程度加剧, 增大了形变摩擦力的贡献比例, 使指数 $n-1$ 增加. 表1根据指数大小关系显示的形变摩擦力所占比例为尖角>圆角>平角, 黏着摩擦所占的比例为平角>圆角>尖角, 可见理论分析结果和摩擦试验结果一致.

2.1.3 机械感受体受力

手指触摸不同试样时, 指尖皮肤内机械感受体感受摩擦振动刺激, 并将机械能量信号转化为神经电位

信号. 在接触压力一定的情况下, 根据图6触摸时的接触面积可知, 皮肤内部机械感受器所受应力大小为尖角>圆角>平角, 其中触摸尖角试样时的应力最大. 机械感受器受力大小, 最终表现为人体对不同纹理形状特征的触觉感知差异, 后面将结合摩擦学和fMRI试验数据进行深入讨论.

2.2 基于fMRI的纹理形状激发触感脑区分析

为了进一步深入研究不同纹理形状激发的触感

大脑脑区, 分别对触觉感知纹理形状的大脑激活数据做平均, 得到三种纹理形状激发触感的大脑横状面切片图, 如图9所示. 每种形状刺激下激活体素群的详细信息列于表2中, 表中团块大小反映了激活脑区大小, 平均 t 值反映了激活强度, 正值代表脑区的正激活, 负值代表脑区的负激活.

根据表2中每个团块的大小可得尖角、圆角和平角三种纹理形状激发的总激活脑区大小分别为364、

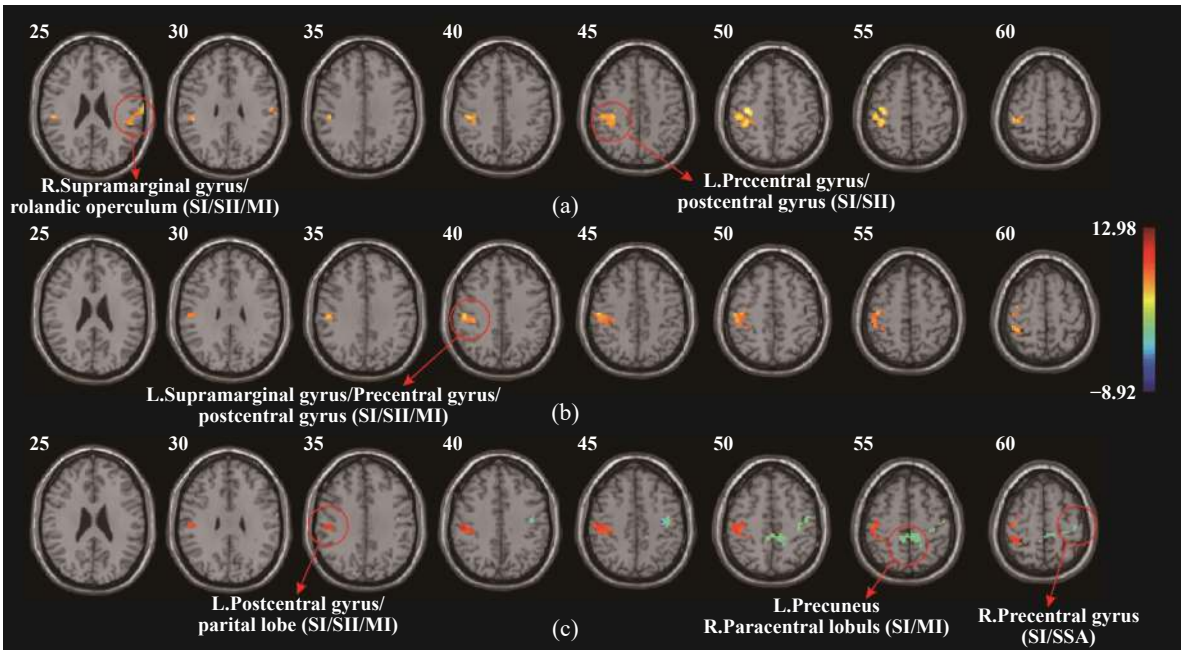


Fig. 9 Brain activation maps of (a) sharp shape, (b) round shape, and (c) flat shape

图 9 三种纹理形状激发触感的大脑横状面切片图

表 2 三种形状试样激发的独立脑区激活信息

Table 2 Activation information of separate activation area

Sample	Anatomical location	Side	Functional location	Cluster size	Average t -value
Sharp shape	Precentral Gyrus	L	SI	263	10.34
	Postcentral Gyrus	L	MI		
	Supramarginal Gyrus	R	SII	101	8.86
	Rolandic Operculum	R	SII		
Round shape	Supramarginal Gyrus	L	SI	268	10.11
	Precentral Gyrus	L	MI		
	Postcentral Gyrus	L	SII	266	11.33
	Postcentral Gyrus	L	SI		
Flat shape	Parietal Lobe	L	MI	104	-14.62
	Precentral Gyrus	R	SII		
	Precuneus	L	SSA	109	-7.46
	Paracentral Lobule	R	SI		

Note: L-left brain; R-right brain; SI-Primary somatosensory cortex; SII-Secondary somatosensory cortex; MI-Primary motor cortex; SSA-Somatosensory association cortex.

268和479; 最大激活强度分别为10.34、10.11和14.62, 据此可知平角纹理激发的脑区大小和激活强度最大, 圆角的最小。

根据图9和表2分别分析每种纹理激发的脑区信息可知, 尖角纹理激发的激活体素群有两个, 是分别位于左、右脑的正激活, 并且以左脑激活为主, 涉及的大脑脑区有中央前回、中央后回、缘上回和罗兰迪克岛盖, 涉及的大脑功能区为SI、SII和MI; 圆角纹理激发的激活体素群只有1个位于左脑的正激活体素群, 涉及的大脑脑区包括中央前、后回和缘上回, 涉及的大脑功能区为SI、SII和MI; 平角纹理激发的激活体素群有3个, 左右脑区的正、负激活都有, 以左脑激活为主, 涉及的大脑脑区较多, 分别为中央前回、中央后回、缘上回、顶叶、楔前叶和中央旁小叶, 涉及的大脑功能区为SI、SII、MI和SSA。

通过上述分析发现, 感知不同纹理形状涉及的主要大脑功能区为躯体感觉皮层, 涉及的主要大脑脑区为中央前回和中央后回。大脑的触感激活以左脑的正激活为主, 但是感知平角纹理时出现了负激活现象。根据以往文献研究表明大脑如果产生了正激活, 说明该脑区在刺激过程中的BOLD信号大于无刺激时的静息阶段下的BOLD信号, 即大脑在该脑区产生的活动反应比正常活动下更为强烈; 然而, 大脑如果产生了负激活, 说明该脑区在静息阶段下的BOLD信号大于在刺激过程中的BOLD信号, 即大脑在该脑区的正常活动受到抑制^[30-31]。受试者在感知平角纹理形状过程中, 大脑的激活区不仅有正激活, 还产生了负激活, 说明在感知平角纹理形状时, 大脑的脑区不仅变得更加活跃, 同时部分脑区也产生了抑制反应。

通过试验结果还可以发现, 感知纹理形状对左右脑有不同程度的激活, 但是都以左脑的激活为主, 主要原因是试验过程中受试是使用右手进行触觉感知, 左脑主要负责人体右侧躯体的体感和运动相关刺激, 符合对机械刺激的感受通常主要发生在对侧脑区的原理。

2.3 主观评价分析

表3为触摸三种纹理试样的触感主观评分结果。从结果可以看出, 不同的纹理形状特征带给人的主观触觉感受各不相同。其中平角纹理的黏着感最强, 尖锐感最弱, 舒适感最差。在触摸过程中, 相比其他两种纹理表面, 平角纹理与皮肤的接触面积最大, 接触表面间的粘附吸引力会增大黏着摩擦力, 进而给人较大的黏着感; 在同样的触摸压力下, 皮肤的变形和内部

感受体所受应力更小, 因此给人较小的尖锐感。虽然平角纹理的尖锐感最小, 但是过大的黏着摩擦力会降低舒适感, 这与文献[32]指出的较大的黏着摩擦力会引起皮肤的摩擦不舒适感增大是一致的。

表 3 三种纹理试样的触感主观评分
Table 3 The score of sharpness, stickiness, comfortableness of samples with different shapes

Sample shape	Sharpness	Stickiness	Comfortableness
Sharp	9.4±0.9	1.8±0.8	5±0.7
Round	6±1.7	4±2.5	8.2±0.8
Flat	3.4±2.3	5.8±1.1	4±1.2

尖角纹理的尖锐感最强, 黏着感最弱, 舒适感适中。触摸过程中, 由于接触面积小, 因此接触表面的黏着摩擦力小, 但是皮肤的局部形变增大, 进而引起皮肤形变摩擦和内部应力增大, 因此给人小的黏着感以及大的尖锐感。尖锐感和黏着感都会引起不舒适, 但是通过对比触摸尖角纹理和平角纹理的舒适感评分可以看出, 平角纹理引起的不舒适感要大于尖角纹理, 该结果表明黏着感对于舒适感的影响大于尖锐感。

触摸感知圆角纹理时, 由于接触面积、摩擦力和皮肤内机械感受体所受应力的大小均适中, 因此相对于尖角试样引发的尖锐感和平角试样引发的黏着感, 圆角纹理的尖锐感和黏着感适中, 所以作为综合触感参数的舒适感最好。

同时将舒适感与核磁共振数据结合可知, 触摸过程中的不舒适感会引起激活脑区范围和强度的增大, 甚至出现大脑活动的抑制现象, 而较好的舒适感对应的大脑脑区激活范围和强度都较小。

3 结论

研究结果表明, 摩擦学、fMRI、认知行为学方法的结合是研究材料表面纹理的摩擦触觉感知的有效手段, 接触摩擦力、主观评价、激活脑区面积和强度是表征摩擦触觉感知的有效参数, 主要结论如下:

a. 黏着摩擦和形变摩擦构成了手指触摸不同纹理形貌表面的摩擦力, 其中黏着摩擦所占比例较大。触摸平角纹理的摩擦力最大, 尖角纹理的摩擦力最小。

b. 黏着感主要受接触面积和黏着摩擦力的影响; 尖锐感主要受触觉感受体所受应力和形变摩擦的影响; 而舒适感受到表面摩擦机制和触觉感受体所受应力综合影响, 黏着感对于舒适感的影响大于尖锐感。平角纹理的黏着感最大, 尖角纹理的尖锐感最强, 圆角纹理的舒适感最好。

c. 纹理形状的激发大脑功能区以躯体感觉皮层为主, 激活脑区主要位于中央前回和后回. 全脑的触感激活以对侧脑区(左脑)的正激活为主. 触摸过程中的不舒适感会引起激活脑区范围和强度的增大, 甚至出现大脑活动的抑制现象, 而较好的舒适感对应的大脑脑区激活范围和强度都较小.

参考文献

- [1] Johnson K O, Hsiao S S. Neural mechanisms of tactual form and texture perception[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1992, 15(1): 227–250. doi: [10.1146/annurev.ne.15.030192.001303](https://doi.org/10.1146/annurev.ne.15.030192.001303).
- [2] Vastano R, Inuggi A, Vargas C D, et al. Tactile perception during action observation[J]. *Experimental Brain Research*, 2016, 234(9): 2585–2594. doi: [10.1007/s00221-016-4663-z](https://doi.org/10.1007/s00221-016-4663-z).
- [3] Li Jie, Ji Hongfei, Gu Rong, et al. Explore the brain response to naturalistic and continuous music using EEG phase characteristics[C]//*Intelligent Computing Theories and Application*, 2016: 9771: 294–305. doi: [10.1007/978-3-319-42291-6_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42291-6_29).
- [4] Bhatia A, Gong R H, Gregory L J. Investigation of the perception of fabric hand using functional magnetic resonance imaging[C]. In: *China International Silk Conference/2nd International Textile Forum*. Suzhou, China, 2007.
- [5] Tang Wei, Chen Nanxuan, Zhang Jiankai, et al. Characterization of tactile perception and optimal exploration movement[J]. *Tribology Letters*, 2015, 58(2): 1–14. doi: [10.1007/s11249-015-0507-4](https://doi.org/10.1007/s11249-015-0507-4).
- [6] Bergmann Tiess W M. Tactual perception of material properties[J]. *Vision Research*, 2010, 50(24): 2775–2782. doi: [10.1016/j.visres.2010.10.005](https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.005).
- [7] Tomlinson S E, Lewis R, Carré M J, et al. Human finger friction in contacts with ridged surfaces[J]. *Wear*, 2013, 301(1–2): 330–337. doi: [10.1016/j.wear.2012.12.039](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.039).
- [8] Liu Taofeng, Li Yiyuan, Li Wei, et al. Influence of surface feature height of deterministic texture on tactile perception of fingertip[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(2): 372–378 (in Chinese) [刘陶峰, 李一员, 李炜, 等. 确定性纹理表面特征高度对皮肤摩擦感知的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(2): 372–378]. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.20180038](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20180038).
- [9] Tang Wei, Liu Rui, Shi Yibing, et al. From finger friction to brain activation: Tactile perception of the roughness of gratings[J]. *Journal of Advanced Research*, 2020, 21: 129–139. doi: [10.1016/j.jare.2019.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.11.001).
- [10] Cesini I, Ndengue J D, Chatelet E, et al. Correlation between friction-induced vibrations and tactile perception during exploration tasks of isotropic and periodic textures[J]. *Tribology International*, 2018, 120: 330–339. doi: [10.1016/j.triboint.2017.12.041](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.041).
- [11] Ding Shuyang. Study on the tactile perception on material properties during reciprocating sliding and tactile signal acquisition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese) [丁树杨. 基于往复摩擦的触觉振动信息获取及材料特征识别的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018].
- [12] Wang Qicai. Brain cognitive characterization of tactile stimulation from fabric touch based on FMRI[D]. Shanghai: Donghua University, 2015 (in Chinese) [王其才. 基于FMRI的织物触觉刺激大脑感知表征[D]. 上海: 东华大学, 2015].
- [13] Savini N, Babiloni C, Brunetti M, et al. Passive tactile recognition of geometrical shape in humans: an fMRI study[J]. *Brain Research Bulletin*, 2010, 83(5): 223–231. doi: [10.1016/j.brainresbull.2010.08.001](https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2010.08.001).
- [14] Mounou A, Thonnard J L, Mouraux A. EEG frequency tagging to explore the cortical activity related to the tactile exploration of natural textures[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20738. doi: [10.1038/srep20738](https://doi.org/10.1038/srep20738).
- [15] Chen Si, Ge Shirong, Shi Xiaolu, et al. Perception component of event related potentials evoked by friction[J]. *Tribology*, 2015, 35(5): 538–542 (in Chinese) [陈思, 葛世荣, 时晓露, 等. 摩擦诱发的事件相关电位认知成分特征研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(5): 538–542]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.05.004](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.05.004).
- [16] Li Wei, Pang Qiang, Jiang Yushi, et al. Study of physiological parameters and comfort sensations during friction contacts of the human skin[J]. *Tribology Letters*, 2012, 48(3): 293–304. doi: [10.1007/s11249-012-0023-8](https://doi.org/10.1007/s11249-012-0023-8).
- [17] Yeon J, Kim J, Ryu J, et al. Human brain activity related to the tactile perception of stickiness[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 8. doi: [10.3389/fnhum.2017.00008](https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00008).
- [18] Hollins M, Bensmaïa S, Karlof K, et al. Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling[J]. *Perception & Psychophysics*, 2000, 62(8): 1534–1544. doi: [10.3758/BF03212154](https://doi.org/10.3758/BF03212154).
- [19] Kitada R, Doizaki R, Kwon J, et al. Brain networks underlying tactile softness perception: a functional magnetic resonance imaging study[J]. *NeuroImage*, 2019, 197: 156–166. doi: [10.1016/j.neuroimage.2019.04.044](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.044).
- [20] So Y, Kim S P, Kim J. Perception of surface stickiness in different sensory modalities: an functional MRI study[J]. *NeuroReport*, 2020, 31(5): 411–415. doi: [10.1097/wnr.0000000000001419](https://doi.org/10.1097/wnr.0000000000001419).
- [21] Kitada R, Hashimoto T, Kochiyama T, et al. Tactile estimation of the roughness of gratings yields a graded response in the human brain: an fMRI study[J]. *NeuroImage*, 2005, 25(1): 90–100. doi: [10.1016/j.neuroimage.2004.11.026](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.11.026).
- [22] Tang Wei, Lu Xiangyong, Chen Si, et al. Tactile perception of skin: research on late positive component of event-related potentials evoked by friction[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2020, 111(5): 623–629. doi: [10.1080/00405000.2019.1661067](https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1661067).
- [23] Li Wei, Jiang Yushi, Pang Qiang, et al. Discomfort perception on human skin among different gender during friction contact[J]. *Tribology*, 2012, 32(3): 227–232 (in Chinese) [李炜, 蒋玉石, 庞强, 等. 不同性别人体皮肤摩擦不舒适度感知功能的研究[J]. *摩擦学*

- 学报, 2012, 32(3): 227–232]. doi: [10.16078/j.tribology.2012.03.001](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2012.03.001).
- [24] Olausson H, Wessberg J, Kakuda N. Tactile directional sensibility: peripheral neural mechanisms in man[J]. *Brain Research*, 2000, 866(1-2): 178–187. doi: [10.1016/S0006-8993\(00\)02278-2](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(00)02278-2).
- [25] Zhou Zhongrong. On bio-tribology in China[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 7–10 (in Chinese) [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]. doi: [10.3321/j.issn:0577-6686.2004.05.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2004.05.002).
- [26] D'Esposito M, Deouell L Y, Gazzaley A. Alterations in the BOLD fMRI signal with ageing and disease: a challenge for neuroimaging[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2003, 4(11): 863–872. doi: [10.1038/nrn1246](https://doi.org/10.1038/nrn1246).
- [27] Bharat B. Introduction to tribology[M]. Translated by Ge Shirong. Beijing: China Machine Press, 2007: 123.
- [28] Wolfram L J. Friction of skin[J]. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists*, 1983, 34(8): 465–476.
- [29] Johnson S A, Gorman D M, Adams M J, et al. The friction and lubrication of human stratum corneum[J]. *Tribology Series*, 1993, 25: 663–672. doi: [10.1016/S0167-8922\(08\)70419-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70419-X).
- [30] Kastrup A, Baudewig J, Schnaudigel S, et al. Behavioral correlates of negative BOLD signal changes in the primary somatosensory cortex[J]. *NeuroImage*, 2008, 41(4): 1364–1371. doi: [10.1016/j.neuroimage.2008.03.049](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.049).
- [31] Klingner C M, Hasler C, Brodoehl S, et al. Dependence of the negative BOLD response on somatosensory stimulus intensity[J]. *NeuroImage*, 2010, 53(1): 189–195. doi: [10.1016/j.neuroimage.2010.05.087](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.087).
- [32] Li Wei. Tribological behaviour of skin under reciprocating sliding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (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, 2007].