

表面织构对滑动电接触界面摩擦学行为的影响

王东伟¹, 李发强¹, 黄起昌¹, 赵阳¹, 丁昊昊²

(1. 中国核动力研究设计院设计研究所 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213; 2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: **目的** 利用表面织构减摩抗磨的优良特性, 将其应用于电接触摩擦表面, 探讨它对滑动电接触界面摩擦磨损及电接触可靠性的影响。**方法** 利用激光系统制备 2 种织构, 即方坑型表面织构 (SPT) 和沟槽型表面织构 (GT), 并与光滑表面的载流摩擦学信号进行对比分析。利用 ABAQUS 模拟试验, 分析界面接触应力、电压和位移的变化特性。**结果** 随着试验的进行, GT 表面的摩擦因数逐渐增大, 并与光滑表面达到同一水平 (0.7), SPT 表面的摩擦因数在整个试验过程中始终较低 (0.4)。光滑表面在电接触过程中发生了多频振动现象, 2 种织构表面的振动信号非常微弱, 尤其是 SPT 表面, 仅出现了 100 Hz 的振动频率。光滑表面和 GT 表面出现较严重的磨损现象, 而 SPT 表面磨损较轻微。有限元分析结果表明, 表面织构的存在能够避免应力集中现象, GT 表面的应力较大 (90 MPa), 且始终分布在沟槽棱边。**结论** 在电接触状态下, 2 种织构表面均能不同程度地降低界面的摩擦因数和摩擦力, 其中 SPT 表面的减摩降磨效果最显著。GT 表面沟槽棱边的损伤和磨屑堆积是导致其逐渐失去减摩效果的主要原因。模拟分析结果证实, SPT 表面织构的存在能避免应力集中, 有利于改善磨损和降低振动强度。虽然 GT 表面的最大应力分布也具有时变特征, 但是其值较大, 且分布在沟槽棱边, 导致沟槽织构的减摩效果逐渐减弱。

关键词: 表面织构; 滑动电接触; 摩擦磨损; 试验测试; 有限元分析

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)09-0137-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.09.013

Effect of Surface Texture on Tribological Behavior of Sliding Electrical Contact Interface

WANG Dongwei¹, LI Faqiang¹, HUANG Qichang¹, ZHAO Yang¹, DING Haohao²

(1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: In this work, brass (H65) was selected as the friction pair material, and two kinds of surface textures, i.e. square pit textured (SPT) surface and groove textured (GT) surface were fabricated on the surface of flat specimens by laser system. The width of pit edges and grooves was 100 μm , the texture spacing was 300 μm , and the texture depth was 20 μm . A series of current-carrying tribological tests was carried out on the ball-on-flat friction and wear testing machine. The normal load was set as 1 N and the input current was set as 1 A. The tribological properties of the surface texture and smooth surface under

收稿日期: 2023-05-03; 修订日期: 2023-09-26

Received: 2023-05-03; **Revised:** 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52105220); 四川省自然科学基金 (2022NSFSC1950)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52105220); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC1950)

引文格式: 王东伟, 李发强, 黄起昌, 等. 表面织构对滑动电接触界面摩擦学行为的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(9): 137-147.

WANG Dongwei, LI Faqiang, HUANG Qichang, et al. Effect of Surface Texture on Tribological Behavior of Sliding Electrical Contact Interface[J]. Surface Technology, 2024, 53(9): 137-147.

current-carrying condition were compared and analyzed. Furthermore, the test process was simulated by thermal-electric-mechanical coupling analysis method, to reveal the effect mechanism of surface texture on the tribological behavior of the electrical contact interface. The friction coefficient of GT surface was low in the initial stage, which gradually increased with the test and reached the same level as that of smooth surface, at about 0.7. While the friction coefficient of SPT surface remained a low value throughout the whole test, which was about 0.4 during the whole test. Similarly, the friction force measured from GT surface was relatively low in the initial stage, which exhibited a sawtooth shape. With the progress of the test, the sawtooth shape feature gradually disappeared, and the anti-friction ability of the GT was gradually alleviated. Therefore, both of the two textured surfaces can reduce the interfacial friction coefficient and friction force to varying degrees, and the ability of SPT surface in reducing friction is the most significant. The vibration analysis results show that the smooth surface generates friction-induced vibration with multi-frequencies during the friction process, which is 100 Hz, 500 Hz and 1 000 Hz. While the vibration signals of the two textured surfaces are very weak, especially for the SPT surface, the vibration intensity is very weak and only one frequency of 100 Hz is detected. In the condition of sliding electrical contact, the increase of friction coefficient will not cause the generation of friction-induced vibration. For the SPT surface and GT surface, the standard deviation of the contact voltage is 0.032 V and 0.05 V, respectively, which is lower than the value calculated from the smooth surface (0.095 V), suggesting that although the surface texture reduces the contact area, the contact voltage can maintain stable as long as there is sufficient conductive contact surface. The wear analysis results show that the smooth surface and GT surface show more serious wear phenomenon. In contrast, the SPT surface wear is slight, and the square pit texture remains intact. The grooves of GT surface are damaged and debris accumulation can be observed, which are the main reasons leading to the gradual loss of anti-friction effect. The finite element analysis results show that the existence of the textured surface can avoid the phenomenon of stress concentration, improve the wear and accordingly reduce the vibration intensity. Although the maximum stress distribution on GT surface also has time-varying characteristics, the stress value on GT surface is larger (90 MPa) and is still distributed on the edge of the groove. Therefore, the anti-friction effect of groove texture is gradually weakened. The simulation analysis of voltage signal and normal displacement signal also provides a reasonable explanation for the tribological behavior of different surfaces. The above research provides a reference for understanding the effect of surface texture on the tribological behavior of electrical contact interface.

KEY WORDS: surface texture; sliding electrical contact; friction and wear; experimental test; finite element analysis

滑动电子连接器广泛应用于交通运输、石油勘探等领域,在电流和信号传输中起着关键作用,因此要求滑动电子连接器具有较强的耐磨性、较低的接触电阻及较好的耐腐蚀性等^[1-4]。然而,电接触界面存在的摩擦磨损行为严重影响了电子连接器的可靠性和使用寿命,受到学术界和工业界的广泛关注^[5-6]。

大量研究表明,界面磨损是导致电子连接器性能劣化和失效的主要因素之一,其主要磨损机制为磨粒磨损、黏着磨损和电弧磨损等^[7-10]。此外,温度、湿度、振动、接触载荷、滑动速度等因素均对电接触界面的摩擦学行为具有显著影响,且各自影响的机理完全不同^[11-18]。电接触失效过程可以描述为,电接触界面在摩擦过程中产生的磨屑颗粒逐渐破坏表面涂层,界面磨损加剧,磨屑在遭受往复碾压过程中逐渐软化,并沉积在接触界面上,形成绝缘的“第三体”层^[19]。虽然“第三体”层能够起到一定的润滑作用,但其绝缘性导致界面接触电阻增大,进而影响电接触系统的稳定性。由此可见,降低电接触界面的磨损程度是提高滑动式电连接器可靠性和稳定性的关键。

目前,表面织构作为一种新型摩擦界面,其减摩

抗磨性能受到广泛关注^[20-24]。王泽霄等^[25]总结了不同形式的表面织构在不同工况下的应用效果,并对织构参数与界面摩擦学特性之间的关系进行了论述。周宇坤等^[26]在机械密封动环外表面加工出特定形貌的表面织构,发现表面织构能够显著增强对流换热效果,降低密封环整体的温度,且织构数量和旋转角对密封系统换热效果的影响较大。Li 等^[27]在 CuSn6 圆盘表面加工出 3 种不同沟槽型的表面织构,并与聚四氟乙烯 (PTFE) 进行摩擦磨损试验。结果表明,表面织构能够有效“捕获”界面磨屑,特定形貌的沟槽织构能够有效降低摩擦因数、减小磨损率。Amanov 等^[28]研究了圆坑型织构对滑动系统摩擦学性能的影响,发现圆坑型织构表面的摩擦因数和磨损率相较于光滑表面均较低,且圆坑边缘的凸起部分不会对界面的摩擦学性能产生负面影响。

以上研究对于认识表面织构与摩擦学性能之间的关系意义重大,但上述研究均无电流输入的情况下进行,关于表面织构在载流状态下对界面摩擦学行为的影响研究鲜有报道^[29]。若表面织构在载流状态下能有效降低界面磨损,抑制“第三体”层的形成,意

味着表面织构有助于提高电接触系统的稳定性和可靠性。另一方面, 表面织构的存在会增大表面粗糙度、减小接触面积, 这可能会导致界面的摩擦和导电行为发生较大波动, 从而对电接触系统的稳定性产生负面影响^[30]。由此可见, 有必要开展相关研究, 探究表面织构对滑动电接触界面摩擦性能和导电性能的影响, 以验证表面织构在滑动电接触系统中应用的可行性, 为改善电接触系统的稳定性和使用寿命提供新的思路和方法。

基于以上分析, 文中选用黄铜 (H65) 为对磨副材料, 利用激光系统在平面样品表面制备 2 种表面织构, 即方坑型表面织构 (SPT) 和沟槽型表面织构 (GT)。在球-面接触式摩擦磨损试验机上进行一系列载流摩擦试验, 对比分析表面织构和光滑表面在载流状态下的摩擦性能。进一步地, 采用有限元分析方法对试验过程进行模拟, 揭示表面织构对电接触界面摩擦行为的影响机理。

1 试验

1.1 装置

滑动电接触试验在球-面往复运动式摩擦磨损试验装置上进行, 如图 1 所示。该装置包括 4 个子系统: 电接触系统、驱动系统、夹具系统和数据采集系统, 如图 1 所示。将球试样固定安装在球夹具上, 可沿水平和竖直方向移动, 将平面试样固定安装在可往复运动的样品台上。将三维加速度传感器安装在球夹具上, 用于测量系统在摩擦过程中产生的实时振动信号。将二维力传感器安装在二维运动台上, 用于测量电接触界面的法向力和摩擦力。利用直流电源设备对摩擦副施加恒定电流, 并采用“四线法”连续测量接触电压和电阻。该试验装置可实现对滑动电接触过程中的接触力信号、电压信号和振动信号的同步采集与分析。

1.2 样品

选用黄铜 (H65) 为对磨副材料。H65 具有良好的力学特性、耐腐蚀性和热电性能, 它被广泛用于电连接器中, 其密度 (ρ) 为 $8\,500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 (E) 为 90 GPa , 硬度为 $75\sim125\text{HV}$ 。将平面试样加工成尺寸为 $25\text{ mm}\times25\text{ mm}\times4\text{ mm}$ 的正方体, 球试样的直径为 4 mm , 二者表面均用不同目数的砂纸打磨至粗糙度 Ra 为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用波长为 $1\,064\text{ nm}$ 、平均功率为 10 W 、脉冲频率为 10 kHz 、扫描速度为 5 mm/s 的激光刻蚀技术, 在平面试样表面制备出方坑型表面织构 (SPT) 和沟槽型表面织构 (GT)。采用 SEM 观察所得的 2 种表面织构的形貌, 如图 2 所示。其中, 方坑的边长和沟槽的宽度均为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 方坑间距和沟槽间距均为 $300\text{ }\mu\text{m}$, 所有织构的深度均为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

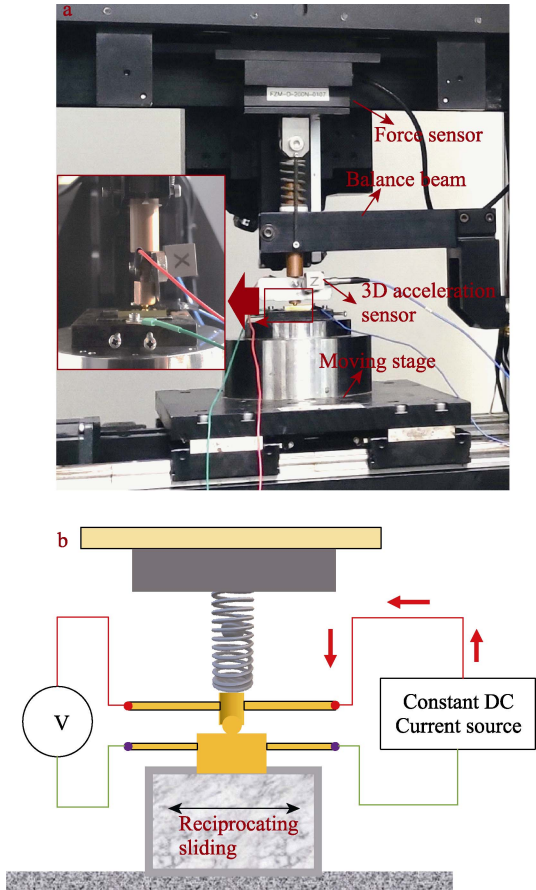


图 1 试验装置 (a) 和“四线法”电路示意图 (b)
Fig.1 Schematic diagram of test device (a) and "four wire method" circuit (b)

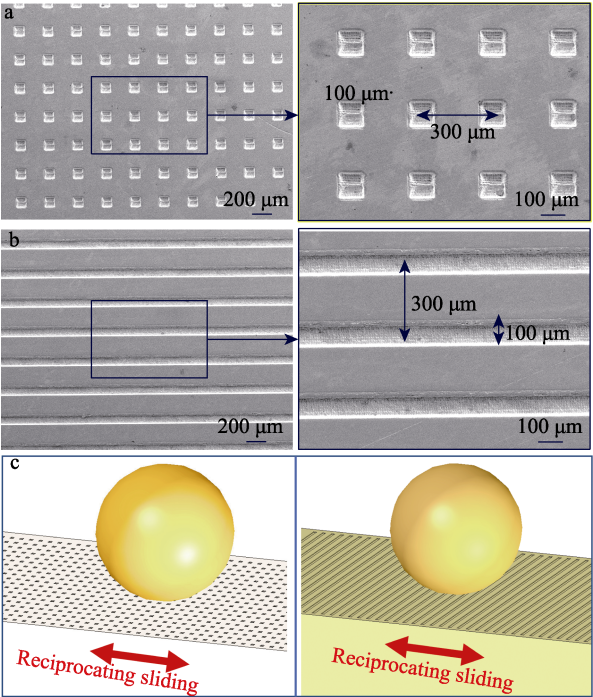


图 2 方坑型表面织构 (a)、沟槽型表面织构 (b) 的 SEM 图及球-织构表面往复滑动示意图 (c)
Fig.2 SEM images of the square pit textured (SPT) surface (a) and groove textured (GT) surface (b), and the schematic diagram of sphere sliding on the textured surfaces (c)

在试验开始前,对球试样和平面试样进行脱脂清洗。设置的试验工况和参数:法向载荷 $F_n=1\text{ N}$, 往复位移幅值 $D=3\text{ mm}$, 往复周期 $T=3\text{ s}$, 输入电流为 1 A , 滑动电接触时间为 $1\ 800\text{ s}$ 。试验环境条件为大气下干态,温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $(60\pm 10)\%$ 。由于摩擦学试验具有一定随机性,因此每组试验至少重复3次,以确保结果的可靠性。

2 结果及分析

2.1 摩擦因数

不同表面的摩擦因数随时间的变化情况如图3a所示。对于光滑表面,摩擦因数在初始阶段迅速增至0.75。这是由于在初始阶段对磨副的相对运动破坏了表面氧化膜,使得金属与基体之间快速达到直接接触状态,因此摩擦因数迅速上升。随后,光滑表面的摩擦因数发生明显且持续的波动。这是由于表面磨损导致界面的接触状态发生实时变化,因此摩擦因数处于动态不稳定状态。在试验结束后,光滑表面的摩擦因数依然处于较高水平(约0.73)。对于沟槽型结构(GT)表面,虽然其摩擦因数在前200 s内迅速上升,且在

200~600 s时间段内依然保持上升状态,但它在前600 s时间范围内的摩擦因数小于光滑表面的摩擦因数。这是由于表面沟槽的存在,减小了接触面积,降低了界面黏滑力,从而降低了摩擦因数。随着试验的进行,GT表面的摩擦因数进一步增大。这可能是因GT表面织构的作用在摩擦过程中逐渐消失,最终在试验结束后达到与光滑表面相似的水平。相比之下,方坑型织构(SPT)表面的摩擦因数在整个试验过程中处于较低的水平(约0.45),表明方坑型织构在摩擦过程中有助于降低界面的摩擦因数,且其作用效果持续时间较长。重复性试验进一步证明了该现象,如图3b所示,GT表面和SPT表面均能降低界面摩擦因数,其中SPT表面降低界面摩擦因数的效果更显著。

2.2 摩擦力分析

对3种表面的摩擦力信号变化情况进行了分析,结果如图4所示。在初期(100~109 s),光滑表面的摩擦力最大,方坑型织构(SPT)表面的摩擦力次之,沟槽型织构(GT)表面的摩擦力最小。此外,GT表面的摩擦力信号在每个行程中均出现了明显的“锯齿状”波动,其波动数量对应球试样滑过的沟槽数量。

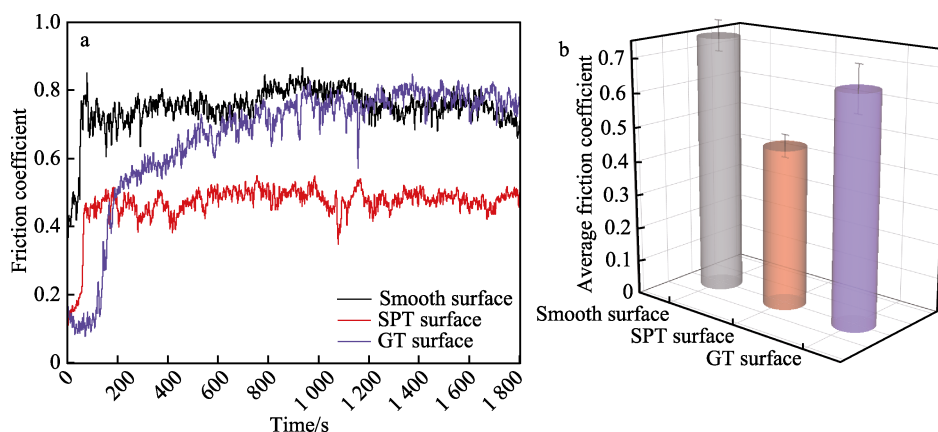


图3 不同表面的摩擦因数随时间的变化曲线(a)及平均摩擦因数(b)
Fig.3 Friction coefficient curves of different surfaces (a) and their average friction coefficient values (b)

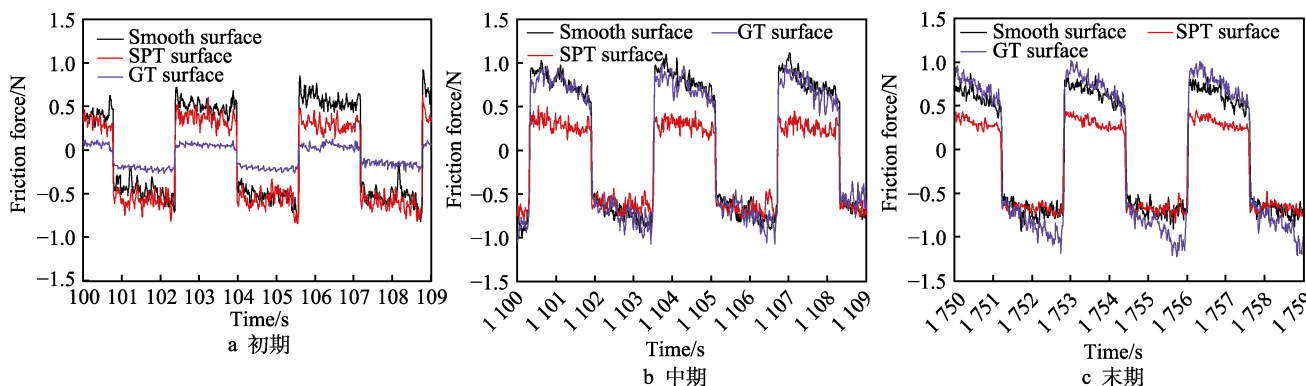


图4 不同表面的摩擦系统在不同阶段的摩擦力信号曲线

Fig.4 Friction force signal curves of the friction systems with different surfaces at different stages:
a) initial stage; b) intermediate stage; c) final stage

这是由于球试样滑过 GT 表面后, 与沟槽织构的棱边发生了碰撞, 导致摩擦力出现瞬时波动现象^[31]。当试验进行至中期 (1 100~1 109 s), 光滑表面和 GT 表面的摩擦力信号均达到较高水平, 且 GT 表面摩擦力信号的“锯齿状”波动基本消失, 表明 GT 表面的沟槽织构降低界面摩擦的能力逐渐减弱。相比之下, SPT 表面的摩擦力依然处于较低水平, 相应地, 该时间段内 SPT 表面的摩擦因数处于较低值。当试验进行至末期 (1 700~1 759 s), SPT 表面的摩擦力在 3 种表面中依然最低, 且其波动程度相较于其他 2 种表面更微弱。综合以上分析可以推测, 在电接触状态下, 织构表面可以改变界面的摩擦学行为。其中, GT 表面在初始阶段时摩擦力较低, 随着摩擦的进行, 沟槽织构的作用逐渐减弱, 其表面摩擦力逐渐增大, 且波动程度也逐渐上升。SPT 表面的摩擦力在整个试验过程中均处于较低水平, 方坑织构的减摩作用持续贯穿于整个试验过程。

2.3 振动信号分析

在滑动电接触过程中, 考虑到电接触系统可能会出现摩擦振动现象, 这对电接触的稳定性具有极大的负面影响^[32], 因此这里对 3 种表面在不同阶段的振动信号进行了分析, 结果如图 5a~b 所示。在试验中期 (1 200~1 206 s), 3 种表面的振动信号均较微弱, 未出现明显的摩擦振动现象, 尤其是方坑型织构 (SPT) 表面, 其振动幅值在 3 种表面中处于最低水平。当试验进行到末期 (1 700~1 706 s), 光滑表面的振动信号出现了明显的间歇性高频振荡现象, 表明光滑表面在该过程中发生了摩擦振动。结合光滑表面的摩擦因数波动特征可以推测, 界面的磨损导致接触状态发生实时改变, 使得沿着划痕区域内的表面粗糙度各不相同。由于不同的粗糙度可能导致摩擦系统出现模态耦合现象, 因此摩擦系统在不同区域可能出现摩擦振动现象^[33]。此外, 根据摩擦振动信号的间歇性振动特性可推测, 在摩擦过程中界面由于黏滑运动, 产生了瞬时摩擦振动, 该现象与电流作用有关。电流作用在接触界面上, 界面温度逐渐上升, 接触微凸体之间的瞬时高温导致接触区域软化, 接触刚度下降, 系统产生黏滑振动的倾向增强。相比之下, 方坑型织构 (SPT) 和沟槽型织构 (GT) 表面的振动信号非常微弱, 尤其是 SPT 表面, 其振动强度处于最低水平。

进一步对 3 种表面的振动信号进行了 FFT 分析, 结果如图 5c 所示。可见, 光滑表面的振动信号产生了明显的主频, 分别为 100、500、1 000 Hz, 进一步证明系统产生了摩擦非线性振动。SPT 表面的振动信号仅出现了 100 Hz 且幅值较低的主频, 说明摩擦系统在该频率处的振动能量非常微弱。此外, 虽然在 GT 表面探测到 500、1 000 Hz 的振动频率, 但其振动能量微弱, 该界面的振动强度也保持在较低水平。

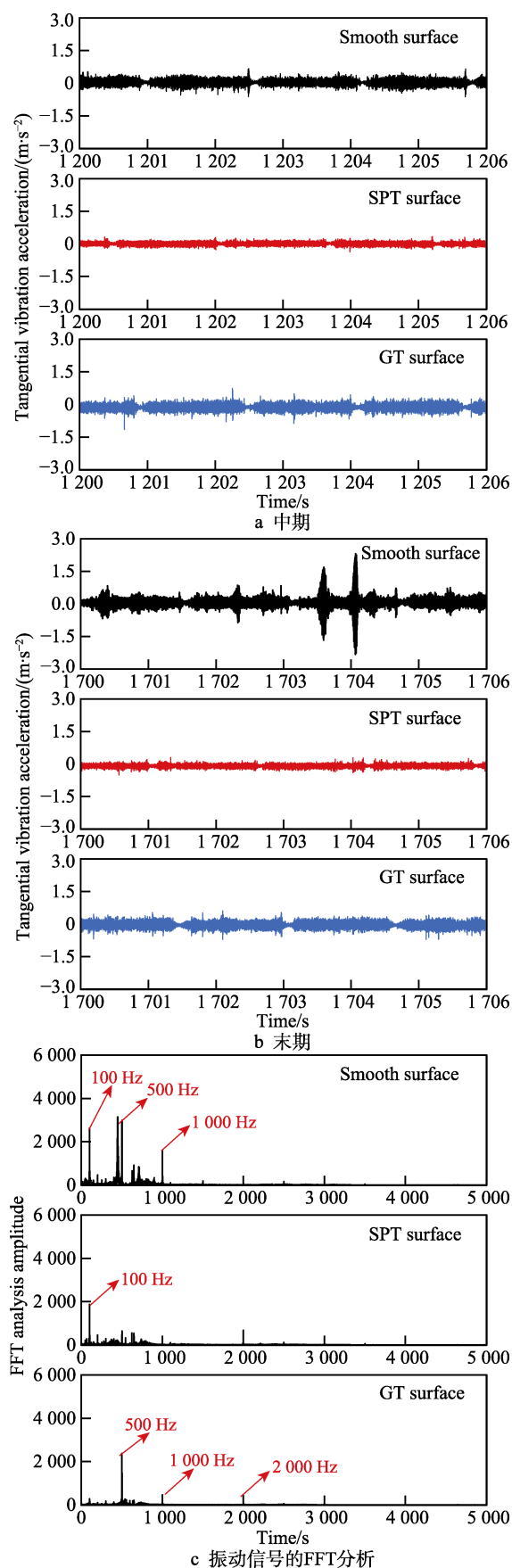


图 5 不同表面的振动信号及 FFT 分析结果
Fig.5 Vibration signals and FFT analysis results of different surfaces: a) intermediate stage; b) final stage; c) FFT analysis of vibration signal

值得注意的是,许多研究表明,在无载流状态下,摩擦振动的强度随着摩擦因数的增大而增强^[34]。在本研究中,虽然 GT 表面的摩擦因数较大,但 GT 表面在整个试验过程中未发生明显的摩擦振动现象,可见在滑动电接触状态下摩擦因数与摩擦振动之间无直接关系。可以推测,这是由于织构表面的存在,导致接触状态在宏观尺度上具有明显的时变特性。此外,由于电流流过接触表面时产生了局部焦耳热等现象,导致界面的磨损行为不同于无载流状态,因此其振动特性与无载流状态有所区别。

2.4 电压变化分析

考虑到接触电压是电接触可靠性和稳定性的关键因素,尤其是在输入恒定电流的情况下,一旦电压波动过大,可能会发生断路现象。为了定量说明不同表面下的电压波动程度,这里选用电压标准差(S)为电压稳定性的评价指标^[30],其计算见式(1)~(2)。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x_i 为电压瞬时值; n 为电压采样点数量。

对不同表面的 S 进行分析,结果如图6所示。可见,光滑表面的电压波动值较大,对应的 S 为0.095 V。这是由于光滑表面出现了摩擦振动现象,使得电压信号具有瞬时突变的特点,因此其 S 较大。相比之下,SPT和GT表面的 S 较小,分别为0.032、0.05 V。这是由于在摩擦过程中,表面织构改善了界面的振动行为,从而提高了接触电压的稳定性。

值得注意的是,在摩擦过程中,虽然表面织构的存在使得界面的名义接触面积有所减小,但是接触面积的变化并不会导致接触电压发生强烈波动,且在整个试验过程中,2种织构表面均未出现任何瞬时断路现象。这是由于在电接触过程中,只要存在充足的导电接触面,则电流可以顺利通过,并不会引起电压信

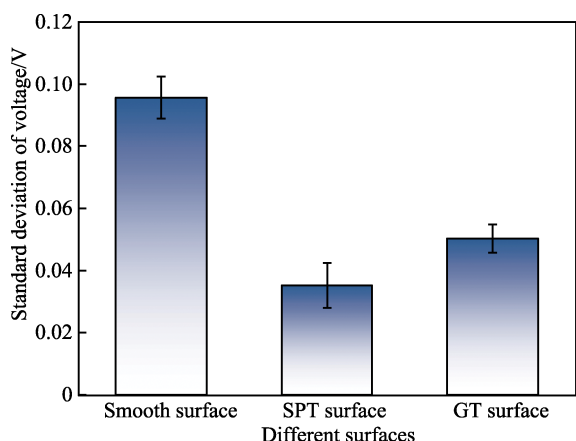


图6 不同表面的电压标准差

Fig.6 S values of contact voltages on different surfaces

号高强度波动。该结果得到 Grandin 等^[35]的证实,他们发现,虽然局部接触区域的氧化使得局部接触电阻增大,但是只要对磨副存在充足的导电接触面,则接触电压并不会发生明显改变。以上分析表明,将表面织构应用于电接触界面具有可行性,它对改善界面摩擦和电接触稳定性具有良好的效果。

2.5 磨损形貌分析

不同平面试样的表面磨损形貌光镜图如图7所示,可见光滑表面磨损严重,磨痕宽度达到672 μm 。此外,磨痕轨迹处呈现明显的犁沟现象,并出现了许多因材料的转移而形成的磨斑,可见光滑表面的磨损机理是磨粒磨损与黏着磨损的结合。相比之下,虽然SPT表面存在一定的犁沟现象,但其磨痕宽度减小至592 μm 。此外,在SPT表面并未观察到明显的磨屑堆积现象。另外,磨痕区内的方形织构结构相对完整,可见SPT表面的织构在试验过程中始终保持着降低磨损的重要作用。这一现象也证明,在整个摩擦过程中SPT表面的摩擦因数和摩擦力均相对较小。GT表面的磨痕宽度增至745 μm ,沟槽棱边在与球试样接触时出现了局部损伤现象,且在非沟槽区域形成了较深的犁沟。另外可以观察到,在沟槽棱边出现了磨斑和磨屑堆积现象。这是因沟槽棱边在对球试样底部进行切削时,部分磨屑颗粒残留在棱边,受到往复碾磨作用后逐渐聚集而成磨斑,这在一定程度上降低了沟槽与球试样之间的“撞击”作用,使得试验中后期界面的摩擦力信号不再出现“锯齿状”波动。另外,已有研究表明,在干摩擦状态下,GT表面的沟槽棱边的应力较大,因此GT表面的棱边磨损严重,其总体磨损程度相较于SPT表面更加剧烈^[36]。

通过白光干涉仪对不同表面的磨损轮廓进行检测,结果如图8a所示。与上述光镜分析结果一致,光滑表面和GT表面的磨损较为严重,磨痕宽度和磨痕深度均明显高于SPT表面。进一步说明SPT表面织构在试验过程中始终保持着降低磨损的效果。进一步对不同表面的磨损率进行分析,根据式(3)确定磨损量。

$$V = A \cdot L \quad (3)$$

式中: V 为磨损量, mm^3 ; A 为磨损痕横截面轮廓的积分面积, mm^2 ; L 为磨痕长度, mm 。

磨损率可由磨损量除以摩擦功得到,见式(4)。

$$\delta = \frac{V}{\Sigma W} \quad (4)$$

不同表面的磨损深度和磨损率的计算结果如图8b~c所示。可见,SPTS表面的磨损率相对最低,GT表面的磨损较严重,磨损率也较高。

为了进一步说明表面织构对电接触界面磨损行为的影响,采用扫描电镜对各试样表面的磨损形貌进行分析,结果如图9所示。由图9可见,光滑表面磨

损严重, 因为磨屑颗粒在接触面往复碾磨, 因此沿摩擦方向出现了许多犁沟, 且在磨痕区域内出现大量因材料的转移和磨屑的堆积形成的压实磨斑。此外, 在磨痕区域内散落着大量的磨屑颗粒。进一步观察发现, 磨损表面出现了电弧侵蚀现象, 局部区域出现孔洞, 其周围分布着熔滴。这是因为接触压力较小

(1 N), 球与平面试样实际接触的面积减小, 导致电流剧烈收缩和局部高温现象的出现^[37]。

相比之下, SPT 表面未出现严重磨损, 磨痕深度较浅。虽然方坑边缘与球试样作用时出现局部损伤, 但总体上方坑的形状保持良好。此外, 大量的磨屑颗粒被方坑捕获, 因此磨痕区域内和磨痕区两侧未出现

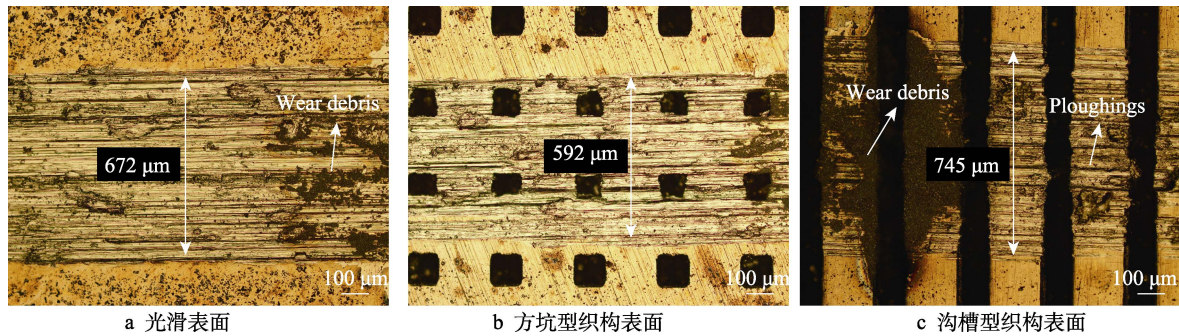


图 7 不同表面的磨损形貌光镜图

Fig.7 Optical images of wear morphologies on different surfaces: a) smooth surface; b) SPT surface; c) GT surface

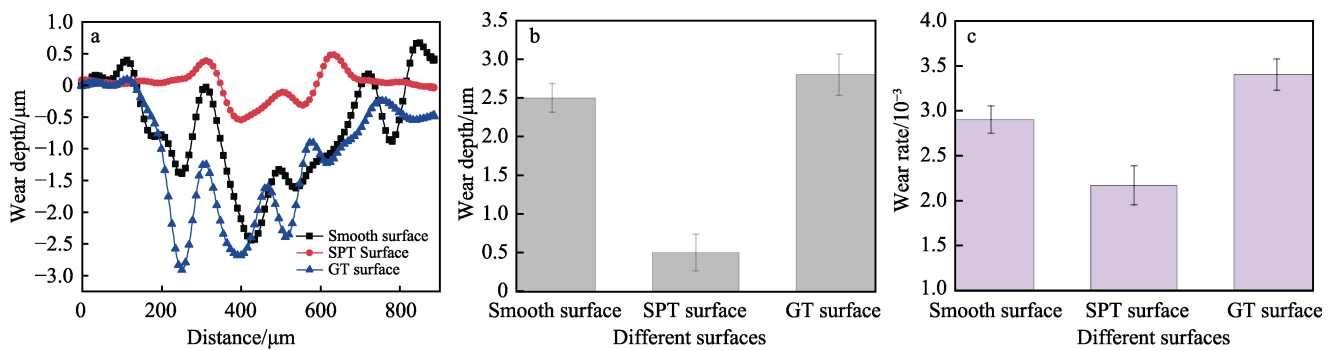


图 8 不同表面的磨损轮廓 (a) 及磨损深度 (b)、磨损率 (c)

Fig.8 Wear profile (a), wear depth (b) and wear rate (c) of different surfaces

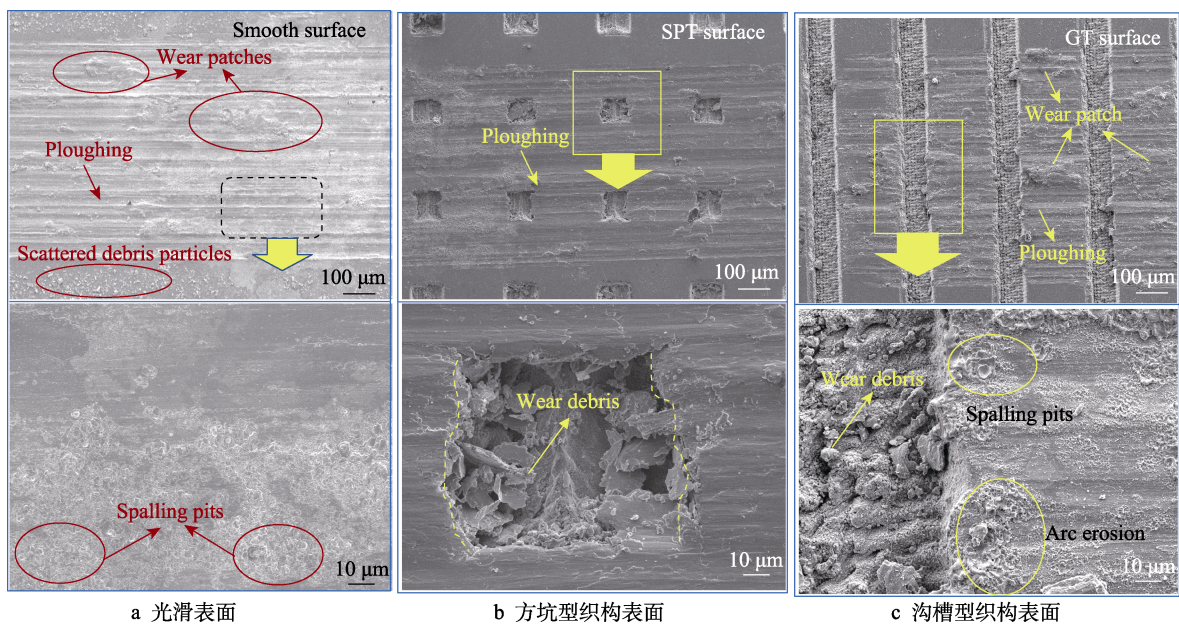


图 9 不同表面的磨损形貌电镜图

Fig.9 SEM images of wear morphologies on different surfaces: a) smooth surface; b) SPT surface; c) GT surface

磨屑散落和堆积现象。在整个试验过程中,方坑织构的减摩效果显著,有效改善了界面的摩擦磨损特性。GT 表面的磨损较为严重,其中,非沟槽区域及沟槽棱边出现了大量的磨斑现象,表明界面黏着磨损严重。另外,在沟槽棱边区域出现了明显的电弧磨损区,可观察到大量的电弧侵蚀孔洞,以及因电弧温度过高而引起的熔滴飞溅现象。这在一定程度上削弱了沟槽的棱边作用,使得 GT 在摩擦过程中改善摩擦行为的效果逐渐减弱,因此其表面磨损加剧,摩擦力和摩擦因数等随之增大。以上分析结果与图 7 所示的光镜分析结果,以及图 3 和图 4 的摩擦因数、摩擦力分析结果一致。

3 数值模拟分析与讨论

3.1 有限元模型与边界条件

通过实测摩擦系统相关部件的尺寸,建立摩擦系统的简化模型,如图 10a 所示。该模型主要由夹具杆、连接杆、球夹具、球试样和平面试样组成。这里采用电-热-机多场完全耦合算法模拟摩擦过程,模型中各部件均采用 Q3D4 或 Q3D8 单元划分网格,各部件的网格特征参数如表 1 所示。设置接触方式为面-面有限滑移接触,主面定位为平面试样表面,从面定义为对球试样表面。

依据试验情况定义边界条件,如图 10b 所示。约束夹具杆顶部在 x 、 z 方向的自由度,将法向载荷(1 N)沿 y 方向施加于连杆顶面。约束平面试样底面在 x 、 y 方向的自由度,并在平面试样底面 z 方向上施加速度边界条件,使得平面试样在该方向上完成往复滑动。定义恒定电流(1 A)通过对磨副表面,

设置平面试样底面的电势为 0 V。设置环境温度为 25 °C。设置球夹具上某节点为观察点,用于提取摩擦过程中的法向位移信号。

3.2 结果分析与讨论

3.2.1 接触应力分析

不同表面在滑动电接触状态下的表面接触应力分布情况如图 11 所示。对于光滑表面,虽然其表面的最大应力(约 20 MPa)相较于其他表面更小,但是在滑动电接触过程中,其最大应力始终集中在滑动区前侧,这可能导致界面摩擦能量的堆积,产生严重的磨损,进而诱发摩擦振动^[38]。相比之下,对于 SPT 表面,虽然它在滑动过程中的表面最大应力(≈ 50 MPa)略大于光滑表面,但是由于方坑型织构的存在,SPT 表面的最大应力始终处于动态变化中。在 0.4 s 时,SPT 表面的最大应力出现在滑动区的棱边侧,在 0.7 s 时该表面的最大应力则转移至滑动区的非棱边处,以上现象在一定程度上避免了界面能量的堆积,使得应力分布更加均匀,从而降低了界面的磨损程度,有效抑制了界面摩擦振动的产生。对于 GT 表面,由于沟槽棱边尖锐且较长,因此最大应力始终集中于棱边,并且其最大应力(≈ 90 MPa)在 3 种表面中最大。虽然沟槽的存在使得接触面积不断变化,打断了界面的连续接触,降低了摩擦振动强度,但是集中在沟槽棱边的应力较大,使得摩擦界面和棱边处的磨损严重。该分析结果与磨损形貌分析结果一致,可知在试验中后期,因沟槽棱边磨损严重,导致 GT 表面改善界面摩擦学行为的能力逐渐减弱,因此 GT 表面在试验后期的摩擦因数和摩擦力均与光滑平面处于相似水平。

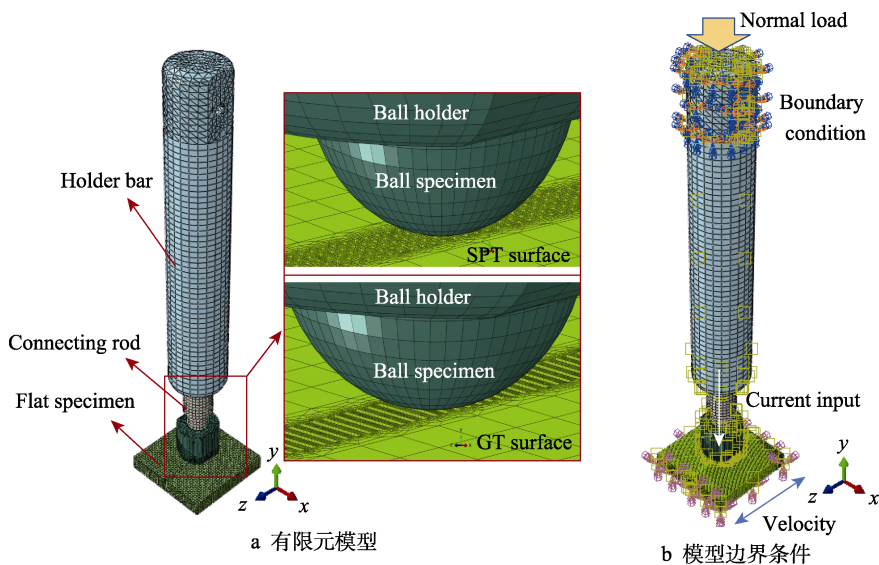


图 10 有限元模型与模型边界条件

Fig.10 Finite element model and model boundary conditions: a) finite element model; b) model boundary conditions

表 1 模型中每个部件的网格属性
Tab.1 Mesh properties of each component in the model

Component	Mesh property	Mesh number	Minimum mesh size/mm
Holder bar	Q3D4+Q3D8	14 302	1
Connecting rod	Q3D8	5 925	1
Ball fixture	Q3D8	21 072	0.5
Ball specimen	Q3D8	36 472	0.025
Smooth surface	Q3D8	40 750	0.03
SPT surface	Q3D8	69 485	0.03
GT surface	Q3D8	90 090	0.03

3.2.2 接触电压分析

不同表面在滑动电接触过程中的接触电压变化情况如图 12 所示。可以看出, 由于表面织构的存在,

SPT 表面和 GT 表面的电压信号均出现不同程度的波动。尤其是 GT 表面, 由于球试样滑过沟槽, 导致接触面积明显减少, 因此界面接触电阻增大, 电压信号波动明显。相比之下, 球试样滑过 SPT 表面时, 由于接触面积未发生明显改变, 因此电压信号波动幅度较小。该分析结果与图 6 试验结果形成良好的对应关系, 即 SPT 表面的电压稳定程度高于 GT 表面。

需要说明的是, 由于在分析过程中仅考虑了表面织构对电压信号的影响, 忽略了界面磨损和摩擦振动的影响, 因此光滑表面的电压信号保持稳定, 且为一个较低值。在实际试验过程中, 由于光滑表面的磨损严重, 界面摩擦振动强度增大, 因此电压信号呈现明显的不稳定特征, 其接触电压大于其他 2 种织构表面, 如图 6 所示。

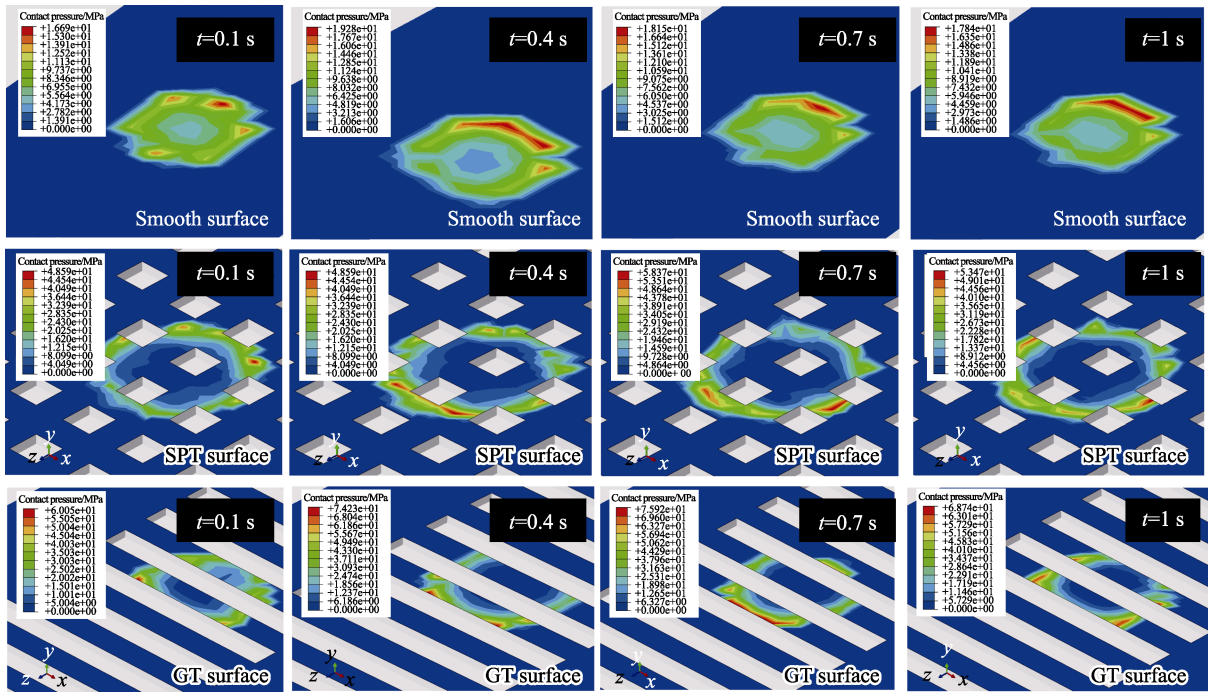


图 11 不同电流负载下 3 种表面的接触压力分布
Fig.11 Contact pressure distribution of three surfaces under different current loads

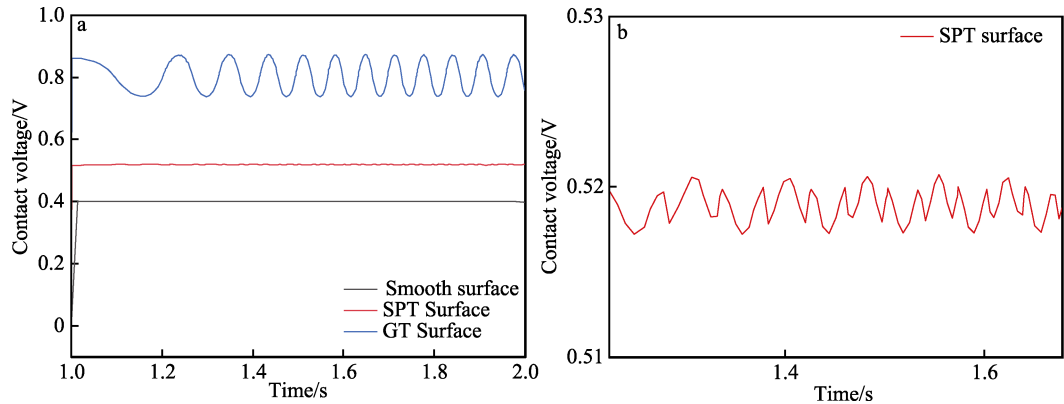


图 12 不同表面的接触电压 (a) 及 SPT 表面接触电压局部视图 (b)
Fig.12 Contact voltage of different surfaces (a) and the local view of contact voltage of SPT surface (b): a) contact voltage of different surfaces

3.2.3 接触位移分析

进一步提取不同表面下的电接触系统在摩擦过程中的法向位移信号,结果如图13所示。可以看出,在滑动初始阶段,3种表面的法向位移均显著上升,这是由界面的瞬时扰动所致。随着滑动的进行,光滑表面的法向位移信号较稳定,呈轻微上升趋势。相比之下,SPT表面的摩擦系统在法向的位移上升明显,使得接触区域出现微小分离,在不影响电接触的情况下,有助于改善界面磨损。相反,对于GT表面的摩擦系统,其法向位移逐渐下降,使得摩擦副充分接触,增大了界面的摩擦磨损配合程度。由此可见,在试验结束后,SPT表面的磨损程度最轻,GT表面的磨损程度最严重,数值模拟分析结果能够较好地解释试验现象。

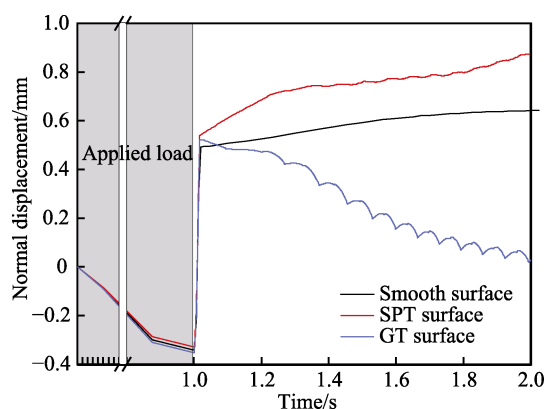


图13 不同表面的摩擦系统的法向位移信号
Fig.13 Normal displacement signals of friction systems on different surfaces

4 结论

在平面样品表面制备2种织构:方坑型表面织构(SPT)和沟槽型表面织构(GT),结合试验研究和数值模拟分析,探讨了表面织构对滑动电接触界面摩擦学行为的影响,得出如下结论。

1) GT表面在前600 s内的摩擦因数低于光滑表面。随着试验的进行,GT表面的摩擦因数和光滑表面的摩擦因数均为0.7左右。SPT表面的摩擦因数在3种表面中最低,始终保持在0.4左右。

2) GT表面摩擦力信号在初始阶段保持最低,并呈现“锯齿状”。随着试验的进行,GT表面的摩擦力信号“锯齿状”特征消失,并与光滑表面的摩擦力一样,达到较高水平。SPT表面的摩擦力在试验过程中始终保持较低水平。

3) 光滑表面在电接触过程中发生了明显的摩擦振动现象,2种织构表面的振动信号非常微弱。在电接触状态下,摩擦因数的增大并不会诱发强烈的摩擦振动。另外,2种织构表面在摩擦过程中均保持良好的电接触状态。

4) 磨损分析结果表明,光滑表面磨损严重,表

现出明显的磨粒磨损和黏着磨损;SPT表面磨损轻微,方坑织构保持完好;GT表面磨损最为严重,沟槽棱边磨屑堆积,损伤较严重,这也是GT表面织构减摩效果降低的原因。

5) 有限元分析结果较好地反映了试验现象。不同表面的应力分布特征是导致3种表面电接触摩擦学行为出现差异的主要原因之一。此外,通过分析接触电压和法向位移,进一步解释了试验现象。

参考文献:

- [1] XIAO J K, WANG C, XIAO S X, et al. Sliding Electrical Contact Properties of Highly Oriented Copper Fiber Brush [J]. *Wear*, 2023, 512/513: 204541.
- [2] 郁大照, 刘琦, 冯利军, 等. 电连接器微动腐蚀损伤行为与机理研究综述[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 233-245.
YU D Z, LIU Q, FENG L J, et al. Review on the Behavior and Mechanism of Fretting Corrosion Damage of Electrical Connectors[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 233-245.
- [3] FARFAN-CABRERA L I. Tribology of Electric Vehicles: A Review of Critical Components, Current State and Future Improvement Trends[J]. *Tribology International*, 2019, 138: 473-486.
- [4] 谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(5): 656-668.
XIE B H, JU P F, JI L, et al. Research Progress on Tribology of Electrical Contact Materials[J]. *Tribology*, 2019, 39(5): 656-668.
- [5] ZHU C Y, LI B M. Analysis of Sliding Electric Contact Characteristics in Augmented Railgun Based on the Combination of Contact Resistance and Sliding Friction Coefficient[J]. *Defence Technology*, 2020, 16(4): 747-752.
- [6] 王塞北, 彭明军, 孙勇, 等. 金属触头电接触性能研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9117-9123.
WANG S B, PENG M J, SUN Y, et al. Research Progress on Electrical Contact Performance of Metal Contacts[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(9): 9117-9123.
- [7] MENG Y, REN W B, ZHANG C. Investigation on Intermittent Failure Phenomenon of Electrical Connectors under Repetitive Mechanical Insertion and Withdrawal Operations[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2022, 12(9): 1533-1541.
- [8] PARK Y W, JOO H G, LEE K Y. Effect of Intermittent Fretting on Corrosion Behavior in Electrical Contact[J]. *Wear*, 2010, 268(3/4): 353-360.
- [9] JEDRZEJCZYK P, FOUVRY S, CHALANDON P. A Fast Methodology to Quantify Electrical-Contact Behaviour under Fretting Loading Conditions[J]. *Wear*, 2009, 267(9/10): 1731-1740.
- [10] HANNEL S, FOUVRY S, KAPSA P, et al. The Fretting

- Sliding Transition as a Criterion for Electrical Contact Performance[J]. *Wear*, 2001, 249(9): 761-770.
- [11] LIU X L, CAI Z B, HE J F, et al. Effect of Elevated Temperature on Fretting Wear under Electric Contact[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 643-655.
- [12] POLJANEC D, KALIN M, KUMAR L. Influence of Contact Parameters on the Tribological Behaviour of Various Graphite/Graphite Sliding Electrical Contacts[J]. *Wear*, 2018, 406/407: 75-83.
- [13] YASAR I, CANAKCI A, ARSLAN F. The Effect of Brush Spring Pressure on the Wear Behaviour of Copper-Graphite Brushes with Electrical Current[J]. *Tribology International*, 2007, 40(9): 1381-1386.
- [14] WANG D W, CHEN X, LI F Q, et al. Influence of Normal Load, Electric Current and Sliding Speed on Tribological Performance of Electrical Contact Interface[J]. *Microelectronics Reliability*, 2023, 142: 114929.
- [15] POMPANON F, LAPORTE J, FOUVRY S, et al. Normal Force and Displacement Amplitude Influences on Silver-Plated Electrical Contacts Subjected to Fretting Wear: A Basic Friction Energy-Contact Compliance Formulation [J]. *Wear*, 2019, 426/427: 652-661.
- [16] 宋晨飞, 孙毓明, 张燕燕, 等. 纯铜滚动载流摩擦副在不同载荷和电压作用下的失效研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(9): 63-70.
- SONG C F, SUN Y M, ZHANG Y Y, et al. Failure of Cu Rolling Triboelectric Pairs under Various Load and Voltage[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(9): 63-70.
- [17] 何莉萍, 彭金方, 蔡振兵, 等. 不同含氧量环境下紫铜/黄铜电接触微动磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(4): 680-689.
- HE L P, PENG J F, CAI Z B, et al. Electrical Contact Fretting Wear Behavior of Copper/Brass under Different Oxygen Content[J]. *Tribology*, 2022, 42(4): 680-689.
- [18] 徐梦廓, 朱世根, 丁浩. 电接触强化对 Ni-P/Nano-WC 复合刷镀层的微观组织及性能的影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(5): 187-193.
- XU M K, ZHU S G, DING H. Effect of Electric Contact Strengthening on Microstructures and Properties of Ni-P/Nano-WC Composite Coating[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(5): 187-193.
- [19] REN W B, WANG P, SONG J, et al. Effects of Current Load on Wear and Fretting Corrosion of Gold-Plated Electrical Contacts[J]. *Tribology International*, 2014, 70: 75-82.
- [20] 赵立新, 章宝玲, 刘洋, 等. 基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(1): 202-224.
- ZHAO L X, ZHANG B L, LIU Y, et al. State of the Art for Improving Tribological Performance Based on of Surface Texturing Technology[J]. *Tribology*, 2022, 42(1): 202-224.
- [21] 李强, 刘清磊, 杜玉晶, 等. 织构化表面优化设计及应用的研究进展[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(6): 59-73.
- LI Q, LIU Q L, DU Y J, et al. Advances in Optimization Design and Application of Textured Surfaces[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(6): 59-73.
- [22] 黄云磊, 钟林, 王国荣, 等. 表面织构润滑减摩的国内外研究现状及进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 217-232.
- HUANG Y L, ZHONG L, WANG G R, et al. Research Status and Progress of Surface Texture Lubrication and Friction Reduction[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 217-232.
- [23] WANG Z Q, YE R H, XIANG J B. The Performance of Textured Surface in Friction Reducing: A Review[J]. *Tribology International*, 2023, 177: 108010.
- [24] RANJAN P, HIREMATH S S. Role of Textured Tool in Improving Machining Performance: A Review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 43: 47-73.
- [25] 王泽霄, 陈文刚, 张禄中, 等. 几何特征及工况条件对表面织构摩擦特性影响研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 89-100.
- WANG Z X, CHEN W G, ZHANG L Z, et al. Research Progress on the Influence of Geometric Characteristics and Working Conditions on the Friction Characteristics of Surface Texture[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 89-100.
- [26] 周宇坤, 彭旭东, 赵文静, 等. 机械密封动环外周表面织构换热机理及结构优化[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(4): 538-550.
- ZHOU Y K, PENG X D, ZHAO W J, et al. Heat Transfer Mechanism and Optimization of Circumferential Texture of Mechanical Seal[J]. *Tribology*, 2020, 40(4): 538-550.
- [27] LI J B, LIU S, YU A B, et al. Effect of Laser Surface Texture on CuSn₆ Bronze Sliding Against PTFE Material under Dry Friction[J]. *Tribology International*, 2018, 118: 37-45.
- [28] AMANOV A, TSUBOI R, OE H, et al. The Influence of Bulges Produced by Laser Surface Texturing on the Sliding Friction and Wear Behavior[J]. *Tribology International*, 2013, 60: 216-223.
- [29] ESTEVES M, RAMALHO A, RAMOS F. Electrical Performance of Textured Stainless Steel under Fretting[J]. *Tribology International*, 2017, 110: 41-51.
- [30] CAO Z F, XIA Y Q, CHEN C, et al. A Synergetic Strategy Based on Laser Surface Texturing and Lubricating Grease for Improving the Tribological and Electrical Properties of Ag Coating under Current-Carrying Friction[J]. *Friction*, 2021, 9(5): 978-989.
- [31] WANG D W, MO J, ZHU Z M, et al. How do Grooves on Friction Interface Affect Tribological and Vibration and Squeal Noise Performance[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 192-205.
- [32] XIAO J K, LIU L M, ZHANG C, et al. Sliding Electrical Contact Behavior of Brass Fiber Brush Against Coin-Silver and Au Plating[J]. *Wear*, 2016, 368/369: 461-469.
- (下转第179页)

- Foetidae by Using Box-Behnken Response Surface Methodology Combined with Multi-Index Comprehensive Weighted Method[J]. *China Pharmacy*, 2016, 27(13): 1835-1838.
- [26] 杨奇彪, 陈中培, 陈列, 等. 纳秒激光加工微凹坑对 YG3 表面浸润性的影响[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(3): 1-8.
- YANG Q B, CHEN Z P, CHEN L, et al. Effects of Nanosecond Laser-Induced Micro-Pits on Surface Wettability of YG3[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(3): 1-8.
- [27] 刘奇, 董光能. 纳秒脉冲激光参数及激光路径填充方式对表面织构平坦化的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 23-28.
- LIU Q, DONG G N. Effect of Nanosecond Pulsed Laser Parameters and Texture Machining Methods on Surface Texture Flattening[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(8): 23-28.
- [28] SHIM D S. Effects of Process Parameters on Additive Manufacturing of Aluminum Porous Materials and Their Optimization Using Response Surface Method[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 119-134.
- [29] XU Z Y, YUAN J S, WU M, et al. Effect of Laser Cladding Parameters on Inconel 718 Coating Performance and Multi-Parameter Optimization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108850.
- [30] HUANG Y B, HU Y L, ZHANG M J, et al. Multi-Objective Optimization of Process Parameters in Laser Cladding CoCrCuFeNi High-Entropy Alloy Coating[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, 31(6): 1985-2000.
- [31] 王国荣, 杨昌海, 李蓉, 等. 激光表面织构化对压裂泵柱塞摩擦性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(3): 17-20.
- WANG G R, YANG C H, LI R, et al. Effect of Laser Textured Surfaces on Tribological Properties of Fracturing Pump Plungers[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(3): 17-20.
- [32] 练国富, 姚明浦, 陈昌荣, 等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 229-239.
- LIAN G F, YAO M P, CHEN C R, et al. Control of the Quality and Efficiency of Multi-Track Overlapping Laser Cladding[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(9): 229-239.
-
- (上接第 147 页)
- [33] DI BARTOLOMEO M, LACERRA G, BAILLET L, et al. Parametrical Experimental and Numerical Analysis on Friction-Induced Vibrations by a Simple Frictional System[J]. *Tribology International*, 2017, 112: 47-57.
- [34] MO J L, WANG Z G, CHEN G X, et al. The Effect of Groove-Textured Surface on Friction and Wear and Friction-Induced Vibration and Noise[J]. *Wear*, 2013, 301(1/2): 671-681.
- [35] GRANDIN M, WIKLUND U. Influence of Mechanical and Electrical Load on a Copper/Copper-Graphite Sliding Electrical Contact[J]. *Tribology International*, 2018: 121: 1-9.
- [36] GACHOT C, ROSENKRANZ A, HSU S, et al. A Critical Assessment of Surface Texturing for Friction and Wear Improvement[J]. *Wear*, 2017, 372/373: 21-41.
- [37] YANG H J, CHEN G X, GAO G Q, et al. Experimental Research on the Friction and Wear Properties of a Contact Strip of a Pantograph-Catenary System at the Sliding Speed of 350 km/h with Electric Current[J]. *Wear*, 2015, 332/333: 949-955.
- [38] WANG D W, MO J L, LIU M Q, et al. Noise Performance Improvements and Tribological Consequences of a Pad-on-Disc System through Groove-Textured Disc Surface[J]. *Tribology International*, 2016, 102: 222-236.