

摩擦学学报

TRIBOLOGY



钢-聚四氟乙烯摩擦界面的摩擦起电行为

张立强, 冯雁歌, 李小娟, 王楠楠, 王道爱

Triboelectric Behavior at the Friction Interface of Steel and Polytetrafluoroethylene

ZHANG Liqiang, FENG Yange, LI Xiaojuan, WANG Nannan, WANG Daoai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮化碳增强聚四氟乙烯摩擦学性能的分子动力学模拟

Molecular Dynamics Simulation on the Tribological Properties of the Carbon Nitride Reinforced PTFE

摩擦学学报. 2021, 41(2): 223 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020136>

γ 射线辐照聚四氟乙烯复合材料的结构和摩擦磨损性能研究

Effect of Gamma Irradiation on Structure and Tribological Properties of PTFE Composites

摩擦学学报. 2021, 41(4): 503 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020187>

聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能

Tribological Properties of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings with PTFE/PPS Fabric Liners

摩擦学学报. 2018, 38(5): 547 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.007>

聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯复合涂层的制备及其摩擦学性能和耐腐蚀性能

Preparation of Polyamideimide/Polytetrafluoroethylene Composite Coatings and Its Tribological and Anti-Corrosion Properties

摩擦学学报. 2021, 41(4): 455 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020182>

表面织构对PTFE复合材料摩擦磨损行为的影响

Effect of Surface Texture on Friction and Wear Behavior of PTFE Composites

摩擦学学报. 2020, 40(6): 697 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020030>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2021005

钢-聚四氟乙烯摩擦界面的摩擦起电行为

张立强^{1,2}, 冯雁歌^{1,3}, 李小娟^{1,2}, 王楠楠^{1,2}, 王道爱^{1,3*}

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 青岛市资源化学与新材料研发中心, 山东 青岛 266100)

摘要: 作为界面摩擦中普遍存在的一种物理现象, 摩擦起电由于其对摩擦界面的高度灵敏性而被广泛研究. 以钢-聚四氟乙烯(PTFE)为研究对象, 通过采集摩擦过程中的摩擦系数、钢球的接地电流以及PTFE的表面电势, 对其摩擦界面的起电行为进行了详细研究. 三种信号的波动幅值呈正相关性, 反映了摩擦-摩擦起电的内在联系. 在钢-PTFE的摩擦过程中, 材料的转移诱导使得PTFE的表面电势在达到饱和值后会反向演化. 利用钢-PTFE摩擦副进入稳定摩擦阶段的时间与摩擦电势的反向演化时间的关联性设计钢-PTFE或其他金属-聚合物摩擦副的摩擦状态监测系统, 对实现机械运动过程中的摩擦副运动原位监测和故障预警具有重要价值.

关键词: 钢-聚四氟乙烯; 摩擦起电; 表面电势; 电流; 极性反向演化; 摩擦监测

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)06-0983-12

Triboelectric Behavior at the Friction Interface of Steel and Polytetrafluoroethylene

ZHANG Liqiang^{1,2}, FENG Yange^{1,3}, LI Xiaojuan^{1,2}, WANG Nannan^{1,2}, WANG Daoai^{1,3*}

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Qingdao Center of Resource Chemistry and New Materials, Shandong Qingdao 266100, China)

Abstract: As a ubiquitous physical phenomenon in the friction interface, triboelectrification has been widely studied due to its high sensitivity to changes in the friction interface. Among them, the triboelectric behavior of metal-polymer friction pairs has attracted much attention due to its wide application in industry and production. Especially in recent years it has been discovered that there is a close relationship between triboelectricity and friction. Not only the friction conditions affect the triboelectricity, but also the friction can be controlled by controlling the electrostatic charge on the surface. Here, we've designed a test system that simultaneously collects both friction signals and electrical signals. By collecting the friction coefficient, the current from the steel ball and the surface potential of polytetrafluoroethylene (PTFE) during the friction process, the triboelectric behavior of steel-PTFE was systematically studied. The fluctuation amplitude of the three signals presents a proportional relationship, which reflects the internal relationship between friction and triboelectricity. This method of collecting multiple signals at the same time is a developing trend in the field of on-line tribology monitoring in the future. In the complex friction interface, the motion of the friction pair had a great

Received 4 January 2021, revised 16 March 2021, accepted 16 March 2021, available online 28 November 2021.

*Corresponding author. E-mail: wangda@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968169.

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFF0304600), the program for Taishan Scholars of Shandong Province (ts20190965) and the National Natural Science Foundation of China (51905518).

国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2020YFF0304600), 山东省泰山学者计划(ts20190965)和国家自然科学基金项目(51905518)资助.

influence on the electrical signal. As for the current signal in the friction process, when the two friction pairs contacted and separated continuously, the current signal presented a bipolar signal. However, the difference of the friction mode led to the possibility that the peak shape of the current in the friction process may appear bipolar signals, or it may be unipolar. This special phenomenon was explained by analyzing the electron flow at its rubbing interface. The large interfacial potential difference of the interface caused by triboelectrification and the transfer of the third body made it possible for a large amount of static charge from the surface to re-inject to the metal surface. Because the third body participated in the friction process of the interface, the triboelectric properties of the interface were changed. The transfer of materials and the induction of the electrical polarity of the interface made the triboelectric potential showed a nonlinear trend during the friction process. That was, the surface potential of PTFE showed a reverse evolution trend after reaching the maximum value. Further experiments showed that this phenomenon of reverse evolution of surface potential existed when steel balls and steel sheets rubbed against PTFE. Optical photographs and surface element analysis of metal friction proved that there were physically adsorbed wear debris and an incompletely covered transfer film with irregular shapes on the surface of the metal friction pair. During the friction process of steel-PTFE, the reversal time of potential can be corresponded to the time when the friction coefficient entered the stable stage, which was of great value to realize the in-situ monitoring of the friction pair motion and fault warning in the process of mechanical motion. This study proposed the mechanism of the triboelectric non-monotonic change of steel-PTFE, and links the start time of stable friction coefficient with the reversal time of surface potential, which has potential application of friction monitoring of steel-PTFE or other metal-polymer friction. It is foreseeable that in the future tribology, coupling the triboelectricity of the interface or other test methods into the traditional friction test system is the trend of online monitoring of the friction state and the state of the friction pair.

Key words: steel-PTFE; triboelectrification; surface potential; current; polarity evolution; friction monitor

作为一种对界面状态十分敏感的摩擦物理现象,摩擦起电常被用于摩擦副界面接触状态和性质变化检测的辅助分析手段^[1-4]。目前,摩擦起电被普遍认为是由两接触-分离表面的电子云发生重叠导致的电子转移造成的^[5-7],而在有水参与的界面中,双电层的存在使得离子转移成为影响摩擦起电性能的重要因素^[8-11]。另外,在摩擦过程中材料的转移也会导致摩擦起电性能发生改变^[12-16]。与简单的接触-分离起电相比,摩擦起电更加复杂,摩擦副在摩擦过程中产生的机械互锁、磨损和界面物质转移等现象极大地影响了材料间的摩擦起电行为。

通常两个物体相互摩擦时,两种材料的原子核对其核外电子的束缚能力差异越大,越容易起电。作为一种常见的摩擦配副,金属与聚合物摩擦时,聚合物材料极易得/失电子而在表面富集大量静电,进而影响材料的摩擦和磨损等性能,因此其摩擦起电行为在应用过程中备受关注^[17]。除了材料的本性,摩擦副材料的摩擦起电还受材料表面结构、化学组成、摩擦运动方式和外部环境条件等因素的制约^[11, 18-23],如可以通过载流或施加电场的方式对摩擦过程进行一定程度的调控^[24-27]。另外,界面的接触应力和黏附状态等也会对材料的摩擦起电行为产生重大影响^[28-32]。另一方面,通过对材料或摩擦过程中的电学和声学等信号的测量可以有效地监测摩擦以及摩擦副的状态^[33-34]。尤其

在金属-聚合物配副的摩擦中,可以通过测量金属端的接地电流和聚合物的表面电势实现对其界面摩擦起电行为的测量^[35-38],这也为利用界面的摩擦电信号变化原位反映摩擦和磨损状态提供了可行的途径。

本文作者利用摩擦试验机 and 电学测试系统的耦合,实现了对钢-PTFE摩擦副摩擦运动过程中的摩擦系数、接地电流和摩擦电势三种信号的原位收集。通过分析这三种信号之间的内在联系,研究了钢-PTFE配副的摩擦起电行为。研究发现,在摩擦过程中这三种信号的变化存在正相关性,证明了摩擦副的摩擦学行为与其摩擦起电行为之间存在内源性联系,这为实现摩擦副摩擦状态的智能监测提供了新思路。

1 试验部分

1.1 试验材料及制备

商用纯PTFE块($\varnothing 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$)购自上海金优橡塑制品厂,试验前分别用200目、400目和800目的砂纸对PTFE表面进行抛光,用无水乙醇清洗表面并在100℃的烘箱内热处理2 h。轴承钢球(GCr15)购自宁阳新新球业,试验之前用丙酮和无水乙醇进行反复清洗,去除表面的有机物。

1.2 试验方法

试验使用商用的TRB摩擦试验机(TRB3, Austria)的旋转模块进行摩擦试验。整个摩擦试验机通过铝箔

制成的法拉第笼包裹来排除环境的电磁干扰。以钢球和PTFE为试验研究的摩擦副, 上方的钢球作为静止不动的定子, 下方的PTFE块作为旋转运动的转子。钢球被固定在1个与摩擦试验机绝缘的夹具中以避免摩擦试验机的干扰, 并通过摩擦试验机自带软件调节旋转台的速度。

通过静电探头[SK050, KEYENCE (Japan) Co, Ltd]测量PTFE表面的静电电势, 探头表面距离PTFE表面为10 mm。使用SR570低噪声电流放大器(Stanford Research System, America)收集摩擦过程中的接地电流信号, 滤波频率为10 Hz。其中电流放大器的一端连接在钢球引出的铜导线, 另一端接地。数据通过数据采集卡(DAQ)以及LabVIEW软件获得。摩擦系数由摩擦试验机附带软件获得。PTFE表面的微观形貌通过扫描电子显微镜(SEM, Phenom Pro X, Netherlands)拍摄。PTFE的红外光谱由衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(ATR-FITR, Nicolet iS10, Thermo Scientific, USA)测试, 扫描范围为600~4 000 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 试验设计

在运动表面摩擦学行为的研究过程中, 对摩擦副摩擦界面状态的变化进行原位分析和监测越来越重要, 将常规的摩擦学测试仪器与其他检测技术相结合已成为未来研究的发展趋势。常见的摩擦副摩擦状态的检测包括金属-金属或金属-润滑油-金属界面的接触电阻、金属-聚合物摩擦过程中收集金属的接地电流以及聚合物的表面电势、摩擦过程中的声学信号以及摩擦过程中伴生的热、光和电学现象等。其中, 摩擦

界面处的接触、黏附、滑动、滚动、材料转移、表面吸附和润滑等行为与界面分离时产生的电荷密切相关^[39-40]。因此, 作为一种界面摩擦时存在的普遍现象, 摩擦起电受到了越来越多的关注^[16, 41-42]。但通常影响摩擦副摩擦起电的因素复杂, 很难实现摩擦副在摩擦运动过程中对摩擦起电动态实时监测。为了解决这个问题, 将静电探头、电流放大器与TRB摩擦试验机耦联, 实现了摩擦副在摩擦过程中摩擦学行为与摩擦起电行为的原位检测。图1展示了这种可收集金属与聚合物界面的摩擦学信号与摩擦起电信号的集成系统, 在摩擦过程中可以同时收集从钢球引入地面的电流信号、聚合物基体的表面电势和摩擦系数。以钢-PTFE摩擦副的摩擦为例, 当二者摩擦时, 钢球和PTFE表面会产生等量异号电荷。通过将钢球与摩擦试验机进行电绝缘处理后再接地, 摩擦带电的钢球表面与大地之间形成电势差, 从而驱动电荷运动形成电流, 通过电流放大器对其测量; 而另一个摩擦副PTFE表面由摩擦电荷的积累产生的表面电势则通过静电探头实现对其的测量。同时, 摩擦副的摩擦系数等参数通过摩擦试验机的信号采集系统进行同步采集。

为了排除其他因素对试验的影响, 试验中所使用的样品为商用的纯PTFE样块。图2(a)和图2(b)分别展示了PTFE的实物图片及红外光谱图。如图2(b)所示, 1 145和1 200 cm^{-1} 波数处的吸收峰分别代表了C-F键的对称伸缩和非对称伸缩。另外, 材料表面的宏观沟槽或凸起结构会给摩擦起电带来数值上的波动, 形成常见的电信号毛刺现象。因此, 为避免这种现象, 保证摩擦副材料表面平滑非常必要。如图2(c)和图2(d)所示, PTFE用砂纸逐级打磨后在微米尺度上表现出平

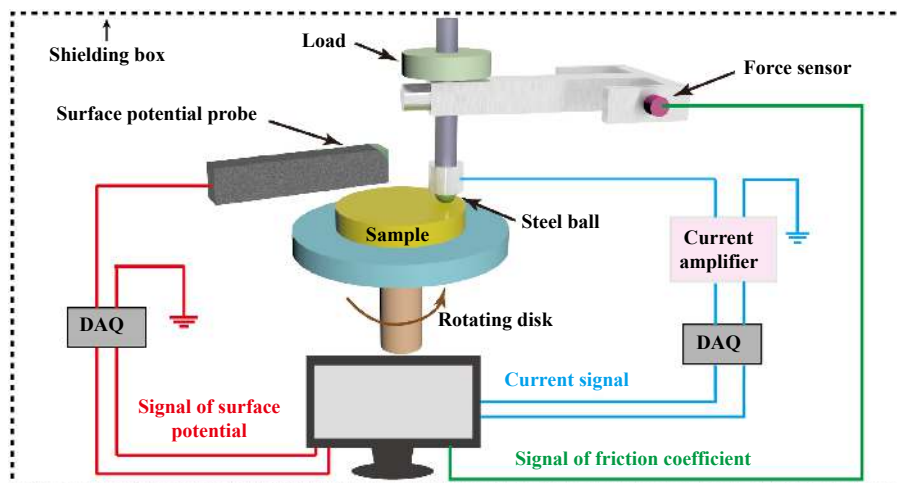


Fig. 1 Schematic diagram of the system that can collect current, surface potential and friction coefficient at the same time

图1 可同时收集摩擦系数、摩擦过程中电流和表面电势的集成系统示意图

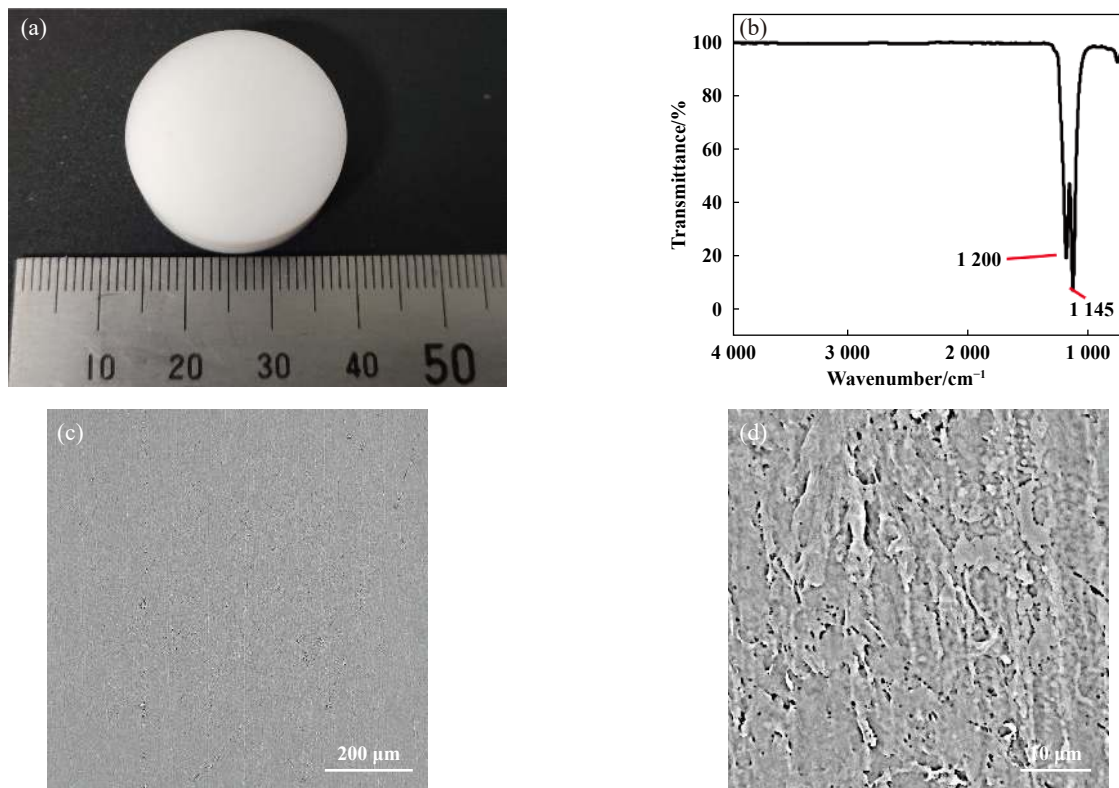


Fig. 2 (a) Photograph of PTFE; (b) The total reflection Fourier transform infrared spectrum of PTFE and the scanning range is 4000 cm^{-1} to 600 cm^{-1} ; (c) SEM micrograph of the surface of PTFE, the scale bar is $200\text{ }\mu\text{m}$. (d) The magnified SEM image with a scale of $10\text{ }\mu\text{m}$

图2 (a)PTFE的实物图片; (b) PTFE的红外光谱图片; (c)PTFE表面的扫描电镜照片, 比例尺为 $200\text{ }\mu\text{m}$; (d)放大后的扫描电镜图片, 比例尺为 $10\text{ }\mu\text{m}$

整的结构, 这可有效减小摩擦过程中的互锁现象, 避免材料在摩擦过程中由于突然的界面跳跃和分离等对摩擦起电信号造成干扰。

2.2 摩擦过程中摩擦系数、电流以及表面电势信号的分析

图3(a, b, c)分别展示了在摩擦过程中实时采集的摩擦系数、来自钢球的接地电流以及PTFE的表面电势三种信号。一般来说, PTFE与钢球之间由于摩擦起电效应会导致钢球的电子流入PTFE表面, 从而使得PTFE表面带负电直至电荷积累至动态平衡。从图3(b)可以看出, 在整个摩擦过程中, PTFE的表面电势并不呈现单调递减的变化趋势, 而是当积累到饱和后会反向充电达到动态稳定的值。而当摩擦系数处于较稳定的摩擦阶段时, PTFE的表面电势恰好处于从负电势进行反向演化的阶段。从钢球收集的接地电流在这个过程中表现出先增大后减小再到稳定状态的特征。这三种信号的变化体现出了摩擦电信号对摩擦副摩擦学行为信号的响应, 有利于揭示摩擦过程中界面的一些现象。其中PTFE表面电势的变化可能与其表层材料

的磨损以及磨屑向钢球的转移有关。而当PTFE发生转移后, 由于转移膜的存在使摩擦系数变得相对稳定, 钢球的接地电流和PTFE摩擦副表面电势趋于稳定。摩擦过程中接地电流的变化与摩擦系数以及表面电势的波动有关。如图3(d, e, f)所示, 摩擦系数、接地电流与表面电势的波动幅值之间存在一定的对应关系, 反映出摩擦副的摩擦起电行为与其摩擦运动状态和摩擦学行为息息相关, 因此利用摩擦电信号的变化可以实现对摩擦系数稳定性的监测。另外, 从图3(c)中可以发现, 从钢球摩擦副收集到的接地电流具有双极性的特征, 在不同的摩擦阶段分别表现正电性和负电性, 这与摩擦电子的转移、感应和回注等过程存在内在联系。

图4(a)所示为钢球-PTFE摩擦副在不同摩擦运动方式条件下钢球接地电流信号的对比。在第一种接触-分离的运动模式下, 钢和PTFE两个摩擦副表面由于摩擦起电效应分别被正充电和负充电。当钢球在接触和分离的过程中, 两个表面之间变化的距离引起电场的改变从而驱动电子在外电路中来回流动, 产生了交

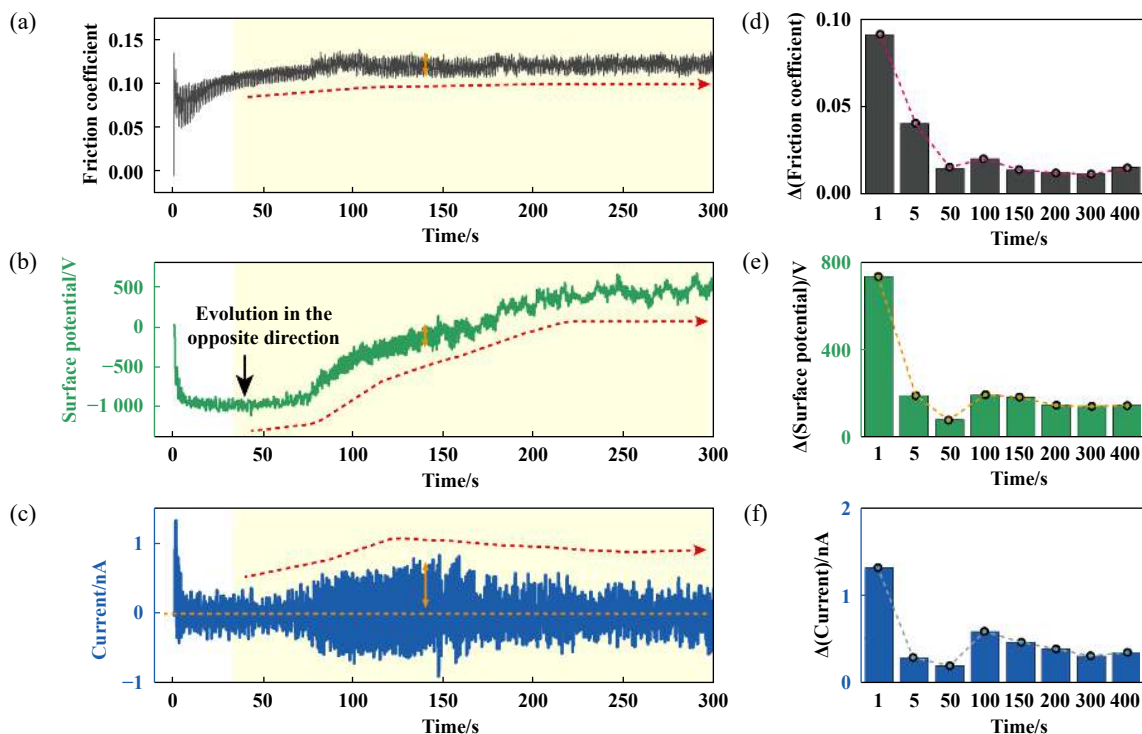


Fig. 3 Comparison of three kinds of signals: (a) friction coefficient; (b) surface potential; (c) current. Comparison of the fluctuation values of the three signals at different times: (d) friction coefficient; (e) surface potential; (f) current. The applied load is 5 N and the sliding speed is 4.48 cm/s

图3 三种信号的对比: (a)摩擦系数; (b)表面电势; (c)接地电流. 三种信号的波动值在不同时间的对比: (d)摩擦系数; (e)表面电势; (f)接地电流. 摩擦过程中施加的载荷为5 N, 滑动的速度为4.48 cm/s

变电流的峰形. 在第二种情况下钢球在PTFE表面往复滑动, 且每次的摩擦轨迹保持一致. 在这种运动模式下, 收集的电信号同样表现出双极性的交变电流峰形. 而当钢球以Z形或者螺旋线形在PTFE表面慢速滑动时, 则电流表现为正极性的峰形. 这是因为这种不与原始摩擦轨迹重叠的运动模式下, 钢球不断在零电荷的新表面滑动, 钢球的电子持续转移到PTFE表面, 从而导致电子从大地持续流到钢球, 产生了正电流的峰形. 而在第二种直线往复的运动模式下, 即与原始的滑动轨迹重合时, 电流的峰形表现为先负后正的双极性的峰形, 这说明摩擦方式与摩擦起电行为密切相关.

图4(b)说明了电流峰形呈现为双极性的原因. 当钢球与PTFE表面接触时, 由于摩擦起电效应, 钢球表面的电子转移到PTFE表面, 然而此时正电荷和负电荷处于同一接触平面, 界面的净电荷为零. 当界面由于剪切运动分离时, 电子就会从大地流入钢球补偿其失去的电子, 产生正向的电流. 此时PTFE表面的静电电荷由于势垒的存在会在表面停留相当长的时间. 当钢球重新滑过表面时, 为了平衡零电势的钢球与带电的PTFE接触时产生的电势差使摩擦界面能量最低, 钢球上的电子会注入大地并在界面产生一部分正电

荷或者直接以界面回注的方式转移到钢球, 使接触界面的电势差降低^[6]. 因此, 电流表现出先负后正的双极性峰形, 由于摩擦起电效应, 电子会继续向PTFE表面转移, 这样最终电流就表现为双极性的峰形.

为了更清晰地说明电子的流动, 在图5中展示了几种摩擦界面状态的示意图. 如图5(a)所示, 界面达到了相对稳定的状态, 由于钢球与聚四氟乙烯的得失电子差异, 电子有机会从钢球表面向聚四氟乙烯表面转移. 如图5(b)所示, 钢球表面的电子转移到聚四氟乙烯表面, 在原始位置形成了空穴, 并导致电子在钢球内部的晶格内流动. 此时发生了电荷的转移. 另一方面, 由于钢球与零电势的地线相连, 因此电子的流动是从地线流入电流表再流入钢球到达钢球表面, 形成正向的电流. 如图5(c)所示, 当电子流动结束后, 钢球表面达到暂时稳定的状态. 如图5(d)所示, 由于聚合物表面的电荷很难向环境中耗散, 因此, 当钢球滑动到聚四氟乙烯带负电较多的区域时, 电子就有机会发生两个行为: 一是电子从聚四氟乙烯表面回注到钢球表面; 二是电子在电荷之间的静电排斥作用下往复运动, 进而导致电子的反向流动, 在外电路表现为电流的反向流动, 这样电流就宏观表现为交流信号.

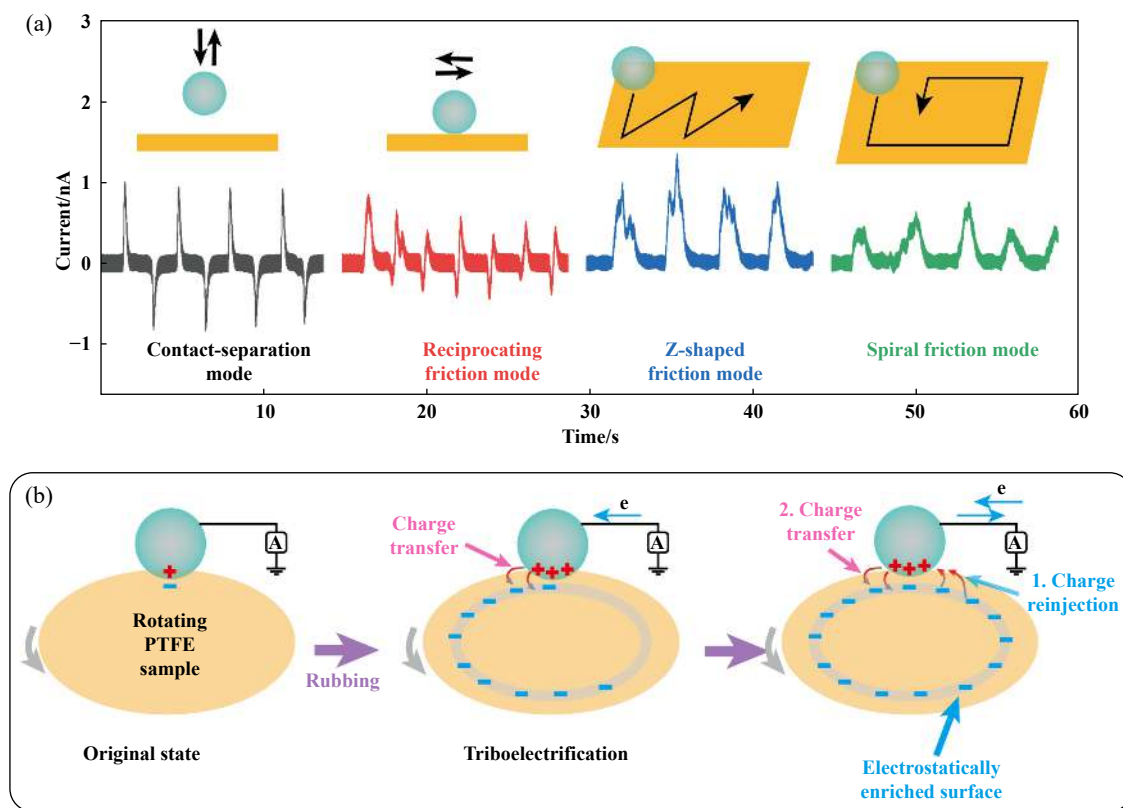


Fig. 4 (a) Comparison of the current signals collected during friction process under different trajectories (contact-separation mode, reciprocating friction mode, Z-shaped friction mode and spiral friction mode); (b) The mechanism of the current peak shape showing positive and negative fluctuations

图4 (a)在不同运动模式下(垂直方向接触-分离模式、往复摩擦模式、“Z”型折线运动模式和螺旋线模式)收集的电流信号的对比;(b)摩擦过程中电流呈现正负波动峰形的机理

钢-PTFE摩擦过程中的表面电势表现出首先达到饱和状态然后反向变化的趋势。通过分析,认为这主要是由材料的转移引起的界面变化造成的。在摩擦过程中材料的转移是不可避免的,即使两个材料表面发生轻微的滑移,在滑移界面也会发生部分材料的转移^[12]。材料的转移会引起界面两个滑动表面成分的变化,由两个原始界面变成了有转移材料参与的摩擦界面。一般来说,软相材料会向硬相材料发生转移。如图6(a~c)所示,在旋转的球-盘摩擦过程中,在钢球沿着摩擦方向的一侧会出现材料的转移与堆积现象。这部分堆积在钢球与PTFE的接触界面夹角的材料也有可能重新进入到接触区域继续参与摩擦过程。另外还有大量的磨屑通过静电作用吸引到钢球表面,这部分带电的材料对钢球的总体电势也会产生影响。图6(d)中在钢球表面的光学图像展示了PTFE在钢球表面磨痕处的转移,这部分转移的材料改变了原摩擦界面的组成,使钢球与基底的摩擦转变为钢球和转移材料同基底的混合摩擦,继而影响了界面的摩擦起电性质。另外在图6(e~f)中展示了转移膜在钢球上的SEM图像和F元

素的分布图像,证明了PTFE在钢球上的转移。

PTFE在摩擦过程中的表面极性发生反向演变的机理如图6(g)所示。在摩擦过程的初始阶段,由于钢球与PTFE表面的电子转移能力的不同,钢球上的电子转移到PTFE表面,导致钢球带正电荷,PTFE带负电荷。当钢球-PTFE摩擦副经过一段时间的磨合之后,由于接触区域高的接触应力,PTFE表面带负电的摩擦层会由于犁耕作用或者疲劳逐渐剥落,由于物理的静电吸附以及界面的黏附作用,带负电的聚四氟乙烯就会向钢球转移,这样钢球表面就出现了一部分带负电荷的PTFE。钢球上带负电材料的转移会抑制原有的摩擦起电行为,并且促使界面开始反向的演化。而下表面由于剥落了一层带负电的PTFE,由于偶极作用,新形成的表面局部会暴露出带正电荷的部分。这部分暴露出来的带正电的表面与钢球之间也存在着摩擦电荷的感应与转移行为。由于PTFE的表层不断剥落以及新摩擦界面的摩擦起电两者的协同作用,使PTFE表面电势在达到最大值后会向反向演变直到PTFE的表面电势达到一个动态稳定的值。

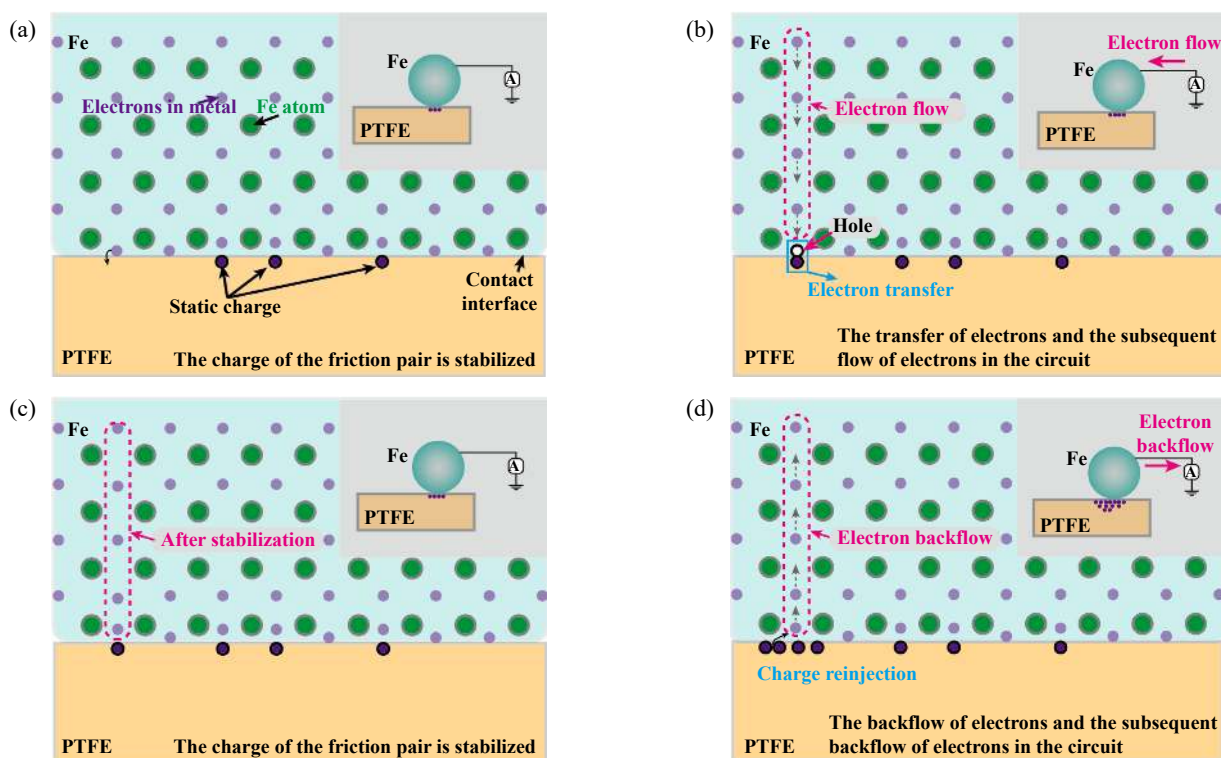


Fig. 5 (a) Schematic diagram of the friction interface in a stable state; (b) Schematic diagram of the electron flow in the external circuit caused by electron transfer on the interface; (c) Schematic diagram when the interface reaches a temporary stable state; (d) The back injection of electrons and the reverse flow of electrons in the external circuit when the sliding continues. The insert picture represents the flow of electrons in the external circuit

图5 (a)界面达到稳定状态时的状态示意图;(b)界面发生电子转移引起的外电路的电子流动示意图;(c)界面达到暂时的稳定状态时的示意图;(d)继续滑动发生电子的回注引起外电路中电子的反向流动. 插图代表外电路中电子的流向

在钢片-PTFE的面-面摩擦过程中同样会出现类似的聚四氟乙烯表面电势极性反向演化的过程. 如图7(a~b)所示, 比较了面-面摩擦下的摩擦系数以及表面电势的变化. 在所使用的摩擦条件下, 钢片与聚四氟乙烯表面之间的平均摩擦系数约为0.14, 这比钢球-PTFE的摩擦系数略大, 可能是增大了实际的接触面积所致. 与球-盘摩擦类似, 摩擦系数的稳定阶段对应着PTFE表面电势的显著增加阶段.

图7(c~d)展示了钢片表面形成的转移膜在普通模式和滤光模式下的光学照片, 可以明显看出, 钢片上存在PTFE的转移膜. 图7(e)展示了PTFE转移膜在钢片上并非完全覆盖整个圆面, 而是呈现部分覆盖的特征. 这表明, 实际的摩擦过程是钢与PTFE的转移膜与基底材料的混合摩擦. 图7(f)与图7(g)展示了钢片上PTFE转移膜的SEM图像和F元素的分布图像. 通过钢片上PTFE转移膜的局部形貌的SEM照片可以看出, PTFE的转移膜为片状且存在由于犁耕作用产生的细微磨痕, 转移膜之间存在互相重叠的现象. 通过F元素的分布图像证明了PTFE向钢片的转移.

2.3 表面电势反向演变时间的影响因素

从上述分析可知, 当PTFE的负电势达到最大值后, 会开始反向变化直到出现1个相对稳定值, 并且当表面电势开始向相反方向演化时, 摩擦系数开始进入稳定阶段. 因此可以把表面电势反向演化的开始时间用作摩擦系数进入稳定阶段的标志, 这对于评价材料摩擦跑合期的长短具有重要意义. 当摩擦过程中载荷和摩擦速度发生变化时, 钢-PTFE的摩擦系数进入稳定阶段的时间会有所不同. 如图8(a)所示, 随着载荷的增大, 摩擦系数呈现出逐渐减小的趋势. 这与其接触面积与载荷的非线性变化有关^[43]. 表1中展示了载荷、接触面积以及接触面积和载荷比值的关系, 所采用的PTFE的弹性模量为 5×10^8 Pa, 泊松比为0.4. 可以看出虽然载荷和接触面积均呈增大的趋势, 但是接触面积与载荷的比值却是逐渐降低的. 材料的摩擦力在本质上是载荷与摩擦界面的剪切力(剪切模量与接触面积的乘积)的比值, 由于材料的剪切模量基本保持不变, 也就意味着在切向方向上接触面积与载荷比值的变化趋势可以反映摩擦系数的变化趋势. 由于实际接触

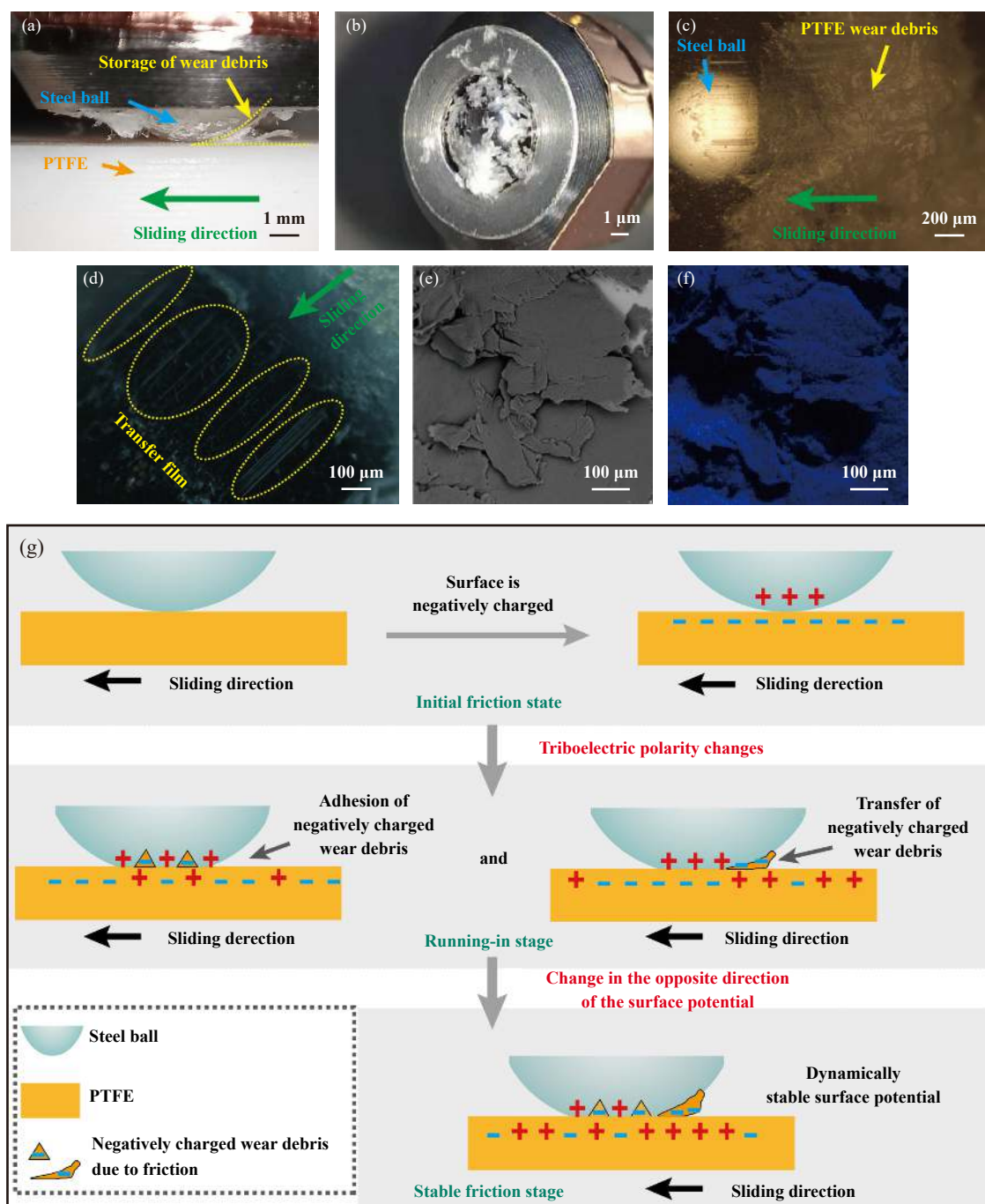


Fig. 6 (a) The photograph of two friction pairs in macro contact; (b) The overall picture of the transferred PTFE adhered on steel ball; (c) The optical image of wear debris accumulated on the side edge of the steel ball; (d) The optical image of PTFE embedded in the wear scar; (e) The partial SEM image of transferred PTFE film; (f) The corresponding F element distribution image; (g) The mechanism of reverse evolution of PTFE surface potential polarity during friction

图6 (a)宏观接触的两个摩擦副的照片;(b)钢球上转移PTFE膜的整体图片;(c)钢球侧边缘积累的磨屑形态;(d)镶嵌在磨痕处的PTFE的光学照片;(e)在钢球上转移的PTFE的局部形貌的SEM照片;(f)转移的PTFE局部的F元素分布;(g)摩擦过程中PTFE表面电势极性反向演化的机制

面积与载荷的比值是降低的,导致钢-PTFE的摩擦系数随着载荷的增加而降低。

如图8(b)所示,表面电势开始反向演化的时间与摩擦系数基本稳定的时间随着摩擦载荷的增大而逐

渐降低。首先,PTFE表层材料的剥落导致表面带负电的PTFE变少,在新形成的表面由于偶极作用有可能形成局部带正电荷的区域。载荷的增大导致了表层材料剥离效率的提高,因此会加速PTFE表面电势的反

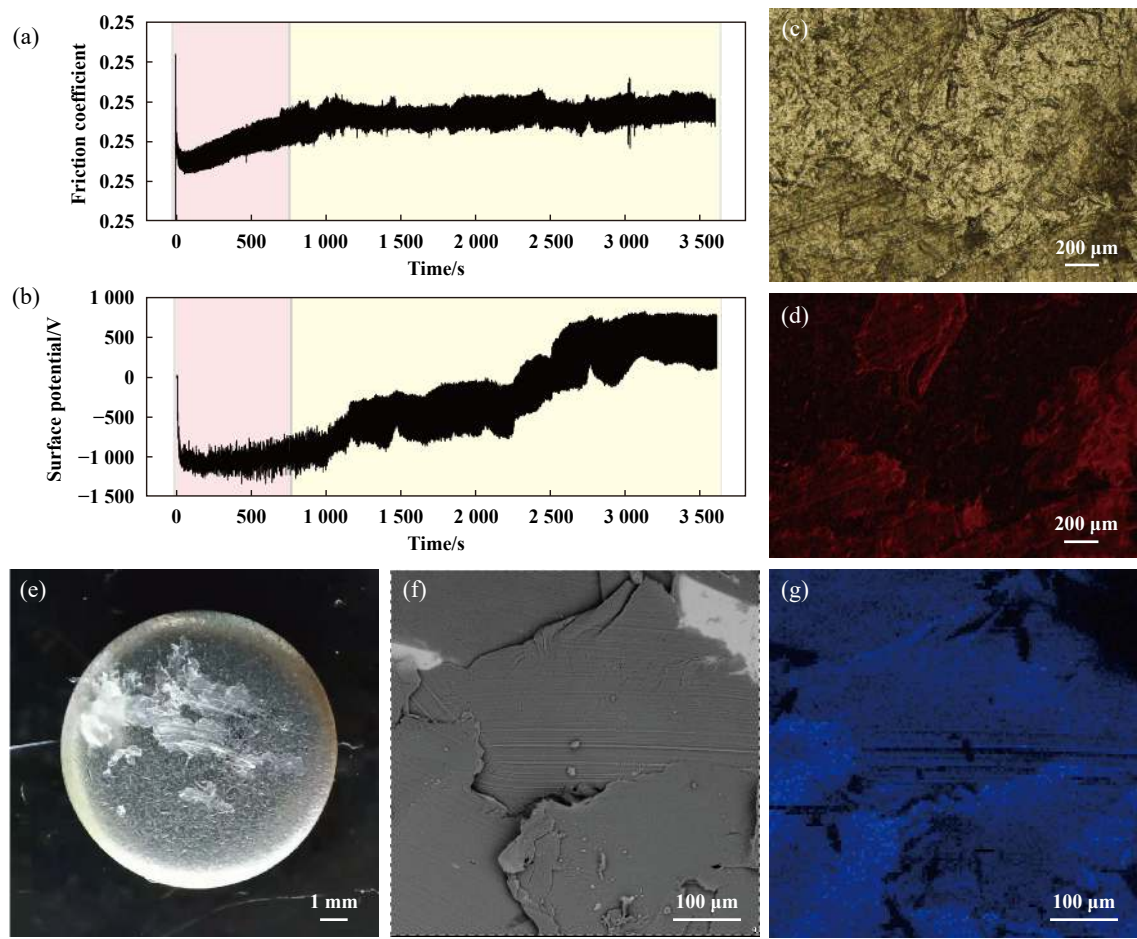


Fig. 7 (a) Friction coefficient and (b) surface potential of PTFE during friction between steel sheet and PTFE; (c) Optical photograph of the transferred PTFE film on steel sheet surface; (d) Optical photograph of transferred PTFE film taken in filter mode; (e) The overall picture of the transferred PTFE on the steel friction pair; (f) The partial SEM image of the transferred PTFE; (g) The corresponding F element distribution image. The load used is 5 N and the sliding speed is 3.32 cm/s

图 7 钢片-PTFE摩擦时的(a)摩擦系数和(b)PTFE的表面电势;(c)钢片表面转移的PTFE的光学照片;(d)滤光模式下拍摄的转移的PTFE的光学照片;(e)PTFE转移的钢片摩擦副的光学图像;(f)转移的PTFE局部SEM图像;(g)对应的F元素分布的图像.所使用的载荷为5 N, 转速为3.32 cm/s

表 1 载荷、接触面积、接触面积与载荷的比值的对比

Table 1 Comparison of load, contact area, ratio of contact area to load

Load/N	Area/(10 ⁻⁸ m ²)	Ratio of contact area to load/(10 ⁻⁸ Pa ⁻¹)
1	7.64	7.64
2	12.12	6.06
3	22.32	4.46
4	30.54	3.82
5	35.44	3.54

向演化. 其次, PTFE在摩擦过程中产生的磨屑在钢-PTFE摩擦界面的夹角迅速地积累并且黏附在钢球表面, 也会减小PTFE表面电势开始反向变化的时间. 如图8(c)所示, 在不同载荷下, 通过在PTFE摩擦极性反演前所做摩擦功的对比可以得知, 摩擦功的大小与其反转时间没有表现出单调的变化对应趋势. 这是因为

虽然摩擦系数具有变小的趋势, 但是载荷的增大导致摩擦力增大, 所以在低载荷范围主要是反转时间导致的位移增大起到了主要贡献, 而在高载荷的范围内主要是摩擦的增大导致的摩擦功变大, 最终导致在5 N的载荷下使材料具有最低的摩擦功损耗.

另外, 摩擦速度的变化也会引起表面电势反演时间以及摩擦系数进入稳定阶段时间的改变. 如图9(a)所示, 在较低的0.89 cm/s的转速时, 摩擦系数约为0.07. 随着摩擦速度的增加, 摩擦系数表现出了逐渐变大的趋势, 在8.90 cm/s的转速时, 摩擦系数达到了0.15左右. 摩擦速度引起的钢-PTFE的摩擦系数增大可以归因于摩擦界面的温度上升^[44]. 另一方面, 图9(b)展示了高的摩擦速度会导致PTFE表面更快地从初始的带负电的表面反向演化. 在较低的0.89 cm/s的速度

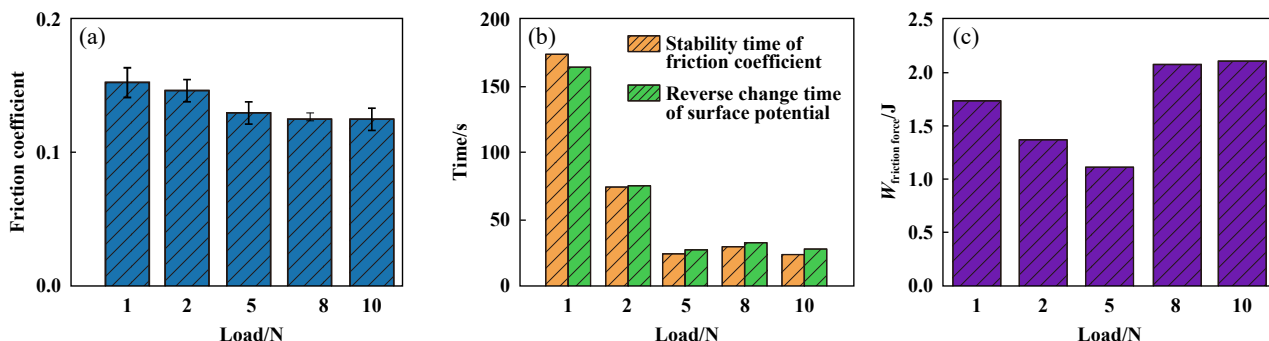


Fig. 8 Effect of load on the reverse evolution of PTFE surface potential: (a) Effect of load on the friction coefficient; (b) Comparison of the time when the surface potential starts to evolve in the reverse direction and the time when the friction coefficient starts to stabilize at different loads; (c) Comparison of the work done by friction force before the surface potential starts to invert at different loads

图8 载荷对PTFE表面电势反向演化的影响: (a)载荷对摩擦系数的影响; (b)在不同的载荷下表面电势开始反向演化以及摩擦系数开始稳定的时间; (c)不同载荷下在表面电势开始反演前摩擦力做功的对比

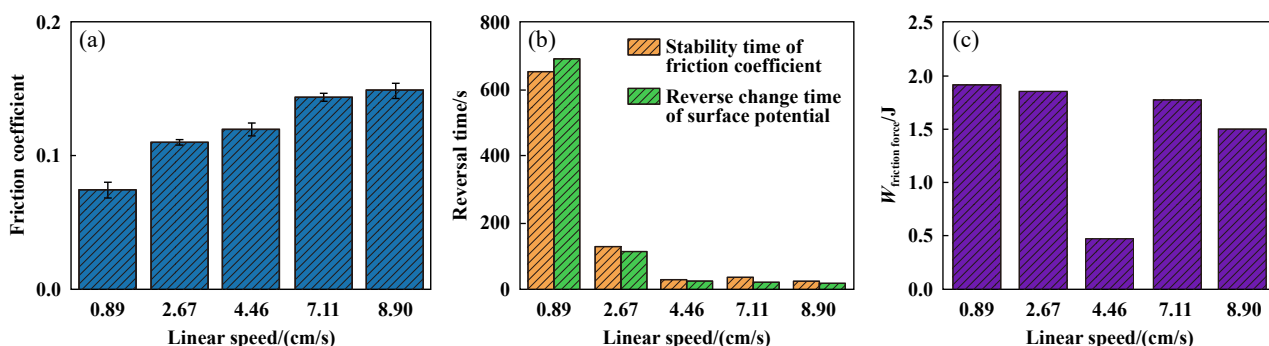


Fig. 9 Effect of friction speed on the reverse evolution of PTFE surface potential: (a) Influence of the sliding speed on friction coefficient; (b) Comparison of the time when the surface potential starts to evolve in the reverse direction and the time when the friction coefficient starts to stabilize at different sliding speeds. (c) Comparison of the work done by friction force before the surface potential starts to invert at different sliding speeds

图9 摩擦速度对PTFE表面电势反向演化的影响: (a) 滑动速度对摩擦系数的影响; (b)在不同滑动速度下的表面电势开始反向演化以及摩擦系数开始稳定时间的对比; (c)不同滑动速度下在表面电势开始反演前摩擦力做功的对比

下, 表面电势开始反向变化的时间以及摩擦系数开始稳定的时间约为650 s, 而随着速度的增加, 二者逐渐变小直至达到稳定. 这可能是因为较高的速度下, PTFE表面的电荷更快地趋向于饱和状态并且使表层材料更迅速地发生剥离并向钢球发生了转移. 如图9(c)所示, 根据在不同速度下所做的摩擦功来看, 摩擦功与反转时间没有出现单调递增或递减的趋势, 这是因为速度的增大一方面会导致摩擦力的增大, 另一方面反转时间内位移的变化并非单调性变化的, 在速度为4.46 cm/s时出现了最小的摩擦做功情况.

总之, 钢-PTFE之间的摩擦起电受到多种因素的影响, 其摩擦起电过程中界面的电子转移受到摩擦方式的重要影响, 并且摩擦电信号的波动与摩擦系数的波动存在内在的联系. 不同载荷以及摩擦速度的变化趋势证明了PTFE表面电势反向演化的时间点与摩擦

系数进入稳定阶段时间点具有良好的对应性. 因此, 利用摩擦起电电势开始反向演化的时间作为检测钢-PTFE摩擦进入稳定阶段的标志, 对于未来智能监测摩擦副的跑合期长短具有潜在的应用价值, 同时在摩擦过程中原位收集多种形式的信号数据也有助于更深入理解界面摩擦及摩擦起电的本质.

3 结论

a. 钢-PTFE摩擦过程中, 实现了摩擦系数、钢球的接地电流和PTFE的表面电势的同步收集, 且发现三种信号的波动幅值存在正相关性. 钢球的接地电流由于受到电子转移以及电荷感应/电子回注的影响表现出双极性的电流峰形, 这与磨痕区域内难以耗散的静电相关.

b. 在钢-PTFE摩擦过程中PTFE的表面电势发生

反向演化, 这主要归因于PTFE在钢球表面发生的黏附、镶嵌和挤压等行为使其在摩擦接触区域发生了材料转移, 使得PTFE表面电势在达到最大值后表现反向演化的趋势, 且该时间点与摩擦系数进入稳定阶段时间点基本保持一致, 这对实现机械运动过程中的摩擦副运动原位监测和故障预警具有重要价值。

参考文献

- [1] Nakayama K. Tribocharging and friction in insulators in ambient air[J]. *Wear*, 1996, 194(1-2): 185–189. doi: [10.1016/0043-1648\(95\)06840-6](#).
- [2] Chang Y P, Chou H M, Chu L M. Surface voltages of tribo-electrification during dry friction process for the typical four polymer pairs[C]. 2016 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), May 26-30, 2016, Okinawa, Japan. 2016, 1-4. doi: [10.1109/ICASI.2016.7539760](#).
- [3] Burgo T A, Silva C A, Balestrin L B, et al. Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2384. doi: [10.1038/srep02384](#).
- [4] Sayfidinov K, Cezan S D, Baytekin B, et al. Minimizing friction, wear, and energy losses by eliminating contact charging[J]. *Science Advances*, 2018, 4(11): eaau3808. doi: [10.1126/sciadv.aau3808](#).
- [5] Xu C, Wang A C, Zou H Y, et al. Raising the working temperature of a triboelectric nanogenerator by quenching down electron thermionic emission in contact-electrification[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(38): 1803968. doi: [10.1002/adma.201803968](#).
- [6] Xu C, Zi Y L, Wang A C, et al. On the electron-transfer mechanism in the contact-electrification effect[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): 1706790. doi: [10.1002/adma.201706790](#).
- [7] Lin Zonghong, Cheng Gang, Lin Long, et al. Water-solid surface contact electrification and its use for harvesting liquid-wave energy[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(48): 12545–12549. doi: [10.1002/anie.201307249](#).
- [8] Sosa M D, Ricci M L M, Missoni L L, et al. Liquid-polymer triboelectricity: chemical mechanisms in the contact electrification process[J]. *Soft Matter*, 2020, 16(30): 7040–7051. doi: [10.1039/d0sm00738b](#).
- [9] Zhang Liqiang, Li Xiaojuan, Zhang Yunlei, et al. Regulation and influence factors of triboelectricity at the solid-liquid interface[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105370. doi: [10.1016/j.nanoen.2020.105370](#).
- [10] Wang Z L, Wang A C. On the origin of contact-electrification[J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34–51. doi: [10.1016/j.mattod.2019.05.016](#).
- [11] Lin Shiquan, Xu Liang, Wang A C, et al. Quantifying electron-transfer in liquid-solid contact electrification and the formation of electric double-layer[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 399. doi: [10.1038/s41467-019-14278-9](#).
- [12] Baytekin H T, Baytekin B, Incorvati J T, et al. Material transfer and polarity reversal in contact charging[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(20): 4843–4847. doi: [10.1002/anie.201200057](#).
- [13] Burgo T A L, Erdemir A. Bipolar tribocharging signal during friction force fluctuations at metal-insulator interfaces[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(45): 12101–12105. doi: [10.1002/anie.201406541](#).
- [14] Lowell J. The role of material transfer in contact electrification[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1977, 10(17): L233–L235. doi: [10.1088/0022-3727/10/17/001](#).
- [15] Salaneck W R, Paton A, Clark D T. Double mass transfer during polymer-polymer contacts[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(1): 144–147. doi: [10.1063/1.322306](#).
- [16] Williams M W. Triboelectric charging in metal-polymer contacts-How to distinguish between electron and material transfer mechanisms[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(1): 53–54. doi: [10.1016/j.elstat.2012.11.006](#).
- [17] Zheng Youbin, Ma Shaochen, Feng Yange, et al. Investigation on the interface control and utilization of triboelectrification[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2018, 48(12): 1514–1530 (in Chinese) [郑有斌, 马韶晨, 冯雁歌, 等. 摩擦起电的界面调控与应用研究[J]. *中国科学: 化学*, 2018, 48(12): 1514–1530]. doi: [10.1360/N032018-00200](#).
- [18] Haeberle J, Schella A, Sperl M, et al. Double origin of stochastic granular tribocharging[J]. *Soft Matter*, 2018, 14(24): 4987–4995. doi: [10.1039/c8sm00603b](#).
- [19] Li Shuyao, Nie Jinhui, Shi Yuxiang, et al. Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(25): 2001307. doi: [10.1002/adma.202001307](#).
- [20] Lin Shiquan, Zheng Mingli, Luo Jianjun, et al. Effects of surface functional groups on electron transfer at liquid-solid interfacial contact electrification[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10733–10741. doi: [10.1021/acsnano.0c06075](#).
- [21] Komatsu T S, Hashimoto M, Miura T, et al. Static electrification by asymmetric rubbing[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 235(1-2): 60–64. doi: [10.1016/j.apsusc.2004.05.133](#).
- [22] Pan Shuaihang, Zhang Zhinan. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: a review[J]. *Friction*, 2019, 7(1): 2–17. doi: [10.1007/s40544-018-0217-7](#).
- [23] Feng Yange, Zheng Youbin, Zhang Ga, et al. A new protocol toward high output TENG with polyimide as charge storage layer[J]. *Nano Energy*, 2017, 38: 467–476. doi: [10.1016/j.nanoen.2017.06.017](#).
- [24] Qin Hongling, Fu Yang, Yu Ye, et al. Tribological performance of carbon brush/collector ring for hydroelectric generator under dry sliding condition with current-carrying and without current-carrying[J]. *Tribology*, 2019, 39(6): 713–722 (in Chinese) [秦红玲, 付阳, 喻叶, 等. 水轮发电机碳刷/集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(6): 713–722]. doi: [10.16078/j.tribology.2019114](#).

- [25] Yin Nian, Zhang Zhinan, Zhang Junyan. Molecular dynamics simulation of friction and wear behaviors of Au coating for conductive slip ring[J]. Tribology, 2018, 38(1): 108–114 (in Chinese) [尹念, 张执南, 张俊彦. 导电滑环Au涂层摩擦磨损行为的分子动力学模拟[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 108–114]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.01.014](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.014).
- [26] Ding Qi, Tang Jinzhu, Zhang Songwei, et al. The tribological behavior of PAO lubricated DLC contacts under DC electric field[J]. Tribology, 2017, 37(6): 707–716 (in Chinese) [丁奇, 汤金柱, 张松伟, 等. 外加直流电场对DLC/PAO固液复合润滑体系摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 707–716]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.001](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.001).
- [27] Xie Bohua, Ju Pengfei, Ji Li, et al. Research progress on tribology of electrical contact materials[J]. Tribology, 2019, 39(5): 656–668 (in Chinese) [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]. doi: [10.16078/j.tribology.2019025](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019025).
- [28] Xu C, Zhang B, Wang A C, et al. Contact-electrification between two identical materials: curvature effect[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 2034–2041. doi: [10.1021/acsnano.8b08533](https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08533).
- [29] Wang A E, Gil P S, Holonga M, et al. Dependence of triboelectric charging behavior on material microstructure[J]. Physical Review Materials, 2017, 1(3): 035605. doi: [10.1103/physrevmaterials.1.035605](https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.1.035605).
- [30] Sow M, Widenor R, Kumar A, et al. Strain-induced reversal of charge transfer in contact electrification[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2012, 51(11): 2695–2697. doi: [10.1002/anie.201107256](https://doi.org/10.1002/anie.201107256).
- [31] Shaw P E. The electrical charges from like solids[J]. Nature, 1926, 118(2975): 659–660. doi: [10.1038/118659c0](https://doi.org/10.1038/118659c0).
- [32] Jacobs T D, Carpick R W. Nanoscale wear as a stress-assisted chemical reaction[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(2): 108–112. doi: [10.1038/nnano.2012.255](https://doi.org/10.1038/nnano.2012.255).
- [33] Kang Rongyu, Chen Xiaoyang, Liu Xu, et al. Simulation experiment study on irregular oil film noise characteristics of engine main bearings[J]. Tribology, 2020, 40(4): 434–441 (in Chinese) [亢荣玉, 陈晓阳, 刘旭, 等. 基于发动机主轴承异常油膜噪声特征的模拟试验研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(4): 434–441]. doi: [10.16078/j.tribology.2019233](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019233).
- [34] Zhang Bo, Wang Jianhua. Effect of the temperature based on capacitance method on the oil-water separation performance of ship turbine oil[J]. Tribology, 2021, 41(1): 137–148 (in Chinese) [张博, 王建华. 基于电容法的温度对舰船汽轮机油分水性能影响研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 137–148]. doi: [10.16078/j.tribology.2020034](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020034).
- [35] Puhon D, Wong J S S. Properties of Polyetheretherketone (PEEK) transferred materials in a PEEK-steel contact[J]. Tribology International, 2019, 135: 189–199. doi: [10.1016/j.triboint.2019.02.028](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.028).
- [36] Zeghloul T, Neaogoe M B, Prawatya Y E, et al. Triboelectrical charge generated by frictional sliding contact between polymeric materials[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 174: 012002. doi: [10.1088/1757-899x/174/1/012002](https://doi.org/10.1088/1757-899x/174/1/012002).
- [37] Musa U G, Cezan S D, Baytekin B, et al. The charging events in contact-separation electrification[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2472. doi: [10.1038/s41598-018-20413-1](https://doi.org/10.1038/s41598-018-20413-1).
- [38] Puhon D, Nevshupa R, Wong J S S, et al. Transient aspects of plasma luminescence induced by triboelectrification of polymers[J]. Tribology International, 2019, 130: 366–377. doi: [10.1016/j.triboint.2018.09.026](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.026).
- [39] Jiang Zeqi, Fang Jianhua, Chen Fei, et al. Research progress on tribo-electrophysical and tribo-electrochemical mechanisms[J]. Tribology, 2017, 37(5): 695–706 (in Chinese) [江泽琦, 方建华, 陈飞, 等. 摩擦电物理和摩擦电化学机理的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 695–706]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.018](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.018).
- [40] Huang Shuiquan, Li Zhongya, Yao Weiqiang, et al. Tribological performance of charged vegetable lubricants[J]. Tribology, 2014, 34(4): 371–378 (in Chinese) [黄水泉, 李中亚, 姚伟强, 等. 荷电植物油润滑的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 371–378]. doi: [10.16078/j.tribology.2014.04.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2014.04.002).
- [41] Qiu Wenzheng, Feng Yang, Luo Ning, et al. Sandwich-like sound-driven triboelectric nanogenerator for energy harvesting and electrochromic based on Cu foam[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104543. doi: [10.1016/j.nanoen.2020.104543](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104543).
- [42] Li Xiaojuan, Zhang Liqiang, Feng Yang, et al. Solid-liquid triboelectrification control and antistatic materials design based on interface wettability control[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(35): 1903587. doi: [10.1002/adfm.201903587](https://doi.org/10.1002/adfm.201903587).
- [43] Xue Qunji, Wang Liping. Diamond-like carbon-based film material[M]. Beijing: Science Press, 2012: 276–277 (in Chinese) [薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 276–277].
- [44] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 241–242 (in Chinese) [温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 241–242].