

摩擦磨损与润滑

电流负载对滑动电接触系统摩擦学行为的影响

李发强¹, 王东伟², 巫英伟¹, 陈晓², 陈泽生², 杨睿²(1.西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
2.中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213)

摘要: **目的** 探讨电流对滑动电接触摩擦学行为特性的影响, 厘清电流负载与滑动电接触摩擦学行为之间的关系。**方法** 采用黄铜材料为对摩副, 在自行设计的摩擦滑动电接触试验机上进行球-面电接触摩擦学试验。分别输入 0.2、1、2 A 的直流负载, 采集界面的摩擦因数、摩擦力、接触电压信号, 并分别使用光学显微镜和扫描电镜等设备观察界面的摩擦磨损特性。利用 ABAQUS 中的热-电-力多场顺序耦合算法模拟试验过程, 分析界面电压、温度和切应力的变化特性。**结果** 当电流从 0.2 A 增至 1 A 时, 界面的摩擦因数在稳定阶段均为 0.5 左右, 同时摩擦力信号也未出现显著差异。当电流负载进一步增至 2 A 时, 摩擦因数增至 0.7, 摩擦力也显著增大。当电流负载从 0.2 A 增至 2 A 时, 接触电压从 0.1 V 增至 0.75 V, 接触电压的增大倍数与电流的增大倍数不同。磨损分析结果表明, 当电流增至 2 A 时, 界面磨损程度加剧, 同时导致磨屑堆积, 形成局部“摩擦凸台”, 且“摩擦凸台”的数量显著增多, 直接导致界面黏着区域增大。有限元分析结果表明, 当电流增至 2 A 时, 界面温度上升明显, 热效应显著, 因此剪切力明显增大。**结论** 界面的接触电阻包括收缩电阻和薄膜电阻, 在摩擦过程中它们随磨损程度发生变化, 因此接触电压不随电流的增大而等比例增大。当电流增至一定程度时对界面的摩擦学行为具有负作用, 这是由于电流负载的增加导致界面温升显著, 摩擦切应力增大, 黏着效应增强, 从而加剧了界面的摩擦磨损程度。此研究结果为认识电流负载与滑动电接触摩擦学行为之间的关系提供了理论依据。

关键词: 电接触; 滑动; 摩擦磨损; 表面分析; 试验测试; 有限元分析

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)08-0142-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.08.009

Effect of Current Load on Tribological Behavior of Sliding Electrical Contact System

LI Fa-qiang¹, WANG Dong-wei², WU Ying-wei¹, CHEN Xiao², CHEN Ze-sheng², YANG Rui²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

收稿日期: 2022-07-21; 修订日期: 2022-11-02

Received: 2022-07-21; Revised: 2022-11-02

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)

作者简介: 李发强 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机械摩擦学。

Biography: LI Fa-qiang (1987-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: tribology.

通讯作者: 王东伟 (1988—), 男, 博士。

Corresponding author: WANG Dong-wei (1988-), Male, Doctor.

引文格式: 李发强, 王东伟, 巫英伟, 等. 电流负载对滑动电接触系统摩擦学行为的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 142-150.

LI Fa-qiang, WANG Dong-wei, WU Ying-wei, et al. Effect of Current Load on Tribological Behavior of Sliding Electrical Contact System[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 142-150.

ABSTRACT: To study the effect of current load on the tribological behavior of sliding electrical contact system, and further clarify the relationship between current load and tribological behavior of sliding electrical contact system, a series of tribological tests were carried out on a self-designed friction sliding electrical contact tester. Brass material was used as the rubbing pair, and a ball-on-flat configuration was designed to perform the tests. The brass flat sample with the size of 25 mm×25 mm×4 mm was ground and polished to surface roughness $Ra \approx 0.04 \mu\text{m}$. H62 solid brass ball with diameter of 4 mm was selected as the ball sample. During the test process, the DC current loads of 0.2 A, 1 A and 2 A were input to the contact system respectively, then the friction coefficient, friction force and contact voltage signals from the interface were detected and analyzed, and the friction and wear characteristics of the contact surface after test were observed. In addition, the variation characteristics of interface voltage, temperature and shear stress were further analyzed by simulating the test process with thermal-electric-mechanical multi-field coupling algorithm, which was carried out in the finite element analysis software ABAQUS. The test results indicated that when the current increased from 0.2 A to 1 A, there was no significant difference between the friction coefficient and the friction force at the stable stage, and the friction coefficient was kept at 0.5 in the steady stage. When the current load further increased to 2 A, the friction coefficient and friction force increased significantly, the friction coefficient was observed to increase to 0.7. As the current load increased from 0.2 A to 2 A, the contact voltage drop increased gradually from 0.1 V to 0.75 V. It is worth noting that although the current increases by a factor of 10, the contact voltage does not scale up, because the contact resistance of the interface changes with the wear process during triboelectric contact. Therefore, a larger current load causes a higher contact voltage, but the contact voltage does not increase proportionally with the increase of current, because the contact resistance of the interface includes shrinkage resistance and thin film resistance. The wear analysis is performed by optical microscopy and scanning electron microscopy, the corresponding results show that when the current load increases from 0.2 A to 2 A, the degree of interface wear intensifies and the number of wear spots increases significantly, which directly leads to the increase of interface adhesion area, so the friction coefficient and friction force increase significantly. The finite element analysis results further show that when the current increases to 2 A, the interface temperature rises visibly and the thermal effect is significant, so the shear force becomes larger, which further confirms that the wear degree of the interface is aggravated in this state. The results of finite element analysis can well reflect the experimental phenomenon. The results of this study provide a theoretical basis for understanding the relationship between current load and the tribological behavior of sliding electrical contact.

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

随着滑动电子连接器在石油勘探、医疗器械及轨道交通领域中的广泛应用, 电接触系统的稳定性已成为设备可靠运行的关键^[1-3]。在滑动电接触过程中, 由于接触界面存在热-电-力多场耦合作用, 因此界面存在电流磨损和机械磨损的复合行为^[4-6]。鉴于电接触界面的磨损行为较复杂, 其失效机理不明确, 电接触的相关问题已在学术界和工业领域引起了广泛关注。

考虑到磨损是导致滑动电连接系统劣化和失效的主要因素之一, 因此研究者对可能影响界面磨损行为的关键因素展开了大量研究^[7-15]。Poljanec 等^[7]研究表明, 滑动电接触系统的摩擦因数和接触电阻随着载荷的增大而减小, 适当增大接触载荷对滑动电接触的稳定性 and 可靠性具有积极作用。同时, 这不可避免地会增大界面磨损, 因此载荷的选择对电接触系统稳定性的意义重大。Zhao 等^[8]通过对 Cu-Ti₃AlC₂ 复合材料与 Cu-5%Ag 合金进行滑动电接触试验后发现, 摩擦副存在一个最优的滑动速度, 使得界面的磨损性能最佳。孟令通等^[9]研究了真空条件下滑动速度对

Ag-Cu-MoS₂ 复合材料载流磨损性能的影响, 发现随着滑动速度的增加, 接触电阻会发生大范围波动, 进一步加剧了材料的磨损。Ma 等^[10]研究发现, 铜-石墨复合材料的摩擦因数和磨损率在很大程度上取决于其滑动速度, 当滑动速度超过临界值 (0.5 m/s) 时, 摩擦磨损状态会发生一定转变。这是由于接触表面以下的变形区具有较大的应变梯度, 当速度低于临界值时, 容易在滑动面上形成富含石墨的润滑层。在超过临界速度时, 会出现高应变率的分层磨损, 很难在接触面上形成润滑层, 导致磨损率增大。

以上研究结果表明, 滑动速度和法向载荷均是影响电接触系统稳定性的主要因素。目前关于电流负载影响滑动电接触系统界面摩擦学行为的研究较少。Braunovic 等^[16]研究了电流负载对电接触系统微动行为的影响, 结果表明, 较高的电流有助于延缓界面失效, 使得电阻的波动幅度下降。Sun 等^[17]揭示了电流密度在导电薄膜中的重要作用, 以及它对界面摩擦学行为的影响。结果表明, 随着电流的增大, 摩擦因数逐渐下降, 界面磨合周期逐渐缩短。此外, 载流摩擦

行为由石墨烯纳米片在滑动界面处的尺寸控制,滑动界面处的尺寸则与电流密度相关。Ren 等^[18]研究发现,随着电流的增加,氧化碎屑的分解和焦耳热加速了磨斑的积累,因此增加电流负载可能会加速电触点的退化。Poljanec 等^[7]的研究结果表明,电流密度对接触界面是否一定会产生负效应取决于摩擦副的材料参数。以上研究虽然对认识电流负载和电接触行为之间的关系意义重大,但是这类研究通常集中在微动领域,即摩擦副之间的相对位移较小。考虑到微动摩擦与滑动摩擦之间存在本质区别,目前关于电流负载与滑动电接触之间关系的研究较少,因此有必要研究电流负载对滑动电接触摩擦学行为的影响。

这里在自行设计的摩擦滑动电接触试验机上进行球-面往复摩擦学试验,通过改变电流负载,探讨电流对滑动电接触摩擦学行为特性的影响。结合有限元分析技术,利用热-电-力多场耦合算法模拟试验过程,解释试验现象,拟为厘清电流负载与滑动电接触摩擦学行为之间的关系提供理论依据。

1 实验

1.1 样品

黄铜材料是一种常见的电接触材料,具有良好的力学强度、耐蚀性、电阻和热电性等特点。这里选择平面试样尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的黄铜板材,经研磨和抛光,试样的表面粗糙度 $Ra \approx 0.04\text{ }\mu\text{m}$ 。球试样选用直径为 4 mm 的 H62 实心黄铜球。平面试样的表面形貌如图 1 所示。

1.2 试验设备

滑动电接触试验在球-面往复滑动式摩擦学试验装置上进行,该装置主要由电接触系统、动力系统、对摩副系统和夹具系统组成,如图 2 所示。在试验开始时,球夹具带动球试样缓慢向下移动,使球试样在

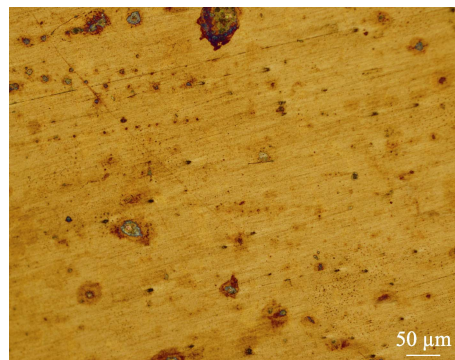
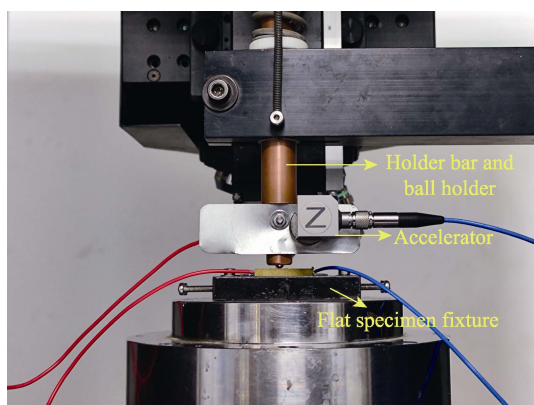


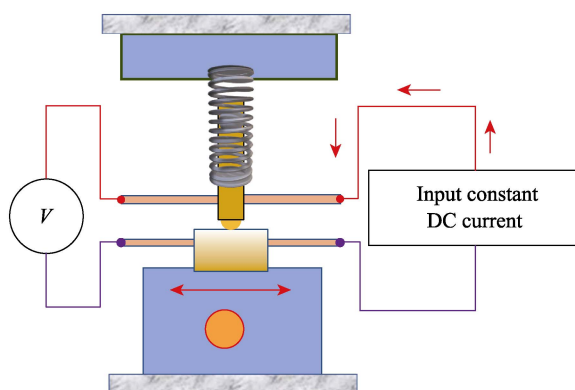
图 1 黄铜表面光镜形貌
Fig.1 Optical image of brass surface

恒定的法向载荷作用下与平面试样接触。将平面试样固定安装在设备底部托架上,托架在驱动装置的作用下,带动平面试样进行往复摩擦运动。利用直流电源设备为对摩副施加恒定的电流,采用“四线法”测量接触电压和电阻的变化。在设备上安装应变传感器和压电动态传感器,用于采集接触界面之间的法向力和切向力。安装在接触界面附近的热电偶用于监测接触界面的温度变化。该设备实现了对滑动电接触过程中接触力、电压信号、温度信号等的同步采集和分析。

开始试验前,在超声波清洗机中,分别使用酒精和蒸馏水对球试样和平面试样进行脱脂清洗,并经干燥后将样品安装在摩擦试验台上。试验工况及参数:摩擦系统进行球-面往复摩擦运动,法向载荷 $F_n=15\text{ N}$,往复位移幅值 $D=3\text{ mm}$,往复周期 $T=3\text{ s}$,滑动电接触时间为 $1\text{ }800\text{ s}$ 。设置输入电流分别为 0.2 A 、 1 A 、 2 A ,进行相应的摩擦学试验。在不同电流负载下,采集摩擦过程中界面的磨损及电接触信号,并用于对比分析。试验环境条件为大气下干态,温度为 $24\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(60\pm 10)\%$ 。考虑到摩擦学试验具有一定的随机性,因此每组试验重复进行 3 次,以保证结果的可靠性。



a 试验装置



b “四线法”测量电压和电流

图 2 试验装置及“四线法”示意图

Fig.2 Schematic diagram of the test setup and four-wire method: a) test setup; b) "four-wire method" used to measure the voltage and current

2 结果及分析

2.1 摩擦因数

摩擦系统在不同电流负载状态下的界面摩擦因数变化情况如图 3a 所示, 当电流负载为 0.2 A 时, 在试验初始阶段摩擦因数很低, 不足 0.2。经过 100 s 的往复运动后, 随着表面污染物和天然氧化层的去除, 摩擦因数迅速增大, 最终为 0.5 左右。当电流负载增至 1 A 时, 摩擦因数在前 600 s 内的变化情况与在 0.2 A 电流负载下的情况非常类似, 但是在 600~1 400 s 内时, 摩擦因数有所下降, 低于 0.2 A 电流负载下相同时段内的摩擦因数, 随着摩擦过程的进行, 摩擦因数有所上升, 最终为 0.5 左右。相比之下, 当电流负载进一步增至 2 A 时, 可见摩擦因数显著变大, 并且在滑动摩擦过程中始终处于上升状态, 在摩擦过程中的最大摩擦因数为 0.7 左右。经多次重复试验后, 摩擦因数的平均值和标准差特征如图 3b 所示, 当电流为 2 A 时, 界面的平均摩擦因数显著高于电流为 0.2 A 和 1 A 时的摩擦因数。综合来看, 随着电流负载的增大, 在一定范围内将会增加界面的摩擦因数。这种负面影响也在其他电接触材料的研究中被注意到^[8,19-20]。产生该现象的原因是, 在低电流作用下 (0.2 A), 磨损表面形成了一层致密的“第三体层”, 在摩擦过程中起到了界面固体润滑的效果; 当输入电流增至 1 A 时, 在界面摩擦热和电流热的共同作用下“第三体”层被软化并压实, 逐渐产生了润滑作用, 因此其摩擦因数出现轻微下降; 当电流负载增大到一定程度后, 在焦耳热、摩擦热、电弧热的共同作用下, 磨损表面温度升高, 这不仅破坏了润滑膜的完整性, 且软化了接触表面材料, 加剧了界面的黏着作用^[21-24]。由此可见, 在 2 A 电流负载作用下, 摩擦界面的摩擦因数明显增大。

2.2 摩擦力结果分析

在不同电流负载下, 对界面的摩擦力变化情况进行了分析。将摩擦过程分为 3 个阶段, 即初始阶段 (85~100 s)、中间阶段 (1 000~1 014 s) 和末期 (1 485~1 500 s)。初始阶段, 在不同电流负载作用下界面摩擦力并无明显区别。这是由于在初始阶段对摩副之间存在天然氧化层, 天然氧化层之间的摩擦并不会因电流负载的不同而存在明显差异 (图 4a)。当试验进行到中间阶段时, 对摩副之间处于基体材料的直接接触状态, 界面磨损行为加剧, 尤其是在电流负载为 2 A 时界面摩擦力明显大于其他电流负载状态。同时可以看出, 在电流为 1 A 下界面的摩擦力略小于 0.2 A 下的作用力。该现象正好对应图 3 中的结果, 即在该阶段, 1 A 电流负载下的摩擦因数小于 0.2 A 电流负载下的摩擦因数。推测该现象的原因是, 在该时间段内, 电流并未体现负作用, 而是软化了第三体层, 形成了润滑加强的效果。当摩擦过程进入末期, 在多种热效应的共同作用下, 加剧了界面的黏着作用, 增加了接触面积, 从而增大了摩擦力, 因此摩擦力信号在 2 A 电流负载作用下明显大于其他电流状态。同时, 在 1 A 电流状态下的摩擦力也增至与 0.2 A 状态下一致。以上分析结果与摩擦因数的分析结果非常一致, 即当电流负载增至一定值时, 在增大界面摩擦因数的同时, 也增大了界面摩擦力。

2.3 电压变化结果分析

在不同电流负载下, 摩擦电接触系统的接触电压变化情况如图 5 所示, 这里将分析区间取为 200~1 800 s。这是由于在前 200 s 内, 接触电压处于逐渐上升状态, 未达到稳定阶段。当电流负载从 0.2 A 逐渐增至 2 A 时, 界面的接触电压逐渐增大, 从 0.1 V 逐渐增至 0.75 V。值得注意的是, 虽然电流增大了 10 倍, 但是接触电压并未等比例放大。这是由于在

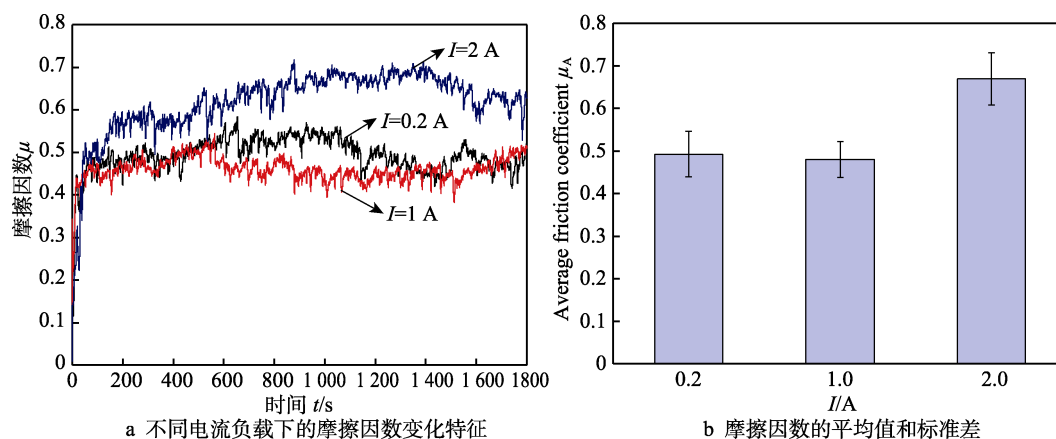


图 3 不同电流负载下的摩擦因数

Fig.3 Friction coefficient values under different electrical current loads: a) variation characteristics of friction coefficient under different current loads; b) mean and standard deviation of friction coefficients

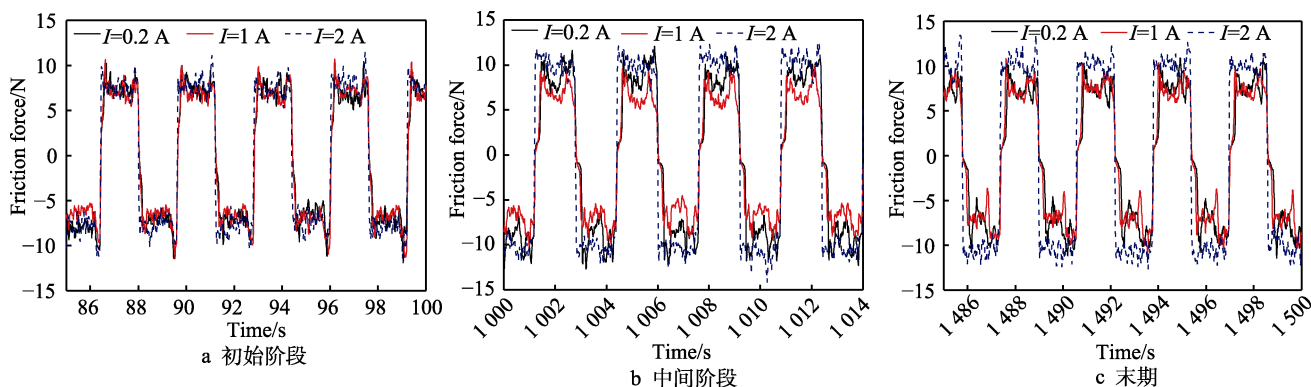


图4 不同电流负载下摩擦系统不同阶段的界面摩擦力

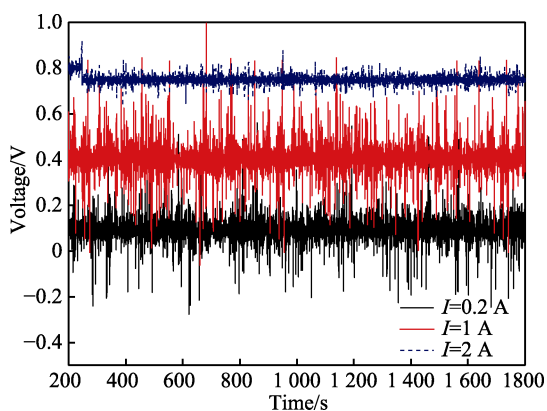
Fig.4 Friction force values of friction system at different stages under different current loads:
a) initial stage; b) middle stage; c) final stage

图5 不同电流负载下的接触电压

Fig.5 Contact voltage values under different electrical current loads

摩擦电接触过程中,界面的接触电阻随着磨损的进行发生了变化。由于电接触表面非完全光滑,只接触某些点。当电流流过这些点时,电流出现收缩,将会产生收缩电阻^[25],故界面的接触电阻包括收缩电阻和薄膜电阻2个部分,它随着电流的变化未等比例改变,因此界面的接触电压也不会随着电流的增大而等比例放大。

2.4 磨损形貌分析

在不同电流负载下,黄铜平面试样表面的磨损光镜图如图6所示。可以看出,不同电流作用下的界面磨损程度均较严重,界面中存在大量黑色磨屑堆积现象。这是由于在机械和电流共同作用下,磨屑受到较强的氧化作用,并在对磨副的反复碾压下黏着在磨痕

区域内。此外,由于载荷(15 N)较大,部分脱落的磨损颗粒在滑动界面形成了严重的磨粒磨损,因此界面中存在明显的“深沟槽”现象。尤其是在电流负载2 A的作用下,界面的磨痕区域相较于1 A时明显增大。同时界面在机械磨损和载流磨损的共同作用下,界面中的黏着现象和氧化效应加剧,因此磨痕区域的颜色较深,磨痕的宽度和长度均增大。

为了进一步说明电流负载对电接触界面磨损行为的影响,采用扫描电镜观察了黄铜平面试样表面的磨损形貌,结果如图7所示。可以看出,当电流负载为0.2 A时,在球-面相对滑动方向上,试样表面出现了一定程度的划痕和深沟,表明接触界面存在犁沟行为。此外,在磨痕上观察到散落的大量磨屑颗粒,这些磨屑颗粒在滑动摩擦过程中随着对磨副的运动发生了不规则运动,因此无规律地散落在磨痕区域内。当电流负载为1 A时,在机械磨损和电流磨损的共同作用下,磨痕区域内出现了因黏着作用而形成的“磨斑”,同时磨损形成的“沟槽”逐渐加深,进一步验证了滑动摩擦电接触的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损,且电流的作用促进了磨屑颗粒的团聚和氧化,逐渐形成了“第三体层”,逐渐增大了黏着作用和摩擦区域。当电流进一步增至2 A时,可以看出,界面磨损所形成的犁沟效应加剧,沟槽深度变大,同时“磨斑”的数量显著增多,这直接导致界面黏着区域增大,摩擦因数和摩擦力同步增大,进一步解释了图3和图4的现象。以上分析结果与图6所示的光镜分析结果非常一致。

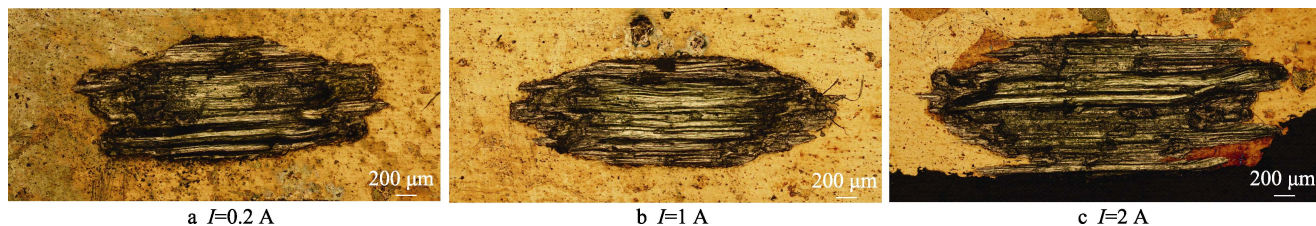


图6 不同电流负载下界面的磨损光镜图

Fig.6 Optical images of interface wear under different electrical current loads

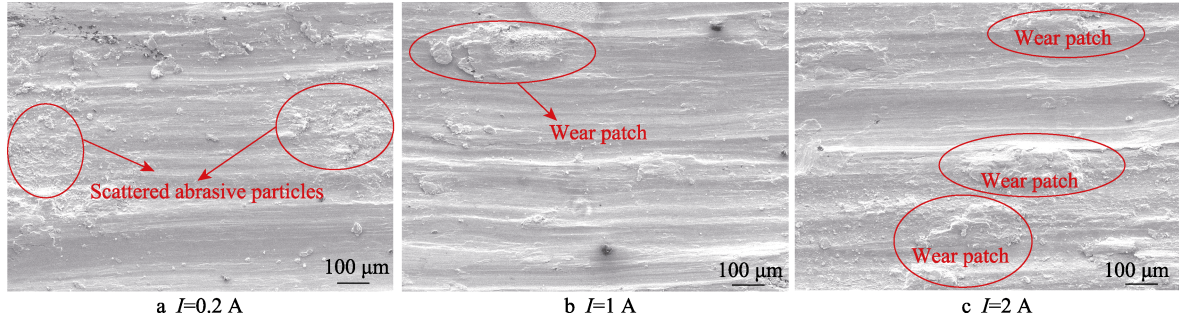


图 7 不同电流负载下界面的磨损电镜图

Fig.7 SEM images of interface wear under different electrical current loads

3 数值模拟分析与讨论

3.1 有限元模型与边界条件

为了进一步探索电流负载对电接触系统摩擦学行为的影响, 这里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 8a 所示。该模型主要由球夹具、球试样和平面试样组成。每个部件以黄铜材料的属性进行定义, 并采用 C3D8 及 C3D4 单元种类划分网格。设置接触方式为 Surface to Surface (Standard), 根据对摩擦副网格大小, 设置 Master surface (即主面) 为平面试样表面, Slave surface (即从面) 为对球试样表面。

根据试验情况定义模型的边界条件, 如图 8b 所示, 约束连杆顶部 x 方向与 z 方向的自由度, 将法向载荷沿 y 方向施加于连杆顶部; 约束滑动平台底面在 y 方向和 z 方向的自由度, 在滑动平台的 x 方向施加速度边界条件, 使得平面试样在该方向上完成往复滑动。定义恒定电流通过对摩擦副表面, 如图 8b 所示。设置环境温度为 25°C 。

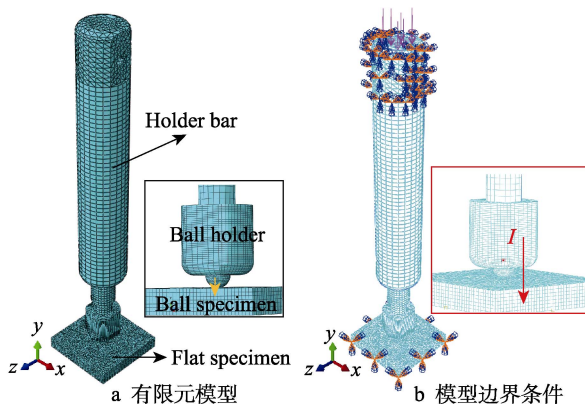


图 8 有限元模型与模型边界条件

Fig.8 Finite element model and model boundary conditions: a) finite element model; b) model boundary

3.2 热-电-力顺序耦合算法

利用 ABAQUS 中的电-热-机顺序耦合算法, 对不同电流下的界面摩擦接触行为进行模拟, 具体分析

流程如图 9 所示。首先采用电-热耦合算法, 向静止接触的对摩擦副中施加恒定电流, 提取摩擦系统的温度变化及各单元节点的热变形情况。在此基础上, 以电-热耦合算法获得的结果作为摩擦系统的初始状态, 即映射出摩擦系统在电流作用下的温度场和变形场, 并进行后续的热-力耦合计算。采用隐式动力学算法, 模拟摩擦副在带电接触状态下的摩擦学运动, 从而分析电接触过程中的电压信号和界面接触力等信号。

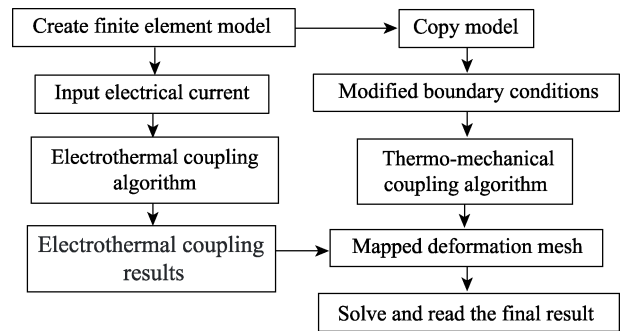


图 9 电-热-机顺序耦合计算流程

Fig.9 Flow chart of electro-thermal-mechanical sequential coupling calculation

Abaqus 隐式求解器 (Abaqus/Standard) 采用迭代法直接求解系统的动力学方程。在隐式积分过程中, 节点受到的内力 f 可以表达为节点受到的外力 F 与节点惯性力 ($\rho \ddot{u}$) 之差, 见式 (1)。

$$\{f\} = \{F\} - \rho \ddot{u} \quad (1)$$

式中: ρ 为节点密度; \ddot{u} 为节点加速度。

将式 (1) 用虚功表示, 见式 (2)。

$$\int_V f g \delta v dV = \int_V F g \delta v dV - \int_V \rho \ddot{u} g \delta v dV \quad (2)$$

当利用隐式求解器进行积分运算时, 在每个时间增量步 ($t + \Delta t$) 结束时建立系统的平衡方程, 通过时间积分求解器计算 \ddot{u} 。节点位移和速度的表达形式见式 (3) — (4)。

$$u|_{t+\Delta t} = u|_t + \Delta t \dot{u}|_t + \Delta t^2 \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}|_t + \beta \ddot{u}|_{t+\Delta t} \right) \quad (3)$$

$$\dot{u}|_{t+\Delta t} = \dot{u}|_t + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}|_t + \gamma \ddot{u}|_{t+\Delta t}] \quad (4)$$

式中: u 为节点位移; \dot{u} 为节点速度; $\beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2$;

$\gamma = \frac{1}{2} - \alpha$, 且 $-\frac{1}{2} \leq \alpha \leq 0$ 。

在隐式积分计算过程中,一般认为当最大增量步与振动周期的比值小于 1/10 时,即 $\Delta t/T < 1/10$,得到的结果较可靠,因此这里将最大增量步设置为 0.000 1 s。

3.3 结果分析与讨论

3.3.1 接触电压

在不同电流负载下,摩擦系统接触电压的稳态值如图 10 所示。可以看出,当输入电流为 0.2 A 时,接触电压 $U(E_{pot})$ 为 0.08 V;当输入电流增至 1 A 时,接触电压 $U(E_{pot})$ 为 0.4 V;当输入电流进一步增至 2 A 时,接触电压 $U(E_{pot})$ 增至 0.8 V。有限元分析结果与试验测试结果非常接近,如图 5 所示。由于该过程未考虑界面的磨损变化,无法体现界面电阻的变化特征,所以电压随电流的增大呈等比例放大。通过分析 0.2 A 状态下的结果可以发现,其计算结果与实测结果非常接近,证明了有限元模型的可靠性,同时验证了接触电压随着电流的增大而增大的结论。

3.3.2 接触温度分析

在不同电流负载下,摩擦系统的温度如图 11 所

示。可以看出,当电流为 0.2 A 时,界面温度上升为 25.07 °C;当电流增至 1 A 时,界面温度为 26.7 °C;当电流进一步增至 2 A 时,界面温度进一步增大,为 31.79 °C。随着电流的增大,接触界面温度呈现上升趋势,主要原因是界面产生的焦耳热与电流成正比。还可以看出,当电流从 0.2 A 增至 1 A 时,界面温度的变化并不大,可见热效应对界面之间的摩擦磨损行为的影响较小,2 种情况下的界面磨损特征趋于一致。当电流增至 2 A 时,温度上升显著,界面热效应所致的磨损行为加剧,因此呈现出图 3—4 及图 6—7 的现象和效果。

3.3.3 接触应力分析

通过提取摩擦电接触系统在滑动半个周期内的最大切应力进行分析,结果如图 12 所示。可以看出,当电流负载为 0.2、1 A 时,界面剪切应力未出现显著差异,可见在该区间范围内电流负载对切应力的影响较小,在 2 种状态下界面的摩擦磨损行为差异并不显著。当电流增至 2 A 时,界面的切应力显著增大,这是由于高电流产生的热效应显著,使得接触面积和切应力明显增大。相应地,界面的摩擦磨损特征也呈现出类似差异,如图 6—7 所示。由此可见,数值模拟分析结果能够较好地反映试验现象。

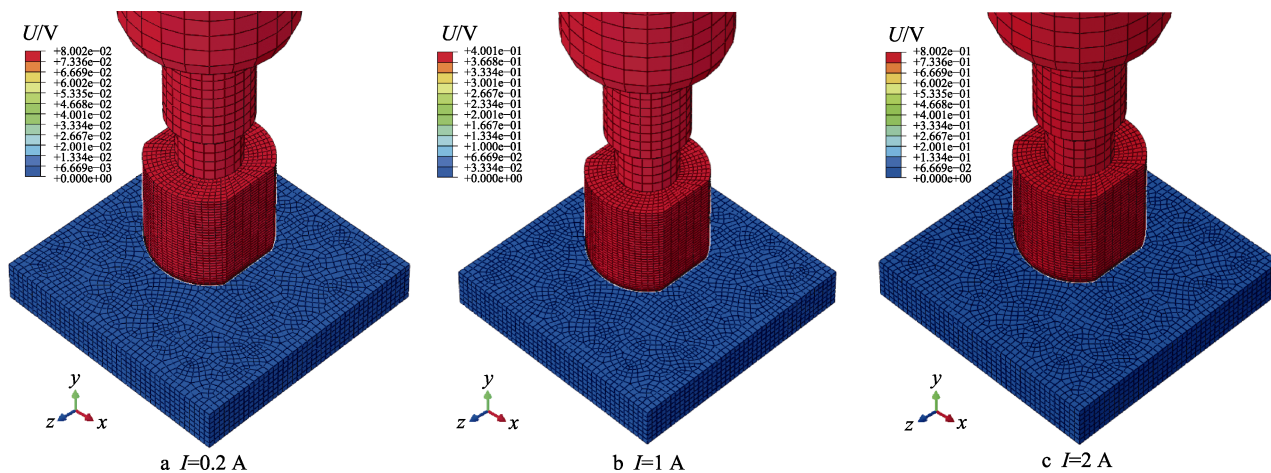


图 10 不同电流负载下摩擦系统的接触电压

Fig.10 Contact voltages of friction system under different current loads

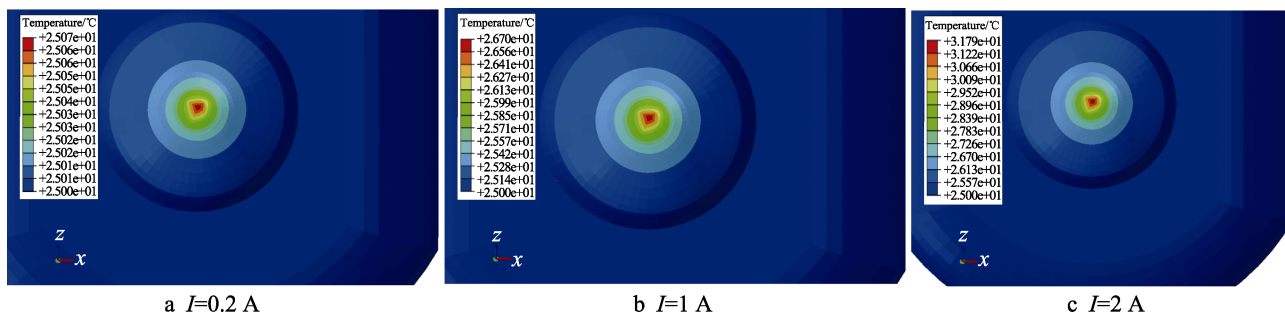


图 11 不同电流负载下摩擦系统的接触温度

Fig.11 Contact temperature of friction system under different current loads

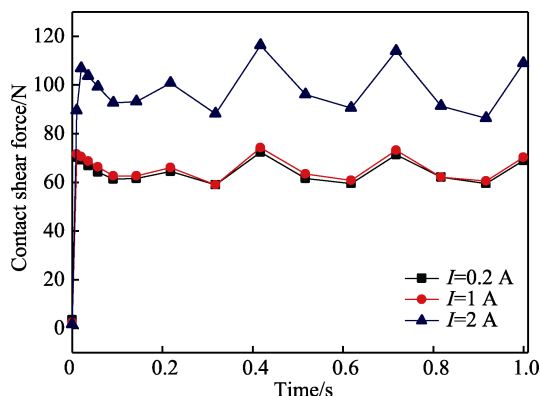


图 12 不同电流负载下摩擦系统的切应力
Fig.12 Shear stress of friction system under different current loads

4 结论

结合试验和数值模拟分析,探讨了电流负载对滑动电接触摩擦学行为特性的影响,结论如下。

1) 当电流从 0.2 A 增至 1 A 时,界面摩擦因数和稳定阶段的摩擦力未出现显著差异。当电流负载进一步增至 2 A 时,摩擦因数和摩擦力显著增大。

2) 在增大电流负载时,接触电压呈现上升趋势。由于界面的接触电阻包括收缩电阻和薄膜电阻,因此界面的接触电压并不会随着电流的增大而等比例增大。

3) 磨损形貌进一步验证了上述结论。同时结果表明,当电流增至 2 A 时,界面磨损程度加剧,磨斑的数量显著增多,这直接导致界面黏着区域增大,摩擦因数和摩擦力显著增大。

4) 有限元分析结果较好地反映了试验现象,同时证明,当电流增至 2 A 时,界面的热效应显著,剪切力明显增大,这是导致界面磨损加剧的重要原因。

参考文献:

- [1] 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 Bo-hua, JU Peng-fei, JI Li, et al. Research Progress on Tribology of Electrical Contact Materials[J]. Tribology, 2019, 39(5): 656-668.
- [2] ANGADI S V, JACKSON R L, PUJAR V, et al. A Comprehensive Review of the Finite Element Modeling of Electrical Connectors Including Their Contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 836-844.
- [3] KOCH J, SCHUETTLE M, PASLUOSTA C, et al. Electrical Connectors for Neural Implants: Design, State of the Art and Future Challenges of an Underestimated Component[J]. Journal of Neural Engineering, 2019, 16(6): 061002.
- [4] 李聪慧, 张燕燕, 曾泽祥, 等. 载流摩擦磨损研究进展

- [J]. 润滑与密封, 2022, 47(7): 153-167.
- LI Cong-hui, ZHANG Yan-yan, ZENG Ze-xiang, et al. Research Progress of Current-Carrying Friction and Wear[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(7): 153-167.
- [5] 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.
- [6] 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 Da-zhao, LIU Qi, FENG Li-jun, et al. Review on the Behavior and Mechanism of Fretting Corrosion Damage of Electrical Connectors[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 233-245.
- [7] 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.
- [8] ZHAO Hao, FENG Yi, ZHOU Zi-jue, et al. Effect of Electrical Current Density, Apparent Contact Pressure, and Sliding Velocity on the Electrical Sliding Wear Behavior of Cu-Ti₃AlC₂ Composites[J]. Wear, 2020, 444/445: 203156.
- [9] 孟令通, 谢鑫林, 李利, 等. Ag-Cu-MoS₂ 复合材料的真空载流磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(6): 755-761.
MENG Ling-tong, XIE Xin-lin, LI Li, et al. Wear Performance of Ag-Cu-MoS₂ Composites under Current-Loading in Vacuum[J]. Tribology, 2016, 36(6): 755-761.
- [10] MA Wen-lin, LU Jin-jun. Effect of Sliding Speed on Surface Modification and Tribological Behavior of Copper-Graphite Composite[J]. Tribology Letters, 2011, 41(2): 363-370.
- [11] CSAPO E, ZAIDI H, PAULMIER D, et al. Influence of the Electrical Current on the Graphite Surface in an Electrical Sliding Contact[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76/77: 421-424.
- [12] ZUO Xue, XIE Wen-xin, ZHOU Yuan-kai. Influence of Electric Current on the Wear Topography of Electrical Contact Surfaces[J]. Journal of Tribology, 2022, 144(7): 071702.
- [13] 张继华, 薛磊, 王智勇. 表面粗糙度对滑动电接触磨损率的影响[J]. 润滑与密封, 2022, 47(7): 77-82.
ZHANG Ji-hua, XUE Lei, WANG Zhi-yong. Effect of Surface Roughness on Sliding Electrical Contact Wear Rate[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(7): 77-82.
- [14] 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 Meng-kuo, ZHU Shi-gen, DING Hao. Effect of Electric Contact Strengthening on Microstructures and Properties of Ni-P/Nano-WC Composite Coating[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 187-193.

- [15] SUNG I H, KIM J W, NOH H J, et al. Effect of Displacement and Humidity on Contact Resistance of Copper Electrical Contacts[J]. *Tribology International*, 2016, 95: 256-261.
- [16] BRAUNOVIC M. Fretting in Electrical/Electronic Connections: A Review[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2009, E92-C(8): 982-991.
- [17] SUN Kun, DIAO Dong-feng. Current Density Effect on Current-Carrying Friction of Amorphous Carbon Film[J]. *Carbon*, 2020, 157: 113-119.
- [18] REN Wan-bin, WANG Peng, SONG Jian, et al. Effects of Current Load on Wear and Fretting Corrosion of Gold-Plated Electrical Contacts[J]. *Tribology International*, 2014, 70: 75-82.
- [19] GRANDIN M, WIKLUND U. Wear Phenomena and Tribofilm Formation of Copper/Copper-Graphite Sliding Electrical Contact Materials[J]. *Wear*, 2018, 398/399: 227-235.
- [20] WANG Peng, YUE Wen, LU Zhi-bin, et al. Friction and Wear Properties of MoS₂-Based Coatings Sliding Against Cu and Al under Electric Current[J]. *Tribology International*, 2018, 127: 379-388.
- [21] MEI Gui-ming, FU Wen-ming, CHEN Guang-xiong, et al. Effect of High-Density Current on the Wear of Carbon Sliders Against Cu-Ag Wires[J]. *Wear*, 2020, 452/453: 203275.
- [22] GRANDIN M, WIKLUND U. Friction, Wear and Tribofilm Formation on Electrical Contact Materials in Reciprocating Sliding Against Silver-Graphite[J]. *Wear*, 2013, 302(1/2): 1481-1491.
- [23] ZHAO H, BARBER G C, LIU J. Friction and Wear in High Speed Sliding with and without Electrical Current[J]. *Wear*, 2001, 249(5/6): 409-414.
- [24] 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.
- [25] BEAKE B D, HARRIS A J, LISKIEWICZ T W, et al. Friction and Electrical Contact Resistance in Reciprocating Nano-Scale Wear Testing of Metallic Materials[J]. *Wear*, 2021, 474/475: 203866.

责任编辑：彭颖

(上接第 128 页)

- [56] ARAKANE S, MIZOSHIRI M, SAKURAI J, et al. Direct Writing of Three-Dimensional Cu-Based Thermal Flow Sensors Using Femtosecond Laser-Induced Reduction of CuO Nanoparticles[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(5): 055013.
- [57] ALI KHAN M U, RAAD R, TUBBAL F, et al. Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, General IoT Applications: A Review[J]. *Polymers*, 2021, 13(3): 357.
- [58] SOREL S, BELLET D, COLEMAN J N. Relationship between Material Properties and Transparent Heater Performance for both Bulk-Like and Percolative Nanostructured Networks[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 4805-4814.
- [59] HECHT D, HU Liang-bing, IRVIN G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(13): 1482-1513.
- [60] ZHAI Hai-tao, WANG Ran-ran, WANG Xiao, et al. Transparent Heaters Based on Highly Stable Cu Nanowire Films[J]. *Nano Research*, 2016, 9(12): 3924-3936.
- [61] PARK J H, JEONG S, LEE E J, et al. Transversally Extended Laser Plasmonic Welding for Oxidation-Free Copper Fabrication Toward High-Fidelity Optoelectronics[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(12): 4151-4159.
- [62] ZHANG Ji-hai, FENG Jin, JIA Li-yang, et al. Laser-Induced Selective Metallization on Polymer Substrates Using Organocopper for Portable Electronics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(14): 13714-13723.
- [63] 孙英, 刘乃源, 余臻伟, 等. 基于 NFC 的可穿戴传感器中柔性/可拉伸天线的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 122-137.
- SUN Ying, LIU Nai-yuan, YU Zhen-wei, et al. Research Progress of Flexible/Stretchable Antennas in Wearable Sensors Based on NFC[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(12): 122-137.
- [64] 郑维炜, 张弦. 柔性可穿戴传感器的研究进展[J]. *合成纤维*, 2022, 51(3): 39-43.
- ZHENG Wei-wei, ZHANG Xian. Research Progress of Flexible Wearable Sensors[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2022, 51(3): 39-43.
- [65] ZHOU Xing-wen, GUO Wei, ZHU Ying, et al. The Laser Writing of Highly Conductive and Anti-Oxidative Copper Structures in Liquid[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(2): 563-571.
- [66] WATANABE A, CAI Jin-guang. On Demand Process Based on Laser Direct Writing and the Sensor Application[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2017, 30(3): 341-343.

责任编辑：万长清