DOI: 10.3901/JME.2019.09.063

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*

宋晨飞^{1,2} 孙毓明¹ 张燕燕¹ 孙逸翔^{1,3} 张永振^{1,3}

(1. 河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室 洛阳 471023;

2. 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 兰州 730000;

3. 机械科学研究总院武汉材料保护研究所 武汉 430030)

摘要: 采用 FTM-CF100 载流摩擦试验机, 以纯铜对滚配副为例研究了滚动载流摩擦副的失效行为和失效机制。随着测试时间的增加, 摩擦因数首先保持平稳然后逐步上升, 传导的电流在初期较快增加后保持稳定, 在此过程中摩擦因数和电流的波动性增加。经过至少 180 min 运行后, 保持电压不变时最终得到的摩擦因数和电流随载荷的增加而增加, 且高载荷有利于获取较低的载流/摩擦波动性; 保持载荷不变时高电压下摩擦因数更高而且波动性更大, 均高于无电流情形。滚动载流摩擦副性能失效表现为摩擦因数的大幅上升以及电流波动性恶化, 增加载荷和电压均加速失效过程。结合微观表征, 推测在高压力和电阻热的作用下表面微凸峰易发生形变, 造成载流摩擦表面粗糙度下降, 因而真实接触面积增加从而电流上升; 但此时铜材料易产生黏着, 引起摩擦因数的升高; 载流摩擦表面的局部氧化和氧化磨粒导致了载流/摩擦的波动性加剧。

关键词: 滚动; 载流摩擦; 失效

中图分类号: TH117

Failure of Cu Rolling Triboelectric Pairs under Various Load and Voltage

SONG Chenfei^{1,2} SUN Yuming¹ ZHANG Yanyan¹ SUN Yixiang^{1,3} ZHANG Yongzhen^{1,3}

(1. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology,
Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

3. Wuhan Research Institute of Materials Protection, China Academy of Machinery Science and Technology,
Wuhan 430030)

Abstract: Rolling electric contact is a novel style of conducting rotary joint, whose failure behavior and the involved mechanism under triboelectric conditions are studied by FTM-CF100 tribometer. It is found that the friction coefficient keeps stable firstly and then grows up as rolling continued, at the same time, the current rises rapidly at initial then level off. And the friction coefficient and current lose their stability during the rolling. After rolling for at least 180 minutes, the final friction coefficient and current increases with the increasing of contact load under a constant voltage. Load increasing can improve the stability of triboelectric contact. Moreover, the friction coefficient and its fluctuation increase with the growth of voltage, which is always higher than those during mechanical rolling. The performance failure could be summarized as significant rising of friction coefficient and deterioration of current stability. The growth of load and voltage will accelerate failure process. Based on micro characterization, it is speculated that asperities on triboelectric pairs should be flatten more easily due to the mechanical stress and joule heating, resulting in lower roughness and larger contact area, and consequently leading to the rising of current. The friction coefficient increases because of the adhesion between the asperities. The deterioration of triboelectric contact stability could be mainly attributed to the local oxidation and oxides debris.

Key words: rolling; tribology with current; failure

* 国家自然科学基金(51775173, 51405134)、中国博士后科学基金(2016M590676)和固体润滑国家重点实验室开放课题(LSL-1509)资助项目。20180512 收到初稿, 20181224 收到修改稿

0 前言

利用载流摩擦副传导电流是运动部件之间输送电功率和电信号的主要方式。载流摩擦副是少数几个单点失效核心部件之一,其失效可能导致整机供电系统的瘫痪^[1]。以弓网、导电滑环为代表的滑动载流摩擦副满足了高速列车、卫星等装备的导电需求,但在使用过程中滑动电接触表现出高摩擦因数、高磨损率、高电阻波动性、电弧损伤等缺点,严重阻碍了其在高端领域应用的进一步应用^[2-5]。

受滚动轴承的启发,基于滚动摩擦低摩擦因数、低磨损率的先天优势,20世纪60年代美国航空航天局(NASA)设计制造了滚动汇流环,目前已应用于航母预警雷达、导弹信号传输系统等关键部位,已逐步取代了原有的滑动载流摩擦副^[6]。但由于技术封锁,NASA对于滚动导电的理论研究、测试方法、评估体系等一直未公开。美国专利US 6582237 B2提出了一种新型滚环结构,滚环内部安装多个弹性体并协同运动并导电^[7]。高春城等^[8]初步实现了弹性滚环导电,在国内较早开展相关研究。孙丽等以NASA的“弹性环”滚环为研究对象,对滚环的预紧力、弹性环壁厚、变形量等参数进行优化^[9]。刘文科等^[10]为确保滚环工作过程中保持可靠电接触且具有足够的抗结构疲劳性,设计了合适的工作压力及结构参数。王立等^[11]针对空间太阳能电站需求,提出了一种串联可扩展双向同轴空心滚环式导电旋转关节方案。国内外研究者对弹性滚环的研究持续关注,主要进行了结构设计、原理样机制造等工作,但目前仍然缺少系统的试验评估和相关载流摩擦基础研究。河南科技大学开展了滚动载流摩擦的试验研究,获取了载荷和电压对平稳运行阶段配副摩擦/导电性能的影响,但对性能失效过程和失效机制缺乏深入探讨^[12]。

本文利用FTM-CF100载流摩擦试验机,以纯铜对滚配副为例研究了滚动载流摩擦副的失效行为和失效机制。测试过程中记录不同载荷和电压试验条件下的摩擦学和电流同步信号,分析其平均值变化规律和波动性变化规律,总结提出滚动载流摩擦副性能失效规律和特点。试验过后利用三维形貌仪、扫描电镜和能谱仪进行表面微观分析,揭示滚动载流摩擦性能变化机制和接触失效机制。相关结果有望推动新型高功率、长寿命滚动电接触配副的设计与应用。

1 试验方法

1.1 滚动载流摩擦试验

试验所用FTM-CF100型滚动载流试验机由河南科技大学与南京神源生智能科技有限公司联合研制(CN107014708A),可实现载荷、电流、转速、气氛、采样频率、试验时长的精确可控,并可采集同步的载荷、摩擦因数、电压、电流信号。采样导电性良好的T2纯铜材料组成对滚配副,见图1。测试试样径向半径为40 mm,外缘弧面半径为100 mm,对滚配副为径向半径60 mm的圆柱。试样装配在旋转轴顶端,由伺服电机驱动,转速分别设定为6 r/min、4 r/min,保障样品时纯滚动状态(无滚滑,线速度均为25.12 mm/s)。旋转轴另一端浸没在2.5 mol/L的碳酸钾溶液中,通过溶液与直流恒压源相连组成导电回路。试验前,所有样品在无水乙醇中超声清洗20 min并自然风干。每次试验装配过样品后,均进行空转(样品不接触)测试摩擦力零点。试验过程中室内温度 20 ± 3 °C,相对湿度 $50 \pm 5\%$ 。

图1 纯铜滚动载流摩擦副示意图

1. 旋转轴密封端盖 2. 测试试样隔套 3. 测试试样
4. 测试试样紧定推卸套 5. 配副试样 6. 配副试样紧定推卸套
7. 旋转轴 8. 圆螺母及锁紧垫圈

为测试载荷对滚动电接触失效的影响,载荷设置为40 N、50 N、60 N和70 N,电压设置为20 V;为测试电压的影响规律,载荷设置为70 N,电压设置为0 V、12 V、16 V和20 V。电压范围设置是为了模拟雷达等部件中较低功率导电旋转关节电流工况,载荷范围设置是为了维持稳定的摩擦接触和电接触^[13-14]。为兼顾长时间测试和动态测试,数据采集频率为50 Hz,每采集15 s中断45 s,据此可评估长时间试验过程中平均值 $\bar{x}$ 的变化规律和短时间内的实时动态特性 δ_x ,见式(1)、(2)

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

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} / \bar{x} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\bar{x}$ 代表每个采样周期内的摩擦因数或电流的平均值; N 代表被统计数据个数。 δ_x 为摩擦因数或电流的波动性, 代表实时数据偏离平均值的程度, 数值越大越不稳定。为增加数据的可读性, 本文以误差棒表示波动性, 其长度在数值上等于 10 倍的 δ_x 。

1.2 微观表征

试验后, 采用白光干涉三维形貌仪(Nano Focus μ surf expert, 德国)观察试样的表面形貌并测试粗糙度。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, TESCAN VEGA3 SBH, 捷克)观察试样表面微观结构并分析材料损伤机制, 采用能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS, EDAX Octane SDD Series, 美国)分析摩擦副表面的元素分布及含量。采用分析天平(Analytical Balance, Sartorius SECURA, 德国)测试试验前后试样的重量损失。

2 试验结果

2.1 滚动载流摩擦失效过程

图 2 是载荷 50 N, 电压 20 V 时滚动载流摩擦失效过程中的摩擦因数和电流变化。试验过程中, 前 100 min 中平均摩擦因数稳定在 0.12, 然后突然开始上升, 在 180 min 时达到 0.24。同步电流从初始的 1.49 A 开始增长, 至 100 min 后平均值稳定在 1.63 A。摩擦因数的快速上升是滚动载流摩擦失效过程中最显著的特点。而对于导电性能, 随着时间增长导电能力增强。但是, 平均值的高低并不能完全反映载流/摩擦性能, 前期研究表明波动性同样是载流/摩擦系统的重要特征^[15]。为此, 下文详细分析了不同载荷、电压下摩擦因数和电流的平均值与波动性的变化规律。

图2 载荷 50 N、电压 20 V 时滚动载流摩擦失效过程中的平均摩擦因数和平均电流变化

2.2 载荷对滚动载流摩擦失效的影响

在外加电压为 20 V 的条件下, 载荷从 40 N 增加至 70 N, 滚动载流摩擦副表现出的摩擦/载流性能

分别见图 3a 和 3b。运行 15 min 后, 随载荷增加摩擦因数从 0.14 降低至 0.11, 摩擦因数波动性从 1.93% 降至 0.72%。可见在摩擦初期高载荷可获得较低的平均摩擦因数和较高的接触稳定性。但随着时间的增长, 40 N 时的摩擦因数及其波动性变化不大, 但更高载荷下摩擦因数及其波动性增长明显, 并且载荷越大变化越显著。例如, 经过 180 min, 载荷 70 N 时摩擦因数平均值从 0.11 大幅增长至 0.48, 波动性从 0.72% 增加至 1.17%。

同步电流数据显示(图 3b), 电压为 20 V 时静态接触下(0 min), 40~60 N 时初始电流在 1.5 A 左右, 70 N 时电流升至 1.58 A。由于输出电压和设备线路电阻均未改变, 因此高载荷下电流增加的原因应该是接触电阻下降。滚动 15 min 后, 电流有所上升, 此时的电流波动性分别为 1.17%、1.29%、1.0% 和 0.86%。随着滚动时间延长至 180 min, 不同载荷下的电流均呈现出一定的增长, 最终分别达到 1.57 A、1.64 A、1.85 A 和 2.17 A, 其波动性分别为 0.83%、0.91%、1.19% 和 1.33%。因此, 施加相同的电压,

(a) 摩擦因数平均值及其波动性

(b) 电流平均值及其波动性

图3 电压 20 V 时, 载荷对滚动载流摩擦失效过程中的摩擦因数和电流与其波动性的影响规律

载荷越大, 电流越高, 高载荷有利于降低初始阶段的电流波动性。但随着时间延续, 高载荷最终导致较高的电流波动性。

2.3 电压对滚动载流摩擦失效的影响

设定载荷为 70 N, 滚动过程中是否通电以及不同电压下的性能变化规律见图 4a 和 4b。经过 180 min 的单纯机械滚动, 摩擦因数从 0.09 缓慢增加至 0.11, 摩擦因数波动性则维持在 0.6% 左右; 而载流摩擦因数则表现出较大的增长幅度, 例如电压为 20 V 时, 摩擦因数从 0.11 增加至 0.48, 波动性从 0.72% 增加至 1.17%。同时发现, 同一条件下载流摩擦因数均高于纯机械摩擦因数。例如运行 180 min 后, 电压为 0 V 和 20 V 时摩擦因数从 0.11 增加至 0.48。

(a) 摩擦因数平均值及其波动性

(b) 电流平均值及其波动性

图 4 载荷 70 N 时, 电压对滚动载流摩擦失效过程中的摩擦因数和电流与其波动性的影响规律。

图 4b 的电流数据显示, 静态(0 min 时)和动态下增加电压均使电流增长。随着试验时间的增长, 即使电压保持不变, 电流也会逐渐增加, 比如在 20 V 下, 电流从静态的 1.58 A 上升至 2.18 A, 电流波动性从初期(15 min 时)的 0.83% 增至 1.33%。

2.4 载荷和电压对滚动载流摩擦平稳运行时间的影响

第 2.1 至 2.3 节的数据表明, 载荷和电压对滚动载流摩擦副性能产生显著影响。高载荷有利于在摩擦初期获取较低的摩擦因数、较低的接触电阻以及较低的载流摩擦波动, 但却容易引起摩擦因数、载流摩擦波动性的快速上升。高电流引起摩擦因数及其波动性上升, 同时电流自身波动性也有所上升。对于摩擦因数, 平均值的升高是最显著的现象; 而对于电流, 平均值在滚动过程中有所增加, 因而不适合用于接触失效评估。图 5a 和 5b 以摩擦因数平均值、摩擦因数波动性和电流波动性随时间的变化趋势为判据, 统计了摩擦副稳定运行时间。在图 5a 中, 随着载荷从 40 N 增加至 70 N, 摩擦因数平稳时间和电流波动性平稳时间从至少 180 min 下降至不足 45 min。摩擦因数波动性平稳时间也有所下降但趋势不明显, 可能由于高载荷一方面降低了摩擦因数波动性的初始值, 另一方面又导致其随时间延长而较快上升, 因而不容易判断变化规律。在图 5b

(a) 电压 20 V 时不同载荷下配副稳定运行时间

(b) 载荷 70 N 时不同电压下配副稳定运行时间

图 5 滚动载流摩擦副在不同工况下的平稳运行时间

中, 单纯机械滚动可稳定运行至少 360 min, 一旦施加电流, 稳定运行时间大幅下降。尽管不同的判据得出的稳定运行时间有一定差别, 引入相关性系数 r 分析后发现各数据间存在相关性。方法如式(3)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中, X, Y 为统计对象; $\bar{X}, \bar{Y}$ 为对应的平均值, 结果见表 1。

表 1 不同判据所得稳定运行时间的相关性

	摩擦因数	电流波动性	摩擦因数波动性
摩擦因数	1		
电流波动性	0.912 254	1	
摩擦因数波动性	0.845 486	0.732 558	1

不同判据得到的稳定运行时间之间强烈的相关性表明配副摩擦失效和导电失效之间存在耦合性。滚动载流摩擦副的性能失效表现为摩擦因数升高以及摩擦/载流波动性的恶化, 载荷和电压的增加均加速失效过程。

3 机制分析

3.1 滚动电接触粗糙表面演化

图 6a 是原始表面三维形貌, 成像范围为 $400 \mu\text{m} \times 1600 \mu\text{m}$, 粗糙度 R_a 为 $1.626 \mu\text{m}$ 。图 6b~6d 是载荷 70 N、外加电压 0 V、12 V、20 V 和滚动时间 180 min 时的摩擦表面三维形貌, R_a 分别为 $1.768 \mu\text{m}$ 、 $1.365 \mu\text{m}$ 和 $1.243 \mu\text{m}$ 。可见, 载流摩擦表面粗糙度

图 6 不同工况下表面粗糙度

低于单纯机械摩擦表面, 且随着电压增大而降低。图 6e 和图 6f 是载荷 50 N、40 N, 电压 20 V, 滚动时间 180 min 的表面三维形貌, R_a 分别为 $1.480 \mu\text{m}$ 和 $1.690 \mu\text{m}$ 。即, 载流摩擦表面粗糙度随载荷的降低而增加。图 6b~6f 粗糙度的变化表明载荷、电压均促进载流摩擦表面微凸峰的变形。通电后, 微凸峰间产生电阻热, 可能促进材料力学性能下降, 更容易发生形变, 进而降低粗糙度^[16]。大量研究表明, 低表面粗糙度或高载荷均可增加有效接触面积, 导致接触电阻降低^[17-18]。因此, 即使外加电压不变, 电流也会随着载荷的增加而增加(图 3b)。同时, 高电压下的电流增加量更大(图 4b, 20 V 时增加 0.6 A, 16 V 时增加了 0.25 A)。

但是, 仅从粗糙度变化无法解释失效过程中摩擦力升高以及波动性增大, 载流摩擦表面粗糙度更低但摩擦因数更高。仅图 3a 中 15 min 时的摩擦因数降低可用粗糙度降低解释。文献报道影响摩擦因数的表面因素包括黏着、粗糙度等多种因素^[19-20]。为进一步揭示滚动载流摩擦失效机制, 利用扫描电子显微镜及能谱对不同工况样品的表面形貌和成分进行对比研究。

3.2 滚动电接触失效机制分析

图 7 是不同工况下的表面 SEM 照片, 放大倍数为 $\times 500$, 图中标尺代表 $50 \mu\text{m}$ 。原始表面(图 7a)存在一些打磨痕迹。载荷为 40 N 时, 单纯机械摩擦 180 min 后表面打磨痕迹变得不明显, 也未出现明显的磨损特征(图 7b)。而载荷 40 N, 电压 20 V 时则出现显著的表面损伤, 如图 7c 中 D 区域出现了大量的、细微的麻点。在滚动摩擦中, 这种麻点一般归因为材料黏着, 电流加剧材料的黏着磨损^[21]。相对于单纯机械滚动, 载流摩擦表面可能因为微凸峰间的电阻热促进材料力学性能下降, 促进黏着更容易产生^[22]。70 N 时纯机械滚动 180 min 后表面出现较多鳞片状产物(图 7d), 比 40 N 时的损伤显著(图 7b)。鳞片状损伤也是滚动摩擦中常见的损伤形式, 是一种多次滚动循环后更为严重的黏着现象^[21]。图 7e 是电压为 20 V、载荷 70 N 时的损伤情况, 通电同样加剧就材料黏着, 鳞片结构分布更为广泛。可见, 增加载荷或电流均促进表面黏着, 因此经过 180 min 滚动后最终摩擦因数随载荷或电流的增大而增大。

同时, 利用能谱仪对样品表面感兴趣区域的成分变化进行表征。原始表面的 O : Cu 原子比是 0.036(图 8a), 70 N 机械滚动表面 O : Cu 原子比是 0.037, 变化不明显(图 8b)。而在 70 N、20 V 时的载流摩擦表面, O : Cu 原子比上升为 0.085。因此,

电流介入促进 Cu 发生氧化反应,其机理可能与水参与的电化学氧化有关^[23, 24]。图 8d 表明原始表面也存在一定均匀氧化。图 8e 是 40 N、20 V 时摩擦后表面 O 元素分布(来源于图 7c),发现表面氧化并非均匀分布,麻点部位氧化较低(区域 D')。图 8f 是 SEM 图 7e 的表面 O 原始分布,区域 E' 氧含量偏高,该部位很可能形成了氧化物颗粒(图 7e 中区域 E)。

铜氧化物的导电性能远远低于金属铜,一旦氧化区域或氧化颗粒进入接触区,将对接触导电产生干扰。同时,局部氧化物可以减缓瞬态的金属-金属黏着,氧化颗粒作为磨粒影响摩擦接触,进而影响摩擦因数。随着滚动时间的增长,氧化作用越来越明显,载流摩擦表面不均匀氧化可能造成了载流/摩擦波动性增加。

图 7 不同工况下的配副表面 SEM 图片

图 8 不同工况下的摩擦表面氧化情况

通过摩擦表面形貌、氧化的对比分析,滚动载流摩擦失效机制可用图 9 表示。滚动载流摩擦性能与配副摩擦/导电共面接触密切相关,突出表现为摩擦失效和导电失效的关联性(表 1)。在材料损伤方面:滚动载流摩擦表面观察到了严重黏着和局部氧

化,但未发现电弧烧蚀,整体样品也未检出重量变化。在性能方面:与铜基材料滑动载流摩擦副相比^[15],滚动配副在平稳运行阶段的摩擦因数、摩擦因数波动性、电流波动性均有所改善。本文的研究结果有助于推动新型滚动电传输装置的设计和应用。

图9 滚动载流摩擦性能失效机制

4 结论

(1) 滚动载流摩擦副性能失效主要体现为摩擦因数的大幅上升以及摩擦因数波动性、电流波动性的上升。高载荷有利于在平稳运行阶段获得低接触电阻和低载流/摩擦波动性,但载荷和电压的增加加快性能失效。

(2) 失效表面的三维形貌分析表明高载荷或高电压下有利于获取较低的粗糙度,因而有效电接触面积增大,即使试验过程中外加电压不变,电流也有所上升。但扫描电镜结果表明,此时铜配副间产生材料黏着,导致摩擦因数升高。这种黏着可能由高接触压力和焦耳热诱发。

(3) 电流促进载流摩擦表面氧化,不均匀氧化和氧化颗粒使摩擦因数波动性和电流波动性增加。

本文讨论了滚动载流摩擦副的失效特征和失效机制,研究结果对设计和制造新型滚动导电旋转关节具有一定指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张永振, 宋克兴, 杜三明. 北京: 载流摩擦学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Yongzhen, SONG Kexing, DU Sanming, et al. Current carrier tribology [M]. Beijing: Science Press, 2016
- [2] 徐屹, 凤仪, 王松林, 等. 碳纳米管-银-石墨复合材料的电磨损性能 [J]. 机械工程学报, 2006, 25(12): 328-332.
XU Yi, FENG Yi, WANG Songlin, et al. Electrical friction and wear properties of CNT-Ag-G composite[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 25(12): 328-332.
- [3] GENERALOVA K, RYAPOSOV I, SHATSOV A. Tribological characteristics of low-voltage sliding electrical contacts of gold alloys [J]. Journal of Friction & Wear, 2016, 37(5): 482-488.
- [4] CHEN Guangxiong, YANG Hongjuan, ZHANG Weihai, et al. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current [J]. Tribology International, 2013, 61: 88-94.
- [5] 张亚东, 韩璐, 李明, 等. 高速列车受电弓气动噪声降噪 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 94-101.
ZHANG Yadong, HAN Lu, LI Ming, et al. Reduction of aerodynamic noise of high-speed train pantograph[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 94-101.
- [6] RENZ D. High voltage-high power components for large space power distribution systems [C]// 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 19-24 August 1984, San Francisco, California. Cleveland: NASA Lewis Research Center, 1984: 84N22615.
- [7] JACOBSON P. Rolling electrical transfer coupling improvements: United States, 6582237 [P]. 2003-06-24.
- [8] 高春城. 新型滚动电传输装置的设计和实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
GAO Chuncheng. Design and experimental study of a new type of roll ring [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995.
- [9] 孙丽, 王秀伦. 滚环的优化设计 [J]. 大连交通大学学报, 1999, 20(3): 56-60.
SUN Li, WANG Xiulun. Optimal design of roll ring [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 1999, 20(3): 56-60.
- [10] 刘文科, 郑传荣, 赵克俊. 滚动汇流环技术的发展和应 用综述 [J]. 火控雷达技术, 2014(2): 107-111.
LIU Wenke, ZHENG Chuanrong, ZHAO Kejian. Overview on development and application of roll slip ring technology[J]. Fire Control Radar Technology, 2014(2): 107-111.
- [11] 刘自立, 侯欣宾, 王立, 等. 新型空间大功率滚环热分析 [J]. 航天器工程, 2017, 26(4): 52-59.
LIU Zili, HOU Xinbin, WANG Li, et al. Thermal analysis of novel high-power roll-ring [J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(4): 52-59.
- [12] 岳洋, 孙逸翔, 孙毓明, 等. 载荷和电压对纯铜滚动载流摩擦学性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 67-74.
YUE Yang, SUN Yixiang, SUN Yuming, et al. Effect of load and voltage on the tribo-electric behaviour of rolling cu pairs [J]. Tribology, 2018, 38(1): 67-74.
- [13] 汤锋, 姜毅. 某直升机电载雷达汇流环的设计 [J]. 电子机械工程, 2010, (6): 30-32.
TANG Feng, JIANG Yi. A design of the helicopter borne radar slip-ring [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2010, (6): 30-32.
- [14] 邢立华, 卢锦明, 李耀娥, 等. 空间用精密导电滑环的研制 [J]. 导航与控制, 2015, (1): 59-64.
XING Lihua, LU Jinming, LI Yaoe, et al. Research on the

- precision conductive slip ring in space [J]. Navigation and Control, 2015, (1): 59-64.
- [15] ZHANG Yongzhen, YANG Zhenghai, SONG Kexing, et al. Triboelectric behaviors of materials under high speeds and large currents [J]. Friction, 2013, 1(3): 259-270.
- [16] BANSAL D, STREATOR J. Voltage saturation in electrical contacts via viscoplastic creep [J]. Acta Materialia, 2011, 59(2): 726-737.
- [17] 陈奇, 黄守武, 张振, 等. 考虑摩擦因素的两圆柱体表面接触承载能力的分形模型研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 114-121.
- CHEN Qi, HUANG Shouwu, ZHANG Zhen, et al. Research on fractal contact model for contact carrying capacity of two cylinders' surfaces considering friction factors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 114-121.
- [18] 张晓寒, ROBERT L J, 孟文俊. 多尺度粗糙度对接触面真实接触面积的影响 [J]. 润滑与密封, 2015, (6): 76-80.
- ZHANG Xiaohan, ROBERT L J, MENG Wenjun. The influence of multiscale roughness on the real contact area between surfaces[J]. Lubrication Engineering, 2015(6): 76-80.
- [19] ROD C. Effects of surface roughness on rolling friction [J]. European Journal of Physics, 2015, 36(6): 065029.
- [20] SHERRINGTON I, HAYHURST P. Simultaneous observation of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts [J]. Wear, 2001, 249(3): 182-187.
- [21] TUNNA J, SINCLAIR J, PEREZ J. A Review of wheel wear and rolling contact fatigue [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(2): 271-289.
- [22] GAARD A, HALLBACK N, KRAKHMALOV P, et al. Temperature effects on adhesive wear in dry sliding contacts [J]. Wear, 2010, 268(7): 968-975.
- [23] LIU Qinggang, KUANG Dengfeng, ZHANG Shilin, et al. Analysis of AFM tip-induced oxidation of thin metal film in the air [C]// Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meetin, 15 October 2003, San Diego, California. Bellingham: SPIE, 2003: 8.
- [24] ALONSO-GONZALEZ P, ALEN B, FUSTER D, et al. Formation and optical characterization of single InAs quantum dots grown on GaAs nanoholes [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(16): 163104-163104-163103.

作者简介: 宋晨飞, 男, 1986 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为载流摩擦、微观摩擦。

E-mail: cfsong@haust.edu.cn

张永振(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为苛刻工况下的干摩擦基础研究(高温、高速、复杂气氛、多物理耦合环境)。

E-mail: yzzhang@haust.edu.cn