DOI: 10.3901/JME.2021.15.168

不同转速下纯铜滚动载流摩擦副的电弧行为及电损伤*

李家伟¹ 张燕燕¹ 宋晨飞¹ 孙逸翔² 陈天骅¹ 张永振^{1,2}

(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. 机械科学研究总院集团有限公司武汉材料保护研究所有限公司 武汉 430030)

摘要: 采用 FTM-CF100 型滚动摩擦磨损试验机, 以铜盘对滚摩擦副为例研究了转速对滚动载流摩擦性能规律和损伤机制的影响, 重点关注了滚动摩擦电弧行为和摩擦副表面电损伤。随着转速的增加, 平均滚动载流摩擦因数逐渐减小且总是高于机械摩擦因数, 实时电流更容易出现剧烈波动。同时, 高转速下电弧出现的初始时间更早, 燃弧率和电弧能更高。高转速下不稳定的接触可能提供了放电间隙, 容易诱发电弧。一旦形成电弧, 表面损伤机制从低转速时的机械损伤主导转变为机械损伤和电弧烧蚀并存。电弧放电导致实时电流剧烈波动, 电弧烧蚀导致摩擦表面氧化严重, 接触电阻上升。

关键词: 滚动; 载流摩擦; 转速; 电弧

中图分类号: TH117

Arc Behavior and Electrical Damage of Rolling Current-carrying Cu Pairs at Different Rotating Speeds

LI Jiawei¹ ZHANG Yanyan¹ SONG Chenfei¹ SUN Yixiang²
CHEN Tianhua¹ ZHANG Yongzhen^{1,2}

(1. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;
2. Wuhan Research Institute of Materials Protection, China Academy of Machinery Science and Technology, Wuhan 430030)

Abstract: Using the FTM-CF100 rolling current-carrying friction tester, the effect of rotating speed on the friction performance and damage mechanism of pure copper rolling current-carrying contact pairs is investigated. The arc behaviors and the surface electric damage are emphasized. With the increase of rotating speed, the average current-carrying friction coefficient decreases gradually and is always higher than mechanical friction coefficient, and the real-time current is more prone to drastic fluctuations. At higher speed, the arc appears earlier, the arc rate and arc energy are higher. The unstable contact at high speed may provide discharge gaps, which is advantageous to arc generation. After the arc appearance, the surface damage mechanism changes from the dominant mechanical damage at low speed to the coexistence of mechanical damage and arc ablation. Arc discharge can lead to current fluctuation, serious oxidation and the increase of contact resistance.

Key words: rolling; current-carrying; rotation speed; arc

0 前言

载流摩擦副是运动部件之间电功率和信号传输

的唯一途径, 是典型的单点失效部件^[1-3]。现有的滑动载流摩擦副已广泛应用于轨道交通装备中的受流和回流系统、航天装备中的太阳能帆板汇流环、雷达中的集电环等高端设备中。但在使用过程中, 滑动电接触表现出摩擦因数大、磨损率高、电噪声高等缺点, 严重阻碍了其在高端领域的进一步应

* 国家自然科学基金资助项目(51775173, U1804252)。20200906 收到初稿, 20210205 收到修改稿

用^[4-6]。为了克服滑动载流摩擦副的缺点,受滚动轴承的启发,美国航空航天局(NASA)设计制造了滚动汇流环,并满足了“自由号”空间站的高功率电能传输需求^[7]。滚动载流摩擦副表现出低摩擦因数、低磨损率、低电噪声等优势,但国内类似产品几乎没有。为了保证滚动载流摩擦副的合理设计和高可靠性运行,必须首先对其载流摩擦性能和损伤机制进行基础研究。

河南科技大学 SUN 等^[8-9]开展了滚动载流摩擦研究,在试验转速为 6 r/min 时考查了开放大气环境、湿度可控环境和水下环境中的滚动载流摩擦性能和损伤机制,但更高转速的试验尚未涉及。前人研究表明,速度对滑动载流摩擦性能有重要影响^[10]。ZHANG 等^[11]阐明了高速滑动会使材料的摩擦学性能和导电性能恶化。XIE 等^[12]研究了不同滑动速度下 AuAgCu 电刷/镀金对的滑动电接触行为,发现高速滑动会引起振动和实际接触面积的变化,导致接触电压降增大,产生明显的电气噪声。HUANG 等^[5]研究了 Ti_3AlC_2 的载流摩擦行为,研究表明摩擦因数随滑动速度和电流密度的增大而增大。丁涛等发现单纯机械摩擦时,滑动速度对碳滑板磨损影响较小,而施加电流后高速滑动产生的电弧严重加剧碳滑板磨损^[13]。综上,速度可以改变载流摩擦副表面的接触状态,进而影响材

料的载流摩擦性能和材料损伤机制。滚动载流摩擦副是航空航天、风电系统、雷达等高端装备中电流传输的关键部件,其转速范围是 0.01~1 000 r/min。随着转速的提高,滚动载流摩擦副的摩擦学性能、导电性能以及材料损伤机制有何变化,目前尚不清楚。因此,有必要对不同速度下的滚动载流摩擦进行研究。

1 试验方案

1.1 试验设备和材料

试验所用滚动载流摩擦试验机 FTM-CF100,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^[14]。试验机外观见图 1,试验机的机械部分主要由加载电动机、载荷传感器、旋转驱动电动机、主轴和扭矩传感器等部件组成。样品固定在主轴的顶部,加载电动机安装在滚珠丝杠上,通过推动轴 B 向轴 A 运动。当样品盘紧密接触时(图 2a),载荷传感器会测量接触载荷直到达到预设值。安装在旋转电动机上的扭矩传感器测量摩擦力矩,并在每次测试前校准扭矩零点。试验机导电部分包括直流稳压电源、水银滑环、主轴和滚动试样。当试样接触时,电流流过接触区形成滚动载流摩擦接触,导电部分的电路图如图 2b 所示。

图 1 滚动载流摩擦试验机^[9]

滚动导电旋转关节中的导电节点是铜基滚环与滚道之间的弹性点接触区。铜基材料在载流摩擦领域的应用非常广泛,纯铜又是黄铜、青铜等导电环材料的基料,因此选用 T2 纯铜(GB/T 2059-2008)作为摩擦副材料。配副试样的直径为

120 mm 的圆柱体,测试试样直径为 80 mm、外缘弧面曲率半径为 100 mm 的圆盘(图 2a 和 2c)^[8]。每次试验前,使用 600#, 1000#, 1500# 的砂纸依次对铜盘试样表面预磨,然后使用无水乙醇在超声波中清洗样品 30 min。

图2 试验设备图示意图

1.2 试验方法

依据文献[15-16]报道的方法进行计算,铜屈服时对应的赫兹接触压力为 393 MPa,结合图 2c 摩擦副几何尺寸反算的临界载荷约为 180 N。本试验载荷设置为 180 N,确保铜盘在初始状态下处于弹性接触。滚动载流摩擦副服役的速度范围为 0.01~1 000 r/min,为更好模拟实际情况,将 A 盘-B 盘转速分别设定为: 4~6 r/min、240~360 r/min、300~450 r/min、400~600 r/min、600~900 r/min 五组不同转速,滚动时无滚滑比,对应的线速度分别为 0.025 m/s、1.508 m/s、1.885 m/s、2.513 m/s、3.780 m/s。试验的初始电流设为 1.5 A,数据采样频率为 1 000 Hz,单次数据采集时间为 10 s,数据采集间隔为 50 s,直至试验结束。当初始电流设为 0 A,可进行单纯机械滚动对比试验。试验过程全程采用数码摄像机拍摄(DV, FDR-AX40, SONY, Japan)。每种工况条件下的试验重复 5 次。

试验过程中可获得同步的摩擦力(f),摩擦因数(μ),电流(I)和接触电阻(R)等数据。摩擦因数和电流的动态特性可用波动性系数 δ_x 来描述^[17]

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

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, σ_x 为数据的标准差; N 为采样周期内的采样个数(本试验一个采样周期 10 s,采集 10 000 个数据), $\bar{x}$ 为采样周期内数据的平均值。

载流摩擦电弧由燃弧率和电弧能表示,燃弧率 K 反映了载流摩擦试验过程中电弧产生的概率,其

数值为燃弧的总时间 t 与试验总时间 T 的比值^[18]

$$K = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (3)$$

电弧能 E 与电弧产生时盘-盘之间的电压 U 、电流 I 和电弧燃烧时间 Δt 密切相关,一般采用下式计算电弧能量^[17]

$$E = \sum_{i=1}^n (UI \Delta t) \quad (4)$$

滚动实验后,使用线切割将圆盘试样磨损区切割成 10 mm × 10 mm × 4 mm 的块体,使用超声波在无水乙醇中清洗样品 30 min。为了初步检测接触表面的损伤程度,首先使用光学显微镜(OM, DMi 8C, Leica, Germany)对试样进行了观察。采用白光干涉三维形貌仪(White Light Interference 3D Profilometer, Nano Focus μ surf expert, Germany),扫描电子显微镜(SEM, VEGA 3 SBH, TESCAN, Czech)观察摩擦副表面损伤形式。使用能谱仪(EDS, EDAX Octane SDD Series, USA)分析摩擦副表面的元素成分及含量。

2 结果与讨论

2.1 不同转速下导电性能和摩擦学性能的演变规律

图 3a 为在不同转速条件下滚动载流摩擦副的实时电流的变化规律。在转速为 4 r/min 时,试验持续 4 h(960 转),电流十分稳定未出现波动现象。在转速为 240 r/min 时,摩擦副运行 14 000 转,电流仍然保持稳定。在 300 r/min、400 r/min 和 600 r/min 的高速下,分别经过 4 800 转(16 min)、4 000 转(10 min)和 2 400 转(4 min)后,电流会出现明显的脉

冲波动, 而且波动产生之后会持续发生。图 3b 所示为在不同转速条件下电流波动性的变化曲线。在转速为 4 r/min 和 240 r/min 时, 电流的稳定性系数分别为 0.02% 和 0.15%, 电流比较稳定。在较高的转

速下, 摩擦副表面出现电流脉冲后电流稳定性系数会出现显著增加, 分别增加至 1.65%、1.72%、3.30%。严重的电流波动意味着滚动载流摩擦副丧失了导电功能。

图 3 不同转速对滚动载流摩擦副导电性能的影响

图 4a 为在不同转速条件下载流摩擦因数的变化规律。由图 4a 的实时数据曲线可以看出载流摩擦因数并未表现出类似于电流的剧烈波动。转速从 4 r/min 到 600 r/min, 平均载流摩擦因数从 0.169 逐渐降到 0.050。图 4b 为在不同转速条件下载流摩擦

因数波动性的变化曲线。随着转速的增加, 摩擦因数的波动性呈现增加的趋势。特别在 600 r/min, 摩擦因数波动性超过 10%, 表明高转速下接触稳定性下降。

图 4 不同转速对滚动载流摩擦副摩擦学性能的影响

2.2 转速对摩擦学性能和导电性能的影响

图 5 统计了转速从 4 r/min 增加到 600 r/min 时平均机械摩擦因数、平均载流摩擦因数和接触电阻的变化规律。图 5a 显示, 电流为 0 A 时的平均机械摩擦因数分别为 0.124, 0.069, 0.037, 0.024 和 0.016; 电流为 1.5 A 时的平均载流摩擦因数分别为 0.169, 0.127, 0.098, 0.088 和 0.050。前人研究表明: 当转速逐渐升高时, 摩擦副表面微凸峰接触时间变短,

啮合程度低, 摩擦副表面没有足够的时间发生黏着, 因此, 摩擦因数逐渐降低^[5, 19-21]。另一明显的结果是相同转速下载流摩擦因数总是高于机械摩擦因数, 可能与载流摩擦副表面焦耳热引起的黏着有关^[11, 22-23]。图 5b 显示, 载流 1.5 A 时的平均接触电阻从 0.590 Ω 增大到 0.740 Ω 。载流表面接触电阻的增加可能与氧化导致的膜电阻有关^[17], 后文将详细分析表面氧化程度。

图 5 转速对载流摩擦副平均摩擦因数和平均接触电阻的影响

2.3 转速对燃弧率和电弧能的影响

采用数码摄像机对试验过程全程录像, 记录了不同工况下的摩擦电弧影像。图 6 为在转速为 600 r/min 条件下不同时间节点的电弧照片。在滚动实验开始阶段并未出现电弧现象。滚动 4 min 后,

摩擦副接触区域出现微小的电弧跳动。随着滚动时间进一步延长, 电弧跳动越来越明显。试验进行 10 min 后可观察到非常明显的电弧脉冲。电弧的出现(图 6)与实时电流的脉冲波动(图 3a)相对应, 电弧放电是滚动导电功能失效的主导因素。

图 6 转速为 600 r/min 时不同时间的电弧影像

图 7 为不同转速下的燃弧率数值。转速为 4 r/min 和 240 r/min 的试验进行两个小时, 并未发现有电弧放电, 同时实时电流曲线也未显示脉冲波动, 因此燃弧率为 0。当转速为 300 r/min 时, 试验 16 min 时开始观察到电弧, 对应的燃弧率为 0.203%。当转速为 400 r/min 时, 试验 10 min 时观察到电弧放电, 对应的燃弧率为 0.156%。当转速增加到 600 r/min 时, 试验 4 min 后即可观察到电弧, 对应的燃弧率为 0.172%。图 7b 统计了不同转速条件下的平均燃弧率, 随着转速 300 r/min 增加到 600 r/min, 平均燃

弧率从 0.895% 增加到 9.214%。

图 8a 为转速 600 r/min 时 7.2 min 至 7.6 min 时段内的实时伏安曲线。当出现电弧时, 实时电流曲线会出现向下的脉冲波动, 实时电压会产生向上的脉冲波动。电弧能量是指出现电弧的时间段 Δt (如图 8a 虚线标记部分) 与电流 I 电压 U 的乘积。图 8b 显示, 转速从 300 r/min 增加到 600 r/min, 平均电弧能量从 0.350 mJ 增加到 0.788 mJ。由此可知, 高转速促进电弧产生, 平均燃弧率和平均电弧能量均会增加。

图7 相同电流不同转速条件下的燃弧率

图8 相同电流不同转速条件下的电弧能量

载流摩擦副的接触实质上是表面微凸峰之间的接触。研究表明:当转速较低时,摩擦副表面微凸峰接触时间久,啮合程度较好,形成稳定的接触导电状态,此时摩擦因数较高但没有电弧产生;当转速逐渐升高时,摩擦副表面微凸峰接触时间短,啮合程度差,再加上高速下系统振动等因素,会产生接触失稳现象^[19-21]。此时摩擦因数平均值降低但波动性增加(图4)。高转速下不稳定的接触可能提供了放电间隙,诱发较高的自感电动势,接触不稳定将导致电接触面积变小,接触处的电流密度增加,摩擦副之间形成较高的电场强度。在电场作用下,电子碰撞产生大量新的电子和正离子,摩擦副间形成电离气体通道,从而使间隙击穿,导致空气电离,从而形成电弧^[11, 24-25]。另外,当摩擦速度较高时,摩擦热会促进电子发射,高速摩擦容易诱发电弧^[26]。

放电间隙是电弧产生的必要条件,此时摩擦副处于电接触失稳状态,摩擦副两端电压升高,电流降低(图8a虚线标记部分)。电弧放电过程具

有高强度、瞬时性,因而电压和电流信号会快速恢复,在实时的伏安曲线中产生一系列脉冲信号。同时,电弧温度超过 10 000 K,放电区域的瞬时高温远远超过铜的熔点(纯铜的熔点是 1 083 ℃)^[27]。铜在电弧高温作用下会产生熔融和氧化,在摩擦副表面形成大量的烧蚀坑^[28-29]。因此,电弧对摩擦副导电品质和材料损伤均有负面影响。

2.4 转速对损伤机制的影响

为分析摩擦副表面的损伤机制,首先观察了试样的三维形貌。图9a为原始空白试样表面形貌,表面只有少量砂纸打磨过的轻微痕迹。图9b为低转速时的载流摩擦表面,试样表面可以观察到轻微的摩擦痕迹,形貌波动约为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。图9c为高转速时下电弧烧蚀坑的表面轮廓,观察到试样表面存在蜂窝状烧蚀坑,图9c中烧蚀坑直径约为 $20 \mu\text{m}$,深度大约 $10 \mu\text{m}$ 。因此,电弧产生后摩擦副表面损伤机制发生新的变化。本文进一步利用金相显微镜、扫描电镜观察磨损表面的形貌,使用能谱仪分析表面成分,结果见图10。

图 9 不同工况条件下的试样表面三维形貌图

图 10a 为原始空白试样表面, 表面上残留着一些较细的砂纸打磨的磨痕, 区域 1 的 O:Cu 原子比仅为 0.037。图 10b 为转速为 4 r/min 时的试样表面, 通过金相显微镜和扫描电镜可以观察到轻微的机械磨痕, 区域 2 的 O:Cu 原子比为 0.089。图 10c 为转速为 300 r/min 时的试样表面, 金相显微镜显示其表面已失去金属光泽, 扫描电镜下可以观察到一些烧蚀坑, 区域 3 的 O:Cu 原子比为 0.116。图 10d 为转速为 600 r/min 时的试样表面, 铜试样表面变暗并出现黑褐色斑块。扫描电镜观察到摩擦副表面存在大量随机分布的烧蚀坑, 区域 4 的 O:Cu 原子比为 0.138。转速较低时, 摩擦副表面微凸峰之间的啮合

程度较好, 形成良好的接触稳定状态, 滚动摩擦副损伤机制主要以机械磨损为主(图 10b); 随着转速的升高, 摩擦副表面微凸峰之间不稳定的接触可能提供了放电间隙, 高速下容易诱导电弧的产生, 滚动摩擦副损伤机制转变为机械损伤和电弧烧蚀并存(图 10c 和图 10d)^[20-21]。随着转速的增加, 摩擦副表面的 O:Cu 比例越来越高, 氧化越来越严重, 与电弧产生的高温烧蚀有关^[8, 30]。在电流和摩擦的参与下, 空气环境中水蒸气与摩擦表面的铜分别发生阳极氧化和摩擦氧化, 也会促使表面氧化程度上升^[8-9]。表面氧化将导致滚动配副的接触电阻上升(图 5b), 导电能力下降。

图 10 在相同电流不同转速下试样磨损表面形貌和 EDS

本文采用铜盘-铜盘对滚摩擦副, 研究了转速对滚动载流摩擦性能规律和材料损伤机制的影响。转速高于 300 r/min 时观察到电弧放电现象, 且燃弧率和电弧能随着转速增加不断升高。电弧导致摩擦副损伤机制由低转速时的机械损伤转变为高转速时的机械损伤和电弧烧蚀并存, 同时导致电流剧烈波动。

因此, 电弧放电是高转速下滚动载流摩擦副导电性能失效和材料损伤的关键因素。该结果可为滚动载流摩擦副加速寿命试验和寿命判据提供理论支撑。此外, 刚性接触的接触力不具备自适应能力, 高转速容易导致接触失稳和电弧, 而且铜盘配副质量过大, 本文盘-盘刚性接触形式不适用于高转速导电旋

转工况。后续研究中我们将设计弹性接触滚动载流摩擦副,改善高转速下的接触失稳现象。

3 结论

(1) 电流 1.5 A 时,随着转速从 4 r/min 增加到 600 r/min,平均摩擦因数从 0.169 逐渐降低到 0.050;在相同转速下,载流摩擦因数大于电流为 0 时的机械摩擦因数。

(2) 电流 1.5 A 时,随着转速 300 r/min 增加到 600 r/min,摩擦界面产生电弧放电,平均燃弧率从 0.895% 增加到 9.214%,平均电弧能量从 0.350 mJ 增加到 0.788 mJ。同时,实时电流产生剧烈脉冲波动,平均电流波动系数从 0.556% 增加到 1.631%。

(3) 电弧导致摩擦副损伤机制由低转速时的机械损伤转变为高转速时的机械损伤和电弧烧蚀并存,电弧烧蚀表面丧失金属光泽,并可观察到烧蚀坑和表面氧化。

参 考 文 献

- [1] LIU H F, NIE Y M, CHEN K, et al. Carbon brush wear of radar tachometer identification technology based on eigen value analysis in time domain [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 602-605: 1883-1886.
- [2] CHEN G X, YANG H J, ZHANG W H, et al. Effect of the strip inclination angle on the friction and wear behavior of contact strip against contact wire with electric current [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 2013, 227(12): 1406-1417.
- [3] WEI W F, JIE W, GAO G Q, et al. Study on pantograph arcing in a laboratory simulation system by high-speed photography [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2438-2445.
- [4] HUANG S, FENG Y, LIU H, et al. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS₂-Graphite-WS₂ nanotubes composites in air and vacuum conditions [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 560: 685-692.
- [5] HUANG Z Y, ZHAI H X, LI M Q, et al. Friction behaviors and effects on current-carrying wear characteristics of bulk Ti₃AlC₂ [J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(2): 300-307.
- [6] 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.
- [7] WILLIAMR J J, JANSEN M J. *Space tribology* [M]. Ohio: Glenn Research Center, 2000.
- [8] SUN Y X, SONG C F, LIU Z L, et al. Effect of relative humidity on the tribological/conductive properties of Cu/Cu rolling contact pairs [J]. *Wear*, 2019, 436: 203023.
- [9] SUN Y X, SONG C F, LIU Z L, et al. Tribological and conductive behavior of Cu/Cu rolling current-carrying pairs in a water environment [J]. *Tribology International*, 2020, 143: 106055.
- [10] JAYASHREE P, FEDERICI M, BRESCIANI L, et al. Effect of steel counterface on the dry sliding behaviour of a Cu-Based metal matrix composite [J]. *Tribology Letters*, 2018, 66(4): 123.
- [11] ZHANG Y Z, YANG Z H, SONG K X, et al. Triboelectric behaviors of materials under high speeds and large currents [J]. *Friction*, 2013, 1(3): 259-270.
- [12] XIE X L, ZHANG L, XIAO J K. Sliding electrical contact behavior of AuAgCu brush on Au plating [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(9): 3029-3036.
- [13] 丁涛, 王鑫, 陈光雄, 等. 120~170km/h 条件下碳滑板/铜接触线摩擦磨损性能试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(16): 36-40.
DING Tao, WANG Xin, CHEN Guangxiong, et al. Experimental study on friction and wear behavior of carbon strip/copper contact wire at speeds of 120~170 km/h [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 36-40.
- [14] 戴振东, 张永振, 黄肖飞, 等. 一种滚动载流摩擦磨损试验机: 中国, CN107014708B [P]. 2017-03-22.
DAI Zhendong, ZHANG Yongzhen, HUANG Xiaofei, et al. Rolling current-carrying friction abrasion tester: China, CN107014708B [P]. 2017-03-22.
- [15] JOHNSON K L. *Contact mechanics* [M]. London: Cambridge University Press, 1987.
- [16] ONO K J, MIFUNE T, MESHII M. Yield stress increase in electron irradiated copper [J]. *Philosophical Magazine*, 1968, 17: 235-240.
- [17] 张永振, 宋克兴, 杜三明. 载流摩擦学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Yongzhen, SONG Kexing, DU Sanming. *Current-carrying tribology* [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [18] 王婧, 张文轩. 高速铁路弓网燃弧率评价标准探讨 [J]. *铁道技术监督*, 2017, 45(1): 7-9, 16.
WANG Jing, ZHANG Wenxuan. Discussion on evaluation standard of pantograph catenary arcing rate of high speed railway [J]. *Railway Quality Control*,

- 2017, 45(1): 7-9, 16.
- [19] JAYASHREE P, TURANI S, STRAFFELINI G. Effect of testing conditions on the dry sliding behavior of a Cu-Based refractory composite material [J]. *Tribology International*, 2019, 140: 105850.
- [20] WEI Q, GAO W, YANG Q, et al. Material removal and tribological behaviors of fused silica scratched by rockwell Indenters with different tip radii [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2019, 514: 90-97.
- [21] ZHAI H X, HUANG Z Y. Instabilities of sliding friction governed by asperity interference mechanisms [J]. *Wear*, 2004, 257(3): 414-422.
- [22] HUANG S Y, FENG Y, LIU H J, et al. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS₂-graphite-WS₂ nanotubes composites in air and vacuum conditions [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 560: 685-692.
- [23] KUBOTA Y, NAGASAKA S, MIYAUCHI T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current [J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1492-1498.
- [24] ZHAO H, FENG Y, ZHOU Z, 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.
- [25] DENG C, YIN J, ZHANG H, et al. Dynamic variation of arc discharge and its effect on corrosion direction under current-carrying sliding [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2018, 233(3): 380-392.
- [26] DENG T, CHEN G X, BI J, et al. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary systems [J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 1629-1636.
- [27] LANCASTER J F. The physics of welding [J]. *Physics in Technology*, 1984, 15(2): 73-79.
- [28] DENG T, CHEN G X, LI Y M, et al. Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway [J]. *Tribology International*, 2014, 79: 8-15.
- [29] HE Q, YANG H, CHEN L S, et al. Arc erosion and morphological characters of Ag/LSCO(12) contacts by different methods [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 815: 80-85.
- [30] 宋晨飞, 孙毓明, 孙逸翔, 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 Chenfei, SUN Yuming, SUN Yixiang, et al. Failure of Cu rolling triboelectric pairs under various load and voltage [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(9): 63-70.

作者简介: 李家伟, 男, 1993 年出生。主要研究方向为滚动载流摩擦。
E-mail: lijiawei1208@163.com

宋晨飞(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。
主要研究方向为载流摩擦、微观摩擦。获第 5 届上银优秀机械博士论文
奖优秀奖。
E-mail: cfsong@haust.edu.cn