

文章编号:1005-0523(2021)04-0113-12



## 弓网系统载流摩擦磨损研究现状

沈明学<sup>1,2,3</sup>, 李含欣<sup>2</sup>, 季德惠<sup>2,3</sup>, 熊光耀<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:**随着电力传输系统、现代铁路交通系统、工业发电机等领域的发展,受电弓/接触网系统(简称弓网系统)的载流摩擦行为备受关注。弓网系统是电力机车的关键受流部件,受电弓在工作时需要从接触网获取电能,其稳定性和受流质量关系到电力机车的可靠、良好运行。文章介绍了载流摩擦的基本特征及其评价分析手段,阐述了弓网系统中4个主要因素(摩擦学参数、载流参数、环境工况、摩擦副材料)对其载流摩擦磨损行为的影响,重点探讨了弓网系统载流摩擦过程中的主要磨损机制及电弧烧蚀的影响,最后对全文进行总结并提出了今后的研究方向。

**关键词:**弓网系统;载流摩擦;摩擦磨损;电弧烧蚀

中图分类号:U226

文献标志码:A

本文引用格式:沈明学,李含欣,熊光耀. 弓网系统载流摩擦磨损研究现状[J]. 华东交通大学学报,2021,38(4):113-124.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.012

## Research Status of Current-Carrying Friction and Wear in Pantograph-Catenary System

Sheng Mingxue<sup>1,2,3</sup>, Li Hanxin<sup>2</sup>, Ji Dehui<sup>2,3</sup>, Xiong Guangyao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Vehicles and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 30013, China; 2. School of Materials Science & Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. National Key Laboratory of Rail Transit Infrastructure Performance Monitoring and Guarantee, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** With the development of power transmission system, modern railway transportation system, industrial generators and other fields, the current-carrying friction behavior of pantograph/catenary system (hereinafter referred to as pantograph/catenary system) has attracted much attention. The pantograph-catenary system is the key current receiving part of the electric locomotive. The pantograph needs to obtain electric energy from the catenary when working. Its stability and current receiving quality are related to the reliable and good operation of the electric locomotive. This paper introduces the basic characteristics of current-carrying friction and its evaluation and analysis methods, and expounds four main factors in pantograph-catenary system, namely, tribological parameters, current-carrying parameters, environmental conditions and friction pair materials. The main wear mechanism and the influence of arc ablation in the current-carrying friction process of pantograph-catenary system are mainly discussed. Finally, the full text is summarized and the future research direction is proposed.

收稿日期:2021-07-21 © 2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目:国家自然科学基金(51905172,52061012);江西省自然科学基金(20192BAB206026)

作者简介:沈明学(1982—),男,教授,博士,研究方向为摩擦学及表面工程。E-mail:shenmingxue@126.com。

**Key words:** pantograph–catenary system; current–carrying friction; frictional wear; arc erosion

**Citation format:** SHENG M X, LI H X, XIONG G Y. Research status of current–carrying friction and wear in pantograph–catenary system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 113–124.

载流摩擦磨损是指两个摩擦副在电场中进行相对运动时, 伴随有电流通过的一种摩擦磨损行为, 广泛存在于电力传输系统、现代铁路交通系统、工业发电机、电磁轨道炮等领域<sup>[1-2]</sup>。弓网系统(见图1)工作时, 受电弓需要从接触网获取稳定的电能, 它们之间的电接触是一种典型的载流摩擦学行为, 是弓网间实现优异载流质量, 即稳定电信号传输的关键<sup>[3]</sup>。有必要系统、深入地研究弓网系统的载流摩擦磨损性能及其电弧烧蚀磨损行为, 对促进我国高速铁路的发展具有十分重要的现实意义<sup>[4]</sup>。

在20世纪20年代, 人们已经开始了载流摩擦磨损方面的研究<sup>[5]</sup>。与无载流的机械摩擦相比, 由于电因素的参与, 载流摩擦磨损的摩擦过程变得更加复杂, 其摩擦磨损行为主要由摩擦副的材料成分、接触表面的温度、机器的设置参数(包括摩擦学参数和载流参数)以及周围环境等因素的主导<sup>[6]</sup>。摩擦副材料在相对运动过程中易产生电弧, 而由电弧引起的烧蚀现象不仅会导致接触表面材料受热熔化, 发生蒸发、流动和喷溅等现象, 还会导致接触副表面的不平滑, 产生裂纹、坑洼等失效现象, 进而严重影响弓网间的受流, 甚至缩短其使用寿命<sup>[7-9]</sup>。载流摩擦问题是载流和摩擦的耦合问

题<sup>[10]</sup>, 研究的最终目的是在满足一定经济效益的前提下, 提高弓网接触的可靠性以及弓网材料的工作寿命<sup>[11-12]</sup>。

本文综述了摩擦学参数、载流参数、环境工况、摩擦副材料4个主要影响因素对弓网系统载流摩擦磨损性能的影响, 并重点探讨了载流摩擦的磨损机制和电弧烧蚀的影响, 深入分析了弓网系统的表面行为, 以期为进一步揭示弓网系统载流摩擦副的失效行为和提高弓网材料使用寿命提供理论参考。

## 1 载流摩擦磨损的研究

### 1.1 载流摩擦的基本特征

摩擦副的接触平面从微观上来说都是凹凸不平的, 其接触区域由一些分散的微小接触点构成, 这些接触点对载流摩擦接触起着导流和负载的作用。同时, 运动过程中产生的热量(摩擦热和焦耳热)会不均匀地分布在材料表面, 且大部分在接触点, 导致其实际接触应力更高, 表现出“负载集中”效应。而当接触点不能继续支撑时, 即遭到破坏, 直到另一个新的接触点重新支撑负载, 反复的失效和再支撑过程构成了载流摩擦的磨损行为<sup>[1, 13]</sup>。

载流摩擦学包括电接触学和摩擦学, 是载流和摩擦耦合的问题<sup>[10]</sup>。根据系统构图为基础, 得到了载流摩擦磨损系统的功能平面图, 如图2所示。载流摩擦磨损系统主要由两对摩擦副及其界面空间(包括过渡层和环境介质等)组成<sup>[14]</sup>。所有功能平面可分为材料平面、热平面和功平面这3个一级功能平面。其中, 材料平面分为摩擦副材料、介质材料和摩擦产物等二级功能平面; 热平面包括机械摩擦、电气摩擦和化学反应等二级功能平面; 功平面包括相对运动过程中摩擦副之间功和电能的传递等二级功能平面。载流摩擦副的相对运动会引起功、热以及物质的传递, 并反映在相应的功能平面。

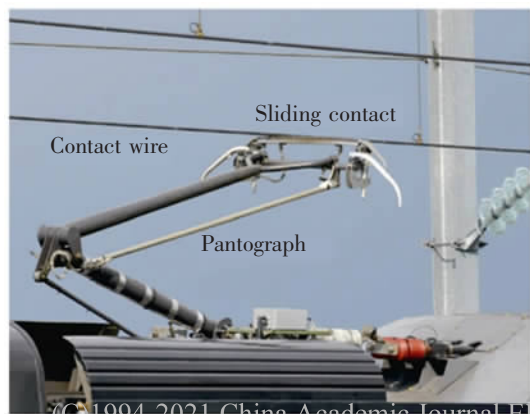


图1 受电弓与接触线滑动接触

Fig1 Sliding contact between pantograph and contact line

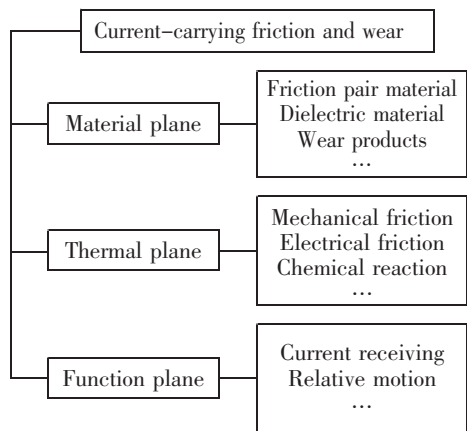


图 2 载流摩擦磨损系统功能平面图

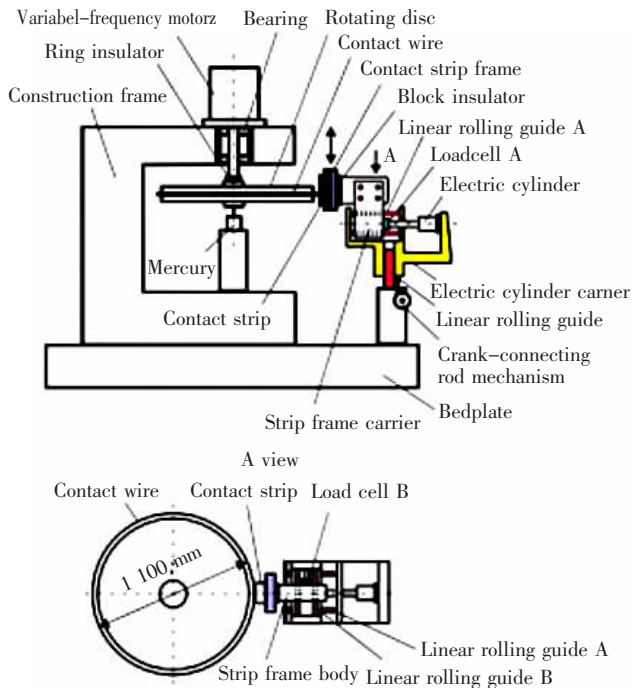
Fig2 Functional plane diagram of current-carrying friction and wear system

1.2 评价分析手段

根据摩擦副的接触形式,载流摩擦磨损试验机主要分为以下 4 种:销-盘式<sup>[15]</sup>、盘-盘式<sup>[16]</sup>、环-块式<sup>[17]</sup>和往复式<sup>[18]</sup>。以西南交通大学的环-块式滑动摩擦试验机为例:将铜基接触线附在直径为 1 100 mm 的旋转盘(功率为 48 kW,转速为 300 r/min)上,碳滑块尺寸为 135 mm×30 mm×24 mm,试验机示意图见图 3,主要研究弓网系统的载流摩擦学性能。该试验机的尺寸较大,便于分析重载大电流工况下弓网的摩擦学性能,且滑板与接触网线路之间“之”字型相对运动可通过两个直向导轨实现,贴合弓网系统在实际中的应用。

载流摩擦特性的评价指标主要包括摩擦磨损性能和电接触性能<sup>[13]</sup>。摩擦磨损性能的评价指标主要是摩擦系数和磨损率,且需要分析摩擦过程中磨损表面的磨损程度和磨损机制的变化。对于电接触性能来说,目前没有公认的评价指标,主要的评价方法有电流法、接触电阻法等。另外为评价电弧放电的程度,还引入了电弧放电能量<sup>[20-21]</sup>、起弧率<sup>[22]</sup>、载流效率<sup>[23-24]</sup>和载流稳定性<sup>[25]</sup>等指标。电弧放电能量  $E$  是衡量电弧放电程度的重要参数。目前,一些学者将电弧放电能量定义为载流摩擦副之间的电压降  $U$  与电流  $I$  的乘积,在载流摩擦试验的总时间  $T$  范围内进行积分后,再除以滑动距离  $d$ <sup>[26]</sup>,可用辛普森积分法<sup>[27]</sup>或梯形数值积分法<sup>[28]</sup>进行计算,计算公式为

$$E = \frac{\int UIdt}{d} \quad (1)$$



(a) Diagram of the tester

(b) Diagram of the electrical circuit

图 3 环-块式滑动载流摩擦试验<sup>[19]</sup>

Fig 3 Ring-block sliding friction test<sup>[19]</sup>

起弧率  $\eta$  是衡量载流摩擦过程中起弧现象的一个标准,其大小为载流摩擦过程中起弧时间  $t$  与载流摩擦总时间  $T$  的比值,计算公式为

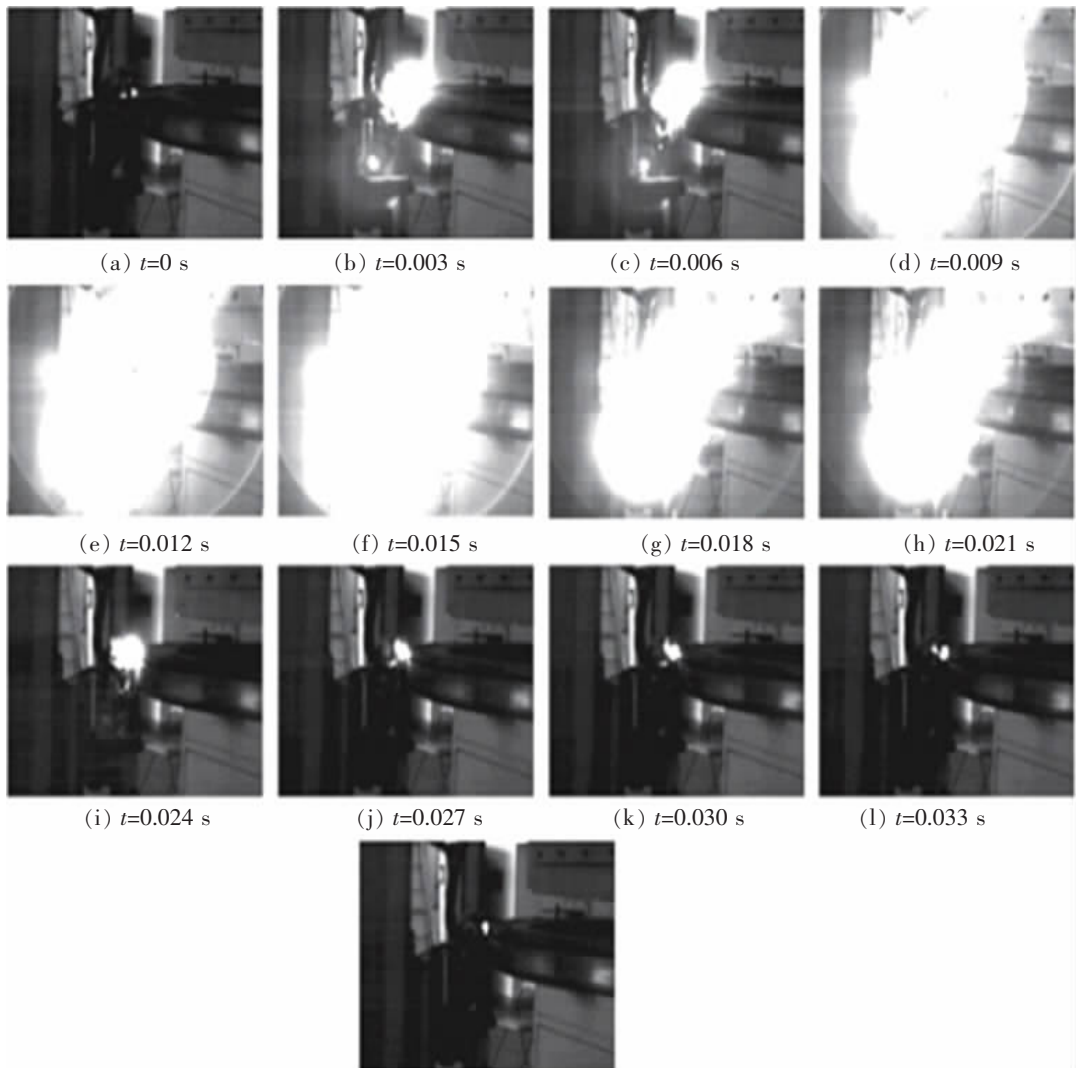
$$\eta = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (2)$$

载流效率  $\mu$  是相对运动过程中摩擦副受流力的一个重要参数,其大小为载流摩擦中实际传输电流的平均值  $I_i$  与额定电流值  $I_0$  的比值,计算公式为

$$\mu = \frac{\bar{I}_i}{I_0} \times 100\% \quad (3)$$

为了揭示电弧放电现象的演变过程以及严重程度,学者们采用了多种方法对其进行表征。例如,通过高速数码摄像机<sup>[26]</sup>拍摄电弧放电过程的照片(如图4所示),可以直观地表现电弧放电起弧、燃弧和熄弧的过程;通过加速度传感器<sup>[28]</sup>来检测弓网接触的振动情况以显示弓网离线的程度;通过红外热像仪<sup>[27]</sup>来检测电弧放电过程中接触区域的温度场变化;通过光敏元件<sup>[29]</sup>来测量电弧放电过程中的光强变化;通过拉曼光谱仪<sup>[30]</sup>来分析碳的分子结构以揭示碳滑板表面的石墨化程度等。此外,周培勇等提出了一种在线测量弓网电弧起弧和熄弧

距离的方法<sup>[31]</sup>,将电流波形开始出现畸变的距离定义为起弧距离,定义了电流波形开始出现畸变相对于畸变结束的绝对位移为弓网电弧熄弧距离。Zhang在研究中定义了4种电弧状态<sup>[29]</sup>:稳定接触下无燃弧状态(见图5(a))、燃弧状态(见图5(b)),以及不稳定接触下随机电弧(见图5(c))和离线电弧(见图5(d))。其中,稳定接触意味着电流没有受到电弧干扰,此时电气性能不受影响,但电弧烧蚀无法避免。不稳定接触下电弧放电不仅会导致电弧烧蚀,还会影响载流效率,尤其是连续的大电弧放电,即离线电弧,会造成弓网电流传输的暂时中断。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图4 电弧放电过程的记录,  $F_n=60\text{ N}$ ,  $I=100\text{ A}$ <sup>[26]</sup>  
Fig.4 Recording of arc discharge process,  $F_n=60\text{ N}$ ,  $I=100\text{ A}$ <sup>[26]</sup>



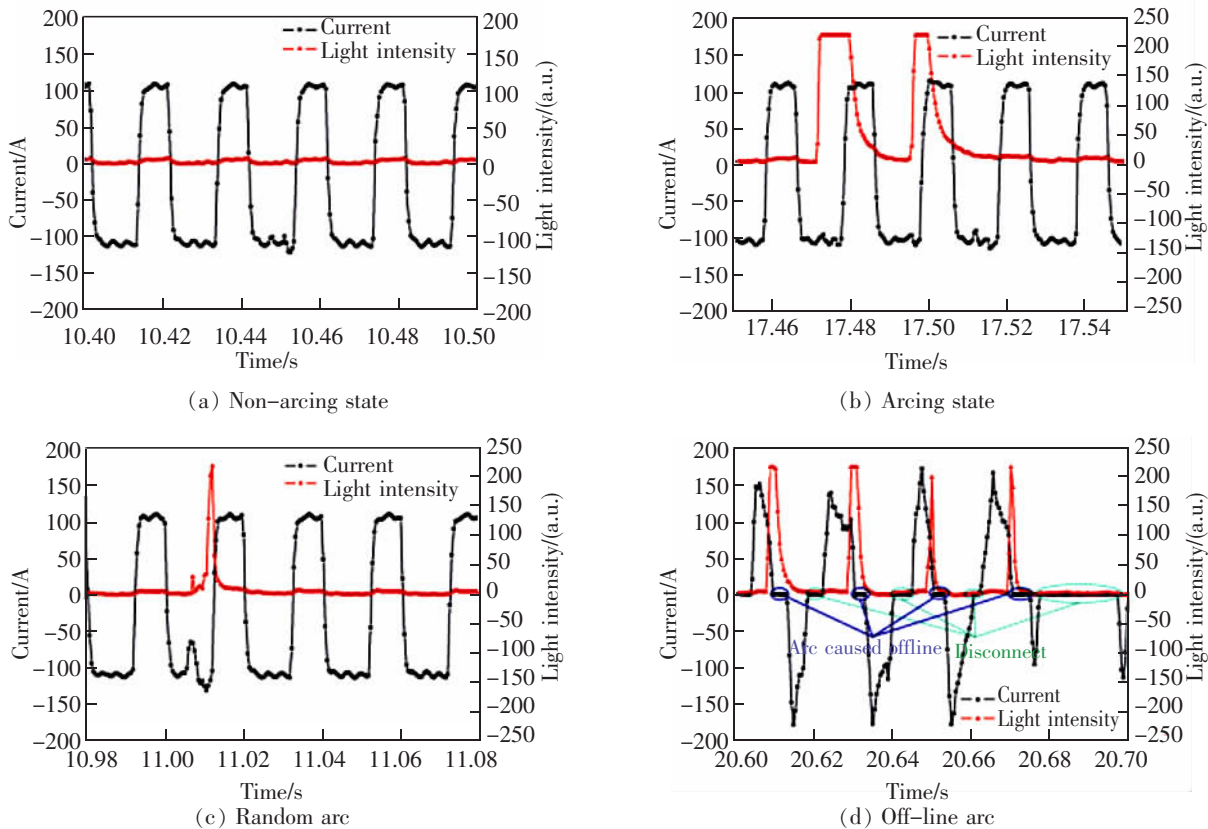


图 5 电流和电弧放电时程记录 ( $v=100 \text{ km/h}, B=41 \text{ N}, f=0.426 \text{ Hz}, I=120 \text{ A}$ )

Fig.5 Time history records of current and arc discharge ( $v=100 \text{ km/h}, B=41 \text{ N}, f=0.426 \text{ Hz}, I=120 \text{ A}$ )

## 2 影响条件

### 2.1 摩擦学参数

一般来说,对载流摩擦性能影响较大的摩擦学参数主要包括法向载荷和相对速度。当法向载荷较大时,由于法向载荷的增加使得碳滑板和接触线之间的接触更加紧密,这在一定程度上抑制了离线电弧的发生,减少了电弧烧蚀现象,从而有助于实现弓网间的良好受流,同时抑制碳滑板的磨损<sup>[32-33]</sup>。然而,过大的法向载荷会增加碳滑板之间的机械磨损,故而存在一个最佳的法向载荷值,使得碳滑板的磨损最小<sup>[7]</sup>。陈忠华等<sup>[34]</sup>通过对试验数据进行拟合来建立磨损率的预测模型,并通过该模型计算了弓网系统滑动电接触的最优载荷。从该角度出发,陈光雄等模拟了服役过的碳滑板与被磨损的扁平接触线之间存在一定倾斜角时<sup>[35]</sup>,倾斜角的存在可以减少二者之间的接触面积,导致单位面积接触压力的增加,这相当于增加了法向载荷,但是碳滑板的磨损量反而减少。此外,陈忠华等还研究了波动压

力载荷<sup>[36]</sup>的影响,发现压力波动幅度的增大会显著提高电弧烧蚀的程度和接触表面温度,导致接触面粗糙不平,磨损愈加严重,载流性能变差,从而影响机车的稳定运行。但在波动频率范围较小(1~5 Hz)时,压力波动频率的变化对弓网的磨损和电流传导影响较小。Zhang 等研究了纯碳滑板载流滑动过程中动态接触力对电弧放电的影响<sup>[37]</sup>,动态接触力变化的计算公式如式(4)。研究发现纯碳滑板在动态接触力的作用下会周期性地产生电弧放电,其放电周期与动态接触力的周期一致,且电弧放电存在 2% 左右的起弧率临界点,低于 2% 时纯碳滑板能保持优良的载流能力,高于 2% 时弓网系统的载流质量会急剧恶化。

$$F(t)=70+B \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

载流摩擦副相对运动速度的提高易使弓网间的接触不平稳,导致接触面振动加剧、温度升高,进一步加剧电弧放电现象,最终导致电弧烧蚀磨损加剧<sup>[38-39]</sup>。杨红娟等模拟了现代电气化铁路中受电弓碳滑板上架空线路的交错运行,研究了振动<sup>[40]</sup>和往

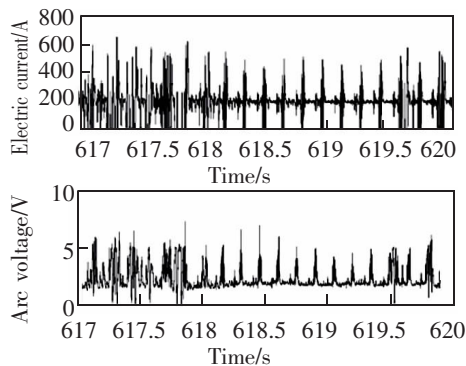
复运动距离<sup>[41]</sup>对弓网系统的影响,发现碳滑板低频振动引起的接触损耗是导致电弧放电的主要原因之一。弓网运动往复距离的增大会导致机械磨损的减小和烧蚀磨损的增大,尤其是往复距离大于30 mm时,在往复滑动的两个极限位置会存在分层磨损、氧化磨损和来自接触线中的铜材料转移。因此,在往复滑动的两个极限位置保持接触副的良好接触是降低纯碳滑板磨损的直接途径。进一步地,武云龙等对弓网系统中拉出值<sup>[42]</sup>对载流磨损性能的影响进行了研究,其中,拉出值指的是定位点处接触线偏移受电弓中心的距离,研究发现在载流状态下电弧放电频率和电弧放电能量都会随着拉出值的增大而增大,但是碳滑板的温升会降低。这是由于随着拉出值的增大,一方面碳滑板表面电弧弧根的运动速度越快,这在一定程度上阻止了接触点温度的升高。另一方面,碳滑板表面的散热面积越大,散热效率越高,最终导致碳滑板磨损率的下降。

## 2.2 载流参数

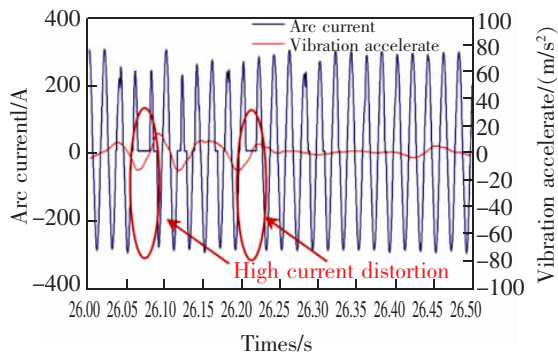
对载流摩擦性能影响较大的载流参数主要包括电流和电压等。其中,电流又包括了电流极性、直流电或交流电、电流大小等。例如,丁涛等通过销-盘试验机研究了电流正负极<sup>[43-44]</sup>对载流摩擦性能的影响,在实验中观察到两种不同的电弧放电现象:当碳滑板与电源阴极相连时,火花放电占主导地位;当碳滑板与电源阳极相连时,以电弧放电为主。电弧放电和火花放电都属于气体放电<sup>[45]</sup>,火花放电是电极间的气体被强电场击穿而产生自激导电的现象,电弧放电是气态带电粒子(如电子或离子)维持导电的现象。电弧放电通常分为直流电弧放电和交流电弧放电。电弧放电会引起电流的变化,当发生离线电弧放电时,直流电流波形的变化幅度(轻微波动的水平线)会加剧,出现不稳定现象,如图6(a)所示。同样,交流电流波形(正弦曲线)也会出现畸变和失真,如图6(b)所示。两者之间没有很大的区别,均会导致电流波形畸变,继而损伤电器<sup>[26]</sup>。

Mei等研究了直流电流<sup>[46]</sup>和高密度交流电流<sup>[27]</sup>对载流摩擦性能的影响,发现碳滑板的磨损率、温升和电弧放电能量会随着电流的增大而随之升高。碳滑板的主要磨损机制包括磨粒磨损、粘着磨损和电弧烧蚀,且以电弧烧蚀为主。Wang等研究了电流对铜浸渍金属化碳与Cu-Cr-Zr合金摩擦学行为的影响<sup>[47]</sup>,发现摩擦系数的稳定状态归因于接触面上

形成了一层润滑膜,且摩擦界面处温度的升高易造成氧化层的形成。由石墨层和氧化层组成的转移膜可以阻止摩擦副的直接接触,降低了摩擦副之间的粘聚力和粘着力。黄海等研究了电压<sup>[48]</sup>对载流摩擦性能的影响,发现随着电压的增大,碳滑板的磨损率和温升会随之增加。此外,低压下的磨损机制以机械磨损为主,并伴有轻微的电弧烧蚀磨损,高压下的磨损机制主要是电弧烧蚀和粘着磨损。进一步增大电压,梅桂明等<sup>[49]</sup>发现随着电压的增大,纯碳滑板的磨损形貌也表现出较大的差异,当电压为0时,表面较为平滑且有光泽,有凹槽和粘着的痕迹;当电压为3.5 V时,表面出现轻微的剥落坑;当电压为167 V时,表面开始出现大量不均匀烧蚀坑和少量裂纹;当电压为667 V时,表面出现较均匀的烧蚀坑;当电压为1352 V时,表面则会出现明显的烧蚀坑,且在烧蚀坑附近出现较大裂纹,如图7所示。



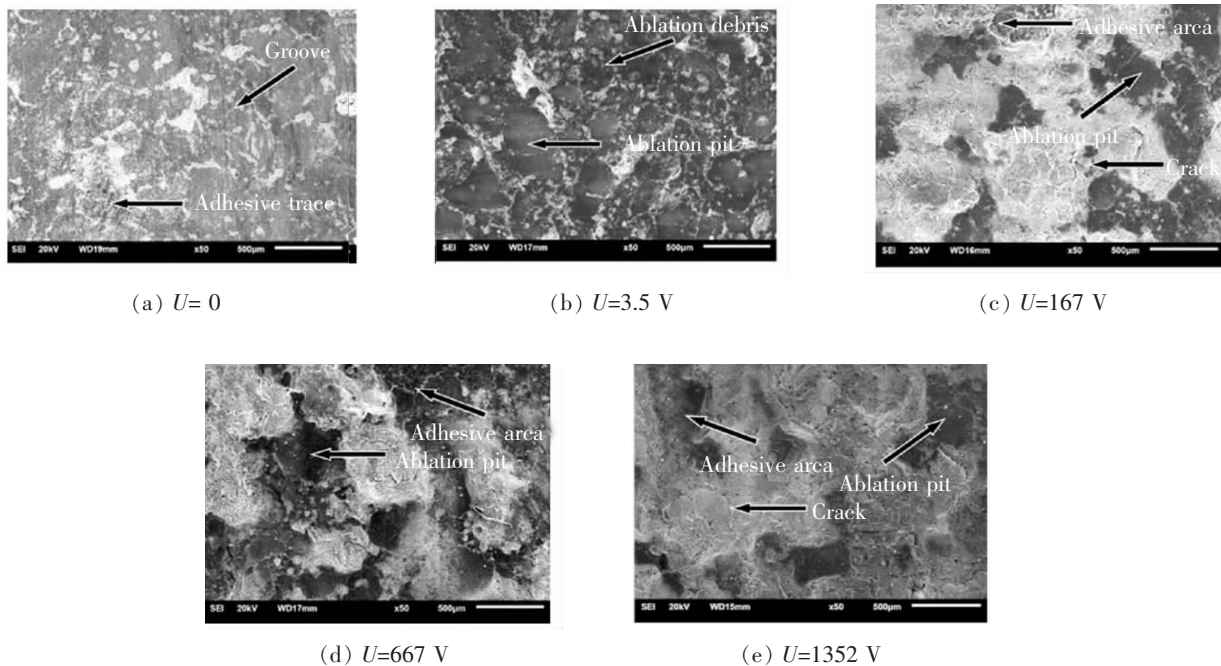
(a) Voltage and current signals during arc generation under DC current ( $I=200\text{ A}$ ,  $F_r=30\text{ N}$ ,  $v=80\text{ km/h}$ )<sup>[46]</sup>



(b) Current and vibration acceleration signals of arc generation under AC current ( $v=350\text{ km/h}$ ,  $I=250\text{ A}$ ,  $F_r=120\text{ N}$ )<sup>[28]</sup>

图6 电弧放电产生的电流变化

Fig.6 Current change caused by arc discharge

图 7 不同电压下磨痕的 SEM 图像<sup>[49]</sup>Fig.7 SEM images of the worn scars for different voltages<sup>[49]</sup>

### 2.3 环境工况

弓网系统是一个开放的摩擦学系统,受电弓滑板和接触网导线间的接触状态会受到复杂多变的环境,如风、沙、雨、雪天气,甚至盐雾、酸雨、沙尘暴等恶劣极端环境条件的影响。

松山晋作等通过洒水模拟了雨天运行时弓网系统的磨耗问题<sup>[50]</sup>,发现载流时产生的焦耳热和电弧热会使水汽化,产生散热效果,显著减轻了磨损,但电弧现象明显增多。王蒙等进行了类似的研究<sup>[51]</sup>,通过在垂直接触面上喷水,并通过阀门控制水量,模拟小雨、中雨和大雨三种天气状况,发现随着降雨量的增加,电弧烧蚀磨损增加。此外,非常薄的水膜可以在一定程度上减少磨耗,改善弓网摩擦副之间的接触性能,但过厚的水膜和垂直滑板表面的浸入力会影响弓网间的电信号传输,导致载流质量变差,且电弧放电现象也会相应增强。张会杰等比较了空气和氮气环境对 C/C 复合材料载流摩擦学性能的影响<sup>[52]</sup>,并从以下两个角度讨论了氮气气氛下摩擦系数更高的原因:一是氮气具有惰性保护作用,摩擦过程中摩擦副材料始终处于直接接触状态,接触表面更加粗糙;而空气条件下,摩擦表面易氧化,在接触表面会形成稳定的氧化膜,使摩擦系数降低。二是在氮气气氛下,摩擦副材料接触表面

的活性较弱,空键键能较高,故而摩擦系数略高。

目前,涉及不同环境工况的摩擦磨损研究较少,主要依靠力学计算和仿真模拟的方式进行理论研究。邢立成结合摩擦试验和仿真计算分别研究了表面覆冰,雾霾和横风 3 种环境对弓网电弧<sup>[53]</sup>的影响,发现覆冰条件下弓网电弧的发生次数会增加,导致受流质量恶化,但同时会降低弓网接触界面的温度,从而减少弓网的摩擦损耗;雾霾条件下会加剧电弧的发生,因为雾霾中的气溶胶、硝酸盐等物质会导致绝缘性能下降,同时雾霾颗粒会在弓网接触表面聚集,更易导致电弧离线;横风条件下会改变电弧的形态,当风力一定大时甚至可以加速电弧的熄灭。此外,张莉娜利用有限元分析软件研究了大风对接触网接触压力变化<sup>[54]</sup>的影响,进而分析了对弓网受流质量及运行安全造成的影响。进一步地,宋洋基于多种力学理论深度研究了环境风下高速铁路弓网动态受流特性<sup>[55]</sup>,建立了接触网波动模型。李运良基于热传导理论研究了弓网电弧对覆冰接触网的<sup>[56]</sup>影响,仿真计算得到了弓网温度分布的影响规律。

### 2.4 摩擦副材料

目前,工业上应用最广泛的受电弓滑板多为碳滑板,包括纯碳滑板和浸金属碳滑板。此外,还有纯



铜滑板、钢滑板、铁基粉末冶金滑板、铜基粉末冶金滑板以及铝包覆碳滑板等。接触线所使用的材料主要有铜合金、铝合金和钢,主要分为硬铜线、硅铜线、镉铜线、银铜线、镁铜线、铝包覆钢线以及铜包覆钢线等<sup>[12]</sup>。

对于碳滑板材料来说,丁涛等将纯碳和浸金属碳滑板分别与纯铜和不锈钢接触线组合对摩<sup>[57]</sup>,发现对于浸金属碳和纯铜配副,由于存在较多的Cu元素,易发生同素材料的转移,即粘着磨损,因此在进行弓网系统选材搭配时应尽量避免选用同素材料。戴利民等研究了几种不同的滑板材料<sup>[58]</sup>,发现纯碳滑板接触区域的亚表层在高温下会被氧化。而浸金属碳滑板材料较为致密,其氧化速度较慢,强度较高,浸金属碳滑板具有更好的载流摩擦性能。此外,对于铜基粉末冶金碳滑板来说,载流摩擦过程中接触区域的温升低于其氧化温度,高磨损率主要是电弧烧蚀对摩擦表面的破坏。对于接触线材料来说,Hu等研究了铜银接触线和纯铜接触线<sup>[59]</sup>对载流摩擦行为的影响,发现铜银接触线的摩擦系数、磨损率和电弧放电能量均高于纯铜接触线。高的电弧放电能量意味着碳滑板与铜银合金接触线之间的摩擦更容易产生电弧放电,而高的摩擦系数是因为铜银接触线的硬度更高,其他变化尚未解释。

此外,徐晓峰等研究了碳滑板中石墨含量<sup>[15]</sup>对载流摩擦行为的影响,发现随着石墨含量的提高,铜/石墨材料的导热率逐渐降低,散热量逐渐减少,随着载流摩擦过程中所产生的热量逐渐增加,材料的性能被严重弱化,甚至发生熔融。当石墨含量较低(质量分数为10%)时,在载流摩擦过程中铜/石墨材料会形成氧化膜和石墨膜,避免了由铜材料高亲和力造成的粘着磨损,材料保持了较好的润滑性能,更适合高速载流摩擦。李雪飞等研究了石墨粒度<sup>[60]</sup>对载流摩擦行为的影响,发现较小的石墨颗粒(45 μm)能够减少电弧的产生,提高复合材料的力学性能,增强摩擦面润滑膜的形成,从而有效地降低摩擦系数和磨损率。Zhao等<sup>[61]</sup>利用化学镀工艺和粉末冶金技术制备了铜/石墨烯复合材料,将不同质量分数比的石墨烯均匀包覆在铜盘基体的表面,再与黄铜球进行往复载流摩擦实验,发现石墨烯的包覆可以降低磨损率,特别是在高的法向载荷下其抗磨效果更加显著。张军伟等利用放电等离子烧结技术制备了铜-石墨梯度复合材料<sup>[62]</sup>,发现非梯度材料

的电弧烧蚀现象严重,且由于电弧的喷溅作用,其电弧烧蚀分布趋于分散,以长条状为主;而梯度铜基复合材料的电弧烧蚀主要发生在出口处,烧蚀面积明显减少。

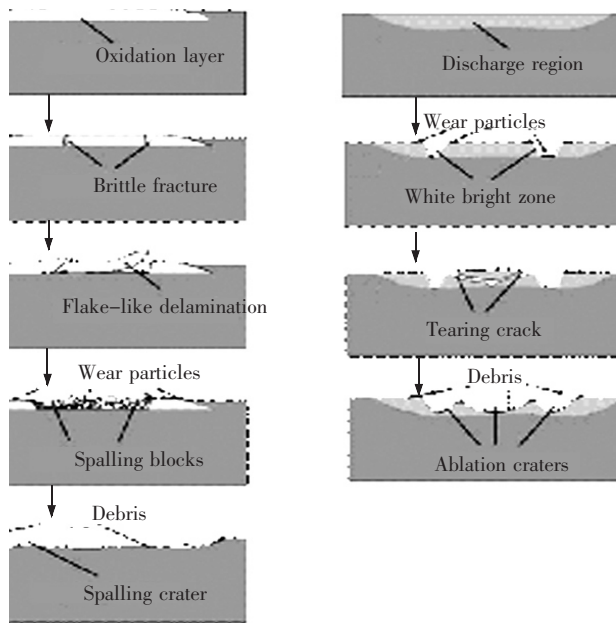
### 3 界面温升和电弧烧蚀

弓网系统载流摩擦过程中主要存在3种热能:电弧放电热、焦耳热和摩擦热,其中,摩擦热的影响最低。焦耳热和电弧放电热会使得接触界面的温度升高<sup>[32,63]</sup>。一方面,温度升高会使得表面材料软化,碳滑板表面的微凸体更易磨损,表面粗糙度降低,摩擦力减小;另一方面,在滑动电接触过程中,碳滑板表面会形成一层均匀致密的氧化膜,起到润滑作用,减少摩擦。然而,温度升高会增加界面材料的磨损<sup>[64]</sup>。此外,当摩擦界面的温度较低时,碳滑板表面的碳膜完整;随着界面温度的升高,碳膜的完整性下降,且界面材料在剪切应力作用下发生软化、突变和脱落,并发生塑性变形、磨粒磨损和疲劳剥落,这促进了第三体磨损;当界面温度高于氧化温度时,界面材料的表面部分氧化,接触表面不规则,产生电弧放电,磨损较为严重。卜俊等研究了温度<sup>[65]</sup>对载流摩擦行为的影响,发现在低温范围内(100~160℃)以磨粒磨损为主,而在高温范围内(200℃以上),材料的磨损机制以粘着磨损为主,且高温会导致碳滑板的摩擦表面生成氧化物和熔融层。上官宝等研究了温度对浸金属碳材料和C/C复合材料两种碳滑板<sup>[25]</sup>的影响,发现随着焦耳热温度的升高,浸金属碳滑板中的金属材料会软化并压在碳滑板的表面,形成金属润滑膜,从而有效地降低浸金属碳滑板的摩擦损耗。然而,随着温度的继续升高,金属材料会熔化、渗入基体或粘附在接触线的表面,最终导致金属润滑膜的消失。对于C/C复合材料来说,高温下C/C复合材料中的纤维碳和沉积碳会升华,并沉积在碳滑板的表面。由于沉积碳具有良好的润滑性,可以有效地降低碳滑板的摩擦损耗,且产生电弧放电的机率也更小。Mei等通过试验数据拟合的方式,指出碳滑板的温升和电弧放电能量呈一定的线性关系<sup>[7]</sup>。

一般来说,载流摩擦过程中最主要的磨损机制包括:电弧烧蚀、磨粒磨损和粘着磨损。此外,丁涛等提出弓网系统的载流摩擦副材料在受热时存在一种磨损机制,即剥层/分层磨损<sup>[66-67]</sup>,其形成机制见图8(a)。首先,当接触表面发生热疲



劳磨损时,接触表面的温度升高,在碳滑板的表面形成了一层薄的氧化层。然后,在热应力、剪应力和法向力的共同作用下,氧化层发生脆性断裂,产生裂纹。之后,裂纹会进一步扩展,并在接触面上会出现片状分层,以及大量的剥落和磨屑。滑动过程中磨屑被去除,形成了剥落坑,且边缘有少量磨屑堆积。弓网系统载流摩擦副的电弧放电会引起电弧烧蚀,其形成机理见图8(b)。电弧放电会在接触表面上形成放电区域,由于电弧烧蚀的作用,放电区域会出现烧蚀坑、白亮层和磨屑。同时,在剪应力和法向载荷的共同作用下,放电区域会出现裂纹。随着裂纹的进一步扩展并连接,在电弧烧蚀坑边缘形成堆积的磨屑。此外,丁涛等指出电弧烧蚀的特征是存在电弧烧蚀坑和暗流线<sup>[68]</sup>。在弓网系统中,应采用冷却措施来降低碳滑板材料的热磨损,特别是应最大限度地抑制离线电弧放电,以延长受电弓碳滑板的使用寿命和更换周期。



(a) Delamination wear (b) Arc erosion

图8 磨损机制形成机理的物理模型<sup>[66]</sup>

Fig.8 Physical model for formation mechanism of delamination wear and arc erosion<sup>[66]</sup>

#### 4 结束语

弓网系统的载流摩擦磨损是一个涉及机械、电气、化学、热传导、电接触等多因素的复杂问题。通过对摩擦学参数、载流参数、环境工况、摩擦副材料

这4个主要影响因素的分析,得出以下主要结论:

1) 对于摩擦学参数,适当的法向载荷可以有效地抑制电弧放电,降低磨损;相对运动速度的提高易使接触面不平稳,导致振动加剧,接触面温度升高,电弧放电严重;

2) 对于载流参数,随着电流和电压的增加,电弧放电频率和强度增大;

3) 对于环境工况,水蒸气或水会通过吸附和化学反应影响摩擦副材料之间地接触状态,特别是氧化物的生成会导致导电性能的恶化;

4) 对于摩擦副材料,应尽量避免使用同素材料作为弓网系统的摩擦配副;适当添加自润滑导电材料,如石墨或者石墨烯,以及一些梯度复合材料的构建可有效改善弓网系统的载流摩擦磨损性能。

弓网系统在载流摩擦过程中的磨损机制较为复杂,受热时以粘着磨损、氧化磨损和剥层/分层磨损为主,电弧放电时以电弧烧蚀、氧化磨损和粘着磨损为主。在整个载流摩擦过程中,弓网系统始终存在着磨粒磨损和材料转移。

然而,目前所使用的载流摩擦试验机大多以自制或改装为主,且使用的摩擦副材料不尽相同,较难实现实验的可重复性和可移植性,进而难以保证基础数据的有效积累。载流摩擦配副的结构和材料还可以进一步深入研究,基于具体的工作参数和实际的环境条件,结合摩擦磨损试验与模拟仿真计算等方式,针对性地开发新型摩擦配副的结构或复合材料。此外,弓网系统载流摩擦过程中最主要的失效行为是电弧烧蚀磨损,目前的研究也主要集中于电弧的测量上,包括产生电弧的时间、频率、电弧放电能量等,可以对载流质量的衡量方式进行创新。

#### 参考文献:

- [1] 惠阳,刘贵民,闫涛,等. 载流摩擦磨损研究现状及展望[J]. 材料导报,2019,33(13):2272-2280.  
HUI Y,LIU G M,YAN T,et al. Research status and prospect of current-carrying friction and wear [J]. Materials Reports,2019,33(13):2272-2280.
- [2] 李占君,孙乐民,张永振. 载流摩擦磨损研究现状及前景[J]. 铁道运输与经济,2005(1):82-84. <http://www.cnki.net>  
LI Z J,SUN L M,ZHANG Y Z. The present research status as well as prospective of Current-carrier friction abrasion

- [J]. *Railway Transport and Economy*, 2005(1):82-84.
- [3] 杨中平. 高速铁路技术概论[M]. 北京: 高速铁路技术概论, 2015.  
ZHONG P Y. Introduction to high speed railway technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [4] 陈立, 吴广宁, 高国强, 等. 高速铁路弓网电接触研究综述[J]. 机车电传动, 2011(5):6-9.  
CHEN L, WU G N, GAO G Q, et al. Research reviews on electrical contact between pantograph and catenary of high-speed railway[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2011(5):6-9.
- [5] BLAU P J. Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals[J]. *Wear*, 1981, 72(1):55-66.
- [6] LANDLY I T. Contact wire wear on electric railroad [J]. *Transitions of American*, 1961, 80(4):220-224.
- [7] 丁涛. 电气化铁路受电弓/接触线摩擦磨损性能及电特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
DING T. Friction and wear behaviors and electrical properties of pantograph strip/contact wire materials in electric railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [8] 王鑫. 受电弓/接触网系统电弧放电机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
WANG X. Study on the mechanism of arc discharge for a pantograph/catenary system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [9] 冯红岩. 电气化铁路弓网关系综述[J]. 山东工业技术, 2013, (14):84.  
FENG H Y. Summary of pantograph-catenary relationship of electrified railway[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2013(14):84.
- [10] 张永振, 杨正海, 上官宝, 等. 典型材料载流摩擦行为 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(5):9-14.  
ZHANG Y Z, YANG Z H, SHANG G B, et al. Current-carrying friction behavior of typical materials, 2012, 33(5):9-14.
- [11] 吴广宁, 周悦, 雷栋, 等. 弓网电接触研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3495-3506.  
WU G N, ZHOU YUE, LEI D, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(11):3495-3506.
- [12] 孙建设, 陈章. 电力机车弓网电接触研究现状分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(2):76-79.  
SUN J S, CHEN Z. Research status of pantograph-catenary electrical contact of electric locomotive[J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2021, 44(2):76-79.
- [13] 张永振, 杨正海, 上官宝. 载流摩擦的研究现状与挑战[J]. 自然杂志, 2014, 36(4):256-263.  
ZHANG Y Z, YANG Z H, SHANGGUAN B. Research progress and challenges in tribo-electric systems[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2014, 36(4):256-263.
- [14] 董霖, 陈光雄, 周仲荣. 载流摩擦磨损系统研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7):102-106.  
DONG L, CHEN G X, ZHOU Z R. Research on the system of Friction and wear with electric current[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(7):102-106.
- [15] 徐晓峰, 逢显娟, 杨正海, 等. 电流对载流摩擦副材料损伤行为的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(11):6-10.  
XU X F, PANG X J, YANG Z H, et al. Effects of electricity on material damage of current-carrying frictional pairs[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(11):6-10.
- [16] SUN Y, SONG C, LIU Z, et al. Tribological and conductive behavior of Cu/Cu rolling current-carrying pairs in a water environment[J]. *Tribology International*, 2019, 143:106055.
- [17] 杨红娟, 胡艳, 陈光雄. 受电弓滑板载流磨损机理演变过程试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1):77-83.  
YANG H J, HU Y, CHEN G X. Experimental study on evolution of wear mechanism of contact strip with electric current[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(1):77-83.
- [18] 宋联美, 张永振, 上官宝, 等. 极性对载流电弧演化及其烧蚀的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(4):105-115.  
SONG L M, ZHANG Y Z, SHANG G B, et al. Effect of polarity on evolution and ablation of current-carrying arc[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 38(4):105-115.
- [19] CHEN G X, HU Y, DONG B J, et al. Experimental study on the temperature of the contact strip in sliding electric contact[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, 231(10):1268-1275.
- [20] 胡道春, 孙乐民, 上官宝, 等. 电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1):36-42.  
HU D C, SUN L M, SHANGGUAN B, et al. Effects of arc discharge on friction and wear properties of metal-impregnated carbon strip sliding against Cu trolley under electric current[J]. *Tribology*, 2009, 29(1):36-42.
- [21] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metalized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. *Tribology International*, 1999, 32(7):367-378.

- [22] 吕乐华,孙乐民,上官宝,等. 载流摩擦参数对铜基复合材料起弧率及载流摩擦学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2014,38(1):60-63.  
LU L H, SUN L M, SHANGGUAN B, et al. Effect of friction parameters with current on arc rate and current-carrying tribological properties[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(1): 60-63.
- [23] 赵彦文,王晓峰,白玲,等. 紫铜/铬青铜摩擦副载流效率研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12):25-27.  
ZHAO Y W, WANG X F, BAI L, et al. Study on Current-carrying efficiency of T2/QCr0.5 rubbing pairs[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(12): 25-27.
- [24] 时光,陈忠华,郭凤仪. 强电流滑动电接触下最佳法向载荷[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1):23-30.  
SHI G, CHEN Z H, GUO F Y. Optimal normal load of sliding electrical contacts under high current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 23-30.
- [25] SHANGGUANG BAO, ZHANG Y, XING J, et al. Comparative Study on Wear Behaviors of Metal-Impregnated Carbon Material and C/C Composite Under Electrical Sliding[J]. Tribology Transactions, 2010, 53(6): 933-938.
- [26] CHEN G X, YANG H J, ZHANG W H, 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.
- [27] MEI G, FU W, CHEN G, et al. Effect of high-density current on the wear of carbon sliders against Cu-Ag wires[J]. Wear, 2020, 452: 203275.
- [28] YANG H, WANG K, LIU Y, et al. The formation of the delamination wear of the pure carbon strip and its influence on the friction and wear properties of the pantograph and catenary system[J]. Wear, 2020, 454: 203343.
- [29] ZHANG Y, LI C, PANG X, et al. Evolution processes of the tribological properties in pantograph/catenary system affected by dynamic contact force during current-carrying sliding[J]. Wear, 2021, 477: 203809.
- [30] XIONG X, TU C, CHENG D, et al. Arc erosion wear characteristics and mechanisms of pure carbon strip against copper under arcing conditions[J]. Tribology Letters, 2013, 53(1): 293-301.
- [31] 周培勇,陈光雄,董丙杰,等. 弓网电弧起弧和熄弧距离及电弧烧蚀磨损的试验研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2):37-41.  
ZHOU P Y, CHEN G X, DONG B J, et al. Experimental study on arc striking and extinguishing distance and electric arc erosion wear of a pantograph-catenary system[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(2): 37-41.
- [32] 杨震,丁涛,郭媛. 弓网系统中铜盘/碳销的载流摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2019, 52(11):63-76.  
YANG Z, DING T, GUO YUAN. Friction and wear behaviors of copper disc/carbon pin in pantograph-catenary system with electric current[J]. Materials Protection, 2019, 52(11): 63-67.
- [33] 丁涛,陈光雄,朱旻昊. 法向载荷对不锈钢/浸金属碳载流摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(9):5-8.  
DING T, CHEN G X, ZHU M H. Effect of normal load on friction and wear properties of stainless-steel/copper-metal impregnation carbon under electric current[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(9): 5-8.
- [34] 陈忠华,王铁军,回立川,等. 弓网系统滑动电接触最优压力载荷的确定[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6):86-92.  
CHEN Z H, WANG T J, HUI L C, et al. Determination of the optimal contact load in pantograph-catenary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 86-92.
- [35] CHEN G, YANG H, ZHANG W, 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.
- [36] 陈忠华,孙国军,回立川,等. 波动压力载荷下弓网滑动电接触特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12):82-88.  
CHEN Z H, SUN G J, HUI L C, et al. Study on characteristics of sliding electrical contact of pantograph catenary under fluctuating pressure load[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 82-88.
- [37] ZHANG Y, ZHANG Y, SONG C. Arc discharges of a pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding[J]. Materials, 2018, 11(5): 776.
- [38] 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: 949-955.
- [39] 杨正海,上官宝,孙乐民,等. 相对滑动速度对铜-石墨复合材料载流摩擦性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(1):1-6.  
YANG Z H, SHANGGUAN B, SUN L M, et al. Effect of relative slipping speed on current-carrying friction performance of copper graphite composites[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science),



- 2021,42(1):1-6.
- [40] YANG H J, CHEN G X, ZHANG S D, et al. Effect of the vibration on friction and wear behavior between the carbon strip and copper contact wire pair[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(8): 722-728.
- [41] YANG H, HU B, LIU Y, et al. Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph-catenary system at high sliding-speed with strong electrical current[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 887-897.
- [42] 武云龙, 付文明, 黄海, 等. 拉出值对碳滑板/铜银合金接触线载流磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(10): 57-61.
- WU Y L, FU W M, HUANG H, et al. Effect of the staggering on the wear performance of carbon strip/Cu-Ag alloy contact wire with electric current[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(10): 57-61.
- [43] DING T, CHEN G X, ZHU M H, et al. Influence of the spring stiffness on friction and wear behaviours of stainless steel/copper-impregnated metallized carbon couple with electrical current[J]. Wear, 2009, 267: 1080-1086.
- [44] 丁涛, 陈光雄, 卜俊, 等. 载流摩擦磨损中不同放电现象的机理研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 83-87.
- DING T, CHEN G X, BU J, et al. Study on the mechanisms of different discharge phenomena in the process of friction and wear with electric current[J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 83-87.
- [45] 张会杰, 孙乐民, 上官宝, 等. 高速铁路弓网电弧的研究现状[J]. 润滑与密封, 2014, 39(5): 117-120.
- ZHANG H J, SUN L M, SHANG G B, et al. Current situation on the study of pantograph-catenary arc for high-speed railways[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(5): 117-120.
- [46] MEI G. Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage[J]. Tribology International, 2020, 151: 106538.
- [47] WANG Y A, LI J X, YAN Y, et al. Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a Cu-Cr-Zr alloy[J]. Tribology International, 2012, 50: 26-34.
- [48] 黄海, 武云龙, 闫硕, 等. 电压对碳滑板磨损性能和温升的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(8): 25-30.
- HUANG H, WU Y L, YAN S, et al. Effect of voltage on wear behavior and temperature rise of a pantograph carbon strip[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(8): 25-30.
- [49] MEI G. Impact of voltage on the electric sliding tribological properties of current collectors against overhead lines[J]. Wear, 2021, 474: 203868.
- [50] 松山晋作, 李春阳. 受电弓的受流摩擦学[J]. 电力牵引快报, 1997(1): 52-60.
- SONGSHAN J Z, LI C Y. Current-carrying tribology of pantograph[J]. High Power Converter Technology, 1997(1): 52-60.
- [51] 王蒙. 潮湿条件下滑板摩擦磨损行为研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.
- WANG M. Experimental and simulative research on thermoelectric characteristics of pantograph friction pair under rain condition[D]. Fuxing: Liaoning Technical University, 2018.
- [52] 张会杰, 孙乐民, 张永振, 等. 环境气氛对C/C复合材料载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 236-241.
- ZHANG H J, SUN L M, ZHANG Y Z, et al. The influence of environmental atmosphere on the tribological performance of C/C composites under electrical current[J]. Tribology, 2015, 35(2): 236-41.
- [53] 邢立成. 弓网电弧的侵蚀机理及环境变量对侵蚀的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- XING L C. Erosion mechanism of pantograph arc and the influence of environmental variables on erosion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [54] 张莉娜. 大风对弓网受流质量及运行安全影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHANG L N. Research on collection quality and operation security of pantograph-catenary under the action of strong wind[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [55] 宋洋. 环境风下高速铁路弓网动态受流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- SONG Y. Study on high-speed railway pantograph-catenary current collection quality under environmental wind load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [56] 李运良. 弓网电弧对覆冰接触网的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Y L. Study on the influence of pantograph-catenary arc on ice covered catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [57] 丁涛, 陈光雄, 李玉梅, 等. 几种受电弓滑板/接触线材料载流摩擦磨损行为的比较[J]. 润滑与密封, 2014, 39(10): 65-72.
- DING T, CHEN G X, LI Y M, et al. Comparison of friction and wear behaviors of several kinds of pantograph strip/

- contact wire materials with electric current[J]. *Lubrication Engineering*, 2014, 39(10): 65–68.
- [58] 戴利民, 林吉忠, 丁新华. 滑板材料受流摩擦时接触点瞬态温升对磨损性能的影响[J]. *中国铁道科学*, 2002(2): 111–117.
- DAI L M, LIN J Z, ZHONG X H. Effect of transient temperature rise of contact point on wear properties of sliding plate materials under flow friction[J]. *China Railway Science*, 2002, (2): 111–7.
- [59] HU Y, CHEN G X, ZHANG S D, et al. Comparative investigation into the friction and wear behaviours of a Cu–Ag contact wire/carbon strip and a pure copper contact wire/carbon strip at high speeds[J]. *Wear*, 2017, 376: 1552–1557.
- [60] 李雪飞, 上官宝, 张永振. 石墨粒度对 C/Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(24): 115–117.
- LI X F, SHANGGUAN B, ZHANG Y Z. Effects of graphite particle size on friction and wear properties of C/Cu Composite [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(24): 115–7.
- [61] ZHAO J, PENG Y, ZHOU Q, et al. The current-carrying tribological properties of cu/graphene composites[J]. *Journal of Tribology*, 2021, 143(10): 102101.
- [62] 张军伟, 杨正海, 孙乐民, 等. 梯度铜碳复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(7): 33–40.
- ZHANG J W, YANG Z H, SUN L M, et al. Current-carrying friction and wear properties of gradient copper-carbon composites[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(7): 33–40.
- [63] 董丙杰, 胡艳, 陈光雄, 等. 受电弓/接触网载流摩擦的电弧放电和碳滑板温升试验研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(12): 41–45.
- DONG B J, HU Y, CHEN G X, et al. Experimental study on arc discharge and strip temperature rise during current carrying friction of pantograph and catenary[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(12): 41–45.
- [64] ZHANG H, SUN L, ZHANG Y, et al. The study of arc rate, friction, and wear performance of C/C composites in pantograph-catenary system[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(6): 1157–1163.
- [65] 卜俊, 丁涛, 陈光雄. 温度对受电弓滑板材料磨损的影响[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(5): 22–27.
- BU J, DING T, CHEN G X. Effect of temperature on the wear behaviour of a pantograph strip material[J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(5): 22–25.
- [66] DING T, CHEN G X, BU 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: 1629–1636.
- [67] YANG H, FU L, LIU Y, et al. Research on the delamination wear properties of the pure carbon strip at the high-sliding speed with electric current[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(1): 76–83.
- [68] DING 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.

(责任编辑:姜红贵)