

弓网载流效率及其对碳滑板磨损性能影响的试验研究

武云龙, 黄海, 付文明, 陈光雄

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究纯碳滑板在高速载流条件下的滑动电接触特性。**方法** 将纯碳受电弓滑板加工成尺寸为 $120\text{ mm} \times 34.5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的长方形试样。在环-块式高速载流摩擦磨损试验机上, 研究法向压力、滑动速度、电流对弓网载流效率的影响, 比较了不同载流效率时碳滑板的磨损形貌。试验过程中实时采集接触副两端的电压、电流以及碳滑板表面温升。每组试验的滑动距离为 150 km , 试验结束后, 用 SEM 扫描电镜观察碳滑板的表面形貌。**结果** 在电流恒定的情况下, 电弧放电能量随着载流效率的增加而降低。在电流 $I=150\text{ A}$ 、滑动速度 $v=150\text{ km/h}$ 的条件下, 载流效率随着法向压力的增加而增加。在电流 $I=100\text{ A}$ 、法向压力 $F_n=100\text{ N}$ 的条件下, 载流效率随着滑动速度的增加而减小。在电压 $U=7\text{ V}$ 、滑动速度 $v=150\text{ km/h}$ 的条件下, 载流效率随着电流的增加而减小。碳滑板的磨损形貌显示, 载流效率较高时, 碳滑板以机械磨损为主并伴随着轻微的电弧烧蚀现象; 载流效率较低时, 碳滑板电弧烧蚀现象非常严重, 有明显的烧蚀坑。**结论** 载流效率在一定程度上反映了弓网系统的接触稳定性。载流效率越低, 碳滑板磨损越严重。

关键词: 滑动电接触; 弓网系统; 载流效率; 磨损; 碳滑板; 电弧烧蚀

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0021-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.004

Experimental Study on Pantograph-Catenary Current-carrying Efficiency and Its Influence on Wear Resistance of Carbon Strip

WU Yun-long, HUANG Hai, FU Wen-ming, CHEN Guang-xiong

(State Key Laboratory of Traction Power, Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: This work aims to study sliding electric contact characteristics of a pure carbon strip under high speed current-carrying conditions. The pure carbon strip was processed into a $120\text{ mm} \times 34.5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ rectangular sample. A series of experimental tests were carried out on a high speed ring-on-block tester. The effects of normal pressure, sliding speed and current on current-carrying efficiency were investigated. Wear appearance of carbon contact strip at different current-carrying efficiency was compared. During the tests, voltage, current on both ends of the contact pair as well as temperature rise of the carbon strip were collected in real time. Sliding distance of each test was 150 km , and wear appearance of the strip was analyzed with

收稿日期: 2016-11-30; 修订日期: 2016-12-27

Received: 2016-11-30; Revised: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金 (U1234202)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1234202)

作者简介: 武云龙 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为弓网载流摩擦学。

Biography: WU Yun-long (1990—), Male, Master, Research focus: current-carrying tribology.

通讯作者: 陈光雄 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学、车辆系统动力学。

Corresponding author: CHEN Guang-xiong (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology, vehicle system dynamics.

scanning electron microscopy (SEM). Provided with constant current, arc discharge energy decreased as the current-carrying efficiency increased. At the electric current of 150 A and sliding speed of 150 km/h, the current-carrying efficiency of a pantograph-catenary system increased as the normal force increased. At the electric current of 100 A and normal force of 100 N, the current-carrying efficiency of a pantograph-catenary system decreased as the sliding speed increased. At the voltage of 7 V and sliding speed of 150 km/h, the current-carrying efficiency of a pantograph-catenary system decreased as the electric current increased. Wear appearance of the strip indicated that, the carbon strip was mainly subject to mechanical wear accompanied by slight arc ablation at high current-carrying efficiency. However, the carbon strip was subject to very serious ablation accompanied by conspicuous ablation pits at low current-carrying efficiency. The current-carrying efficiency reflects contact stability of pantograph-catenary system to a certain extent. The lower the current-carrying efficiency is, the worse the wear of carbon strip is.

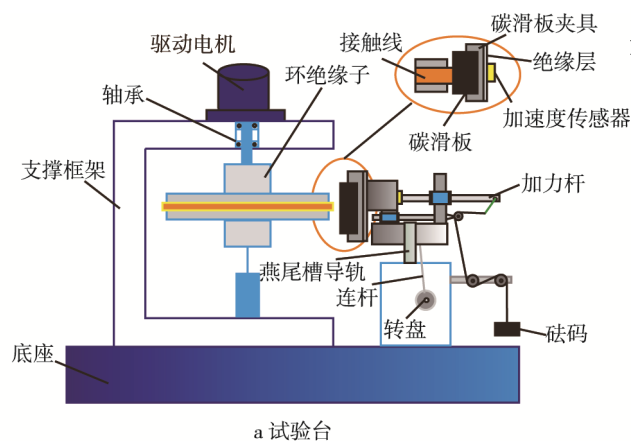
KEY WORDS: sliding electric contact; pantograph-catenary system; current-carrying efficiency; wear; carbon strip; arc ablation

随着轨道交通事业的快速发展,高速铁路为人们的日常出行带来了极大的便利。但是,随着科技信息化等产业的迅速发展,高速铁路面临着新的机遇与挑战,高速铁路技术必须随着时代的发展做出技术性的突破。因此,需要大力发展高速铁路技术。其中,弓网系统^[1]作为高速铁路运行过程中电力传输的重要环节,制约着高铁技术的发展。受电弓与接触网属于柔性接触,在机车运行过程中,由于运行的不稳定性,受电弓与碳滑板分离产生离线电弧。电弧会对弓网造成磨损,将会严重影响受电弓的服役寿命。因此,对碳滑板磨损性能的试验研究是必不可少的。国内外学者对载荷、电流、刚度、离线率、振动加速度、环境、材料等^[2-8]影响碳滑板磨损性能的因素做过研究。本文在高速弓网摩擦磨损试验台上,研究了弓网间法向压力、滑动速度、电流对弓网载流效率的影响,并比较了不同载流效率时碳滑板的磨损形貌。

1 试验

1.1 试验设备和数据采集系统

图1是实验机和数据采集系统的结构简图。试验



a 试验台

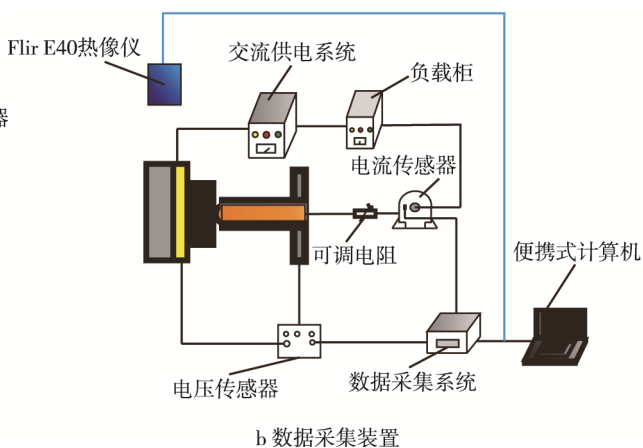
在环-块式高速摩擦磨损试验台上进行,其结构简图如图1a所示。试验台主要是由支架、底座、变频电机、转盘、升降台、交/直流供电系统等组成。

交流供电系统可以提供 0~3000 V 电压和 0~800 A 电流。转盘转速由西门子 A700 变频器通过控制变频电机来调节,转盘可以实现 0~400 km/h 的滑动速度。在试验过程中,升降台上下往复运动,来模拟实际工况中的拉出值。升降台的往复滑动频率在 0.3~3 Hz 之间连续可调。加力系统采用砝码进行加力,砝码加力的稳定性比较好,滑板磨损后仍能保持法向力的稳定。

数据采集系统如图1b所示,采集系统包括 Flir E40 热像仪、供电系统、负载柜、电流传感器、电压传感器、数据采集系统等。电流和电压参数的采样频率设为 10 kHz。通过 Flir E40 热像仪来采集碳滑板表面的实时温升,最后取温升稳定阶段的平均值来作为碳滑板最终温升。

1.2 试样材料和试验参数

试验样品均取自服役于高速铁路中的受电弓与接触网。其中纯碳滑板加工成 120 mm×34.5 mm×25 mm



b 数据采集装置

图1 试验机和数据采集系统

Fig.1 The test system and the data collection system

的长方体，其中 C 的质量分数为 99.70%，其他成分（S、N、Cl 等）的质量分数为 0.30%。铜银合金接触线（型号 CTHA110）被镶嵌在直径为 1100 mm 的转盘上。样品制备时需用 600#砂纸打磨试样表面，保证表面粗糙度为 0~3.2 μm。每组试验设定滑动距离为 150 km，试验参数如表 1 所示。试验前需使碳滑板与接触线试样在一定的法向压力下轻微接触，并在低速、非载流条件下对磨 3 min，这样可以使碳滑板和接触线接触良好。待其运行平稳后，按照试验参数进行试验。

表 1 试验参数
Tab.1 Experiment parameters

参数	数值
滑动速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	0~200
法向压力 F_n/N	0~120
电流 I/A	0~200
频率 f/Hz	0.50
拉出值 A/mm	55

利用赫兹理论，可以得到不同法向压力条件下的初始接触面积和接触比压，如表 2 所示。

表 2 初始接触面积和接触比压
Tab.2 The initial contact area and contact specific pressure

法向压力 N	接触面积 mm^2	接触比压 $(N \cdot mm^{-2})$
60	0.63	95.39
80	0.76	104.99
100	0.88	113.12
120	1.00	120.00

1.3 载流效率的计算

载流效率 η 是反映弓网系统受流质量的一个重要指标，其值是回路中动态电流的平均值与静止通电流值之比。载流效率 η 为：

$$\eta = \frac{\bar{I}}{I_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中： η 为载流效率； \bar{I} 为回路实际电流平均值； I_s 为回路静态电流值。

2 结果与分析

2.1 载流效率与电弧放电能量之间的关系

图 2 为弓网电弧放电能量随载流效率变化的曲线（ $I=100\text{ A}$ ， $F_n=100\text{ N}$ ）。从图 2 可以看出，弓网系统中，电弧放电能量随着载流效率的提高逐渐减少。

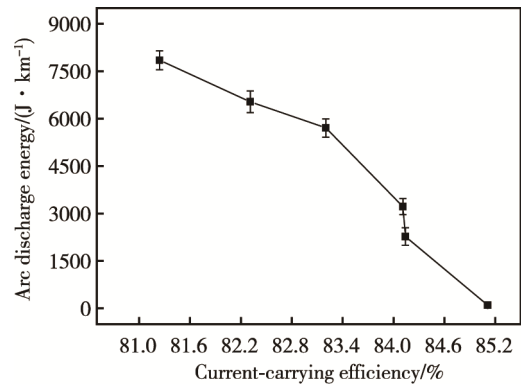


图 2 电弧放电能量随载流效率的变化
Fig.2 Variation of the arc discharge energy with current-carrying efficiency

图 3 为回路中电压与电流的时序图。图 3 中的 A 区域是当接触副存在不平顺时的电流和电压波形图，在此阶段会发生离线放电现象，电弧能量变大，相应的电流波形出现截波现象，载流质量变差。图 3 中的 B 区域是接触副接触良好时的电压和电流波形图，在此阶段没有离线现象发生，电弧能量较小，电流波形图完整，载流质量较好。载流效率是系统回路中实际电流值与额定电流值之比，可以用来表征弓网系统中载流质量。载流效率越高，说明弓网系统中电弧离线现象越少，接触稳定性越好，电弧放电能量越小。

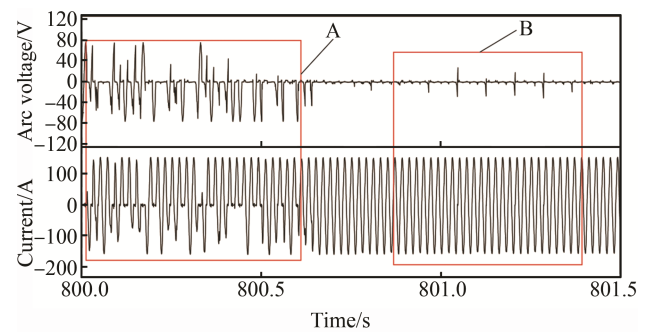


图 3 电压和电流时序图
Fig.3 Variation of the arc voltage and electric current

2.2 法向压力对载流效率的影响

图 4 显示了在电流 $I=150\text{ A}$ 和滑动速度 $v=150\text{ km/h}$ 的条件下，载流效率随法向压力变化的曲线。由图 4 可以看出，弓网系统中载流效率随着法向压力的增大而增大，当法向压力增大到一定程度后，曲线趋于平稳。

当碳滑板与受电弓接触时，接触表面存在许多微凸体^[9]。电弧的产生是由于微凸体间的间隙变大，接触副两端的电压超过阈值电压击穿空气造成的。当法向压力增大时，接触副表面贴合更加紧密，其表面微凸体之间的间隙减小，电弧放电的频率降低。接触副表面微凸体偶对的数量也会影响电弧的产生^[10]。法向

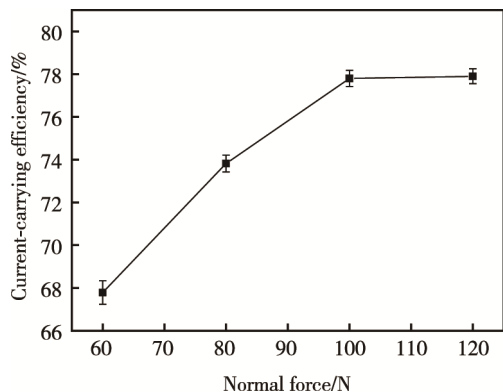


图4 载流效率随法向压力的变化

Fig.4 Variation of the current-carrying efficiency with normal force

压力的增大,促使接触表面发生塑性变形,会增加接触表面微凸体的数量,微凸体数量的增加可以有效地减少电弧产生的频率,提高载流效率。当法向压力增加到一定程度后,对接触副表面间隙的影响也减小,其微凸体数量也达到饱和,从而载流效率变化趋于平稳。

2.3 滑动速度对载流效率的影响

图5显示了在法向压力 $F_n=100$ N 和电流 $I=100$ A 的条件下,载流效率随滑动速度变化的曲线。由图5可以看出,随着滑动速度的增加,载流效率逐渐减小。

滑动速度对弓网系统载流效率的影响主要体现在:(1)弓网接触副是通过摩擦表面的微凸体进行接触,随着滑动速度的增加,剪切力对微凸体的破坏加剧,使接触材料产生剥层形成磨屑,影响受流质量^[11];(2)随着滑动速度的加快,微凸峰分离次数增加,接触性能变差,受流质量降低;(3)当滑动速度增加时,弓网接触稳定性变差,弓网间离线现象增加,电弧发生频率增加^[12]。所以,随着滑动速度的增加,弓网系统的载流效率降低。

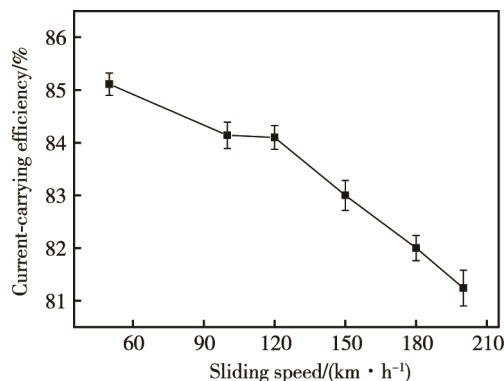


图5 载流效率随滑动速度的变化

Fig.5 Variation of the current-carrying efficiency with sliding speed

2.4 电流对载流效率和碳滑板表面温升的影响

图6显示了在电源输出电压 $U=7$ V 和法向压力 $F_n=100$ N 的条件下,载流效率随电流的变化曲线。由图6可以看出,载流效率随电流的增加逐渐减小。

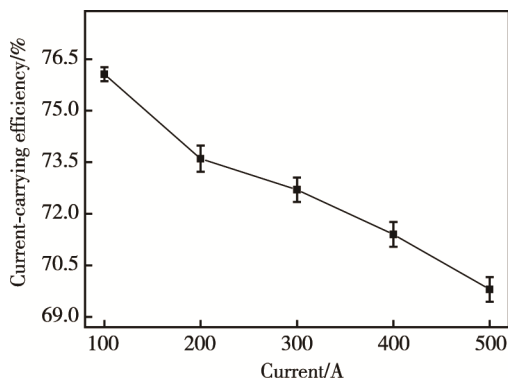


图6 载流效率随电流的变化

Fig.6 Variation of the current-carrying efficiency with current

图7显示的是在法向压力 $F_n=100$ N、滑动速度 $v=150$ km/h 的条件下,碳滑板表面温升随电流的变化曲线。从图7可以看出,碳滑板表面温升随着电流的增加显著升高。当 $I=100$ A 时,碳滑板表面温升为 107.10 °C;当 $I=500$ A 时,碳滑板表面温升达到 385.70 °C。在法向压力以及滑动速度不变的条件下,碳滑板表面温升主要由电流决定。由于电源输出电压 $U=7$ V,在试验过程中,电弧以电火花放电为主,碳滑板表面温升主要由焦耳热所致。由焦耳公式 $Q=I^2 \times R$ 可知,随着电流的增加,系统产生的焦耳热不断增加,从而使碳滑板表面的温度不断升高^[13]。随着回路电流的增大,碳滑板表面温升由 107.10 °C 升至 385.70 °C,碳滑板表面磨损机制由刚开始的机械磨损为主伴随电弧烧蚀现象到以电弧烧蚀为主。温度的升高对碳滑板表面形貌的影响比较大,温升越高,碳滑板表面磨损越严重,从而影响到接触副的状态^[14]。接触副表面形貌的恶化会使接触状态变差^[15],从而使载流效率降低。

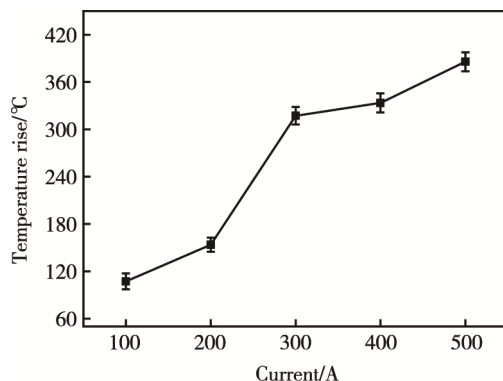


图7 碳滑板表面温升随电流的变化

Fig.7 Variation of the temperature rise with current

2.5 磨损形貌分析

图 8 显示了在电流 $I=150\text{ A}$ 的条件下, 碳滑板在不同载流效率时对应的磨损表面扫描电镜图 (SEM)。从图 8 可以看出, 随着载流效率的降低, 碳滑板表面磨损情况变得更加严重。从图 8a 可以看出, 当载流效率 $\eta=83.20\%$ 时, 碳滑板表面有明显的磨屑和磨痕, 此时以机械磨损和粘着磨损为主。从图 8b 可以看出, 当载流效率 $\eta=77.16\%$ 时, 碳滑板表面有明显的白色电弧烧蚀区域和剥离层, 以及微小的烧蚀坑, 此时以电弧烧蚀为主。从图 8c 可以看出, 当载流效率 $\eta=68.92\%$ 时, 碳滑板表面电弧烧蚀比较严重, 出现了大面积的电弧烧蚀区域, 部分区域有较大的烧蚀坑。

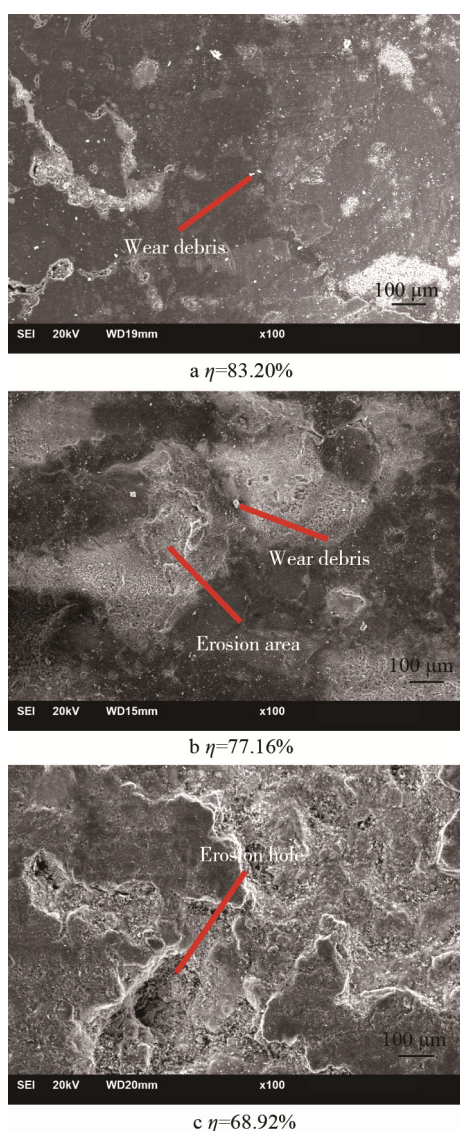


图 8 不同载流效率时碳滑板的磨损形貌

Fig.8 Wear morphology of the carbon strip under different current-carrying efficiencies

3 结论

1) 电弧放电能量随着载流效率的提高而减小。

2) 载流效率随着法向压力的增加而增加, 随着滑动速度、电流的增加而降低。

3) 在相同电流的条件下, 不同载流效率对应着不同的磨损形貌。载流效率较高时, 碳滑板以机械磨损为主伴随着轻微的电弧烧蚀现象; 载流效率较低时, 碳滑板电弧烧蚀现象非常严重, 有明显的烧蚀坑。

参考文献:

- [1] WU T X, BRENNAN M J. Basic Analytical Study of Pantograph-Catenary System Dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 30(6): 443—456.
- [2] 田磊, 孙乐民, 赵燕霞, 等. 波动载荷对 C/C 复合材料/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(11): 37—40.
TIAN Lei, SUN Le-min, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Fluctuating Load on Friction and Wear Property of C/C Composite/QCr under Electrical Current[J]. Lubrication Engineering, 2012(9): 41—45.
- [3] LIU P, BAHADUR S, VERHOEVEN J D. Electrical Sliding Friction and Wear Behavior of Cu-Nb in Situ Composites[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part A, 1994, 17(4): 616—624.
- [4] 丁涛, 王鑫, 陈光雄, 等. 不同弹簧刚度下不锈钢/浸金属碳摩擦副的受流质量与磨损性能的关系[J]. 机械工程材料, 2011(1): 33—35.
DING Tao, WANG Xin, CHEN Guang-xiong, et al. Relation of Current-carrying Quality with Wear Performance of Stainless Steel/Impregnated Metallized Carbon Friction Pairs at Different Spring Stiffnesses[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011(1): 33—35.
- [5] 刘敬超, 赵燕霞, 孙乐民, 等. 离线率对铜基粉末冶金载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(6): 22—24.
LIU Jing-chao, ZHAO Yan-xia, SUN Le-min, et al. Effects of Off-line Rate on Friction and Wear Properties of Cu-based Powder Metallurgy under Electric Current[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(6): 22—24.
- [6] 杨红娟. 振动对弓网电滑动摩擦磨损性能影响的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YANG Hong-juan. Experimental Study on the Influence of Strip Vibration on Friction and Wear of a High-speed Pantograph and Catenary System with Electric Current [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] BARES J A, ARGIBAY N, MAUNTLE N, et al. High Current Density Copper-on-Copper Sliding Electrical Contacts at Low Sliding Velocities[J]. Wear, 2009, 267 (1): 417—424.
- [8] HE D H, MANORY R R, GRADY N. Wear of Railway Contact Wires against Current Collector Materials[J]. Wear, 1998, 215(1): 146—155.
- [9] ZHAI H, HUANG Z. Instabilities of Sliding Friction Governed by Asperity Interference Mechanisms[J]. Wear,

- 2004, 257(3—4): 414—422.
- [10] 章赛丹, 陈光雄, 杨红娟. 接触压力对碳滑板/铜接触线载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012(9): 41—45.
- ZAHNG Sai-dan, CHEN Guang-xiong, YANG Hong-juan. Effect of Contact Pressure on Friction and Wear Behavior of Carbon Strip/Copper Contact Wire under AC Passage[J]. Lubrication Engineering, 2012(9): 41—45.
- [11] LIU Wei-min, ZHOU Feng, YU Lai-gui, et al. Preparation and Tribological Investigation of Thin Silicone Films[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(9): 2357—2362.
- [12] JIA S G, LIU P, REN F Z, et al. Sliding Wear Behavior of Copper Alloy Contact Wire against Copper-based Strip for High-speed Electrified Railways[J]. Wear, 2007, 262 (7/8): 772—777.
- [13] 胡艳, 董丙杰, 黄海, 等. 碳滑板电滑动温升及其对滑板磨损影响的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 677—683.
- HU Yan, DONG Bing-jie, HUANG Hai, et al. Experimental Study on the Temperature Rise of a Carbon Strip and Its Influence on the Wear Performances of the Carbon Strip[J]. Tribology, 2015, 35(6): 677—683.
- [14] LANCASTER J K. The Influence of Arcing on the Wear of Carbon Brushes on Copper[J]. Wear, 1963, 6(5): 341—352.
- [15] 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 Tao. Friction and Wear Behaviors and Electrical Properties of Pantograph Strip/Contact Wire Materials in Electric Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.