

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.10.025

波动载荷下弓网动态接触电阻特性研究

陈忠华¹, 王一帆^{1,2}, 杨彩红¹, 时光¹, 回立川¹

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网河南省电力公司濮阳供电公司, 河南 濮阳 457000)

摘要: 在实际的列车运行过程中压力载荷是以正弦形式波动变化,波动载荷对弓网系统中的接触电阻特性有重要影响。文中利用销盘式高速载流摩擦磨损试验机模拟弓网系统中的压力波动状态,研究了波动载荷、滑动速度和接触电流对动态接触电阻特性的影响,结合表面形貌对其变化规律产生的原因进行了分析。结果表明:载流滑动接触且压力波动频率一定时,动态接触电阻随压力波动幅度的增大先减小后增大;压力波动幅度一定时,动态接触电阻随压力波动频率的增大而缓慢增大;波动载荷条件下,动态接触电阻随滑动速度的增大而逐渐增大,随接触电流的增大而逐渐减小。高温电弧和接触温升是导致动态接触电阻变化的主要原因。

关键词: 波动载荷; 弓网系统; 滑动电接触; 接触电阻; 表面形貌

Study on Dynamic Contact Resistance of Pantograph Catenary Under Fluctuating Load

CHEN Zhonghua¹, WANG Yifan^{1,2}, YANG Caihong¹, SHI Guang¹, HUI Lichuan¹

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Puyang Power Supply Company, Henan Puyang 457000, China)

Abstract: In the actual train operation, the pressure load fluctuates in sine form, and the fluctuating load has an important influence on contact resistance characteristics in pantograph catenary system. In this paper, the pressure fluctuation in the pantograph catenary system is simulated by a pin disk high speed current borne friction and wear tester, the influence of different factors on the dynamic contact resistance is studied and combining with the surface morphology, the causes of its variation regulation are analyzed. The experimental results show that when the current carrying sliding contact and pressure fluctuation frequency are definitized, the dynamic contact resistance decreases first and then increases with the increase of pressure fluctuation range; when the pressure fluctuation range is definitized, the dynamic contact resistance increases slowly with the increase of pressure fluctuation frequency. Under the condition of fluctuating load, dynamic contact resistance increases with the increase of sliding velocity, decreases with the increase of contact current. High temperature arc and contact temperature rise are the main causes of dynamic contact resistance change.

Key words: fluctuating load; pantograph catenary system; sliding electrical contact; contact resistance; surface topography

0 引言

随着高速电气化铁路的迅猛发展,弓网的良好接触导电是保障高速列车可靠运行的首要条件。接触电阻的大小影响着接触部分的温升和弓网的受流质量。另外,接触压力载荷又是接触电阻的重

要影响因素之一,在实际的列车运行过程中压力载荷是以正弦形式波动变化的。由于受电弓与接触网组成了两个独立的弹性系统,当受电弓与接触网接触并高速运行时,接触网导线受到外界扰动力,引起接触网导线在垂向的振动,振动在接触网导线上传播形成波,当主横波遇到吊弦、定位线夹等集

收稿日期:2019-02-21; 修回日期:2019-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477071)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51477071).

中质量时,其中一部分将形成新的反射波,当受电弓遇到新的反射波时,其运动分量的振幅会增大,这也就产生了波动变化的压力载荷。而压力载荷的波动变化又影响着受电弓滑板与接触网导线之间的接触电阻,故对波动载荷下接触电阻的研究十分必要。

近些年来,国内外学者从不同角度出发,采用不同的研究方法取得了一些有益成果。在接触电阻方面,文[1]得出了收缩电阻的作用范围,并结合电镀层的影响,提出了基于最小能量原理下求具有电镀层的收缩电阻的方法;文[2]发现了受电弓在流过 150 A 及以上的大电流时,浸铜碳材料的接触电阻均随电流的增大而增大,且浸铜碳材料的电阻变化率比铜基粉末冶金材料小;文[3]通过理论分析,并结合数据拟合的方法分析了弓网静态接触电阻特性。文[4-5]论述了多种接触状态下接触电阻和电弧等的特性机理和产生原因;文[6]利用试验数据建立了关于接触压力、滑动速度和接触电流的弓网动态接触电阻数学模型;文[7-9]是关于静态压力条件下的电接触研究。以上这些文献并未涉及接触压力波动这一影响因素。在波动载荷方面,文[10-11]通过实验分析了波动载荷对弓网系统摩擦副间载流摩擦磨损性能的影响;文[12-13]利用环-块式载流摩擦磨损试验机研究了受电弓振动对滑板摩擦磨损和电弧放电的影响;文[14]建立了柔性接触网的计算模型,并通过仿真对弓网系统动态特性进行了研究。从现有文献来看,目前只是涉及到了波动载荷对弓网摩擦磨损特性和载流特性的研究,而关于波动载荷下弓网动态接触电阻方面的研究相对较少,其接触电阻特性规律还不清楚。

文中以销盘式高速载流摩擦磨损实验机为实验平台,以浸金属碳销为实验对象,研究了不同速度和电流工况下,波动载荷对动态接触电阻特性的影响,并通过理论和表面形貌进一步分析了接触电阻变化规律形成的原因。

1 实验装置与材料

销盘式高速载流摩擦磨损实验机实物图见图 1。实验系统见图 2。

实验机由一个交流变频电机驱动无氧纯铜圆盘旋转,圆盘由操作面板调节转速,运行速度在 0~450 km/h 可调;加载电流最大可达 600 A;销与圆盘间的接触压力在 0~300 N 可调;波动载荷通过信号发生器调节,并通过功率放大器驱动电磁激振器加

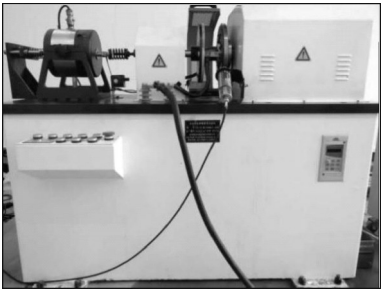


图 1 实验机实物图

Fig. 1 Physical diagram of experiment machine

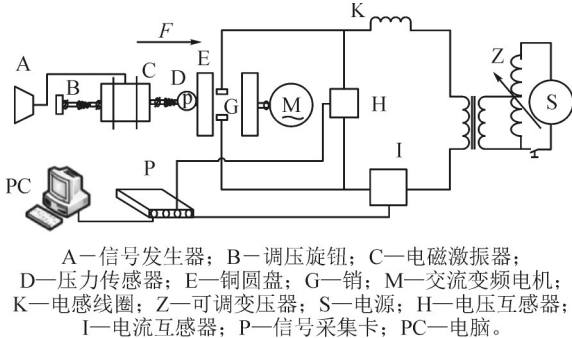


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

载,接触电压和电流通过采集卡显示到电脑中。在销与圆盘之间手动加载 $F_0=70\text{ N}$ 的初始力,而加载的正弦波动压力 F 可表示为

$$F = F_0 + P \sin 2\pi f t \tag{1}$$

式(1)中: F_0 为恒定压力; P 为压力波动幅度; f 为压力波动频率。

接触电阻值通过采集销与圆盘间接触电压和电流的有效值并利用伏安特性间接计算得出。

$$R = \frac{U_m}{I_m} \tag{2}$$

式(2)中: U_m 为电压有效值; I_m 为电流有效值。

整个实验过程中的压力能够以指定形式波动,因此可以在有效模拟弓网系统压力波动状态的前提下,实现对摩擦力、摩擦系数、接触电压、接触电流、滑动速度等参数的在线测量、存储,销的表面形貌利用金相显微镜进行观察并存储。

实验中采用无氧纯铜材料的圆盘模拟接触网导线,浸金属碳销试样模拟受电弓滑板。销试样是直径 $R=10\text{ mm}$,高 $H=26\text{ mm}$ 的圆柱体,其性能参数见表 1。成分参数见表 2。

表 1 浸金属碳销性能参数

Table 1 The parameters of the pin sample

电阻率/ ($\Omega \cdot \mu\text{M}$)	肖氏硬 度/Hs	体积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强 度/MPa	气孔 率/%
9.8	93.0	2.45	328.7	≤ 10.0

表2 浸金属碳销成分参数(质量分数)

Table 2 Component parameters of metal

impregnated carbon						%
碳 (C)	铜 (Cu)	铅 (Pb)	锡 (Sn)	锑 (Sb)	硅 (Si)	
58.325	35.125	2.331	1.813	1.813	0.518	0.075

2 实验结果分析

2.1 接触电阻测量值的波形分析

销与圆盘间的接触电阻变化曲线($F=70\text{ N}\pm 30\text{ N}$, $V=40\text{ km/h}$, $I=52.4\text{ A}$, $f=2\text{ Hz}$)见图3。从图3可以看出,实验过程中的电阻值始终围绕平均值 $R=0.372\ 073\ \Omega$ 上下浮动,因此在此条件下受电弓与滑板间的接触电阻为 $R=0.372\ 073\ \Omega$ 。

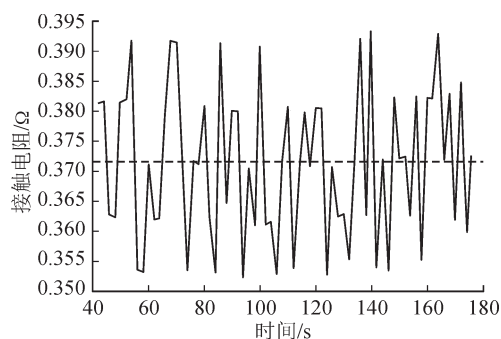


图3 接触电阻随时间变化曲线

Fig. 3 Contact resistance versus time curve

整个运动过程中受电弓滑板与接触网导线之间的接触电阻是在不间断变化的,这是因为在高速滑动电接触过程中接触面间的导电斑点会不断的产生和消失,实际接触面积在不停的发生改变,致使接触电阻波动变化^[15]。

2.2 波动幅度对动态接触电阻的影响

2.2.1 实验结果及理论分析

波动频率设为2 Hz,测量并计算波动压力分别为 $70\text{ N}\pm 10$ 、 ± 20 、 ± 30 、 ± 40 、 $\pm 50\text{ N}$ 时的动态接触电阻值,每个过程持续300 s。

接触电流52.4 A,不同滑动速度下动态接触电阻随波动幅度变化的曲线图见图4。滑动速度80 km/h,不同接触电流下动态接触电阻随波动幅度变化的曲线图见图5。

从图4、图5可以看出,动态接触电阻随波动幅度的增大,呈现出先减小后增大的趋势。

理论分析:考虑到金属材料的硬度和温度是呈负指数关系,见式(3)^[16]。温度越高材料硬度越低。

$$H = Ae^{-BT} \quad (3)$$

式(3)中: H 为材料硬度; T 为绝对温度; A 为绝对

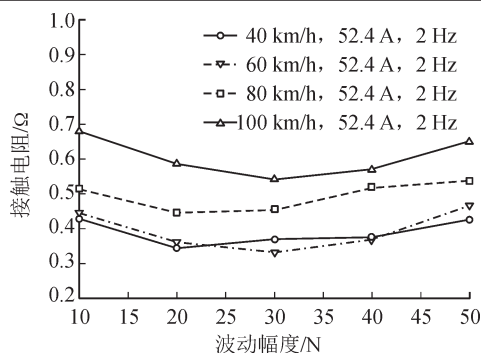


图4 不同滑动速度下接触电阻随波动幅度变化曲线

Fig. 4 Curves of contact resistance with fluctuation

amplitude at different sliding speeds

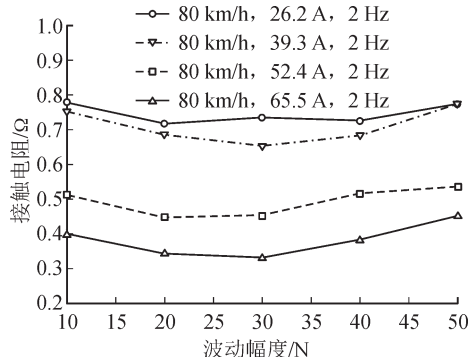


图5 不同接触电流下接触电阻随波动幅度变化曲线

Fig. 5 Curves of contact resistance with fluctuation

amplitude under different contact current

温度为零时的推算硬度; B 为材料硬度的软化系数。

考虑到实际接触面的半径 a 和接触力 F 之间的关系由赫芝公式导出^[17],即

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4}F\left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}\right) + \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)^{-1}} \quad (4)$$

式(4)中: E_1 、 E_2 为材料的弹性模量; v_1 、 v_2 为材料的泊松比; r_1 、 r_2 为两理想光滑弹性球半径。

在相同工况的前提下,一方面,随着波动幅度的增大,接触表面由弹性形变过渡到塑性形变,导电斑点半径增大,如式(4)所示,随着接触压力的增大,实际接触面的半径增大,接触电阻减小。同时销试样表面最高温由 $70\text{ N}\pm 10\text{ N}$ 时的 $227\text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $70\text{ N}\pm 30\text{ N}$ 时的 $361\text{ }^\circ\text{C}$,温差较为明显,见图6。结合式(3)可知,温度的升高导致接触面硬度的下降,摩擦副的塑变抗力降低,微凸峰之间的相互阻碍作用减小,经不断擦拭后接触表面变的相对平坦,实际接触面积增大,接触电阻减小。另外一方面,电弧能是随着波动幅度的增大而增加的,见图7。当波动幅度进一步增大时,摩擦副接触状态越来越不稳定,离线率不断增大,电弧能和燃弧率升高,电弧在一定范围内释放的能量增大,强烈的电弧热量造成了摩擦副温度急剧上升,引起接触表面的熔溅、氧化^[18]。电弧

的烧蚀作用对塑性表面造成了不可恢复性的破坏,接触表面质量恶化,实际接触面积减少,接触电阻增大。



(a) 70 ± 10 N, 2 Hz, 80 km/h, 52.4 A



(b) 70 ± 30 N, 2 Hz, 80 km/h, 52.4 A

图6 不同波动幅度下销试样最高温度

Fig. 6 The maximum temperature of the sample under different fluctuation

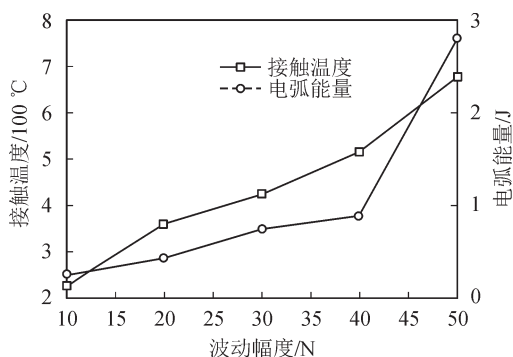


图7 2 Hz、80 km/h、52.4 A时接触温度、电弧能量随波动幅度变化曲线图

Fig. 7 Contact temperature and arc energy change with fluctuation range of 2 Hz, 80 km/h and 52.4 A

综上所述,温度的升高导致接触电阻的减小;而电弧作用的增强导致接触电阻的增大,经过这两种因素的共同作用接触电阻呈现出先减后增的趋势。

为了准确分析电弧能量、表面温度对接触电阻的影响程度,对其进行相关性分析,并采用相关性系数 r 来表示,即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 (Y_i - \bar{Y}_i)^2}} \quad (5)$$

式(5)中: X 表示电弧能或接触温度; Y 表示接触电阻值; $n=5$; r 值的范围在 $-1 \sim +1$ 。 $r>0$ 时为正相关; $r<0$ 时为负相关; $r=0$ 表示不相关; r 的绝对值越大,说明两个变量之间的相关程度越大。

计算结果表明:接触电阻与电弧能量的相关系数为 0.988 2,接触电阻与接触温度的相关系数为 $-0.941 5$ 。电弧能量、接触温度与接触电阻密切相关,但电弧能量与接触电阻的相关程度更大。接触电阻先减后增的趋势是电弧能量和接触温度共同作用的结果,随着波动幅度的增大,电弧能量越来越大,对接触电阻的影响越来越显著,超出了接触温度的影响。因此,接触电阻随波动幅度的增大呈现先减小后增大的趋势。

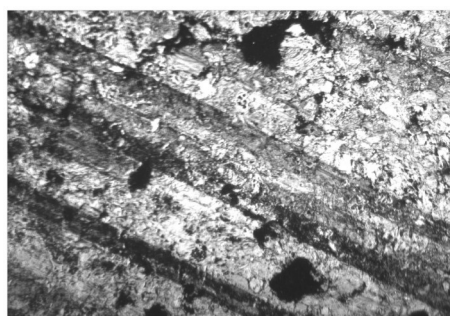
2.2.2 接触表面形貌分析

滑动速度 80 km/h, 电流 52.4 A, 频率 2 Hz, 经过 300 s 实验后的销表面形貌, 见图 8。

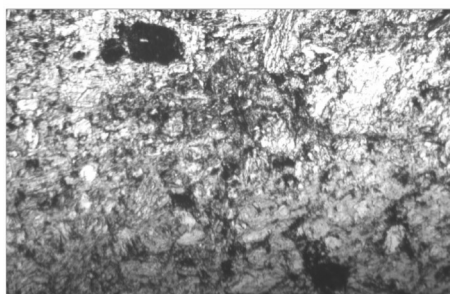
图 8(a) 为波动幅度 70 N ± 10 N 时的表面形貌, 接触表面存在宽窄不一的犁沟和部分凹坑、磨屑, 表面较为粗糙。现象表明: 由于此时接触压力较小, 电弧放电现象并不明显, 摩擦副材料更容易发生磨粒磨损^[19]。此时接触表面温度相对较低, 塑变抗力较高, 微凸峰之间的相互阻碍作用较大, 导致微凸峰之间的断裂, 材料表面产生犁沟, 经过多次反复犁削作用, 犁沟两侧部分材料脱离表面, 形成磨屑, 并进一步对接触表面刮擦, 导致接触表面沿着摩擦方向产生更多的犁沟, 实际接触面并不平坦, 接触电阻较大。

图 8(b) 为波动幅度 70 N ± 30 N 时地表面形貌, 接触表面犁沟变少, 虽有部分黏着凹坑, 但整体较为平坦。现象表明: 由于黏着磨损主要受接触压力、表面温度及摩擦副材料的影响, 此时压力波动幅度增大、温度升高, 接触表面以黏着磨损为主要磨损形式。在摩擦副接触过程中, 峰顶处首先会受到较大的载荷作用, 接触处产生变形, 并由弹性变形过渡到塑性变形, 压力以及塑性变形致使接触处的金属粘住而结合在一起, 当摩擦副相对运动后, 销试样上增加了一个切向的剪切力, 引起黏着结点的断裂, 在接触表面形成黏着坑, 但此时接触面的擦拭作用较大, 经过对粗糙不平处的进一步擦拭, 黏着坑数量变少, 接触面变的平坦, 导致接触电阻减小。

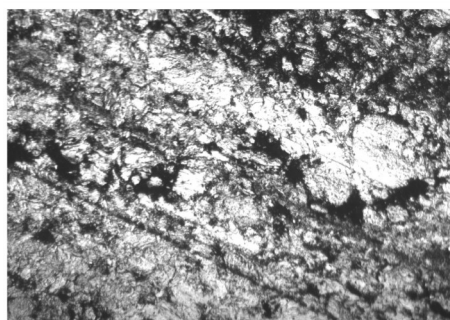
图 8(c) 为波动幅度 70 N ± 50 N 时的表面形貌, 接



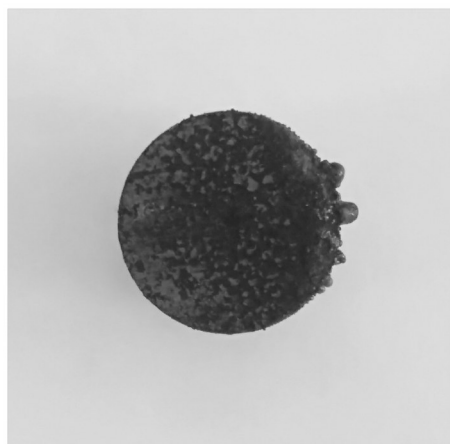
(a) 70 N±10 N, 2 Hz, 80 km/h, 52.4 A



(b) 70 N±30 N, 2 Hz, 80 km/h, 52.4 A



(c) 70 N±50 N, 2 Hz, 80 km/h, 52.4 A



(d) 70 N±50 N时销经电弧侵蚀后的宏观图

图8 不同波动幅度下销试样表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of pin specimens under different wave amplitude

触表面出现了较为密集的烧蚀坑和材料的熔融,且接触表面出现了磨损不均匀的现象,如图8(d)销的宏观形貌图所示,在销相对运动的后沿处电弧侵蚀现象较为严重,存在材料的堆积。现象表明:由于压力波动幅度的进一步增大,离线电弧作用加剧,电弧侵蚀现象明显,此时接触表面以电气磨损为主

要磨损形式。电弧高温和放电现象以及电阻热的共同作用,造成了接触表面材料的局部熔融及电弧侵蚀,并留下了密集的烧蚀坑。销表面的这些烧蚀坑主要是因为材料中的金属元素发生熔溅现象所造成,由于金属元素相较碳纤维熔点较低,会在高温电弧作用下发生熔溅,在接触表面留下烧蚀坑,并且部分熔融的化合物会沉积在销的边缘和铜圆盘上。材料中金属元素的减少,导致电流传导受阻,使得接触电阻增大。

2.3 波动频率对动态接触电阻的影响

2.3.1 实验结果与理论分析

波动压力设为 $70 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$, 测量并计算波动频率分别为 1、2、3、4、5 Hz 时的动态接触电阻值, 每个过程持续 300 s。

接触电流 52.4 A, 不同滑动速度下动态接触电阻随波动频率变化的曲线图见图 9。滑动速度 80 km/h, 不同接触电流下动态接触电阻随波动频率变化的曲线图见图 10。

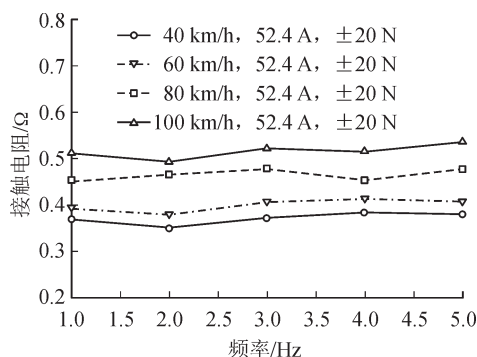


图9 不同滑动速度下接触电阻随波动频率变化曲线

Fig. 9 Curves of contact resistance with fluctuating

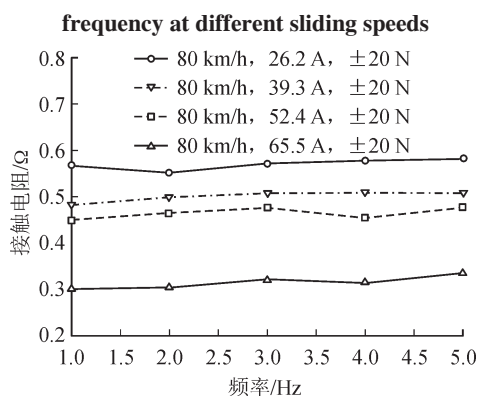


图10 不同接触电流下接触电阻随波动频率变化曲线

Fig. 10 Curves of contact resistance with fluctuation

frequency under different contact current

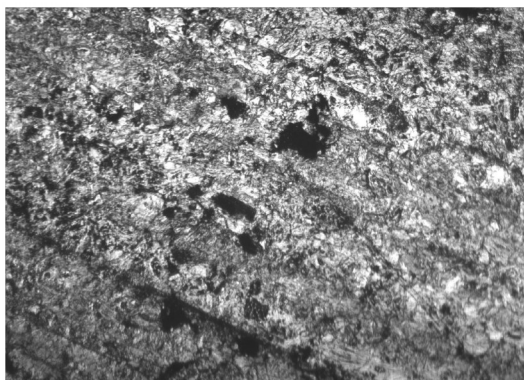
从图9、10中可以看出,动态接触电阻随波动频率的增大而增大,且增大较为缓慢。

理论分析:波动频率的增加使载荷波动的更加频繁,一定程度上加剧了接触状态的不稳定,表面

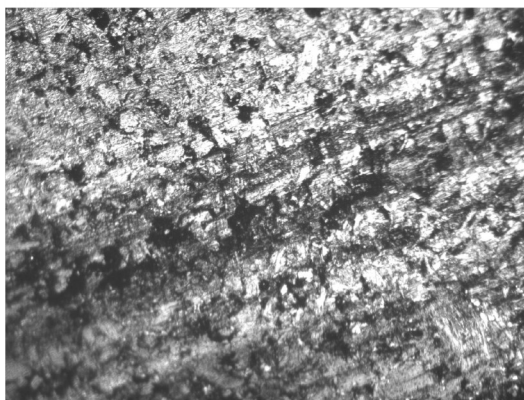
剪切作用增大,造成表面材料的破坏,致使接触电阻增大。但由于所加波动频率相对较小,变化范围不大,并不能明显影响到接触的稳定性,这就导致了接触电阻增大较为缓慢。因此,对于波动频率范围较小的弓网系统,波动频率的变化对接触电阻的影响并不明显。

2.3.2 接触表面形貌分析

滑动速度 80 km/h, 电流 52.4 A, 波动压力 $70 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$, 经过 300 s 实验后的销表面形貌, 见图 11。



(a) $70 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, 1 Hz, 80 km/h, 52.4 A



(b) $70 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, 5 Hz, 80 km/h, 52.4 A

图 11 不同波动频率下销试样表面形貌

Fig. 11 Surface morphology of pin samples under different wave frequencies

图 11(a) 为波动频率 1 Hz 时的表面形貌, 接触表面存在部分凹坑和划痕; 图 11(b) 为波动频率 5 Hz 时的表面形貌, 接触表面出现了连续的凹坑和烧蚀点。现象表明: 随着波动频率的增大, 一定程度上加剧了接触状态的不稳定, 离线电弧有一定增加, 但由于波动频率的变化范围较小, 并没有从根本上影响摩擦副间的电流传导效果, 并且通过对比发现两者接触表面都较为平坦, 整体形貌差别并不明显。因此接触电阻虽有增大, 但增大趋势较为缓慢。

2.4 波动载荷下滑动速度对动态接触电阻的影响

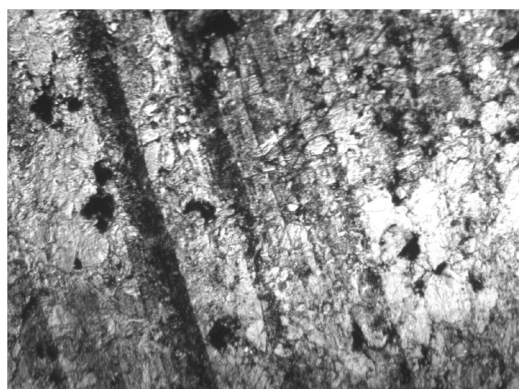
2.4.1 实验结果及理论分析

从图 4、9 可以看出, 波动幅度和波动频率相同

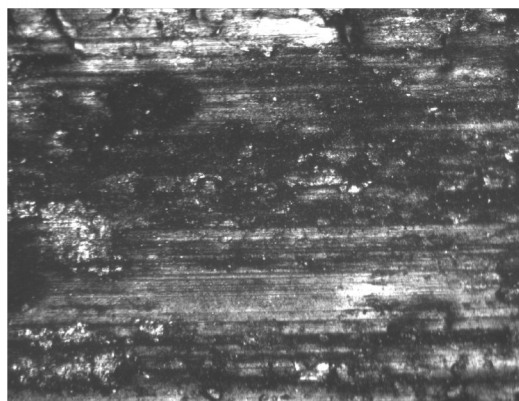
时, 动态接触电阻随滑动速度的增大而逐渐增大。理论分析: 随着滑动速度的提高, 更多的动能转化为接触表面的热能, 以及接触状态的不稳定性加剧, 产生了电弧高温和长弧放电现象, 加剧了接触表面金属元素的熔融及氧化, 形成电弧侵蚀, 对接触表面造成破坏。虽然温度的升高致使接触表面材料硬度的下降, 接触电阻减小, 但此时强烈的电弧侵蚀作用对接触表面造成了更加严重的破坏, 导致了接触电阻随滑动速度的增大而增大。因此, 滑动速度的提高对弓网动态接触电阻造成了较为不利的影响。

2.4.2 接触表面形貌分析

波动载荷 $70 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ 、2 Hz, 电流 52.4 A, 经过 300 s 实验后的销表面形貌, 见图 12。



(a) $70 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, 2 Hz, 40 km/h, 52.4 A



(b) $70 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, 2 Hz, 100 km/h, 52.4 A

图 12 不同滑动速度下销试样表面形貌

Fig. 12 Surface morphology of pin samples under different sliding speeds

图 12(a) 为滑动速度 40 km/h 时的表面形貌, 沿着摩擦方向可以看到宽窄不一的犁沟和少量凹坑。现象表明: 此时滑动速度较小, 电弧侵蚀作用并不明显, 摩擦副表面更容易发生磨粒磨损^[19]。摩擦过程中的刮擦和磨削在接触表面形成划痕和凹坑, 同时分布着少量的电弧烧蚀坑, 对接触表面的影响并不大, 此时的接触电阻较小。

图12(b)为滑动速度100 km/h时的表面形貌,表面较40 km/h时粗糙,其上不均匀分布着深浅不一的电弧烧蚀点和部分金属材料熔融后的化合物。现象表明:此时滑动速度较高,电弧侵蚀作用严重,接触表面主要以电气磨损为主要磨损形式。磨损距离的变长,以及周期性的载荷使摩擦副的接触区域产生很大的应力,产生塑性形变,而后持续的高温 and 电弧侵蚀在接触部位的薄弱点处造成材料的脱落和熔融,出现烧蚀坑和熔化物,接触表面变得粗糙,接触电阻增大。

2.5 波动载荷下接触电流对动态接触电阻的影响

2.5.1 实验结果及理论分析

从图5和图10可以看出,波动幅度和波动频率相同时,动态接触电阻随接触电流的增大而逐渐减小。理论分析:接触电流流经若干导电斑点所产生的功率可表示为

$$P = NI^2 R_c \quad (6)$$

式(6)中: N 为导电斑点个数; I 为接触电流; R_c 为接触电阻。

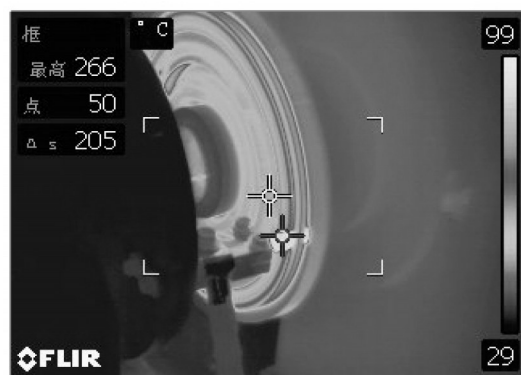
从式(6)可知,当接触电流流经导电斑点时,会产生高密度的焦耳热。随着接触电流的增大,接触表面的温度逐渐升高,销试样表面最高温度由26.2 A的266 °C升高到65.5 A的484 °C,见图13。温差较为明显。致使材料的硬度随之下降,材料的杨氏模量、导电斑点的几何形貌及导电斑点半径都会因材料硬度的变化而改变^[20],表现为接触电阻的减小;同时由于所加波动载荷较小,表面接触状态相对稳定,离线电弧并不严重,对接触表面并没有造成的大量破坏,此时接触电阻相对较小。其次电弧的存在还可以保证弓网取流的连续性^[21],一定程度上提高了受流质量。因此,适当的提高接触电流有助于接触电阻的改善和受流的稳定。

2.5.2 接触表面形貌分析

波动载荷70 N±10 N、2 Hz,滑动速度80 km/h,经过300 s实验后的销表面形貌见图14。

图14(a)为接触电流26.2 A时的表面形貌,接触表面有大量宽窄不一的犁沟以及部分磨屑,整个表面极不平整。现象表明:此时接触电流较小,焦耳热较低,接触表面以磨粒磨损为主要磨损形式。接触表面上硬的凸体在摩擦过程中机械性地造成材料的脱落,产生磨屑并参与摩擦,造成表面出现大量犁沟。由于电流较小,温度相对较低,擦拭作用并不充分,表面依然粗糙、不平顺,接触电阻较大。

图14(b)为接触电流65.5 A时的表面形貌,接触表面有部分划痕和黏着凹坑,电弧侵蚀现象并不明



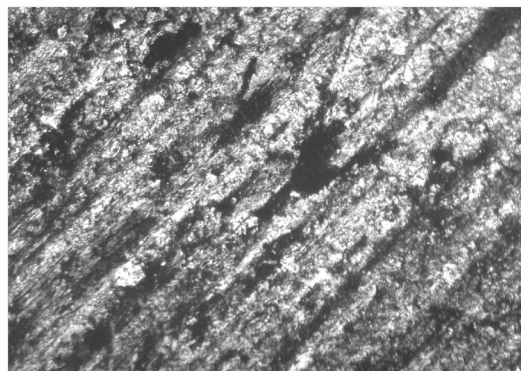
(a) 70 N±10 N, 2 Hz, 80 km/h, 26.2 A



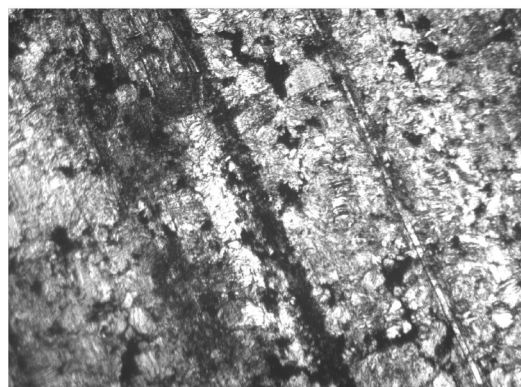
(b) 70 N±10 N, 2 Hz, 80 km/h, 65.5 A

图13 不同接触电流下销试样最高温度

Fig. 13 The maximum temperature of the sample under different contact current



(a) 70 N±10 N, 2 Hz, 80 km/h, 26.2 A



(b) 70 N±10 N, 2 Hz, 80 km/h, 65.5 A

图14 不同接触电流下销试样表面形貌

Fig. 14 Surface morphology of pin samples under different contact current

显,电气磨损形式较为次要。现象表明:此时接触电流较大,产生高密度的焦耳热,使得接触表面材料性能弱化,塑性变形加剧,黏着磨损机制更容易发生。温度的提高导致材料硬度的下降,擦拭作用增大,虽然有黏着点发生剪切断裂留下的凹坑以及划痕,但整个表面相比图 14(a)变的平坦,接触电阻减小。

3 结论

通过对波动载荷下动态接触电阻特性的理论分析和表面形貌分析,得出以下结论:

1)动态接触电阻随着波动幅度的增大先减小后增大;随着波动频率增大而增大,且增大较为缓慢;随着滑动速度的增大而增大;随着接触电流的增大而减小。高温电弧和接触温升是造成动态接触电阻变化的主要原因。

2)波动幅度对动态接触电阻的影响是由于温升和高温电弧共同作用的结果所造成,温度的升高导致接触电阻的减小,而高温电弧导致接触电阻的增大;波动频率在 1~5Hz 范围内变化时,对动态接触电阻的影响并不明显;适当的减小滑动速度对动态接触电阻的改善较为关键。

3)相同载流条件下,压力波动幅度和滑动速度较小时,接触表面主要表现为机械磨损;压力波动幅度和滑动速度较大时,接触表面主要表现为电气磨损,且电气磨损是造成表面接触状态恶化,接触电阻增大的主要原因。

参考文献:

- [1] 丁方正. 带电镀层接触表面之间收缩电阻的计算[J]. 机电元件, 1990(1):9-15.
DING Fangzheng. Calculation of contraction resistance between charged cladding material and contact surface[J]. Electromechanical Components, 1990(1):9-15.
- [2] 郭凤仪, 马同立, 陈忠华, 等. 不同载流条件下滑动电接触特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12):18-23.
GUO Fengyi, MA Tongli, CHEN Zhonghua, et al. Characteristics of the sliding electric contact under different currents[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12):18-23.
- [3] 王万岗, 梁明亮, 吴广宁, 等. 弓网系统静态接触电阻特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1):30-34.
WANG Wangang, LIANG Mingliang, WU Guangning, et al. Characteristics of static contact resistance between pantograph and catenary[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1):30-34.
- [4] 吴积钦. 受电弓——接触网系统电接触特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- WU Jiqin. Study on the characteristics of electric contact between pantograph and overhead contact line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [5] 王万岗. 高速铁路弓网电弧动态特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
WANG Wangang. Study of dynamic characteristic for high speed railway pantograph arcing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [6] 李春茂, 朱宁俊, 吴广宁, 等. 弓网系统动态接触电阻数学模型的研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11):3554-3560.
LI Chunmao, ZHU Ningjun, WU Guangning, et al. Investigation on the mathematical model of dynamic contact resistance of pantograph-catenary system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3554-3560.
- [7] ZHOU Y, HONG C, LIU L, et al. The reliability investigation of gold plated electrical contacts under sliding conditions[C]//2012 IEEE Conference on Prognostics and System Health Management (PHM). [S.l.]:IEEE, 2012:1-6.
- [8] BOGGS S, NISHIWAKI S, TOYODA M, et al. Effect of silver coating thickness on high current contact stability[C]//2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation.[S.l.]:IEEE, 2002:5485-5494.
- [9] 陈忠华, 唐博, 时光, 等. 弓网多目标滑动电接触下最优压力载荷[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17):154-160.
CHEN Zhonghua, TANG Bo, SHI Guang, et al. Optimal pressure load under multi-objective sliding electric contact in the pantograph-catenary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17):154-160.
- [10] 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 Lemin, ZHAO Yanxia, et al. Effects of fluctuating load on friction and wear property of C/C composite/QCr0.5 under electrical current[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(11):37-40.
- [11] 胡道春, 孙乐民, 上官宝. 动载荷条件下紫铜/铬青铜受流摩擦磨损性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(1):35-39.
HU Daochun, SUN Lemin, SHANGGUAN Bao. Tribological characteristics of t2/QCr0.5 rubbing pairs with electric current and dynamic load[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(1):35-39.
- [12] 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]. Tribology Transactions, 2012, 226(8):722-728.
- [13] YANG H J, HU Y, CHEN G X, et al. Correlation between the wear and vibration of the contact strip in a contact wire rubbing against a contact strip with electrical current[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(1):86-93.
- [14] 阮杰. 电气化高速铁路接触网与受电弓动态性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
RUAN Jie. Study on the dynamic performance of overhead

(下转第 163 页)

- [16] 万 帅, 张 伟, 陈家宏, 等. 一种新型 110 kV 输电线路雷击闪络限制器的研制[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 184-190.
WAN Shuai, ZHANG Wei, CHEN Jiahong, et al. Research and development of a new type lightning arresters for 110 kV AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 184-190.
- [17] 李 鑫. 高压输电线路综合防雷措施的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LI Xin. Research and application of comprehensive measures of lightning protection for high voltage transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [18] 贺 远. 500 kV 输电线路雷击故障分析与防雷措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
HE Yuan. Research on lightning stroke tripping of 500 kV transmission lines and lightning protection measures[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [19] 高广德, 向 文, 邹建华, 等. 基于改进层次分析法的输电线路并行防雷措施的研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(6): 154-158.
GAO Guangde, XIANG Wen, ZOU Jianhua, et al. Research of parallel lightning protection measures for transmission line based on IAHP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(6): 154-158.
- [20] 胥彦玲, 李 纯, 宸铁梅, 等. 基于专利分析的锂离子电池储能技术发展态势[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2): 323-329.
XU Yanling, LI Chun, YI Tiemei, et al. Development trend of lithium-ion battery energy storage technology based on patent analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2): 323-329.
- [21] 王若谷, 戴立森, 梁芷睿, 等. 基于不同种类储能电池的微电网综合储能系统性能对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 166-171.
WANG Ruogu, DAI Lisen, LIANG Zhirui, et al. Performance comparison of microgrid integrated energy storage system based on different kinds of batteries[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 166-171.
- [22] 陈 燕. 专利信息采集与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 1-30.
CHEN Yan. Patent information collection and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 1-30.
- [23] 赵亚娟, 董 瑜, 朱相丽, 等. 专利分析及其在情报研究中的应用[J]. 图书情报工作, 2006, 50(5): 19-22.
ZHAO Yajuan, DONG Yu, ZHU Xiangli, et al. Patent analysis and its application in information research[J]. Library and Information Service, 2006, 50(5): 19-22.
- 邓阿妹(1981—), 女, 博士, 主要从事专利、标准等科技情报分析和研究。
- 魏 凤(1977—), 女, 研究员, 博士, 主要从事专利、标准、政策、法律法规等情报的分析和研究(通讯作者)。
- 谷山强(1981—), 男, 研究员级高工, 博士(后), 从事雷电监测防护与预警技术、智能输电运检技术研究及推广工作。
- 赵 淳(1985—), 男, 博士研究生, 从事电网防灾减灾与输电运维技术研究开发与工程应用推广工作。
- 曾 瑜(1986—), 女, 工程师, 硕士生, 从事雷电监测与防护技术研究及技术标准管理工作。
- 李春生(1978—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事输变电防雷技术研究工作。
- 周 恺(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事输电线路技术研究工作。

(上接第 155 页)

- contact system and pantograph for high speed rail way[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [15] 陈忠华, 石英龙, 时 光, 等. 受电弓滑板与接触网导线接触电阻计算模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 188-195.
CHEN Zhonghua, SHI Yinglong, SHI Guang, et al. Calculation model of the contact resistance between pantograph slide and contact wire[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 188-195.
- [16] MERCHANT H D, MURTY G S, BAHADUR S N, et al. Hardness-temperature relationships in metals[J]. Journal of Materials Science, 1973, 8(3): 437-442.
- [17] ROARK R J. Formulas for stress and strain[M]. New York: Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd., 2003.
- [18] 吴积钦, 钱清泉. 弓网系统电弧侵蚀接触线时的热分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(3): 31-34.
WU Jiqin, QIAN Qingquan. Thermal analysis of arc erosion of contact wire of the pantograph & catenary system[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3): 31-34.
- [19] 张永振, 宋克兴, 杜三明, 等. 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.
- [20] 朱宁俊. 弓网系统接触电阻特性及其影响机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHU Ningjun. Research on the characteristic and effect mechanism of the contact resistance of pantograph-catenary system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [21] 吴积钦. 弓网系统电弧的产生及其影响[J]. 电气化铁道, 2008(2): 27-29.
WU Jiqin. Generation of arc in pantograph catenary system and its influence[J]. Electric Railway, 2008(2): 27-29.
- 陈忠华(1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电机与电器、电接触理论及其应用。
- 王一帆(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电接触理论及其应用。