

界面氧化对碳-铜接触副电接触性能的影响

高国强¹, 王青松¹, 何志江², 肖嵩^{1*}, 王虹¹, 钱鹏宇¹, 彭伟¹, 吴广宁¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756;

2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽省 合肥市 230601)

Influence of Interface Oxidation on the Electrical Contact Properties of C-Cu Contact Pairs

GAO Guoqiang¹, WANG Qingsong¹, HE Zhijiang², XIAO Song^{1*}, WANG Hong¹,

QIAN Pengyu¹, PENG Wei¹, WU Guangning¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China

2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute, Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Pantograph catenary system sliding electrical contact is the only way for train energy transmission. And the oxidation degree of contact interface has an obvious effect on the current carrying friction and wear of C/Cu contact pairs. This paper designs a linear reciprocating current carrying friction test bench and presents a method to simulate different oxidation states by quantitatively controlling the thickness of oxide film on the surface of carbon sliding plate. The electrical contact characteristics of C/Cu contact pairs under different oxidation degrees of oxidation and the effect of interface oxidation on the electrical contact performance of current carrying friction pair are studied. The results show that Proper thickness of oxide film is helpful to obtain lower contact resistance, which is 17.9% lower than the initial value, improving the electrical contact performance of carbon/copper contact pair and facilitate energy transmission. However, excessively thick oxide film will increase the contact resistance, leading to frequent discharge at the contact interface. The total discharge energy is 104.4% higher than the initial value, and its electrical contact performance is degraded. The research content is helpful to further improve the service performance of carbon/copper contact pairs in low oxygen environment.

KEY WORDS: C/Cu contact pairs; current-carrying friction and wear; electrical contact characteristics; interfacial oxidation

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(51922090); 国家自然科学基金-联合基金集成项目(U1966602); 四川省杰出青年科技人才项目(2019JDJQ0019)。

National Excellent Youth Science Foundation Project (51922090); Smart Grid Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U1966602); Sichuan Science and Technology General Project (2019JDJQ0019).

摘要: 弓网系统滑动电接触是列车能量传递的唯一途径。且界面氧化程度对 C/Cu 接触副载流摩擦磨损影响显著。文中设计直线往复载流摩擦试验台, 提出一种通过定量控制碳滑板表面氧化膜厚度来模拟不同氧化状态的方法, 研究不同氧化程度下 C/Cu 接触副的电接触特性, 探究界面氧化对载流摩擦副电接触性能的影响机理。实验结果表明: 适当的氧化膜厚度有助于获得更低的接触电阻, 较初值降低了 17.9%, 提升 C/Cu 接触副的电接触性能, 有利于能量传输; 但过厚的氧化膜会增大接触电阻, 导致接触界面放电频发, 放电总能量较初值提升了 104.4%, 劣化其电接触性能。所得结果有助于进一步提升碳/铜接触副在低氧环境的服役性能。

关键词: C/Cu 接触副; 载流摩擦磨损; 电接触特性; 界面氧化

0 引言

碳材料因其优越的润滑性、稳定性, 常与铜材料配合被广泛应用于轨道交通领域、电力领域及航空航天领域的滑动电接触系统中^[1-6], 在滑动电接触能量传输中起着极为重要的作用。高速列车弓网系统是一种典型的碳-铜滑动电接触副, 其服役性能和寿命与接触副电接触特性息息相关^[7-9]。受电弓碳滑块在滑动受流过程中, 在其接触表面上会积聚大量的焦耳热、摩擦热以及电弧热^[10-11], 这些热量促使开放大气条件中碳-铜界面氧化膜层的生成速率加快。界面氧化膜一方面因其低电导率, 一定程度上阻碍电流的传输, 加剧了界面电弧放电, 降低界面电接触稳定性^[12]; 另一方面氧化膜的边界润滑作用, 能有效减缓界面损伤, 接触界面粗糙度降低, 传导电流的有效接触斑点增多, 有助于维持较好的电接触性能^[13]。但目前界面氧化膜的两种相反作用

的竞争机制尚不明确。随着高速列车向更高速度、更大容量发展，弓网碳-铜界面温度剧增，界面损伤加剧，界面氧化膜的生成速度和被破坏的速度均不断提升，界面氧化层的分布极不均匀^[14-17]，进一步提升了界面氧化对弓网碳-铜接触副电接触性能影响的复杂程度。

早在 20 世纪初，就有学者关注到氧化膜对接触副的电接触特性存在影响。辽宁工程技术大学的郭凤仪等研究了不同载流条件下铜基粉末冶金滑板及浸铜碳滑板的电接触特性，发现了随着电流的增加，两种滑板材料的接触电阻、温度以及磨损率都在增加，但浸铜碳滑板材料的接触电阻变化率较小^[18]。Xinlong Liu 等研究了不同气氛环境对微动摩擦接触电阻的影响，发现了富氧环境促进了表面氧化铜和氧化亚铜的生成，增大了接触电阻，但温度升高带来的接触面软化以及氧化磨粒的润滑作用，降低了摩擦系数和磨损率^[19]。西南交通大学龚聪煜等研究了氧化石墨烯在不同粗糙条件下的微动电接触性能，试验表明氧化石墨烯能显著降低接触电阻、摩擦系数和磨损量^[20]。高温下，氧化石墨烯脱落导致接触电阻上升，铜板磨损加剧。上述研究表明氧化膜在电接触性能中的重要地位，但研究工作侧重于定性分析氧化膜的影响，对电流、温度、氧化等参数没有解耦，目前尚缺乏界面氧化对碳-铜接触副载流摩擦磨损的影响规律及作用机理的定量研究。

因此本文搭建了载流摩擦试验台，通过定量控制接触界面氧化膜的厚度，研究不同氧化程度下碳-铜接触副的电接触特性；通过对磨损后的碳滑块表面形貌及成分进行分析，解析界面氧化对碳-铜配副电接触性能的影响机理。研究结果可为进一步提升碳-铜接触副的电接触性能，提升弓网运行的稳定性提供一定的指导。

1 试验设备与分析方法

1.1 试验设备

本文模拟弓网系统碳-铜接触模式，设计了直线往复载流摩擦试验台，具体如图 1 所示。实验设备主要由载流摩擦试验台、直流恒流电源、数据采集系统、空气压缩机、气氛舱、红外热成像仪组成。铜接触线通过接触线夹和绝缘子固定在两根钢柱上，铜接触线与碳滑块试样移动轨迹的夹角固定为 15°，以使滑块在试验中模拟实际铁路受电弓滑

板“之”字型运动^[18]。碳滑块位于铜接触线下方，通过夹具固定后在滑轨的带动下与接触线相对滑动，通过空气压缩机向气缸提供稳定的气流，气体通过气体腔室内后将其活塞杆顶出，向接触副提供 20~200N 可调的法向载荷，使碳滑块运动过程中始终保持了铜接触线的稳定接触。恒流源可为碳-铜接触副提供 0~200A 可调的直流电流。在碳滑块夹具下方安装两个力传感器分别测量运动中的切向和法向载荷，其量程均为 0~500N，精度为 0.02%。霍尔电压传感器测量接触副压降，其量程为-200~200V，线性度 0.1%，准确度 0.5 级；交流电流钳测量流经接触副的电流，其量程为 0~800A，准确度 >99%。数据采集系统可实时采集切向载荷、法向载荷、电压和电流的数据，采集频率 5kHz，红外热成像仪则是用于测量滑块表面的温度。

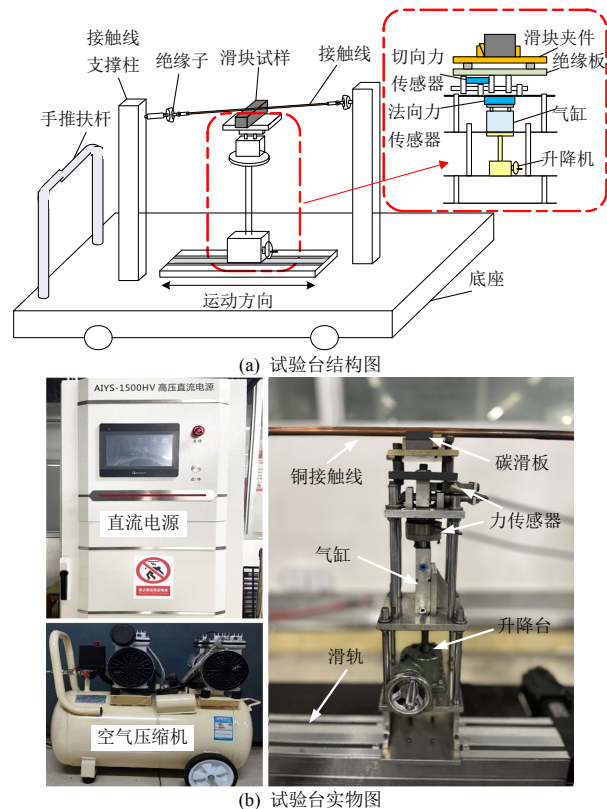


图 1 滑动往复载流摩擦磨损实验平台

Fig. 1 sliding reciprocating current-carrying friction test

1.2 试验材料及方法

在试验中，滑块由规格为 100mm×35mm×35mm 的碳材料制成。接触线由直径为 3mm 的纯铜材料制成，上述材料的化学组成和主要的物理特性如表 1 所示。

实验开始前，用 300、2000 目的砂纸打磨滑板和接触线表面至平整，试验参数如表 2 所示。试验后以碳滑块的表面形貌和接触电阻作为实验结果

表1 试验材料的化学组成主要物理特性
Table 1 chemical composition and main physical properties of test materials

材料组成及性能	纯碳滑块	纯铜接触线
元素组分/%	99.19% C, 0.73% S, 0.08% O	99.50% Cu, 0.50% O
密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	1.53	8.9
电阻率/(10 ⁻⁶ Ω·m)	32	0.018
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	769	380
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.4	380
硬度/(10 ⁷ N·m ⁻²)	43	82.6

表2 载流摩擦试验参数
Table 2 Current-carrying friction test parameters

参数	条件
氧化膜厚度/μm	0、2、3、4.6、6.9、9.2、11.5
电流 I/A	60
载荷 F/N	100
滑行速度 v/(m/s)	1.5
滑行时间 t/min	45

的表征参数，每组重复3次以减小实验误差。

1.3 试验数据处理

1.3.1 接触电阻的计算

接触电阻是表征电接触性能的核心参数之一。通过霍尔电压传感器、交流电流钳以及数据采集卡实时记录了试验过程中的接触压降和回路电流，采用式(1)计算接触电阻(由于碳、铜材料的体电阻远小于接触电阻值，故材料体电阻忽略不计)：

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{I_i} \tag{1}$$

式中：R 表示碳-铜接触界面的平均接触电阻；U_i 表示碳-铜接触界面的动态电压降；I_i 表示流经碳-铜接触界面的动态电流值。

1.3.2 电弧能量的计算

在弓网系统运行状态下，由于接触电阻的存在，导致碳-铜接触界面产生电压降，但当接触副在运行过程中因振动出现分离或虚接状态时，电压降的数值将突增，一旦超过空气击穿电压时，将会发生电弧现象。本文通过式(2)、(3)计算碳-铜接触副的电弧放电总能量和单位时间内电弧放电能量。

$$E = \sum_{k=0}^n \int_{t_0}^{t_1} UI dt, \quad U > U_c \tag{2}$$

$$e = \frac{E}{T} = \frac{\sum_{k=0}^n \int_{t_0}^{t_1} UI dt}{T}, \quad U > U_c \tag{3}$$

式中：E 为电弧放电总能量，kJ；e 为单位时间内

电弧放电能量，J/s；U为接触副间的放电电压，V；I为流过接触副的电流，A；T为接触副间发生电弧的时间，s；t为时间，s；U_c为空气的击穿压降。

1.4 界面氧化处理方法

在载流摩擦磨损的过程中，接触表面会形成一层金属氧化膜，通过对试验后滑板表面有铜转移的区域、纯C、Cu表面以及氧化铜进行XRD谱图分析，结果如图2所示，其中除了突出的C峰和Cu峰外，还存在明显的CuO峰，因此滑板表面形成的金属氧化物以CuO为主。为了探究界面氧化膜对碳-铜接触副载流摩擦磨损的影响规律，本文选取粒径为4.5μm的CuO粉末，将CuO粉末放置在筛网上，使其均匀覆盖在碳滑板表面，再通过机械压制使CuO黏着在碳滑块表面，由于滑板表面涂敷的面积是确定的，故氧化膜厚度是通过使用精度为0.0001g的电子天平测量CuO粉末的质量来定量控制。图3(a)为碳滑板表面涂敷CuO后的表面形貌，因为碳滑块在试验中为“之”字型运动，为了保证

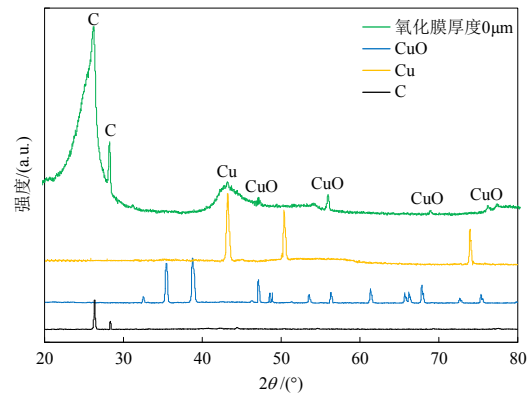
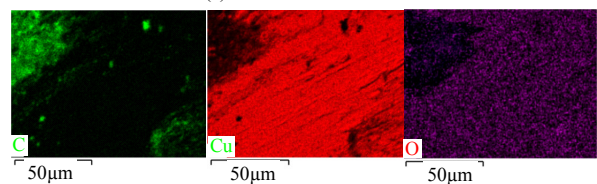


图2 未涂抹氧化膜时磨损后碳滑板与各标准峰的XRD谱图

Fig. 2 XRD spectrum of carbon slide plate and standard peaks without oxide film on C/Cu contact pair



(a) 碳滑板表面宏观情况



(b) 区域A的EDS分析

图3 碳滑板表面氧化后的表面形貌

Fig. 3 surface morphology of carbon slide after oxidation

所有接触区域均存在氧化层,故涂敷宽度定为6cm。图3(b)为宏观表面氧化膜部分(即区域A)的EDS分析图,从中可以看出所涂敷的CuO基本均匀分布于滑板表面。

2 试验结果与分析

2.1 界面氧化对接触电阻的影响

接触电阻是弓网电接触性能最关键的表征参数,其值很大程度上反应了弓网电接触状态的优劣。而弓网碳-铜界面氧化膜的高电阻率势必会对接触电阻产生较为重要的影响,进而使弓网电接触状态发生转变^[21]。

2.1.1 静态接触电阻

图4为不同氧化膜厚度下静态接触电阻变化趋势,通入60A电流后,随着氧化膜厚度的增加,静态接触电阻逐渐增加。根据静态接触电阻变化趋势的快慢,可将其分为缓增阶段、陡增阶段以及绝缘阶段。当接触表面未覆盖氧化膜时,电流通过接触斑点进行传递,接触电阻主要由电流通过这些接触斑点收缩产生的收缩电阻组成。在缓增阶段,接触表面上覆盖一层较薄的氧化层,原本直接接触的部分接触斑点被其隔离,此时的接触电阻由膜电阻和收缩电阻共同组成^[22],接触电阻数值增加。流经被氧化膜覆盖的接触斑点的电流逐步减少,而未被氧化膜覆盖的接触斑点需要承受更高的电流,导致接触界面局部区域热量积聚,这些能量促使该区域表面形成氧化膜,同时聚集的热量会使铜斑点硬度下降,对脆性氧化膜的支撑作用减弱,部分脆性氧化膜易剥落,因此接触电阻增加缓慢。陡增阶段由于氧化层过厚,部分接触斑点已经无法流通电流,导致剩余的接触斑点电流密度大幅增加,温升陡增,

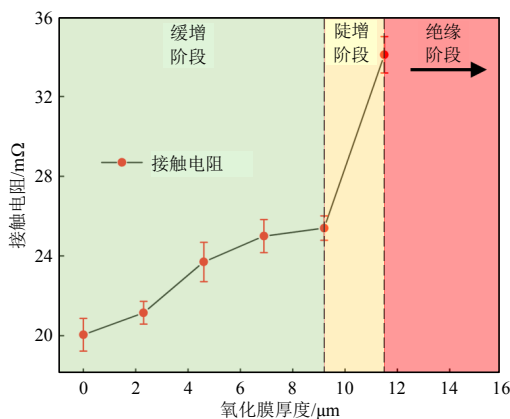


图4 接触电阻随氧化膜厚度变化曲线

Fig. 4 change curve of contact resistance with oxide film thickness

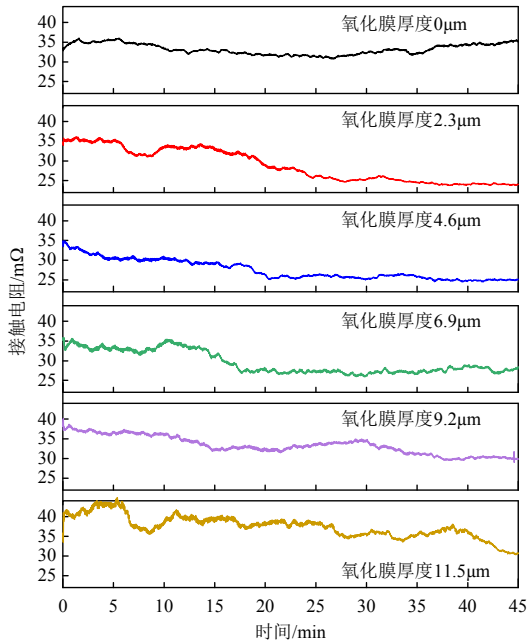
接触斑点失效几率增加,最终造成了接触电阻呈大斜率增加。当进入绝缘阶段时,氧化膜厚度过大,所有接触斑点都被完全隔离,整体电接触状态处于绝缘状态。

2.1.2 动态接触电阻

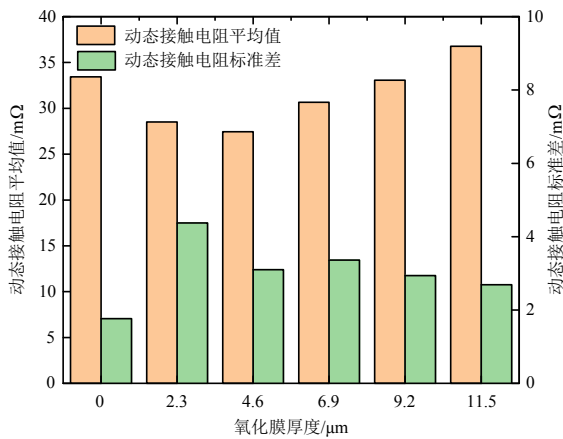
在实际工况下,载流摩擦长期都处在运动状态,动态过程中的界面氧化对接触电阻的影响相较于静态过程来说将会变的更加复杂多变。一方面氧化膜的存在会提高膜电阻,另一方面,氧化膜的润滑作用能让接触表面更光滑,接触斑点的尺寸增大以及数量增多,从而降低收缩电阻。为探究两者之间相互竞争的机制,本研究进行了不同氧化层厚度下滑动电接触试验。

图5所示为随着氧化膜厚度的增加,弓网碳-铜界面接触电阻动态值、平均值以及标准差的变化趋势。从图5(a)观察到,未涂覆氧化膜时,接触电阻整体波动变化较小。表面涂敷氧化膜后,整个动态接触电阻可以分为磨合阶段和稳定阶段,由于氧化膜的高电阻率,接触电阻的初值较大。氧化膜厚度在 $2.3\sim 6.9\mu\text{m}$ 时,膜电阻虽有所上升,但电流尚能击穿氧化膜层在接触斑点间传导,而氧化膜的边界润滑作用隔离了碳-铜基体间的直接接触,降低了界面间的粘着、犁削磨损,界面粗糙度随之降低,光滑界面接触斑点数量及表面积都更大,收缩电阻减小使接触电阻逐步降低,经过20min左右的磨合后,接触界面氧化膜分布及厚度达到动态平衡,接触电阻进入稳定阶段。随氧化膜厚度的增加,接触电阻进入到稳定阶段的时间更短,但由于膜电阻的增加,达到稳定状态的接触电阻幅值随之增大。氧化膜超过 $9.6\mu\text{m}$ 后,过高的膜电阻导致接触界面局部区域会聚集大量热量,碳-铜接触斑点高温失效,致使接触界面各区域间的导电性存在较大差异且处于剧烈的变化状态,这导致接触电阻处于磨合阶段的时间增加,甚至在试验记录的40min内未进入到稳定阶段。

动态电阻的平均值和标准差如图5(b)所示,随氧化膜厚度的增加,接触电阻呈U字型变化,即接触电阻先降低再增加,转折点出现在氧化膜厚度为 $4.6\mu\text{m}$ 处。接触电阻的标准差则随着氧化膜厚度的增加呈倒U型分布,在无氧化膜覆盖时的波动最小。这说明,氧化膜会加剧接触电阻的波动程度,而过厚的氧化膜长期使接触电阻处于较高水平,其波动程度也降低,但电能传输效率明显下降。



(a) 动态接触电阻



(b) 平均值和标准差

图5 不同氧化膜厚度对动态接触电阻的影响
Fig. 5 Effect of different oxide film thickness on dynamic contact resistance

2.2 界面氧化对电弧特性的影响

在碳-铜电接触副相对运动中，当接触点脆性断裂或发生分离时，由于存在接触压降，界面会发生放电现象^[23-26]。界面放电主要受两方面因素的影响，一是接触界面上的电压降 U ，二是气体击穿电压 U_0 。当电流恒定时，接触压降主要由接触电阻的大小决定。

图 6、7 分别为放电频次、平均单次放电能量以及电弧放电总能量和总持续时间随氧化膜厚度的变化曲线。从图 6 可知，放电频次及平均单次放电能量均呈先下降后上升的趋势，存在极小值点，极小值点分布出现在 2.3 和 4.6 μm 处。当氧化膜厚度小于等于 4.6 μm 时，此时接触表面的氧化膜较薄，膜电阻尚处于缓增阶段，而边界润滑作用降低接触

界面的粗糙度，接触斑点尺寸增大以及数量增多，收缩电阻下降显著，导致接触电阻下降，从而使接触压降降低，平均单次放电能量随氧化膜厚度的增加呈下降趋势。由图 5(b)可知，在氧化膜厚度为 2.3 和 4.6 μm 时，前者的接触电阻阻值略大于后者，因此两者的触点压降相差很小，但当氧化膜厚度从 2.3 μm 增加到 4.6 μm 时，接触表面聚集的热量在局部区域会增加，使其附近的气体活性增强，气体击穿电压 U_0 下降，此时触点压降 U 与气体击穿压降 U_0 的差值在 4.6 μm 时反而更大，因此更容易发生放电，放电频次较 2.3 μm 时更高。

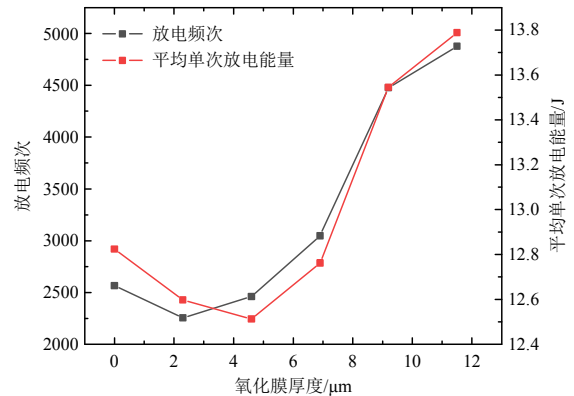


图6 放电频次与单次放电能量随氧化膜厚度的变化
Fig. 6 Frequency of discharge and single discharge energy with the thickness of the oxide film

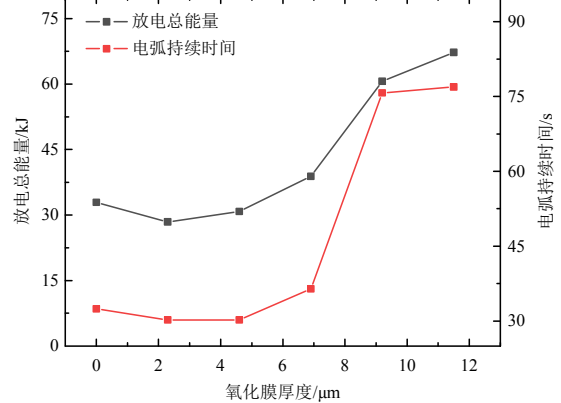


图7 放电总能量与持续时间随氧化膜厚度的变化
Fig. 7 Variation of total energy and duration of arc discharge with oxide film thickness

当氧化膜厚度超过 4.6 μm 时，此时升高的膜电阻阻碍电流在接触斑点间的传播，从而导致接触界面局部温度梯度陡增、电弧放电严重，电损伤和热损伤加剧，会使接触表面原本连续的氧化膜破裂，甚至使接触副材料性能急剧劣化，接触表面粗糙程度增加，导电通道被破坏，接触电阻增大，接触压降增加，平均单次放电能量陡增；另一方面，较高的界面粗糙度增加了接触的稳定性，而局部过厚的

氧化膜导致接触表面局部温度上升后，其附近的气体活性进一步增强，气体击穿电压 U_0 随之下降，界面更容易发生放电现象，放电频次激增。

由图 7 可知，放电总能量和电弧持续总时间均随氧化膜厚度的增加呈先下降后上升的趋势，分别在 2.3 和 4.6 μm 处取得最小值。相较于氧化膜厚度为 4.6 μm 的情况，2.3 μm 厚度下的平均单次放电能量增加了 2%，但放电频次下降更多，降低了 9%，因此放电总能量在 2.3 μm 下取得最小值，而电弧持续总时间则与放电频次的变化趋势一致。

2.3 界面氧化对界面温度的影响

界面氧化状态的改变对滑动电接触副间的摩擦热、焦耳热、电弧热均存在影响，而表面的温度变化主要与接触电阻产生的焦耳热大小有关^[27]。图 8 为不同氧化膜厚度下滑板表面温度随时间的变化趋

势，其中， T_{max} 代表滑板表面最高温度， T_{avg} 代表滑板表面平均温度。可以得出平均温度随氧化膜厚度的增加先减小后增大，并在 4.6 μm 时取得最小值。这是因为较薄的氧化膜能提高表面的光滑程度，降低界面的粗糙度，接触斑点尺寸增大以及数量增多，导致接触电阻下降，滑板表面温度下降；而过厚的氧化膜会严重阻碍电流的传输，界面温度上升明显，进一步导致材料劣化，表面粗糙度增大，接触电阻增大。同时，滑板最高温度的变化与平均温度的变化趋势相同，但最小值点却出现在氧化膜厚度为 2.3 μm 时。出现这种现象的原因在于，当氧化膜厚度为 4.6 μm 时，相较于 2.3 μm ，在摩擦过程中，氧化物在局部区域的积聚更为显著，局部斑点膜电阻的升高是导致接触区域最高温度增加的主要原因，这进一步验证 4.6 μm 时放电频次更高的分析结果。

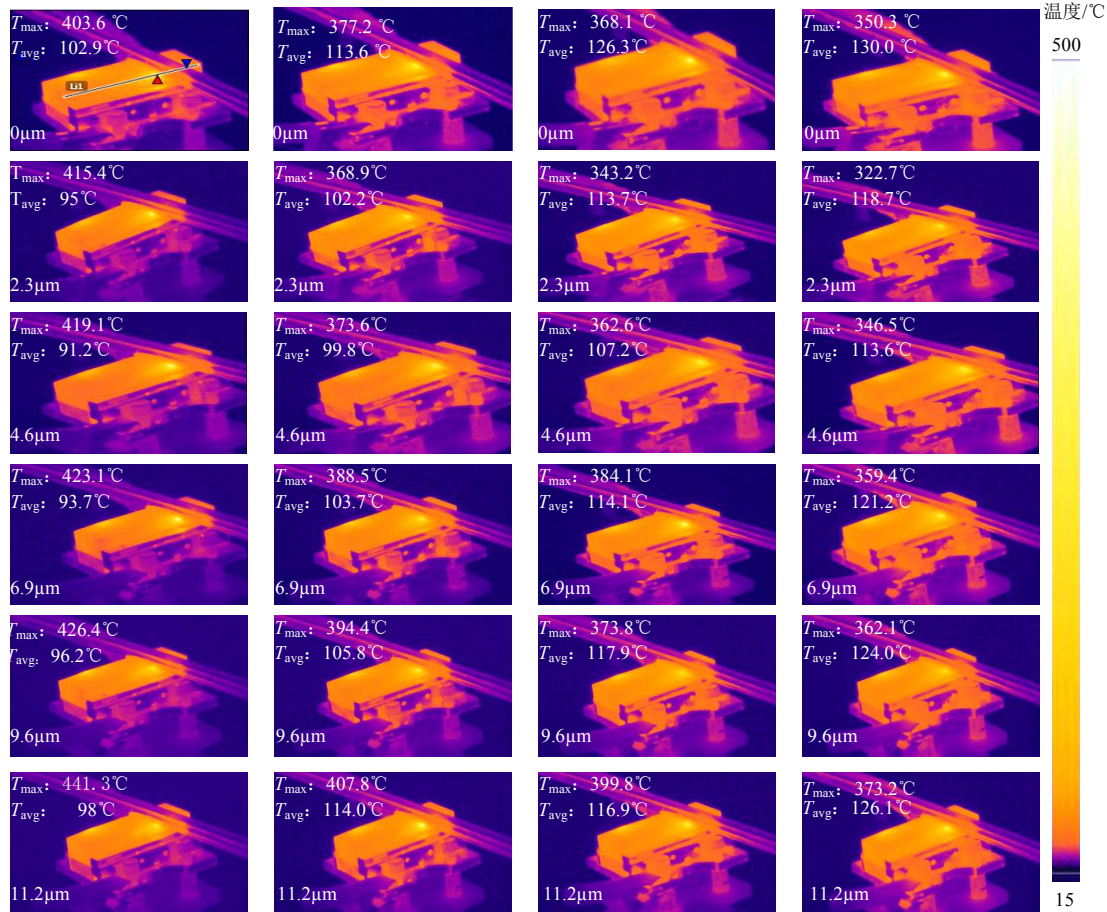


图 8 不同工况下滑板表面温度变化

Fig. 8 Variations in surface temperature of slides under different operating conditions

2.4 表面形貌及损伤机理分析

图 9 所示是利用金相显微镜扫描观测的碳滑板表面形貌，其中图 9(a)为无氧化膜运行后的表面形貌，通入 60A 电流，在此条件下长时间运行，缺乏氧化膜的隔离润滑作用，而电流带来的高温又使金

属铜软化，碳接触副间的材料转移现象最为显著。滑板表面出现明显的铜转移，且高温促使铜发生一定程度的氧化，表面颜色由最初的紫红色逐渐变为浅黄色，同时可以清晰观察到机械损伤造成的划痕^[28]。图 9(b)是氧化膜厚度为 4.6 μm 运行后的表面

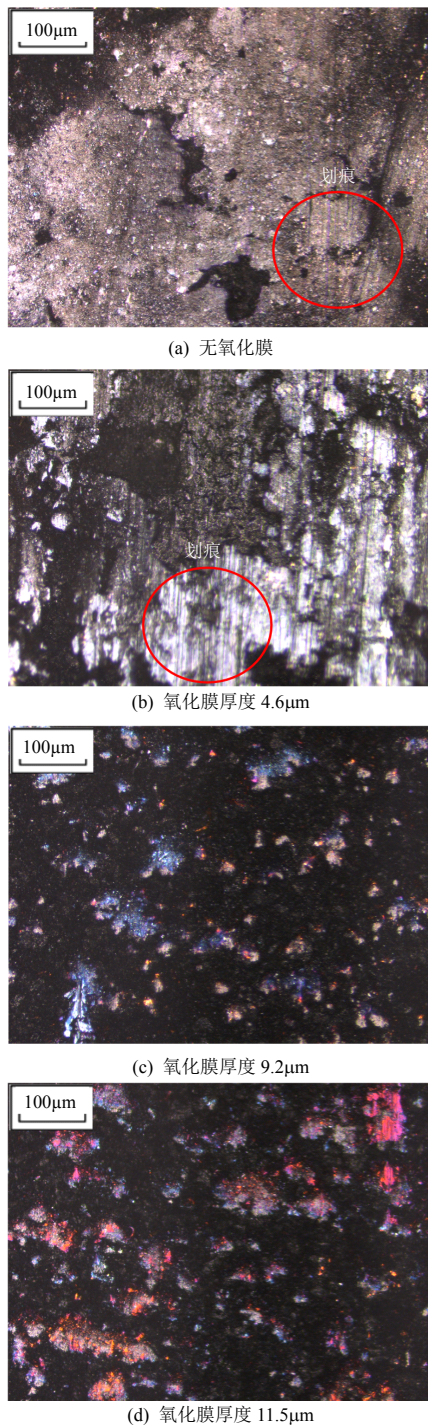


图9 碳滑板表面形貌(光镜×100)

Fig 9 surface morphology of carbon sliding plate(light microscope×100)

形貌, 初始接触界面存在氧化膜后, 能隔离碳-铜基体的直接接触, 降低黏着磨损, 当氧化膜较薄时对电流传输的阻碍效果有限, 电、热损伤未造成氧化膜的大面积剥落, 接触表面始终存在一层薄且连续均匀的边界润滑层, 颜色呈银灰色。图9(c)是氧化膜厚度为 $9.2\mu\text{m}$ 运行后的表面形貌, 初始氧化膜厚度的进一步增加, 较高的膜电阻阻碍电流在接触斑点间的传输, 放电频发。界面局部氧化膜破损剥

落, 放电产生的局部高温促使附近区域氧化加剧, 在界面形成分散且厚的青蓝色、桃红色氧化膜层。分散且较厚的氧化膜层丧失了润滑隔离作用, 且进一步阻碍局部区域电流传输, 界面电热损伤加剧, 界面粗糙度增加, 电接触性能劣化^[29]。图9(d)为氧化膜厚度为 $11.5\mu\text{m}$ 运行后的表面形貌, 氧化膜分布状态与图9(c)类似, 但分散的氧化膜厚度及尺寸明显增加, 且主要呈桃红色。进一步增厚的氧化膜使碳材料具有更高的表面粗糙度, 电接触性能进一步劣化。

3 结论

本文提出一种定量控制碳滑板表面氧化膜厚度的方法, 探究界面氧化对碳/铜接触副电接触性能的影响, 得到以下结论:

1) 静态电接触中, 氧化膜厚度与电接触劣化性能单调增加。而滑动电接触中, 接触电阻随着氧化膜厚度的增加呈“U”字型变化, 最小值点出现在 $4.6\mu\text{m}$ 处, 较初值降低了17.9%。

2) 滑动电接触中, 较薄的氧化膜降低了摩擦过程中接触界面的粗糙度, 可抑制接触界面放电, 且电弧放电总能量较初值降低了13.59%; 而较厚的氧化膜会阻碍电流在接触斑点间的传播, 导致电弧放电严重, 总能量较初值提升了104.4%。

3) 碳表面 T_{max} 与 T_{avg} 随氧化膜厚度的增加均呈U字型变化, 极小值点分别出现在 2.3 、 $4.6\mu\text{m}$ 处。

4) 氧化膜较薄且以连续均匀的形式出现时, 能有效降低磨损; 而厚度较大时, 低电导率带来的温升会劣化材料的机械性能, 润滑作用明显减弱。同时氧化膜厚度的增加会造成转移层的颜色和组成成分逐渐丰富。

参考文献

- [1] 王塞北, 彭明军, 孙勇, 等. 金属触头电接触性能研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9117-9123.
WANG Saibei, PENG Mingjun, SUN Yong, et al. Research progress on electrical contact performance of metal contacts[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9117-9123(in Chinese).
- [2] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.
RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1-9(in Chinese).

- [3] 周昱涵, 杨泽锋, 鲁超, 等. 弓网系统离线电弧在低气压环境下运动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5412-5420.
ZHOU Yuhuan, YANG Zefeng, LU Chao, et al. Research on motion characteristics of offline arc in pantograph catenary system under low air pressure environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5412-5420(in Chinese).
- [4] 谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(5): 656-668.
XIE Bohua, JU Pengfei, JI Li, et al. Research progress on tribology of electrical contact materials[J]. Tribology, 2019, 39(5): 656-668(in Chinese).
- [5] 李箫波, 魏文赋, 左浩梓, 等. 基于 Mo₂C 晶粒增强的铜/石墨复合材料浸渗特性与优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7881-7889.
LI Xiaobo, WEI Wenfu, ZUO Haozi, et al. Infiltration characteristics and optimization of copper/graphite composite reinforced by Mo₂C grain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7881-7889(in Chinese).
- [6] 胡怡, 魏文赋, 雷栋, 等. 弓网电弧等离子体光谱特性实验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 62-70.
HU Yi, WEI Wenfu, LEI Dong, et al. Experimental investigation on spectral characteristics of pantograph-catenary arc plasma[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 62-70(in Chinese).
- [7] 高国强. 高速列车运行状态暂态过电压机理与抑制方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
GAO Guoqiang. Study on the over-voltage mechanism and suppressing method for high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012(in Chinese).
- [8] 高宗宝, 吴广宁, 吕玮, 等. 高速电气化铁路中的弓网电弧现象研究综述[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 104-108, 127.
GAO Zongbao, WU Guangning, LV Wei, et al. Research review of arc phenomenon between pantograph and catenary in high-speed electrified railway[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 104-108, 127(in Chinese).
- [9] 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 Yang, LIU Guimin, YAN Tao, et al. Research status and prospect of current-carrying friction and wear[J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2272-2280(in Chinese).
- [10] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5(in Chinese).
- [11] 周悦, 魏文赋, 高国强, 等. 弓网电接触系统滑板温升特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 74-80.
ZHOU Yue, WEI Wenfu, GAO Guoqiang, et al. Characteristics of temperature rise of pantograph strip in electric contact system between pantograph and catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 74-80(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 熊党生, 李溪滨. 氧化磨损与氧化物润滑[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1996, 1(1): 49-57.
XIONG Dangsheng, LI Xibin. Oxidative wear and oxide lubrication[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 1996, 1(1): 49-57(in Chinese).
- [14] 郭凤仪, 姜国强, 赵汝彬, 等. 基于相对稳定系数的滑动电接触特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 113-119.
GUO Fengyi, JIANG Guoqiang, ZHAO Rubin, et al. Sliding electrical contact characteristics based on relative stability coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 113-119(in Chinese).
- [15] 吴广宁, 周悦, 雷栋, 等. 弓网电接触研究进展[J]. 高压技术, 2016, 42(11): 3495-3506.
WU Guangning, ZHOU Yue, LEI Dong, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary[J]. High-Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3495-3506(in Chinese).
- [16] 吴杰, 高国强, 魏文赋, 等. 弓网系统滑动电接触特性[J]. 高压技术, 2015, 41(11): 3635-3641.
WU Jie, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, et al. Characterization of sliding electrical contact of pantograph-catenary system[J]. High-Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3635-3641(in Chinese).
- [17] YANG Hongjuan, CHEN Guangxiong, GAO Guoqiang, 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, 332-333: 949-955.
- [18] 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(in Chinese).
- [19] LIU Xinlong, CAI Zhenbing, CUI Ye, et al. Effect of

- Different atmospheres on the electrical contact performance of electronic components under fretting wear [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(15): 155302.
- [20] 龚聪煜, 刘善邦, 曹中清, 等. 电泳沉积法制备氧化石墨烯膜的微动电接触性能[J]. *表面技术*, 2021, 50(8): 227-236.
GONG Congyu, LIU Shanbang, CAO Zhongqing, et al. The fretting electrical contact performance of graphene oxide films prepared by electrophoretic deposition[J]. *Surface technology*, 2021, 50(8): 227-236(in Chinese).
- [21] BHUSHAN B, GE S. Electromagnetic effects on the friction and wear of solid-solid interface [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2003, 34(10-11): 938-945.
- [22] 时光, 陈忠华, 郭凤仪, 等. 波动载荷下弓网接触电阻特性及建模研究[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(11): 2287-2295.
SHI Guang, CHEN Zhonghua, GUO Fengyi, et al. Research on characteristic of the contact resistance of pantograph-catenary under load fluctuation condition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(11): 2287-2295(in Chinese).
- [23] 高国强, 吴广宁, 魏文赋, 等. 轨道交通弓网系统电接触: 理论与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018: 25-29.
GAO Guoqiang, WU Guangning, WEI Wenfu, et al. The electrical contact of the pantograph-catenary system: theory and application[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018: 25-29(in Chinese).
- [24] WANG Hong, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, et al. Influence of the interface temperature on the damage morphology and material transfer of C-Cu sliding contact under different current amplitudes[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(8): 5006-5021.
- [25] WEI Wenfu, WU Jie, GAO Guoqiang, 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.
- [26] WU Guangning, ZHOU Yue, GAO Guoqiang, et al. Arc erosion characteristics of Cu-impregnated carbon materials used for current collection in high-speed railways[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(6): 1014-1023.
- [27] 何志江, 杨泽锋, 王虹, 等. 弓网电接触系统服役性能的纵向磁场优化[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(5): 1228-1236.
HE Zhijiang, YANG Zefeng, WANG Hong, et al. Axial magnetic field optimization method for service performance in electric contact system between pantograph and catenary[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1228-1236(in Chinese).
- [28] DING Tao, CHEN Guangxiong, 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(9-10): 1629-1636.
- [29] 冀盛亚, 孙乐民, 上官宝, 等. 表面粗糙度对青铜/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能影响的研究[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(1): 29-31, 55.
JI Shengya, SUN Lemin, SHANGGUAN Bao, et al. Tribological characteristics of H68/QCr0.5 rubbing pairs under electric current with different surface roughness[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(1): 29-31, 55(in Chinese).



高国强

在线出版日期: 2023-05-31。

收稿日期: 2022-07-12。

作者简介:

高国强(1981), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术的研究工作, xnjdggq@163.com;

*通信作者: 肖嵩(1986), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术的研究工作, xiaosong@home.swjtu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳, 张蕾)