

基于光学测量系统的高压断路器铜钨弧触头烧蚀特性研究

牛博¹, 杨鼎革¹, 褚继峰², 王智翔³, 李夏⁴, 袁福祥⁴, 何继厚⁴, 吴兵⁵, 张存峻⁶, 南美璇⁷, 杨爱军²

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 3. 北京 ABB 开关有限公司, 北京 102600; 4. 国网陕西省电力有限公司超高压公司, 西安 710065; 5. 国网陕西省电力有限公司营销服务中心(计量中心), 西安 710100; 6. 西安工程大学, 西安 710048; 7. 国网西咸新区供电公司变电检修中心, 西安 710061)

摘要: 高压 SF₆ 断路器具有关合、承载、开断额定电流和故障电流的能力, 在维护电力系统安全稳定运行方面发挥着重要作用。然而, 断路器触头在电弧烧蚀作用下寿命不断降低, 进而导致开断失败, 因此研究弧触头的烧蚀特性对开发电寿命监测系统有重要意义。文中基于高速摄影仪、高速光谱仪、光纤传感器等光学测量系统, 对电弧弧根的宏观移动特性进行了观测。通过分析触头表面形态图像和质量损失, 探究了铜钨触头在不同开断电流等级下的烧蚀特性。研究发现, 随着开断电流的增大, 弧根直径逐渐扩大, 电弧在触头表面的移动性却降低; 铜钨触头的质量损失呈现出指数式上升, 表面甚至出现分层现象。在 5 kA 开断电流作用下, 弧根在触头表面旋转移动; 随着电流逐渐增加至 40 kA, 弧根旋转特性减弱, 电弧逐渐向触头中心靠拢。因此, 电弧特性、弧触头烧蚀量和开断电流之间存在关联关系, 可以为高压 SF₆ 断路器的电寿命评估提供理论依据。

关键词: SF₆ 断路器; 光学测量; 铜钨触头; 电弧烧蚀; 电寿命评估

Research on Ablation Characteristics of Copper-tungsten Arc Contacts of High-voltage Circuit Breakers Based on Optical Measurement System

NIU Bo¹, YANG Dingge¹, CHU Jifeng², WANG Zhixiang³, LI Xia⁴, YUAN Fuxiang⁴, HE Jihou⁴, WU Bing⁵, ZHANG Cunjun⁶, NAN Meixuan⁷, YANG Aijun²

(1. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Beijing ABB Switchgear Co., Ltd., Beijing 102600, China; 4. Ultra High Voltage Company of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710065, China; 5. Marketing Service Center(Metrology Center) of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, China; 6. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 7. Power Transformation Maintenance Center of State Grid Shaanxi Xixian New Area Electric Power Company, Xi'an 710061, China)

Abstract: High-voltage SF₆ circuit breakers have the ability to close, carry, and break rated current and fault current, and play an important role in maintaining the safe and stable operation of power systems. However, the life of circuit breaker contacts is continuously reduced under the action of arc ablation, which leads to breaking failure. Therefore, it is of great significance to study the ablation characteristics of arc contacts for the development of electrical life monitoring systems. Based on high-speed camera, high-speed spectrometer, optical fiber sensor and other optical measurement systems, this paper observes the macroscopic movement characteristics of arc root. By analyzing the contact surface morphological image and mass loss, the ablation characteristics of copper-tungsten contacts at different breaking current levels were explored. The study found that with the increase of breaking current, the diameter of the arc root gradually expanded, and the mobility of the arc on the contact surface decreased; the mass loss of copper-tungsten contacts increased exponentially, and the surface even appeared delamination. Under the action of 5 kA breaking current, the arc root rotates and moves on the surface of the contact; as the current gradually increases to 40 kA, the rotation characteristic of the arc root weakens, and the arc gradually moves towards the center of the contact. Therefore, there is a correlation between the arc characteristics, the amount of arc contact ablation and the breaking current, which can provide a theoretical basis for the evaluation of the electrical life of high-voltage SF₆ circuit breakers.

Key words: SF₆ circuit breaker; optical measurement; copper-tungsten contacts; arc ablation; evaluation of electrical life

基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目资助(5226KY22000N)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd.(5226KY22000N).

0 引言

电力系统的安全稳定运行离不开众多高压电力设备，而作为电力系统非常重要的保护装备，高压 SF₆ 断路器具有关合、承载和开断额定电流和故障电流的能力^[1-5]。在线路发生故障时，高压断路器触头如果无法快速切断故障电流，将会直接危害到整个电力系统的稳定运行，甚至引发严重事故、造成生命财产损失。高压断路器弧触头的劣化过程主要是由电弧的烧蚀作用引起的^[6-10]。通过研究弧触头烧蚀机理，可以探索断路器状态检测的工程方法，这为电寿命评估提供了理论和实验依据，具有非常重要的研究意义。

高压断路器弧触头通常采用烧结的铜钨合金，铜被固定在钨骨架当中。铜具有较高的电导率和热导率，钨具有较高的熔沸点。合成材料整体上即拥有铜的良好导电性，又具有钨的耐高温性能^[11-12]。以往文献对断路器触头的烧蚀过程进行了大量的理论和实验研究。通过建立仿真模型，可以计算不同条件下的触头表面温度、材料转移速率和触头质量损失等参数^[13-15]。1949 年，Holm^[16]就提出了触头表面的能量平衡方程，估算了不同电流和不同材料下，触头质量的损失速率。Wilson 在论文^[17]中指出，触头材料除了以汽化蒸发的形式损失之外，还存在液滴喷溅损失。Ecker^[18]详细分析了电弧放电过程中，触头电流的连续性、电弧压降、触头表面能量平衡和等离子体射流等问题。曹伟产等人^[19]研究了钨骨架连接度对铜钨复合材料耐烧蚀性能的影响。魏敏^[20]以 252 kV SF₆ 断路器作为对象，研究了断路器开断过程中的介质恢复强度、电弧动态特性以及开断特性的影响因素。然而，触头表面形态变化对烧蚀过程的影响，尚未得到系统的探索研究。而且，以往研究经常忽略触头的烧蚀历史对后续烧蚀过程的影响。

文中以一台瓷柱式高压 SF₆ 断路器为载体，建立了一套基于光学测量的弧触头烧蚀实验系统。光学测量方法可以有效避免工程应用中的电磁干扰。采用高速摄影仪与多面反射镜相结合的方式，对电弧弧根的宏观行为特征进行了观测，为光纤传感器安装位置的选取提供了重要依据。利用新型的光纤传感器，结合光电二极管和高速光谱仪，对电弧弧根在弧触头表面的运动特性进行了同步监测。通过分析弧触头的质量损失、弧

触头烧蚀后的表面形态照片，揭示了铜钨弧触头烧蚀机理，力求为开发弧触头烧蚀监测系统奠定理论基础。

1 实验部分

1.1 电弧发生回路

文中所用的 245 kV/40 kA 试验断路器由灭弧腔体、支撑绝缘套管和液压操作机构组成。其中，所用梅花触头和柱状触头的直径分别为 47 mm 和 18 mm，柱状触头整体呈圆柱形，端部为平面，触头表面边缘呈 2 mm 圆形倒角，触头材质为铜钨合金(28 wt% Cu, 72 wt% W)。液压操作机构与底座下部的连杆相接，能够提供约 5 m/s 的分闸速度。灭弧腔体内部填充的 SF₆ 压力为 1 bar。在光学测量实验中，为了便于观察电弧弧根运动特性，断路器未安装 PTFE 喷口，灭弧方式为电流过零点后自然熄灭。

弧触头烧蚀实验的主电路见图 1，由充电回路、电容器组和实验回路组成。充电回路主要包含自耦调压器、整流桥、真空充电开关和限流电阻。调压器可以控制充电电压，以相对恒定的电流向电容器组充电。电容器组被用作实验回路的电源，其电容值为 35 mF，最大充电电压为 6.3 kV，最大存储能量为 695 kJ。实验回路为 LC 振荡电路，包括实验电流触发电路、实验断路器、泄流回路。引燃管用于触发实验回路电流通断，含有直流引燃管、正向交流引燃管和反向交流引燃管的 3 条支路，使得主回路中分别流过准直流电、正半波交流电和负半波交流电。在放电结束后，泄流回路会被触发导通，电容器组中的剩余电荷将导入大地。电弧电流和电压分别通过主回路中的分流电阻(阻值为 1.19 mΩ)和高压探头(Tektromix P6015A)进行测量，衰减比例 1 000: 1，由数字示波器(Tektronix DPO 2024)进行记录。电弧电流大小 I_{arc} 等于分流电阻上的压降 U_1 除以分流电阻的阻值 R_s ，而断路器两端的电压则由高压探头的测量结果 U_2 减去 U_1 得到。

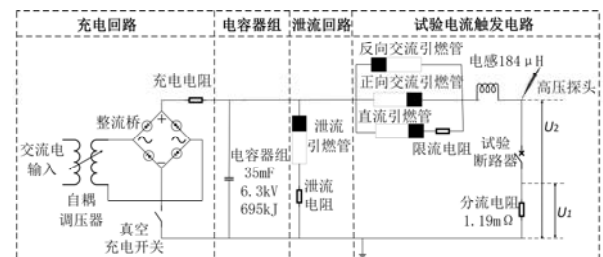


图1 弧触头烧蚀实验主电路原理图

Fig. 1 Main circuit schematic diagram of arc contact Ablation Experiment

1.2 光学测量系统

为了方便安装传感器和实验观察，将作为灭弧腔体的绝缘套管换成了金属腔体，并在金属腔体侧壁上设置了多个辅助窗口，而通过位于断路器顶部的绝缘套管隔离了实验中的高低电位。实验中，辅助窗口可配置为观察窗或传感器接口。对于观察窗，安装了 20 mm 厚的钢化玻璃，用以抵御实验过程中产生的振动和冲击。光学测量系统主要由一台高速摄影仪 Phantom V7.1(high-speed camera, HSC)、一台单通道高速光谱仪 Exemplar LS(high-speed spectrometer, HSS)、一台多通道光电二极管检测放大单元(photo-diode detector unit, PDD)组成。高速摄影仪拍摄弧根运动特性的示意图见图 2，柱状触头处于固定位置，高速摄影仪以一定仰角聚焦在触头表面，可拍摄到弧根在触头表面的移动过程。通过安装中性减光片，避免高速摄影仪感光元件发生饱和。通过加装窄带滤光片(522 nm±2 nm)，可以拍摄空间铜蒸汽的相对分布情况，高速摄影仪的详细参数见表 1。

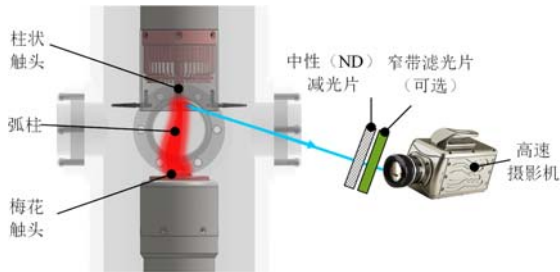


图2 高速摄影仪拍摄弧根运动特性的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arc root motion characteristics taken by high-speed camera

表1 高速摄影仪主要参数表

Table 1 Main parameters of high speed camera

项目	参数
最大分辨率	800×600
每秒帧数	4 800(最大分辨率), 15 000(最小分辨率)
录像时间/s	1.2(最大分辨率)
最小快门速度/μs	2
触发方式	TTL 电平
传感器类型	SR-CMOS 彩色
镜头参数	Nikon 24-85 mm, F2.8 微距镜头

光纤测量系统见图 3，主要由光纤固定环、

光纤传感器、光纤光路、中性减光片、高速光谱仪、光电二极管检测单元、数字示波器、电子计算机和控制单元组成。高速光谱仪可以监测弧根处的电弧可见光光谱，其主要参数详见表 2。光电二极管检测单元可以定量获取电弧弧根在触头表面的运动轨迹。高速光谱仪和示波器的数据采集通过主控单元的脉冲触发信号进行同步，由电子计算机进行数据存储。光纤传感器由 SMA905 光纤接头和准直器组成，3 个光纤传感器与触头表面处在统一水平面内，感光面中轴线(图中虚线)互成 120°夹角，弧根光谱信号通过光纤传送至断路器外部的光电检测放大单元中。光电二极管检测单元核心部件为高速光电二极管 S5972 和光电信号放大器 AD8304。其中，S5972 的响应范围为 320~1 000 nm，平均感光灵敏度约为 0.5 A/W，满足对电弧辐射光谱强度的检测要求。AD8304 的动态范围高达 160 dB，可以保证不发生饱和现象。输出电压 U_{out} 和光电二极管输出电流之间 I_{pd} 的关系为^[21]

$$U_{out} = 0.2U \times \log_{10}(I_{pd} / 100\text{pA}) \quad (1)$$

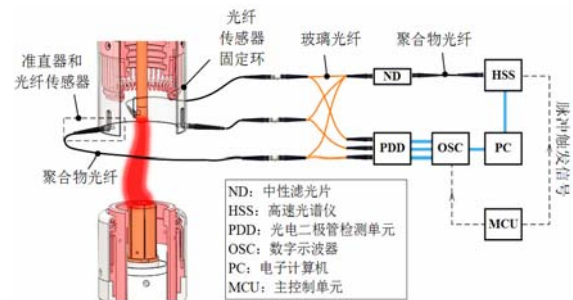


图3 光纤测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical fiber measurement system

表2 高速光谱仪主要参数表

Table 2 Main parameters of high speed spectrometer

项目	参数
传感器类型	CCD
波长范围/nm	200~850
传感器排列方式	2 048×1
传感器单元尺寸/μm	14×200
数字分辨率	16 位, 65 536: 1
数据传输速度	极速模式下, >900 条光谱每秒
光谱积分时间/ms	1(调整精度 1×10^{-3})
触发方式	TTL 电平
狭缝尺寸(宽, 高)/μm	25, 1×10^3
光谱分辨率/nm	0.6

由于光电二极管的输出电流和入射光的强度成正比，将 AD8304 的输出电压值代入式(1)，即可计算出射光强度。

1.3 触头质量损失测量

每次(或若干次)实验前后，均对弧触头的端部进行称重，两次称量数值之差即为电弧烧蚀造成的质量损失值。文中对触头质量进行称重的仪器为 Sartorius 公司的 LP1200S 精密天平，其主要参数见表 3。

表 3 精密天平主要参数

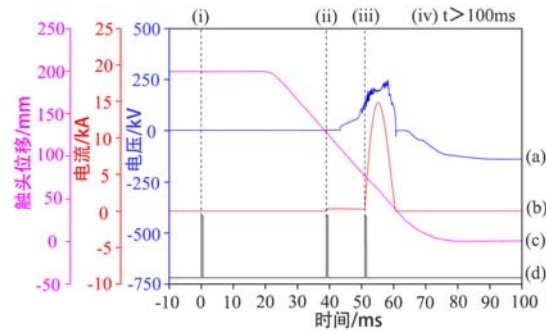
Table 3 Main parameters of precise analytical balance

项目	参数
分度值/mg	1
量程/g	1 200
重复性/mg	≤±1
线性度/mg	≤±2
温漂/(mg·K ⁻¹)	≤±2

2 结果与讨论

2.1 触发时序和典型波形图

弧触头电弧烧蚀实验主要包括电容器组充电和同步触发两个步骤。在电容器组达到预设充电电压后，充电开关自动断开完成充电过程。单次实验的具体触发时序和典型的电压、电流、触头位移波形见图 4。第 1 个触发脉冲发出，断路器的液压操作机构、数字示波器、高速摄影仪和高速光谱仪被同时触发。在弧触头分开前的时刻，第 2 个触发脉冲发出，主回路中的直流引燃管被触发，使主回路被导通，电流值约为几百安培。再经过一定时间，第 3 个触发脉冲发出，触发正向交流引燃管。由于交流引燃管支路电阻较小，电流迅速转移到该支路当中，储存在电容器组中的电能以正弦交流电的形式流过实验断路器弧触头间隙。在经过第 1 个自然过零点时，由于反向交流引燃管未触发，电弧自然熄灭。电弧熄灭后约 100 ms，泄流引燃管触发导通，将电容器组中的剩余电荷导入实验大地。



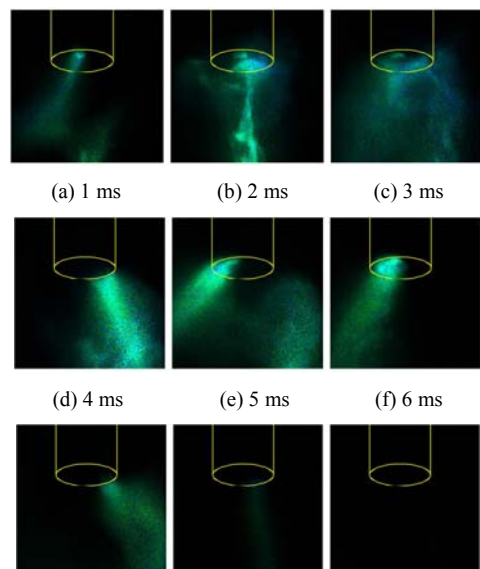
(a)—断路器进出线间电压；(b)—电弧电流；(c)—动触头直线位移；(d)—脉冲触发信号。

图 4 实验触发时序和典型波形图

Fig. 4 Trigger sequence and typical waveforms

2.2 弧根移动特性与电弧电流关系

通过使用如图 2 所示的高速摄像机配置，可以拍摄到电弧弧根在触头表面上的运动轨迹细节。在 SF₆ 气体中，不同电流等级下，电弧弧根在铜钨触头表面移动的高速摄影图像见图 5-7。图 5 为 5 kA 电流下，弧根在铜钨触头表面的移动图像。可以看出，电弧弧根并未一直处在触头表面中心位置，相反大部分时间位于触头边缘位置。随着电流的增大，弧根直径也在增大，受限于触头表面的尺寸，弧根在触头表面的移动性降低。在 15 kA 电流下，观察发现弧根总是跟触头表面的边沿相切。特别在大约第 5 ms 到 7 ms 的时间段内，弧根几乎占满了整个触头表面。在 40 kA 电流作用下，电弧弧根在整个电流放电周期内的大部分时间几乎占据整个触头表面，甚至会延伸到触头的侧表面，触头表面不再有额外空间供弧根自由移动。在弧柱靠近触头表面的区段，亮度很高，推断该现象与触头表面材料的剧烈汽化相关。



(a) 1 ms (b) 2 ms (c) 3 ms
(d) 4 ms (e) 5 ms (f) 6 ms

(g) 7 ms (h) 8 ms (i) 9 ms

图5 电弧弧根在触头表面移动的高速摄影图像(铜钨触头, SF₆, 5 kA, 帧速率 10 000 fps)

Fig. 5 High-speed photographic image of arc root moving on contact surface (Cu-tungsten contact, SF₆, 5 kA, frame rate 10 000 fps)

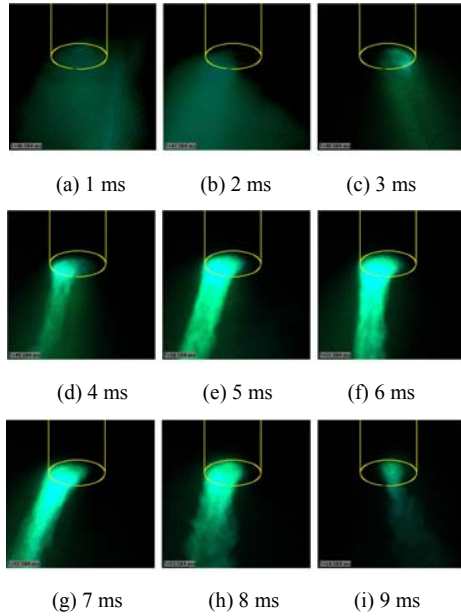


图6 电弧弧根在触头表面移动的高速摄影图像(铜钨触头, SF₆, 15 kA, 帧速率 10 000 fps)

Fig. 6 High-speed photographic image of arc root moving on contact surface (Cu-tungsten contact, SF₆, 15 kA, frame rate 10 000 fps)

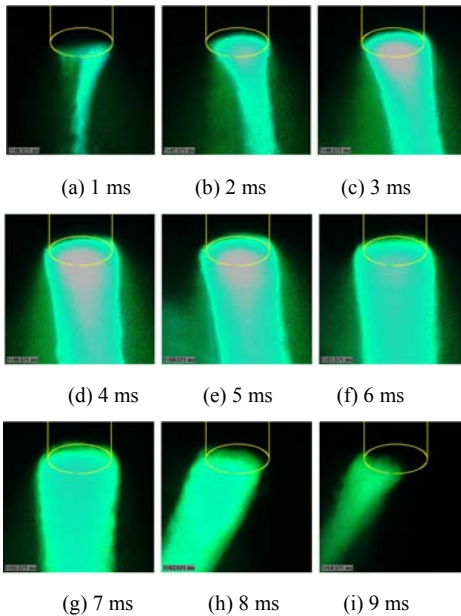


图7 电弧弧根在触头表面移动的高速摄影图像(铜钨触头, SF₆, 40 kA, 帧速率 10 000 fps)

Fig. 7 High-speed photographic image of arc root moving on contact surface (Cu-tungsten contact, SF₆, 40 kA, frame rate 10 000 fps)

2.3 触头多次开断的喷溅行为

错误!未找到引用源。为经过不同次数的 35 kA 电流开断后, 在电流过零时刻后 0.5 ms 拍摄到的铜钨触头表面的金属液滴喷溅现象, 见图 8。在使用新触头进行第一次实验后, 如图 8 **错误!未找到引用源。**(a)所示, 从图片中几乎看不到触头间隙中的明亮光斑, 推断此时的液滴喷溅现象并不显著。经过 5 次实验之后, 如图 8 **错误!未找到引用源。**(b)所示, 可以在触头间隙中看到明显的金属液滴喷溅。图 8 **错误!未找到引用源。**(c)表明, 在经过 10 次实验后, 无论从喷溅出的金属液滴的尺寸, 还是液滴喷溅的空间范围, 液滴的喷溅现象都变得更加显著。

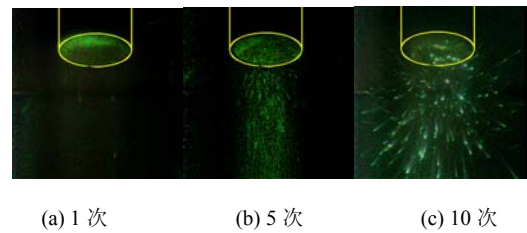


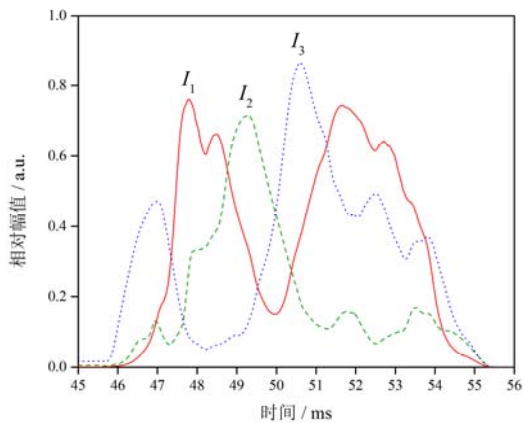
图8 不同次数 35 kA 电流烧蚀实验后, 铜钨触头在过零时刻 0.5 ms 后的液滴喷溅图像

Fig. 8 After different times of 35 kA current ablation experiments, the droplet splashing images of the copper-tungsten contact after the zero-crossing time of 0.5 ms

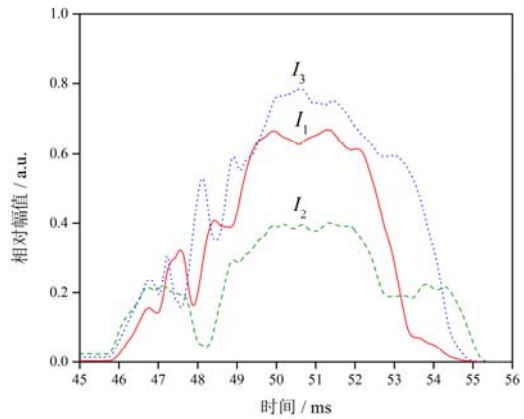
2.4 基于光电检测单元的弧根移动监测

采用如图 3 所示的光纤传感器布局和光电二极管检测单元, 可以检测得到弧根不同径向上的相对辐射强度。当电弧弧根在触头表面移动时, 弧根中心位置到各个光电传感器的距离就会不断发生变化, 从而在光电传感器上获得不同的电压输出。不同峰值电流下(5、15、40 kA), 光电检测单元 3 个传感器通道输出信号随时间变化的波形(I_1 、 I_2 、 I_3)见图 9(铜钨触头, SF₆, I_1 、 I_2 、 I_3 分别代表位于 0°、120°、240°角位置上的光电传感器输出信号)。图 9(a)对应 5 kA 电流下的实验输出波形, 其中观察到波形 I_3 主要在 47 ms 和 51 ms 处存在两个峰值, I_1 在 48 ms 和 53 ms 处有两个峰值, 而 I_2 只在 49.5 ms 处存在一个峰值。波形峰值代表着弧根位置与对应的光纤传感器距离最近, 所以 I_1 、 I_2 、 I_3 交替出现的峰值意味着弧根在触头表面的旋转移动。15 kA 电流下的实验输出波形见图 9(b), 其主要特征为 I_1 、 I_2 、 I_3 均在 49~54 ms 之间存在一个较大峰值, 这代表弧根的移动性相对较弱。由于从图中看到 $I_{2, peak} < I_{1, peak} < I_{3, peak}$, 推断出弧根中心位置距离传感器 2 最

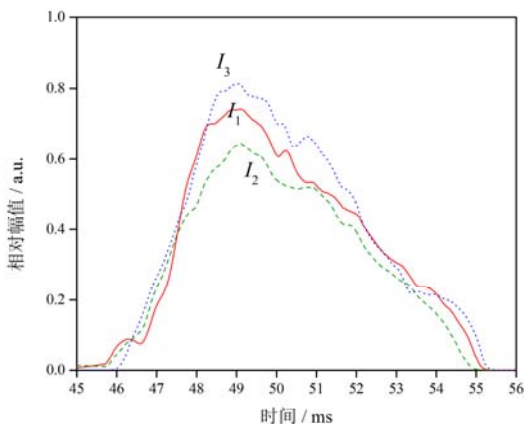
远, 距离传感器 3 最近。对于 40 kA 下的实验, I_1 、 I_2 、 I_3 的重叠程度较高, 并且均只有在 49 ms 前后的一个峰值, 表示弧根中心位置大部分时间处在靠近触头中心的位置上。因此, 光电二极管检测单元可以用来表征电弧的移动特性, 为建立电弧能量与弧触头烧蚀量之间的关系奠定了基础。



(a) 5 kA



(b) 15 kA



(c) 40 kA

图 9 测量弧根移动性的光电检测单元输出波形

Fig. 9 The output waveform of the photoelectric detection unit for measuring the mobility of the arc root

2.5 弧触头质量损失与电流关系

高压 SF₆ 断路器通过安装 PTFE 喷口, 可以产生用于冷却电弧的气流, 这对电弧的熄灭起着重要作用。但是, 该气流同时又会对弧触头表面形成冲击作用, 导致较大的质量损失。在各个电流等级下, 分别连续进行 5 次烧蚀实验, 见图 10, 在 4.5、19、33.5 kA 电流下, 弧触头烧蚀平均质量损失分别为 9、93、640 mg。

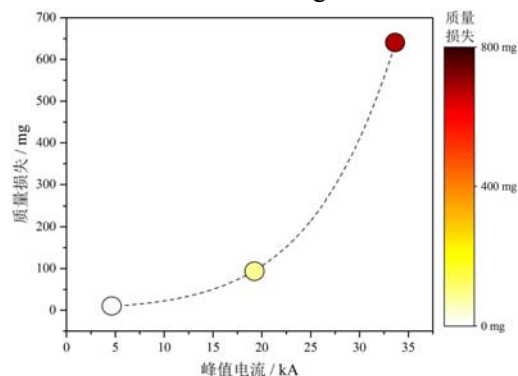


图 10 在 SF₆ 气流冲击作用下, 铜钨触头的平均烧蚀质量损失

Fig. 10 Average ablation mass loss of copper-tungsten contacts under the impact of SF₆ flow

2.6 弧触头表面形态与电流关系

弧触头表面形态在受到烧蚀之后会发生改变, 通过对触头表面形态进行分析, 可以推断电弧和弧触头的相互作用过程, 推测弧触头材料损失机理。在 SF₆ 气流作用下, 铜钨触头在不同电流等级下经过 5 次电流开断实验后的表面形态见图 11。

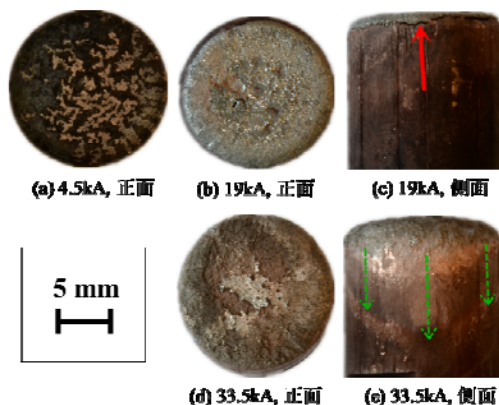


图 11 不同电流烧蚀作用下, 铜钨触头的表面形态变化

Fig. 11 Surface morphology changes of copper-tungsten contacts under different current ablation

在 4.5 kA 电流下, 铜钨触头表面仅在电弧作用下发生了颜色改变, 表面形态无明显变化, 见图 11(a)。在 19 kA 电流下, 观察到触头表面呈现出多孔疏松结构(钨骨架), 见图 11(b)。同时, 从触头侧面可以观察到, 触头表面层和触头本体之

间存在一条明显开裂的痕迹,见图 11(c)中红色箭头所指位置,这一现象为铜钨触头烧蚀后表面分层的理论提供了有力的证据。在 33.5 kA 电流下,上述触头表面形成的钨骨架层已经不复存在,见图 11(d),然而可以观察到表层材料被气流剥落的痕迹。在触头侧面可以观察到条纹状的图形,见图 11(e),由此可以推测出,在开断过程中,触头表面熔化的金属材料(包括铜和钨)被外部气流吹散开来,触头周围的气流方向可以通过条纹的方向观察得到(在图中由绿色虚线箭头表示)。

3 结论

文中以一台瓷柱式高压 SF₆ 断路器为载体,结合高速摄影仪、高速光谱仪和光纤传感器,研究了不同电流等级下电弧弧根的移动特性。通过分析弧触头的质量损失、弧触头烧蚀后的表面形态照片,揭示了铜钨触头的烧蚀机理,得到了以下结论。

1)随着电弧电流增大,弧根直径逐渐增大,其在触头表面的移动性逐渐降低,最终会延伸到触头侧面。

2)在 5 kA 开断电流作用下,弧根在触头表面旋转移动。随着电流增加到 15 kA,弧根移动性减弱。电流达到 40 kA 后,弧根中心基本靠近在触头中心位置上。

3)随着电流的增大,铜钨触头的质量损失呈现出指数式上升,表面出现分层现象,推断是 SF₆ 气流的冲击作用使得表层材料被逐渐剥落,造成了触头的质量损失。

参考文献:

[1] JANSSEN A L J, BRUNKE J H, HEISING C R, et al. CIGRE WG 13.06 studies on the reliability of single pressure SF₆-gas high-voltage circuit-breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 274-282.

[2] 唐 炬, 曾福平, 张晓星. 基于分解组分分析的 SF₆ 气体绝缘装备故障诊断方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

TANG Ju, ZENG Fuping, ZHANG Xiaoxing. Fault diagnosis method and technology of SF₆ gas insulation equipment based on decomposition component analysis[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[3] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[4] 李良书, 万康鸿, 王琼苑, 等. 二硫化钼传感器对于绝缘介质特征分解气体的敏感特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 36-43.

LI Liangshu, WAN Kanghong, WANG Qiongyuan, et al. Study on sensitivity characteristic of decomposed gas of MoS₂ sensor with insulating medium feature[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 36-43.

[5] 万康鸿, 柯 伟, 陈敏源, 等. 真空开关全气压范围内激光诱导等离子体特性及其在真空度检测中的应用研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 24-30.

WAN Kanghong, KE Wei, CHEN Minyuan, et al. Research on the characteristics of laser-induced plasma in full pressure range of vacuum switch and its application in vacuum detection[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 24-30.

[6] SHEA J J. High current AC break arc contact erosion[C]//2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Orlando: IEEE, 2008: 22-46.

[7] ZHANG Xiaoxing, LIU Li, WANG Jincong, et al. Detection of SF₆ decomposition components by pristine and Cr-doped GaN based on the first-principles theory[J]. Computational and Theoretical Chemistry, 2021, 1205(11): 113431.

[8] LIU Yupeng, ZHOU Qu, WANG Jingxuan, et al. Cr-doped MN(M=In, Ga) monolayer: A promising candidate to detect and scavenge SF₆ decomposition components[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2021, 330(10): 112854.

[9] LIU Zhicheng, GUI Yingang, XU Lingna, et al. Adsorption and sensing performances of transition metal (Ag, Pd, Pt, Rh, and Ru) modified WSe₂ monolayer upon SF₆ decomposition gases (SO₂F₂ and SO₂F₂) [J]. Applied Surface Science, 2022(581): 152365.

[10] 付钰伟, 王小华, 高青青, 等. 火花放电下 SF₆ 特征分解产物演化特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 13-17.

FU Yuwei, WANG Xiaohua, GAO Qingqing, et al. Evolution feature of characteristic SF₆ decomposition products under spark discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 13-17.

- [11]TEPPER J , SEEGER M , VOTTELER T , et al.Investigation on erosion of Cu/W contacts in high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 658-665.
- [12]WANG Y1 , LIANG Sh , LI Zb.Experiment and simulation analysis of surface structure for CuW contactafter arc erosion[J]. Materials Science & Technology, 2015, 31(2): 243-247.
- [13]ABBASI V , GHOLAMI A , NIAYESH K.The effects of SF₆-Cu mixture on the arc characteristics in a mediumvoltage puffer gas circuit breaker due to variation of thermodynamic properties and transport coefficients[J]. Plasma Science & Technology, 2013, 15(6): 586-592.
- [14]MURPHY A B.Calculation and application of combined diffusion coefficients in thermal plasmas[J]. Scientific Reports, 2014(4): 4304.
- [15]LEE J C , KIM Y J.The influence of metal vapors resulting from electrode evaporation in a thermal puffer-type circuit breaker[J]. Vacuum, 2007, 81(7): 875-882.
- [16]HOLM R.The vaporization of the cathode in the electric arc[J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(7): 715-716.
- [17]WILSON W R.High-current arc erosion of electric contact materials(includes discussion)[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus & Systems, 1955, 74(3): 657-664.
- [18]EOKER G.Electrode components of the arc discharge[J]. Ergebnisse Der Exakten Naturwissenschaften, 1961(33): 1-104.
- [19]曹伟产, 刘楠, 陈铮, 等.W骨架连接度对W-Cu复合材料耐电弧烧蚀性能的影响[J]. 电工材料, 2022(1): 3-6.
CAO Weichan, LIU Nan, CHEN Zheng, et al.Effect of W-W contiguity on arc ablation resistance of W-Cu composite[J]. Electrical Engineering Materials, 2022(1): 3-6.
- [20]魏敏.252 kV SF₆ 断路器开断特性数值计算与分析 [D].沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
WEI Min.Numerical computation and analysis on breaking characteristics of 252 kV SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [21]Analog Devices.160 dB Range (100 pA ~ 10 mA)

logarithmic converter AD8304[R]. US: Analog Devices, 2012.

牛博(1980—), 男, 教授级高工, 博士, 主要研究方向为电力设备状态检测(E-mail: niubo127@163.com)。

褚继峰(1993—), 男, 助理教授, 博士, 主要研究方向为电力设备状态检测、智能传感器技术(通信作者)(E-mail: jfchu93@xjtu.edu.cn)。

杨爱军(1986—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力设备状态检测、微能量收集、人工智能技术。