



·等离子体及应用技术·

真空断路器弧后残余等离子体的探针诊断方法^{*}

马廷彪¹, 陈里昂², 徐铭铭³, 陈 辉², 葛国伟², 程 显²

(1. 河南九域恩湃电力技术有限公司, 郑州 4500052; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001;
3. 国网河南省电力公司 电力科学研究院, 郑州 450052)

摘 要: 真空断路器开断过程中弧后残余等离子体是表征其开断性能的重要参量。基于探针电子饱和区域工作原理, 提出了一种真空电弧弧后残余等离子体电子密度测量方法, 分析了其结构和工作原理。设计了探针诊断系统的探针结构和控制系统, 基于可拆卸真空腔体进行了残余等离子体电子密度的单探针测量实验, 采用高速相机观测电弧发展演变过程, 研究了电流大小、触头结构等参数对残余等离子体衰减过程的影响。通过前人其他诊断方法对比验证了该测量方法的有效性, 为后续真空断路器弧后微观特性研究提供了一种低成本、有效的诊断方法。

关键词: 真空电弧; 弧后残余等离子体; 探针诊断; 电子密度

中图分类号: TM561

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210071

Probe diagnostics of post-arc residual plasma of vacuum circuit breakers

Ma Tingbiao¹, Chen Li'ang², Xu Mingming³, Chen Hui², Ge Guowei², Cheng Xian²

(1. Henan Jiuyu Enpai Power Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The post-arc residual plasma of the vacuum arcs in the breaking process is an important parameter, which is used to indicate the breaking capacity of the vacuum circuit breakers. Based on the basic principle of the electron saturation region for the probe diagnostics, the paper proposes a measuring method of electron density in residual plasma. The structure and principle of the method are analyzed. The probe structure and control system of the probe diagnostics are designed. The electron density of the residual plasma is measured by the single probe based on the dismountable vacuum chamber. The vacuum arcs development is observed by the high speed camera. The influence of the current magnitude and contact structure on the decay process of the residual plasma is investigated. Finally, the validity of the measurement method is verified by comparing with other diagnostic methods, which provides a low-cost and effective diagnostic method for future research on the micro-characteristics of vacuum circuit breakers.

Key words: vacuum arcs; post-arc residual plasma; probe diagnostics; electron density

真空断路器以其优越的绝缘和灭弧性能在中压配电领域占有主导地位^[1]。真空断路器开断过程电流过零后, 真空间隙间存在残余等离子体, 电子和离子在电场作用下运动, 离子鞘层向新阴极运动, 而暂态恢复电压施加在鞘层上, 鞘层的发展过程对开断与否起着关键作用, 而鞘层的发展中重要的微观参数是弧后残余等离子体演变过程^[2-4]。因此弧后残余等离子体特性的诊断对真空断路器开断性能表征具有重要意义。

弧后鞘层发展及残余等离子体密度衰减过程研究是国内外研究的热点^[5], Andrew & Varey^[6]提出了鞘层理论模型用于分析弧后动态介质恢复强度。P. Sarrailh^[7]利用粒子模拟算法(Particle In Cell, PIC)计算了鞘层发展过程 hybrid-MB 模型, 得到鞘层发展过程在 10 μs 之内, 弧后电流峰值在几百 mA, 建立鞘层过程的 2D3V 模型, 用于分析

* 收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(192102210142)

作者简介: 马廷彪(1962—), 男, 主要从事配电网设备故障诊断技术研究。

单个真空灭弧室鞘层发展过程。张颖瑶等^[8]建立了电极表面微凸起模型,为微粒碰撞和场致发射引起真空击穿奠定了基础。贾申利等^[9]建立真空电弧弧后鞘层发展的一维仿真模型,分析了电子速度和离子温度等微观特性对鞘层发展过程的影响。在弧后残余等离子体诊断方面,李兴文等^[10-11]研究了激光诱导等离子体光学诊断方法,并用于零区及弧后微观特性的诊断。K. Tomita等^[12-13]利用汤姆森散射法对弧后衰减过程进行了诊断。Y. Inada^[14]利用 Shack-Hartmann 型激光感应器测量二维的电子密度和金属蒸气密度,可以实现燃弧阶段的测量和零区电弧特性的诊断。刘志远等^[15-16]在单断口真空灭弧室阳极表面温度衰减和弧后鞘层发展过程诊断方面开展大量的理论与实验研究。S. Popov等^[17-18]采用 Langmuir 探针阵列系统对弧后等离子体密度和鞘层发展过程进行了诊断。A. Klajn等^[19]采用减速场分析器诊断了残余等离子体特性。目前针对残余等离子体密度诊断主要包括光学方法和探针方法,光学方法成本较高,而探针诊断方法属于接触测量,对探针设计和数据处理要求较高,对探针诊断弧后残余等离子体密度的基本原理和准确性有待进一步探索,为低成本的探针诊断的适用范围提供参考。

1 探针诊断基本原理

1.1 探针诊断工作原理

根据探针的伏安特性曲线,其工作区域可分为:离子饱和区和、过渡区和电子饱和区。离子饱和区,当探针工作于此区域时,电子几乎无法进入探针,这时探针电流为饱和离子电流 I_{is} ; 过渡区,当探针工作于过渡区时,电子开始逐渐进入探针,此时探针电流为电子电流; 电子饱和区,当探针电子饱和区工作时,离子几乎无法进入探针,此时探针上流过的电流为饱和电子电流 I_{es} 。传统探针诊断通过施加锯齿扫描电压,利用过渡区域的伏安特性获得等离子体微观特性。本文针对真空断路器残余等离子体密度进行诊断,在电流过零前 $30 \sim 50 \mu\text{s}$ 施加电压激励,利用探针的饱和电子电流来计算残余等离子体电子密度 n_e 。探针工作的伏安特性曲线如图 1 所示。

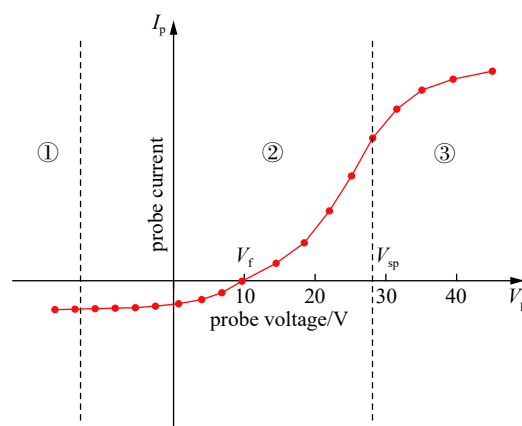


Fig. 1 Volt-ampere characteristic curve of the probe operation
图 1 探针工作的伏安特性曲线^[20]

1.2 残余等离子体探针诊断原理

残余等离子体探针诊断测量电路示意图如图 2(a)所示。 R_0 是分压电阻; R_1 是采样电阻,通过测量流过采样电阻得到探针电流; D_0 和 D_1 分别是二极管和 TVS 管,分别用来防止探针电流反向注入和开断过程中探针部分的过电压保护; U_0 是偏置电压,为了使探针工作模式位于电子饱和区,根据测量真空电弧弧后等离子体探针工作的伏安特性曲线,偏置电压一般范围为 $30 \sim 50 \text{ V}$,在此选用 36 V 作为偏置电压。

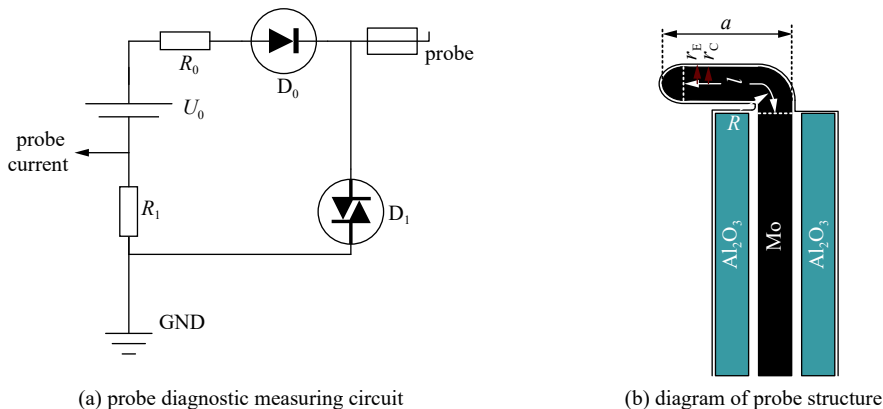


Fig. 2 Probe diagnostic circuit and structure
图 2 探针诊断电路和探针结构

探针结构示意图见图 2(b)。选用直径为 1.1 mm 的钼丝作为探针,钼丝外面包裹着内径为 1.2 mm 、外径为 2 mm 的氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷管用于绝缘,在切线方向弯曲,折成“L”形状,用来收集弧后阶段触头间隙中扩散出的电子。这种结构一方面增大收集电子面积,另一方面保证探针测量空间上具有一定的空间分辨率。

探针的电子电流密度与残余等离子体电子密度、电子迁移速度之间的关系为

$$j_{es} = \frac{1}{4} en_e v_e \quad (1)$$

式中： j_{es} 是流经探针的电子电流密度； n_e 是真空间隙中的电子密度；电子迁移速度 $v_e = (8kT_e/\pi m_e)^{1/2}$ 。探针的电流大小与流经探针的电子电流密度关系为

$$j_{es} = I_{probe}/S_E \quad (2)$$

式中： I_{probe} 是试验中可直接测得的探针电流； $S_E = 2\pi r_E(l + r_E)$ 是探针周围等离子体发射边界的区域，而不是探针采集电子部分的表面积。参照探针头部结构图 2(b)，其中 r_E 与探针的半径 r_C 的长度之差是探针周围鞘层的厚度，所以在计算时应当考虑鞘层的存在，然而鞘层厚度与所施加在探针上的偏置电压的大小和探针与等离子体之前的电位差有关。根据前人研究表明^[20]：当等离子体中的密度高于 10^{10} cm^{-3} 的时候，探针表面的鞘层厚度小于 0.25 mm ，对于本次试验中所使用的直径为 1.1 mm 的探针来说，为了方便计算与比较，采用探针原有的表面积 S_p ，而不是等离子体发射边界的区域面积 S_E 。

通过式(1)和(2)得到电子密度 n_e 与探针电流 I_{probe} 的关系

$$n_e = A_1 I_{probe} = (4/ev_e S_p) I_{probe} \quad (3)$$

式中： $A_1 = 4/ev_e S_p$ ，根据前人的研究结果表明^[20]，真空电弧弧后电子温度一般为 $2 \sim 3 \text{ eV}$ ，再将 k 和 m_e 的数值代入电子迁移速度的计算公式，可知道 v_e 的值为 10^8 cm/s 。通过转换公式，可以将探针电流转换成所需测量的电子密度，因此只需要使用探针采集真空间隙中不同位置上流过探针的电流，即可得到残余等离子体的电子密度和衰减情况。

2 探针诊断系统设计

2.1 探针结构与布置

探针结构按照图 2(b) 相关参数进行设计，其布置方式如图 3 所示。其中探针的尾部用信号线连接，且另一端通过真空腔体上的法兰与探针控制板相连，可将探针上采集到的电流输入到探针测量回路。

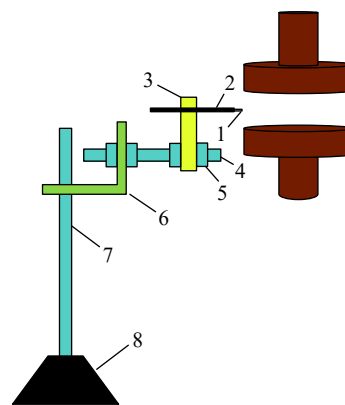
2.2 探针控制电路

基于电子饱和区工作原理的弧后残余等离子体探针诊断要求探针施加电压激励在电弧电流过零前 $30 \sim 50 \mu\text{s}$ ，对探针电压激励施加时刻与电流零点之间的控制精度要求较高。探针在燃弧阶段导通时间较长，燃弧过程中的电弧等离子体吸附在探针表面对测量结果影响较大，而滞后导通无法准确获得零区及弧后残余等离子体电子密度衰减过程。设计的探针控制系统如图 4、图 5 所示，控制的具体过程如下：主控制器发出命令控制电火花触发装置触发，引入主电流，触发控制装置控制精度在 $\pm 2.5 \mu\text{s}$ ，主电流为工频半波电流。然后在主电流过零前的 $30 \sim 50 \mu\text{s}$ ，实验控制台发出导通信号，导通信号通过光耦和三极管放大信号，控制 MOS 管 (IRF9640) 导通，进而在主电流过零前施加 36 V 偏置电压。

3 残余等离子体电子密度探针诊断实验

3.1 实验电路

本文利用可拆卸式的真空腔体开展弧后残余等离子体的特性诊断实验，如图 6 所示。大电流回路是由 16 mF 的电容 C_1 和 $600 \mu\text{H}$ 的电感 L_1 组成，可以产生 10 kA 的工频电流，其中 CB 为合闸开关，AB 为保护开关，初始状态 CB 和 AB 分别处于分闸状态，用于实现真空腔体高压侧隔离绝缘，在触头间隙触发导通前 CB 和 AB 完成合闸。可拆卸式的真空腔体真空度可以达到 10^{-5} Pa ，触头间隙导通采用电火花触发引弧方式。通过高速相机观测真空电弧发展演变过程，相机的型号为 Phantom VEO 1310，该相机使用 1280×960 CMOS 传感器，满幅拍摄速率为



1—Mo wire; 2— Al_2O_3 ceramic pipe; 3—epoxy resin pipe;
4— $\phi 8$ nylon screw rod; 5— $\phi 8$ nylon nut; 6—nylon adaptor;
7— $\phi 10$ nylon screw rod; 8—counterweight base.

Fig. 3 Configuration of the probe diagnostics

图 3 探针布置方式

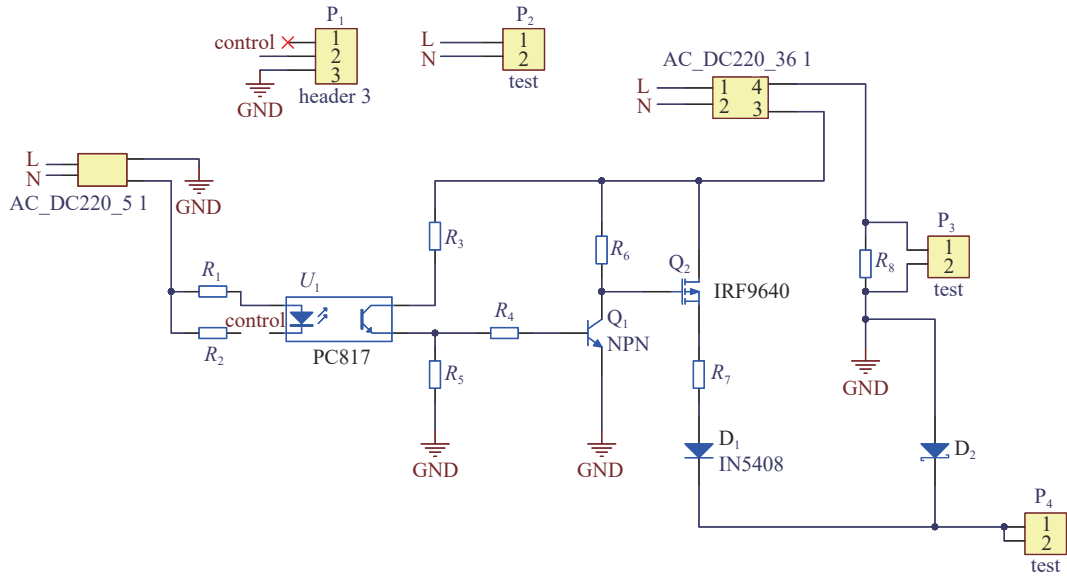


Fig. 4 Probe control loop
图 4 探针控制电路原理图

10 860 帧/s。

本文重点研究电流大小和触头结构对残余等离子体电子密度分布及衰减的影响,需要进行多次重复试验获得其平均值,以便提高诊断的可靠性和准确性。探针诊断整体试验波形如图 7 所示,主电流为 5 kA,电弧电压基本为 18~30 V,探针偏置电压在电流过零前 30 μ s; 电流零区附近的探针电流放大图如图 8 所示,通过电流零区附近探针电流按照式(3)进行计算即可得到弧后残余等离子体电子密度衰减过程。真空电弧熄灭过程如图 9 所示,电弧处于扩散电弧模式,阴极斑点均压分布在触头表面,最后阴极斑点熄灭时刻在触头中间位置。



Fig. 5 Test main controller
图 5 实验主控制器

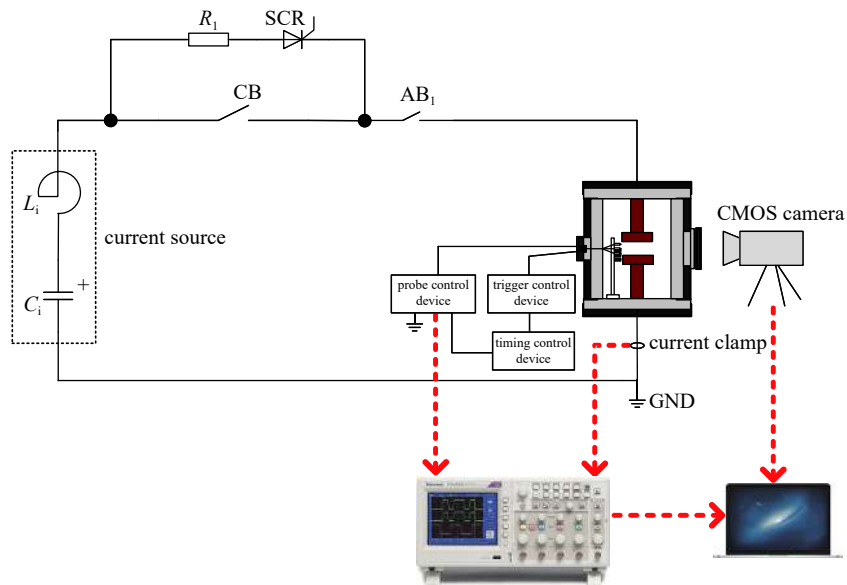


Fig. 6 Test platform
图 6 探针诊断试验平台

3.2 单探针实验结果与探讨

(1) 电流大小对弧后残余等离子体电子密度的影响

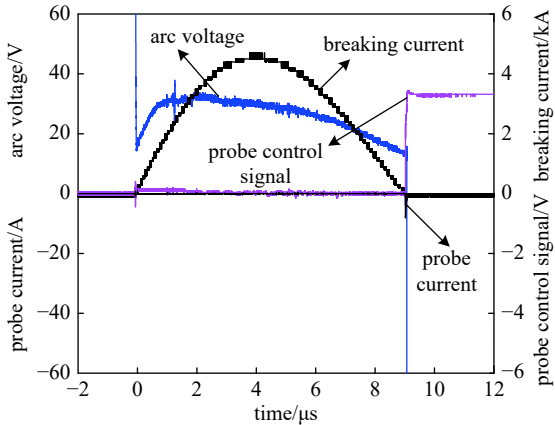


Fig. 7 Probe test overall waveform

图7 探针试验整体波形图

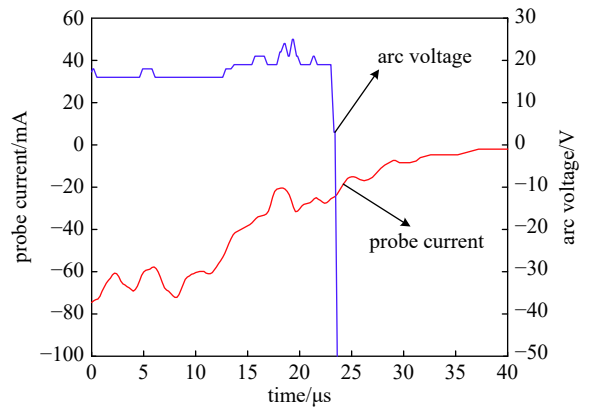


Fig. 8 Local magnification of probe current

图8 探针电流局部放大图

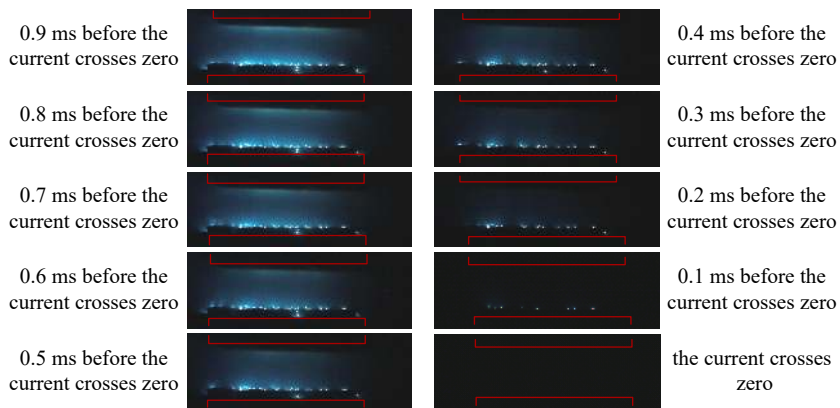


Fig. 9 Arc images at 0~0.9 ms before current crosses zero

图9 电弧过零前0~0.9 ms的电弧图像

在探针布置位置和触头间隙不变的条件, 改变电流值分别为 2.2, 4.5, 5.4 和 6.7 kA, 研究电流大小对弧后残余等离子体电子密度的影响规律。在每个电流条件下进行重复试验 5 次, 对探针电流进行多次平均, 探后按式 (3) 进行数据处理, 获得弧后不同时刻的残余等离子体电子密度衰减情况。不同电流条件下弧后残余等离子体电子密度衰减规律如图 10 所示, 随着电流过零后时间的增加, 残余等离子体电子密度迅速衰减, 衰减时间为 15~30 s。电流零区初始电子密度随着电流增加而增大, 当电流由 2.2~6.7 kA 变化时, 零区初始电子密度由 $1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $2.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 而且随着电流增加, 残余等离子体电子密度衰减到零的时间增加。上述规律初步可以说明基于电子饱和和区工作原理的探针诊断方法可以定性的获得残余等离子体电子密度分布和衰减过程。

(2) 触头结构对电子密度的影响

本试验采用的 2 个触头直径均为 50 mm 的横磁和纵磁触头, 触头间距均设置成 10 mm, 开断电流峰值为 5.4 kA, 得到横磁和纵磁触头弧后电子密度的变化曲线, 如图 11 所示。横磁触头零区初始等离子体密度大于纵磁触头, 且纵磁触头弧后残余等离子体衰减的更快, 这与相同条件下纵磁触头比横磁触头开断能力强和介质恢复速度快的规律相吻合。

(3) 探针诊断结果探讨

前人采用发射光谱^[15]、激光诱导荧光^[10-11]和汤姆森散射^[12-13]等光学诊断方法研究弧后微观特性, 一般测量触

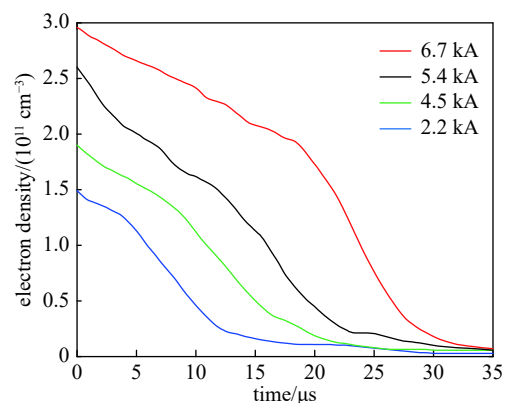


Fig. 10 Electron density curves at different switching current

图10 不同开断电流下的电子密度曲线

头间隙中间位置的残余等离子体密度为 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 而触头间隙与主屏蔽罩间的残余等离子体密度一般采用探针诊断方法, 电流零区附近触头间隙与主屏蔽罩间的初始电子密度一般为 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 这与本文的测量结果范围基本一致。同时对比了本研究与 Anton V. Schneider 等诊断结果, 如图 12 所示, 本文探针电流与 Anton V. Schneider 和 S. Popov 等结果基本一致, 略有不同的原因在于本文实验采用的触头直径略大, 且腔体内未布置主屏蔽罩, 后续将进一步开展相同条件的验证, 并辅以光学诊断方法校正探针测量结果。

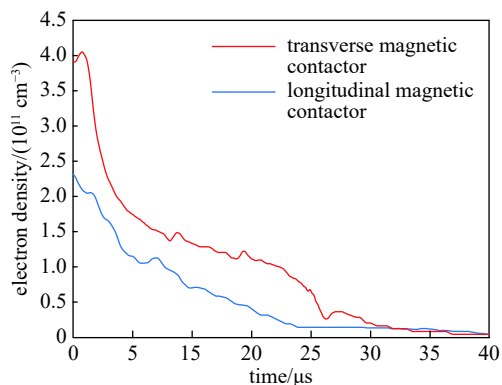


Fig. 11 Electron density curves under different types of contacts

图 11 不同类型触头下的电子密度曲线

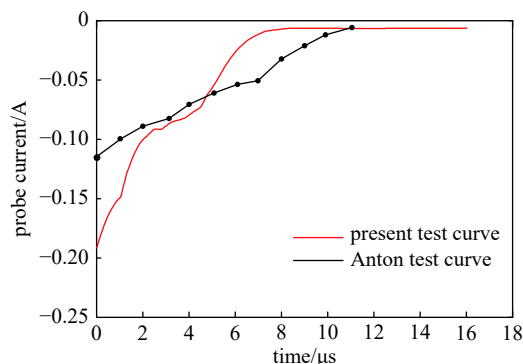


Fig. 12 Comparative verification test

图 12 对比验证试验

4 结论

本文设计了真空断路器弧后残余等离子体电子密度的探针测量系统, 并通过实验测量了不同电流和触头结构条件的残余等离子体密度衰减过程, 对比国内外其他方法, 初步验证了该方法的有效性。主要结论如下:

(1) 采用电子饱和区域的工作原理用于测量真空断路器弧后电子密度的探针测量方法, 设计了探针结构及其控制系统, 为后续探针阵列测量弧后鞘层二维分布奠定基础。

(2) 进行了不同电流和触头结构的单探针诊断, 电流零区初始电子密度约 10^{11} cm^{-3} , 衰减时间为 $15 \sim 30 \mu\text{s}$, 随着电流增大, 初始电子密度增大, 衰减时间增加, 定性验证了探针诊断的有效性。

(3) 通过与诊断方法结果对比, 表明探针测量方法可以获得弧后鞘层发展的定性规律, 定量表征需要进一步校正, 初步说明基于电子饱和区工作原理的探针诊断方法的可行性。

参考文献:

- [1] 王建华, 耿英三, 刘志远. 输电等级单断口真空断路器理论及其技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017. (Wang Jianhua, Geng Yingsan, Liu Zhiyuan. The theory and technology on electrical transmission voltage level single break vacuum interrupter[M]. Beijing: China Machine Press, 2017)
- [2] 葛国伟, 张鹏浩, 程显, 等. 真空灭弧室零区剩磁补偿装置及效果[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3272-3279. (Ge Guowei, Zhang Penghao, Cheng Xian, et al. The device and effect of the magnetic field compensation in vacuum interrupters at current-zero[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3272-3279)
- [3] 徐蓉, 王珏, 赵莹, 等. 纵磁结构真空灭弧室电磁场及电弧运动特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 855-858. (Xu Rong, Wang Jue, Zhao Ying, et al. Characteristics of electromagnetic field and arc motion in vacuum interrupter with longitudinal magnetic field contacts[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 855-858)
- [4] 董华军, 廖敏夫, 邹积岩, 等. 基于CCD真空开关电弧等离子体参数诊断方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 65-68, 81. (Dong Huajun, Liao Minfu, Zou Jiyun, et al. Methods of diagnosing the plasma parameters in vacuum switching arcs based on CCD[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 65-68, 81)
- [5] 罗城, 丛培天, 张天洋, 等. 气体火花开关电极烧蚀研究综述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 105001. (Luo Cheng, Cong Peitian, Zhang Tianyang, et al. Review of the research on electrode erosion of gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 105001)
- [6] Orama L R. Numerical modeling of vacuum arc dynamics at current zero using ATP[C]//Presented at the International Conference on Power System Transients. Montreal, Canada: IEEE, 2005.
- [7] Sarrailh P, Garrigues L, Hagelaar G J M, et al. Expanding sheath in a bounded plasma in the context of the post-arc phase of a vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41: 015203.
- [8] Zhang Yingyao, Xu Xinye, Jin Lijun, et al. Fractal-based electric field enhancement modeling of vacuum gap electrodes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1957-1964.
- [9] Mo Yongpeng, Shi Zongqian, Jia Shenli, et al. One-dimensional particle-in-cell simulation on the influence of electron and ion temperature on the sheath

- expansion process in the post-arc stage of vacuum circuit breaker[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 023511.
- [10] 李兴文, 魏文赋, 吴坚, 等. 激光诱导等离子体光学诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1788-1797. (Li Xingwen, Wei Wenfu, Wu Jian, et al. Review of optical diagnosis methods for the laser produced plasmas[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1788-1797)
- [11] 李志超, 赵航, 龚韬, 等. 激光惯性约束聚变中光学汤姆逊散射研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 092004. (Li Zhichao, Zhao Hang, Gong Tao, et al. Recent research progress of optical Thomson scattering in laser-driven inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 092004)
- [12] Tomita K, Gojima D, Nagai K, et al. Thomson scattering diagnostics of decay processes of Ar/SF₆ gas-blast arcs confined by a nozzle[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46: 382001.
- [13] Tomita K, Nagai K, Shimizu T, et al. Thomson scattering diagnostics of atmospheric plasmas in contact with ionic liquids[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7: 066101.
- [14] Inada Y, Kamiya T, Matsuoka S, et al. Gap length dependence of two-dimensional electron and copper vapour density distribution over vacuum plasma[J]. *Journal of Instrumentation*, 2015, 10: C12007.
- [15] Wang Haoran, Liu Zhiyuan, Liu Jiankun, et al. Investigation of vacuum arc extinction process by planar laser-induced fluorescence[C]//28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Greifswald, Germany: IEEE, 2018: 313-316.
- [16] Wang Zhenxing, Liu Jiankun, Li Yuecheng, et al. Two-dimensional observation of copper atoms after forced extinction of vacuum arcs by laser-induced fluorescence[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(8): 2777-2789.
- [17] Schneider A V, Popov S A, Dubrovskaya E L, et al. Study of the cathode sheath dynamics after arc current zero crossing using a two-dimensional Langmuir probe system[J]. *Russian Physics Journal*, 2019, 62(7): 1103-1108.
- [18] Popov S, Schneider A, Dubrovskaya E, et al. Batrakov. 2-D Langmuir probe set for diagnostics of plasma density distribution and cathode sheath expansion after current zero in a vacuum interrupter[C]//28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Greifswald: IEEE, 2018: 205-208.
- [19] Klajn A. Plasma parameters after forced switching-off of the current in vacuum[J]. *Przełąd Elektrotechniczny*, 2013, 89(9): 193-195.
- [20] Schneider A V, Popov S A, Batrakov A V, et al. Diagnostics of the cathode sheath expansion after current zero in a vacuum circuit breaker[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(6): 1349-1353.