

计及金属蒸气影响的 中频真空电弧弧后鞘层发展研究

蒋原¹, 李旭彬^{2*}, 武建文³, 廖敏夫², 夏尚文³, 黄凯¹

- (1. 工业过程知识自动化教育部重点实验室(北京科技大学自动化学院), 北京市 海淀区 100083;
2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省 大连市 116023;
3. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京市 海淀区 100191)

Development of the Post-arc Sheath in Intermediate-frequency Vacuum Arc Considering the Influence of Metal Vapor

JIANG Yuan¹, LI Xubin^{2*}, WU Jianwen³, LIAO Minfu², XIA Shangwen³, HUANG Kai¹

- (1. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education (School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing), Haidian District, Beijing 100083, China;
2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China;
3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Metal vapor as the background gas causes frequent collisions of charged particles in the vacuum arc chamber, and the thermal ionization effect can change the plasma density in post-arc stage, which has a great influence on the dielectric recovery process of the intermediate-frequency (IF) vacuum arc. In the present work, multi-target tracking techniques have been applied to dual-view arc images when the IF current fails to be interrupted firstly. According to the spatial mapping relationship, metal droplet ejection process is three-dimensional constructed, and a velocity of $10\sim 20\text{ m s}^{-1}$, a pressure between $1\sim 5\text{ MPa}$, the maximum metal vapor number density of 10^{23} m^{-3} in the surface of metal droplet inside the vacuum chamber are obtained, realizing non-invasive measurement for number density of metal vapor. Then, the particle-in-cell-Monte Carlo collision (PIC-MCC) model is modified. Thermal ionization on sheath growth is taken into account in the modeling process, and Saha equation is used to modify the initial plasma density. Finally, the modified PIC-MCC model can predict the occurrence of IF post-arc breakdown when the metal vapor increases from 10^{18} m^{-3} to 10^{23} m^{-3} , which is consistent with the experimental results, proving that thermal ionization of metal vapor has an important impact on the characteristics of IF post-arc dielectric recovery.

KEY WORDS: intermediate-frequency vacuum arc; non-invasive measurement; post-arc sheath; metal vapor; particle-in-cell-Monte Carlo collision (PIC-MCC)

摘要: 金属蒸气作为背景气体使灭弧室内带电粒子碰撞次数频繁, 同时热电离效应可改变弧后等离子体密度, 对于中频真空电弧弧后介质恢复过程有较大影响。该文首先采用多目标追踪技术对中频电流开断失败时的双视角电弧图像进行处理, 根据空间映射关系三维重构金属液滴的喷射过程, 依此计算出液滴平均速度为 $10\sim 20\text{ m/s}$, 中频大电流过零后灭弧室内金属液滴表面的压强为 $1\sim 5\text{ MPa}$, 金属蒸气密度最大数量级为 10^{23} m^{-3} , 实现对金属蒸气密度的非接触测量; 然后, 改进粒子网格-蒙特卡罗碰撞(particle-in-cell-Monte Carlo collision, PIC-MCC)模型, 建模过程考虑金属蒸气热电离效应对鞘层生长的影响, 利用 Saha 方程修正初始等离子体密度; 最后, 利用改进的 PIC-MCC 模型进行预测, 当金属蒸气密度从 10^{18} m^{-3} 增加至 10^{23} m^{-3} 时发生中频弧后击穿, 与实验结果一致, 证明金属蒸气热电离对中频弧后介质恢复特性有重要影响。

关键词: 中频真空电弧; 非接触测量; 弧后鞘层; 金属蒸气; 粒子网格-蒙特卡罗碰撞

0 引言

将真空断路器应用于航空变频($360\sim 800\text{ Hz}$)供电和直流输电等场景, 可解决由电流频率提高导致的电器熄弧困难、开断能力下降等难题。真空电弧

基金项目: 国家自然科学基金项目(52577147, 52177127); 航空科学基金(2020Z025074001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52577147, 52177127); Aviation Science Fund (2020Z025074001).

的弧后鞘层发展是介质恢复过程中最重要的阶段, 直接决定是否发生弧后击穿及影响开断能力。在中频大电流过零后, 开关触头主要以金属液滴的形式产生金属蒸气, 从而影响弧隙内的等离子体扩散及介质强度恢复。而中频真空电弧的半波时间仅有 0.6~1.38 ms, 相比工频电弧的恢复时间更短, 金属蒸气等对弧后鞘层发展的影响更为严重^[1-4]。

研究中频真空电弧的手段主要有实验方法和仿真计算, 其中, 仿真能够定量描述等离子体内部变化, 相比实验研究成本更低, 也更容易获取鞘层微观特性及内在机理。弧后过程的仿真方法有连续过渡模型(continuous transition model, CTM)、粒子网格-蒙特卡罗碰撞(particle-in-cell-Monte Carlo collision, PIC-MCC)模型及二维流体-粒子混合模型, 近年正在向三维瞬态模型方向发展^[5-7]。文献[8]搭建 CTM-Helmer 融合模型, 对真空电弧的弧后过程和开断特性进行仿真, CTM 可描述离子鞘层从阳极向阴极的发展过程, 但对不同等离子体参数下鞘层特性的普适性较差。PIC-MCC 模型可以提供较为接近实际物理过程的动态描述, 文献[9]在 PIC-MCC 模型中考虑多种碰撞, 研究电子离子温度、残余等离子体的漂移速度对鞘层发展的影响; 文献[10]考虑粒子的径向运动, 对金属蒸气作用下弧后等离子体的衰减过程进行研究; 文献[11]考虑弧后阴极表面的残余等离子体、金属蒸气、不均匀温度分布和电子发射及带电粒子与金属蒸气之间的碰撞, 建立二维 PIC-MCC 模型, 仿真结果表明, 随着金属蒸气密度的增加, 电弧后击穿发生得越早, 当金属蒸气密度低于 10^{20} m^{-3} 时, 不会发生弧后击穿; 文献[12]研究纵向磁场对弧后鞘层发展的影响。需要指出的是, 现有的弧后鞘层仿真主要考虑带电粒子与金属蒸气原子之间的碰撞电离过程, 而燃弧时期的高温金属蒸气通常会导致原子热电离, 但目前尚未有文献对金属蒸气热电离效应如何影响中频真空电弧的弧后鞘层发展过程进行深入研究。

参数是电弧仿真的基础, 一些关键参数, 如电弧温度、阳极表面温度、等离子体密度等, 仍需通过实验方法获取^[13-15]。文献[16]利用非接触式光谱法获得中频真空电弧的电子温度为 0.5~3 eV, 电子密度量级为 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 为中频真空电弧的仿真提供了重要依据。文献[17]利用探针检测阴极鞘层到达探针位置的时间, 测量弧后电流和电子密度。

文献[18]使用无氧铜阴极触头, 研究残余等离子体的电子温度与电流峰值的关系以及探针电流变化范围和离子密度的径向分布规律。金属蒸气密度是真空放电过程的重要参数, 影响弧后鞘层发展及击穿。由触头产生的金属液滴是中频条件下金属蒸气的一个主要来源, 受电弧内部压力的作用, 在金属液滴形成喷射运动的过程中蒸发出金属蒸气^[19-21]。由于真空灭弧室为密封状态, 利用传感器直接测量电弧压力和金属蒸气密度难度较大, 多采用分析金属液滴的热力学及运动特性等非接触式测量方法间接获得金属蒸气密度。文献[22]通过建立数学模型, 计算由扩散态真空电弧弧后液滴蒸发出的金属蒸气密度, 直径微米级的液滴蒸发出的蒸气密度可达到 10^{21} m^{-3} ; 文献[23]测量真空开关内金属液滴的温度, Cu 和 Cr 触头液滴温度在 1900~2200 K, 通过温度可计算蒸气密度; 文献[24-25]利用激光技术, 分别观测真空电弧中金属液滴的速度及金属蒸气的密度; 文献[26]借助电弧图像获取金属液滴在各采样时刻的坐标, 根据加速度推算电弧压力, 但该方法只获得图像平面内的压力, 缺少空间第三维度信息。电弧图像中的液滴数量多、亮度变化大, 人工逐帧检测难度高, 通过边缘提取和连通域分析等多目标跟踪技术可实现高精度自动检测^[27], 便于进一步获得金属蒸气密度。

为更准确地描述中频真空电弧的弧后过程, 本文首先采用多目标跟踪算法处理中频真空电弧图像, 三维重构金属液滴运动, 求解电弧内部的空间压强梯度, 获得在压力作用下的金属液滴蒸发产生金属蒸气密度; 然后, 结合 Saha 方程提出计及金属蒸气热电离影响的 PIC-MCC 修正模型; 最后, 仿真和对比分析不同密度的金属蒸气及热电离对弧后鞘层过程的影响。

1 双目视觉电弧实验

1.1 实验平台

本文搭建如图 1 所示的中频真空开关电弧实验平台, 通过调节电感电容值, 可产生实验所需要的航空中频 360~800 Hz 电流。航空变频发电机的短路电流一般为额定电流的 3~5 倍, 对于 4×150 kV·A/115 V 变频电力系统, 4 机并联的短路电流为 5.2~8.7 kA, 因此, 本文短路电流的首半波峰值大于 $5.2 \times 1.414 = 7.4 \text{ kA}$ 。实验中使用触头直径为 41 mm 的纵磁真空灭弧室, 开距为 3 mm。另外, 本文实

验中使用的是改进的商用真空灭弧室,为方便拍摄图像,在加工阶段即要求去除金属屏蔽罩,只保留玻璃外壁,高速相机可拍摄电弧,密闭的灭弧室内气体压力为 5×10^{-4} Pa,以上改进尽量保证了灭弧室的原始结构。

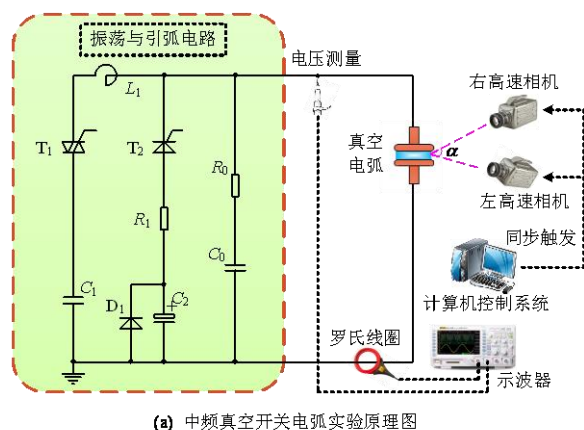


图1 双目视觉中频真空电弧实验系统

Fig. 1 Intermediate frequency vacuum arc experiment system with stereoscopic view

为减少操动机构的分散性对拍摄电弧形成的干扰,本文的实验采取“先引弧,后振荡”的策略。其中,引弧电路由如下元件组成:电解电容 C_2 、电力二极管 D_1 、限流电阻 R_1 和晶闸管 T_2 ;中频振荡回路由如下元件组成:电容 C_1 、电感 L_1 、双向晶闸管 T_1 。二者配合可在平板型真空断路器中产生实验所需要的短路电流和真空电弧。使用耐压强度2000 V的高压探头测量中频真空电弧电压;使用量程30 kA的PEM空心电流互感器测量中频电流。记录波形的示波器型号为DL750。

在电弧图像采集过程中采用两台高速相机,二者形成一定的观测角,同步拍摄可以获取左、右视角电弧图像,再利用三维重构算法可实现对中频真空电弧放电过程的双目立体视觉观测。根据重构算法,观测角 α 在 $0 \sim 90^\circ$ 效果最佳,本实验中 α 约为 27° ;拍摄间隔时间为 $1/40\,000$ s。

1.2 金属液滴跟踪

真空电弧图像中的金属液滴具有较显著的边缘特征和一致的形状特征,首先,根据电弧图像的

灰度性质,划分检测区域(region of interest, RoI);其次,利用Canny边缘检测算法捕捉液滴轮廓,采用连通域分析技术获取液滴信息并根据几何学形态特征进行筛选;最后,使用交并比(intersection over union, IoU)跟踪算法,获取电弧图像中的液滴位置。多目标跟踪算法的流程如图2所示。

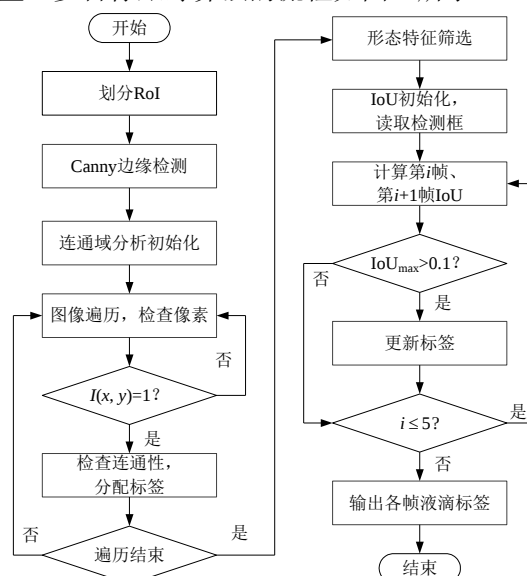


图2 电弧图像中金属液滴的多目标跟踪算法流程

Fig. 2 Flow chart of multi-target tracking algorithm for metal droplets in arc images

多目标跟踪算法对电弧图像的处理结果如图3所示,数字标签表示连续出现且可被跟踪的金属液滴,发生分裂、合并、中途消失的液滴未做标记。其中,左相机电弧图像中标签为2、15的液滴分别与右相机电弧图像中标签为2、15的液滴为同一液滴(后文分别以液滴1和2代指)。利用图1中双高

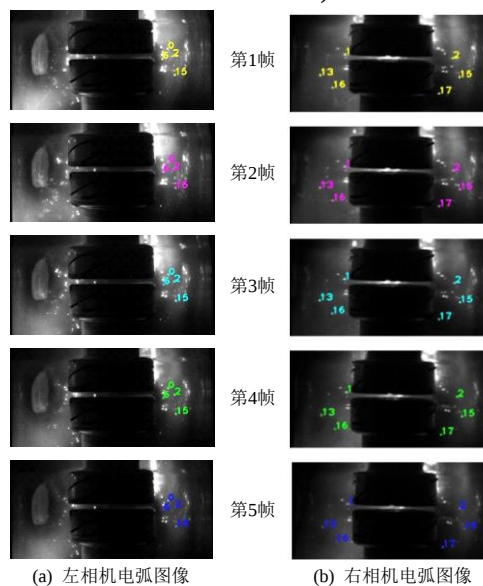


图3 多个金属液滴的跟踪结果

Fig. 3 Tracking results of metal droplets

速摄像机成像平面的空间位置关系, 对图 3 中标定的金属液滴进行运动轨迹三维重构, 结果如图 4 所示。

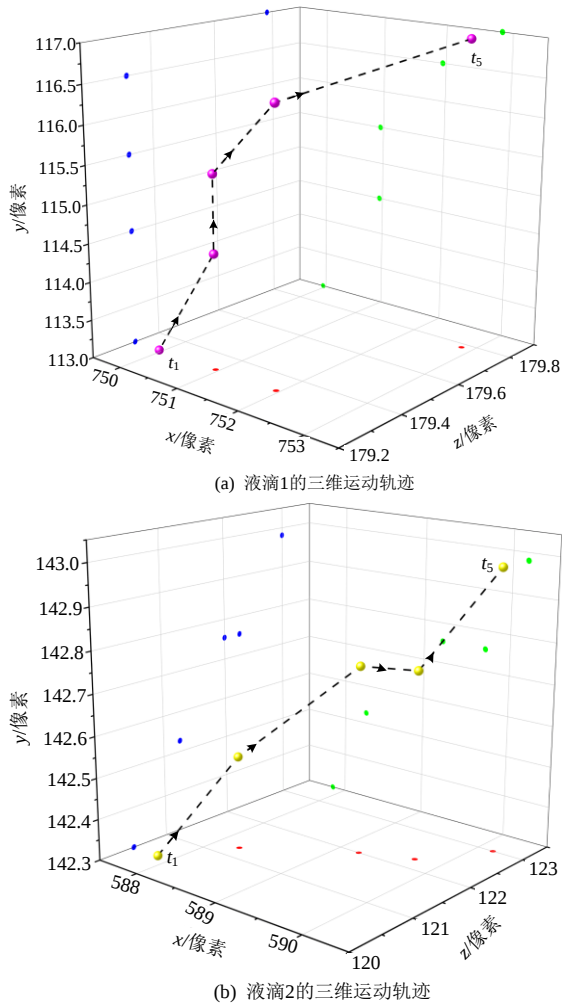


图 4 金属液滴的空间运动轨迹

Fig. 4 Spatial motion trajectory of the metal droplet

为掌握更全面的金属液滴运动信息, 按照直径大小分类, 分别统计其速度和加速度, 结果如图 5 所示, 可见平均运动速度的范围为 10~20 m/s, 随

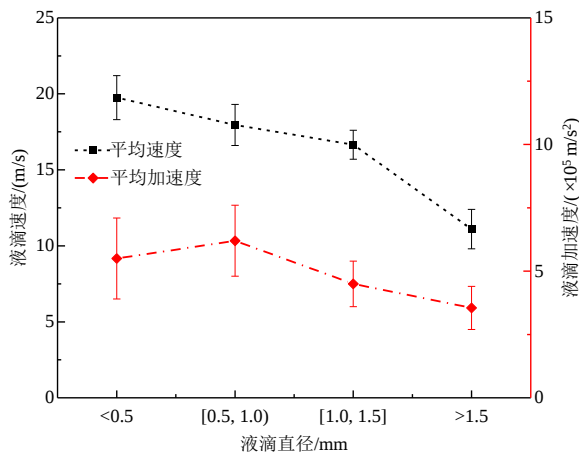


图 5 金属液滴的平均速度与加速度

Fig. 5 Average velocity and acceleration of metal droplets

着液滴直径的增大, 速度变慢; 平均加速度的范围为 $3.5 \sim 6.2 \times 10^5 \text{ m/s}^2$, 与液滴直径的关系不明显。

2 金属蒸气特性分析

2.1 金属蒸气密度非接触测量

中频真空灭弧室内发生弧后击穿时, 金属液滴的运动与压强^[21-22]有如下关系:

$$\nabla P = -\frac{3ma}{4\pi r^3} = -\rho a \quad (1)$$

式中: ∇P 为沿金属液滴运动方向的压强梯度, 是三维矢量; m 为金属液滴的质量; a 为金属液滴的加速度, 是三维矢量; ρ 为金属液滴的密度。

根据金属液滴的加速度, 可以获得沿移动方向的弧后压强梯度, 如图 6 所示。由图 6 可知, 真空灭弧室内金属液滴表面的压强梯度在 10 MPa/mm 以下, 且随着喷射过程的进行在减小。考虑到图 3 中金属液滴喷射的距离为 0.1~0.5 mm, 得到压强为 1~5 MPa。由理想气体状态方程, 液滴周围局部金属蒸气密度 N_{atom} 可由式(2)得到:

$$N_{\text{atom}} = N_A \frac{\Delta P l_d}{RT} \quad (2)$$

式中: N_A 为阿伏伽德罗常数, $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; l_d 为金属液滴喷射的距离; R 为气体常数, 8.31 J/(mol K) ; T 为温度。

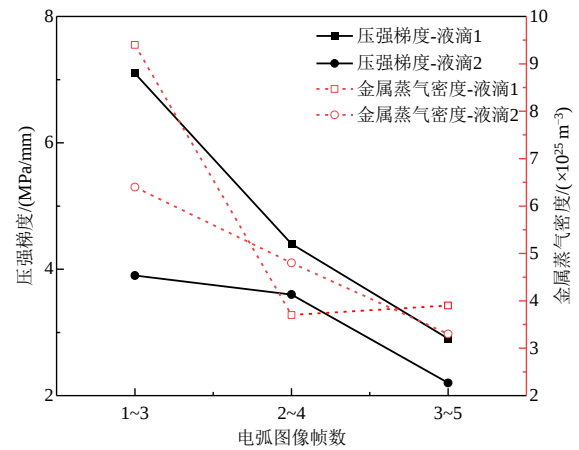


图 6 金属液滴表面的压强梯度与金属蒸气密度

Fig. 6 Pressure gradient and metal vapor density near the surface of metal droplets

液滴周围局部金属蒸气密度可达到 10^{25} m^{-3} , 但这是液滴表面金属蒸气数密度的最大值, 并不代表弧室内的平均值。一般认为, 弧后金属蒸气数密度的最大值可达 $10^{22} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ^[28]。根据扩散和对流原理, 液滴外任意半径 r 处的蒸气比流速度 q 与金属蒸气的质量分数 w 有如下关系:

$$\int \frac{4\pi K \rho}{w-1} dw = \int \frac{q}{r^2} dr \quad (3)$$

式中 K 为扩散系数。根据式(3), 可计算金属液滴周围金属蒸气密度, 如图7所示。由图7可知, 蒸发前期, 80%以上的金属蒸气分布在液滴10倍半径范围内。随着蒸发进行, 液滴表面金属蒸气密度在减少, 当液滴蒸发为初始半径的1/10时, 液滴周围金属蒸气逐渐在空间均匀分布, 蒸气密度几乎为初始表面最大蒸气密度的百分之一。因此, 可以合理地假设, 电弧室内的平均金属蒸气数密度是局部最大密度的1%, 即 10^{23} m^{-3} 。

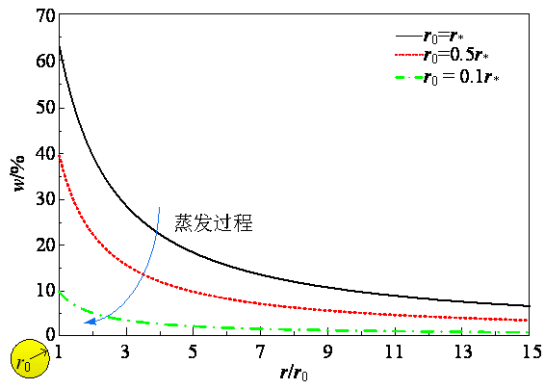


图7 金属液滴周围的蒸气质量分布

Fig. 7 Vapor mass distribution around a metal droplet

2.2 金属蒸气热电离

考虑金属蒸气电离, 当灭弧室内的金属蒸气密度为 N_{atom} 时, 电离的正离子密度为

$$N_{i+} = \chi_i N_{\text{atom}} \quad (4)$$

式中 χ_i 为电离率, 由 Saha 公式计算^[29]:

$$\frac{\chi_i^2}{1-\chi_i^2} = \frac{\alpha T^{2.5}}{P} \exp\left(-\frac{11600W_{\text{ai}}}{T}\right) \quad (5)$$

式中: α 为与灭弧室结构相关的系数; W_{ai} 为金属原子的游离能。由此可得到在不同压强 P 条件下, χ_i 随温度 T 的变化曲线, 如图8所示。

3 弧后鞘层仿真

3.1 计及金属蒸气热电离的 PIC-MCC 模型

PIC-MCC 是模拟等离子体在电磁场作用下的复杂物理过程的模型, 可用于真空开关弧后介质恢复研究。其中, PIC 用于跟踪和记录粒子的动态位置和速度等信息, MCC 用于模拟粒子间的碰撞过程。

基于实际物理过程, 建立如图9所示的简化二维 PIC-MCC 模型用于分析弧后金属蒸气对中频真空开断弧后鞘层过程的影响^[30]。为简化计算, 设置触头材料为纯铜, 模型中间隙距离根据实验固定为

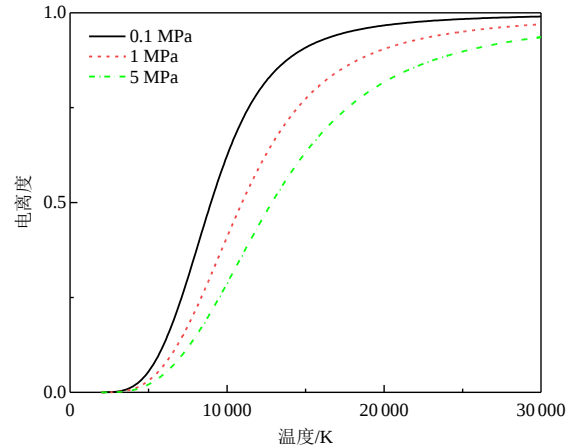


图8 金属蒸气电离率与温度、压强的关系

Fig. 8 Relationship between metal vapor ionization rate and temperature and pressure

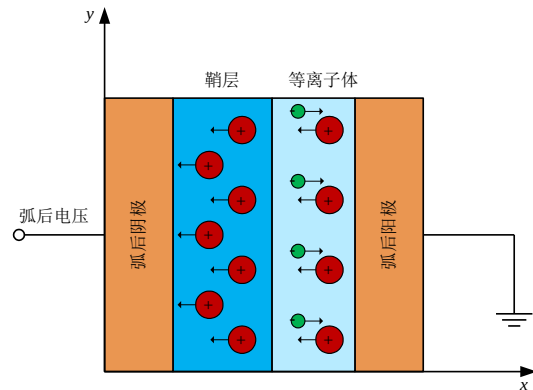


图9 简化的二维 PIC-MCC 模型

Fig. 9 2D Simple PIC-MCC model

3 mm。模型左侧为弧后阴极, 施加线性的瞬态恢复电压 (transient recovery voltage, TRV) 斜率为 $-1 \text{ kV}/\mu\text{s}$; 模型右侧为弧后阳极, 设置电势为 0 V ^[31-33]。该模型主要考虑轴向鞘层发展, 径向值有两个网格且设置为周期性边界条件, 这样设置可以分析粒子的空间分布且不大幅增加计算量。文献[34]对比了二维模型考虑径向扩散和一维仅考虑轴向鞘层运动的仿真结果, 发现径向扩散对鞘层厚度变化曲线影响较小。二维模型计算量较大, 本文主要关注金属蒸气对弧后鞘层的影响, 因此, 采用简化的二维模型是合理的。

假设电流零点时刻间隙内的电子和单价铜离子均匀分布且速度分布满足麦克斯韦分布。文献[35]通过仿真分析发现电子和离子温度对鞘层厚度变化影响较小, 因此, 本文电子和离子的温度采用经典数值, 分别设置为 3 和 2 eV。将间隙内的金属蒸气原子设置为背景气体, 在与电子或离子发生碰撞时根据相应的碰撞类型作出改变。模型考虑了带电粒子与金属蒸气原子之间的关键碰撞过程, 包

括电子和原子之间的弹性、激发和电离碰撞以及离子和原子之间的电荷交换碰撞和动量交换碰撞。粒子运动到边界时移出仿真区域。为得到稳定可靠仿真结果，划分的空间网格尺寸和时间步长由初始时刻等离子体的德拜长度 λ_D 和振荡频率 ω_p 决定，需分别满足如下条件：

$$\Delta x \leq \lambda_D \quad (6)$$

$$\Delta t \leq 0.2/\omega_p \quad (7)$$

模型的初始等离子体密度为

$$N_{i0} = \frac{4I_{pa0}}{v_i \pi D^2 Z e} \quad (8)$$

式中： N_{i0} 为初始时刻离子密度，设置电子密度等于离子密度； I_{pa0} 为鞘层开始发展时电流值，本文取 3 A； v_i 为初始时刻的漂移速度，设为 3 000 m/s； D 为触头直径，根据实验取 41 mm； Z 为离子价态，根据文献中常用数值在式(8)中取 1.8； e 为基本电荷，取 1.6×10^{-19} C。

此外，金属蒸气原子在高温下易发生热电离，结合 2.2 节的 Saha 方程，考虑金属蒸气的热电离，对模型初始等离子体离子密度进行修正，由式(9)给出。

$$N_{i0} = \frac{4I_{pa0}}{v_i \pi D^2 Z e} + \chi_i N_{atom} \quad (9)$$

3.2 考虑金属蒸气碰撞的弧后鞘层仿真

弧后初始时刻金属蒸气密度范围在 $10^{19} \sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ，鞘层完全形成的时间约为几 μs 到几十 μs 。而发生弧后击穿时，由上文分析可知，灭弧室内液滴表面的金属蒸气密度 N_{atom} 可达到 10^{23} m^{-3} ，导致带电粒子和原子间的碰撞加剧，必然延缓弧后鞘层的形成时间。基于 3.1 节的 PIC-MCC 仿真模型和式(8)计算初始的等离子体密度，系统研究过零时刻金属蒸气密度在 $10^{19} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 对弧后鞘层的影响，鞘层厚度的发展过程如图 10 所示。

当金属蒸气密度为 10^{19} 和 10^{20} m^{-3} 时，鞘层从弧后阴极发展到阳极所需时间分别为 1.75 和 1.94 μs ，可以看出在此范围内，金属蒸气密度的增加对鞘层发展过程的影响较小；当金属蒸气密度为 10^{21} m^{-3} 时，鞘层的充满间隙的时间略增大，约为 2.4 μs ，但相对于 10^{20} m^{-3} 时增大约 20%；当金属蒸气密度为 10^{22} m^{-3} 时，鞘层的充满间隙的时间增大为 4.1 μs ，相比 10^{21} m^{-3} 时增大 71%；更进一步，根据上文实验和计算结果，当金属蒸气密度为

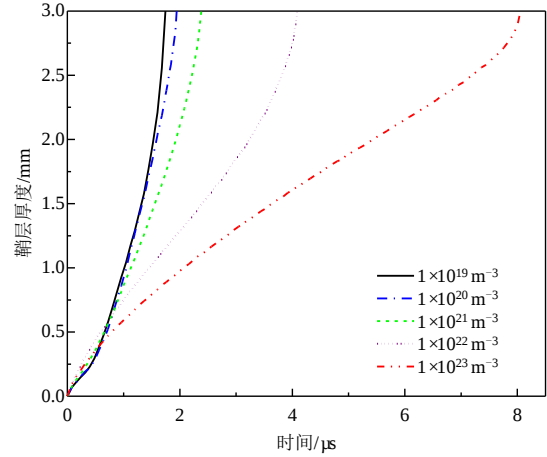


图 10 不同金属蒸气密度时鞘层厚度的生长过程

Fig. 10 Growth of the sheath thickness with different metal vapor densities

10^{23} m^{-3} 时，鞘层发展完全所需时间明显放慢至 8.05 μs ，相比 10^{22} m^{-3} 时增大约 1 倍。综上，可以看出在金属密度低于 10^{20} m^{-3} 时，增大金属蒸气密度对鞘层的发展过程影响较小；当金属蒸气密度大于 10^{20} m^{-3} ，金属蒸气密度的增加对鞘层的充满时间产生显著影响，且随着密度的增大，鞘层充满间隙所需的时间显著延长。

本文中，金属蒸气主要通过和电子和离子碰撞过程来影响鞘层的发展，为进一步分析金属蒸气对鞘层过程的影响机理，选取特定时刻以弹性碰撞为例，解释金属蒸气通过碰撞过程影响鞘层发展的微观机理。图 11 为在 0.8 μs 时刻在不同原子密度下的弹性碰撞总次数沿 x 轴(鞘层发展方向)分布。由图 11 可知，当金属蒸气密度大于 10^{20} m^{-3} ，随着原子密度的增加，弹性碰撞次数显著增大。具体来看，在原子密度为 10^{20} 和 10^{21} m^{-3} 条件下，弹性碰撞次数的最大值分别约为 2.7×10^9 和 2.2×10^{10} 。随着原子密度进一步增大，在原子密度为 10^{22} 和 10^{23} m^{-3} 条件下，弹性碰撞次数的最大值显著增大，分别约为 3.1×10^{11} 和 4.1×10^{12} 次。与 10^{22} 和 10^{23} m^{-3} 条件下相比，弹性碰撞次数在 10^{20} 和 10^{21} m^{-3} 条件下相对较小，因此，对电子的能量影响相对较小，反映出鞘层发展时间随着密度增大略微增大。在 10^{22} 和 10^{23} m^{-3} 条件下，弹性碰撞次数显著增大，通过弹性碰撞可以减小电子能量，从而减慢电子移动速度，使鞘层充满间隙所需时间大幅变慢。延缓的鞘层发展时间对弧后介质恢复过程不利。由于弧后电压主要施加在鞘层两端，若鞘层不能快速发展，则可能会导致击穿，造成电弧重燃，不利于中频真空开断。

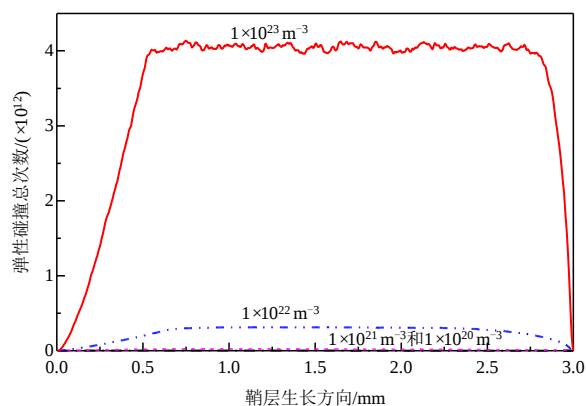
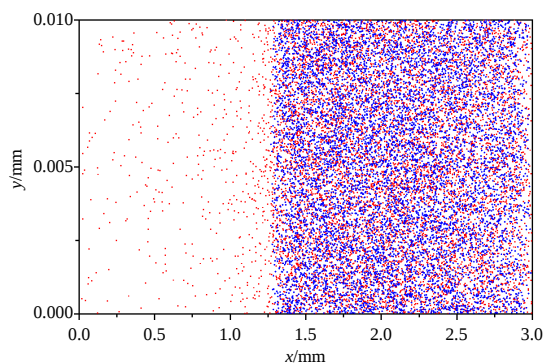


图 11 不同金属蒸气密度在 $0.8 \mu\text{s}$ 时的弹性碰撞总次数的空间分布

Fig. 11 Distribution of the number of elastic collisions under different metal vapor atom densities at $0.8 \mu\text{s}$

3.3 计及金属蒸气热电离效应的弧后鞘层仿真

本文提出计及金属蒸气热电离的 PIC-MCC 模型初始参数改进。由于金属蒸气具有较高的温度较容易发生热电离,因此,需要通过仿真进一步评估考虑热电离与否对鞘层发展以及击穿与否的影响。根据 2.1 节的 PIC-MCC 仿真模型和式(9)计算初始的等离子体密度,对比研究考虑热电离与否对鞘层过程的影响。根据上文研究看出,金属密度低于 10^{20}m^{-3} 时,增大金属蒸气密度对鞘层的发展过程影响较小,因此,本节主要分析金属蒸气密度在 $10^{20} \sim 10^{23} \text{m}^{-3}$ 范围内,考察计及热电离对弧后鞘层的影响。图 12 为 $10^{20} \sim 10^{22} \text{m}^{-3}$ 范围内计及热电离与否对鞘层发展的影响。由图 12 可知,原子密度为 10^{20}m^{-3} 时,金属蒸气热电离的作用效果并不明显,考虑热电离与否对鞘层过程影响较小。金属蒸气密度从 10^{21}m^{-3} 开始,随着原子密度的增大,热电离过程对鞘层的影响愈加明显。考虑金属蒸气热电离过程后的鞘层发展速度明显变慢,原因在于热电离增大了带电粒子密度,随之增大了带电粒子和原子之间的碰撞次数,降低了带电粒子运动速度,从而减慢鞘层发展速度。



(a) $N_{\text{atom}} = 1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, 不考虑热电离

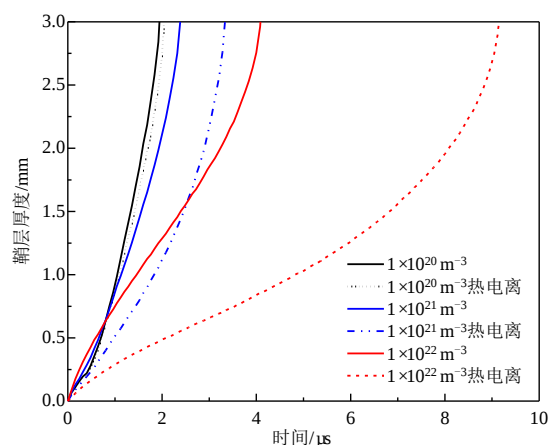
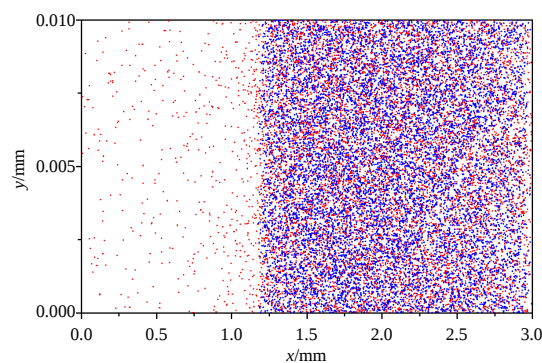


图 12 不同金属蒸气密度下热电离对鞘层发展的影响

Fig. 12 Effect of thermal ionization on sheath development at different metal vapor densities

图 13 为在 $1.2 \mu\text{s}$ 特定时刻 $10^{20} \sim 10^{22} \text{m}^{-3}$ 范围内不同金属蒸气原子密度和计及热电离与否对鞘层发展过程的带电粒子空间分布的影响。图中稀疏分布粒子代表离子,密集分布粒子为电子和离子混合。仅有离子存在的区域为该时刻的鞘层,离子和电子均存在的区域为等离子体区。由图 13(a)、(c)、(e)或(b)、(d)、(f)可知,在其他条件相同时,随着原子密度的增大,鞘层的厚度变窄,即鞘层发展变慢,这一现象主要是由于原子密度增大,导致碰撞频率增大,减慢了电子运动速度,从而减缓鞘层发展速度。对比图 13(a)和(b)可知,在原子密度为 10^{20}m^{-3} 时,金属蒸气热电离对带电粒子空间分布影响较小,考虑热电离的情况下,鞘层厚度略微变窄。进一步分析图 13(c)~(f),当原子密度超过 10^{21}m^{-3} 时,金属蒸气热电离对电子和离子的空间分布影响显著。考虑金属蒸气热电离过程后,带电粒子的密度随之增大,从而增大了带电粒子和原子之间的碰撞次数,减慢鞘层发展速度。

计及热电离情况下金属蒸气密度为 10^{23}m^{-3} 时,仿真显示发生弧后瞬时击穿。如图 14 所示,随着时间的增加,代表电子的超粒子数呈指数增



(b) $N_{\text{atom}} = 1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, 考虑热电离

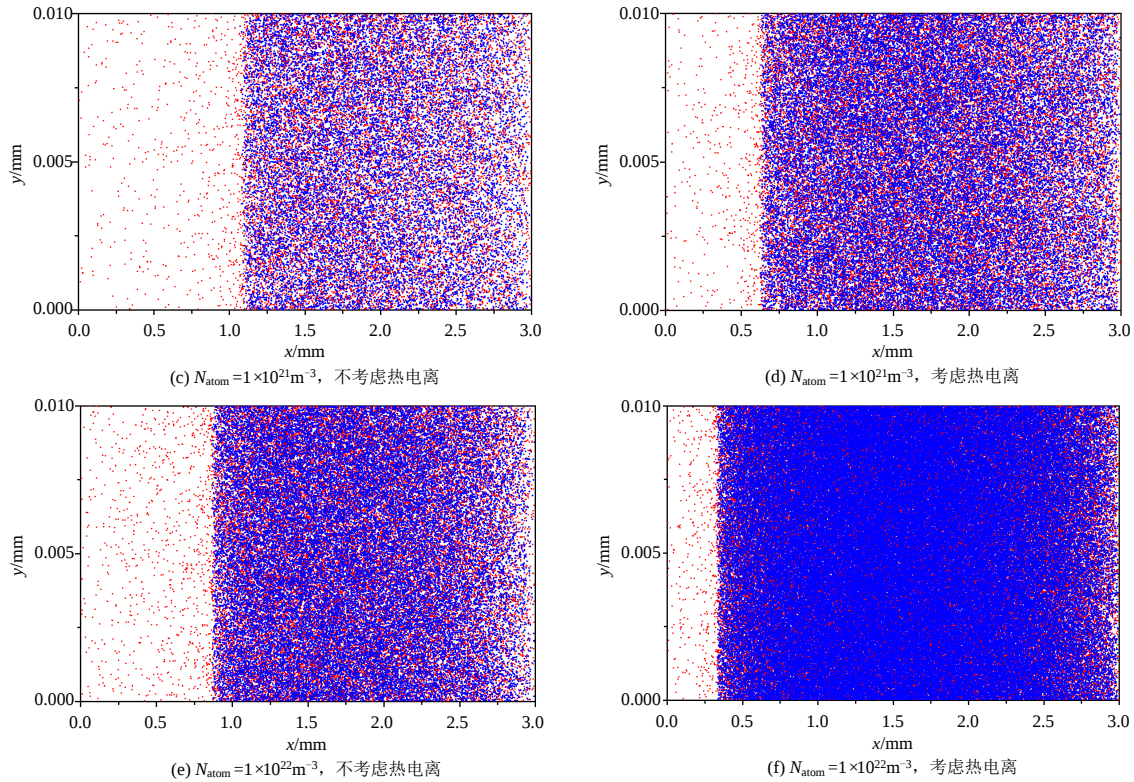


图 13 1.2 μs 不同金属蒸气密度下以及考虑热电离与否对电子和离子空间分布的影响

Fig. 13 Influence of different metal vapor atom densities and with/without thermal ionization of metal vapor atom on the spatial distributions of electrons and ions at 1.2 μs

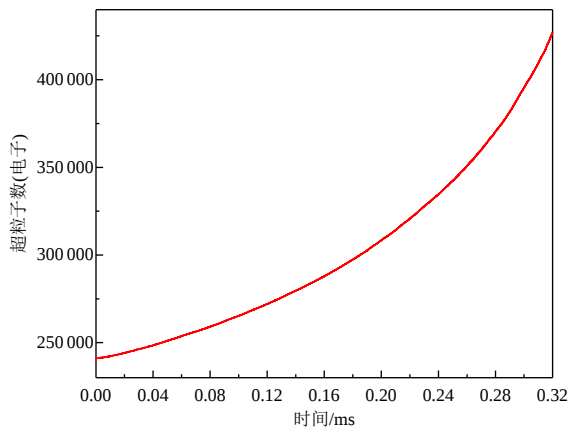


图 14 超粒子数随时间变化曲线

Fig. 14 Evolution curve of the number of super-particles

加, 产生了电子崩, 即弧后击穿。随着超粒子数量的增多, 仿真计算的速度明显减慢, 在验证了击穿发生的趋势后, 仿真在 0.32 μs 被终止。

进一步, 为验证击穿仿真的准确性, 选取文献[36]实验测量的击穿距离与电压关系式:

$$d_j = B_1 u + B_2 u^2 \quad (10)$$

式中: d_j 为临界击穿距离; B_1 为 0.283 mm/kV; B_2 为 -0.0274 mm/kV; u 为施加在电极上的电压, 在本文中, u 为线性增长, 斜率取绝对值为 1 kV/μs。一般认为, 若弧后鞘层能承受住 TRV, 显示为鞘层厚

度始终大于式(10)给出的临界击穿距离, 则击穿不发生; 若鞘层厚度从某时刻开始或者始终小于临界击穿距离, 则鞘层不足以承受弧后 TRV, 将会发生弧后击穿。图 15 为鞘层仿真结果与根据式(10)计算出的临界击穿曲线的对比。由图 15 可知, 鞘层厚度始终小于击穿距离, 表明鞘层阶段发生击穿, 验证了击穿仿真的准确性。在计及金属蒸气密度热电离情况下, 当金属蒸气为 10^{23} m^{-3} 时发生了击穿过程。而不考虑热电离时, 如图 10 所示, 该金属蒸

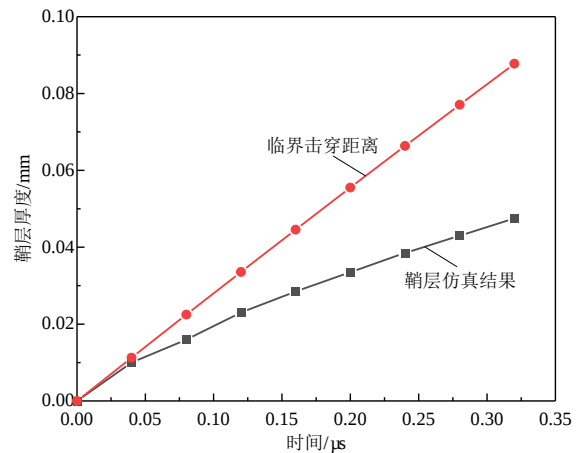


图 15 鞘层仿真结果与临界击穿曲线对比

Fig. 15 Comparison between the simulated sheath growth and the critical breakdown curve

气密度下,鞘层顺利生长至充满间隙,不发生击穿。

上述计算结果表明,忽略热电离可能会造成计算误差,即低估了实际的鞘层发展时间,且在较高金属密度情况下会产生相反的仿真结果:计及热电离效应情况下可仿真出发生击穿;而忽略热电离时,仿真结果则呈现电子和离子数量衰减为零,形成鞘层而不发生击穿。在实际开断情况下,考虑到金属蒸气温度较高,在中频燃弧过程相对较长时间(ms级)内,金属蒸气的热电离会对弧后初始时刻的等离子体产生影响,因此,在金属蒸气密度较大(超过 10^{21}m^{-3})时考虑热电离是必要的,且会对仿真结果产生重要影响。同时也说明,中频真空开断条件下金属蒸气密度达到 10^{23}m^{-3} 时容易导致击穿,需要在燃弧过程中采取必要的措施,如磁场调控等来减少过零时刻的蒸气原子密度,以此避免击穿过程。

4 结论

本文分析中频真空灭弧室内金属液滴的空间喷射运动,进而获得金属蒸气密度,并在此基础上研究计及金属蒸气影响的中频真空电弧弧后鞘层发展过程,得到如下结论:

1) 搭建中频真空开关电弧双视角实验平台,根据实验结果,开断中频电流失败时,双视角电弧图像中均观察到大量的金属液滴向外喷溅,这是灭弧室内金属蒸气的重要来源。

2) 利用视觉追踪算法,三维重构了弧后击穿期间金属液滴的立体喷射过程,灭弧室内金属液滴的平均速度为 $10\sim 20\text{m/s}$,金属液滴表面的压强为 $1\sim 5\text{MPa}$,金属蒸气密度的最大数量级为 10^{23}m^{-3} 。

3) 根据改进的PIC-MCC模型,仿真弧后鞘介质恢复过程除了应考虑带电粒子与金属蒸气的碰撞,还应计及金属蒸气热电离效应对鞘层发展时间的影响。根据本文模型的预测结果,当金属蒸气密度达到 10^{23}m^{-3} 时将发生弧后击穿,与实验结果一致,证明计及金属蒸气的影响对于深入分析中频弧后介质恢复特性有重要意义。

致 谢

本文中金属蒸气密度的非接触测量方案是在英国利物浦大学 Jiu Dun Yan 教授的指导下完成的,在此向他表示衷心的感谢。

参考文献

[1] BUTICCHI G, WHEELER P, BOROEYEVICH D. The

more-electric aircraft and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(4): 356-370.

[2] 蒋原,武建文,李擎,等. 平板触头小开距中频真空电弧特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6517-6524.

JIANG Yuan, WU Jianwen, LI Qing, et al. Characteristics of intermediate frequency vacuum arc in butt contact with short gap[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6517-6524(in Chinese).

[3] 鞠思源,贾申利,莫永鹏,等. 不同长径比下真空电弧自由燃弧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6675-6685.

JU Siyuan, JIA Shenli, MO Yongpeng, et al. Research on the characteristics of free-burning vacuum arc under different gap distance-to-diameter ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6675-6685(in Chinese).

[4] 马强,王立军,阙继磊,等. 平板触头小开距高电流密度下真空电弧特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6229-6238.

MA Qiang, WANG Lijun, QUE Jilei, et al. Experimental study on vacuum arc characteristics of butt contacts with short gap and high current density[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6229-6238(in Chinese).

[5] 张润铭,王立军,王聪,等. 真空电弧中不同倾斜角度的阴极射流下阴极斑点弧坑形成和发展的建模仿真[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 438-449.

ZHANG Runming, WANG Lijun, WANG Cong, et al. Modeling and simulation on the formation and development of cathode spot crater under inclined cathode jet with different angles in vacuum arc[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 438-449(in Chinese).

[6] 李旭彬,蒋原,王雯,等. 粒子模拟在直流真空开关弧后介质恢复过程的仿真应用[J]. 高电压技术, 2026, 52(2): 897-907.

LI Xubin, JIANG Yuan, WANG Wen, et al. Application of particle-in-cell method in the simulation of post-arc dielectric recovery process of DC vacuum switches [J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(2): 897-907 (in Chinese).

[7] WEI Dejie, ZHU Liying, WU Jianwen, et al. 3-D simulation study on deep dielectric charging characteristics of satellite slip ring assembly[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(11): 3384-3391.

[8] 王华清,黄道春,双明镜,等. 融合连续过渡模型与 Helmer 模型的真空断路器开断模型研究[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1731-1741.

WANG Huaqing, HUANG Daochun, SHUANG Mingjing, et al. Interruption model of vacuum circuit breaker based on continuous transition model and Helmer

- model[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1731-1741(in Chinese).
- [9] MO Yongpeng, SHI Zongqian, JIA Shenli. Study of the influences of different factors on the charged particles absorbed by the post-arc anode during the post-arc sheath expansion process in vacuum circuit breakers[J]. AIP Advances, 2021, 11(1): 015317.
- [10] WANG Dan, WANG Lijun, WANG Zhiwei, et al. 2-D particle simulation on the influence of transverse magnetic field on the plasma decay in postarc stage of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(11): 3975-3981.
- [11] WANG Lijun, CHEN Zhuo, WANG Dan, et al. Two-dimensional Particle-in-Cell/Monte Carlo Collisional simulation of the post-arc breakdown in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(8): 3228-3236.
- [12] CHEN Yi, YANG Fei, SUN Hao, et al. Influence of the axial magnetic field on sheath development after current zero in a vacuum circuit breaker[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(6): 064003.
- [13] VAN LANEN E P A, SMEETS R P P, POPOV M, et al. Vacuum circuit breaker postarc current modelling based on the theory of Langmuir probes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 925-932.
- [14] 高雪莹, 林莘, 丁一, 等. 高压断路器石墨烯铜钨触头烧蚀性能实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9471-9481.
- GAO Xueying, LIN Xin, DING Yi, et al. Experimental study on ablative performance of graphene-copper-tungsten contacts for high voltage circuit breakers [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9471-9481(in Chinese).
- [15] 曹博, 王振兴, 潘世佳, 等. 考虑吸收效应的真空电弧发射光谱碰撞辐射建模[J]. 高电压技术, 2026, 52(2): 984-995.
- CAO Bo, WANG Zhenxing, PAN Shijia, et al. Collisional radiative modeling of vacuum arc emission spectroscopy considering absorption effect[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(2): 984-995 (in Chinese).
- [16] 王景, 武建文. 中频真空电弧的等离子体特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 145-152.
- WANG Jing, WU Jianwen. Plasma characteristics of intermediate-frequency vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36): 145-152(in Chinese).
- [17] 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.
- [18] ARAI K, TAKAHASHI S, MORIMIYA O, et al. Probe measurement of residual plasma of a magnetically confined high-current vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 929-933.
- [19] JIANG Yuan, WU Jianwen, MA Suliang, et al. Appearance of vacuum arcs in axial magnetic field and butt contacts at intermediate frequencies[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(2): 1405-1412.
- [20] MILLER H C. Anode modes in vacuum arcs: update[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2366-2374.
- [21] 蒋原, 刘雨坤, 李擎, 等. 中频供电系统真空电弧开断过程与液滴喷射分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 684-691.
- JIANG Yuan, LIU Yukun, LI Qing, et al. Interruption and droplets emission in intermediate-frequency vacuum arc of aviation power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 684-691(in Chinese).
- [22] ZALUCKI Z. Estimation of post-arc neutral vapor density in the gap volume generated by evaporating macroparticles in a diffuse vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1985, 13(5): 321-326.
- [23] LINS G. Measurement of the temperature of evaporating macroparticles after current zero of vacuum arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16(4): 433-437.
- [24] SIEMROTH P, LAUX M, PURSCH H, et al. Investigation of vacuum arc droplets from copper, titanium, and tungsten by means of light scattering [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(9): 2736-2744.
- [25] GELLERT B, SCHADE E, DULLNI E. Measurement of particles and vapor density after high-current vacuum arcs by laser techniques[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1987, 15(5): 545-551.
- [26] 蒋原, 李擎, 崔家瑞, 等. 纵向磁场下中频真空电弧的重燃现象分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3860-3868.
- JIANG Yuan, LI Qing, CUI Jiarui, et al. Re-Ignition of intermediate frequency vacuum arc at axial magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3860-3868(in Chinese).
- [27] 蒋原, 马速良, 武雨田, 等. 基于视觉追踪技术的中频真空电弧弧后特性研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4138-4147.
- JIANG Yuan, MA Suliang, WU Yutian, et al. Post-arc characteristics of intermediate frequency vacuum arc based on visual tracking technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4138-4147(in Chinese).
- [28] WANG Zhenxing, TIAN Yunbo, GENG Yingsan, et al. Simulation of breakdown in Cu-Cr metal vapor after

- vacuum arc extinctions[C]//2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology(ICEPE-ST). Matsue: IEEE, 2013: 1-4.
- [29] BAKSHI V. Saha equation for a two-temperature plasma[J]. Physical Review A, 1990, 42(4): 2460.
- [30] 李旭彬, 冷爽, 黄智慧, 等. 基于 PIC-MCC 模型的真空开关弧后鞘层仿真研究[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(11): 1033-1038.
- LI Xubin, LENG Shuang, HUANG Zhihui, et al. Post-arc sheath of vacuum circuit breaker: a simulation study in PIC-MCC method[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(11): 1033-1038(in Chinese).
- [31] 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(1): 015203.
- [32] MO Yongpeng, SHI Zongqian, BAI Zhibin, et al. Influence of residual plasma drift velocity on the post-arc sheath expansion of vacuum circuit breakers[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(5): 053506.
- [33] WANG Dan, WANG Lijun, WANG Zhiwei, et al. 2-D particle simulation on the influence of transverse magnetic field on the plasma decay in postarc stage of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(11): 3975-3981.
- [34] MO Yongpeng, SHI Zongqian, JIA Shenli. Study of post-arc residual plasma dissipation process of vacuum circuit breakers based on a 2D particle-in-cell model[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(4): 045401.
- [35] 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(2): 023511.
- [36] 廖明, 王季梅. 10 kV 真空断路器击穿特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(4): 57-59.
- LIAO Ming, WANG Jimei. Statistical property of the breakdown of 10 kV vacuum circuit breakers [J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(4): 57-59(in Chinese).



蒋原

在线出版日期: 2025-03-12。

收稿日期: 2024-11-28。

作者简介:

蒋原(1985), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为真空电器电弧理论及应用, jiangyuan@ustb.edu.cn;

*通信作者: 李旭彬(1993), 男, 博士, 研究方向为真空电弧弧后过程建模与仿真, lixubin986@gmail.com。

(编辑 张蕾)