



·等离子体及应用技术·

真空电弧等离子体发射光谱诊断*

张 晋^{1,2}, 袁 召^{1,2}, 陈立学^{1,2}, 刘 珊^{1,2}

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 脉冲功率技术教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 真空断路器的开断容量限制其在高压大电流开断领域的应用, 获取燃弧过程中的等离子体参数对于提高真空断路器的开断容量至关重要。利用发射光谱法对真空电弧内的等离子体参数进行了诊断, 研究了在不同电流幅值条件下真空电弧内电子温度、电子密度、谱线强度的轴向分布规律, 结合真空电弧高速图片对真空电弧内不同粒子的扩散过程与弧柱直径之间的关系进行了分析。得到的电子温度在 8000~10 000 K 量级, 电子密度在 10^{19} ~ 10^{20} m^{-3} 量级, 电子温度与电子密度从阴极向阳极逐渐下降, 同时铜原子谱线强度主要集中在两极而一价铜离子谱线强度由阴极向阳极逐渐升高。铜原子谱线强度的径向分布呈现类平顶波分布、一价铜离子谱线强度的径向分布呈现类高斯分布的特点, 且铜原子的谱线范围略大于弧柱直径, 一价铜离子的谱线范围略小于弧柱直径, 两种粒子的扩散速度存在差异。

关键词: 真空电弧; 发射光谱; 电子温度; 电子密度; 谱线强度

中图分类号: TM561

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210116

Vacuum arc plasma emission spectroscopy diagnosis

Zhang Jin^{1,2}, Yuan Zhao^{1,2}, Chen Lixue^{1,2}, Liu Shan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and New Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology (Huazhong University of Science and Technology), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: The breaking capacity of vacuum circuit breakers limits its application in the field of high-voltage and high-current breaking. Obtaining plasma parameters in the arcing process is very important for improving the breaking capacity of VCB. The emission spectroscopy is used to diagnose the plasma parameters in the vacuum arc in this paper. The axial distribution of electron temperature, electron density, and spectral line intensity in the vacuum arc under different current amplitude conditions is studied. The relationship between the diffusion process of different particles in the vacuum arc and the diameter of the arc column is analyzed based on the high-speed pictures of the vacuum arc. The electron temperature is 8000–10 000 K, and the electron density is 10^{19} – 10^{20} m^{-3} . The electron temperature and electron density gradually decrease from the cathode to the anode. The intensity of the copper atomic line is mainly concentrated at the two poles, while the intensity of the monovalent copper ion line gradually increases from the cathode to the anode. The radial distribution of the copper atomic line intensity presents a flat-top wave distribution, and the monovalent copper ion line intensity presents a Gaussian-like distribution. The spectral range of copper atoms is slightly larger than the diameter of the arc column, and the spectral range of monovalent copper ions is slightly smaller than the diameter of the arc column. The diffusion speed of the two particles is different.

Key words: vacuum arc; emission spectrum; electron temperature; electron density; spectral line intensity

真空断路器以真空作为绝缘和灭弧介质, 具有开断容量大、弧后介质恢复速度快以及环境友好等诸多优点^[1-2], 已经在开关中低压领域占据主导地位。但是在高压输电系统中, 真空断路器的开断容量还难以满足系统的需求, 为了提高真空断路器的开断容量使真空断路器在高压输电系统中发挥更大的作用, 需要对真空断路器开断过程中

* 收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0904300); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51807069)

作者简介: 张 晋(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事真空电弧方面的研究。

通信作者: 袁 召(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高压电器、高压电抗器等方面的研究工作。

真空电弧内微观粒子的运动和分布规律进行诊断。常用的诊断方法有发射光谱法、吸收光谱法、激光诱导荧光法、激光干涉法等多种方法。其中发射光谱法作为一种常见的光学测量手段,具有实验方法简单,对于测量对象无干扰,测量结果准确等优点,十分适合低温等离子体的参数诊断^[3]。Alireza Khakpour 等利用发射光谱研究了两种阳极斑点模式对触头间等离子体分布的影响规律^[4], Ralf Methling 利用发射光谱研究了在拉弧工况下不同燃弧时刻对应的等离子体分布规律^[5], M. Lisnyak 等研究了在铜铬触头条件下大电流真空电弧谱线强度的轴向分布,总结了多种微观粒子的谱线轴向分布规律^[6], St. Franke 利用谱线展宽法对出现两种阳极斑点时的电子密度进行了测定,得到出现一型阳极斑点情况下电子密度在 $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、出现二型阳极斑点情况下电子密度在 $(50 \sim 100) \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 的结论^[7]。仿真方面,西安交大王立军等建立了燃弧过程中的磁流体动力学模型,对不同开距条件下真空电弧内电子温度进行了仿真研究,得到了电子和离子的二维温度分布^[8-9]。关于真空电弧内金属原子的测量,王振兴与 Sergey 等利用吸收光谱测定了燃弧和弧后过程中铜、铬原子的绝对密度随时间的变化规律^[10-12]。通过激光诱导荧光法^[13-18],可以获取到触头间隙内金属原子的二维分布,同时可以观测到燃弧过程中金属蒸汽分布的变化过程,指出燃弧后期阳极的活跃是影响金属蒸汽分布的重要因素。

本文主要的研究对象为电子,电子作为真空电弧中主要的导电粒子承担 90% 以上的电弧电流,电子温度和密度的分布及变化规律对于真空电弧的形态影响巨大,因此获取燃弧过程中电子的微观参数对于深入理解真空电弧的燃弧过程以及提高真空断路器的开断容量至关重要。本文利用光谱仪对燃弧过程中的发射谱线进行测量,在获得了谱线强度轴向分布的基础上结合沙哈-玻耳兹曼方程对工频不同电流幅值下的电子温度、电子密度进行了计算,同时测量了燃弧过程中的径向发射光谱,发现了铜原子和一价铜离子扩散过程存在差异的现象,研究结果为深入研究真空电弧内等离子体的特性提供了必要的数据库。

1 实验装置及布置

1.1 实验回路

实验布置示意图如图 1 所示,实验中为得到 50 Hz 工频振荡电流,采用电容和电抗器串联单频振荡的方式产生,振荡电流幅值为 2~6 kA。

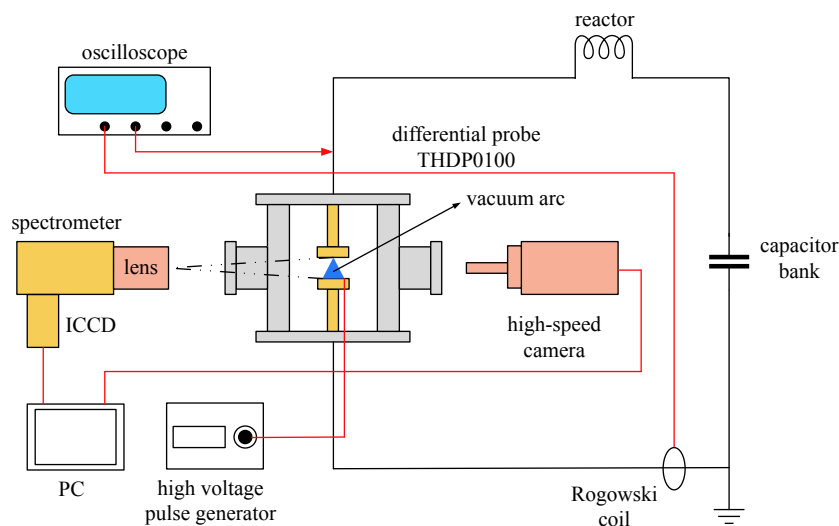


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

图 1 实验装置示意图

采用外部触发的方式产生真空电弧,高压脉冲单元产生一个脉冲高压用于击穿触发电极和阴极之间的间隙以产生初始等离子体,在外部电场的作用下初始等离子体进入主间隙,随后主间隙被击穿,主电流得以通过间隙,从而得到一个工频正弦半波电流。在真空泵的作用下,保持可拆真空灭弧室内的气压维持在 10^{-4} Pa 。实验中采用的触头为杯状纵磁触头,如图 2 所示,触头直径为 60 mm,触头开距为 8 mm。

通过改变对于电容的预充电电压来控制振荡电流的幅值。实验中通过 Tektronix 公司的 pem 线圈对电弧电流进行测量,利用电压探头测量电弧电压。测量得到的电压和电流信号输入示波器,用于记录燃弧过程中真空电弧的电学特性。

1.2 光学测量系统及参数

光学测量模块包括高速相机系统和光谱仪系统两部分,如图1所示。高速摄像机用于对燃弧过程中真空电弧的形态进行记录,采用的拍摄速度为10000帧/s,曝光时间为1 μs。光谱仪系统主要由光谱仪以及ICCD组成,光谱仪的型号为普林斯顿仪器公司生产的SP2750i,ICCD型号为PI-MAX 1024EM。其中光谱仪用于将燃弧过程中电弧发出的光进行分散,得到每个波段的光谱信息,ICCD相机则用于记录这些光谱信息并输出给计算机。

光谱仪系统、高速相机系统、合成振荡回路3部分的时序由示波器控制,当线圈中检测到电流并且达到示波器设定的动作值时,示波器会产生一个触发信号来触发高速相机和ICCD,用于同步记录燃弧过程。



Fig. 2 Experimental contact structure
图2 实验触头结构

2 发射光谱诊断原理

电子温度是反映电子平动动能的物理量,同时能够反映等离子体的热运动状态。利用发射光谱测定等离子体中电子温度的方法包括谱线绝对强度法、双谱线法和多谱线斜率法等,本文利用多谱线斜率法对电子温度进行诊断。真空电弧满足局部热力学平衡态(LTE)的条件,在局部热力学平衡态的条件下,等离子体中电子温度与电子激发温度是相等的,因此利用沙哈-玻耳兹曼方程计算得到的电子激发温度就是真空电弧中自由电子的温度^[19]。根据沙哈-玻耳兹曼方程,辐射谱线强度与对应的等离子体温度之间的关系为^[20]

$$I = n A_{ki} h \nu \frac{g_k}{Z} \exp\left(-\frac{E_k}{k_B T}\right) \quad (1)$$

对式(1)两侧同时取对数可得

$$\ln\left(\frac{I \lambda}{g_k A_{ki}}\right) = -\frac{E_k}{k_B T} + \ln\left(\frac{h n}{Z}\right) \quad (2)$$

式中: I 为谱线强度; T 为等离子体激发温度; n 为等离子体中的中性粒子密度; A_{ki} 为跃迁几率; h 为普朗克常数; ν 为谱线的频率; g_k 为上能级统计权重; Z 为原子配分函数; E_k 为高能态激发能; k_B 为玻耳兹曼常数。

根据式(2)可得 $\ln(I \lambda / g_k A_{ki})$ 与高能态激发能 E_k 之间满足线性关系。因此可以通过测量多条铜原子谱线的强度,以 E_k 作为横轴,以 $\ln(I \lambda / g_k A_{ki})$ 作为纵轴描出各点,并做直线拟合,得到的拟合直线的斜率即为 $-1/k_B T$ 。该方法需要原子的跃迁几率以及高能态激发能等相关信息,可以在NIST上查询到铜原子谱线的相关信息如表1所示。

在保证等离子体处于LTE条件下,综合考虑沙哈热电离方程以及玻耳兹曼分布律,只考虑等离子体中原子电离对于电子的贡献,电子密度可以利用一条原子谱线和一条离子谱线按照下式确定^[21]

$$n_e = 2 \frac{I \lambda g_k^+ A_{ki}^+}{I^+ \lambda^+ g_k^+ A_{ki}^+} \left(\frac{2 \pi m_e k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{\text{ion}} + E_k^+ - E_k}{k_B T}\right) \quad (3)$$

式中: m_e 代表电子质量; E_{ion} 为铜原子电离能;其余参数与式(1)、式(2)中相同;带有上标+的表示一价铜离子(Cu II)对应数据,未带上标表示铜原子(Cu I)对应数据。

3 实验结果及分析

3.1 不同粒子谱线强度的分布

利用发射光谱对真空电弧燃弧过程中的谱线强度进行测量,得到了铜原子(Cu I)与一价铜离子(Cu II)谱线强度的轴向和径向分布规律,在电流峰值时刻,两种粒子的谱线强度轴向分布如图3所示。

表1 铜原子的特征谱线参数

Table 1 Parameters of characteristic spectral lines of copper atom (Cu I)

wavelength/nm	E_k/cm^{-1}	g_k	$A_{ki}/(10^8\text{s}^{-1})$
510.6	30783.697	4	0.020
515.4	49935.195	4	0.600
521.9	49942.051	6	0.750
529.4	62403.332	8	0.109

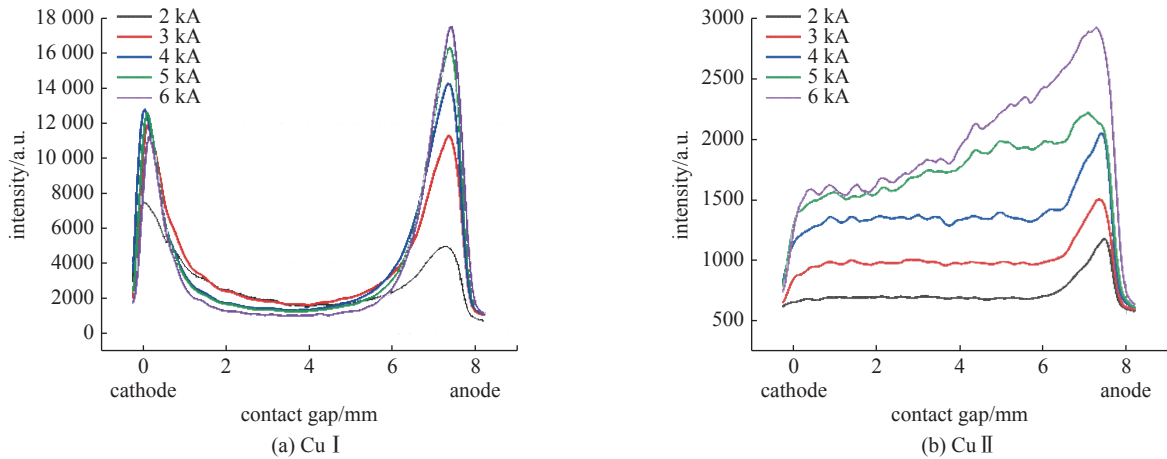


Fig. 3 Axial distributions of spectral line intensity

图 3 谱线强度的轴向分布

根据图3可见,铜原子(Cu I)谱线呈现双峰分布,主要辐射强度集中在阴极区和阳极区。当电流幅值为2,3 kA时,阴极区的辐射强度高于阳极区,随着电弧电流的增大,阳极区的辐射强度不断增强;当电流值超过4 kA之后,阳极区的辐射强度超过了阴极区。根据式(4)可知,谱线强度正比于粒子的激发态密度^[22]。

$$\epsilon_{ul} = \frac{1}{4\pi} \frac{hc}{\lambda_0} n_u A_{ki} \quad (4)$$

式中: ϵ_{ul} 为铜原子从高能级 u 到低能级 l 的发射系数; λ_0 为中心波长; c 为光速; n_u 为粒子激发态密度。铜原子的谱线强度的两个峰值出现在阴极和阳极,且随着电弧电流的增大,阳极区的谱线强度逐渐高于阴极区,这说明随着电弧电流的增大,阳极表面开始活跃,产生了大量的金属原子。同时,阴极斑点处作为发射源会产生大量金属原子与电子,因此在阴极处也存在一个谱线峰值。由于铜原子只能在阴极和阳极附近生成,在弧柱区没有铜原子的产生来源,因此弧柱区的铜原子谱线强度较低。

对于一价铜离子(Cu II),在电弧电流较小时2~4 kA,呈现阴极区谱线强度升高,弧柱区谱线强度基本保持不变,阳极区谱线强度再次升高的特点。当电弧电流达到5 kA以上,从阴极区向阳极区呈现不断上升的趋势。这可能与电流的增大,弧柱区电子能量增强导致的电离过程加剧有关。铜离子在靠近两极区也出现了较高的峰值,这与两极处较高的铜原子密度与两极附近鞘层区内存在较高的场强有关。实验中测得的铜原子(Cu I)与一价铜离子(Cu II)谱线强度的径向分布规律如图4所示,图5中为真空电弧的高速图像(上方为阴极,下方为阳极)与计算得到的弧柱直径,光谱测量区域与弧柱直径的测量区域如图5中白线所示,选取测量区域为触头开距中心。

根据谱线强度的径向分布可知,在工频条件下,电流幅值为4 kA时,铜原子的谱线强度呈现类平顶波的特点,在弧柱中心区域梯度变化不明显且铜原子的谱线范围略大于同时刻的铜离子谱线范围与弧柱直径。根据图5中的真空电弧图像可知,在燃弧2 ms时刻弧柱区覆盖了整个触头直径范围,因此测得的铜原子谱线分布的对称性较

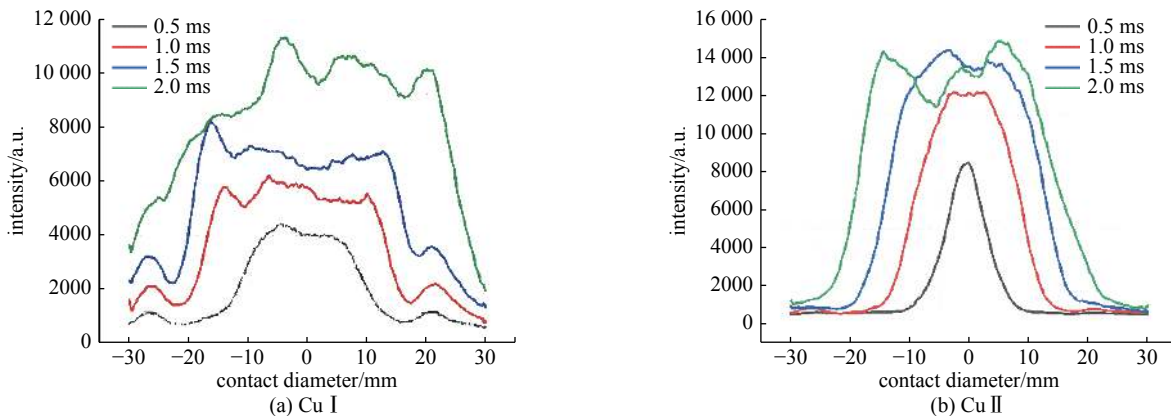


Fig. 4 Radial distributions of spectral line intensity

图 4 谱线强度的径向分布

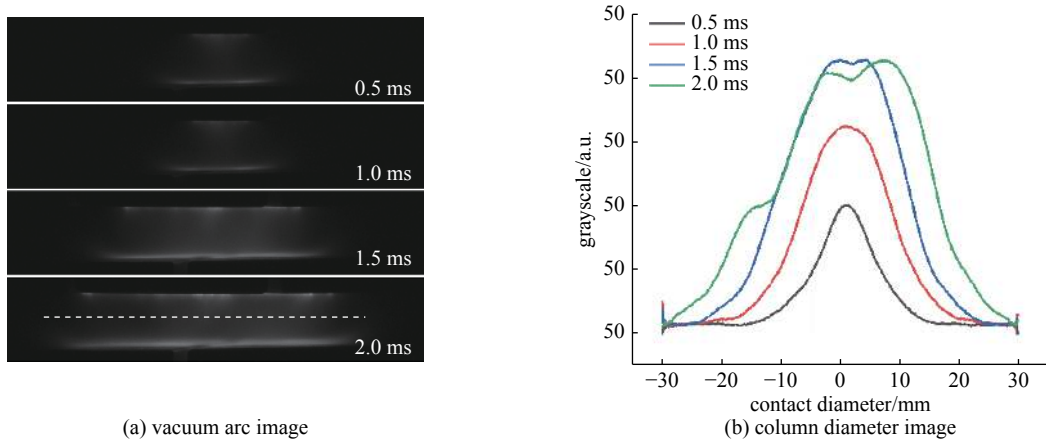


Fig. 5 Vacuum arc image and arc column diameter image

图 5 真空电弧图像与弧柱直径图

差,但一价铜离子谱线的强度分布展现出了较好的对称性,弧柱中心区域的梯度变化更加明显,主要强度集中在半径 20 mm 范围内。铜离子的分布范围小于铜原子的分布范围,这主要有两点原因:(1)铜离子是由铜原子电离产生的,电离过程中需要高能电子与铜原子碰撞。以上两个条件说明了铜离子会在铜原子的扩散范围内产生,因此会造成铜离子的分布范围小于铜原子;(2)由于实验触头为杯状纵磁触头,燃弧过程中会产生纵向磁场,在外部纵磁的作用下,铜离子的径向运动会受到磁场的约束。但是铜原子的径向运动却不会受到约束,这也会造成铜离子分布范围小于铜原子。

3.2 电子温度与电子密度的轴向分布

利用搭建的发射光谱诊断平台,对不同电流幅值条件下的真空电弧轴向发射光谱进行测量,测量区域为触头中心轴线,结合式(1)~(3)对真空电弧的轴向电子温度和密度进行计算,实验中选取的电流幅值为 2~6 kA,得到的电流峰值时刻电子温度和电子密度的结果如图 6 所示。由于在靠近阴极区和阳极区的鞘层内部,存在极高的电场强度,属于非电中性区,鞘层内部的电场分布、粒子碰撞、阴极斑点处的发射是一个复杂的过程,因此难以用沙哈-玻耳兹曼方程结合谱线强度对等离子体参数进行计算,在实际处理中只对弧柱区的电子参数进行计算。

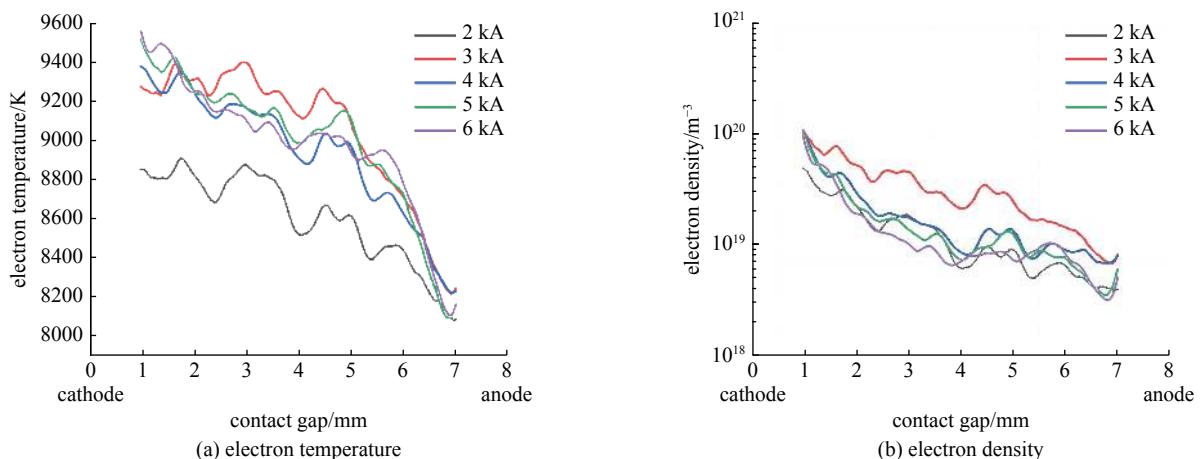


Fig. 6 Axial distribution of electron temperature and electron density

图 6 电子温度与电子密度的轴向分布

根据实验结果可知,在弧柱区电子温度和电子密度变化缓慢且从阴极向阳极呈现下降趋势,这与弧柱区的物理特性有关。真空电弧的弧柱区属于电中性区域,以电子和离子为主,不像阴阳两极附近存在极高的场强,弧柱区内的电压降很低,因此电子在弧柱区的加速效应不明显。另外弧柱区内电子与金属原子的碰撞、与离子的复合以及电子向外部空间的扩散都会导致电子运动速度的降低,进而导致电子温度的降低。此外,由图 6(a)中可知,随着电弧电流的增大,靠近阴极区的电子温度最大值升高,这说明电流的增大会导致阴极鞘层电压的升高,进而导致电子在鞘层区的加速过程显著,造成电子温度的升高。

4 结 论

本文利用发射光谱法对真空电弧的燃弧过程进行了诊断,得到了不同电流幅值条件下的电子温度与电子密度的轴向分布,电子温度与电子密度从阴极向阳极逐渐下降。关于 Cu I 与 Cu II 谱线强度的轴向分布测量, Cu I 谱线强度主要集中在阴极区和阳极区、Cu II 谱线强度由阴极向阳极逐渐增加。Cu I 谱线强度呈现类平顶波的特点,且谱线范围略大于弧柱直径; Cu II 谱线强度呈现类高斯分布的特点,且谱线范围略小于弧柱直径,铜离子与铜原子扩散速度存在差异。

参考文献:

- [1] 王章启, 邹积岩, 何俊佳, 等. 电力开关技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. (Wang Zhangqi, Zou Jiyan, He Junjia et al. Power switch technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2003.)
- [2] 李建基. 真空断路器技术的进步[J]. 电器工业, 2001(7): 14-15. (Li Jianji. Advances in vacuum circuit breaker technology[J]. Electrical Industry, 2001(7): 14-15)
- [3] 董攀, 龙继东, 陈德彪, 等. 强流激光离子源中的等离子体参数诊断[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 055103. (Dong Pan, Long Jidong, Chen Debiao, et al. Diagnosis of plasma in high current laser ion source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 055103)
- [4] Khakpour A, Franke S, Methling R, et al. Optical and electrical investigation of transition from anode spot type 1 to anode spot type 2[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2126-2134.
- [5] Methling R, Gorchakov S, Lisnyak M V, et al. Spectroscopic investigation of a Cu—Cr vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(8): 2303-2309.
- [6] Lisnyak M, Pipa A V, Gorchakov S, et al. Overview spectra and axial distribution of spectral line intensities in a high-current vacuum arc with CuCr electrodes[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118: 123304.
- [7] Khakpour A, Methling R, Franke S, et al. Vapor density and electron density determination during high-current anode phenomena in vacuum arcs[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124: 243301.
- [8] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 开距对不同状态下真空电弧特性影响的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 154-160. (Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. Simulation analysis of influence of electrode separations on vacuum arcs characteristics under different states[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 154-160)
- [9] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 电弧电流以及纵向磁场对小电流真空电弧特性影响的数值仿真[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 54-61. (Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. Numerical simulation of effect of arc current and axial magnetic field on low current vacuum arc characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 54-61)
- [10] Wang Haoran, Wang Zhenxing, Liu Jiankun, et al. Optical absorption spectroscopy of metallic (Cr) vapor in a vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 51: 035203.
- [11] Gortschakow S, Popov S, Khakpour A, et al. Cu and Cr density determination during high-current discharge modes in vacuum arcs[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Greifswald: IEEE, 2018: 181-184.
- [12] Khakpour A, Popov S, Franke S, et al. Determination of Cr density after current zero in a high-current vacuum arc considering anode plume[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2108-2114.
- [13] 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.
- [14] Liu Jiankun, Li Yi, Geng Yingsan, et al. Two dimensional distribution of metallic (Cu) vapor in a forced vacuum arc extinction by LIF[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Greifswald: IEEE, 2018: 403-406.
- [15] Liu Jiankun, Zha Zirui, Wang Zhenxing, et al. Two dimensional distribution diagnostic of copper vapor in a vacuum arc by laser-induced fluorescence[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu: IEEE, 2019: 144-147.
- [16] Lins G. Measurement of the neutral copper vapor density around current zero of a 500-A vacuum arc using laser-induced fluorescence[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1985, 13(6): 577-581.
- [17] Wang Haoran, Liu Ziyuan, Liu Jiankun, et al. Investigation of vacuum arc extinction process by planar laser-induced fluorescence[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Greifswald: IEEE, 2018: 313-316.
- [18] Lins G. Collisional transfer and neutral copper vapour density during a diffuse vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1990, 23: 784.
- [19] 赵文华, 唐皇哉, 沈岩, 等. 谱线强度法所测得温度的物理意义[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(11): 2145-2149. (Zhao Wenhua, Tang Huangzai, Shen Yan, et al. Physical meaning of temperature measured by spectral line intensity method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(11): 2145-2149)
- [20] Griem H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [21] 陈新坤. 原子发射光谱分析原理[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1991. (Chen Xinkun. Principles of atomic emission spectroscopy[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1991.)
- [22] Khakpour A, Franke S, Gortschakow S, et al. Investigation of anode plume in vacuum arcs using different optical diagnostic methods[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 3488-3495.