

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.018

发射光谱法诊断空气电弧的稳态电子密度分布

刘广义¹, 曹 蕤¹, 卢 阳², 姚斯立¹, 高 文¹, 孙 昊², 宇文博¹

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学电气学院, 西安 710049)

摘要: 空气电弧是一种常见的等离子体,对其稳态阶段的微观参数进行研究,对准确把握等离子体内部的反应机制有重要意义。发射光谱法是一种成熟的诊断等离子体电子密度的技术,具有非接触式测量、瞬态探测、灵敏度高、响应速度快、仪器简单等优点。文中以 H_{α} 656.28 nm 谱线做特征谱线,以石墨为电极材料在250 A、200 V的条件下对空气电弧进行发射光谱的测量,对实验获得的发射光谱作阿贝尔反变换和佛克脱线型拟合,反卷积得到斯塔克展宽,最终获得空气电弧电子数密度的径向分布。同时利用汤姆逊散射法测量相同参数条件下空气电弧的电子数密度以验证发射光谱法测量结果的正确性,经验证两种方法的测量结果具有良好的一致性。该实验为空气电弧等离子体电子数密度的测量提供了参考思路和方法。

关键词: 气体电弧; 发射光谱法; 汤姆逊散射; 稳态; 等离子体

Diagnosis of Steady State Electron Density Distribution in Air Arc by Emission Spectroscopy

LIU Guangyi¹, CAO Rui¹, LU Yang², YAO Sili¹, GAO Wen¹, SUN Hao², YU Wenbo¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The air arc is a common plasma, and the study of its microscopic parameters in the steady state stage is of great significance for accurately grasping the reaction mechanism inside the plasma. Emission spectroscopy is a mature technique for diagnosing plasma electron density, which has such advantages as non-contact measurement, transient detection, high sensitivity, fast response, and simple instrumentation. In this paper, the H_{α} 656.28 nm spectral line is used as the characteristic spectral line, and graphite is used as the electrode material to measure the emission spectrum of the air arc under the conditions of 250 A and 200 V. Abelian inverse transformation and Voigt off-line fitting are performed on the emission spectrum obtained from the experiment, Stark broadening is obtained by deconvolution, and finally the radial distribution of the air arc electron number density is obtained. At the same time, the Thomson scattering method is used to measure the electron number density of the air arc under the same parameter conditions to verify the correctness of the emission spectrometry measurement results. It is verified that the measurement results of the two methods have good consistency. This experiment provides a reference idea and method for the measurement of air arc plasma electron number density.

Key words: gas arc; emission spectroscopy; Thomson scattering; steady state; plasma

0 引言

直流电力系统因其具有远距离输电效率高、可控性好^[1]等优点成为输送可再生能源^[2]的未来趋势^[3-4]。直流断路器是最主要的直流保护隔离措施^[5],可实

现精准的故障隔离并提高整体的选择性。直流故障电流缺乏自然过零点,其产生的电弧难以熄灭^[6]。同时空气间隙是电力系统的主要绝缘方式,雷击和过电压将导致间隙放电产生空气电弧^[7-9]。深入探究直流空气电弧由稳态逐渐熄灭过程,对准确把握其物

收稿日期:2023-10-02; 修回日期:2023-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52077170)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52077170).

理原理有重要意义,也为断路器的研制和线路绝缘等领域提供了指导。电弧等离子体的微观现象已成为当前的研究焦点^[10-11]。

大量重粒子内部的电子获得能量,跃迁到激发态,甚至脱离原子核束缚,变为自由电子,形成了气体电弧。各类粒子存在复杂的相互作用,辐射的电磁波波段横跨硬X射线到微波波段。电子密度是表征等离子体的一个主要参数,可以通过等离子诊断技术得到。电子密度是气体电弧的电导率的决定性因素。

等离子体光学诊断主要有可见光快速照相、发射光谱法、激光阴影/纹影成像、激光干涉、汤姆逊散射等方法^[12]。

其中,发射光谱法是一种被动光谱法,属于弦积分测量,无空间分辨率,需要反演,但由于仅需光谱收集回路,无需各类探头,仪器相对简单,可实现时间和空间分辨,实现非介入式的测量,具有高灵敏度的优点^[13-16]。电子从自由态到自由态辐射产生连续韧致辐射,自由态到束缚态产生连续复合谱线,电子处于束缚态的高能级向低能级跃迁时发射线状谱。发射光谱法研究对象为线状谱。SOUSA M R等人对不同的电流峰值电平的脉冲电弧,从10 kA到100 kA,利用氮氧离子线确定电弧的电子温度和电子密度随时间变化的径向分布^[17]。ERSHOV-PAVLOV E A等人使用单脉冲和双脉冲激发模式对等离子体的发射光谱的金属元素进行了分析^[18]。VALENSI F等人通过发射光谱研究了金属惰性气体焊接过程中的等离子柱^[19]。CAO Shiquan通过发射光谱研究了激光产生的铝等离子体的电子温度和电子密度衰减曲线^[20]。然而光学发射光谱法依赖于特定的等离子体理论模型,诊断结果的可靠性需通过其他诊断方法进行校验。

汤姆逊散射来自于激光在等离子体中传播时,电子或离子作受迫振动而发出次级辐射而形成的散射波。汤姆逊散射法具有高时空分辨能力,无需满足热力学平衡状态,可直接导出电子密度^[21-24]。该方法需要向中性束注入高能的中性粒子,与电弧等离子体中的粒子发生反应,辐射特定波长的谱线。辐射谱线发射的区域均集中在中性束注入区域,属于局域分辨测量。

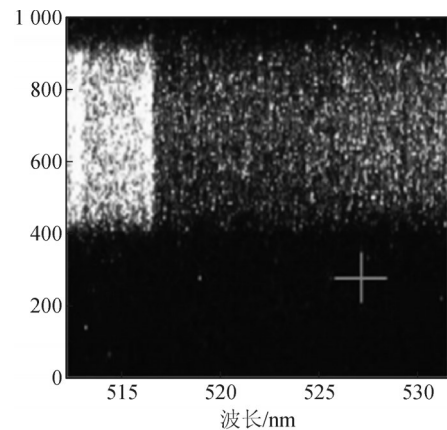
文中针对用石墨作电弧电极材料时生成等离子光谱实验数据,针对 H_{α} 656.28 nm谱线,分别采用斯塔克展宽方法和532 nm作激光探针的汤姆逊法对等离子体的电子密度数量级进行了定量诊断,对两种方法进行了比较,并检验了结果的有效性。通过测量等离子体的电子密度,可加深对等离子体内部的反应机制的理解,为空气电弧准确诊断提供了验

证思路和有力手段。

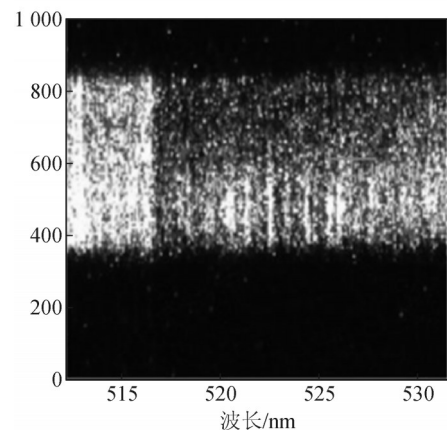
1 发射光谱法原理及实验平台

受激电子在从高能级向低能级跃迁时,以光的形式向外释放能量,由于构成气体的粒子类型固定,原子中不同能级轨道上电子能量固定,故跃迁的差值固定,其产生的能量差值具有标记原子特征的作用。辐射出的能量产生固定波长的光谱,在已知等离子所处的气体环境时,可以通过光谱在特定波段的谱线强度来关联电离程度,进而反应电子密度。

由于触头材料的不同,会在燃弧时产生不同元素的发射光谱,这些谱线出现的位置不同强度也不同,故在选择触头材料时需要避开532 nm附近会出现强发射谱线的材料。石墨触头和含铁元素的钨触头的发射谱线对比见图1。由图1可知,石墨触头的发射光谱明显弱于含铁的钨触头的发射光谱。同时,石墨电极具有易成型、易加工、可降低成本的优点,在本实验中石墨电极触头处可被轻松打磨至锥形和较为光滑的平面,形成针板放电。



(a) 石墨触头发射光谱



(b) 含铁的钨触头发射光谱

图1 两种触头材料的发射光谱对比图

Fig. 1 Comparison of emission spectra of two contact materials

电弧发生回路由直流电流源、固态继电器、起旁路作用的IGBT、圆柱型燃弧机构组成,见图2。实验使用的供电电流为250 A。在圆柱型燃弧机构中使用石墨电极,在空气中产生气体电弧。阴极为直径为3 mm、长30 mm的棒状电极,两端打磨成平面,露出夹具部分长20 mm,在触发后以1.1 m/s的速度拉弧,弧柱长为15.5 mm。阳极为直径3 mm、长25 mm的棒状电极,与阴极接触面打磨成45°圆锥状,以形成针板放电。喷口内径8 mm,用于限制电弧形态,侧边开有观察窗。电弧光通过碰口观察窗和圆柱形燃弧机构侧边石英玻璃窗,进入光谱收集回路。

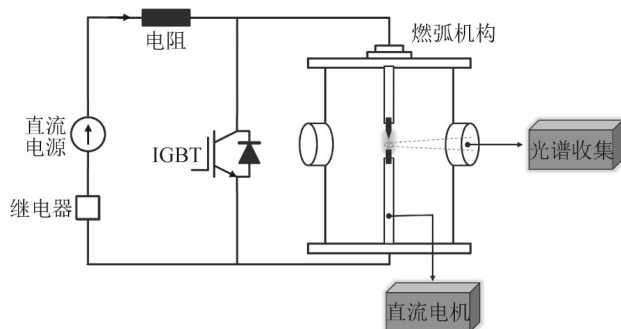


图2 空气电弧燃弧电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of air arc ignition circuit

时序上,直线电机机械延时约为18 ms,先于IGBT动作前15 ms给电机控制器发信号,电机运动到开距需要50 ms(最小为30 ms),运动到规定位置后稳定燃弧30 ms。总燃弧时间约85 ms。曝光时刻为熄弧前5 ms。

发射光谱的收集系统要求能够对等离子体进行良好的聚焦。电弧光通过凸透镜(L_1 、 L_2)、平面镜(M_1 、 M_2)后翻转90°,进入光谱仪(Andor 500i)的狭缝,分光后由ICCD(Andor DH334T-18U-E3 ICCD)拍摄记录,由数字延时/脉冲发生器(Stanford, DG535)控制时序。 L_1 、 L_2 的焦距均为300 mm。为了使弧光的进入, M_1 、 M_2 使得等离子图像空间旋转并对齐狭缝。等离子体光信号的路径图见图3。

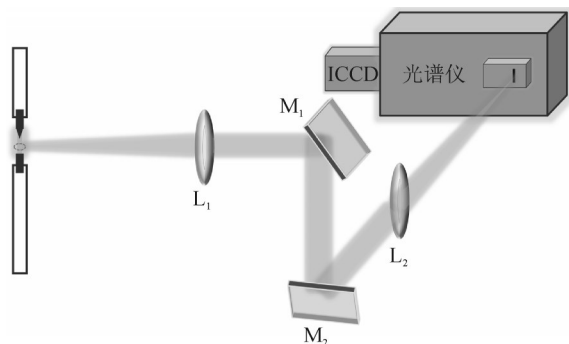


图3 发射光谱法测电弧电子密度实验光路

Fig. 3 Experimental light path for measuring arc electron density by emission spectrometry

本实验中,光谱仪狭缝宽度为150 μm ,ICCD门宽为500 μs ,光栅线数为1 200 lines/mm,增益 $g=3\ 000$ 。光谱仪在multi-track模式下,track条数为128,光谱图在空间上均匀分割成128份,每一空间位置由1 024个像素点表出其波长,每一固定波长处发射强度由8个像素点表出。空间分辨率约为11 mm/128=85 μm ,再分别乘以光路放大系数。

空气电弧成像部分光路示意图见图4,为使得进入光谱仪狭缝的光信号尽可能的多,本实验加入平面镜 M_1 、 M_2 ,将喷口长方形的观察窗中的光信号从与ICCD狭缝的垂直状态,使其旋转90°与狭缝重叠,实现了从仅相交面积处的点测量模式变为重合的线测量模式,光信息得到充分扩充。

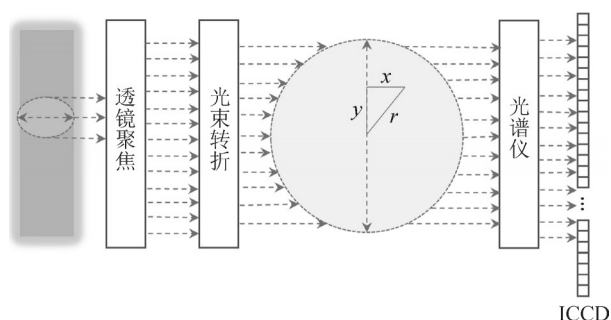


图4 空气电弧成像部分光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optical path of the air arc imaging part

2 汤姆逊散射法原理及实验平台

汤姆逊散射法需要加入激光发射装置,激光照射等离子体后,气体电弧将吸收、反射、散射激光,收集分析散射信号可以得到等离子体内部的电子密度信息。用激光作探针,其侵入程度可忽略不计。

汤姆逊散射产生于入射的低能光子同低能自由电子的弹性碰撞。为标定汤姆逊散射信号的绝对辐射强度,首先需要测量瑞利散射的强度,以得到实验室空气中的重粒子的数密度。汤姆逊散射的特征参数相干因子(Salpeter数) $\alpha=1/(k\lambda_D)$,其中 k 是由热射激光波数矢量确定的微分波数矢量的绝对值, $\lambda_D=[(\epsilon_0 k_B T_e)/(n_e e^2)]^{1/2}$ 为德拜半径。在电子密度较高或电子温度较低的情况下,德拜半径减小,相干因子变大。气体电弧的 α 介于0.5和2之间,汤姆逊散射处于集体状态。汤姆逊散射光谱中包含离子项和电子项。离子项特征峰的线宽较窄(<0.1 nm),电子项相对较宽(>1 nm),本研究忽略汤姆逊的离子特征部分。

激光汤姆逊散射法可实现在局域高空间分辨率和高时间分辨率要求下,精确测量电子密度^[23]。

汤姆逊散射的碰撞界面与待测等离子体组成成分无关,其通用性比发射光谱法更好。汤姆逊散射法测电弧电子密度实验光路见图5,脉冲Nd:YAG激光器(Nimma-900)发射出脉冲宽度为7 ns、波长为532 nm、能量为70 mJ的探针激光。汤姆逊散射法与发射光谱法的收集光路部分相同,为拍摄到有效信息,减少杂散信息的干扰,ICCD的曝光时间同脉冲持续时间相同,为7 ns。

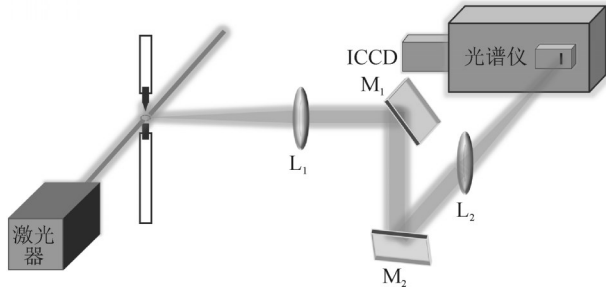


图5 汤姆逊散射法测电弧电子密度实验光路

Fig. 5 Light path of arc electron density measuring experiment by Thomson scattering method

3 实验光谱数据及其处理

光谱仪的数据经过转换后,其实质为 $1\ 024 \times 128$ 的矩阵表,即沿波长单位有1 024个值,沿空间位置有128个点。分析中心波长 H_{α} 656.28 nm谱线附近5 nm范围内的光强。原始实验数据实际上是沿狭缝方向上弦积分光强,对其进行阿贝尔反变换。变换后所得散点图为佛克脱线型,对其进行拟合。测仪器展宽后,由拟合所得佛克脱线型函数反卷积得到斯塔克展宽,最后通过斯塔克展宽得到等离子体电子密度的径向分布。本实验选取 H_{α} 656.28 nm的谱线作为分析对象。主要原因有3点:一是该谱线中,656.28 nm波长的谱线强度最为显著;二是该谱线的斯塔克展宽与电子密度的关系明确;三是仅需在实验过程中向喷口喷洒适量水雾就能用ICCD捕获到氢原子的谱线,对比于用其他原子用来做斯塔克展宽分析,方便易得。

由ICCD拍摄捕捉到的等离子体光信号实际是空气电弧在沿光路方向的积分值,需对其进行阿贝尔反变换,得到发射光源沿径向的分布函数。即对于光学薄且轴对称的电弧,需对其辐射强度积分值 $I(y)$,作基于快速傅里叶变换算法的阿贝尔反变换,得到沿径向分布的发射强度 $f(r)$ 的值。变换函数为^[25]

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(y)}{dy} \cdot \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (1)$$

谱线辐射积分强度值 $I(y)$ 与沿径向分布的发射强度 $f(r)$ 关系见图4。

实验中,采集到的谱线并非理论的在某一波长处的竖线,而是具有一定形状和宽度的线型。实测得到的线型为佛克脱轮廓。佛克脱分布的谱线是高斯线型和洛伦兹线型卷积的结果,使用阿贝尔反演后的数据重建 H_{α} 656.28 nm的谱线。

洛伦兹线型由自然展宽、范德瓦尔斯展宽、共振展宽、斯塔克展宽等^[26-28]组成。自然展宽量级为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ nm,超出了绝大多数实验室光学器件的分辨极限,可忽略不计。范德瓦尔斯展宽是发射粒子与不同种类原子的碰撞,共振展宽来源于发射粒子与同种原子的碰撞^[12]。等离子中的斯塔克展宽是由发射粒子同带电粒子相互碰撞而产生,导致谱线变宽和峰值波长的偏移^[29]。由准静态微场理论,斯塔克展宽仅与等离子体的电子密度有关,无需满足局部热力学平衡。通常电子碰撞贡献远远大于粒子碰撞,电子碰撞是引起氢原子的斯塔克谱线加宽的主要因素,具有一级斯塔克效应,忽略范德瓦尔斯展宽和共振展宽,因而测量出谱线轮廓的半高全宽可以推导出电子密度。

高斯线型包括仪器展宽和多普勒展宽。仪器展宽来源于光谱测量系统的固有分辨率限制,本实验中已用校准汞灯确定仪器展宽,即使用光源正对光谱仪狭缝,观察目标谱线是否过曝,若过曝则降低曝光时间。重复测量3次取平均值,得到仪器展宽,测得 $\Delta\lambda_{in} = 0.26$ nm。由辐射粒子的无规则热运动,光子的移动存在与观察者平行的速度分量,实际观测到的波长会有一定偏移,将带来多普勒展宽,在扣除塞曼效应后,其计算式为

$$\Delta\lambda_{Doppler} = \sqrt{\frac{8kT_e \ln 2}{m_e c^2}} \lambda_0 \quad (2)$$

式(2)中, k 为玻尔兹曼常数。高斯展宽 $\Delta\lambda_G$,仪器展宽 $\Delta\lambda_{in}$,多普勒展宽 $\Delta\lambda_{Doppler}$ 的关系式有

$$\Delta\lambda_G = \sqrt{\Delta\lambda_{in}^2 + \Delta\lambda_{Doppler}^2} \quad (3)$$

多普勒展宽引起的谱线展宽会比由仪器展宽和斯塔克展宽引起的谱线展宽小一个数量级,此处不考虑多普勒展宽。

在实际数据处理中,在原始数据中选择中心波长附近波长范围的数据。待测为 H_{α} 656.28 nm为第 k 列,选取 $(k-200) \sim (k+200)$ 范围内作阿贝尔逆变换。对逆变换后的每一空间位置对应的各列波长数据分别做佛克脱线型拟合。计算拟合后的佛克脱线型的半高全宽 $\Delta\lambda_v$,已知高斯展宽 $\Delta\lambda_G$ 近似为仪器展宽。

本实验中仅考虑了斯塔克展宽(近似洛伦兹分布)

和仪器展宽(近似高斯分布)。由反卷积公式可得^[30]

$$\Delta\lambda_V = c_1\Delta\lambda_L + \sqrt{c_2\Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2} \quad (4)$$

式(4)中: $c_1=0.5346$; $c_2=0.2169$; $\Delta\lambda_V$ 是佛克脱分布的半峰全宽; $\Delta\lambda_G$ 是高斯分布的半峰全宽; $\Delta\lambda_L$ 是洛伦兹分布的半峰全宽。

由斯塔克展宽获得电子数密度,由于温度对 H_α 656.28 nm 谱线展宽的影响微弱,忽略温度的影响,电子密度计算式为^[31-33]

$$n_e = 10^{23} \left(\frac{\Delta\lambda_L}{1.098} \right)^{1.47135} \quad (5)$$

式(5)中:电子密度单位为 m^{-3} ; $\Delta\lambda_L$ 单位为 nm。

4 实验结果与讨论

利用发射光谱法测得的原始数据见图6(纵坐标为空间位置)。

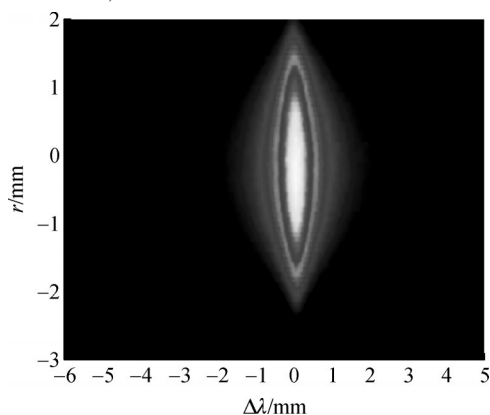


图6 ICCD拍摄到的发射光谱

Fig. 6 Emission spectrum captured by ICCD

经过处理后,计算出空气电弧径向电子密度结果见图7。

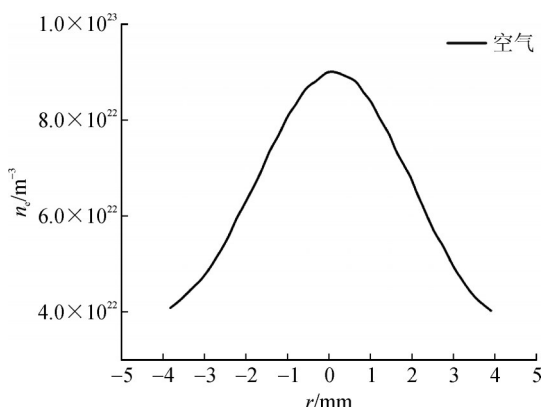


图7 发射光谱法测空气电弧电子密度径向分布曲线

Fig. 7 Measuring radial distribution curve of air arc electron density by emission spectrometry

由发射光谱法给出的诊断结果,弧心区域电子密度约为 $0.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$,电子密度随径向距离的增大而减小,在弧柱边缘处,电子密度约为 $4.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 。

利用 532 nm 激光作探针,采集汤姆逊散射信号见图8(纵坐标为径向位置)。

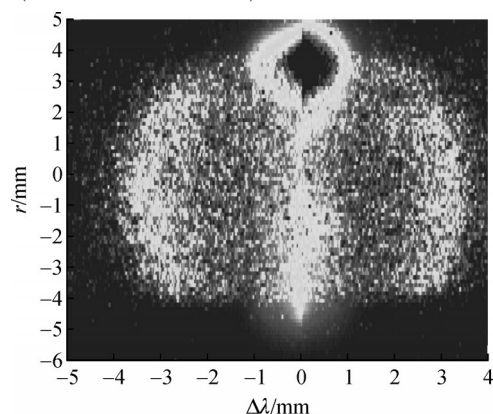


图8 ICCD拍摄到的汤姆逊散射光谱

Fig. 8 Thomson scattering spectrum captured by ICCD

汤姆逊散射法原始数据处理后,测得的等离子体电子密度见图9。

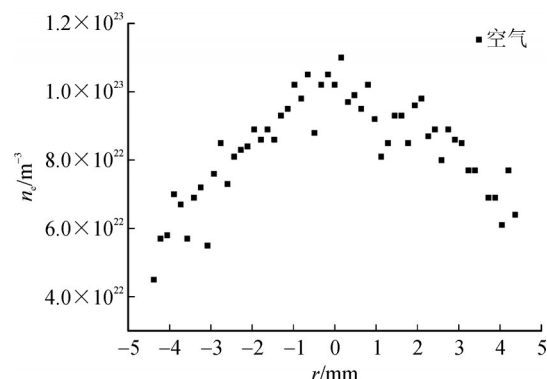


图9 汤姆逊散射法测空气电弧电子密度径向分布曲线

Fig. 9 Measuring radial distribution curve of air arc electron density by Thomson scattering method

由汤姆逊散射法直接给出的散点图诊断结果,弧心区域电子密度集中在 $1.05 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$,电子密度随径向距离的增大而减小,在弧柱边缘处,电子密度约为 $5.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 。

两种方法结果对比可知:空气电弧等离子体内部电子密度分布随径向分布趋势相似。从电子密度的数量级上来看,两种方法测得结果范围重叠度高,集中在 $5.0 \times 10^{22} \sim 9.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 内。汤姆逊散射法测出的散点图较好地验证了发射光谱法结果的正确性。

5 结语

利用发射光谱法测量直流电路中碳电极拉弧形成的空气电弧稳态燃弧时的电子密度,经 ICCD 拍摄后,利用阿贝尔逆变换和斯塔克展宽法处理测得数据,计算后得出,该实验环境下,250 A 的空气电弧的弧心电子密度数量等级在 $0.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 附

近。为验证结果准确性,利用532 nm激光,对相同实验环境中的气体电弧进行探测,根据汤姆逊散射法测得弧心电子密度数量等级在 $1.05 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 附近,可验证发射光谱法结果的正确性。

致谢

特别感谢中国西电集团重大研发项目“气体电弧特性测试的关键技术研究及试验平台建设”对本实验提供的项目资助(项目编号:XD2021KJ001)。

参考文献:

- [1] 汤广福,罗 湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):8-17.
- [2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999 - 5008.
- [3] 温家良,吴 锐,彭 畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):7-12.
- [4] 郭贤珊,周 杨,梅 念,等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术,2018,42(11):3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3698-3707.
- [5] 余占清,曾 嵘,屈 鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术,2020,46(8):2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8):2617-2626.
- [6] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术,2019,45(8):2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2353-2361.
- [7] 陈维江,曾 嵘,贺恒鑫. 长空气间隙放电研究进展[J]. 高电压技术,2013,39(6):1281-1295.
CHEN Weijiang, ZENG Rong, HE Hengxin. Research progress of long air gap discharges[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1281-1295.
- [8] 曾 嵘,庄池杰,余占清,等. 长空气间隙放电研究的挑战与进展[J]. 高电压技术,2014,40(10):2945-2955.
ZENG Rong, ZHUANG Chijie, YU Zhanqing, et al. Challenges and achievement in long air gap discharge research[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):2945-2955.
- [9] 王 羽,邓冶强,文习山,等. 基于长间隙放电试验适用于大尺寸输电线路的改进电气几何模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3654-3661.
WANG Yu, DENG Yeqiang, WEN Xishan, et al. An improved electric geometry model based on breakdown test of long air gaps and suited for large-sized transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3654-3661.
- [10] YANG F, MA R, WU Y, et al. Numerical study on arc plasma behavior during arc commutation process in direct current circuit breaker[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(2):167-171.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吴 蓉,李 燕,朱顺官,等. 等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(4):731-735.
WU Rong, LI Yan, ZHU Shunguan, et al. Emission spectroscopy diagnostics of plasma electron temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(4):731-735.
- [14] 冯红艳,吴 蓉,李 燕,等. 小尺寸等离子体电子密度原子发射光谱诊断[J]. 分析科学学报,2008,24(1):103-107.
FENG Hongyan, WU Rong, LI Yan, et al. Diagnoses of mini-plasma electron density by atomic emission spectroscopy [J]. Journal of Analytical Science, 2008, 24(1): 103-107.
- [15] HERSHKOWITZ N, BREUN R A. Diagnostics for plasma processing(etching plasmas)(invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1):880-885.
- [16] CHEN Jinbin, LU Yonghua, TAO Jun, et al. Investigation on propagation loss of Silver nanowire plasmonic waveguides[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2012, 29(2):252-256.
- [17] SOUSA M R, ZAEPFEL C, CHEMARTIN L, et al. Characterization of a high current pulsed arc using optical emission spectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Phys-

- ics, 2016, 49(41): 415205-1-415205-14.
- [18] ERSHOV-PAVLOV E A, KATSALAP K Y, STEPANOV K L, et al. Time-space distribution of laser-induced plasma parameters and its influence on emission spectra of the laser plumes[J]. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 2008, 63(10): 1024-1037.
- [19] VALENSI F, PELLERIN S, BOUTAGHANE A, et al. Plasma diagnostics in gas metal arc welding by optical emission spectroscopy[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(43): 10-23.
- [20] CAO Shiquan, SU Maogen, SUN Duixiong, et al. Spatial-resolved measurement and analysis of extreme-ultraviolet emission spectra from laser-produced Al plasmas[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(4): 10-13.
- [21] EVANS D E, KATZENSTEIN J. Laser light scattering in laboratory plasmas[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1969, 32(1): 207-271.
- [22] DZIERŻĘGA K, MENDYS A, PELLERIN S, et al. Thomson scattering from laser induced plasma in air[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2010, 227(1): 10-13.
- [23] TOMITA K, GOJIMA D, SHIMIZU T, et al. Thomson scattering diagnostics of SF₆ gas-blasted arcs confined by a nozzle under free-recovery conditions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(26): 265201-1-265201-14.
- [24] VAN DE SANDE M J, VEN DER MULLEN J J A M. Thomson scattering on a low-pressure, inductively-coupled gas discharge lamp[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(12): 1381-1391.
- [25] PRETZIER G. A new method for numerical Abel-inversion [J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1991, 46(7): 639-641.
- [26] 钟增达. 水中火花放电等离子体的电子密度光谱诊断[J]. *电气开关*, 2020, 58(3): 97-99.
ZHONG Zengda. Spectral diagnosis of plasma electron density generated by spark discharge in water[J]. *Electric Switcher*, 2020, 58(3): 97-99.
- [27] BRUGGEMAN P, SCHRAM D, GONZÁLEZ M Á, et al. Characterization of a direct DC-excited discharge in water by optical emission spectroscopy[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18(2): 025017-1-025017-10.
- [28] GRIEM H R. *Plasma spectroscopy*[Z]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [29] ARAGÓN C, AGUILERA J A. Characterization of laser induced plasmas by optical emission spectroscopy: A review of experiments and methods[J]. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 2008, 63(9): 893-916.
- [30] SUN H, ZHANG Y, LI L, et al. Measurement of electron density and temperature in an annular magnetically confined cold-cathode plasma of Helium by optical emission spectroscopy[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(1): 013511.
- [31] KONJEVIĆ N, IVKOVIĆ M, SAKAN N. Hydrogen balmer lines for low electron number density plasma diagnostics[J]. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 2012 (76): 16-26.
- [32] GIGOSOS M A, GONZÁLEZ M Á, CARDEÑOSO V. Computer simulated Balmer-alpha, -beta and -gamma stark line profiles for non-equilibrium plasmas diagnostics[J]. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, 58 (8): 1489-1504.
- [33] NIKIFOROV A Y, LEYS C, GONZALEZ M A, et al. Electron density measurement in atmospheric pressure plasma jets: Stark broadening of hydrogenated and non-hydrogenated lines[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, 24(3): 034001-1-034001-10.
- 刘广义(1983—), 男, 硕士, 主要从事气体电弧特性测试技术研究(E-mail: liuguangyi@xihari.com)。