

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.022

基于激光诱导等离子体的Mach-Zehnder干涉法测量气体介质恢复特性的研究

陈介夫¹, 孙昊¹, 李刚², 吴翊¹, 高文², 刘广义²

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

摘要: 在高压电器中,灭弧气体的应用十分广泛,气体的灭弧性能与其恢复特性息息相关。对于气体介质的灭弧性能测量,已有理论研究中的建模仿真方法以及一些直接或间接的测量电子密度的手段都存在较明显的缺点。为解决这一问题,文中通过Mach-Zehnder干涉法可以较为精确地测量出弧后各时间点的电子密度这一研究气体介质恢复特性的关键参数。同时考虑到断路器结构下新型气体介质测量成本高昂,文中设计了基于激光诱导等离子体的气体介质恢复特性测量实验。通过该实验,对SF₆、CO₂和N₂的电子密度衰减特性进行测量,其电子密度的衰减速率特征值为SF₆(1)>CO₂(0.77)>N₂(0.72),并与已有结论进行对比,验证了该方法的可行性。

关键词: 激光诱导等离子体; Mach-Zehnder干涉法; 电子密度; 气体介质恢复特性

Research on Gaseous Medium Recovery Characteristics Measurement by Mach-Zehnder Interferometry Based on Laser-induced Plasma

CHEN Jiefu¹, SUN Hao¹, LI Gang², WU Yi¹, GAO Wen², LIU Guangyi²

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

Abstract: Arc extinguishing gas is used widely in high voltage apparatus, and arc extinguishing performance of the gas is closely related to its recovery performance. As for the measurement of arc extinguishing performance of gas medium, there are obvious shortcomings in modeling and simulation methods and some direct or indirect methods for measuring electron density. For solving this problem, the use of Mach-Zehnder interferometry can accurately measure the electron density at each time point behind the arc, which is a key parameter for studying the recovery characteristics of gas medium. At the same time, considering the high cost of the new gas medium measurement under the circuit breaker structure, a laser induced plasma based gas medium recovery characteristics measurement experiment is designed in this paper. Through this experiment, the electron density attenuation characteristics of SF₆, CO₂ and N₂ are measured, the characteristic value of decay rate of electron density is SF₆(1)>CO₂(0.77)>N₂(0.72), and the feasibility of the proposed method is verified by comparing with the existing conclusion.

Key words: laser-induced plasma; Mach-Zehnder interferometry; electron density; recovery characteristics of gaseous medium

0 引言

气体的灭弧性能或者说开断能力与其恢复特

性息息相关,恢复特性包括热恢复和电恢复。对于环保型气体的灭弧性能实验测量,已有理论研究通常以气体稳态电弧为初始条件建立零后非平衡模

收稿日期:2024-06-25; 修回日期:2024-08-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403600);国家自然科学基金项目(U22B20121);国家自然科学基金委面上项目(52077170)。

Project Supported by National Key Research and Development Program Under Grant(2022YFB2403600), the National Natural Science Foundation of China(U22B20121), General Program National Natural Science Foundation of China(52077170).

型计算零后气体的热恢复特性,进而对热气体进行临界击穿计算获得电恢复特性。然而诸如仿真中描述辐射、湍流等物理过程的模型尚未完善等关键问题限制了该方法在环保型气体灭弧性能评估中的应用。

介质恢复的过程是零后热气体由电弧等离子体向绝缘体的变化过程,而电弧等离子体的电导率由电子密度和电子扩散系数主导,因此也可以通过测量气体等离子体电子密度的衰减特性对气体的介质恢复特性进行测量。

而针对电子密度这一关键参数的测量,传统的接触式测量方法无法应用于高温电弧组分的实验诊断。而诸如等离子体吸收光谱、发射光谱绝对强度法、发射光谱斯塔克展宽法等^[1-11]这类基于光谱分析技术的测量方法大多基于LTE假设,无法应用于包括弧后介质恢复阶段在内的非平衡态等离子体组分实验测量。激光散射法如汤姆逊散射及瑞利散射是等离子体组分实验测量的另一类常用方法。该方法测量精度高且不基于LTE假设,近年来被广泛应用于各类等离子体组分诊断研究^[12-13]。然而该方法光路复杂且对实验环境及平台精度要求极高,同时无法对重复性较差的待测对象实现时间及空间分辨,此外高能激光对被测等离子体的影响降低了测量精度,因此该方法在弧后介质动态恢复过程实验诊断领域的应用并不广泛。目前,建立适用于非平衡态电弧等离子体组分的实验诊断研究已经成为电弧等离子体微观物理特性研究领域中的重点及难点问题。

Mach-Zehnder 干涉测量法不依赖于LTE假设,且激光探针能量较低对待测等离子体性质几乎没有影响,同时通过结合激光扩束及高速摄影等技术可以获得弧后不同时间和空间电子密度的分布。该方法被广泛应用于各类等离子体组分实验诊断^[14-16]。但目前这一方法尚未被应用于开关电弧等离子体尤其是弧后介质恢复阶段的等离子体电子密度的测量中。

同时考虑到新型气体在研发阶段通常价格昂贵,断路器结构下用气量大成本高且电子密度难以测量,对此文中拟采用激光诱导等离子体(LIP)的方式代替电弧等离子体测量气体的电子密度衰减特性,利用LIP重复性好、烧蚀量小的特点降低实验成本。

LIP的产生原理与电弧等离子有所不同,简单来说,就是功率激光通过凸透镜在焦点附近聚焦,当焦点附近的能量密度超过气体介质的击穿阈值时发生击穿,产生等离子体。但是对于等离子体熄

灭的过程,二者又有十分相似的地方。LIP在熄灭过程中,电子主要通过扩散和复合两个过程逐渐消散,这与电弧等离子体中气体的介质恢复过程相似。特别是在电子数密度这一参数上,二者具有较高的相似性。

1 Mach-Zehnder干涉法原理及实验平台

Mach-Zehnder 干涉法是一种非接触的等离子体诊断方法^[17-18],由探针光和参考光两束光构成,见图1。

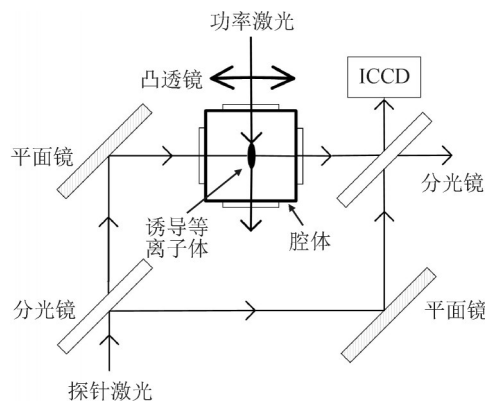
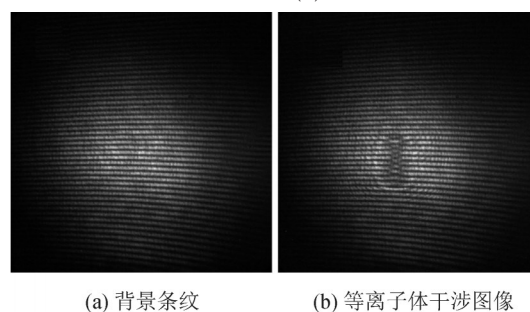


图1 双臂干涉法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometry

利用两束激光间由于光路搭建时的细微误差造成的固定的光程差和夹角,在两束光合光处将形成明暗相间的条纹,即背景条纹见图2(a)。

当探针光通过待测等离子体时,等离子体中的自由电子和重粒子分别与探针光相互作用,使得折射率发生变化引起光程 h 产生变化,表现为干涉条纹在对应处发生扭曲见图2(b)。



(a) 背景条纹

(b) 等离子体干涉图像

图2 干涉条纹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interference fringe

光程 h 产生的变化,其表达式为

$$\Delta h = \int dn = \int (n_{\text{plasma}} - n_0) dr \quad (1)$$

式(1)中: Δh 为光程差,可看做三维折射率的二维投影; n_{plasma} 为等离子折射率; n_0 为参考光路折射率,真空下为1,空气下为1.000 3。等离子体折射率 n_{plasma} 由电子折射率 n_e 和重粒子折射率 n_h 构成,其表达式为:

$$n_{\text{plasma}} = 1 + n_e + n_h = 1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} + \sum_i (A_i + \frac{B_i}{\lambda^2}) x_i \quad (2)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (3)$$

式(2)-(3)中:常数1为真空折射率; ω_p 为等离子体角频率; ω 和 λ 为探针光角频率和波长; A_i 和 B_i 为与重粒子*i*相关的实验测定常数; x_i 为粒子*i*的摩尔数; N_e 为电子数密度; e 为电子电荷; ϵ_0 为真空介电常数; m_e 为电子质量。式(2)中右侧第1项为电子折射率贡献项,可看出电子密度越大电子项产生的负值越大。当电子密度极高时折射率由电子项决定,此时有 $n_{\text{plasma}} = n_e = -\frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e c^2} \lambda^2 N_e$ 。式(2)右侧第2项为重粒子贡献项,该项为正与电子作用相反。当电子密度极低时,折射率由重粒子项决定,其表达式为

$$n_h = \sum_i (A_i + \frac{B_i}{\lambda^2}) x_i \approx \alpha_{\text{Glad}} \rho = \frac{2\pi N_A}{\sum_i x_i M_i} \sum_i \alpha_{\text{polar},i} x_i \rho = 2\pi \sum_i \alpha_{\text{polar},i} N_i \quad (4)$$

式(4)中: α_{Glad} 为 Gladstone-Dale 系数^[19]; ρ 为等离子体质量密度; N_A 为阿伏伽德罗常数; x_i 为粒子摩尔数; M_i 为粒子摩尔质量; $\alpha_{\text{polar},i}$ 为粒子极化率; N_i 为粒子数密度。从式(4)中可以看出重粒子项仅与粒子组分及其极化率有关。在获得等离子体的折射率分布及重粒子折射率项后,即可通过式(2)对电子密度的空间分布进行求解。

对于缺乏 A_i 和 B_i 数据的气体,在单色光下无法对其重粒子折射率进行计算。可采用双色法即同时采用波长不同的亮色光进行干涉实验,忽略不同波长探测光对 B_i 常数的影响,利用不同波长的探针光获得两个方程通过两式相减将重粒子项消除^[17]。该方法对实验光路搭建要求及高,要求两束不同频率的探针光在整个光路中完全重合且需要两套成像设备成本较高。对此提出了一种基于平衡态组分的单色光方法,解决了重粒子项难以计算的问题,该方法将在下文做详细描述。

在获得干涉图像后需提取条纹扭曲处的相位差,用于重建三维折射率。目前在提取相位差主要有基于空域,频域及混合的方法^[20]。由于空域的方法更适合用于直条纹,而本实验中等离子体区域的条纹扭曲重叠现象严重,本实验采用频域滤波的方法^[17]。频域相对于空域的方法,可以获得整张图片的相位信息,信息保存更完善。难点在于频域滤波窗口的构建。尤其是批量实验时需要自动构建滤波窗口,及相位的解缠^[21-26]。

2 基于LTE组分的重粒子折射率估算方法

对于缺乏 A_i 和 B_i 数据的气体,文中提出了基于LTE组分的重离子折射率的估算方法。该方法总的来说就是通过气体的LTE组分求解,获得重粒子与电子密度间的数值关系,进而利用电子密度对重粒子折射率进行拟合,从而实现式(2)的求解。关于计算气体的LTE组分的方法可参考文[27]。

在得到气体的平衡态组分后利用式(4)获得平衡态下重粒子折射率,再通过数值拟合的方法获得电子数密度对重粒子折射率的关系式,代入式(2),即可获得平衡态电子折射率方程为

$$n_{\text{plasma}} = 1 - \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e c^2} \lambda^2 N_e + p_1 \lg(N_e) + p_2 \quad (5)$$

式(5)中, p_1 和 p_2 为拟合系数。计算 α_{glad} 的另一个关键参数,粒子的极化率 α_{polar} 可以通过NIST数据库查询,对于NIST数据库中没有的数据如离子,通过式(6)计算获得^[27]。

$$\alpha = \lim_{F \rightarrow 0} \left(-\frac{\partial^2 E}{\partial F^2} \right) \quad (6)$$

离子极化率的计算使用二级微扰方法MP2,基组采用 aug-cc-pVTZ。

3 SF₆、CO₂和N₂的电子密度衰减特性测量

考虑到测试气体尚不易购买,而关于SF₆、CO₂和N₂的电弧实验及理论研究十分丰富^[28-33],因此选用这3种气体作为本节的研究对象。但由于相关电弧研究的实验或计算的断路器结构不尽相同,这里不展开讨论。总的来说气体弧后介质恢复速率应满足:SF₆>CO₂>N₂。

考虑到激光诱导等离子体与电弧等离子体存在电场、时间尺度等差异需要进一步通过实验对LIP等离子体评估气体介质等离子体的可行性进行验证。本节将通过3种样本气体LIP下的电子密度衰减测量对其介质恢复速率进行测量,并将测量结果与已有结论进行对比验证LIP实验评估的可行性。

首先对SF₆、N₂和CO₂的LIP电子分布的形态特征和电子衰减征进行测量。

为了控制不同气体的等离子体的输入能量相同,首先测量了SF₆、N₂和CO₂的一个大气压下透射率和能量输入情况。图1可以看出3种气体在激光器能量超过100 mJ后可以稳定击穿,稳定击穿后CO₂的能量吸收率最高,SF₆最低。在激光器能量超过150 mJ后3种气体的吸收能量与激光器输出能量存在比较好的线性关系。考虑到激光器的能量

上限和3种气体吸收能量的线性区间,选择150 mJ的吸收能量进行相关实验,对应SF₆条件下激光器出口能量212 mJ,CO₂条件下激光器出口能量190 mJ,N₂条件下激光器出口能量202 mJ。为方便实验激光器出口能量分布设置为210、190、200 mJ。对于其他已知或未知的气体,只需要通过测量激光器的输出能量以及产生LIP后剩余出射的激光能量即可得出在该种气体内产生LIP所吸收的激光能量。多次改变激光的输出能量即可得到一组数据,经过拟合即可得到任意气体下激光器输出能量和LIP吸收能量的关系,见图3。

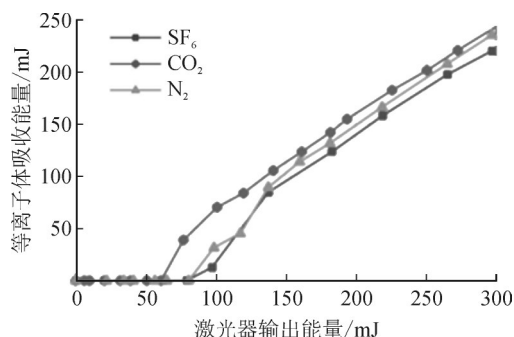


图3 SF₆、CO₂和N₂激光诱导等离子体能量输入测量结果

Fig. 3 Measurement results of laser-induced plasma energy input in SF₆, CO₂ and N₂

一个大气压下SF₆、CO₂和N₂3种气体在输入150 mJ下击穿后100 ns~10 μs的干涉条纹见图4。3种气体的相位信息见图5。图5中深色表示电子富集造成的负相位;白色表示重粒子,尤其分子富集造成的正相位;灰色为均值为零的背景相位。图5(a)为SF₆干涉测量结果,图5(b)为CO₂干涉测量结果,图5(c)为N₂干涉测量结果。通过图4中100 ns时3种的气体的干涉条纹结果可以看出SF₆气体中的等离子体最小,CO₂和N₂较为接近。对比图5中的相位信息可以看出3种气体在等离子体初始阶段核心区域电子富集呈负相位,3种气体中SF₆的等离子体电子富集区间最窄。在核心区域边缘有一层正相位区域,表示LIP产生的压力波。

1 μs时3种气体的等离子体条纹区间均有明显增加,其中SF₆的长度和宽度都明显小于CO₂和N₂。同时3种气体在等离子体功率激光入射方向出现扰动,其中CO₂的扰动最为明显。边缘处可以明显观测到多重的波纹。相位结果与条纹结果一致,从相位中可以看出CO₂的电子富集区域小于N₂。5 μs时从图4中可以看出3种气体的等离子体进一步扩大,但SF₆明显小于其他两种气体。此时CO₂中的等离子体条纹范围略大于N₂。SF₆气体相对于CO₂和N₂边界及内部出现较强的扰动。而CO₂和N₂

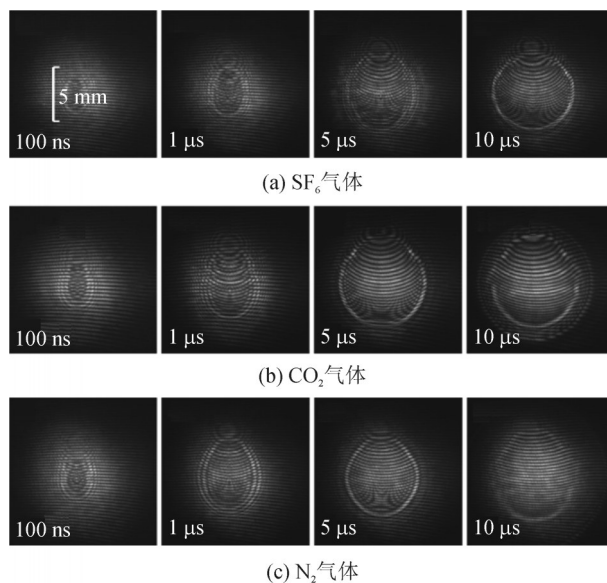


图4 常压下SF₆、CO₂和N₂等离子体干涉条纹

Fig. 4 Interference fringes of SF₆, CO₂ and N₂ plasma at atmospheric pressure

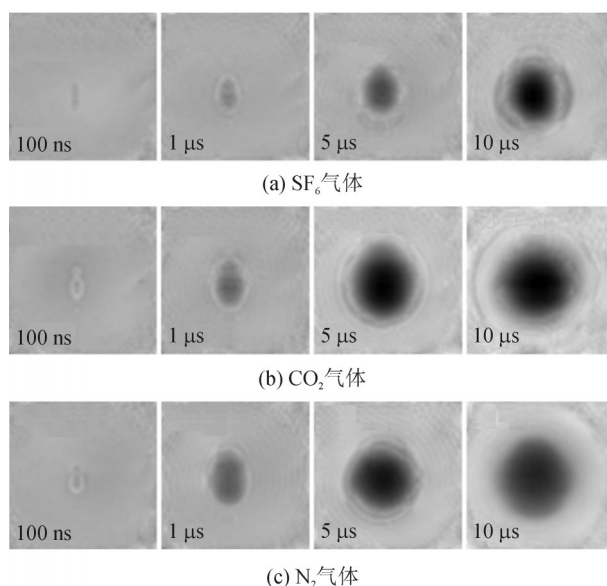


图5 常压下SF₆、CO₂和N₂气体的干涉相位

Fig. 5 Interference phases of SF₆, CO₂ and N₂ gas at atmospheric pressure

的等离子体区域条纹相对清晰。通过对比图5中的相位结果,可以看出此时SF₆的电子富集区域明显小于CO₂和N₂,边缘压力波相位出现明显扰动。CO₂的等离子体区域略大于N₂且边缘出现多层压力波。10 μs时,SF₆等离子体的边界条纹又变得明显,CO₂在边界的上半部分条纹则出现散乱,N₂的整体边界波纹出现散乱。表明CO₂和N₂的等离子体发展过程略滞后于SF₆。此时三者依旧保持SF₆体积最小,CO₂次之,N₂最大的特点。

总的来说从干涉条纹和相位来看SF₆的LIP始终明显小于CO₂和N₂且边界明显。LIP中SF₆等离子

体具有较小的形态特征与3种气体燃弧时SF₆具有较窄的电弧半径这一现象具有一致性。3种气体击穿后不同时刻的电子密度分布情况见图6。

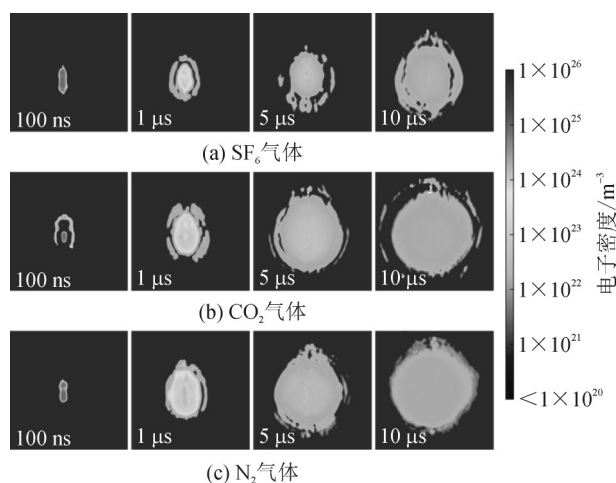


图6 SF₆、CO₂和N₂的电子密度对比

Fig. 6 Comparison of electron densities of SF₆, CO₂ and N₂

总的来说,就3种气体等离子体中的电子密度分布而言SF₆的电子密集区域更小,N₂的最大,与干涉条纹的观测结论一致。这里认为造成LIP形态大小差异的主要原因之一是SF₆具有更大的分子质量或者说等离子体密度。

进一步分析3种气体中等离子体电子衰减的差异,对3种气体的电子密度进行了统计分析。3种气体电子密度峰值随时间变化曲线见图7。从图7中可以看出在相同的等离子体吸收能量下,3种气体在初始阶段即击穿后50 ns时具有接近的电子密度峰值,均在 $7\sim 9\times 10^{24}\text{ m}^{-3}$ 的量级。其中SF₆的电子密度峰值略高于其他两种气体。在50 ns~1 μs阶段SF₆的峰值密度降低最快,CO₂与N₂基本相同。在1~10 μs内CO₂和N₂的衰减速度快过SF₆。10 μs时SF₆的峰值电子密度最大,CO₂电子峰值密度略高于N₂。从电子的峰值密度看,SF₆在1 μs内快速衰减,1 μs后衰减相对缓慢。

3种气体电子密度均值随时间变化曲线见图8。在击穿后50 ns时3种气体的均值在 $3\times 10^{23}\text{ m}^{-3}$ 的量级,远低于峰值电子密度,其中SF₆电子密度均值略低于其他两种气体。通过与电子密度峰值中SF₆具有较高峰值的现象对比,可以看出SF₆等离子体中电子密度存在更大梯度。在50 ns~1 μs阶段SF₆的均值密度降低最快,3种气体的电子密度均值的衰减情况与电子密度峰值基本相同。在1~10 μs 3种气体的电子密度均值均衰减较1 μs内的衰减速率放慢,其中SF₆的电子密度均值明显低于CO₂和N₂。与电子密度峰值明显不同的是10 μs时SF₆的电子密度均值明显低于其他两种气体,CO₂电子密度均值

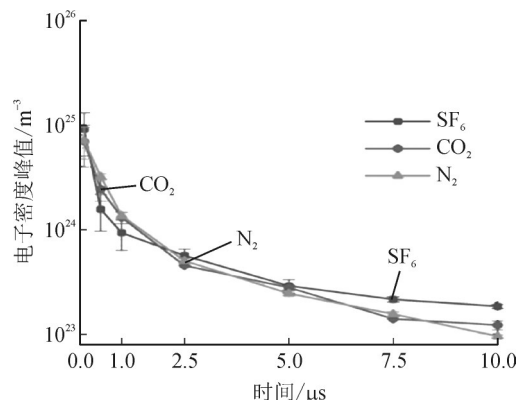


图7 SF₆、CO₂和N₂电子密度峰值随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of peak electron densities of SF₆, CO₂ and N₂ over time

略高于N₂。SF₆ LIP 电子密度峰值和均值的差异,说明其电子密度存在极大的梯度。对于电子密度的衰减,结合图4、6中等离子体和电子密度分布的特征,即SF₆体积最小,CO₂略小于N₂,可以得出SF₆气体的整体电子密度衰减速度最快,CO₂次之的结论,这与已有的介质恢复特性结论一致。

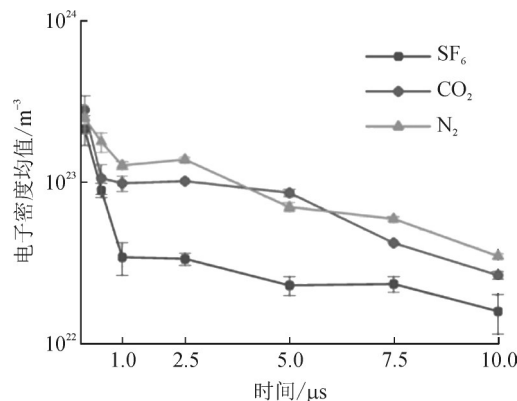


图8 SF₆、CO₂和N₂电子密度均值随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of the mean electron densities of SF₆, CO₂ and N₂ over time

总的来说,3种气体的LIP体现出SF₆体积最小,CO₂次之N₂最大的特点,与3种气体的电弧等离子体的半径规律一致。3种气体LIP中电子密度衰减速率的特征已有的介质恢复特性结论也完全吻合。说明LIP一定程度上可以对气体的电弧等离子体进行评估。

如前所述,气体介质恢复即热气体由导体向绝缘体转变的物理过程,这一过程可以通过气体的电导率进行描述,而气体的电导率与气体的电子密度正相关,因此可以假设气体的介质恢复强度与电子密度的衰减速率反相关,即气体的电子密度衰减越快,介质电阻率上升越快即介质恢复越快。

为了方便定量分析,文中采用指数函数: $N_e = a\Delta t_b$ 对气体的电子密度衰减特征进行评估,其中 a, b 均为拟合参数。气体的电子密度衰减速率可以通过

特征值 b 进行定量描述。

3种气体的电子密度衰减拟合曲线见图9。从图9中可以明显看出3种气体的电子密度衰减速率表现为: $\text{SF}_6 > \text{CO}_2 > \text{N}_2$ 。进一步将特征值 b 以 SF_6 为基准进行归一化,获得的相对值即可实现对气体介质的恢复性能进行定量评估: b 值越大表示电子密度衰减速率越快,则介质电阻率上升越快即介质恢复越快。3种气体的相对特征值结果见表1,表1中 br 表示 b 这一参量气体相对 SF_6 的特征值。通过对表中 br 值的定量对比可以得出3种气体的介质恢复速率满足: $\text{SF}_6 > \text{CO}_2 > \text{N}_2$ 与已有电弧实验测量结果^[34-36]一致,表明气体LIP电子密度衰减的特征值可以用于对气体的介质恢复速率进行定量评估。

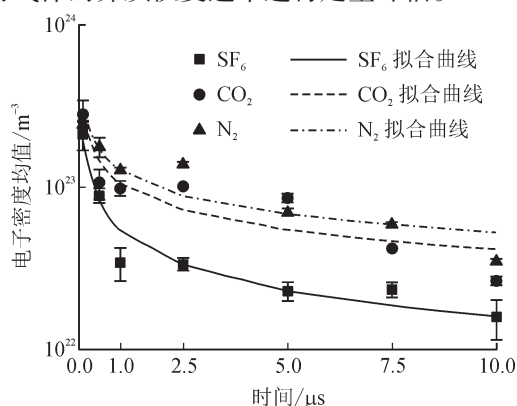


图9 SF_6 、 CO_2 和 N_2 电子密度均值衰减特性拟合结果

Fig. 9 Fitting results of the mean attenuation characteristics of SF_6 , CO_2 and N_2 electron densities

表1 基于LIP的气体介质恢复速率评估结果表

Table 1 Recovery rate evaluation results of gas media based on LIP

气体	br
SF_6	1.00
CO_2	0.77
N_2	0.70

4 结语

利用Mach-Zehnder干涉法对 SF_6 、 CO_2 和 N_2 在激光诱导等离子体下的电子密度衰减速率的特征值为: $\text{SF}_6(1) > \text{CO}_2(0.77) > \text{N}_2(0.72)$,样本气体间的定性关系与已有的介质恢复实验结论一致,证明了激光诱导等离子体与电弧等离子体存在相似性,激光诱导等离子体下的电子密度测量可以为气体介质的恢复性能评估提供数据支撑。

近年来研究较为热门的环保绝缘气体 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 、 $\text{C}_3\text{F}_{10}\text{O}$,由实验结果来看,诱导激光会在 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 中同时产生多个LIP,这使干涉条纹产生重叠无法得到理想的结果。后续会将Mach-Zehnder干涉法用于电弧等离子体中并对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 、 $\text{C}_3\text{F}_{10}\text{O}$ 等气体做进一步的研究。

致谢

感谢孙昊教授、吴翊教授等老师在实验中对我的悉心指导;同时也要感谢陈喆歆博士、王春林博士等师兄提供的帮助。此外还要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。

参考文献:

- [1] GRIEM H R, SCOTT F R. Plasma spectroscopy[J]. American Journal of Physics, 1961, 1(10): 864-865.
- [2] KUNZE H J. Plasma diagnostics[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 351-373.
- [3] GRIEM H R, BARR W L. Spectral line broadening by plasmas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 3(4): 227-227.
- [4] 海 涛,王其平. SF_6 灭弧室模型的电弧温度的测试[J]. 高压电器, 1991, 27(4): 3-8.
HAI Tao, WANG Qiping. Measurement of arc temperature in an SF_6 interrupter model[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27(4): 3-8.
- [5] AIREY D R, RICHARDS P H, SWIFT J D. Time-resolved radial temperature profiles for 10 kA SF_6 arcs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975, 8(16): 1982-1993.
- [6] JONES G R, HU W, ELKHOLY S M. A spectroscopic investigation of electrode material entrained into the extinguishing arc of SF_6 circuit breaker[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 21(9): 1414.
- [7] 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.
- [8] TUMA D T, CHEN C L, DAVIES D K. Erosion products from the cathode spot region of a copper vacuum arc[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 49(7): 3821-3831.
- [9] JENKINS J E, SHERMAN J C, WEBSTER R, et al. Measurement of the neutral vapour density decay following the extinction of a high-current vacuum arc between copper electrodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975, 8(8): 95147292.
- [10] HONG D, SANDOLACHE G, BAUCHIRE J M, et al. A new optical technique for investigations of low-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 976-981.
- [11] HORVATH B, LAMARA T. Time-resolved optical resonant absorption spectroscopy of Cr metallic vapor in air using a broadband LED light source[J]. Plasma Sources Science Technology, 2013, 22(4): 447-450.
- [12] TOMITA K, GOJIMA D, NAGAI K, et al. Thomson scattering diagnostics of decay processes of Ar/SF_6 gas-blast arcs confined by a nozzle[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2013, 46(38): 382001.
- [13] SNYDER S C, LASSAHN G D, REYNOLDS L D. Direct evidence of departure from local thermodynamic equilibrium

- in a free-burning arc-discharge plasma[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics*, 1993, 48(5):4124.
- [14] ZOU Xiaobing, WANG Xinxin, HAN Malin, et al. Experimental study of implosion plasma physical characteristics in a small puff-gas Z-pinch[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2006, 808(1): 181-184.
- [15] ZOU Xiaobing, WANG Xinxin, LUO Chengmu, et al. measuring the evolution of electron density profile in a small gas-puff Z-pinch[J]. *IEEJ Transactions on Fundamentals & Materials*, 2010, 124(6):515-518.
- [16] 刘 振, 邹晓兵, 王新新, 等. 用马赫—贞德干涉仪测量喷气式 Z 箍缩等离子体密度[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(1): 129-132.
- LIU Zhen, ZOU Xiaobing, WANG Xinxin, et al. Measuring the electron density of plasma in Z-pinch with a Mach-Zehnder interferometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(1): 129-132.
- [17] 陈喆歆. 气体开关电弧等离子体的双温物性参数分析及击穿模型研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- CHEN Zhixi. Analysis of dual-temperature thermophysical parameters and breakdown model of gas switch arc plasma [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [18] BREITLING D, SCHITTENHELM H, BERGER P, et al. Shadowgraphic and Interferometric investigations on Nd: YAG laser - induced vapor/plasma plumes for different processing wavelengths[J]. *Applied Physics A*, 1999, 69(1): 505-508.
- [19] KHARITONOV A I, KHOROSHO K S, SHKADOVA V P. Temperature dependence of air refraction at high temperatures[J]. *Fluid Dynamics*, 1974, 9(5):851-853.
- [20] 郑 峰, 张宏超, 陆 建, 等. 激光等离子体干涉条纹的图像处理研究方法[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(5):668-671.
- ZHENG Feng, ZHANG Hongchao, LU Jian, et al. Image processing of interference fringes of laser-induced-plasma [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 33(5):668-671.
- [21] TAKEDA M, INA H, KOBAYASHI S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computerbased topography and interferometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1982(72):156-160.
- [22] GONZALEZ R, WOODS R, EDDINS S. 数字图像处理 [M]. MATLAB 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- GONZALEZ R, WOODS R, EDDINS S. Digital image processing[M]. MATLAB ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2005.
- [23] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *Journal of the Optical Society of America A - optics Image Science and Vision*, 1994, 11(1):107-117.
- [24] GU J, HUNG Y Y, CHEN F. Iteration algorithm for computer-aided speckle interferometry[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(23):5308.
- [25] PRETZIER G, GER H, NEGER T, et al. Comparison of different methods of abel inversion using computer simulated and experimental side-on data[J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1992, 47(9):28845462.
- [26] KASIM M F, HOLLOWAY J, CEURVORST L, et al. Quantitative single shot and spatially resolved plasma wakefield diagnostics[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2015, 18(8):81302-81302.
- [27] 王伟宗, 荣命哲, 吴 翊, 等. 平衡态与非平衡态等离子体物性参数计算模型研究[J]. *高压电器*, 2010, 46(7):41-45.
- WANG Weizong, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Studies on properties calculation models of equilibrium and non-equilibrium plasma[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(7):41-45.
- [28] KNOBLOCH H. The comparison of arc-extinguishing capability of sulfur hexafluoride(SF₆) with alternative gases in high-voltage circuit-breakers[M]. Springer US: Gaseous Dielectrics VIII, 1998.
- [29] LI Xingwen, JIA Shenli, YOU Yimin, et al. Experimental study of the arc plasma characteristics in SF₆, N₂ and CO₂ [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2011, E94.C(9): 34388267.
- [30] MURAI K, NAKANO T, TANAKA Y, et al. The LTE simulation on decaying arc plasmas in various arc quenching gases in a model circuit breaker[C]//3rd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Busan, Korea (South): IEEE, 2015: 7368392.
- [31] LIU J, ZHANG Q, YAN J D, et al. Analysis of the characteristics of DC nozzle arcs in air and guidance for the search of SF₆ replacement gas[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(43):435201.
- [32] 郭煜敬, 张 豪, 张 权, 等. N₂、CO₂和SF₆喷嘴电弧电流开断能力的比较分析[J]. *高压电器*, 2016, 52(12):31-40.
- GUO Yujing, ZHANG Hao, ZHANG Quan, et al. Comparative study of the interruption capability of N₂, CO₂ and SF₆ nozzle arcs[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(12):31-40.
- [33] 阎敦敦, 张 权, 曹 昆. SF₆替代气体热开断能力与物性参数关系研究[J]. *高压电器*, 2016, 52(12):23-30.
- YAN Jiudun, ZHANG Quan, CAO Kun. Thermal interruption performance of SF₆ replacement gases and its dependence on material properties[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(12):23-30.
- [34] TAKI M, MAEKAWA D, ODAKA H, et al. Interruption capability of CF₃I gas as a substitution candidate for SF₆ gas [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2007, 14(2):341-346.
- [35] LEE A, FROST L S. Interruption capability of gases and gas mixtures in a puffer-type interrupter[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1980, 8(4):362-367.
- [36] 王尔智. 高压SF₆断路器介质恢复特性的数值模拟[J]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WANG Erzhi. Numerical simulation of dielectric recovery characteristics of high-voltage SF₆ circuit breakers[J]. Beijing: Science Press, 2012.

陈介夫(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事等离子体诊断等的研究工作(E-mail: cjf2016001601@163.com)。