第 52 卷 第 2 期：984-995　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 984-995
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250778

考虑吸收效应的真空电弧发射光谱碰撞辐射建模

曹　博，王振兴，潘世佳，苏鑫鹏，李　瑞，耿英三
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：发射光谱是诊断真空电弧关键物理参数的有效方法。然而，电弧等离子体对光的吸收效应会影响光谱的辐射强度，甚至引起光谱线型畸变。这些效应必然会干扰发射光谱的准确识别，进而影响基于发射光谱的参数诊断。为了解决这些问题，建立了真空电弧等离子体碰撞辐射模型，考虑了电子碰撞激发-退激发、电子碰撞电离-三粒子复合、辐射衰减以及辐射吸收过程，结合辐射输运方程合成了发射光谱，最后通过对实验光谱的拟合计算出真空电弧的关键物理参数。结果表明，考虑吸收效应之后，光谱发射系数和谱线展宽均会增加，其中 510.6 nm 的发射系数增量最大；另外，电子温度和电子数密度均有所增加，其中电子温度的平均增量为 0.05 eV，而电子数密度的平均增量为 7.06×10^{20} m^{-3}；最后，吸收效应会通过改变净辐射速率直接影响辐射对应能级的粒子密度，同时也能通过改变能量分布状态间接改变电弧的能级布居。

关键词：发射光谱；吸收效应；碰撞辐射模型；真空电弧；真空断路器

Collisional Radiative Modeling of Vacuum Arc Emission Spectroscopy Considering Absorption Effect

CAO Bo, WANG Zhenxing, PAN Shijia, SU Xinpeng, LI Rui, GENG Yingsan
(National Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Optical emission spectroscopy is an effective method for measuring key physical parameters in a vacuum arc. However, radiation absorption inside the arc plasma can significantly impact the spectral intensity and even distort the line shape. These effects hinder accurate spectral identification and consequently compromise parameter diagnostics based on optical emission spectroscopy. To address this issue, a collisional radiative model for vacuum arc was developed in this study. The model incorporated electron impact excitation/de-excitation, electron impact ionization/three-body recombination, spontaneous emission, and radiation absorption processes. The synthetic spectra were generated by coupling the model with the radiative transfer equation, and key plasma parameters were extracted by fitting the model to the experimental spectral data. The results indicate that, after taking into account the absorption effect, both spectral emission coefficient and spectral line broadening will increase, and the largest increment in the emission coefficient is found at 510.6 nm; furthermore, both electron temperature and electron density will increase, and the average increments in electron temperature and electron density are 0.05 eV and 7.06×10^{20} m^{-3}, respectively; finally, the absorption effect can directly affect the particle density at the energy levels corresponding to the radiation by changing the net radiation rate, and can also indirectly change the population distribution of the arc by changing the energy distribution state.

Key words: optical emission spectroscopy; absorption effect; collisional radiative model; vacuum arc; vacuum interrupter

0　引言

真空断路器具有体积小、重量轻、灭弧能力强、环境友好等特点，广泛应用于电力系统的中压领域[1-3]。随着其向高压领域的推广[4]，真空断路器的开断性能趋于极限，也对深入理解真空断路器内部的电弧演化过程提出了更高的要求。关键物理参数如电子温度[5]、电子数密度[6]和激发态密度[7]的时空分布信息，是揭示真空电弧动态演化过程及开断能力评估的重要依据。

发射光谱法(optical emission spectroscopy，OES)相对于其他诊断手段具有更直接和简易的特点，因而被广泛应用于电弧开断物理过程的研究中[8-9]。华中科技大学的袁召教授团队基于真空电弧的 OES 数据，研究了不同峰值电流下原子和离子的空间分布规律[10]，并且进一步计算了电子温度和电子数密度[11]。基于此，该团队利用光纤阵列扩展了发射光

基金资助项目：智能电网重大专项(2030)(2024ZD0802500)。
Project support by Smart Grid-national Science and Technology Major Project(2030)(2024ZD0802500).

谱的空间测量维度，实现了对真空电弧二维等离子体参数的测量[12]。四川大学的贾申利教授团队测量了直流真空电弧的发射光谱，并利用 OES 信息研究了 CuI 激发温度随电弧电流的演化过程[13]。大连理工大学的邹积岩教授团队基于发射光谱信息测量了真空电弧的电子温度[14]。在本课题组之前的工作中，利用发射光谱层析重建算法以及二线测温法计算了真空电弧的三维温度分布，并且利用基尔霍夫定律评估了吸收效应对温度测量的影响[15-16]。Bacon 等人测量了真空电弧阳极等离子体的发射光谱，并且根据 OES 信息计算了真空电弧的电子温度[17]。Boxman 等人根据 OES 信息测量了真空电弧铝等离子体的激发态密度以及电子温度[18]。Rosenthal 等测量了热阳极真空电弧的 OES 信息，研究了 CuI、CuII、CuIII 特征谱线以及电子温度的一维分布规律[19]。Khakpour 等人同样通过测量真空电弧的发射光谱，计算了电子温度[20]，另外利用 OES 数据计算了真空电弧的金属蒸气密度以及电子数密度[21]。Ejiri 等人根据 CuI 特征谱线强度比测量了真空电弧激发温度分布，并且研究了电极材料对真空电弧激发温度的影响[22]。

然而，现有的大多数工作都只利用几个能级之间的关系来计算真空电弧的电子温度、电子数密度以及激发态密度等关键物理参数，而忽略了电弧内部复杂的激发、电离以及辐射衰减机制。其中，激发和电离过程涉及电子与原子、离子之间的能量传递和能级跃迁，其机制受电子温度、粒子数密度以及粒子之间相互作用等多种因素的综合影响；而辐射衰减过程不仅与能级结构有关，还与等离子体密度、温度以及辐射传输特性密切相关。激发、电离以及辐射衰减等机制相互交织，共同影响了真空电弧的微观物理过程。因此，仅利用几个能级测量的参数分布难以对真空电弧的微观物理过程进行全面、深入的描述。

碰撞辐射模型(collisional radiative model，CRM)是研究电弧等离子体微观动力学机理-能级布居-光谱分布的常用仿真模型。此模型通过耦合特定的反应类型来计算电弧等离子体的能级布居，再结合辐射输运方程计算发射光谱，最后通过拟合仿真结果与实验光谱确定电弧等离子体的参数分布[23]。碰撞辐射模型广泛应用于气体放电[24-25]、推力器[26-27]以及激光诱导等离子体[28-29]的光谱分析以及参数诊断。基于碰撞辐射模型的研究揭示了电弧等离子体的电子温度、电子数密度的时空演化规律[30-32]，阐明了激发态原子的产生和损失机制[33-35]，并且探讨了电弧等离子体的吸收效应[36]。在真空电弧的发射光谱分析中，Boxman 和 Bacon 等人利用碰撞辐射模型研究了真空电弧的激发和电离机制[37-38]。Ejiri 等人利用碰撞辐射模型研究了真空电弧激发温度的弛豫过程[39-40]。

然而，在基于碰撞辐射模型的真空电弧发射光谱研究中，现有的工作都只关注了激发和电离过程，并没有充分考虑吸收效应。吸收效应会影响光谱的辐射强度，甚至引起光谱线型畸变。这些效应必然会干扰发射光谱的准确识别，进而影响基于发射光谱的参数诊断。因此有必要研究吸收效应对基于发射光谱测量的关键物理参数分布的影响。

在本文中，针对铜原子和一价铜离子开发了一个碰撞辐射模型，用于研究吸收效应对基于发射光谱测量的关键物理参数分布的影响。该模型综合考虑电子碰撞激发-退激发、电子碰撞电离-三粒子复合、自发辐射以及辐射吸收过程，结合辐射输运方程合成发射光谱，并通过拟合实验测量光谱实现真空电弧等离子体的参数诊断。研究结果不仅揭示了吸收效应对谱线强度和线型的影响，还进一步量化了吸收效应对电子温度和电子数密度空间分布的影响。

1　实验设置

实验装置如图 1 所示，由真空腔体、LC 电源、高压脉冲发生器和测量系统组成。真空腔体侧面安装了 2 个石英窗，用于观察真空电弧的光谱信息。在真空腔体内部安装了 1 对直径为 40 mm 的纵磁(axial magnetic field，AMF)电极，电极材料为铜，间隙被固定为 10 mm，电极结构如图 2 所示。电极通过腔体内部的导电杆与 LC 电源相连接形成主回

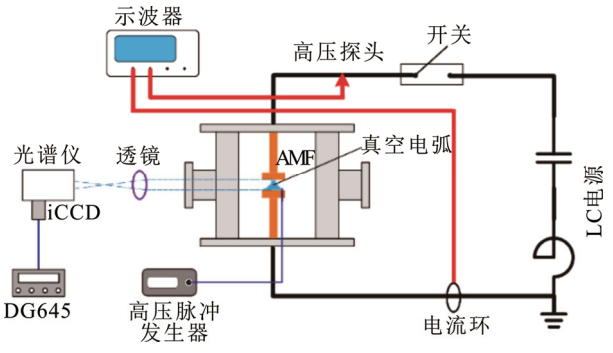


图 1　实验装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of the experimental setup

路，该回路可以产生频率为 45 Hz、峰值为 2~16 kA 的交流电。真空电弧通过外部触发方式产生，具体方法是在阴极表面通过陶瓷管安装触发极，触发极的另一端与高压脉冲发生器相连接。施加高压脉冲信号之后，电极间隙产生初始等离子体，在外电场的作用下，初始等离子体诱导电极间隙击穿，进而形成真空电弧。电弧电压和电流通过高压探头和电流环测量。

在燃弧阶段，真空电弧发出的光由 1 个焦距为 0.5 m 的透镜聚焦，并且通过 75 μm 的狭缝入射光谱仪。为了获得轴向光谱分布，狭缝被固定在电极间隙的轴线位置，如图 2 所示。之后，进入狭缝的电弧光被光谱仪(型号为 Andor Shamrock 500i)色散并且由具有光学增益功能的 Andor iStar 像增强型(iCCD)相机记录。考虑到真空电弧的动态演化过程，iCCD 的曝光时间设置为 50 μs。此外，为了获得更高的光谱分辨率，采用 2 400 mm^{-1} 的衍射光栅。在实验开始之前，利用低压汞灯对整个光谱系统进行了校准。

电弧电压与电弧电流的典型波形如图 3 所示，在电路导通之前，阴阳电极之间电压约为 180 V。在 t=0 ms 时刻施加高压脉冲触发信号，放电通道开始导通，电流从零开始增加。t≈5 ms 时，电流达到峰值，约为 2 kA。此后，电弧电流持续下降。在 t≈11 ms 时电弧熄灭，放电通道关断。另外，当放电通道形成之后，电极间隙的电压稳定在几十伏，这是电弧电压。而当放电通道关闭之后，电极电压迅速发生反向，并且最终维持在−150 V。

电极轴线位置的实验光谱图像如图 4 所示，记录时间为 t=5 ms，此时电弧电流为 2 kA。波长范围是 505~525 nm，轴向 0 mm 以及 10 mm 位置分别代表阴极表面以及阳极表面。图 4 中可以明显识别出激发态铜原子 CuI 和 1 价铜离子 CuII 的线辐射，同时靠近阳极区域的辐射强度最大，而间隙中心区域的辐射强度最小。

距离阴极表面 7 mm 处的光谱分布如图 5 所示，其中 CuII 的线辐射主要集中在 505~515 nm 波段，而 CuI 线辐射集中在 510~525 nm 波段。另外，CuI 辐射强度明显大于 CuII，因此只利用 CuI 的光谱数据拟合碰撞辐射模型。对应的，该模型中包含了铜原子的基态、激发态以及 1 价铜离子的基态能级。同时为了保证模型的简洁性，忽略了对 CuI 发射光谱影响较小的激发态能级。

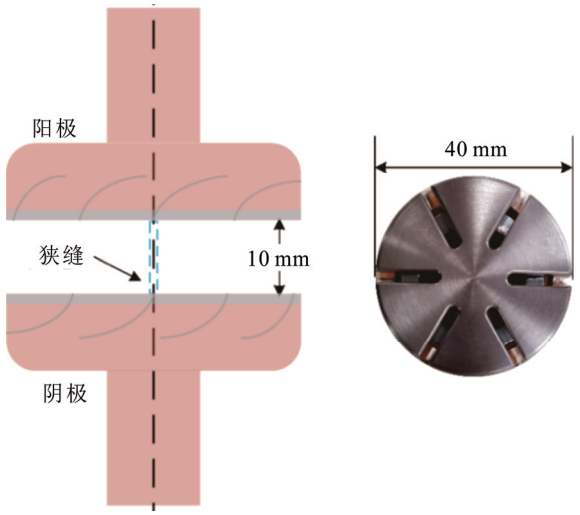


图 2 实验中使用的触头结构

Fig.2 Configuration of contact used in the experiments

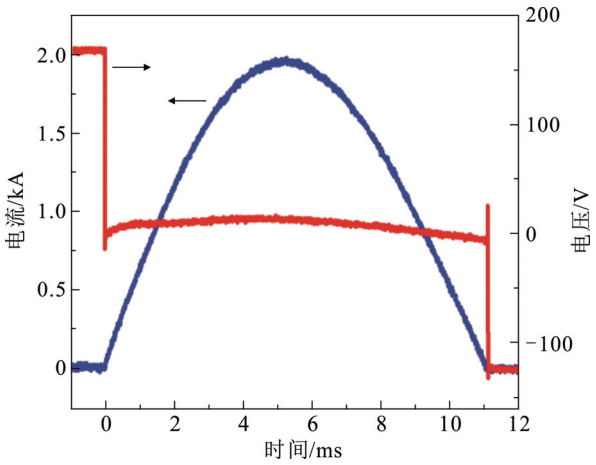


图 3 电弧电压与电流波形图

Fig.3 Waveforms of arc voltage and current

2 碰撞辐射模型

基于真空电弧发射光谱的实验结果，开发了包含铜原子基态、前 40 个激发态以及 1 价铜离子基态的碰撞辐射模型。该模型用于拟合 510.6、515.3、521.8 nm 以及 522.0 nm 特征谱线的光谱分布，同时获取电子温度、电子数密度以及能级布居等关键参数。

碰撞辐射模型包含能级布居计算模块、发射光谱合成模块以及实验数据拟合模块，计算流程如图 6 所示。首先在 0.2~2 eV 和 10^{17}~10^{23} m^{-3} 的参数范围内，分别等间隔选取 180 个电子温度和 200 个电子数密度，两两组合构建电子温度和电子数密度的参数组合(T_e, N_e)。其次基于模型包含的动力学过程，分别计算每一组(T_e, N_e)对应的速率系数，构建速率平衡方程并且求解能级布居；之后基于能级布居计

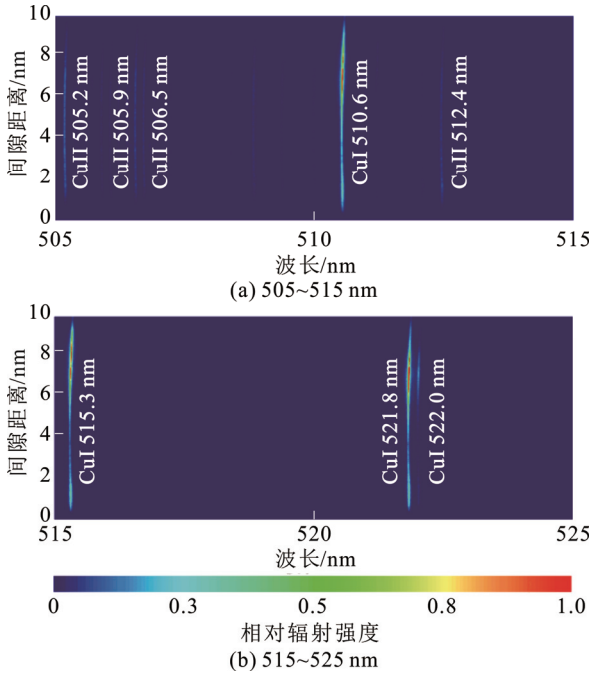


图 4　实验光谱图像

Fig.4　Images of the experimental spectra

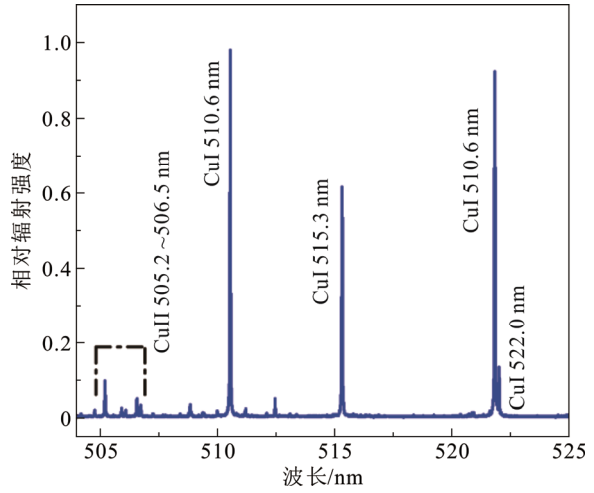


图 5　距离阴极表面 7 mm 处的实验测量光谱

Fig.5　Experimentally measured spectra at 7 mm from the cathode surface

算光谱发射系数和吸收系数，结合辐射输运方程获取仿真合成光谱；最后利用每一组(T_e，N_e)计算的仿真合成光谱拟合实验测量光谱，获取辐射强度的标准偏差参数，选取标准偏差参数的最小值，从而确定真空电弧等离子体的电子温度和电子数密度。

2.1　能级布居计算模块

本文基于准稳态假设[41]开发了零维碰撞辐射模型，模型中考虑了以下动力学过程。

1）电子碰撞激发-退激发过程：

$$\mathrm{Cu}+\mathrm{e}\leftrightarrow\mathrm{Cu}^{*}+\mathrm{e} \tag{1}$$

2）电子碰撞电离-三粒子复合过程：

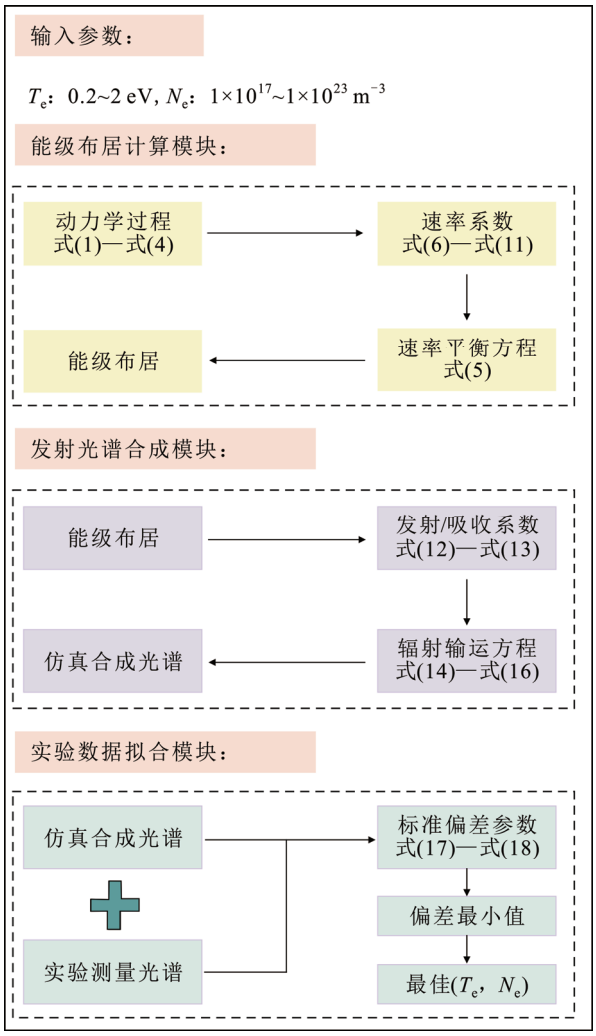


图 6　碰撞辐射模型计算流程

Fig.6　Calculation procedure of the collisional radiative model

$$\mathrm{Cu}+\mathrm{e}\leftrightarrow\mathrm{Cu}^{+}+\mathrm{e}+\mathrm{e} \tag{2}$$

3）自发辐射过程：

$$\mathrm{Cu}^{*}\rightarrow\mathrm{Cu}+h\nu \tag{3}$$

4）吸收过程：

$$\mathrm{Cu}+h\nu\rightarrow\mathrm{Cu}^{*} \tag{4}$$

式中：e 代表电子；Cu、Cu^+、Cu^*分别代表铜原子、1 价铜离子、激发态铜原子；$h\nu$ 代表自发辐射释放光子的能量。

输入电子温度 T_e、电子数密度 N_e，计算上述动力学过程的速率系数，构建并求解速率平衡方程即可获取真空电弧等离子体的能级布居，即：

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1,i\neq j}^{N}k_{ij}(T_e)N_iN_e+\sum_{i=1,i>j}^{N}\eta_{ij}A_{ij}N_i+\\&N_eN_+N_ek_{+j}(T_e)-\sum_{i=1,i\neq j}^{N}k_{ji}(T_e)N_jN_e-\\&\sum_{i=1,i<j}^{N}\eta_{ij}A_{ji}N_j-N_eN_jk_{j+}(T_e)=0\end{aligned} \tag{5}$$

式中：N_i、N_j、N_+分别代表 i、j 能级的粒子密度以及 1 价铜离子的基态能级密度；A_{ij}、η_{ij} 分别是爱因斯坦系数和逃逸因子；k 代表电子碰撞过程的速率系数(下标用来表示跃迁过程包含的能级，其中下标“ij”和“ji”代表电子碰撞激发-退激发过程，“$j+$”和“$+j$”代表电子碰撞电离-三粒子复合过程)。对于电子碰撞激发过程，其速率系数 k_{ij} 的计算式为：

$$k_{ij}=\int_{E_{ij}}^{\infty}\sigma_{ij}(E)v(E)f(E,T_{\mathrm{e}})\mathrm{d}E \tag{6}$$

式中：$f(E,T_{\mathrm{e}})$为电子能量分布函数，通常假设为 Maxwell 分布；$v(E)$代表电子速度；E 为电子能量；$\sigma_{ij}(E)$表示电子碰撞激发截面，其数据来自文献[42]。

对于电子碰撞退激发过程，其碰撞截面根据细致平衡原理计算[23]，表示为：

$$\sigma_{ji}(E)=\frac{g_i}{g_j}\frac{E+E_{ij}}{E}\sigma_{ij}(E+E_{ij}) \tag{7}$$

式中：g_i、g_j 分别代表 i、j 能级的统计权重；E_{ij} 是 i、j 能级之间的能量差。

另外，利用 Saha 关系描述了铜原子和 1 价铜离子的粒子分布，表示为：

$$\frac{N_j}{g_j}=\frac{N_{\mathrm{e}}}{g_{\mathrm{e}}}\frac{N_+}{g_+}\left(\frac{h^2}{2\pi m_{\mathrm{e}}kT_{\mathrm{e}}}\right)^{3/2}\exp\left(\frac{E_{j+}}{kT_{\mathrm{e}}}\right) \tag{8}$$

式中：N_{e} 为电子数密度；g_{e}、g_+分别为电子、1 价铜离子的统计权重；E_{j+}为铜原子电离能量；h 为普朗克常数。

对于辐射过程，利用爱因斯坦系数 A_{ij} 以及逃逸因子 η_{ij} 计算其速率系数，其中逃逸因子用于定量描述吸收过程。对于圆柱形电弧等离子体，逃逸因子的计算式[43]为：

$$\eta_{ij}=\frac{1.92-1.3/(1+\tau^{6/5})}{(\tau+0.62)\left(\pi\ln(1.375+\tau)\right)^{1/2}} \tag{9}$$

式中：τ 为中心波长处的光学厚度，其计算式为：

$$\tau=CN_{\mathrm{d}}L\phi_0 \tag{10}$$

式中：N_{d} 为辐射低能级的粒子数密度；L 为等离子体尺寸；ϕ_0 为线型函数 $\phi(\lambda)$的中心值；C 为用于特定辐射跃迁的常数项，表示为：

$$C=\frac{\lambda_{ij}^2}{8\pi}\frac{g_i}{g_j}A_{ij} \tag{11}$$

式中：λ_{ij} 为谱线波长。

获得相关碰撞过程以及辐射过程的速率系数之后，求解式(5)即可获得真空电弧等离子体的能级布居。对于考虑吸收效应的真空电弧等离子体，碰撞辐射模型的算法流程如下所述。

第 1 步：在光学薄假设下，计算各反应的速率系数。

第 2 步：构建速率平衡方程。

第 3 步：求解方程组，获得能级布居，根据能级布居求解不透明度并计算逃逸因子。

第 4 步：利用逃逸因子修正辐射过程的速率系数，同时假设碰撞过程的速率系数不变。

第 5 步：返回第 2 步进行迭代求解，直至能级布居结果收敛。

2.2 发射光谱合成模块

为了合成真空电弧等离子体的发射光谱，利用能级布居计算了光谱发射系数和吸收系数[44]。其中，从高能级 i 到低能级 j 的光谱发射系数 ε_λ 计算式为：

$$\varepsilon_\lambda=\frac{1}{4\pi}\frac{hc}{\lambda_{ij}}N_iA_{ij}\phi(\lambda) \tag{12}$$

式中：$\phi(\lambda)$为光谱线型函数[44-45]。

相同跃迁的吸收系数计算式为：

$$\kappa_\lambda=N_j\left(1-\frac{N_ig_j}{N_jg_i}\right)\frac{\pi e^2}{mc}f_{ji}\phi(\lambda) \tag{13}$$

式中：f_{ji} 为辐射跃迁的振子强度；e 为电子电荷量。另外，统计权重、振子强度、爱因斯坦系数等数据均引用自 NIST 数据库[40]。

之后，利用辐射输运方程求解真空电弧等离子体的发射光谱 I_λ，计算式为：

$$I_\lambda=S_\lambda(1-\mathrm{e}^{-\tau_\lambda}) \tag{14}$$

式中：S_λ 为源函数；τ_λ 为光学厚度，其定义为：

$$S_\lambda=\varepsilon_\lambda/\kappa_\lambda \tag{15}$$

$$\tau_\lambda=\kappa_\lambda L \tag{16}$$

式中：L 为真空电弧等离子体的尺寸，设置为电极直径 40 mm。

2.3 实验数据拟合模块

在不同电子温度、电子数密度参数组合下，计算 510.6、515.3、521.8 nm 以及 522.0 nm 特征谱线的光谱分布，并与实验测量结果进行拟合，选取拟合误差最小的参数组合，即可获取真空电弧的电子温度和电子数密度。在进行数据拟合之前，首先要对光谱强度进行归一化，即：

$$\begin{cases} I_{f,\mathrm{OES}}^{\mathrm{normalized}} = \dfrac{I_{f,\mathrm{OES}}}{\sum_{f=1}^{4} I_{f,\mathrm{OES}}} \times 100\% \\ I_{f,\mathrm{CRM}}^{\mathrm{normalized}} = \dfrac{I_{f,\mathrm{CRM}}}{\sum_{f=1}^{4} I_{f,\mathrm{CRM}}} \times 100\% \end{cases} \tag{17}$$

式中：$I_{f,\mathrm{OES}}$为实验测量的光谱辐射强度；$I_{f,\mathrm{CRM}}$为仿真计算的光谱辐射强度；$I_{f,\mathrm{OES}}^{\mathrm{normalized}}$和$I_{f,\mathrm{CRM}}^{\mathrm{normalized}}$分别为归一化的实验测量光谱辐射强度以及仿真计算光谱辐射强度。

强度归一化之后，利用标准偏差参数δ定量描述仿真合成光谱与实验测量光谱的偏差，表示为：

$$\delta = \sum_{f=1}^{4} \left(I_{f,\mathrm{OES}}^{\mathrm{normalized}} - I_{f,\mathrm{CRM}}^{\mathrm{normalized}} \right)^2 \tag{18}$$

标准偏差参数δ的最小值对应着碰撞辐射模型计算结果与实验光谱的最佳匹配，此时的(T_e，N_e)参数组合即是真空电弧等离子体的电子温度和电子数密度。

3　计算结果

3.1　拟合结果

仿真合成光谱与实验测量光谱的拟合结果如图 7 所示，实验光谱记录自 2 kA 峰值时刻，探测点距离阴极表面 7 mm。从拟合结果来看，2 种条件下的计算结果均与实验光谱相匹配，但是也存在着一定的偏差。这是因为碰撞辐射模型的计算结果基于单点的发射光谱，该点的电子温度和电子数密度数值唯一确定。而实验光谱则来自电弧发射光沿狭缝空间的积分值，其积分路径中的电子温度和电子数密度的分布不均匀。因此，参数分布的不一致性必然导致计算结果与实验测量结果之间的偏差。

3.2　吸收效应对发射光谱的影响

本节研究了吸收效应对发射光谱的影响，在光学薄假设以及考虑吸收效应的前提下，利用碰撞辐射模型的计算结果拟合实验数据，获得仿真合成光谱，结果如图 8 所示。其中图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)、图 8(d)分别代表中心波长为 510.6、515.3、521.8 nm 以及 522.0 nm 的光谱分布。首先，考虑吸收效应之后，特征谱线的光谱发射系数ε_λ明显增加，这与吸收效应降低了电弧的净辐射速率以及改变电弧能量平衡有关；其次，吸收效应使得电弧内部的辐射衰减增强，这导致光谱辐射强度I_λ明显小于光谱发射系数ε_λ。同时，利用式(19)量化了吸收效应对不同特

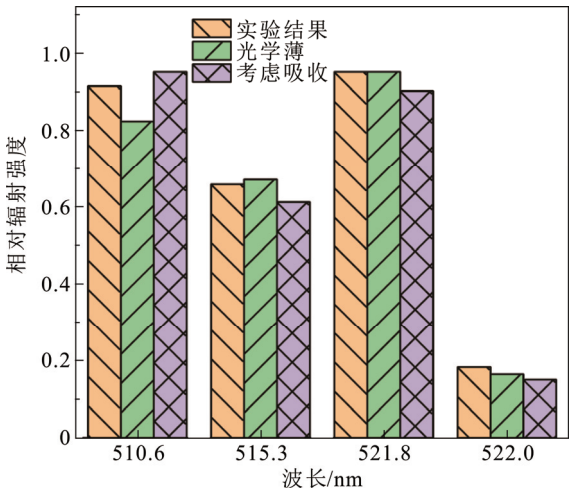


图 7　发射光谱拟合结果

Fig.7　Fitting results of optical emission spectroscopy

征谱线光谱发射系数ε_λ的增量，结果如表 1所示，其中510.6 nm 的光谱发射系数增量最大，而其他特征谱线的增量差异不明显。

$$\delta_1 = \frac{X_\tau - X_0}{X_\tau} \tag{19}$$

式中：δ_1为考虑吸收效应之后的光谱发射系数和半高宽的增量；X_0和X_τ分别为光学薄和考虑吸收效应之后的数据。

根据光谱分布提取谱线半高宽，结果如表 2 所示，其中半高宽的增量利用式(19)计算。考虑吸收效应之后，特征谱线半高宽略有增加，且增量受谱线波长的影响较小。然而，无论在光学薄假设还是考虑吸收效应的情况下，半高宽都远小于 1 nm。

3.3　吸收效应对电弧参数分布的影响

本节研究了吸收效应对电子温度和电子数密度空间分布的影响，实验电弧的峰值电流为 2 kA，实验光谱的记录时间为 t=5 ms。利用实验光谱拟合模块，计算了光谱仪狭缝对应不同空间位置的电子温度和电子数密度。

吸收效应对电子温度空间分布影响的结果如图 9 所示。2 种计算条件下，电子温度的参数范围是 0.9~1.2 eV。随着探测点远离阴极，电子温度空间分布呈现先减小后增加的特性，且靠近阳极位置的电子温度明显高于靠近阴极的位置。此外，考虑吸收效应之后电子温度有所增加，这是因为吸收效应减少了辐射衰减引起的能量损失。同时，在电极间隙内电子温度的平均增量为 0.05 eV，且电子温度增量受轴向位置的影响较小。

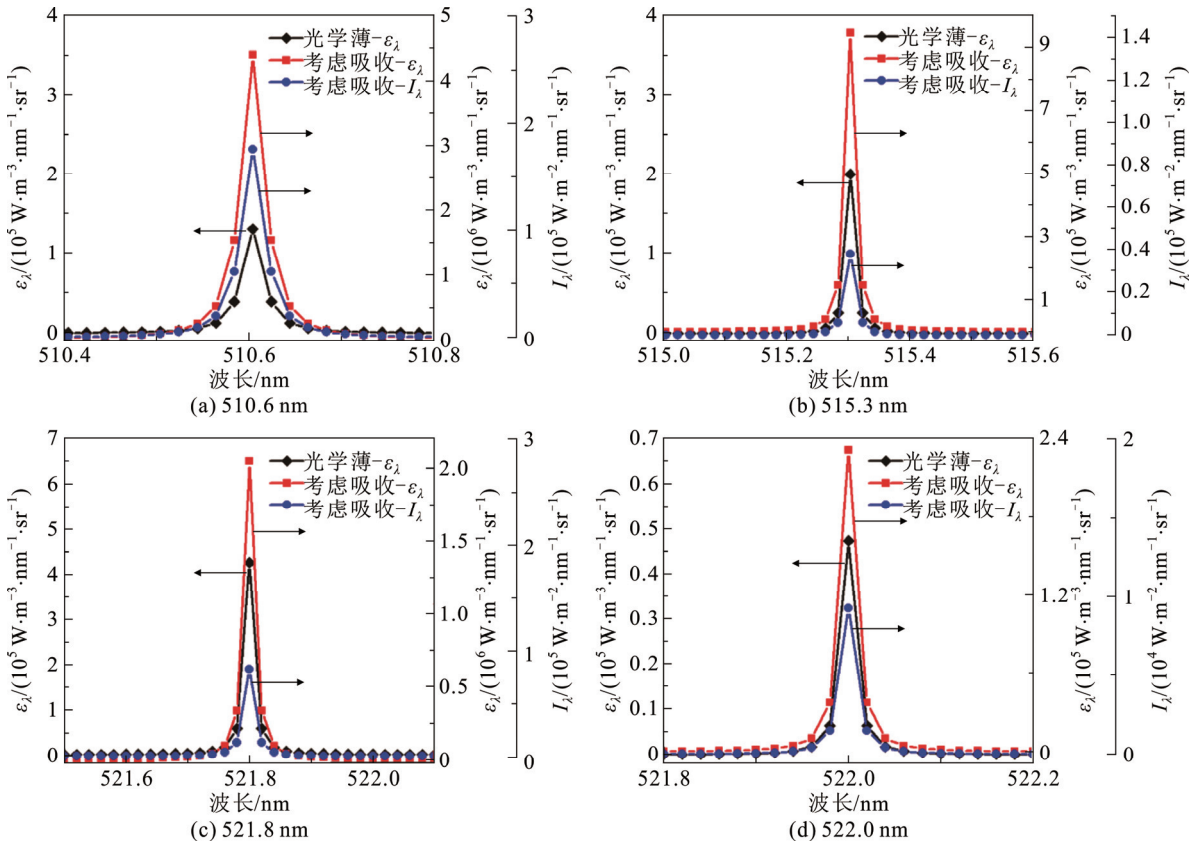


图 8 铜原子光谱分布

Fig.8 Spectral distribution of copper atoms

表 1 特征谱线的光谱发射系数及增量

Table 1 Spectral emission coefficients and increments of the characteristic spectral lines

波长/nm	光谱发射系数/(W·m^{-3}·nm^{-1}·sr^{-1})		
	光学薄	考虑吸收	增量
510.6	1.31×10^5	4.03×10^6	0.970
515.3	2.01×10^5	9.47×10^5	0.788
521.8	4.26×10^5	2.05×10^6	0.792
522.0	4.74×10^4	2.31×10^5	0.795

表 2 特征谱线半高宽

Table 2 Full width at half maximum of the characteristic spectral lines

波长/nm	半高宽/nm		
	光学薄	考虑吸收	增量
510.6	0.128 3	0.163 5	0.215 3
515.3	0.078 8	0.098 7	0.201 6
521.8	0.080 6	0.101 1	0.202 8
522.0	0.080 7	0.101 2	0.202 6

吸收效应对电子数密度空间分布影响的结果如图 10 所示，在 2 种计算条件下，电子数密度的参数范围是 4×10^{21}~1×10^{22} m^{-3}，且靠近电极位置的电子数密度更高，而间隙中心区域的电子数密度较低。

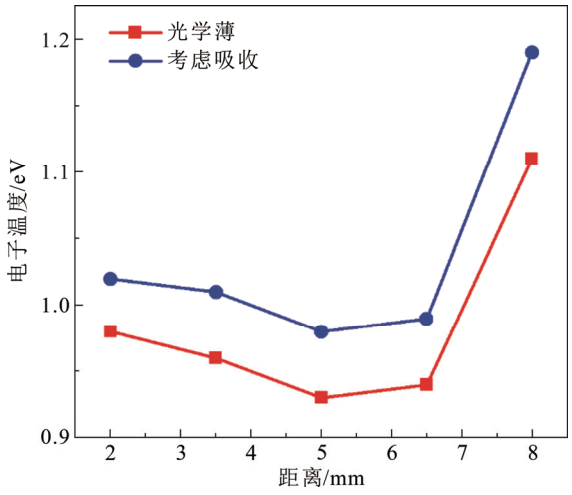


图 9 吸收效应对电子温度空间分布的影响

Fig.9 Effect of absorption on the spatial distribution of electron temperature

考虑吸收效应之后，电子数密度的数值有所增加，这是因为吸收效应减少了辐射衰减引起的能量损失，从而使得真空电弧等离子体的能级布居朝向高能量方向偏移。高能级粒子的电离阈值较低，因此电子碰撞电离的效率更高，更高的碰撞电离效率必然导致更大的电子数密度。此外，在电极间隙内，

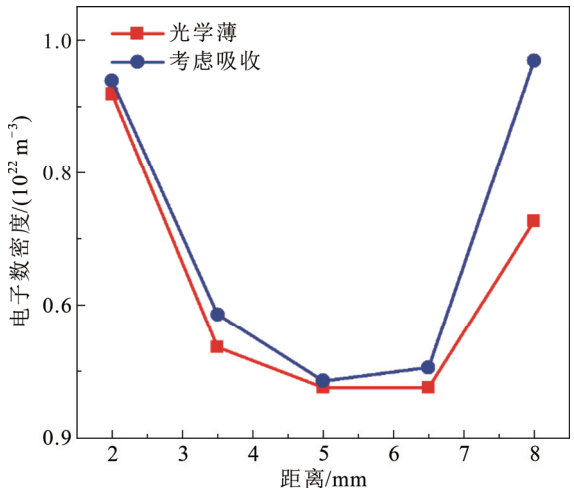


图 10　吸收效应对电子数密度空间分布的影响

Fig.10　Effect of absorption on the spatial distribution of electron density

电子数密度的平均增量为 7.06×10^{20} m^{-3}，且靠近阳极位置的电子数密度增量远大于其他位置。这与阳极表面的融化和蒸发效应有关，在大电流真空电弧中，热阳极表面会融化产生金属液滴并且蒸发产生大量金属蒸气，这会增大近阳极区域的光学厚度，导致吸收效应更加明显。

4　讨论

4.1　误差分析

由于电子温度和电子数密度在空间上的不均匀分布，基于单点参数计算的仿真合成光谱往往难以与实验测量的积分光谱完全相符，进而引入一定的拟合偏差。这种偏差必然影响电子温度和电子数密度诊断的准确性。因此，有必要研究辐射强度偏差与参数诊断误差之间的联系。

具体地，在给定一组电子温度和电子数密度的条件下，利用碰撞辐射模型计算出各谱线的基准辐射强度。随后，分别对电子温度和电子数密度添加误差，重新计算辐射强度，并用相对变化量来衡量辐射强度对电子温度误差和电子数密度误差的敏感性，该相对变化量 ΔI 的定义为：

$$\Delta I=\frac{\sum_{s=1}^{4}I_s(X+\Delta X)-\sum_{s=1}^{4}I_s(X)}{\sum_{s=1}^{4}I_s(X)}\times100\% \qquad (20)$$

式中：X 代表电子温度和电子数密度；$I_s(X)$代表基准辐射强度；ΔX 代表电子温度和电子数密度的变化量；谱线波长 s 分别为 510.6、515.3、521.8 nm 以及 522.0 nm。

电子温度误差和电子数密度误差对辐射强度相对变化量的影响如图 11 所示。其中，图 11(a)和图 11(b)分别在光学薄和考虑吸收效应的前提下，分析了电子温度误差对辐射强度的影响；而图 11(c)和图 11(d)则在相同条件下展示了电子数密度误差所导致的辐射强度变化。辐射强度的相对变化量随着电子温度误差的增加单调递增，而随着电子数密度误差的增加单调递减。同时辐射强度相对变化量对电子温度误差的敏感度显著高于电子数密度误差。在±15%的误差范围内，电子温度导致的辐射强度相对变化量最大约 120%，而电子数密度导致的辐射强度变化量最大约 30%。

在建立电子温度误差和电子数密度误差与辐射强度相对变化量的关系之后，可以根据仿真合成光谱与实验测量光谱之间的相对变化量，反推电子温度和电子数密度的诊断误差。以图 7 的拟合结果为例，采用式(20)计算光学薄和考虑吸收效应前提下的辐射强度相对变化量，并将其映射到图 11 所示的曲线中，从而得到对应的参数误差。图中虚线代表了这一反推过程的结果：在光学薄假设下，辐射强度的相对变化量为−3.58%，对应的电子温度误差和电子数密度误差分别为−0.93%和 3.02%；而考虑吸收效应时，辐射强度的相对变化量为−3.41%，对应的误差分别为−0.79%和 2.36%。

4.2　真空电弧铜等离子体能级布居的影响因素

真空电弧的能级布居决定了发射光谱的强度和分布，是建立发射光谱与关键物理参数联系的基础。因此，为了深入研究真空电弧的动态演化过程，本节分析了电子温度、电子数密度以及吸收效应对真空电弧等离子体特征谱线 510.6、515.3、521.8 nm 和 522.0 nm 对应的高低能级以及 $3d^{10}5d^2\ ^2D_{3/2}$ 能级相对粒子密度的影响。所研究的辐射及能级信息如表 3 所示，其中“1”代表铜原子价态，“2”或者“4”代表该价态下的具体激发态编号，例如(1.2)代表铜原子的第二激发态。

4.2.1　电子温度对能级布居的影响

电子温度对激发态能级布居的影响见图 12，计算假设为光学薄，电子数密度设置为 5×10^{21} m^{-3}，能级密度归一化到第二激发态(1.2)。从相对粒子数密度分布可以看出，激发态能级的能量差距越小，其粒子密度越接近。第二激发态(1.2)的粒子数密度远大于其他能级。另外，随着电子温度升高，第二

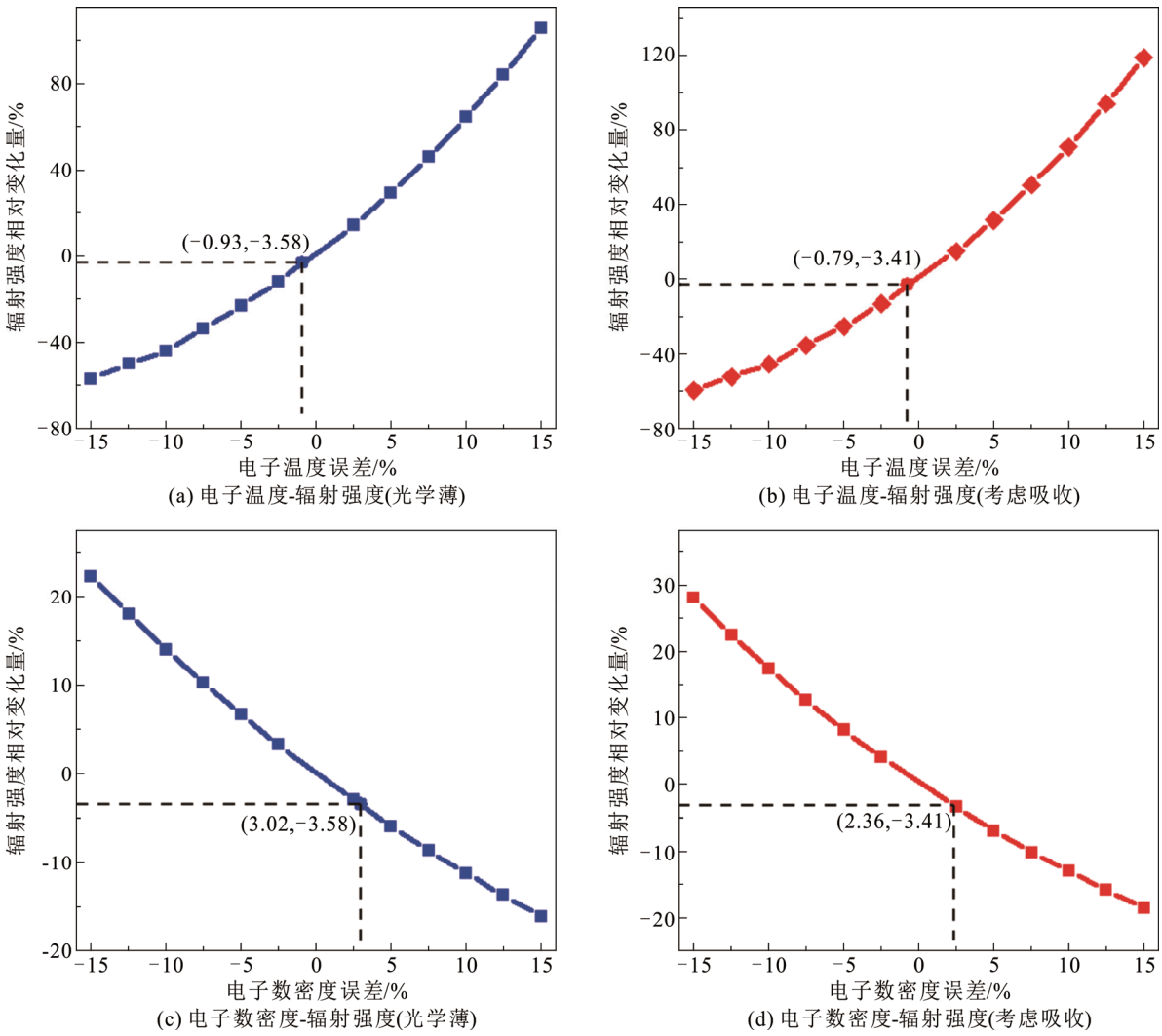


图 11 电子温度误差和电子数密度误差对辐射强度相对变化量的影响

Fig.11 Effects of electron temperature and electron density errors on the relative variation of radiation intensity

表 3 辐射以及能级信息

Table 3 The radiation and energy level information

波长/nm	高能级电子组态	高能级序号	低能级电子组态	低能级序号
510.6	$3d^{10}4p\ ^2P_{3/2}$	(1.5)	$3d^94s^2\ ^2P_{3/2}$	(1.2)
515.3	$3d^{10}4d\ ^2D_{3/2}$	(1.26)	$3d^{10}4p\ ^2P_{1/2}$	(1.4)
521.8	$3d^{10}4d\ ^2D_{5/2}$	(1.27)	$3d^{10}4p\ ^2P_{3/2}$	(1.5)
522.0	$3d^{10}4d\ ^2D_{3/2}$	(1.26)	$3d^{10}4p\ ^2P_{3/2}$	(1.5)
	$3d^{10}5d\ ^2D_{3/2}$	(1.31)		

激发态(1.2)的粒子数密度逐渐降低，其他更高能级的粒子数密度逐渐增大。这是因为当电子温度增大时，电子与基态以及低激发态的铜原子碰撞激发的速率会增大，从而导致高激发态的粒子数密度增加而低激发态的粒子数密度降低。

4.2.2 电子数密度对能级布居的影响

电子数密度对激发态能级布居的影响如图 13 所示，计算前提为光学薄，电子温度设置为 1.0 eV，能级密度归一化至第二激发态(1.2)。随着电子数密

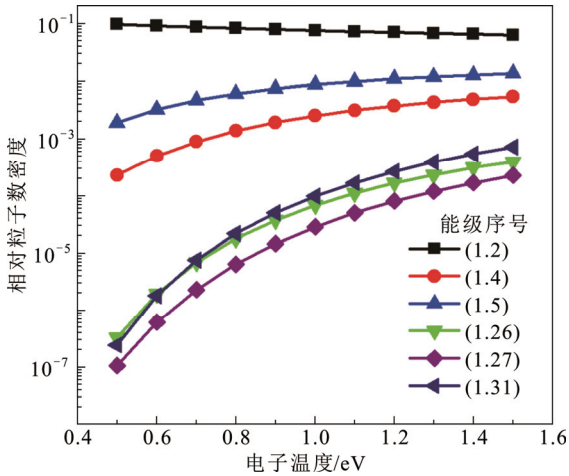


图 12 电子温度对能级布居的影响

Fig.12 Effect of electron temperature on the population distribution

度增加，激发态(1.2)的粒子数密度逐渐减小，其他激发态的粒子数密度逐渐增大。这是因为当电子数密度增大时，电弧单位体积内的电子碰撞频率增大，进而导致电子与基态原子和激发态原子的碰撞激发速率增大。激发速率的提升使得高激发态的粒子数密度增大。相比之下，低激发态的粒子数密度会因为持续的激发过程而降低。

4.2.3　吸收效应对能级布居的影响

吸收效应对能级布居的影响见图 14，计算条件为电子温度 0.8 eV、电子数密度 1.5×10^{21} m^{-3}。粒子数密度归一化到激发态(1.2)。考虑吸收效应之后，激发态(1.2)的粒子数密度减小，而其他高能级激发态的粒子数密度均增大，这一现象与吸收效应引起的自发辐射速率降低有关。当辐射速率降低时，高激发态粒子的净流出速率和低激发态粒子的净流入速率均减小，从而导致高激发态的粒子数密度增加，低激发态的粒子数密度降低。值得注意的是，对于激发态(1.31)，吸收效应对其粒子数密度的影响远小于其他能级。这是因为激发态(1.31)并非特征谱线对应的激发态，吸收效应对其动力学过程的影响较小，因此粒子数密度的变化较小。

综上所述，电子温度、电子数密度以及吸收效应都会影响真空电弧等离子体的能级布居。其中，电子温度和电子数密度与电子碰撞过程的速率直接相关，它们会影响所有能级的粒子分布。吸收效应一方面会改变对应谱线的净辐射速率，从而影响特征谱线对应能级的粒子数密度分布，而对于其他能级的粒子分布影响较小；另一方面，吸收效应也会影响电弧的能量平衡状态，进而改变电子温度和电子数密度，从而对所有能级的粒子分布产生间接影响。

4.3　各影响因素与能级布居的相关程度

在之前的讨论中，已经明确了电子温度、电子数密度以及吸收效应在真空电弧能级布居演化过程中起的作用。然而，这些影响因素与真空电弧能级布居的关联程度尚不明确。因此，本节引入了斯皮尔曼等级相关系数，用于量化电子温度、电子数密度以及吸收效应与能级布居的相关程度[46]。斯皮尔曼等级相关系数 ρ 的计算式为：

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d^2}{n(n^2-1)} \tag{21}$$

式中：d 代表所研究变量之间的等级差；n 代表变量的观测值。将电子温度 T_e、电子数密度 N_e、特征谱线光学厚度(τ_{510}、τ_{515}、τ_{521}、τ_{522})作为自变量，激发态能级总密度 N 作为因变量计算斯皮尔曼相关系数并且绘制热图，结果如图 15 所示。其中，电子温度 T_e、电子数密度 N_e 的取值范围分别是 0.9~1.2 eV、4×10^{21}~10^{22} m^{-3}。斯皮尔曼等级相关系数的取值范围是 0~1。结果表明，在自变量的取值范围内，电子温度、电子数密度以及吸收效应与能级密度呈正相关。同时，电子温度 T_e 与能级密度 N 的相关系数最大，而光学厚度与能级密度的相关系数最小。这说明能级密度受电子温度的影响最大，而受吸收效应的影响最小。

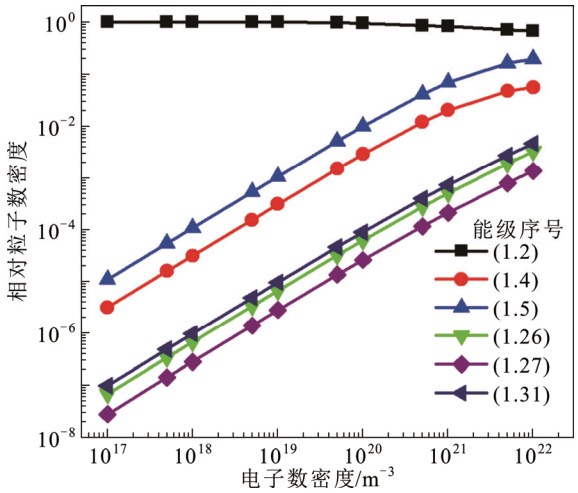


图 13　电子数密度对能级布居的影响

Fig.13　Effect of electron density on the population distribution

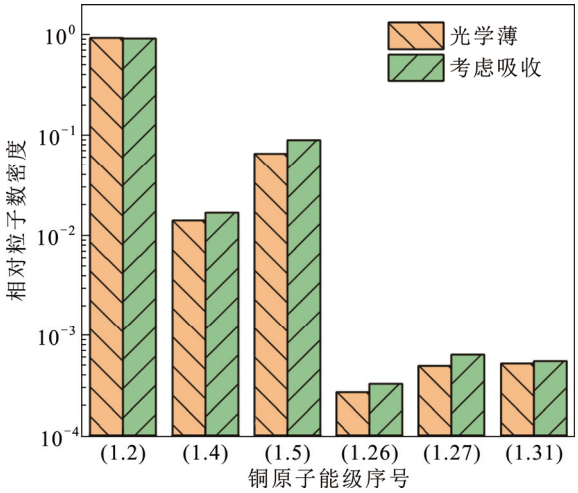


图 14　吸收效应对能级布居的影响

Fig.14　Effect of absorption on the population distribution

5　结论

1）吸收效应会影响真空电弧的发射光谱。考

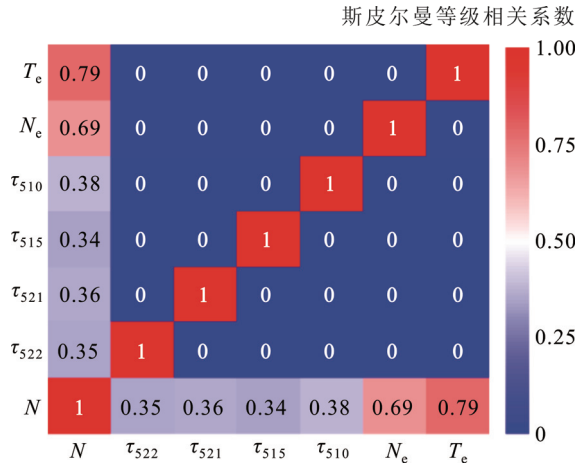


图 15 斯皮尔曼相关系数热图

Fig.15 Heat map of Spearman correlation coefficient

虑吸收效应之后，特征谱线的光谱发射系数和谱线半高宽均会增加，其中 510.6 nm 的发射系数增量最大，其余谱线发射系数的增量接近。而谱线半高宽的增量受波长的影响较小。

2）吸收效应会影响真空电弧的电子温度和电子数密度。考虑吸收效应之后，电子温度和电子数密度均会增加。在电极间隙内，电子温度的平均增量为 0.05 eV，且电子温度增量与轴向位置的关联不大。而对于电子数密度，电极间隙内的平均增量为 7.06×10^{20} m^{-3}，同时靠近阳极位置的增量远大于其他位置。

3）吸收效应对真空电弧的能级布居具有双重影响。一方面，吸收效应会改变特征谱线的净辐射速率，从而影响谱线对应能级的密度分布；另一方面，吸收效应也会影响电弧的能量分布状态，进而改变电子温度和电子数密度，最终间接影响真空电弧的能级布居。

参考文献 References

[1] DU N, GUAN Y G, ZHANG J S, et al. Phenomena and mechanism analysis on overvoltages caused by 40.5-kV vacuum circuit breakers switching off shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2102-2110.

[2] 吴益飞，吴 翊，庄伟斌，等. 直流快速开断技术研究进展和展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：467-477.
WU Yifei, WU Yi, ZHUANG Weibin, et al. Research progress and prospect of fast DC current interruption technology[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 467-477.

[3] 李 璨，咸日常，崔 永，等. KYN 系列 12 kV 开关柜真空断路器灭弧室触头温度间接测算[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4355-4363.
LI Can, XIAN Richang, CUI Yong, et al. Indirect measurement of arc-extinguishing chamber contact temperature of KYN series 12 kV switch cabinet vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4355-4363.

[4] 钟建英，孙广雷，杨葆鑫，等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：451-466.
ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.

[5] GALONSKA M, HOLLINGER R, KRINBERG I A, et al. Influence of an axial magnetic field on the electron temperature in a vacuum arc plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5): 1542-1547.

[6] INADA Y, KIKUCHI R, NAGAI H, et al. Influence of CuCr electrode composition on 2D electron and metal vapor density distribution over vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Appled Physics, 2020, 53(30): 305201.

[7] SUN L Q, WANG Z X, CAO Z Y, et al. Optical investigation of excited species distribution in low-current vacuum discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(7): 2156-2165.

[8] 张潮海，邹可园，张晓星. 高压电气设备绝缘气体分解产物光学检测技术研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2806-2815.
ZHANG Chaohai, ZOU Keyuan, ZHANG Xiaoxing. Review on optical detection technology of insulating gas decomposition products for high voltage electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2806-2815.

[9] 文 韬，向念文，章 程，等. 高压放电等离子体研究现状及发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3226-3239.
WEN Tao, XIANG Nianwen, ZHANG Cheng, et al. Research status and development trend of high voltage discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3226-3239.

[10] LIU S, YUAN Z, ZHANG J, et al. Observation of the dynamic evolution process of vacuum arc microscopic particles based on the emission spectrum principle[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(4): 045502.

[11] 张 晋，袁 召，陈立学，等. 真空电弧等离子体发射光谱诊断[J]. 强激光与粒子束，2021，33(6)：065014.
ZHANG Jin, YUAN Zhao, CHEN Lixue, et al. Vacuum arc plasma emission spectroscopy diagnosis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(6): 065014.

[12] LI Y L, YUAN Z, LIU S, et al. Emission spectroscopic diagnosis of 2-D particle distribution in vacuum arcs under different currents[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(7): 2837-2845.

[13] TANG Q, MAEDE Y, SATO M, et al. Optical diagnostics of vacuum arcs in the process of DC interruption[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(50): 505204.

[14] 邹积岩，董华军，丛吉远，等. 真空开关电弧电子温度诊断的实验研究[J]. 真空科学与技术学报，2008，28(6)：531-534.
ZOU Jiyan, DONG Huajun, CONG Jiyuan, et al. Electron temperature diagnosis of metal vapor plasma of vacuum switching arc[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2008, 28(6): 531-534.

[15] CAO B, LI R, CAO Z Y, et al. Spatiotemporal evolution of excitation temperature of vacuum arcs by tomography[J]. Journla of Vacuum Science &Technology A, 2023, 41(5): 053006.

[16] WANG Z X, PAN Y B, GONG Y J, et al. 3D reconstruction of dynamic behaviors of vacuum arcs under transverse magnetic fields via computer tomography[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(6): 063511.

[17] BACON F M. Vacuum arc anode plasma. I. spectroscopic investigation[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(11): 4750-4757.

[18] BOXMAN R L, GOLDSMITH S. Excited-state densities in a multi-cathode-spot Al vacuum arc. I. Spectroscopic measurements[J].

Journal of Applied Physics, 1980, 51(7): 3644-3648.
[19] ROSENTHAL H, BEILIS I, GOLDSMITH S, et al. A spectroscopic investigation of the development of a hot-anode vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(5): 1245-1259.
[20] KHAKPOUR A, METHLING R, UHRLANDT D, et al. Time and space resolved spectroscopic investigation during anode plume formation in a high-current vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(18): 185203.
[21] 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(24): 243301.
[22] EJIRI H, KIKUCHI R, KUMADA A, et al. Excitation temperature imaging of vacuum arc based on two-line radiance method[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1955-1961.
[23] HARTGERS A, VAN DIJK J, JONKERS J, et al. CRModel: a general collisional radiative modeling code[J]. Computer Physics Communications, 2001, 135(2): 199-218.
[24] YANGUAS-GIL A, COTRINO J, GONZÁLEZ-ELIPE A R. Measuring the electron temperature by optical emission spectroscopy in two temperature plasmas at atmospheric pressure: a critical approach[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(3): 033104.
[25] BAEVA M, UHRLANDT D, MURPHY A B. A collisional-radiative model of iron vapour in a thermal arc plasma[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(22): 22LT02.
[26] HAN X, WANG Y M, CHEN Z Y, et al. High-resolution particle density measurement for argon plasma plume by image reconstruction and collisional-radiative model[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109544.
[27] ZHU X M, WANG Y F, WANG Y, et al. A xenon collisional-radiative model applicable to electric propulsion devices: II. Kinetics of the 6*s*, 6*p*, and 5*d* states of atoms and ions in Hall thrusters[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(10): 105005.
[28] BAGHEL S S, GUPTA S, GANGWAR R K, et al. Diagnostics of laser-produced Mg plasma through a detailed collisional radiative model with reliable electron impact fine structure excitation cross-sections and self-absorption intensity correction[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2021, 30(5): 055010.
[29] SU M G, WANG B, MIN Q, et al. Time evolution analysis of dynamics processes in laser-produced Al plasmas based on a collisional radiative model[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(1): 013302.
[30] ZHU X M, CHEN W C, LI J, et al. Determining the electron temperature and the electron density by a simple collisional-radiative model of argon and xenon in low-pressure discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(2): 025203.
[31] YANG J, YOKOTA S, KANRKO R, et al. Diagnosing on plasma plume from xenon Hall thruster with collisional-radiative model[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(10): 103504.
[32] HAN X, WU P, CHEN Z Y, et al. Collisional radiative model for high-ionization-rate equilibrium argon plasma plume[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2022, 194: 106436.
[33] DRESSLER R A, CHIU Y H, ZATSARINNY O, et al. Near-infrared collisional radiative model for Xe plasma electrostatic thrusters: the role of metastable atoms[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(18): 185203.
[34] STANCALIE A, CIOBANU S S, SPOREA D. Investigation of the effect of laser parameters on the target, plume and plasma behavior during and after laser-solid interaction[J]. Applied Surface Science, 2017, 417: 124-129.
[35] 王均武，玄洪文，俞航航，等. 激光诱导放电等离子体极紫外辐射的模拟[J]. 物理学报，2024，73(1)：015203.
WANG Junwu, XUAN Hongwen, YU Hanghang, et al. Simulation of extreme ultraviolet radiation of laser induced discharge plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(1): 015203.
[36] ZHU X M, CHENG Z W, PU Y K, et al. Escape factors for Paschen 2p-1s emission lines in low-temperature Ar, Kr, and Xe plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(22): 225204.
[37] BACON F M, WATTS H A. Vacuum arc anode plasma. II. Collisional-radiative model and comparison with experiment[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(11): 4758-4766.
[38] GOLDSMITH S, BOXMAN R L. Excited-state densities in a multicathode-spot Al vacuum arc. II. Theoretical approach[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(7): 3649-3656.
[39] EJIRI H, KIKUCHI R, KUMADA A, et al. Examination of excitation temperature of vacuum arc based on collisional-radiative model[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1948-1954.
[40] KRAMIDA A, RALCHENKO Y, READER J. NIST atomic spectra database (version 5.12)[EB/OL]. (2024-07-16)[2025-05-19]. https://physics. nist. gov/asd.
[41] VAN DER MULLEN J A M. Excitation equilibria in plasmas；a classification[J]. Physics Reports, 1990, 191(2/3): 109-220.
[42] AGRAWAL A, BAGHEL S S, SHARMA L, et al. Electron impact fine-structure cross-section calculations of Cu and their applications in the diagnostics of laser-produced Cu-plasma through the collisional radiative model[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2023, 208: 106764.
[43] FUJIMOTO T. A collisional-radiative model for helium and its application to a discharge plasma[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1979, 21(5): 439-455.
[44] CHUNG H K, CHEN M H, MORGAN W L, et al. FLYCHK: generalized population kinetics and spectral model for rapid spectroscopic analysis for all elements[J]. High Energy Density Physics, 2005, 1(1): 3-12.
[45] KUNZE H J. Introduction to plasma spectroscopy[M]. Berlin, Germany: Springer, 2009.
[46] SRIKAR P S N S R, SURESH I, GANGWAR R K. Accelerated real-time plasma diagnostics: integrating argon collisional-radiative model with machine learning methods[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2024, 215: 106909.



曹　博
1997—，男，博士生
主要从事真空电弧光谱仿真方面的研究工作
E-mail: cb17853142150@stu.xjtu.edu.cn

CAO Bo
Ph.D. candidate



王振兴(通信作者)
1983—，男，副教授，博导
主要从事真空电弧等离子体的仿真及诊断方面的研究工作
E-mail: zxwang@xjtu.edu.cn

WANG Zhenxing
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-05-26　修回日期　2025-10-15　　编辑　曾文君