

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.005

开关电弧非平衡态电导率的研究

石 岩^{1,2}, 崔博源¹, 陈 允¹, 林 莘², 张 进³, 钟建英⁴, 吴昱怡¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 3. 国家电网公司, 北京 100031; 4. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 电弧等离子体电导率是影响电弧能量的关键因素之一。文中从微观角度出发,通过库伦碰撞模型对SF₆电弧等离子体内电子温度与重粒子温度进行计算,针对热力学非平衡态特点对Saha方程、Guldberg-Wagge方程进行修正,根据SF₆放电时存在的电离、解离平衡计算得出不同压强、不同温度下的电子数密度;改进Spitzer电导率计算模型,得到压强为0.1~1 MPa、温度为300~20 000 K范围内非平衡态双温度SF₆电弧等离子体电导率,并在压强为0.6 MPa下与平衡态电弧电导率计算结果进行对比。研究结果表明:当温度为7 000 K时等离子体内部开始出现电子,并随着温度的升高电子密度迅速达到峰值;压强为0.6 MPa下,温度小于10 000 K时,非平衡态双温度等离子体电导率与平衡态等离子体电导率计算结果相差较大,这是由于非平衡态条件下,电子温度与重粒子温度相差很大,不能用单一温度同时表征两种粒子的发展过程。在等离子体内粒子电离不充分时,非平衡态双温度电弧等离子体模型更能够准确描述电弧的动态发展过程。研究结果可应用于滤波器组、电容器组断路器等开断容性小电流的气流场数值计算中。

关键词: SF₆等离子体; 非平衡态; 电子数密度; 电导率

Study on Non-equilibrium State Conductivity of Switching Arc

SHI Yan^{1,2}, CUI Boyuan¹, CHEN Yun¹, LIN Xin², ZHANG Jin³, ZHONG Jianying⁴, WU Yuyi¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 3. National Electric Net Ltd., Beijing 100031, China; 4. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: From the microscopic point of view, the electron temperature and heavy particle temperature in the SF₆ arc plasma are calculated with the Coulomb collision model. The Saha equation and the Guldberg-Wagge equation are modified according to the thermodynamic non-equilibrium state characteristics. According to the ionization existing in the SF₆ discharge to conduct deionization balance calculation, the electron number density for different pressure and temperature is obtained. The calculation model of Spitzer conductivity is improved to obtain the conductivity of SF₆ arc plasma in non-equilibrium state in the condition of 300~20 000 K and 0.1~1 MPa, and the result is compared with the calculated equilibrium state arc conductivity at pressure of 0.6 MPa. It is shown that at 7 000 K electrons begin to appear inside the plasma and the electron density rapidly reaches the peak with the increase of the temperature. When the pressure is 0.6 MPa and the temperature is lower than 10 000 K, the calculation difference of the conductivity between the non-equilibrium dual-temperature plasma and the equilibrium plasma are large because in the non-equilibrium state the electron temperature and the heavy particle temperature are quite different. Therefore, the development of the two different kinds of particles cannot be simultaneously characterized by single temperature. The non-equilibrium dual-temperature arc plasma model can describe the dynamic development of arc more accurate-

收稿日期:2019-10-08; 修回日期:2019-12-19

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51637006);国网公司直流特高压工程专项(GYB11201604850)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51637006), State Grid UHV DC Project and Major (GYB11201604850).

ly when ionization is insufficient in the plasma. These research results can be applied to the numerical calculation of the airflow field with small breaking current for such as filter-bank and capacitor-bank circuit breakers.

Key words: SF₆ plasma; non-equilibrium state; electron density; conductivity

0 引言

在高压SF₆断路器负载开断的气流场数值计算中,电弧能量常常作为源项代入到流体力学控制方程中^[1-3]。到目前为止,国内外研究提出的电弧能量模型绝大多数都把电弧等离子体看作可变电阻^[4-5],等离子体电导率成为影响电弧能量的关键因素之一。宏观电导率与微观电子数密度有着直接联系,为了更深入研究SF₆电弧等离子体宏观电导率,有必要从微观角度入手,建立电弧等离子体的微观数学模型。

早期研究主要是基于SF₆断路器在开断大电流、稳定燃弧的热力学平衡态条件下进行数值模拟和参数计算。然而,断路器在开断容性小电流电弧时,在电弧等离子体边缘及等离子体壁或电极的附近,等离子体内部粒子电离不充分,电子密度很小,通常不能够向重粒子传递用来保持热平衡所需要能量,因而重粒子温度与电子温度不相等,热力学平衡条件不再满足^[6-7]。由于等离子体辐射过程和电离过程非常复杂,目前尚没有办法对辐射温度和电离温度进行实验测量,常用的办法是使辐射温度与电离温度等效为电子温度,电子温度与重粒子温度通过碰撞模型计算得出激发温度^[8],因此涉及多温度的变化过程的等离子体电弧模型可由仅有电子温度与重粒子温度两种变量的“双温度”电弧数学模型描述^[9]。

在电弧等离子体微观数学模型中,首先要对等离子体中任意位置的粒子组分进行计算,计算方法主要为热力学统计或化学动力学方法,平衡态下计算微观粒子组分有3种方法^[10]:分别为基于质量作用定律、Gibbs自由焓最小化原理和化学动力学方法。这3种方法都需要与元素化学计量守恒、Dalton分压定律、电荷准中性条件相结合计算得出电弧等离子体中各组分的粒子密度。早期的研究中,化学动力学方法应用最为广泛。继文[11]最早建立了SF₆电弧衰减过程中的化学动力学模型后,出现了大量关于高压SF₆断路器的弧后反应动力学研究^[12-17],但只有文[16]基于非热力学平衡。文[18]计算了双温条件下的氦气等离子体输运系数,但未考虑非化学平衡。Wang等人基于国际前沿的唯象势和粒子热化学参数研究成果建立了热力学平衡态SF₆电弧模

型^[19],计算得出平衡态下电弧等离子体组分含量及物性参数。基于质量作用定律的数学模型中,Potapov和Eindhoven建立了原理简单、思路清晰的数学模型^[20-25]。当电子温度与重粒子温度相差较大时,Potapov模型具有较大误差,因此不适用于热力学非平衡态条件下。而Eindhoven模型对此进行了修正,去掉了Saha方程和配分函数的指数项,在非热力学平衡态条件下计算结果更准确。

文中根据Eindhoven电弧等离子体数学模型,通过库伦碰撞模型计算电子与重粒子间温度的传递关系,对不同粒子的配分函数进行计算,修正Saha电离方程和Guldberg-Wagge解离方程,计算在非平衡态下等离子体内电子密度,改进Spitzer电导率计算模型,得出小电弧电导率。研究结果可用于滤波器组断路器、电容器组断路器等开断容性小电流的气流场计算中,使计算结果更具参考价值。

1 双温度等离子体数学模型

1.1 双温度间的数学关系

非平衡态等离子体中电子质量很小,比较容易在电场中获得外界的能量,在电极表面或容器壁附近电子密度又很低,难以向重粒子传递能量,因此电子温度高于重粒子温度。要研究双温度间的数学关系,首先要研究粒子间发生碰撞时的能量变化过程。

电子与重粒子每一次碰撞过程中平均损失的过剩能量为 $\Delta\epsilon_{eh}$ 。只能在从外电场获取能量加以补充的情况下,方能维持 T_e 高于 T_h 的状态。在碰撞支配的等离子体中,带负电的电子具有与电场强度向量 $\mathbf{E}$ 相反的方向的漂移速度 U_e ,平均漂移速度可表示为

$$U_e = \frac{1}{2} \left(\frac{e\mathbf{E}}{m_e} \right) \frac{l_e}{\bar{v}_e} \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{e\mathbf{E}}{m_e}$ 为在外电场作用下电子的平均速度; e 为元电荷电量; m_e 为电子质量; $l_e/\bar{v}_e$ 的物理意义为两次连续碰撞间的平均间隔,其中, l_e 为电子平均自由程, $\bar{v}_e$ 为电子热运动速率,可以表示为

$$l_e = \frac{1}{\frac{1}{2}n_e Q_e + \sum_{j=1}^N n_j Q_j} \quad (2)$$

$$\bar{v}_e = (8k_B T_e / \pi m_e)^{1/2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, Q_j 和 n_j 分别为相应粒子 j 的碰撞截面和粒子密度。由此可以得到两次相继碰撞间电子从外电场平均获得的能量为

$$eEU_e \tau = \frac{1}{2m_e} \left(\frac{eEl_e}{\bar{v}_e} \right)^2 = \frac{\pi(eEl_e)^2}{16k_B T_e} \quad (4)$$

又因为电子在与重粒子发生二体弹性碰撞时, 每次碰撞中损失的过剩能量平均为

$$\Delta \varepsilon_{ch} = \frac{2m_e}{m_h} \frac{3}{2} k_B (T_e - T_h) \quad (5)$$

所以, $\Delta \varepsilon_{ch} = eEU_e \tau$, 可得:

$$\frac{\pi(eEl_e)^2}{16k_B T_e} = \frac{2m_e}{m_h} \frac{3}{2} k_B (T_e - T_h) \quad (6)$$

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{\pi}{48} \frac{m_h}{m_e} \left(\frac{eEl_e}{k_B T_e} \right)^2 \quad (7)$$

$$l_e = 1 / \left(\frac{1}{2} n_e Q_e + \sum_{j=1}^N n_j Q_j \right) \quad (8)$$

由此可以估算出电子温度与重粒子温度的关系为

$$T_e = \left[T_h + \sqrt{T_h^2 + \frac{\pi}{12} \frac{m_h}{m_e} \left(\frac{eEl_e}{k} \right)^2} \right] / 2 \quad (9)$$

1.2 双温度等离子体数学模型的基本方程

求解电弧等离子体电导率的关键一环是通过求解等离子体粒子组分得到电子密度。

计算等离子体组分构成, 涉及的主要理论依据和基本方程如下:

1) 元素化学计量守恒。根据质量守恒定律, 解离和电离反应前后各元素的化学计量数(摩尔数)不变。

$$\sum_l c_{sl} n'_{sl} = C \quad (10)$$

式(10)中: n'_{sl} 为等离子体中与第 s 种元素有关的第 l 种粒子的物质的量; c_{sl} 为等离子体中单位摩尔第 l 种粒子中 s 原子的物质的量; C 为常数。

2) 道尔顿分压定律。气体混合物的总压强等于其中各气体分压之和, 这就是气体分压定律, 该定律同样适用于电离气体(等离子体)。

$$p + \delta_p = \sum_i p_i \quad (11)$$

式(11)中: p_i 为等离子体中第 i 种粒子组分的分压; δ_p 为考虑等离子体内部电荷存在时气压的修正值。

3) 电荷准中性条件。等离子体宏观上是电中性的, 所有带电粒子(电子 e , 正离子, 负离子)所带电荷代数之和为零。

$$\sum_i z_i n'_i - n'_e = 0 \quad (12)$$

式(3)中: n'_i 为等离子体中第 i 种带电粒子的数密度; z_i 为等离子体中第 i 种带电粒子的带电电荷, 正离子取正, 负离子取负; n'_e 为电子的数密度。

4) 等离子体状态方程。采用双温度等离子体模型时, 需要考虑到与不同而对有关的关系式进行修改。

$$p = n_e k_B T_e + (n_a + n_i + n_d) k_B T_h \quad (13)$$

式(13)中: p 为气体压力; n_e 、 n_a 、 n_i 、 n_d 分别为电子、原子、一次离子和多次电离粒子的数密度。

5) 质量作用定律。其表现形式主要有 Saha 方程和 Guldberg-Wagge 方程两种。

Saha(电离)方程的非平衡态双温度方程为

$$n_e \left(\frac{n_{r+1}}{n_r} \right) = 2 \frac{Z_{r+1}}{Z_r} \left(\frac{2m_e \pi T_{\text{reac}}}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_{l,r+1} - \Delta E_{l,r+1}}{k T_{\text{reac}}} \right) \quad (14)$$

Guldberg-wagge 方程

对于解离反应 $AB = A + B - E_d$ (E_d 为解离能), 平衡态时, 涉及的粒子密度关系为

$$\frac{n_A n_B}{n_{AB}} = \frac{Z_A Z_B}{Z_{AB}} \left(\frac{2m_A m_B \pi k T_h}{m_{AB} h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_d}{k T_{\text{ex}}} \right) \quad (15)$$

式(15)中: n_i 、 m_i 、 Z_i 分别是粒子数密度、粒子质量、粒子的配分函数 ($i = A, B, AB$); SF_6 放电分解反应的解离能在文[19]中有详细描述; T_{ex} 是激发温度。

6) 激发温度的求解。在热力学平衡态(电子温度和重粒子温度相关较小)下, 可以认为激发温度 T_{ex} 与电子温度 T_e 、重粒子温度 T_h 三者近似相等, 即 $T_e = T_h = T_{\text{ex}}$ 。但是在非平衡态下, 粒子的激发温度需要单独求解, 可由电子温度 T_e 和重粒子温度 T_h 共同确定, 其表达式为

$$T_{\text{ex}} = \frac{v_{eA} T_e + \sum_{j(j \neq e)} v_{jA} T_h}{v_{eA} + \sum_{j(j \neq e)} v_{jA}} \quad (16)$$

式(16)中: v_{eA} 为电子和某粒子的碰撞频率; v_{jA} 为其他粒子和某粒子的碰撞频率。

7) 配分函数的求取。配分函数值的求取是实现电弧等离子体参数计算中关键的一步, 如果已知系统的配分函数, 可求得系统的基本热力学函数内能、物态方程和熵, 从而确定整个系统的全部性质。配分函数定义为

$$z_r = \sum_{s=1}^{S_{\text{max}}} g_{r,s} \exp \left(- \frac{E_{r,s}}{k_B T_{\text{ex}}} \right) = g_{r,1} + g_{r,2} \exp \left(- \frac{E_{r,2}}{k_B T_{\text{ex}}} \right) + \dots \quad (17)$$

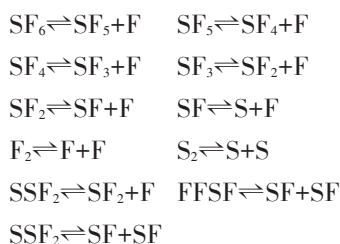
式(17)中: z_r 是次电离粒子的配分函数; $g_{r,s}$ 为该种粒子 s 能级的简并次数; $E_{r,s}$ 是其第 s 个能级与

基级($s=1$)的能量差, $E_{n,1}=0$ 。粒子的种类(单原子、双原子、多原子)不同各个配分函数的确定方法不同,文[19]中有详细介绍。

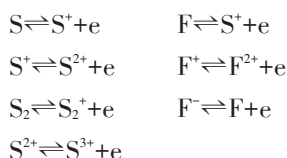
2 等离子体电子密度、电导率的计算

2.1 电子密度的计算

纯SF₆等离子体模型中主要有20种粒子成分^[19]: SF₆、SF₅、SF₄、SF₃、SF₂、SF、SSF₂、FSSF、S₂、F₂、S、F、e、F⁻、F⁺、F₂⁺、S₂⁺、S⁺、S₂⁺、S₃⁺。在断路器开断时产生的电弧中可能发生的解离平衡为:



主要发生的电离平衡为:



根据上述解离、电离平衡方程式,联立上述列举的双温度等离子体数学模型基本方程。

文中在牛顿迭代法的基础上求解,首先设定初始重粒子温度、压强、各粒子密度和等离子体电位梯度值;通过计算配分函数、电子温度、激发温度、电离能降等参数,求解非线性方程组,得出温度为300~41 300 K、压强为0.1~0.8 MPa下的电子数密度值。计算结果见图1。

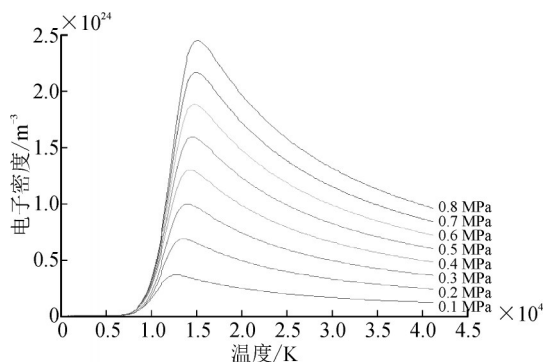


图1 不同压强下电子数密度随温度变化曲线

Fig. 1 Curves of electron density versus electron temperature under different pressure

由图1可见,电子出现的时间与气体压强关系不大,不论压强大小,电子都于温度为7 000 K时开始出现,但电离反应的剧烈程度与气体压强关系很大,压强越大,电离反应越剧烈,电子密度变化越

快,达到峰值后开始下降。压强越大,电子密度达到峰值所需的温度越高,但随后电子密度下降的速度越快。温度高于30 000 K后,电子密度下降速度趋于平缓。

2.2 电导率的计算

实际等离子体绝大多数是不均匀、非平衡态的,在双温度条件下,对Spitzer电导率模型加以修正。

传导电流密度的定义为

$$J = -n_e e \int v f_e dv \quad (18)$$

式(18)中: n_e 为电子数密度; f_e 为外电场引起的分布函数,利用Krook模型^[19]可以表示为

$$f_e = f_{e0} + \frac{eE_z}{m_e v_{me}} \frac{\partial f_{e0}}{\partial v_z} \quad (19)$$

式(19)中: f_{e0} 是电子的Maxwell分布函数; f 是外电场引起的各向异性扰动; $v_{me} = 1/\tau_e$ 是电子与中性粒子间的碰撞频率。

将式(19)代入式(18)并利用归一化条件 $\int f_0 dv = 1$ 可得电流密度

$$J = \frac{n_e e^2 E}{m_e v_{me}} \quad (20)$$

电子与中性粒子间动量碰撞频率可表示为

$$v_{me} = (4\pi\epsilon_0)^2 \frac{4\sqrt{2\pi} n_m z^2 e^4}{3m_e^{1/2} T_e^{3/2}} \ln \Lambda \quad (21)$$

由等离子体电导率 $\sigma = J/E$ 可得

$$\sigma = \frac{3n_e T_e^{3/2}}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e^{1/2} 4\sqrt{2\pi} n_m z^2 e^2 \ln \Lambda} \quad (22)$$

式(22)中: m_e 为电子质量; z 为粒子所带电荷量; $\ln \Lambda$ 为库伦对数,可以表示为: $\ln \Lambda = \ln(4\pi n \lambda_D^3)$ 。

对式(22)计算可得不同温度和压强条件下的电导率变化曲线。见图2。

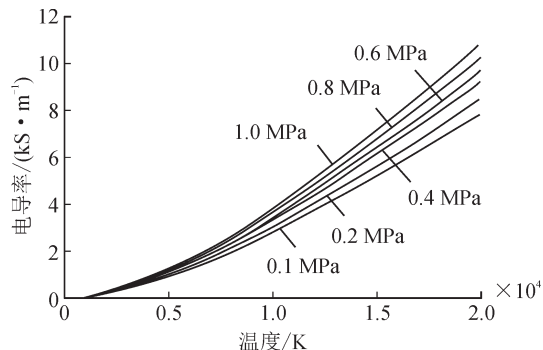


图2 电导率随压强与电子温度变化曲线

Fig. 2 Electrical conductivity changing curve with pressure and temperature

LESLIE S.F 和 RICHARD W.L 对熔流电弧模型简化,并计算了平衡态下电弧等离子体电导率随温

度变化的曲线, 见图 3。在压强为 0.6 MPa 条件下, 当温度小于 5 000 K 时, 平衡态电导率几乎为零, 而非平衡态电导率随温度升高始终呈上升趋势, 这是因为温度较低时, 电子密度很小, 平衡态电导率计算模型忽略了电子碰撞对电导率的影响; 当温度小于 10 000 K 时两种模型的电导率计算值差异很大, 这是因为非平衡态双温度模型中, 随着温度的升高, 带电粒子在外界电场和电弧能量的作用下增加了动能, 加剧了粒子间的碰撞, 导致电子与重粒子之间的能量传递加强, 二者温度趋于相同, 而平衡态模型的单温度并不能同时描述电子和重粒子的不同发展过程。所以非平衡态与平衡态的电导率计算值很接近。当温度升高到 10 000 K 以上时两种模型的电导率趋于相同。

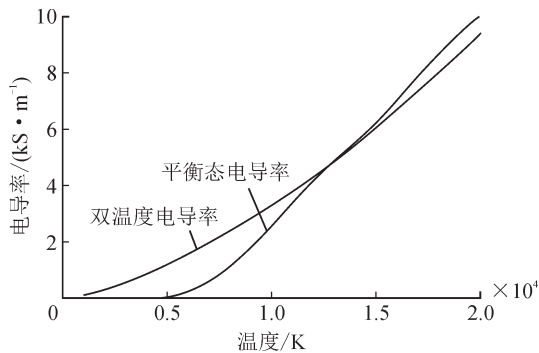


图3 SF₆平衡态与非平衡态电导率随温度变化曲线
Fig. 3 SF₆ equilibrium and non-equilibrium conductivity with temperature change curve

3 光谱测量实验

该课题组已经建立了SF₆等离子体光谱实验平台, 测量气体放电时电弧等离子体的光谱信息, 分析测得光谱波长、光强及半高宽度等光谱参量可得到等离子体电子密度、电导率等参数。文[26]详细介绍了光谱实验测量电子温度、电子密度原理, 光谱测量回路见图4, 主要由高压直流电源、光谱检测系统、密封气室及气体回收装置等组成。其中, 采用硅堆D和高压电容C(0.22 μF)组成的整流电路作为高压直流电源; T₁为调压器(变比为220 V:250 V), T₂为单相变压器(变比为220 V:100 kV)。电阻R₁、R₂为限流电阻。气体电介质密封室为法兰和有机玻璃经密封构成, 光谱测量窗口为纯石英玻璃, 其紫外线通过率为95%以上。

经文中所建立的双温度等离子体数学模型的计算, 及该课题组搭建的光谱测量实验平台获得的电子温度、电子密度测量数据, 得出SF₆气体压强在0.1~0.4 MPa下, 不同电子温度对应的电弧电导率实验值与理论计算值, 结果见表1。

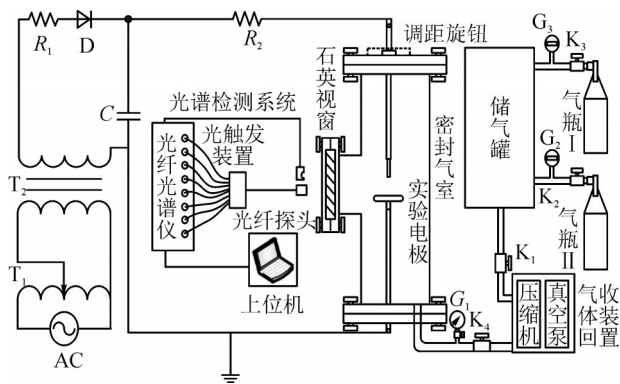


图4 光谱测量电路原理图
Fig. 4 The principle diagram of experimental circuit
表1 不同气压下SF₆气体的电子温度及电导率
Table 1 T_e and σ in different pressure of SF₆

参数	数值			
气压/MPa	0.10	0.20	0.30	0.40
电子温度/(10 ⁴ K)	6.06	4.44	3.13	2.67
电导率实验值/(10 ³ S·m ⁻¹)	2.80	4.50	6.96	9.26
电导率计算值/(10 ³ S·m ⁻¹)	3.08	4.14	6.37	8.34
误差/%	10.00	8.00	8.50	9.90

通过光谱测量实验计算得到的SF₆电弧等离子体电导率数据可以看出, 等离子体电子温度随着气压升高而降低, 而电导率随着气压的升高而增大。这是因为随着气压的升高, 分子数密度增大, 此时各粒子间相互碰撞更加剧烈, 导致电子的自由行程变小, 增大了电子运动时的能量损耗, 使电子运动速率降低, 动能下降, 所以表现为电子温度下降; 而电导率的大小最主要影响因素为电弧等离子体通道内的电子数量的多少, 由于气压升高后电子的自由行程变小, 导致单位体积内电子的碰撞频率升高, 由于碰撞引起的电子数量增加, 通道内的电子数密度增大, 电导率也随之升高, 等离子体通道的导电能力增强。

4 结论

文中基于Eindhoven等离子体微观数学模型, 对电子温度与重粒子温度之间的数学关系进行研究, 建立了非平衡态双温度等离子体数学模型, 对压强为0.1~0.8 MPa、温度为300~41 300 K条件下的电子数密度进行计算; 改进了Spitzer电导率计算公式, 通过已计算到的电子数密度与电子温度得到了不同气压下、温度为300~20 000 K条件下等离子体电导率随温度的变化关系, 并对比了在气压为0.6 MPa条件下的平衡态与非平衡态双温度电弧等离子体模型的电导率, 得出以下结论:

1) SF₆发生电离的起始温度为7 000 K, 该温度不

受气压影响,但随着温度的升高,电离程度的加深,气压越高,电子数密度越高;在温度变化过程中发生的分解反应不同,电子与其他带电粒子复合,导致电子数密度达到峰值后呈下降趋势,温度高于30 000 K后电子数密度下降速度缓慢。

2) 实际情况下等离子体大多数是非平衡态的,在非平衡态条件下电弧电导率随着气压升高而增大,且在同一气压下,电导率随着温度升高呈上升趋势。在气压为0.6 MPa下,通过与平衡态条件下的电弧电导率对比可知:在温度小于10 000 K时,两种电弧模型的电弧电导率计算值有所差异。这是因为在非平衡态条件下,电子温度与重粒子温度不相等,而平衡态电弧等离子体模型的单温度并不能同时描述电子和重粒子的不同运动发展过程,所以,在等离子体内粒子电离不充分时,非平衡态双温度电弧等离子体模型更能够准确描述电弧的动态发展过程。

3) 随着气压的升高,分子数密度增大,此时各粒子间相互碰撞更加剧烈,导致电子的自由行程变小,电子动能减小使电子温度逐渐降低;单位体积内电子碰撞频率加快引起电弧等离子体通道内的电子数密度增加,所以电导率升高;电导率实验值与计算值的最大误差仅为实验值的10%,文中提出的非平衡态双温度电弧等离子体电导率的计算方法具有一定准确性。

参考文献:

- [1] 王 亮. SF₆断路器开断容性小电流介质恢复特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2014.
WANG Liang. Research on dielectric recovery characteristic of small capacitive current in SF₆ circuit break[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2014.
- [2] 钟建英. 自能式SF₆断路器开断过程的计算与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2002.
ZHONG Jianying. The interrupting process computation and analyses of a self extinguishing type SF₆ circuit[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2002.
- [3] 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.
- [4] 李和平,陈 熙. 双温度通道电弧等离子体二维数值模拟[J]. 工程热物理学报,2006,27(3):481-483.
LI Heping, CHEN Xi. Two - dimensional two - temperature simulation of plasma tube arc[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3):481-483.
- [5] AMAKAWA T, JENISTA J, HEBERLEIN J, et al. Anode-boundary - layer behaviour in a transferred, high - intensity arc[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1998, 31(20):2826-2834.
- [6] YANG Guang, HEBERLEIN J. Anode attachment modes and their formation in a high intensity argon arc[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16(3):529-542.
- [7] 王飞鸣,林 莘,徐建源. 高压SF₆断路器非平衡态等离子体电弧的熄弧特性[J]. 高电压技术,2014,40(10):3073-3084.
WANG Feiming, LIN Xin, XU Jianyuan. Extinction characteristics of non-equilibrium plasma arc in high-voltage SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3073-3084.
- [8] 高尚惠,孙 煜. 热力学与统计物理学[M]. 北京:高等教育出版社,1980.
GAO Shanghui, SUN Yu. Thermodynamics and statistical physics[M]. Beijing:Higher Education Press, 1980.
- [9] FAUCHAIS P, BOULOSI M I, PFENDER E. Thermal plasmas fundamentals and applications[M]. New York:Plenum, 1994.
- [10] 荣命哲,刘定新,李 美,等. 非平衡态等离子体的仿真研究现状与新进展[J]. 电工技术学报,2014,29(6):271-282.
RONG Mingzhe, LIU Dingxin, LI Mei, et al. Research status and new progress on the numerical simulation of non-equilibrium plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6):271-282.
- [11] BRAND K P, KOPAINSKY J. Particle densities in a decaying SF₆ plasma[J]. Applied Physics, 1978, 16(4):425-432.
- [12] BARTLOVA M, COUFAL O. Comparison of some models of reaction kinetics in HV circuit breakers with SF₆ after current zero[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2002, 35(23):3065-3076.
- [13] ADAMEC L, COUFAL O. On kinetics of reactions in HV circuit breakers after current zero[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1999, 32(14):1702-1710.
- [14] COLLI, CASANOVAS A M, VIAL L, et al. Chemical kinetics modelling of a decaying SF₆ arc plasma in the presence of a solid organic insulator, copper, oxygen and water[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2000, 33(3):221-229.
- [15] COUFAL O, SEZEMSKY P. On the formal correctness of the reaction kinetics model and its solution in HV circuit breakers after current zero[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2001, 34(14):2174-2184.
- [16] GIRARD R, BELHAOUARI J B, GONZALEZ J J, et al. A two temperature kinetic model of SF₆ plasma[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1999, 32(22):2890-2901.
- [17] ADAMEC L, COUFAL O. Comments on the computation of

- the composition of quenching media in HV circuit breakers after current zero[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1997, 30(11):1646-1652.
- [18] 王海兴, 孙素蓉, 陈士强. 双温度氦等离子体输运性质计算[J]. 物理学报, 2012, 61(19):317-323.
WANG Haixing, SUN Surong, CHEN Shiqiang. Calculation of transport coefficients of two-temperature Helium plasmas [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19):317-323.
- [19] 王飞鸣. 高压SF₆断路器非平衡态电弧机理及开断特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
WANG Feiming. Research on mechanism of non-equilibrium plasma arc and breaking characteristics in high-voltage SF₆ circuit breakers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [20] GLEIZES A, CHERVY, GONZALE J J. Calculation of a two-temperature plasma composition: Bases and application to SF₆[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1999, 32(16):2060-2067.
- [21] WANG W Z, RONG M Z, YAN J D. The reactive thermal conductivity of thermal equilibrium and nonequilibrium plasmas application to nitrogen[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(4):980-990.
- [22] WANG Weizong, RONG Mingzhe, YAN J D, et al. Thermophysical properties of nitrogen plasmas under thermal equilibrium and non-equilibrium conditions[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(11):2-19.
- [23] GHORUI S, HEBERLEIN J, PFENDER E. Thermodynamic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2008, 28(4):553-582.
- [24] RAMSHAW J D. Simple approximation for thermal diffusion in gas mixtures[J]. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 1996, 21(3):233-238.
- [25] TANAKA Y, YOKOMIZU Y, ISHIKAWA M, et al. Particle composition of high-pressure SF₆ plasma with electron temperature greater than gas temperature[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5):991-995.
- [26] 庚振新, 石岩, 钟建英, 等. SF₆放电等离子体分解特性的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4):18-24.
GENG Zhenxin, SHI Yan, ZHONG Jianying, et al. Research of the decomposition characteristics of SF₆ discharge plasma [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4):18-24.

石岩(1992—), 男, 硕士, 研究方向为高压电器气流场数值计算。

崔博源(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压开关设备研制及试验技术。

(上接第26页)

- [14] EMC Partner. User manual & calibration protocol[M]. Switzerland: EMC Partner AG, 2004.
- [15] V. Prasad Kodali. 工程电磁兼容[M]. 陈淑凤, 高攸纲, 苏东林, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2006:181-187.
PRASAD KODALI V. Engineering electromagnetic compatibility[M]. CHEN Shufeng, GAO Yougang, SU Donglin, translate. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2006:181-187.
- [16] 邱关源. 电路[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 1999:158-170.
QIU Guanyuan. Circuit[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 1999:158-170.
- [17] 邱关源. 电网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988:91-95.
QIU Guanyuan. Theory of electric network[M]. Beijing: Science Press, 1988:91-95.
- [18] 俎云霄, 吕玉琴. 网络分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007:172-185.
ZU Yunxiao, LYU Yuqin. Network analysis and synthesis [M]. Beijing: China Machine Press, 2007:172-185.
- [19] 翟小社, 王建华, 宋政湘, 等. 信号完整性分析中时域宏模型结合电路仿真的方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(6):631-635.
ZHAI Xiaoshe, WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, et al. Time domain macromodeling combining with circuit simulation for signal integrity[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(6):631-635.
- [20] 程利军. 微机继电保护装置电磁兼容研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003:1-40.
CHENG Lijun. Research on electromagnetic compatibility for the microprocessor based protective relay[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003:1-40.
- 翟小社(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事智能电器设计及电磁兼容研究工作。
- 刘畅(1981—), 男, 博士, 工程师, 主要从事真空灭弧室设计。
- 李仁峰(1990—), 男, 硕士, 主要从事真空灭弧室老炼技术研究。
- 姚晓飞(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事相控快速真空开断技术及真空电弧理论研究。