

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.012

气密继电器电弧等离子体热物性参数计算分析

翟子楠¹, 王小华²

(1. 平顶山学院电气与机械工程学院, 河南 平顶山 467000;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 建立气密继电器电弧流体仿真模型的基础是获得电弧等离子体的热物性参数特性。文中为了获得在 300~20 000 K 温区, 压强 0.1、0.4、0.8、1.0 MPa, 银蒸汽的比例为 1%、10%、50% 条件下的 N_2 -Ag 等离子体热物性数据, 通过最小吉布斯自由能模型计算了 N_2 -Ag 等离子体的热力学特性。利用新的势能模型计算了 N_2 -Ag 混合等离子体的碰撞积分, 进而确定了 N_2 -Ag 等离子体的输运特性。同时着重讨论了热物性特性在不同压强和不同银蒸汽含量时的演变情况。结果表明, 增大压强能抑制等离子组分的分解反应和电离反应。银蒸汽含量达到 50% 时对 N_2 -Ag 等离子体的热物性参数有显著影响。通过与其他文献比较, 计算数据得到有效性验证, 可以应用于具有银触头的气密继电器电弧等离子体的仿真建模。

关键词: 气密继电器; 电弧等离子体; 热力学特性; 输运特性

Analysis on Thermophysical Properties of Arc Plasmas in Gas Sealed Relay

ZHAI Zinan¹, WANG Xiaohua²

(1. Electrical & Mechanical Engineering College, Pingdingshan University, Henan Pingdingshan 467000, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The thermophysical properties of arc plasma are essential for setting up physical model of a gas sealed relay. In order to obtain the thermophysical data of N_2 -Ag arc plasmas in the condition that temperature ranges from 300 to 20 000 K, pressure is 0.1, 0.4, 0.8 and 1.0 MPa, and proportion of Ag vapor is 1%, 10% and 50%, respectively, the thermodynamic properties of N_2 -Ag arc plasmas are calculated using Gibbs free energy minimization. New potential model is adopted to calculate collision integrals of N_2 -Ag arc plasmas, thus the transport properties are determined. Emphasis is put on the evolution of thermophysical properties under different pressures and silver vapor proportions. The results indicate that increasing pressure can suppress the decomposition reaction and ionization reaction in arc plasmas. When the proportion of Ag vapor reaches 50%, it has a significant impact on the thermophysical properties. The data obtained in this study are validated by literatures, so they can be applied to modelling and simulation of arc plasma in gas sealed relay with silver contacts.

Key words: gas sealed relay; arc plasma; thermodynamic properties; transport property

0 引言

气体密封式继电器是航空航天飞行器中使用广泛的一种电磁式继电器, 为了保证继电器的可靠性并延长使用寿命, 这种继电器通常都被密闭在充

满高纯保护性气体的环境当中。通过研究发现, 造成失效的主要原因来源于内部开断电弧对触点的侵蚀^[1]。由于密闭的环境, 实验形式对于测量电弧微观特性及物性参数无能为力。在高压开关电弧仿真研究中, 基于统计学及热力学计算获得电弧微观特性的方法已经得到应用^[2-4]。气密继电器电弧的基础

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-06-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA05A121); 河南省科技攻关计划项目(152102210091)。

Project Supported by National High-Tech R & D Program of China(863 Program)(2011AA05A121), Key Science and Technology Program of Henan Province(152102210091).

研究同样可采用建立微观模型的方式^[5]。文[6-7]从微观角度着手,研究了对于 SF₆ 中混杂少量触头铜金属蒸汽时的电弧等离子体特性。此外,改进的势能模型开始应用于碰撞积分的计算中^[6,8-10]。文[8]将唯像势模型应用于 SF₆ 气体输运特性的计算中。文[11]采用唯像势模型,计算了 CO₂ 和 C₂F₄ 混合气体的输运特性参数。该研究针对银触头溅射蒸汽与高纯氮气混合等离子体计算了在温度 300~20 000 K, 压强 0.1、0.4、0.8、1.0 MPa, 银蒸汽的比例为 1%、10%、50%时的物性参数。利用较高精度的组分计算模型获得了等离子体的热力学特性参数(包括质量密度,焓,熵,定压比热等);通过唯像势模型计算粒子碰撞积分,进而获得了等离子体输运系数(包括粘度,电导率,热导率等)。由于没有查询到 N₂-Ag 电弧等离子体全面的物性参数计算结果文献,为了验证文中结果的有效性,采用了纯氮气的研究结果来进行比较。

1 计算方法

确定热力学特性的前提是计算等离子体的组分,由最小吉布斯自由能模型结合拉格朗日数乘法联立质量作用定律,电荷准中性条件,并采用牛顿迭代解非线性方程组的方法即可得到各粒子的组分,进而可以计算热力学特性参数。鉴于冗长的公式,数学表达可参考文[12]。

设等离子体含有 N 种粒子,吉布斯自由能的定义为

$$G = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \quad (1)$$

式(1)中, n_i 和 μ_i 分别表示第 i 种粒子的数密度与化学势。 μ_i 的定义为

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \left(n_i \sum_{j=1}^N n_j \right) + RT \ln(P/P^0) \quad (2)$$

式(2)中, μ_i^0 是第 i 个粒子在标准态压强 P^0 下的标准态化学势,可以由最小二乘法拟合系数得到。文[13]提供了拟合所需的标准态函数及各粒子标准态焓值。

计算输运特性的前提是获得等离子体的碰撞积分。其定义为

$$\Omega_{i,j}^{(l,s)} = \sqrt{\frac{kT}{2\pi\mu_{ij}}} \int_0^\infty e^{-\gamma_{ij}^2} \gamma_{ij}^{2s+3} Q_{ij}^{(l)}(\varepsilon) d\gamma_{ij} \quad (3)$$

式(3)中: $\gamma_{ij} = (\varepsilon/kT)^{1/2}$ 为动能; k 是玻尔兹曼常数; μ_{ij} 为粒子 i 和粒子 j 的约化质量; (l,s) 是碰撞积分的两个阶参数; $Q_{ij}^{(l)}$ 为 l 阶输运截面。

对于中性与中性粒子,计算碰撞积分时采用了

Laricchiuta 最近提出的一种 Lennard-Jones 势能的改进模型,鉴于该模型能适应更广泛的粒子碰撞作用范围,最近被应用于电弧仿真计算中。Lennard-Jones 唯象势定义为^[14]

$$\varphi(x) = \varepsilon_b \left[\frac{m}{n(x)-m} \left(\frac{1}{x} \right)^{n(x)} - \frac{n(x)}{n(x)-m} \left(\frac{1}{x} \right)^m \right] \quad (4)$$

式(4)中: $x = r/r_e$; $n(x) = \beta + 4x^2$ 为平衡距离; ε_b 为约束能;中性粒子之间碰撞时 m 为 6,中性与离子碰撞时为 4。 β 由经验式(5)得到

$$\beta = 6 + \frac{5}{s_i + s_j} \quad (5)$$

式(5)中: s_i 与 s_j 分别是粒子 i 和粒子 j 极化率的立方根。计算所用极化率来源于美国国家标准技术研究所(NIST)的化学比较基准数据库^[15]。

对于中性粒子与离子,有弹性碰撞和电荷共振非弹性碰撞两种形式。对于弹性碰撞,同样使用唯象势,参数 m 调整为 4。对于电荷共振非弹性碰撞,使用经验公式

$$Q_{ex} = \frac{1}{2} [A - B \ln(g)]^2 \quad (6)$$

式(6)中: Q_{ex} 为电荷转移截面;参数 A, B 为经验系数^[16-17]。

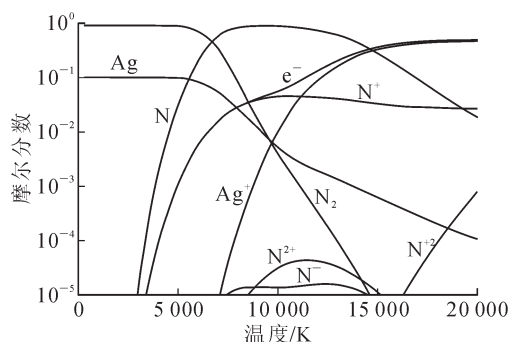
对于电子与中性粒子, e^- -N、 e^- -N₂、 e^- -Ag 的碰撞积分可以利用式(3)计算,但需要得到电子碰撞截面数据。对于 50 eV 以上的碰撞截面数据来源于 NIST 的电子散射截面数据库,50 eV 以下的碰撞截面数据来源于文[18-20]。当获取到粒子的碰撞积分后,结合前期获得的组分及热力学参数就可以计算输运特性参数,数学表达可参考文[21]。

2 等离子体组分

在 N₂-Ag 等离子体中共考虑了 10 种粒子: N, N₂, e^- , N⁺, N⁻, N₂⁺, N₂⁻, N₂²⁺, Ag, Ag⁺。银触头继电器的电弧温度可达到 10 000 K。为了使计算结果更具有广泛性,把计算温度扩展到了 20 000 K,银蒸汽的比例考虑了 1%、10%、50% 3 种情况。N₂-10%Ag 等离子体在压强 0.1 MPa 时,以摩尔分数显示的组分见图 1。从各粒子随温度的演变情况可以预测到影响热力学特性的主要是 N、N₂、 e^- 、N⁺、Ag⁺ 几种粒子。

3 热力学特性

图 2(a)显示在 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽比例对 N₂-Ag 等离子体质量密度的影响,采用文[22]中的纯氮气等离子体质量密度在 0.1 MPa 时的数据验证计算的可靠性。如图 2(a)中所示,纯氮气的质量密度曲线与 1%Ag 的曲线的较小差异说明 1%的银

图1 N_2 -10%Ag 等离子体组分Fig. 1 Composition of N_2 -10%Ag plasmas

蒸汽对等离子体的质量密度影响很小,同时也验证了计算数据的有效性。总的质量密度随温度升高呈现下降趋势。随着银含量的增加,质量密度在固定温度点也呈现增加的趋势,明显是由于银的摩尔质量比氮气的摩尔质量大(Ag 的摩尔质量 107.86 g/mol, N_2 的摩尔质量 28.02 g/mol)造成的结果。图 2(b)显示了变化的压强对 N_2 -1%Ag 等离子体质量密度的影响。在某一温度时,质量密度随压强增大而增大,暗示增大压强可以抑制分解和电离反应。这对于抑制电弧是一种有效手段。

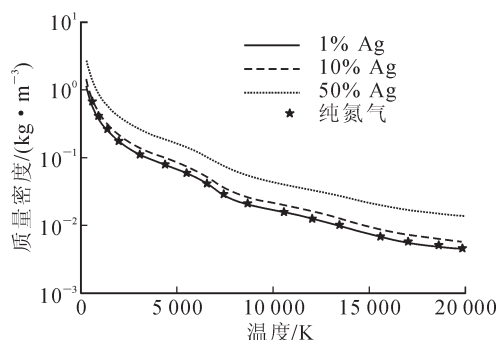
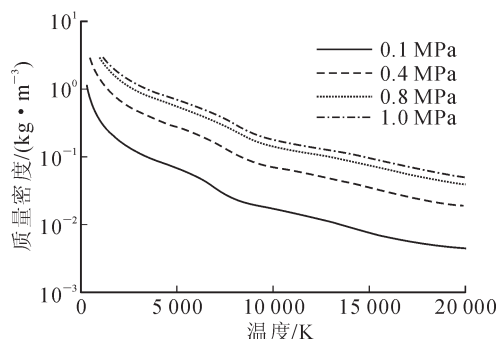
(a) 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽比例对 N_2 -Ag 等离子体质量密度的影响(b) 变化的压强对 N_2 -1%Ag 等离子体质量密度的影响图2 N_2 -Ag 等离子体质量密度Fig. 2 Mass density of N_2 -Ag plasmas

图 3(a)显示在压强为 0.1 MPa 时不同银蒸汽比例对 N_2 -Ag 等离子体焓值的影响,温度高于 5 000 K

后,银蒸汽的比例增大时,焓值下降明显。说明金属蒸汽的电离严重影响保护性气体焓值变化。这也是电离反应导致质量密度变化所带来的结果。图 3(b)显示不同压强对 N_2 -1%Ag 等离子体焓值的影响,压强的增大使焓值降低。这一趋势也证明了增大压强是一种抑制电弧的有效手段。

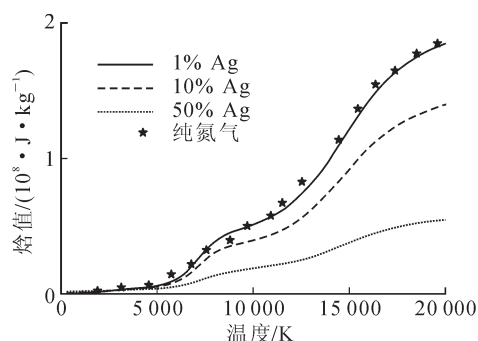
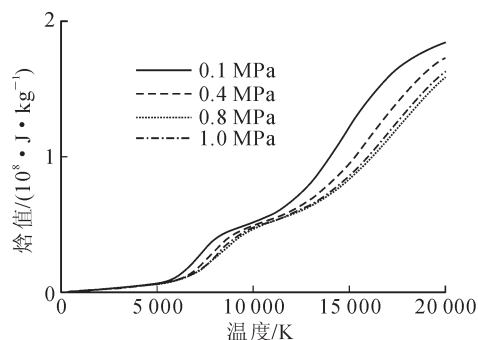
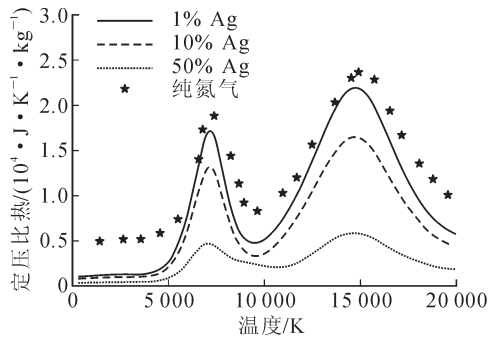
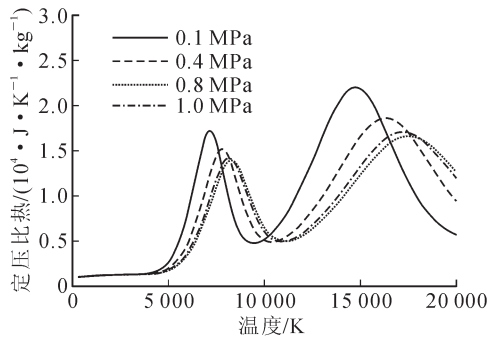
(a) 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽比例对 N_2 -Ag 等离子体焓值的影响(b) 不同压强对 N_2 -1%Ag 等离子体焓值的影响图3 N_2 -Ag 等离子体焓值Fig. 3 Enthalpy of N_2 -Ag plasmas

图 4(a)显示在压强为 0.1 MPa 时不同银蒸汽比例对 N_2 -Ag 等离子体定压比热的影响。银蒸汽比例的增加使 C_p 值降低。图 4(b)显示不同压强对 N_2 -1%Ag 等离子体定压比热的影响。压强的增大促使曲线峰值向高温区移动,同时幅值降低。这一特点说明增大压强能够延迟电离反应的发生。

4 输运特性

图 5(a)显示了在 0.1 MPa 气压时不同银蒸汽含量对电导率的影响。在温度为 7 000 K 以下时电导率快速增加,银含量的变化对电导率影响不大,此时主要电离反应是来自氮气的。在 7 000~14 000 K 时,银蒸汽含量对电导率的影响较为明显,银蒸汽比例的增加会使电导率增大。在 14 000 K 以上时,电导率变化缓慢,这是因为几乎所有的电离反应几乎都已完成。图 5(a)中星形散点为 Murphy 计算的纯氮气在 0.1 MPa 气压时电导率^[23]。由于银原子电离

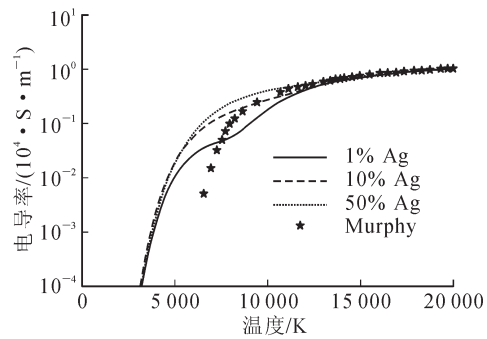
(a) 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽比例对 N_2 -Ag 等离子体定压比热的影响(b) 不同压强对 N_2 -1%Ag 等离子体定压比热的影响图 4 N_2 -Ag 等离子体定压比热Fig. 4 Specific heat of N_2 -Ag plasmas

反应, 较大的误差发生在 7 000~10 000 K 之间, 随着组分的完全电离, 14 000 K 后的差异逐渐变小。

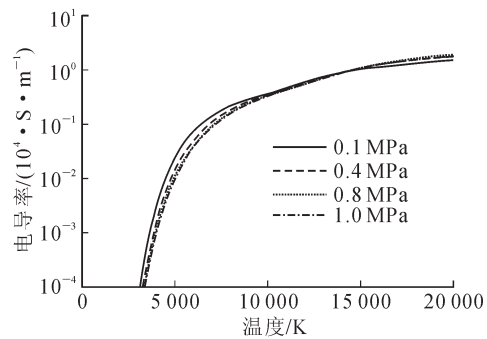
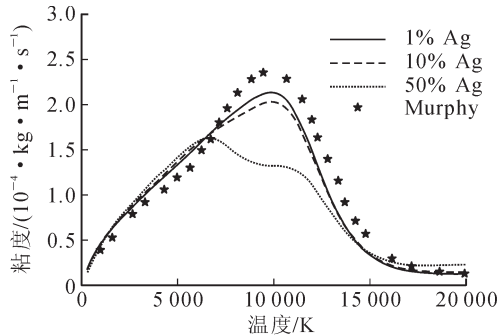
图 5(b) 显示了压强变化对 N_2 -10%Ag 等离子体电导率的影响。由于压强增大抑制了电离反应的发生, 电子密度不会快速增大, 所以在 10 000 K 以下时, 电子与中性粒子的碰撞积分占据主导地位。而在 10 000 K 以上时, 电子与离子的碰撞积分占据主导地位。在 10 000 K 以下时, 电导率随着气压增大而变小。在 10 000 K 以上时, 电导率随着气压增大而增大。

图 6(a) 显示了在 0.1 MPa 气压时不同银蒸汽含量对粘度的影响。在 7 000~14 000 K 区间, 银蒸汽含量的增加促使粘度变小, 而在其他温区粘度则几乎不受粘度变化影响。特别是当银蒸汽比例为 50% 时, 粘度峰值变化显著。这个现象归功于 Ag-Ag 的碰撞积分。在 10 000 K 以上时, 计算结果小于 Murphy 计算的纯氮气粘度数值^[23], 在峰值处较为明显, 这部分差异来自于中性与中性粒子, 中性粒子与离子的碰撞积分。图 6(b) 显示了压强变化对 N_2 -10%Ag 等离子体粘度的影响。在 7 000~20 000 K 时, 粘度随压强的增大而增大, 同时峰值右移。而低于 7 000 K 时, 粘度几乎不受压强变化影响。

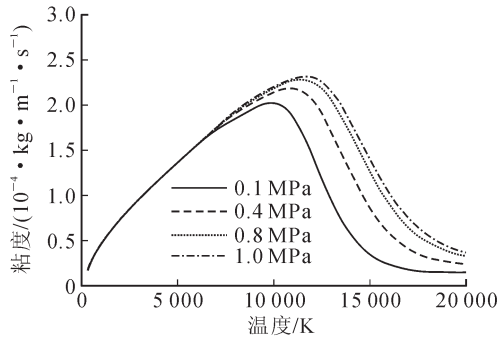
在 0.1 MPa 气压时不同银蒸汽含量对热导率的



(a) 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽含量对电导率的影响

(b) 压强变化对 N_2 -10%Ag 等离子体电导率的影响图 5 N_2 -Ag 等离子体电导率Fig. 5 Conductivity of N_2 -Ag plasmas

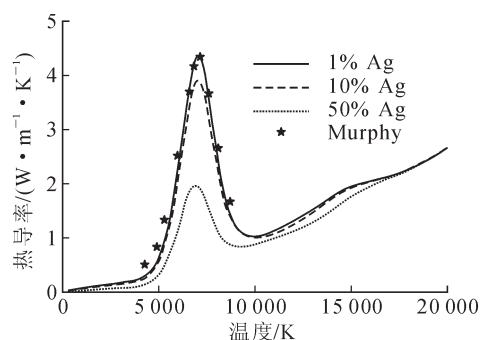
(a) 0.1 MPa 压强时不同银蒸汽含量对粘度的影响

(b) 压强变化对 N_2 -10%Ag 等离子体粘度的影响图 6 N_2 -Ag 等离子体粘度Fig. 6 Viscosity of N_2 -Ag plasmas

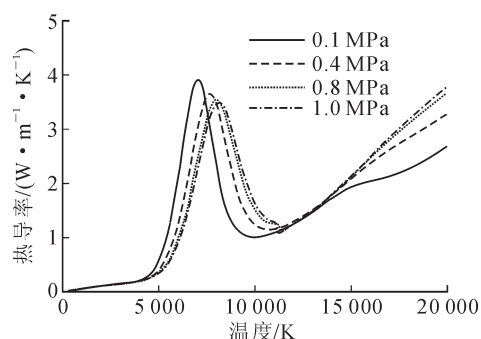
影响如图 7(a) 所示。粘度在峰值处受到的影响最大, 随着银含量的增加而显著变小。这主要由于银蒸汽

较弱的电导率导致。基于这个原因,图6中Murphy计算的纯氮气热导率在第1个峰值处与文中的计算结果必然存在一定差异^[23]。

图7(b)显示了压强变化对 N_2 -10%Ag等离子体热导率的影响。在温度为15 000 K以下,增大的压强减弱了热导率,峰值向高温区移动。这显然是增大压强抑制了分解反应带来的结果。但是当温度高于15 000 K后,压强的增大影响总的热导率增加。这是因为所有成分已完全电离,电子的传输热导率占据主导地位。



(a) 0.1 MPa气压时不同银蒸汽含量对热导率的影响



(b) 压强变化对 N_2 -10%Ag等离子体热导率的影响

图7 N_2 -Ag等离子体热导率

Fig. 7 Conductivity of N_2 -Ag plasmas

5 结论

文中主要研究了压强为0.1、0.4、0.8、1.0 MPa气压,1%、10%、50%银蒸汽比例,温区为300~20 000 K条件下 N_2 -Ag电弧等离子体的热物性参数的演变情况。结果表明:

1)银蒸汽含量增加使质量密度增大,焓值降低,定压比热下降。使电导率增大,粘度、热导率降低。银蒸汽含量增大至50%时对气密继电器等离子体热物性参数有显著影响。

2)在成分完全电离前,增大压强能抑制分解反应和电离反应,有助于抑制电弧。增大压强使电导率降低,热导率下降,但粘度几乎不受影响。完全电离后,增大压强使电导率、粘度、热导率增大。

3)通过与其他文献比较,计算数据得到有效性

验证,可以应用于具有银触头的气密继电器电弧等离子体的仿真建模。

参考文献:

- [1] 马跃,邓杰,孟彦辰,等.不同负载条件下航天继电器接触失效机理分析[J].低压电器,2013(23):14-19.
MA Yue,DENG Jie,MENG Yanchen,et al.Analysis of contact failure mechanism of aerospace relays[J]. Low Voltage Apparatus,2013(23):14-19.
- [2] 臧春艳,何俊佳,程礼椿.平衡态和非平衡态等离子体的微观模型研究[J].高压电器,2005,41(6):416-419.
ZANG Chunyan,HE Junjia,CHENG Lichun.Study on microcosmic models of equilibrium and non-equilibrium plasma[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(6):416-419.
- [3] 林莘,王亮,徐建源,等.非平衡态双温度 SF_6 等离子体电弧数学模型研究[J].高压电器,2015,51(3):1-7.
LIN Xin,WANG Liang,XU Jianyuan,et al.Non-equilibrium dual temperature SF_6 plasma arc mathematical model research[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(3):1-7.
- [4] 舒胜文,黄道春,阮江军.真空开关电弧开断过程的数值仿真方法研究进展[J].高压电器,2014,50(2):131-138.
SHU Shengwen,HUANG Daochun,RUAN Jiangjun.Review of numerical simulation methods for arc interruption process of vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(2):131-138.
- [5] 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.
- [6] WANG Xiaohua,ZHONG Linlin,CRESSAULT Y,et al. Thermophysical properties of SF_6 -Cu mixtures at temperatures of 300~30,000 K and pressures of 0.01~1.0 MPa: Part 2. Collision integrals and transport coefficients[J]. Journal of Physics D-Applied Physics,2014,47(49):495201-495216.
- [7] 袁端磊,张一茗,穆广祺,等.铜蒸气浓度对 SF_6 -Cu高温电弧物性参数的影响[J].高压电器,2016,52(4):123-127.
YUAN Duanlei,ZHANG Yiming,MU Guangqi,et al.Influence of copper concentration on physical property parameters of high-temperature SF_6 -Cu arc[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(4):123-127.
- [8] AUBRETON J,ELCHINGER M F,ANDRÉ P.Influence of partition function and interaction potential on transport properties of thermal plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2013,33(1):367-399.
- [9] AUBRETON J,ELCHINGER M F,ANDRÉ P.Influence of

- partition function and interaction potential on transport properties of thermal plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2013, 33(1): 367-399.
- [10] WANG W Z, WU Y, RONG M Z, et al. Theoretical computation of thermophysical properties of high-temperature F_2 , CF_4 , C_2F_2 , C_2F_4 , C_2F_6 , C_3F_6 and C_3F_8 plasmas[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2012, 45(28): 285201.
- [11] YANG A, LIU Y, SUN B, et al. Thermodynamic properties and transport coefficients of high-temperature CO_2 thermal plasmas mixed with C_2F_4 [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2015, 48(49): 495202.
- [12] COUFAL O, ŽIVNÝ O. Composition and thermodynamic properties of thermal plasma with condensed phases[J]. The European Physical Journal D, 2011, 61(1): 131-151.
- [13] BONNIE J, MCBRIDE M J Z, GORDON S. NASA glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species [R]. Washington DC: NASA, 2002.
- [14] LARICCHIUTA A, COLONNA G, BRUNO D, et al. Classical transport collision integrals for a lennard-jones like phenomenological model potential[J]. Chemical Physics Letters, 2007, 445(4/6): 133-139.
- [15] RUSSELL D. NIST computational chemistry comparison and benchmark database, NIST standard reference database number 101 release 16a[EB/OL]. <http://cccbdb.nist.gov/>, 2015-01-01.
- [16] ANDRÉ P, BUSSIÈRE W, ROCHETTE D. Transport coefficients of Ag-SiO₂ plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2007, 27(4): 381-403.
- [17] CAPITELLI M, GORSE C, LONGO S, et al. Collision integrals of high-temperature air species[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2000, 14(2): 259-268.
- [18] CRAWFORD C K. Electron-Impact ionization cross sections for silver[J]. The Journal of Chemical Physics, 1967, 47(11): 4667.
- [19] ROBINSON L B. Elastic scattering of low-energy electrons by atomic nitrogen and atomic oxygen[J]. Physical Review, 1957, 105(3): 922-927.
- [20] TABATA T, SHIRAI T, SATAKA M, et al. Analytic cross sections for electron impact collisions with nitrogen molecules[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2006, 92(3): 375-406.
- [21] DEVOTO R S. Simplified expressions for the transport properties of ionized monatomic gases[J]. Physics of Fluids, 1967, 10(10): 2105.
- [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): 113502.
- [23] MURPHY A B. Transport coefficients of plasmas in mixtures of nitrogen and hydrogen[J]. Chemical Physics, 2012, 398(1): 64-72.

翟子楠(1975—),男,副教授,主要从事电气检测技术方面工作。

(上接第 68 页)

- flows: The fundamentals of computational fluid dynamics [M]. Linacre House: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [17] POZRIKIDIS C. Fluid dynamics: Theory, computation, and numerical simulation[M]. US: Springer Science & Business Media, 2009.
- [18] 郝艳捧, 薛艺为, 阳 林, 等. 复合绝缘子不同部位水滴撞击特性及其影响因素[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1366-1372.
- HAO Yanpeng, XUE Yiwei, YANG Lin, et al. Characteristics of different parts of composite insulators impacted by water droplets and its influencing factors[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1366-1372.
- [19] BOURIS D, PAPADAKIS G, BERGELES G. Numerical evaluation of alternate tube configurations for particle deposition rate reduction in heat exchanger tube bundles[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(5): 525-536.
- [20] MORSE Y S, TU J Y, YEOH G H, et al. Principal characteristics of turbulent gas-particulate flow in the vicinity of single tube and tube bundle structure[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(15): 3141-3157.
- [21] 屠幼萍, 孙佑飞, 彭庆军, 等. 雾霾环境下自然积污绝缘子的污秽颗粒粒径分布特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3318-3326.
- TU Youping, SUN Youfei, PENG Qingjun, et al. Particle size distribution characteristics of naturally polluted insulators under the fog-haze environment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3318-3326.
- 律方成(1963—),男,博士,教授,博导,研究方向为高压与绝缘技术、电气设备在线监测与故障诊断。