

真空断路器铜铬金属蒸气等离子体非局部热力学平衡态物性参数分析

杨赫¹ 徐晶¹ 柯贤杨¹ 岳洋² 郑悦² 史红菲³ 郑佳圆³ 刘晓明^{3*}

(1. 国网天津市电力公司经济技术研究院 天津 300160; 2. 国网天津市电力公司 天津 300160;
3. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 河北工业大学电气工程学院 天津 300401)

Analysis of Physical Properties Parameters of CuCr Metal Vapor Plasma under Non-Local Thermodynamic Equilibrium State for Vacuum Circuit Breaker

YANG He¹, XU Jing¹, KE Xianyang¹, YUE Yang², ZHENG Yue²,
SHI Hongfei³, ZHENG Jiayuan³, LIU Xiaoming^{3*}

(1. Economic Technology Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300160, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300160, China; 3. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, School of Electrical Engineering, Tianjin 300401, China)

Abstract In the large current-breaking process of the DC vacuum circuit breaker, the metal vapor arc plasma generated in the vacuum interrupter is closely related to the material properties of the contact electrode. In order to study the variation of metal vapor plasma physical properties parameters in the process of breaking, the non-local thermodynamic equilibrium model of vacuum arc plasma was established to obtain the composition distribution of particles of metal vapor plasma of CuCr25~CuCr75 contact. Moreover, using the statistical thermodynamic method, the thermodynamic parameters of metal vapor plasma were calculated, and the distribution of specific enthalpy and isobaric specific heat capacity with different alloy ratios were illustrated. Furthermore, the Chapman-Enskog method was used to calculate the transport parameters to investigate the effect of alloy ratio on the conductivity.

Keywords Vacuum circuit breaker, CuCr contact electrode, Conductivity

摘要 真空断路器在大电流故障开断过程中,以真空为介质条件的灭弧系统内所产生的金属蒸气电弧等离子体组氛与电极材料特性密切相关。为了研究开断过程中金属蒸气等离子体物性参数的变化,以真空断路器 CuCr25~CuCr75 触头电极材料为研究对象,建立非局部热力学平衡模型,研究铜铬合金不同配比下金属蒸气等离子体粒子组氛分布。采用统计热力学方法求得等离子体热力学参数,分析不同合金配比下比焓和比定压热容分布;利用 Chapman-Enskog 法计算等离子体输运参数,探究铜铬合金材料对比对电导率的影响。

关键词 真空断路器 铜铬触头 电导率

中图分类号: TM561 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202305013

真空断路器作为新一代电力系统中涉及新材料、新结构、新机理和新制备技术的环境友好型开关电器装备,其服役状态是所在电力系统安全、稳定与可靠运行的关键。真空断路器在中压开关领域占有绝对优势,系统电压等级和容量的提高,对

真空断路器故障开断性能和动静态绝缘能力提出了更高要求^[1-2]。触头电极是形成极间真空金属蒸气电弧等离子体的源头,而且等离子体组氛与触头电极材料的组成与配比密切相关。

铜铬合金材料的出现提高了抗熔焊与介质恢

复能力之间的平衡点。在真空断路器灭弧系统的应用中,铜铬合金材料具有导电率高、截流值低及机械强度高的特点,更易开断大电流且提高了耐受电压的能力。Cu组元熔点低、导电率和热导率高;Cr组元熔点较高,截流值较低,但机械强度高。近年来,国内外研究者针对铜铬合金触头电极材料配比性能影响方面开展了相关研究工作。对于Cu电极,主要通过光学发射光谱法^[3-4]、静电探针法^[5]和干涉测量法^[6]实现真空电弧电子数密度测量;而对于Cu基电极和铜铬电极来说,可以通过激光诱导荧光光谱法^[7]和激光吸收法^[8]实现真空电弧金属蒸气密度的测定。刘志远等^[9]对配用CuCr25、CuCr50、全武合金三种触头材料的真空断路器进行雷电冲击试验,分析了工频升压速度对触头材料绝缘特性的影响。修士新等^[10]开展了真空断路器铜铬触头材料对其耐压性能和分断能力的影响研究。Rieder等^[11]研究表明触头电极中Cr含量在25%~75%范围变化时,断路器平均截流值与触头中Cr含量无关,但触头本体电阻与表面接触电阻均随着Cr含量的上升而增加。汪丽丽等^[12]研究表明随着Cr含量增加,铜铬致密度和电导率不断下降,布氏硬度及抗弯强度不断提高。

在真空断路器开断过程中等离子体物性参数计算方面,Liu等^[13]以CuCr50触头电极真空断路器开关电弧为研究对象,建立了Eindhoven微观电弧模型,分析了真空电弧等离子体输运特性与粒子数密度。Jia等^[14]建立了局部平衡态等离子体模型,研究了Cu基触头和不同气体介质等离子体物性参数分布变化。Wang等^[15]基于最小吉布斯自由焓理论模型,得到了不同温度下SF₆-PTFE-Cu气体混合物组成,当铜的摩尔分数超过10%时,热力学性质和输运系数将发生显著变化。金属蒸气等离子体组氛分析过程中,当处于局部热力学平衡态时,Potapov模型与Eindhoven模型计算结果误差较小;但当处于非局部热力学平衡态时,Potapov模型计算结果误差较大^[16]。通过对CuCr50在局部热力学平衡态和非局部热力学平衡态粒子组氛计算与分析,发现非局部热力学平衡态更能真实反映真空介质金属蒸气等离子体的动力学行为^[17]。

基于上述分析,本文从微观角度出发,以真空断路器CuCr25~CuCr75电极材料为研究对象,建立非局部热力学平衡态Eindhoven模型,求得铜铬合金不同配比、不同温度下等离子体组氛与输运参数,

分析粒子数密度随温度变化规律,探究铜铬合金配比对开断性能的影响。

1 金属蒸气粒子组氛与参数化计算模型

为探究金属蒸气等离子体物性参数,从微观角度出发,提出如下分析路线:

Step1. 假设极间所有组氛均为气态;铜铬金属蒸气等离子体中各元素比例预先设定为常数;忽略痕量杂质组氛。

Step2. 采用Eindhoven模型,计算配分函数,求解铜铬合金触头电极不同配比下等离子体粒子组氛。

Step3. 采用统计热力学方法计算热力学参数,计算粒子碰撞积分。

Step4. 采用Chapman-Enskog方法,求解Boltzmann方程,求得铜铬合金不同配比、不同温度下电弧等离子体输运特性。

1.1 非局部热力学平衡态粒子组氛计算模型

Eindhoven模型基于电荷准中性条件、化学计量平衡条件、道尔顿分压定律和质量作用定律(电离反应程(Saha方程): $L_r \rightarrow L_{r+1} + e$;解离方程(Guldberg-Waage方程)),描述如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \sum_i P_i \\ \frac{n_{r+1} n_e}{n_r} = \frac{2Z_{r+1}}{Z_r} \cdot \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-\frac{E_i - \Delta E_i}{kT}} \\ \frac{n_A n_B}{n_{AB}} = \frac{Z_A Z_B}{Z_{AB}} \cdot \left(\frac{2\pi m_A m_B kT}{m_{AB} h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_D}{kT}} \\ \sum_i \sum_j j n_{ij}^+ = n_e^- + \sum_i n_i^- \\ \sum_j n_s \Big| \sum_m n_p = C \\ P_i = k n_i T \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, k , h 和 P 分别为玻尔兹曼常数,普朗克常数和金属蒸气压; n_{r+1} 和 n_r 分别为 L_{r+1} , L_r 的数密度; Z_{r+1} 和 Z_r 分别为 L_{r+1} , L_r 的配分函数; m_e 为电子质量; n_e 为电子数密度; E_i 为电离能;电离能下降值为 $\Delta E_i = \frac{(r)e^2}{(4\pi\epsilon_0\lambda_D)}$; ϵ_0 为真空介电常数; λ_D 为德拜长度; L_r 带电荷数为 r ;粒子 i 带电荷数为 z_i ; C 为常数; T 为介质温度。

真空断路器在大电流故障开断过程中,金属蒸气电弧等离子体的发生、发展、逸散与熄弧全过程均伴随着复杂的物理化学过程;等离子体中包含大量的重粒子和电子;粒子碰撞过程中,因电子质量很小,使得电子温度 T_e 远高于重粒子温度 T_h ,即,金属蒸气电弧等离子体处于非平衡态。

定义: 以 $\theta = T_e/T_h$ 定义非局部平衡系数, 描述电弧等离子体偏离平衡态的程度, 推得电离和解离方程。

解离方程:

$$\frac{n_a n_b}{n_c} = \frac{Z_a^* Z_b^*}{Z_c^*} \cdot \left(\frac{2\pi k T_h}{h^2} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_a m_b}{m_c} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_c^d}{k T_h}\right) \quad (2)$$

电离方程:

$$n_e \left[\frac{n_{a^{(z+1)^+}}}{n_{a^{z^+}} \right] = 2 \left[\frac{Z_{a^{(z+1)^+}^*}}{Z_{a^{z^+}^*}} \right]^{\frac{1}{\theta}} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_i - \Delta E_i}{k T_{ex}}\right) \quad (3)$$

1.2 金属蒸气等离子体热力学参数计算模型

金属蒸气电弧等离子体热力学参数主要包括质量密度、比焓与比定压热容等。

质量密度:

$$\rho = \sum_l n_l m_l \quad (4)$$

式中, 粒子种类数为 l , 粒子数密度与质量分别为 n_l 和 m_l 。

金属蒸气等离子体焓值:

$$H = \sum_l n_l \bar{H}_l \quad (5)$$

式中, \bar{H}_l 为粒子 l 摩尔焓。

粒子摩尔焓由摩尔生成焓、平动摩尔焓与内部摩尔焓构成:

$$\bar{H}_l = \bar{H}_l^r + \bar{H}_l^{\text{int}} + \bar{H}_l^f \quad (6)$$

平动摩尔焓与粒子种类无关, 各组元平动摩尔焓相同, 即:

$$\bar{H}_l^r = \frac{5}{2} RT \quad (7)$$

式中, R 为理想气体常数。

内部生成焓由粒子配分函数决定, 即:

$$\bar{H}_l^{\text{int}} = RT \frac{\partial \ln Z}{\partial \ln T} \quad (8)$$

粒子摩尔生成焓是粒子的特性参数, 可以从 CRC 手册与 NIST-JANAF 数据库中获得。

系统比焓:

$$h = \frac{\sum_l n_l H_l}{\sum_l n_l M_l} \quad (9)$$

式中, M_l 为粒子 l 的摩尔质量。

比焓与比定压热容的微分关系:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (10)$$

1.3 金属蒸气等离子体输运参数的计算

采用流体模型分析时, 电子输运性质通常由 Boltzmann 方程来描述。

假设: 两粒子碰撞前满足粒子混沌; 粒子间相互作用分为中性粒子-中性粒子、离子-中性粒子、电子-中性粒子与带电粒子间相互碰撞四种类型。

利用 Chapman-Enskog 方程将 Boltzmann 方程展开, 可求得电导率输运系数。

电子扩散系数:

$$[D_{ee}]_4 = \frac{3n_e \rho}{2nm_e} e^2 \frac{\sqrt{2\pi k T / m_e}}{|q|} \begin{vmatrix} q^{11} & q^{12} & q^{13} \\ q^{21} & q^{22} & q^{23} \\ q^{31} & q^{32} & q^{33} \end{vmatrix} \quad (11)$$

式中, e 代表电子电荷; $\begin{vmatrix} q^{11} & q^{12} & q^{13} \\ q^{21} & q^{22} & q^{23} \\ q^{31} & q^{32} & q^{33} \end{vmatrix}$ 是碰撞积分矩阵, $|q|$ 为删去末行和末列的矩阵行列式。

忽略重粒子影响的电导率:

$$\sigma = \frac{e^2 n_e n m_e}{\rho k T} D_{ee} \quad (12)$$

Schellekens 研究了真空灭弧室纵磁触头结构下金属蒸气等离子体热力学参数, 温度为 2000 K 时, 蒸气密度为 $0.39 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ^[18]; 在相同温度下, 采用本文模型求得蒸气密度为 $0.48 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$; 验证了本文计算方法的有效性和可行性。

2 等离子体粒子组元与物性参数计算与分析

2.1 金属蒸气等离子体输运参数计算

以真空断路器开断故障电流所形成的金属蒸气等离子体为研究对象, 考虑 13 种粒子: 电子, Cr, Cu, Cu^+ , Cr^+ , Cu^- , Cr^- , Cu^{2+} , Cr^{2+} , Cu^{3+} , Cr^{3+} , Cu^{4+} , Cr^{4+} ; 忽略其他少量粒子。

假设: 非平衡系数为 1; 金属蒸气压为 1Torr, 即 133.32 Pa; 基于等离子体微观粒子模型, 自编程序求解非线性方程组, 得到 CuCr25、CuCr50、CuCr75 三种电极材料粒子数密度随温度的变化情况, 如图 1 所示。

以 CuCr50 为例, 分析如下:

(1) 电子数密度变化情况

2000 K 时, 电子数密度约为 $3.48 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$; 6950 K 时, 电子数密度达最大值, 约 $6.44 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 随着温度升高, 20000 K 时, 电子数密度逐渐降至 $2.42 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。

(2) Cu^- 数密度与 Cr^- 数密度变化情况

2000 K 时, Cu^- 粒子数密度约为 $1.07 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$, Cr^- 粒子数密度约为 $2.96 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$; 4700 K 时, Cu^- 数

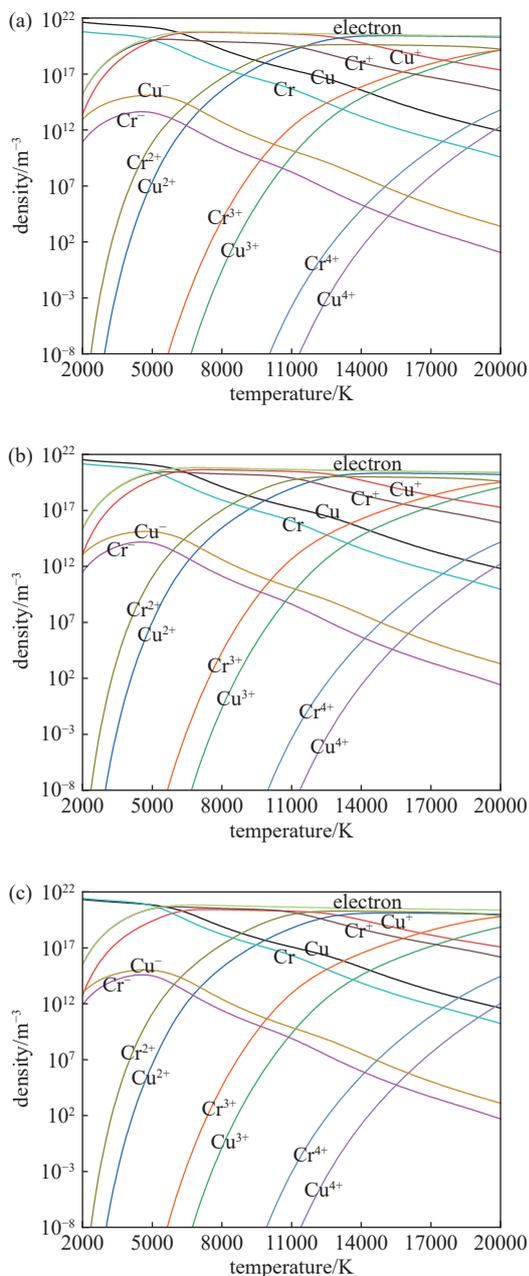


图1 不同电极材料粒子组氛随温度的变化。(a) CuCr25, (b) CuCr50, (c) CuCr75

Fig. 1 Variation of particle composition with different electrode materials under different dielectric temperatures. (a) CuCr25, (b) CuCr50, (c) CuCr75

密度达最大值, 约 $1.32 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$; 4550 K 时, Cr^- 数密度达最大值, 约 $1.51 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 。

随介质温度升高, Cu^- 、 Cr^- 数密度减少, Cr^- 数密度一直小于 Cu^- 数密度。这是由于 Cr 电子亲和势小于 Cu 电子亲和势, Cr 比 Cu 更加难以获取电子。

(3) Cu 和 Cr 粒子数密度变化情况

2000 K 时, Cu 和 Cr 粒子数密度呈减少趋势,

Cr 比 Cu 减少程度更为剧烈, 这是由于 Cu 的一次电离势和二次电离势比 Cr 的一次电离势和二次电离势更大。

(4) Cu^+ 和 Cr^+ 粒子数密度变化情况

6700~12950 K 区间, Cu^+ 粒子数密度达到最大值; 5000~11000 K 区间, Cr^+ 粒子数密度达到最大值。在此区间内, Cu^+ 和 Cr^+ 粒子数密度之所以变化不大是由于虽然有一部分电离成 Cu^{2+} 、 Cr^{2+} , 但 Cu、Cr 也在不断电离使得 Cu^+ 、 Cr^+ 的粒子数增加。大于 12950 K 时, Cu^+ 数量快速下降; 大于 11000 K 时, Cr^+ 数量快速下降。

(5) Cu^{2+} 和 Cr^{2+} 粒子数密度变化情况

2400 K 时, Cr^{2+} 粒子数密度开始增加, 15200 K 时达到最大值, 约 $2.09 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 3000 K 时, Cu^{2+} 粒子数密度开始增加; 13150 K 时达到最大值, 约 $1.03 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。

Cr^{2+} 在 12550~14100 K, 一直在 10^{20} 数量级, 这是由于一方面 Cr^- 、Cr、 Cr^+ 不断吸收能量转化为 Cr^{2+} , 另一方面 Cr^{3+} 、 Cr^{4+} 不断失去能量变为 Cr^{2+} , 处于动态平衡。

(6) Cu^{3+} 和 Cr^{3+} 粒子数密度变化情况

Cr^{3+} 粒子数密度在 5700 K 以上开始增加; Cu^{3+} 粒子数密度在 6700 K 以上开始增加。18450~20000 K 时, Cr^{3+} 粒子数密度一直在 10^{19} 数量级; 19900~20000 K 时, Cu^{3+} 粒子数密度一直在 10^{19} 数量级。

(7) Cu^{4+} 和 Cr^{4+} 粒子数密度变化情况

Cr^{4+} 粒子数密度在 11450 K 以上开始迅速增加; Cu^{4+} 粒子数密度在 10000 K 以上开始迅速增加。随着介质温度的增加, Cu^{4+} 和 Cr^{4+} 粒子数密度增大率增大, 随后占据主导地位。

θ 为 1.5 时, 不同电极材料的电子数密度随真空介质温度的变化情况如图 2 所示。以 CuCr25 为例, 当介质温度为 6800 K, 电子数密度到达峰值, 约 $5.48 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 当介质温度由 6800 K 增至 12200 K 时, 电子数密度下降至 $3.48 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 当介质温度由 12200 K 增至 14100 K 时, 电子数密度增加至 $3.80 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$; 当介质温度由 14100 K 增至 20000 K 时, 电子数密度下降至 $2.79 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。当介质温度为 3000~7000 K 或 10000~14000 K 时, 随着 Cr 含量的增加, 电子数密度随之增加; 而当介质温度小于 3000 K 或 7000~10000 K 或大于 14000 K 时, Cr 含量对于电

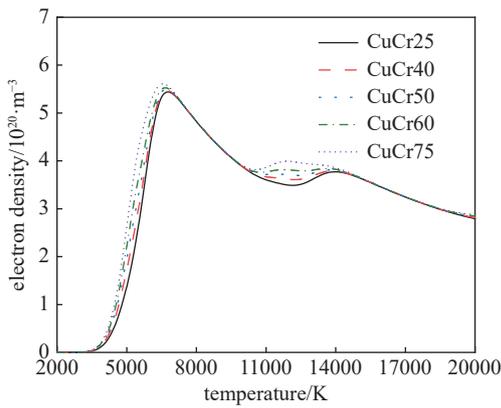


图2 不同电极材料的电子数密度随介质温度的变化

Fig. 2 Variation of the electron density with different electrode materials under different dielectric temperatures

子数密度的影响较小。

电极材料为 CuCr50, 不同 θ 时, 电子数密度随介质温度的变化情况如图 3 所示。随着 θ 增大, 电子数密度随之减小; 随着介质温度增加, θ 对电子数密度的影响度值呈现先增大后减小的趋势。

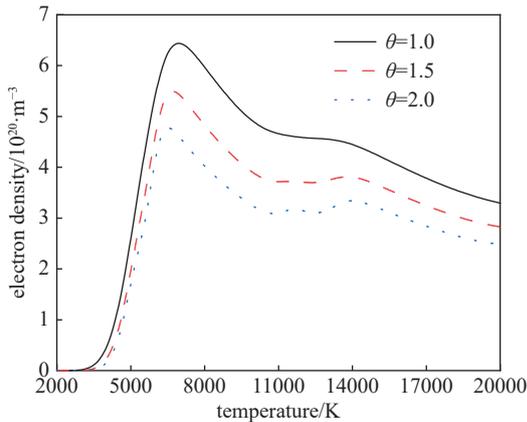


图3 不同 θ 时 CuCr50 电子数密度随介质温度的变化情况

Fig. 3 Variation of electron density with different θ for CuCr50 under different dielectric temperatures

2.2 金属蒸气等离子体热力学参数计算与分析

依据粒子组氮变化规律, 基于热力学参数计算模型, 求得 θ 为 1.5 时铜铬合金不同配比下混合金属蒸气等离子体热力学参数, 如图 4 所示; 不同 θ 时 CuCr50 金属蒸气电弧等离子体热力学参数, 如图 5 所示。

由图 4 可知, 比焓随 Cr 含量的增加而增加。当介质温度为 2000~5650 K、8600~12300 K 或 16600~20000 K 时, 比定压热容随 Cr 含量的增加而增加; 当介质温度为 5650~8600 K 或 12300~16600 K 时,

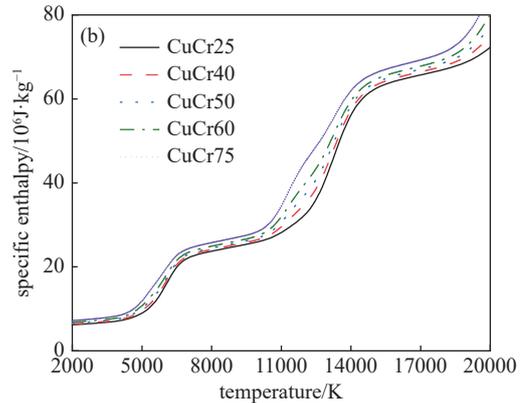
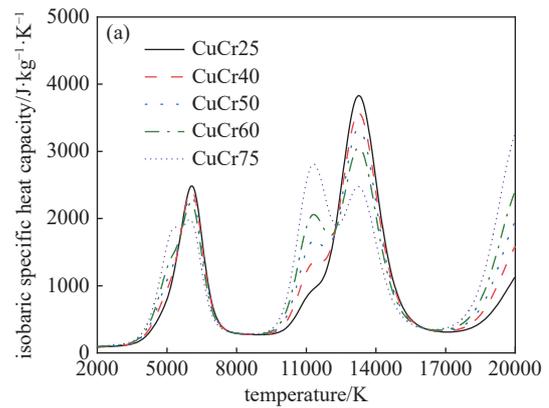


图4 不同电极材料下金属蒸气等离子体热力学参数分布。

(a) 比定压热容随温度的变化, (b) 比焓随温度的变化

Fig. 4 Distribution of metal vapor plasma thermodynamic parameters under different proportions of CuCr alloy. (a) Variation of isobaric specific heat capacity with temperature, (b) variation of specific enthalpy with temperature

比定压热容随 Cr 含量的增加而降低。

由图 5 可知, 当介质温度为 4100~6400 K、10800~11550 K、12650~14300 K、19500~20000 K 时, 比定压热容随 θ 的增加而增加; 当介质温度为 2000~4100 K、6400~10800 K、11550~12650 K、14300~19500 K 时, 比定压热容随 θ 的增加而降低。当介质温度为 5000~7900 K、9500~13550 K、13700~16850 K 时, 比焓随 θ 的增加而增加; 当介质温度为 2000~5000 K、7900~9500 K、13550~13700 K、16850~20000 K 时, 比焓随 θ 的增加而降低。

2.3 金属蒸气等离子体输运参数计算与分析

基于金属蒸气等离子体输运参数计算模型, 求得 θ 为 1.5 时铜铬合金不同配比下等离子体电导率分布, 如图 6 所示。当介质温度为 10350~13900 K 时, 金属蒸气等离子体电导率随 Cr 含量的增加而增

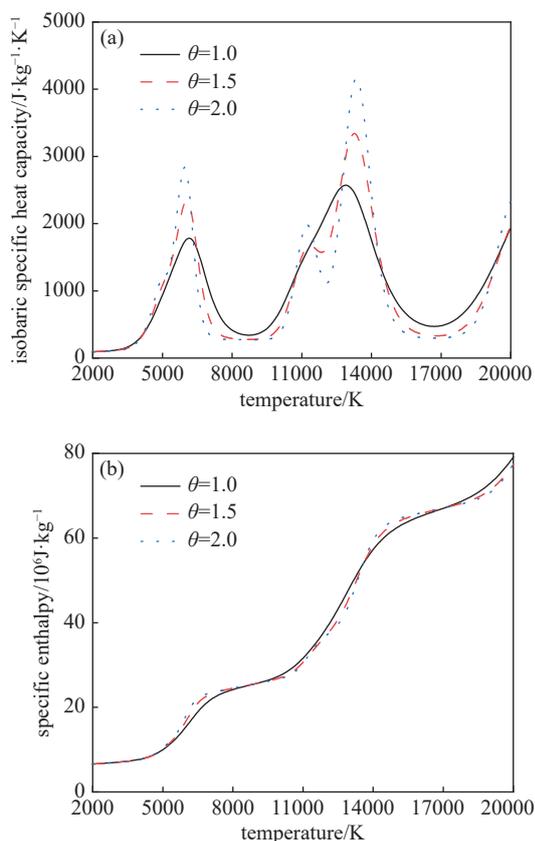


图5 不同 θ 时 CuCr50 金属蒸气电弧等离子体热力学参数。
(a) 比定压热容随温度的变化, (b) 比焓随温度的变化

Fig. 5 Distribution of metal vapor plasma thermodynamic parameters under different θ of CuCr50 (a) Variation of isobaric specific heat capacity with temperature, (b) variation of specific enthalpy with temperature

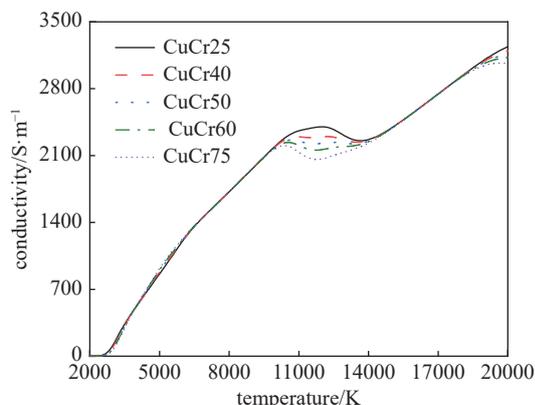


图6 不同电极材料下等离子体电导率

Fig. 6 Variation of plasma conductivity with different electrode materials

加; 当介质温度为 2000~10350 K、13900~20000 K 时, Cr 含量对金属蒸气等离子体电导率的影响较小。

不同 θ 时 CuCr50 金属蒸气等离子体电导率分

布, 如图 7 所示。当介质温度为 2000~20000 K 时, θ 对金属蒸气等离子体电导率的影响较小。

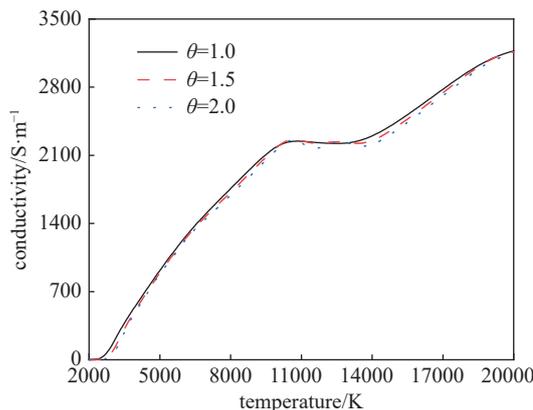


图7 不同 θ 时 CuCr50 等离子体电导率

Fig. 7 Variation of plasma conductivity with different θ of CuCr50

3 结论

以真空断路器铜铬合金触头电极材料为研究对象, 建立金属蒸气等离子体非局部热力学平衡模型, 求得了粒子组氛与物性参数。

(1) 当介质温度为 2000~20000 K 时, 电子数密度随着 θ 的增大而减小。当介质温度为 3000~7000 K、10000~14000 K 时, 电子数密度随 Cr 含量的增加而增加。

(2) 比定压热容的峰值对应一次、二次和三次电离反应, 比焓随 Cr 含量的增加而增加。

(3) 当介质温度为 10350~13900 K 时, 电导率随 Cr 含量的增加而减小。

参 考 文 献

[1] Geng Y X, Liu X M, Chen H, et al. Simulation analysis of the post-arc sheath development process for the vacuum circuit breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(7): 626-631 (耿钰翔, 刘晓明, 陈海, 等. 真空断路器弧后鞘层发展过程仿真分析[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(7): 626-631 (in Chinese))

[2] Liu X M, Shi H F, Chen H, et al. Analysis of the influence factors of post-arc dielectric recovery on DC vacuum circuit breaker[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 40-47 (刘晓明, 史红菲, 陈海等. 直流真空断路器弧后介质恢复特性影响因素分析[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 40-47 (in Chinese))

[3] Kaneda T, Kaneko E, Yanabu S, et al. The characteristics

- of vacuum arcs with magnetic fields parallel to its columns[J]. *Physica B+C*, 1981, 104(1-2): 124-129
- [4] García L A, Restrepo E, Jiménez H, et al. Diagnostics of pulsed vacuum arc discharges by optical emission spectroscopy and electrostatic double-probe measurements[J]. *Vacuum*, 2006, 81(4): 411-416
- [5] Arai K, Takahashi S, Morimiya O, et al. Probe measurement of residual plasma of a magnetically confined high-current vacuum arc[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, 31(5): 929-933
- [6] Boxman R L. Interferometric measurement of electron and vapor densities in a high - current vacuum arc[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(11): 4835-4846
- [7] Lins G, Paulus I, Pohl F, et al. Neutral copper vapor density and electric recovery after forced extinction of vacuum arcs[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1989, 17(5): 676-678
- [8] Takahashi S, Arai K, Morimiya O, et al. Laser measurement of copper vapor density after a high-current vacuum arc discharge in an axial magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(5): 1519-1526
- [9] Zhang Y Y, Liu Z Y, Geng Y S, et al. Dielectric performances of vacuum interrupter using a new contact material-*quanwu* alloy[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(8): 1914-1919 (张颖瑶, 刘志远, 耿英三, 等. 采用全武合金触头材料真空断路器灭弧室的绝缘特性 [J]. *高压技术*, 2009, 35(8): 1914-1919 (in Chinese))
- [10] Xiu S X, Zou J Y, He J J. Effect of micro properties of CuCr contact material on macro performance[J]. *High Voltage Apparatus*, 2000, 3: 40-42 (修士新, 邹积岩, 何俊佳. CuCr 触头材料微观特性对其宏观性能的影响 [J]. *高压电器*, 2000, 3: 40-42 (in Chinese))
- [11] Rieder W F, Schusseck M, Glatzle W, et al. The influence of composition and Cr particle size of Cu/Cr contacts on chopping current, contact resistance, and breakdown voltage in vacuum interrupters[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1989, 12(2): 273-283
- [12] Wang L L. Study on arc erosion performance of CuCr electrical contact materials in different atmospheres[D]. Hefei University of Technology, 2022 (汪丽丽. 不同气氛下 CuCr 电接触材料电弧烧蚀性能研究 [D]. 合肥工业大学, 2022 (in Chinese))
- [13] Liu X, Li Z, Cao Y, et al. Research on transport properties of the metal vapor vacuum arc, 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, Xi'an, China, 2011: 94-98
- [14] Jia B, Fan H, Liu X, et al. Analysis of physical parameters of CuCr metal vapor arc plasma for vacuum circuit breaker, 2023 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), Tianjin, China, 2023: 1-2
- [15] Wang Z, Wang S, Li Q, et al. Calculation of thermodynamic properties and transport coefficients of SF₆-PTFE-Cu mixtures[C]. 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022: 1-4
- [16] Zang C Y, He J J, Cheng L C. Study on microcosmic models of equilibrium and non-equilibrium plasma[J]. *High Voltage Apparatus*, 2005, 41(6): 416-419 (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 (in Chinese))
- [17] Liu X, Lin H, Cao Y, et al. Research on non-equilibrium composition solution of vacuum arc plasma[J]. *Proceedings International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum*, 2008, 2: 310-313
- [18] Schellekens H, Schulman M B. Contact temperature and erosion in high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 29(3): 452-461