第 50 卷 第 11 期：4951-4960　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 4951-4960
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231537

铜蒸气对密封直流接触器氢-氮混合气体电弧特性的影响

程　显[1,2]，张钰峥[1,2]，葛国伟[1,2]，秦　聪[1,2]，陈鸿源[1,2]
（1. 郑州大学电气工程学院，郑州 450001；
2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心，郑州 450001）

摘　要：密封直流接触器开断过程电弧烧蚀触头产生的铜蒸气对氢-氮混合气体电弧特性及开断性能具有重要作用。依据平衡态等离子体理论计算出铜蒸气不同占比的氢-氮混合气体的各项物性参数，引入铜蒸气影响，建立了基于磁流体动力学理论的氢-氮混合气体电弧模型，系统研究了铜蒸气在混合气体中占比及分布规律对燃弧特性、电弧发展演变特性等的影响规律。基于可拆卸腔体开展了实验验证，750 V/250 A 密封直流接触器实验中电弧重击穿概率、熄弧时间变化等规律与理论分析结果基本相符，验证了铜蒸气对燃弧特性的影响。研究表明：随着铜蒸气在混合气体中占比提高，燃弧过程电弧温度缓慢降低，熄弧时间逐步提高，重击穿概率增大，且铜蒸气不均匀分布比均匀分布熄弧时间有所降低。研究结果为混合气体直流燃弧特性和高可靠性密封直流接触器优化设计提供理论参考。

关键词：密封直流接触器；铜蒸气；氢-氮混合气体；电弧；燃弧特性

Effect of Copper Vapour on the Arc Characteristics of Hydrogen-nitrogen Gas Mixtures in Sealed DC Contactors

CHENG Xian[1,2], ZHANG Yuzheng[1,2], GE Guowei[1,2], QIN Cong[1,2], CHEN Hongyuan[1,2]
(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission & Distribution Equipment and Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The copper vapor generated by the arc ablation contact during the opening process of sealed DC contactors plays an important role in the arc characteristics and opening performance of the hydrogen-nitrogen gas mixture. In this paper, the physical parameters of the hydrogen-nitrogen gas mixture with different percentages of copper vapor are calculated based on the equilibrium plasma theory, and the influence of copper vapor is introduced to establish an arc model of hydrogen-nitrogen gas mixture based on the magnetohydrodynamic theory, and the influence laws of the copper vapor percentage and distribution law in the gas mixture on the arc ignition characteristics and arc development and evolution characteristics are systematically studied. Based on the disassembled cavity, simulated experiments were carried out to verify the arc re-strike probability and arc extinguishing time in the 750 V/250 A sealed DC contactor experiments, which are basically consistent with the theoretical analysis results. The study shows that, as the proportion of copper vapor in the gas mixture increases, the arc temperature decreases slowly, the arc extinguishing time increases gradually, and the probability of heavy breakdown increases; meanwhile, the uneven distribution of copper vapor decreases compared with the uniform distribution of arc extinguishing time. The results of the study provide theoretical reference for the optimization design of DC arc burning characteristics of mixed gas and highly reliable sealed DC contactors.

Key words: sealed DC contactors; copper vapor; hydrogen-nitrogen gas mixture; arc; burning arc characteristics

---

基金资助项目：国家高层次人才特殊支持计划(SO20220B06966)；国家自然科学基金(52477162；52477163；52107170)；河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2023SJGLX141Y)；郑州大学教育教学改革研究与实践项目(2023ZZUJGXM060)。
Project supported by National Special Support Program for High-level Talents (SQ20220B06966), National Natural Science Foundations of China (52477162, 52477163, 52107170), Research and Practice Project of Higher Education Teaching Reform in Henan Province (2023SJGLX141Y), Research and Practice Project of Education and Teaching Reform of Zhengzhou University (2023ZZUJGXM060).

0 引言

近年来，随着电动汽车、充电桩、储能、光伏发电等直流供电应用迅速发展，直流接触器作为直流供电系统控制的重要设备，高性能经济紧凑直流接触器需求迫切[1-2]。陶瓷密封直流接触器以其体积小、灭弧性能优越等优点，广泛应用，成为直流供电系统控制设备的主流[3]。国内外学者已对充气式直流接触器电弧特性研究做了大量的工作，主要是通过仿真和实验两种手段相结合的方式[4-5]。通过仿真得出电弧的演变机制以及分析其微观特性，再经过实验来验证仿真结果，同时观察电弧的燃弧形态和电弧特性曲线，将两者相结合即可分析多种因素如压强、磁场强度、气体介质等对电弧燃弧特性的影响[6-8]。文献[9-10]分别向密封直流接触器内充空气和氢气作为灭弧介质，经过实验验证得出氢气作为灭弧介质相较于空气灭弧性能更优良。文献[11-12]通过向密封直流接触器内充入氢气和氮气的混合气体作为灭弧介质，得到了在氢气、氮气不同比例下的燃弧图像和特性曲线，并对比了不同比例下的电弧特性。文献[13]向密封直流接触器内充入不同比例的氢-氮混合气体进行电弧特性研究，认为氢气含量越高，电弧越容易发生重击穿。文献[14]通过仿真和实验研究得出，直流电弧重击穿放电的根本原因是弧隙残留的金属蒸气或高温气体在足够高的局部电场强度下发生击穿放电。文献[15]在考虑铜蒸气均匀分布于气体介质的情况下对小电流直流电弧进行了稳态仿真和实验，认为在考虑铜蒸气下仿真得出的电弧电气特性与实验电弧更加拟合。文献[16]在考虑铜触头烧蚀情况下对电弧进行暂态仿真，认为燃弧过程中铜蒸气在触头之间及弧根处浓度最高，其余气域浓度较低，总体呈现不均匀分布。目前铜蒸气在密封直流接触器中对氢-氮混合气体电弧特性的影响研究相对较少，对于其影响机理仍有空白，文献主要集中于通过仿真或实验方法寻找铜蒸气分布规律且仿真分析铜蒸气对稳态电弧特性的影响。而稳态电弧特性并不能很好的反映实际工况中铜蒸气对电弧特性机理作用。因此，有必要对充入氢-氮混合气体的密封直流接触器开展考虑不同占比、不同分布特性铜蒸气对电弧特性的影响研究。

本文以磁流体动力学(magnetohydrodynamic，MHD)为基础，建立 750 V/250 A 密封直流接触器仿真模型，通过耦合多个物理场方程得出铜蒸气在混合气体中不同分布特性、不同占比的电弧演变过程并分析铜蒸气对混合气体电弧的影响机理；搭建实验平台进行实验验证，通过高速摄像机拍摄电弧的燃弧过程及运动特征；将仿真与实验相结合进行对比分析，初步验证了铜蒸气对电弧重击穿、熄弧时间的影响规律，为密封直流接触器中氢-氮混合气体电弧的温度特性、运动特性、电气特性研究提供理论基础，为低重击穿高可靠性密封直流接触器的优化设计提供参考。

1 基于 MHD 的电弧建模

1.1 建立几何模型

本文所研究的密封直流接触器为桥式双断口直流接触器，因其结构对称，为简化仿真模型，在仿真中只搭建其左视图的动、静触头，如图 1 所示。图 1 中计算域为 10 mm×20 mm，静触头高为 2 mm，宽为 8 mm，动触头高为 2 mm，宽为 8 mm。在初始时刻，动触头与静触头之间的间隙设为 0.5 mm。

1.2 多物理场耦合

基于 MHD 电弧模型理论认为，在不考虑单一粒子的运动条件下，电弧等离子体是一种可导电的连续流体介质，它是一种由电场、磁场、热场、流场等多个物理场相互耦合而形成的复杂磁流体[17-18]。因此，该模型的基本控制方程为描述流体运动的 Navier-Stokes 方程和求解电磁场的麦克斯韦方程，将上述两个方程联立求解如下。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\rho\nabla\cdot(\boldsymbol{V})=0 \tag{1}$$

式中：ρ 为密度；t 为时间；$\boldsymbol{V}$ 为电弧等离子体速度矢量。

能量守恒方程：

$$\rho c_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla T\right)-\nabla\cdot(k\nabla T)=Q \tag{2}$$

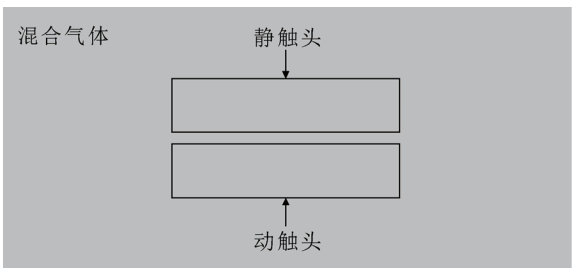


图 1 仿真建模

Fig.1 Simulation modeling

$$Q=\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{5k_{\mathrm{B}}T}{2e}\right)(\nabla T\cdot\boldsymbol{J})+\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J}-Q_{\mathrm{r}} \tag{3}$$

式中：c_{p}为定压比热容；T为热力学温度；k为热导率；Q为等离子体热源；k_{B}为玻耳兹曼常数；e为电子电荷；$\boldsymbol{J}$为电流密度；$\boldsymbol{E}$为电场强度；Q_{r}为总体积辐射系数。

动量守恒方程：

$$\left(\frac{\partial\boldsymbol{V}}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\boldsymbol{V}\right)=\left(-p\boldsymbol{I}+\mu\left(\nabla\boldsymbol{V}+(\nabla\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}}\right)\right)\cdot\nabla+\boldsymbol{F}+\rho\boldsymbol{g} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B} \tag{5}$$

式中：p为压强；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；μ为动力黏度系数；$\boldsymbol{F}$为洛伦兹力；$\boldsymbol{g}$为重力加速度；$\boldsymbol{B}$为磁感应强度。

气体状态方程：

$$p=\rho RT \tag{6}$$

式中：R为理想气体常数。

电磁场控制方程[19]：

$$\begin{cases}\nabla\cdot(-\sigma\nabla\varphi)=0\\ \boldsymbol{E}=-\nabla\varphi-\dfrac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}\\ \boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}\\ \nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}\end{cases} \tag{7}$$

式中：σ为电导率；φ为电位；$\boldsymbol{A}$为磁矢势。

1.3　起始条件和边界条件的设置

该模型分断电压、电流等级分别为750 V、250 A，磁场、温度、压力、热边界条件如下：

1）压力、磁场和温度边界条件

灭弧室初始大气压设为一个大气压；磁场设为约化场，方向朝外，大小为60 mT；灭弧室边界设为热绝缘。

2）热边界条件

等离子体中阳离子加速撞击阴极，并在阴极表面产生热量。随着阴极温度不断升高，其表面进行热电子发射，大量的电子发射导致电极温度温升下降。根据能量守恒，阴极热边界方程为：

$$-\boldsymbol{n}\cdot(-\lambda\nabla T)=-|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}|\phi_{\mathrm{c}}+|\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}|U_{\mathrm{ion}} \tag{8}$$

$$|\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}|=|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}|-|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}| \tag{9}$$

$$|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}|=|J_{\mathrm{R}}(T)| \tag{10}$$

$$J_{\mathrm{R}}(T)=A_{\mathrm{R}}T^{2}\exp\left(-\frac{q\phi_{\mathrm{eff}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right) \tag{11}$$

式中：U_{ion}为等离子体电离电位；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}$为离子电流密度；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}$为电子流密度；$\phi_{\mathrm{c}}$为阴极材料表面功函数；$|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}|$为介面电流密度模；$A_{\mathrm{R}}$为理查德森常数；$\phi_{\mathrm{eff}}$为电极表面有效逸出功。

若阳极没有离子流，则此时只有电子进入阳极表面产生热量，阳极热边界方程为：

$$-\boldsymbol{n}\cdot(-\lambda\nabla T)=|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}|\phi_{\mathrm{s}} \tag{12}$$

式中：ϕ_{s}为阳极材料表面功函数。

1.4　物性参数的计算

目前市面上主流的密封直流接触器其灭弧介质多为氢气或者氢-氮混合物。氢气作为灭弧介质因其较大的导热系数可使电弧快速冷却，从而达到快速熄弧的效果。但因其分子质量较小，在磁场力的作用下，分子运动快、动能大，故更容易碰撞电离，原弧道区介质恢复能力不足而发生了触头区的重击穿，在严重的工况下甚至会发生电弧的重燃。而氮气作为灭弧介质，相比于氢气可以很好的抑制电弧的重击穿和重燃。文献[14]向灭弧室内充入不同比例的氢-氮混合气体并通过实验验证得出在氢-氮比例为3:2时灭弧性能最优，熄灭电弧所需要的时间最短。因此，本文采用氢-氮体积比为3:2的混合气体充当灭弧介质。

在触头分断电弧过程中，由于在750 V/250 A等级下，电弧的温度最高可达到21 000 K，在电弧热和力的作用下，触头材料表面熔化，蒸发出铜蒸气，混入到灭弧介质中。而铜蒸气对于电弧的运动特性有着较大的影响，故有必要在灭弧介质物性参数中考虑到铜蒸气带来的影响。

对于考虑铜蒸气下氢-氮混合气体作为灭弧介质的电弧中，主要考虑11种主要成分：H_2、N_2、H、N、H^+、N^+、N^-、Cu、Cu^+、Cu^{2+}、e。根据文献[20]数据，结合Eindhoven模型，基于LTE状态的等离子，通过Guldberg-Waage(解离)方程和Saha(电离)方程求解粒子组分，再利用Chapman-Enskog方法求解玻耳兹曼方程[16,21]，得到混合气体的输运参数(热导率、电导率、黏度系数、热导率、常压热容等)。在氢-氮体积比为3:2的混合气体中掺入1%铜蒸气的粒子组分如图2所示，不同占比铜蒸气混合气体电弧等离子体的电导率-温度特性曲线如图3所示。由图3可见，在西安交通大学的气体放电等离子体基础数据库中99%N_2-1%Cu的电导率-温度特性曲线与本文计算出的99%N_2-1%Cu的电导率-温度特性曲线基本一致，证明了本文计算混合气体输运参数程序的可靠性和准确性。

在混合气体中铜蒸气的加入使混合气体多项物性参数如质量密度、黏度系数、导热系数、导电

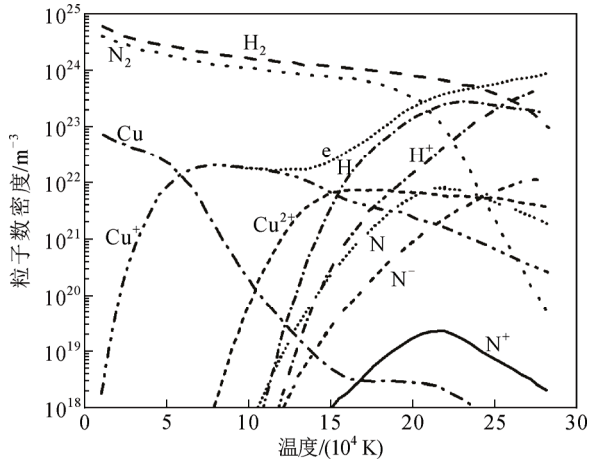


图 2 粒子组分

Fig.2 Particle fraction

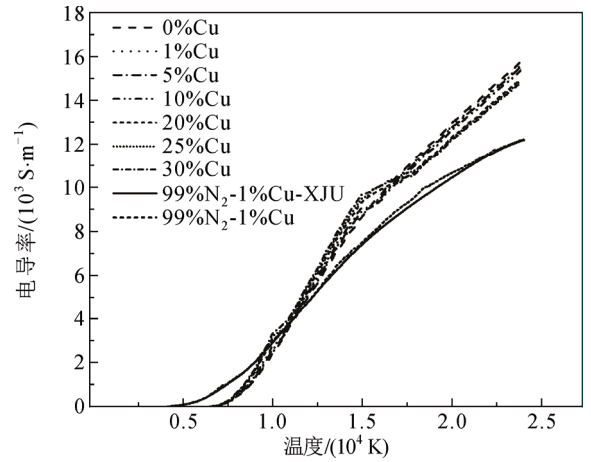
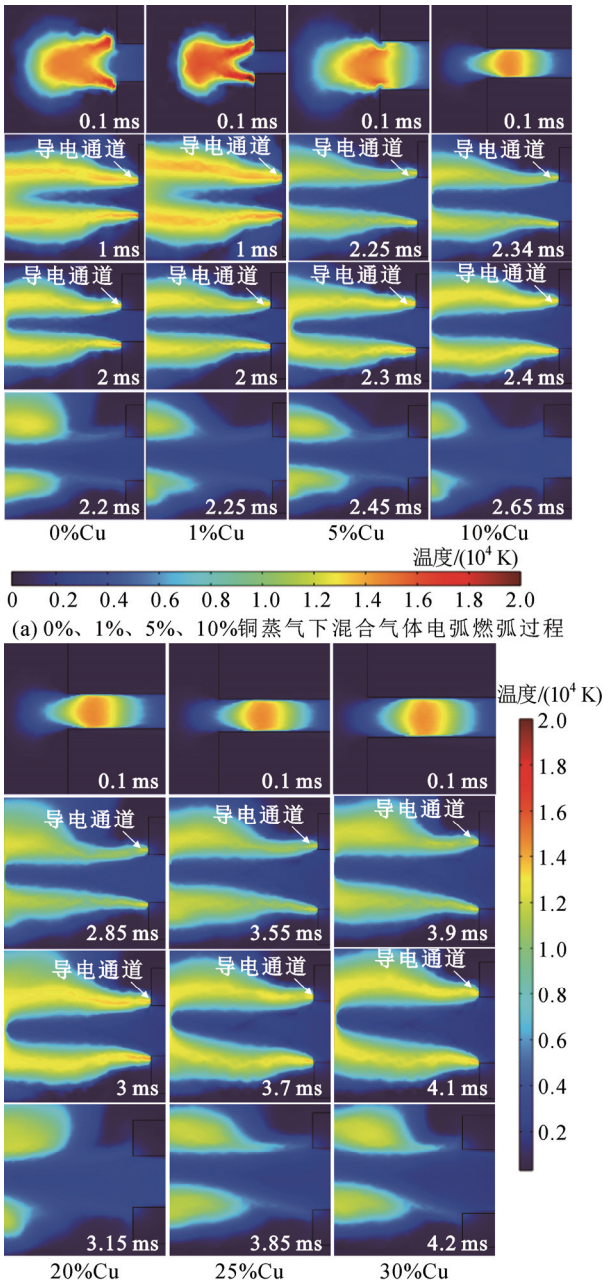


图 3 不同占比铜蒸气混合气体电导率

Fig.3 Conductivity of gas mixtures with different percentages of copper vapour



(a) 0%、1%、5%、10%铜蒸气下混合气体电弧燃弧过程

(b) 20%、25%、30%铜蒸气下混合气体电弧燃弧过程

图 4 不同占比铜蒸气均匀分布的混合气体电弧燃弧过程

Fig.4 Arc burning process of mixed gas arc with different percentage of copper vapor uniformly distributed

率、常压热容等发生改变，但电弧的运动特性与各项物性参数紧密相连，如导电率影响电弧所受电磁力的大小，粘度系数影响电弧运动时的摩擦力，质量密度影响电弧质量等。本文将改变后的所有物性参数代入模型中进行仿真，综合考虑当物性参数均发生改变时电弧的运动特性。

2 考虑铜蒸气的氢-氮混合气体电弧仿真分析

2.1 铜蒸气均匀分布的电弧运动特性分析

设置动触头速度为 0.8 m/s，铜蒸气在混合气体中均匀分布下 H_2-N_2 混合气体电弧燃弧过程的温度场分布如图 4 所示。

由图 4 给出的电弧燃弧图像可以看出，随着混合气体中铜蒸气占比的提升，电弧在触头间停滞的时间越长，熄灭电弧所需要的时间逐渐提高。同时观察图 5 可以看出，当铜蒸气在混合气体中体积占比不小于 5%时，电弧导电通道随着时间推移会逐渐消失，但在熄弧前又会短暂形成明显导电通道，即此时电弧发生重击穿，随后电弧熄灭。

由图 6 可以看出，在 t=0.1 ms 时，若混合气体中不掺铜蒸气，则电弧已经到达吹弧阶段，此时电弧最高速度为 218.7 m/s，当考虑铜蒸气在混合气体中占比为 30%且均匀分布时，电弧在 t=0.1 ms 处于

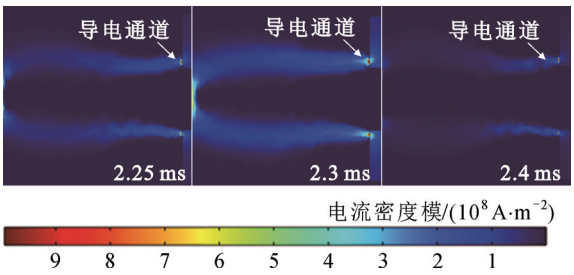


图 5　5%铜蒸气下混合气体电弧电流密度模云图

Fig.5　Mode cloud of mixed gas arc current density at 5% copper vapour

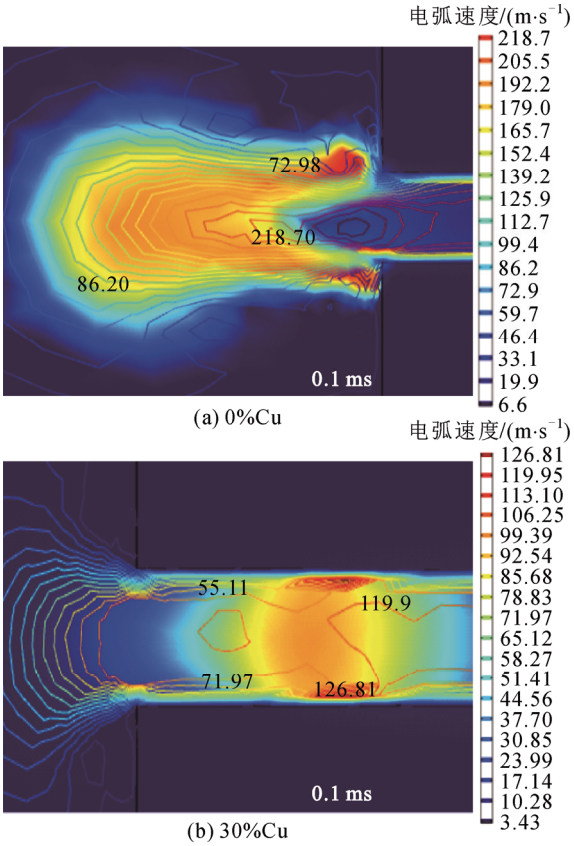


图 6　0%、30%铜蒸气下 t=0.1 ms 时刻混合气体电弧速度等位线

Fig.6　0%, 30% copper vapor under t=0.1 ms moment mixed gas arc velocity isochrones

拉弧阶段，位于触头之间，最高速度为 126.81 m/s。

t 为 0.1、2 ms 时刻不同占比铜蒸气均匀分布的混合气体电弧最高速度如图 7 所示，随着混合气体中铜蒸气占比的提高，电弧移动速度逐渐减小。经式(1)—(4)计算得出，铜蒸气的存在使得混合气体电弧质量密度增加，黏度系数降低，电导率先上升后下降。质量密度的增加会使得电弧质量变大，黏度系数降低导致电弧在运动过程中所受摩擦力减小，电导率则影响电弧所受电磁力的大小，当电导率上

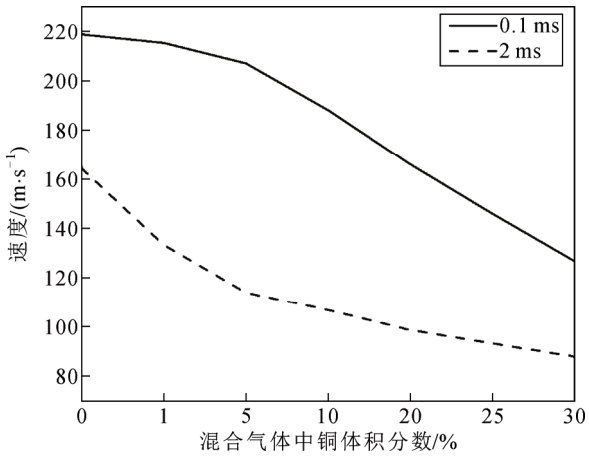


图 7　t 为 0.1、2 ms 时刻不同占比铜蒸气均匀分布的混合气体电弧最高速度

Fig.7　The highest speed of the mixed gas arc under different percentage of copper vapor uniform distribution when t is 0.1 ms and 0.2 ms

升时电磁力增加，电导率下降时电磁力减小。而此时随着混合气体中铜蒸气占比的提高，电弧移动速度逐渐减小，显然上述三者中质量密度对电弧速度的影响占据主导地位。由于铜蒸气质量密度较大，当铜蒸气在混合气体中占比越高，混合气体的质量密度提升越明显，在电弧所受相同的磁吹力条件下，由于质量密度的显著提高使得电弧移动速度下降，阻碍电弧被拉长，进而导致熄弧时间延长。因此，混合气体中铜蒸气占比越高电弧被拉长的速度越慢，电弧熄弧所需要的时间越长。

在燃弧过程中不同占比铜蒸气的电弧最高温度如图 8 所示，观察图 8 可以看出，随着铜蒸气占比的提升，电弧的温度呈现下降的趋势。这是由于电弧烧蚀触头使铜变成铜蒸气的过程中需要吸收界面的能量，导致触头温度降低，随着铜蒸气的进一步扩散到与电弧接触时，此时会发生热传递，使得电弧的温度降低。

不同占比铜蒸气均匀分布下混合气体的电弧电压 U 曲线如图 9 所示。由表 1 可得，在不含铜蒸气以及铜蒸气占比(体积分数，下同)为 1%的条件下，电弧在熄弧前不发生重击穿；在混合气体中铜蒸气占比为 5%和 10%情况下，电弧发生一次重击穿，导致熄弧时间变长；铜蒸气占比为 20%、25%和 30%条件下，电弧在熄灭前分别发生了 2、4、5 次重击穿，这使得熄灭电弧所需要时间显著增加。

触头间的重击穿会造成电弧电压大幅骤降，严

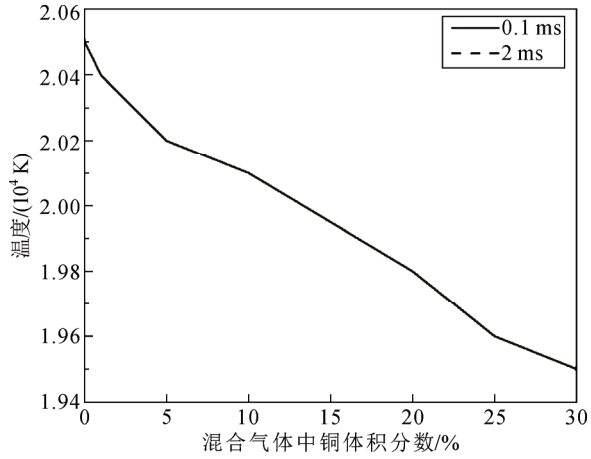


图 8 不同占比铜蒸气均匀分布下电弧最高温度

Fig.8 The maximum temperature of steam arc under different percentage of copper vapor uniform distribution

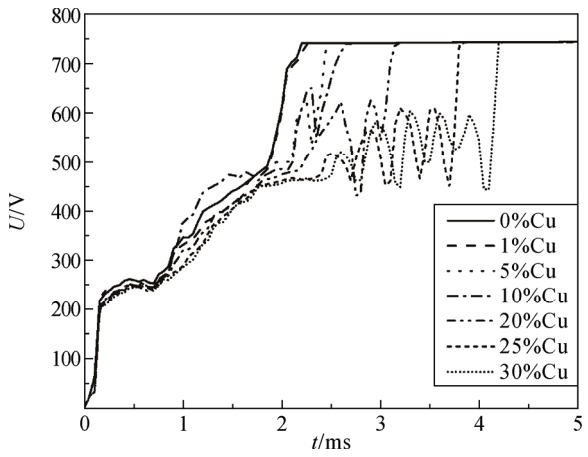


图 9 不同占比铜蒸气均匀分布下的电弧电压

Fig.9 Arc voltage at different ratios with copper vapor under copper vapor uniform distribution

重增加燃弧时间，加剧触头的侵蚀，缩短开关电器的电寿命[22]。弧柱所经过的区域，高温游离气体需要一定时间消散，残留的离子、电子、高能中性粒子和铜蒸气也需要一定时间扩散至周围气域，这使得弧隙绝缘强度下降。吹弧过程中弧压逐渐上升，触头间场强也随之增加，当触头间场强大于弧隙绝缘强度时，电弧发生重击穿。当铜蒸气在混合气体中占比越高，弧隙间残留的高温铜蒸气越多，弧隙绝缘强度下降越明显，介质强度恢复过程更缓慢，电弧发生重击穿的概率越大，次数越多。

2.2 铜蒸气不均匀分布的电弧运动特性分析

高温电弧对触头的侵蚀作用主要发生在触头之间且电弧弧根在触头表面停滞时间较长，同时铜蒸气扩散速度与电弧发展速度相比较慢。文献[23]指出接触器开断过程中，铜蒸气在弧根处及触头之间浓度最高，体积分数平均可达 20%~35%，而在其余气域体积分数在 10%以下，呈现不均匀分布。设置仿真模型中触头之间及弧根处气域铜蒸气体积分数分别为 20%、25%、30%，其余气域铜蒸气占比为 5%，此后所提铜蒸气在混合气体中不均匀分布的占比均指动静触头之间及弧根处气域铜蒸气的占比，其余物理场边界条件保持不变进行仿真。

表 2 为铜蒸气在混合气体中不同分布下 t 为 0.1、2 ms 时电弧最高速度。由表 2 可得，t=0.1 ms 时刻铜蒸气在混合气体中的分布特性对电弧移动速度的影响很小，这是由于此时电弧仍处于拉弧阶段，不同分布特性模型在触头间设置的铜蒸气占比相同。t=2 ms 时刻铜蒸气在混合气体中的分布特性对电弧移动速度的影响显著。因为铜蒸气不均匀分布下触头之间及弧根处以外的气域铜蒸气占比较小，此时电弧处于吹弧阶段，电弧除弧根以外均处于铜蒸气较低的气域中，混合气体电弧的质量密度并不会显著增加，故在 t=2 ms 时刻铜蒸气不均匀分布较均匀分布电弧移动速度有所提高。

表 1 不同占比铜蒸气均匀分布下的电弧熄弧时间与重击穿次数

Table 1 Arc quenching time and number of re-strikes for different ratios of copper vapor arcs under unifo-rm distribution of copper vapor

铜蒸气体积分数/%	熄弧时间/ms	重击穿次数
0	2.2	0
1	2.25	0
5	2.45	1
10	2.65	1
20	3.15	2
25	3.85	4
30	4.2	5

表 2 混合气体中铜蒸气不同分布下 t 为 0.1、2 ms 电弧最高速度

Table 2 The maximum arc speed at t=0.1, 2 ms with different distribution of copper vapor in the gas mixture

铜蒸气体积分数/%	t=0.1 ms 最大速度/(m·s⁻¹)		t=2 ms 最大速度/(m·s⁻¹)	
	铜蒸气均匀分布	铜蒸气不均匀分布	铜蒸气均匀分布	铜蒸气不均匀分布
20	166.00	166.98	98.61	118.86
25	146.00	145.23	93.17	114.92
30	126.81	123.06	87.86	105.41

图 10 为铜蒸气不均匀分布下 H_2-N_2 混合气体电弧燃弧过程的温度场分布。由图 10 燃弧图像可以看出，在混合气体中铜蒸气不均匀分布与铜蒸气均匀

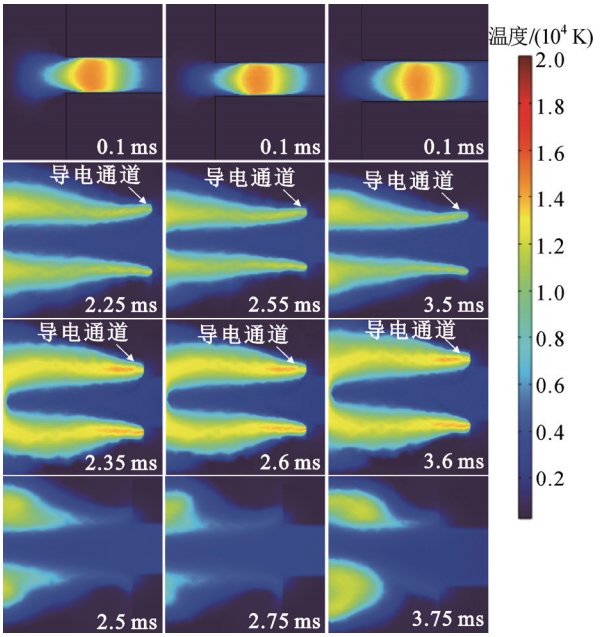


图 10　混合气体中铜蒸气不均匀分布、不同占比电弧燃弧过程

Fig.10　Uneven distribution of copper vapor in the gas mixture, different percentage of the arc burning process

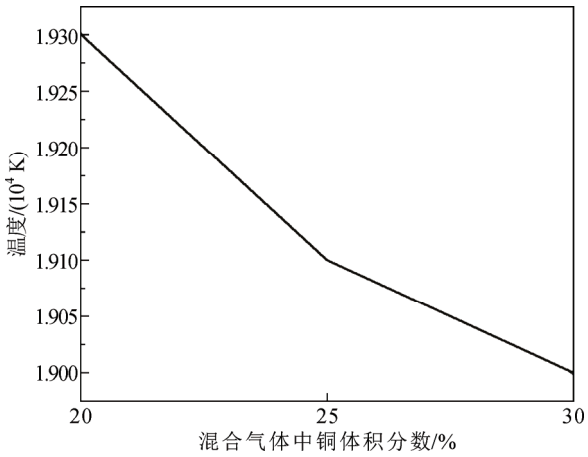


图 11　铜蒸气不均匀分布、不同占比电弧最高温度

Fig.11　Uneven distribution of copper vapor, different percentage of the maximum arc temperature

分布占比相同时，铜蒸气不均匀分布下熄灭电弧所需要时间与铜蒸气均匀分布相差较大。铜蒸气不均匀分布下铜蒸气占比为 20%时，熄弧所需要的时间为 2.6 ms，较铜蒸气均匀分布下降了 17.5%；铜蒸气占比为 25%时，熄灭电弧所需时间为 2.75 ms，较铜蒸气均匀分布下降了 28.6%；铜蒸气占比为 30%时，电弧熄灭所需要 3.75 ms，较铜蒸气均匀分布下降了 10.7%。在分断 750 V 电压等级下，电弧在整个燃弧过程中吹弧阶段所停滞的时间最长，而铜蒸气不均匀分布下吹弧阶段电弧所处的气域中铜蒸气含量相对于触头之间及弧根处较少。故在此吹弧阶段混合气体电弧的质量密度并不会因铜蒸气的存在而显著上升，电弧移动速度下降不明显，因此铜蒸气不均匀分布比均匀分布熄弧时间有所降低。

图 11 为铜蒸气不均匀分布下不同占比的电弧最高温度。在铜蒸气不均匀分布与均匀分布占比相同时，在仿真结果中铜蒸气不均匀分布下的电弧最高温度均低于铜蒸气均匀分布的电弧最高温度。这是由于铜蒸气不均匀分布下触头之间及弧根处铜蒸气浓度要高于其余气域铜蒸气浓度，浓度高的铜蒸气会自发向铜蒸气浓度低的气域扩散，这导致铜蒸气的扩散速度提高，使得铜蒸气更快、更全面的接触电弧，同时铜蒸气扩散至与电弧接触时电弧会向铜蒸气转递热量，故电弧温度降低。

铜蒸气不均匀分布下不同占比铜蒸气混合气体的电弧电压曲线如图 12 所示。观察电弧电压曲线可以看出，铜蒸气占比为 20%、25%和 30%条件下，电弧在熄灭前分别发生了 2、4、5 次重击穿，这与铜蒸气均匀分布下铜蒸气占比为 20%、25%和 30%的电弧重击穿次数相同。由 2.1 节分析可知，电弧重击穿的本质是触头间场强大于弧隙绝缘强度时，电弧发生重击穿。当铜蒸气不均匀分布和均匀分布的占比相同时，二者触头之间及弧根处气域铜蒸气含量相同，在开断电弧过程中，弧隙间残留高温铜蒸气浓度相同，这使得弧隙绝缘强度下降程度相同，故铜蒸气在混合气体中的分布特性对电弧重击穿影响较小。

3　实验验证

制作 750 V/250 A 密封直流接触器样机，搭建实验平台如图 13 所示。使用 VRI-Phantom 高速摄像机拍摄触头间的燃弧过程，触头间的电弧电压由 SDS2204X Plus 示波器测得。

为验证密封直流接触器在开断电弧过程中有铜蒸气的存在以及铜蒸气对电弧的影响，设置电压源为 250 V，电阻 R 分别为 1、2、3、4、5 Ω 进行 5 组实验。电弧电压波形如图 14 所示。

若在触头开断电弧过程中不产生铜蒸气，则在同一小电压等级(小于 300 V)，随着电阻的减少，电流越大，电弧所受磁吹力越大，电弧熄灭的时间应随之减小。而由表 3 可知，电弧熄弧时间整体趋势

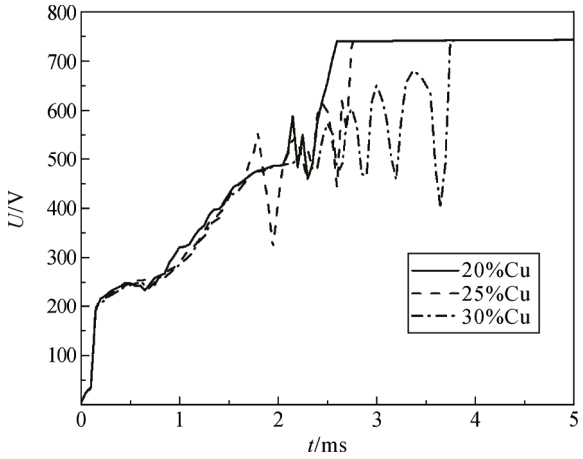


图 12 不同占比铜蒸气不均匀分布下的电弧电压

Fig.12 Uneven distribution of copper vapor, different percentage of arc voltage

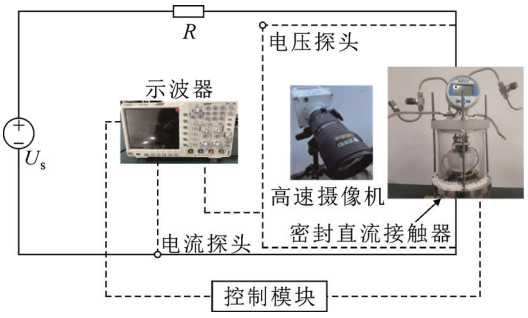


图 13 实验平台

Fig.13 Experimental platform

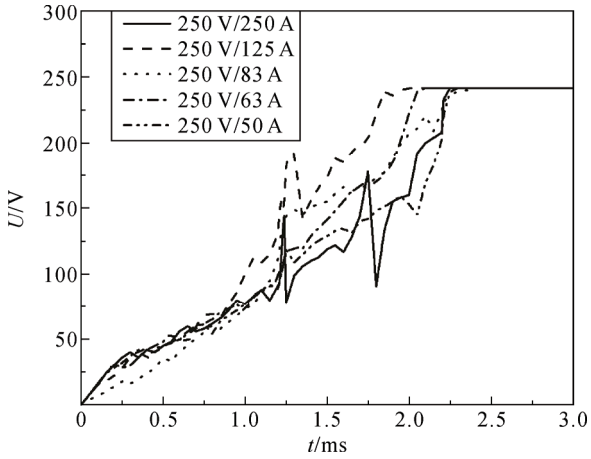


图 14 电压等级为 250 V 不同电流的电弧电压

Fig.14 Voltage level is 250 V for different currents of arc voltage

表 3 电压等级为 250 V 不同电流的电弧熄灭时间与重击穿次数

Table 3 Arc extinguishing time and the number of re-strikes for different current of voltage level 250 V

电压电流等级	熄弧时间/ms	重击穿次数
250 V/50 A	2.3	0
250 V/63 A	2.1	0
250 V/83 A	2.4	0
250 V/125 A	2	1
250 V/250 A	2.25	2

并不随着电流的增大而减小，这是由于电流等级越高，触头间电弧能量越大，电弧烧蚀触头所产生的铜蒸气就越多，进而铜蒸气会扩散到混合气体中减小电弧的运动速度，使得熄弧时间延长。这与第 2 章所得出铜蒸气的存在会延缓电弧的熄灭相对应。由表 3 可以看出，在电流等级 125 A 以下电弧并不发生重击穿，而在 125、250 A 电弧分别发生 1、2 次重击穿，这与第 2 章仿真中得出铜蒸气在氢-氮混合气体中占比越高，电弧越容易发生重击穿相符。

设置电压源为 750 V，电阻 R 为 3 Ω 进行实验。电弧燃弧过程中的动态图像如图 15 所示。由图 15 可看出，起弧过程中电弧因所受磁场力较小停留在触头之间；在拉弧阶段电弧不断被拉长但此时磁场力仍不足以使电弧吹出触头之间，当电弧逐渐被拉长至吹出触头区域，进入吹弧阶段；在吹弧阶段高温电弧烧蚀触头过程中已在触头表面产生熔池，熔池周围伴随着大量铜蒸气的产生，同时电弧发生 4 次明显的重击穿；2.82 ms，电弧熄灭。

由图 15 可得，实验中电弧熄灭所需要的时间为 2.82 ms，明显大于仿真中在氢-氮混合气体内不考虑铜蒸气的熄弧时间，证明混合气体中铜蒸气的存在会延长电弧熄弧时间。观察图 15 燃弧图像可以粗略看出，电弧在触头之间以及弧根处剧烈燃烧并伴有熔池的出现，熔池周围产生大量铜蒸气。文献[24]通过拍摄电弧内部金属蒸气发光光强照片得出金属蒸气在起弧及拉弧阶段密度较高且均匀分布于电弧区域，在吹弧阶段金属蒸气主要集中于弧根处，这与图 15 燃弧图像粗略观察到的铜蒸气分布规律基本一致。故在仿真中以铜蒸气不均匀分布作为初始条件考虑铜蒸气对电弧燃弧时间、重击穿等特性作用机理更贴合实际工况。

750 V/250 A 实验电弧电压、电流曲线如图 16 所示。由图 16 可得，实验电弧在熄灭前发生 4 次明显的重击穿，这与第 2 章电弧仿真模型中考虑氢-氮混合气体有铜蒸气存在会使得电弧更易发生重击穿的仿真结果相符，验证了氢-氮混合气体中的铜蒸气是影响电弧重击穿的重要因素。

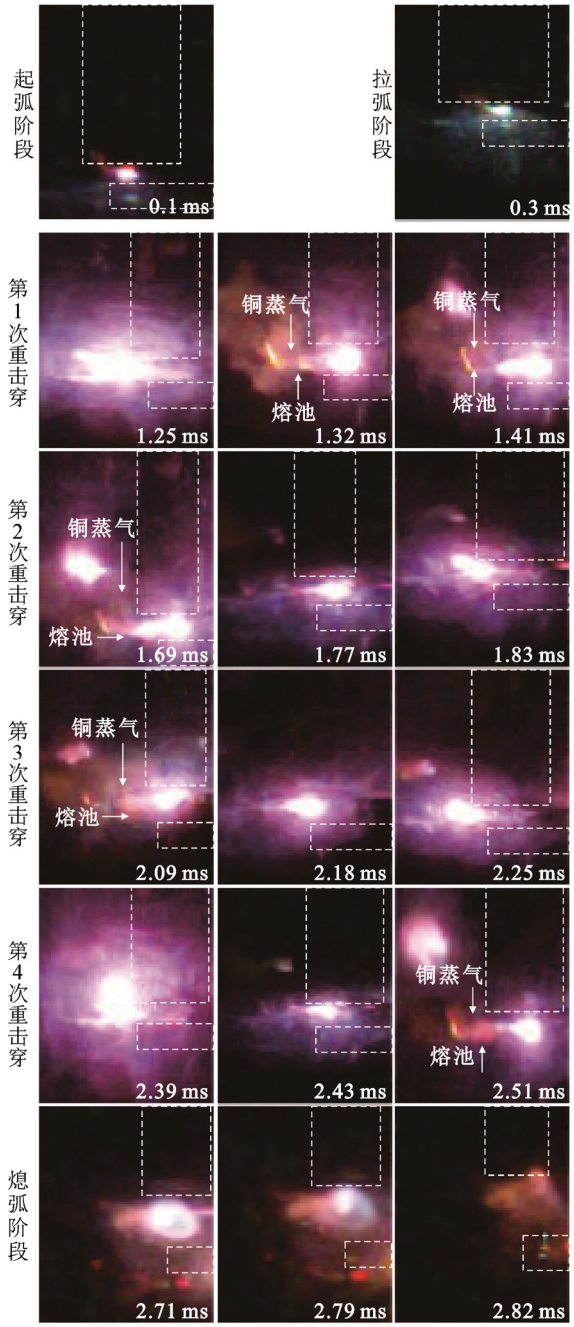


图 15　电弧动态图像

Fig.15　Dynamic image of electric arc

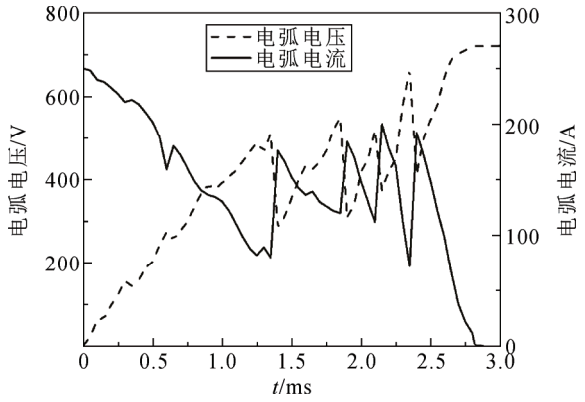


图 16　750 V/250 A 实验电弧电压、电流曲线

Fig.16　750 V/250 A experimental arc voltage and current curve

4　结论

1）系统分析了铜蒸气在混合气体中不同占比、不同分布特性对燃弧特性的影响规律，阐明铜蒸气对电弧温度、燃弧时间和重击穿等特性作用机理，研究表明：随着铜蒸气在氢-氮混合气体中占比的提高，电弧熄弧时间延长、最高温度缓慢降低、电弧发生重击穿概率越大；铜蒸气在混合气体中不均匀分布较均匀分布电弧熄弧时间下降，最高温度稍有降低；仿真中以铜蒸气不均匀分布作为初始条件考虑铜蒸气对电弧燃弧时间、重击穿等特性作用机理更贴合实际工况。

2）开展了 750 V/250 A 密封直流接触器电弧特性实验，燃弧时间和重击穿概率与理论分析基本相符，验证了铜蒸气对燃弧特性的影响规律，为高性能直流接触器优化提供参考依据。

参考文献　References

[1] 陈晓龙，周　宁，韩小文，等. 一种具备自适应重合闸能力的混合式直流断路器 [J]. 电网技术，2022，46(12)：4718-4731.
CHEN Xiaolong, ZHOU Ning, HAN Xiaowen, et al. A hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing ability[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4718-4731.

[2] 李　静，关明旭，刘树鑫，等. 直流空气电弧作用下触头熔蚀过程及其对开断特性影响[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1531-1541.
LI Jing, GUAN Mingxu, LIU Shuxin, et al. Process of contact erosion and influence on breaking characteristics under DC air arc[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1531-1541.

[3] 胡玉耀，孙建亮，蒋兴良，等. 覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型[J]. 高电压技术，2023，49(2)：515-524.
HU Yuyao, SUN Jianliang, JIANG Xingliang, et al. Double-arc dynamic circuit model of DC flashover of ice-covered insulator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 515-524.

[4] 葛国伟，程　显，王华清，等. 低压混合式直流断路器中真空电弧电流转移判据[J]. 电工技术学报，2019，34(19)：4038-4047.
GE Guowei, CHENG Xian, WANG Huaqing, et al. Investigation on the vacuum arc current commutation criteria of the low voltage DC hybrid circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4038-4047.

[5] 葛国伟，程　显，谢　伟，等. 弧后电流测量装置电流转移特性试验研究[J]. 高电压技术，2019，45(3)：950-958.
GE Guowei, CHENG Xian, XIE Wei, et al. Experimental research on vacuum arc current commutation of post arc current measure equipment[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 950-958.

[6] 李　静，钱　宇，王奥飞，等. 磁吹直流空气断路器弧根跃迁及对开断特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报，2022，43(4)：1651-1660.

LI Jing, QIAN Yu, WANG Aofei, et al. Research on arc root transition of magnetic DC air circuit breaker and its influence on breaking characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(4): 1651-1660.

[7] 朱梅林，蒋兴良，刘延庆，等. 直流冰面局部电弧运动特性[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1939-1948.
ZHU Meilin, JIANG Xingliang, LIU Yanqing, et al. Motion characteristics of DC local arc on ice surface[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1939-1948.

[8] 李兴文，贾申利，张博雅. 气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用[J]. 高电压技术，2020，46(3)：757-771.
LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya. Research and application on physical farameters calculation and behavior simulation of gas switching arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 757-771.

[9] WU Y, CUI Y F, DUAN J W, et al. Influence of arc current and pressure on non-chemical equilibrium air arc behavior[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(1): 014021.

[10] 辛　超，武建文. 直流氢气-氮气混合气体电弧开断过程实验研究[J]. 电工技术学报，2015，30(13)：117-124.
XIN Chao, WU Jianwen. Experimental study on the breaking process of DC hydrogen-nitrogen mixed gas arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 117-124.

[11] SHIBA Y, MORISHITA Y, KANEKO S, et al. Study of DC circuit breaker of H_2-N_2 gas mixture for high voltage[J]. Electrical Engineering in Japan, 2011, 174(2): 9-17.

[12] XIN C, WU J W, LIU B, et al. Plasma characteristics of DC hydrogen-nitrogen mixed gas arc under high pressure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2722-2723.

[13] 韩　颖，孟令新，侯春光，等. 多物理因素影响下氢气介质直流电弧重击穿现象仿真与试验研究[J]. 电器与能效管理技术，2018(22)：28-34.
HAN Ying, MENG Lingxin, HOU Chunguang, et al. Simulation and experimental research on DC arc re-striking in hydrogen medium under multiple physical factors[J]. Low Voltage Apparatus, 2018(22): 28-34.

[14] 翟国富，薄　凯，李庆楠，等. 直流电弧运动过程中重击穿现象及机理研究[J]. 电工技术学报，2016，31(11)：105-113.
ZHAI Guofu, BO Kai, LI Qingnan, et al. Research on restriking phenomena and mechanism during DC arc motion process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 105-113.

[15] 钟昱铭，熊　兰，杨子康，等. 计及铜蒸气介质的小电流直流电弧仿真与实验[J]. 电工技术学报，2020，35(13)：2913-2921.
ZHONG Yuming, XIONG Lan, YANG Zikang, et al. Numerical simulation and experiment of small current DC arc considering copper vapor medium[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2913-2921.

[16] ONO H, SEKIKAWA J, KUBONO T. Arc duration of break arcs magnetically blown-out in a DC 450 V resistive circuit[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2012, E95. C(9): 1515-1521.

[17] 宋　宇，林　莘，徐建源，等. 高压断路器中 C_4F_7N/CO_2 混合气体的开断性能[J]. 高电压技术，2023，49(3)：971-981.
SONG Yu, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Interruption performance of C_4F_7N/CO_2 gas in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 971-981.

[18] 程　显，李　鑫，葛国伟，等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术，2022，48(3)：820-828.
CHENG Xian, LI Xin, GE Guowei, et al. Insulation configuration and optimization of integrated voltage self-sharing interrupter for series connection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 820-828.

[19] 程　显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[20] 孟令新. 可控磁场氢气灭弧介质下直流电弧特性研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2019.
MENG Lingxin. Study on DC arc characteristics in hydrogen arc extinguishing medium with controllable magnetic field[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2019.

[21] 韩桂全，刘　洋，刘　庆，等. 铜蒸气对 CO_2 电弧等离子体物性参数的影响[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1635-1640.
HAN Guiquan, LIU Yang, LIU Qing, et al. Effect of Cu vapour on the physical property parameters of CO_2 arc plasma[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1635-1640.

[22] 李兴文，吕启深，田　甜，等. 直流空气电弧作用下触头烧蚀特性[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1970-1977.
LI Xingwen, LÜ Qishen, TIAN Tian, et al. Contact erosion characteristics under direct current air arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1970-1977.

[23] 张　峰. 充气式直流接触器电弧数学模型及其优化设计[D]. 天津：河北工业大学，2022.
ZHANG Feng. Inflatable DC contactor arc mathematical model and optimal design[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2022.

[24] 周　学. 航天继电器分断电弧及其抑制措施的仿真和实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
ZHOU Xue. Simulation and experiment research on electrical arc and its extinguishing methods in aerospace relay[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2011.



程　显
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事高压电器及高电压新技术研究，重点研究混合断路器技术、多断口真空开关技术
E-mail: chengxian@zzu.edu.cn

CHENG Xian
Ph.D., Professor



葛国伟(通信作者)
1987—，男，博士，副教授，硕导
主要从事高电压试验技术、绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作
E-mail: ggw@zzu.edu.cn

GE Guowei
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-08-25　修回日期　2024-04-24　　编辑　曹昭君