

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.007

直流接触器触头电弧侵蚀特性

王海涛^{1,2}, 杨博^{1,2}

(1. 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), 天津 300130;

2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津 300130)

摘要:触头开断过程中会产生电弧,从而导致触头表面被侵蚀,影响其电接触性能。由于直流供电系统不存在自然过零点,致使直流接触器触头受电弧侵蚀影响比交流接触器更加严重。为了研究电弧对触头的侵蚀作用,基于磁流体动力学理论,考虑电弧与触头之间的能量耦合,建立电弧-触头动态耦合模型,研究了电流等级和分断速度对触头电弧侵蚀特性的影响。仿真结果表明:近阳极区电弧温度高于近阴极区电弧温度;电流等级由 20 A 提高到 30 A 时,电弧温度和燃弧时间显著提高,燃弧能量增加 75.93%,使得触头侵蚀更加严重;触头分断速度由 0.1 m/s 增加到 0.2 m/s 时,电压电流的变化率提高,燃弧时间和熔池体积减小,燃弧能量减少 47.83%,电弧对触头的侵蚀作用降低。实验结果与仿真相吻合,验证了仿真模型的正确性。

关键词:直流接触器;磁流体动力学;电弧侵蚀;动态过程;电流等级;分断速度

中图分类号: TM501

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0053-08

0 引言

随着电动、混动车和光伏输电技术的不断发展,直流开关电器已被广泛应用^[1-3]。直流接触器开断过程中不可避免地会产生电弧,电弧为回路能量释放提供通路,但其过高的温度往往会烧蚀触头,产生熔池,增加接触电阻和熔焊力,导致触头性能大大降低,严重影响系统的可靠性^[4]。此外,直流供电系统由于不存在自然过零点,相较于交流,电弧温度高,燃弧能量大,电弧更难熄灭,触头易发生材料转移,严重影响触头的性能^[5]。触头系统是开关电器的核心部分,有一半以上的失效都是由于触头熔焊导致,影响触头熔焊的因素主要有电流等级、触头开距、分断速度和灭弧方式等^[6]。直流接触器属于频繁动作的开关电器,其分断频率高、速度快,研究不同分断因素对直流接触器电弧侵蚀的影响具有重要意义。

直流接触器触头在分离过程中受电、热、力等多种因素作用,电弧影响着触头的性能,温度高达几千甚至上万摄氏度,没有可靠的实验技术可以准确测量电弧的各种热力学特性。通过理论分析,仿真成为分析电弧的有效途径之一。在熔池仿真研究方面,文献[7]将电弧等效为高斯热源,考虑相变的影响,分析了表面张力与熔池流动的关系;文献[8]建立 Cu/Ni 金属丝深熔钎焊熔池模型,分析了铜电极与石墨焊接池的传热过程;文献[9]从熔池

能量和流动方面研究了等离子体弧焊中条形气孔的特征;文献[10-12]测量了短路时电弧电流,并将其作用在触头表面,计算烧蚀体积和质量,并分析了电弧停滞时间对触头烧蚀的影响;文献[13]建立真空电弧作用下阳极触头熔池模型,分析了不同因素对熔池流速的影响。在电弧仿真研究方面,文献[14]建立三维灭弧腔室仿真模型,研究电弧在气吹作用下的动态演变特性;文献[15]建立雅各布天梯电弧并有效引燃 110 kV 电缆;文献[16-20]基于磁流体动力学理论,建立阻性负载条件下桥式触头分断过程中的电弧模型,通过计算电弧温度和电流密度分布随时间的变化;文献[21-25]建立了较为完善的电弧模型,考虑磁场和栅片等灭弧方式,研究了电弧弧根转移过程和电弧重燃现象。

现有的仿真模型大多是将电弧等效为作用于触头表面的热源,忽略了动态电弧与触头之间的相互影响。目前研究电弧选用的电压电流等级较高,文中基于电压超过 12~20 V、分断电流超过 0.25~1 A 即可产生电弧的特性^[26],针对 CJX2 系列直流接触器中电弧对触头的侵蚀作用的过程,建立了电弧与触头的多物理场耦合模型,研究了不同电流等级和分断速度下电弧侵蚀变化规律,对提高直流接触器开断性能和减轻触头材料的电弧侵蚀具有重要意义。

1 电弧-触头仿真模型

1.1 边界条件设置及假设

焦耳热作为电弧能量的主要来源,使电弧在极

收稿日期:2022-12-18;修回日期:2023-02-27

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(216Z1011G)

短时间内产生了很高的温度,当作用在触头表面的高温达到触头材料熔点时会产生熔池,而电场、磁场、温度场随着熔池的扩大不断发生变化,从而影响电弧的参数。为了对该过程进行分析,建立了二维轴对称电弧-触头磁流体动力学仿真模型,其几何模型如图1所示。

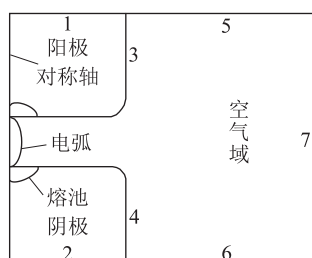


图1 电弧-触头仿真模型

Fig.1 Arc-contact simulation model

触头尺寸设置为4 mm×2 mm,阴极为动触头,阳极为静触头;初始开距为0.2 mm,随着触头运动而不断增大。边界1、边界2为热绝缘,边界3—边界7为磁绝缘,触头初始温度为293.15 K。为保证电弧起弧,假设电弧区域初始温度为8 000 K^[27]。触头处于开放环境中,其空气域压强为一个标准大气压,空气域的密度、导热系数、电导率、恒压热容、动力黏度等数值参考文献[28]。选择AgW60作为触头材料,其物性参数如表1所示^[29]。

参数	数值
比热容/[J·(g·K) ⁻¹]	176.4
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	267.8
密度/(g·cm ⁻³)	15.79
电导率/(S·m ⁻¹)	3.559×10 ⁷
熔化潜热/(J·g ⁻¹)	157.8
熔点/K	1 234

电弧对触头的侵蚀过程复杂,为简化计算,作如下假设:

(1) 电弧处于局部热力学平衡状态,电弧等离子体为不可压缩的牛顿流体,且流动状态为层流。

(2) 不考虑起弧过程,在初始时电弧已经存在于一定间距的触头间。

(3) 小电流条件下形成的触头材料蒸发量较小,忽略触头材料蒸发产生的金属蒸汽对电弧特性的影响。

1.2 模型控制方程

在宏观上研究电弧等离子体时,将其看作导电流体,因此电弧-触头磁流体动力学模型由质量、动

量、能量守恒方程和麦克斯韦方程描述。

(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; \mathbf{u} 为速度矢量。

(2) 动量守恒方程。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{K} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4)$$

式中: p 为压力; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{K} 为粘性应力; \mathbf{F} 为洛伦兹力; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{B} 为磁感应强度; μ 为动态粘度。

(3) 能量守恒方程。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} - Q_{\text{rad}} \quad (6)$$

式中: C_p 为恒压热容; T 为温度; k 为导热系数; Q 为热源,包含焓传递、焦耳热、体积净辐射损失; k_B 为玻尔兹曼常数; q 为电子电荷; \mathbf{E} 为电场强度; Q_{rad} 为总体积辐射系数,其值来自COMSOL材料库中的空气等离子体的辐射系数,如图2所示。

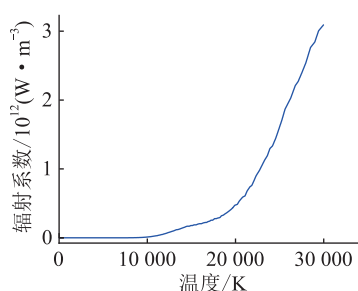


图2 空气等离子体辐射系数

Fig.2 Air plasma radiation coefficient

(4) 麦克斯韦方程。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (10)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{A} 为磁矢势; σ 为电导率; φ 为电势。

1.3 阴极表面热通量方程

从阴极与电弧能量传递的角度分析,根据能量守恒定律,电弧热传导和阴极表面聚集的离子撞击使得触头温度升高,触头热传导和电子发射降低触头温度,控制方程如下。

$$-n \cdot (-k \nabla T) = Q_b \quad (11)$$

$$Q_b = -J_{\text{elec}} \Phi + J_{\text{ion}} V_{\text{ion}} \quad (12)$$

$$J_{\text{elec}} = \begin{cases} J_R & |\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}| > J_R \\ |\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}| & |\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}| \leq J_R \end{cases} \quad (13)$$

$$J_R = A_R T^2 e^{-\frac{\Phi_{\text{eff}}}{k_B T}} \quad (14)$$

$$J_{\text{ion}} = |\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}| - J_{\text{elec}} \quad (15)$$

式中: Q_b 为阴极表面热源; Φ 为触头材料表面功函数; J_{elec} 、 J_{ion} 、 J_R 分别为电子、离子、热离子法向电流密度; V_{ion} 为等离子体电离势; A_R 为有效 Richardson 常数; Φ_{eff} 为有效功函数; \mathbf{n} 为表面法向量。

1.4 阳极表面热通量方程

根据能量守恒定律, 阳极表面注入的能量主要是电弧热传导和阴极释放的电子能量, 阳极流出的能量主要通过触头热传导。

$$-n \cdot (-k \nabla T) = Q_a \quad (16)$$

$$Q_a = |\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}| \Phi \quad (17)$$

式中: Q_a 为阳极表面热源。

1.5 相变材料处理

在分断电弧的高温作用下, 触头局部温度快速升高, 当温度达到材料熔点时, 触头熔化使其物性参数发生改变, 因此须考虑相变的影响, 液态 Ag 的物性参数参考文献[30]。

$$\rho = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \quad (18)$$

$$c_p = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}) + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (19)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \times \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \quad (20)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (21)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (22)$$

式中: c_p 为触头材料等效比热容; θ_1 、 θ_2 分别为固相和液相体积分数; $C_{p,1}$ 、 $C_{p,2}$ 分别为固相和液相恒压热容; α_m 为相变质量分数; k_1 、 k_2 分别为固相和液相导热系数; $L_{1 \rightarrow 2}$ 为相变潜热, 取 157.8 J/g。

2 仿真结果与分析

电弧与触头的温度可以直观反映电弧侵蚀的动态过程, 燃弧时间与燃弧能量是影响触头侵蚀的关键因素。文中利用 COMSOL Multiphysics 进行仿真计算, 研究了不同电流等级和触头分断速度对电弧温度、熔池大小、燃弧时间、燃弧能量等参数的影响, 分析触头与电弧的动态特性。

2.1 电弧-触头动态过程分析

建立二维轴对称电弧-触头模型, 针对 CJX2 系列直流接触器, 选用电压电流为 48 V/25 A, 上触头为阳极, 下触头为阴极, 初始间距为 0.2 mm, 触头分

断速度为 0.1 m/s, 计算时间为 50 ms。为研究初始阶段电弧温度变化情况, 0.1 ms 内设置时间步长为 0.01 ms, 0.1 ms—50 ms 设置时间步长为 0.1 ms。电弧最高温度随时间的变化见图 3。大量仿真表明, 电弧温度变化主要经历 4 个阶段: 在 0.1 ms 内电弧温度迅速上升, 最高达到 19 840 K; 随着触头开距的增加, 电弧温度开始抖动下降, 在 4 ms 左右, 电弧温度达到 16 000 K, 电弧温度缓慢下降, 处于稳定燃弧阶段; 在 21.9 ms 时, 电弧温度达到 13 000 K, 电弧温度急剧下降, 处于熄弧阶段; 在 22.1 ms 左右, 电弧温度在 3 000 K, 弧根和弧柱明显消失, 电弧熄灭。

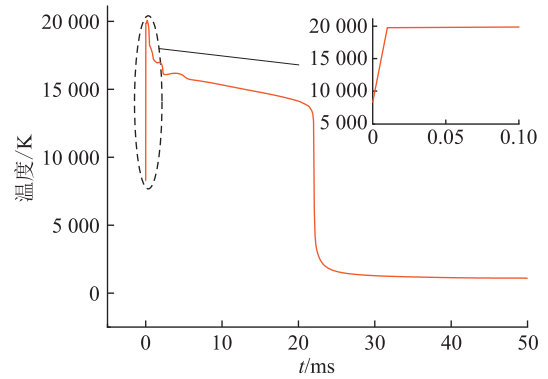


图3 电弧最高温度随时间变化规律

Fig.3 Variation of maximum arc temperature with time

二维轴对称模型经过二维镜像处理得到二维电弧温度变化图像, 如图 4 所示。通过大量仿真, 选取其中具有代表性的时间点: 0.1 ms 时刻, 触头刚开始运动, 触头间电弧温度急剧升高; 4 ms—21.9 ms, 电弧处于稳定燃弧阶段; 22.1 ms 为电弧熄灭时刻。其中, 在电弧稳定燃烧阶段具有较为明显的近阴极区、弧柱区和近阳极区, 电流在通过触头表面时, 电流密度发生了收缩现象, 导致电流密度增大, 从而形成弧根, 且阳极表面先于阴极表面形成弧根, 近阳极区电弧温度高于近阴极区电弧温度。从微观角度分析, 电弧热传导和离子撞击使阴极表面温度升高, 阴极表面发射电子, 消耗掉部分能量, 电子质量小、运动速度快, 阳极受电弧热传导和电子撞击使温度上升更快, 电流密度更大, 更易形成弧根。

电弧作用在触头表面, 使得触头温度升高, AgW60 触头材料熔点为 1 234 K, 随着电弧能量的注入, 温度不断升高。图 5 为阳极和阴极触头最大熔池分布图, 可以看出, 熔池主要产生于电弧弧根处, 近似为椭圆形, 熔池宽度大于熔池深度, 阳极最高温度为 1 676.7 K, 阴极最高温度为 1 553.7 K, 阳极比阴极温度略高, 且熔池更大, 说明阳极更易达到熔点, 这主要是由于阴极发射的电子撞击阳极表面, 使阳极温度更高。通过对触头表面进行二维旋

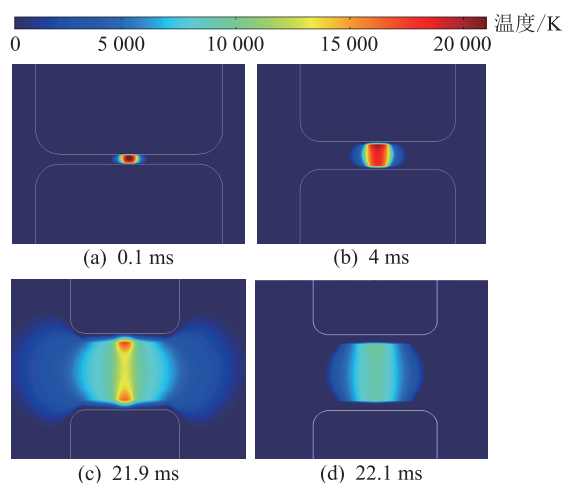


图4 触头分断过程电弧温度分布
Fig.4 Arc temperature distribution during contact breaking

转得到三维触头,采用表面积分,输入 $T > 1\ 234\ \text{K}$,可以求出熔池体积,阳极熔池为 $4.883 \times 10^{-4}\ \text{mm}^3$,阴极熔池为 $4.085 \times 10^{-4}\ \text{mm}^3$ 。

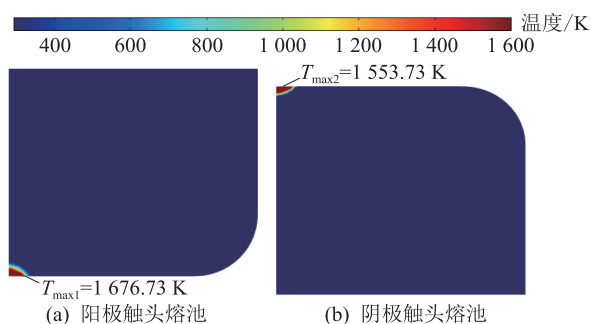


图5 触头最大熔池分布
Fig.5 Contact the biggest pool distribution

触头分断电压电流为 $48\ \text{V}/25\ \text{A}$,电弧电压电流变化如图6所示。0 ms时,触头开始分断,电弧被拉长,电弧电压迅速升高,存在 $13\ \text{V}$ 的压降,此时电流迅速降低。0.1 ms左右,电弧开始燃弧,电弧电压逐渐升高。22 ms时,电弧电压达到 $28\ \text{V}$,在此期间,电弧电流逐渐下降,变化幅度较小,其主要原因是触头以 $0.1\ \text{m/s}$ 的速度匀速分断,电弧弧根处于触头表面中心处,产生稳定的弧柱,弧柱逐渐被拉长变细,导致电弧等效电阻升高,导电率下降,电压电流变化较缓慢。22 ms之后,触头间距足够大,等效电阻较高,电弧无法继续燃烧,电弧被拉长,弧柱消失,电弧熄灭,电压迅速升高,趋于电源电压,电流急剧下降。燃弧能量是反应电弧侵蚀程度的重要参数,对直流接触器的电寿命有重要的影响,通过式(23)可以计算燃弧能量^[31]。

$$w = \int_0^t u_{\text{arc}} i_{\text{arc}} dt \quad (23)$$

式中: w 为燃弧能量; u_{arc} 为电弧电压; i_{arc} 为电弧电流。

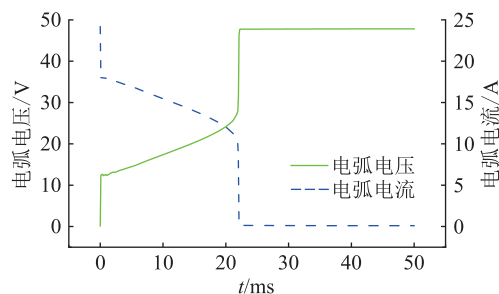


图6 电弧电压电流变化曲线
Fig.6 Voltage and current change curves of arc

2.2 电流等级对电弧侵蚀的影响

为研究电流等级对侵蚀的影响,设置电流梯度为 $10\ \text{A}$,调节电流为 $20、30、40\ \text{A}$,计算得到电弧-触头仿真模型,电弧最高温度如图7所示。由于只改变电流大小,电弧最高温度整体趋势一致,电流等级对电弧温度有较大的影响,电流 $20、30、40\ \text{A}$ 对应的最高电弧温度分别为 $18\ 350、20\ 230、21\ 380\ \text{K}$,且随着电流等级的提高,电弧第一次下降温度的时间也随之延长,拐点时间分别为 $3.5、3.7、4.1\ \text{ms}$ 。随着弧柱的拉长,电弧处于燃弧阶段,由于电流等级提高,等效电阻降低,电弧温度更高,且电弧温度下降斜率减小。从燃弧时间来看,随着电流的增加,时间有明显的增长,当电弧最高温度降至 $3\ 000\ \text{K}$ 时,弧根弧柱明显消失,电弧熄灭,燃弧时间分别为 $19.2、26.8、36.6\ \text{ms}$ 。燃弧能量与电流直接相关,电流等级的提高使得燃弧能量更大,电弧散热需要的时间更长,导致燃弧时间有显著增加,电弧熄灭后,电流大的电弧温度仍较高。

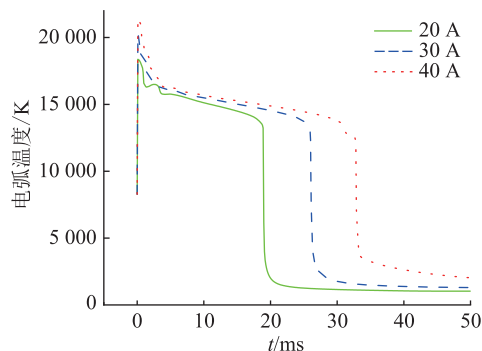


图7 不同电流下电弧最高温度随时间变化曲线
Fig.7 Curves of maximum arc temperature with time under different currents

不同电流对触头熔池的影响分别如表2、表3所示。对于相同电流等级,熔池宽度明显大于熔池深度,随着电流等级的提高,熔池体积不断增加。在阳极触头中,电流从 $20\ \text{A}$ 升至 $30\ \text{A}$,熔池体积增

加 $16.008 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$; 电流从 30 A 升至 40 A, 熔池体积增加 $31.817 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。在阴极触头中, 电流从 20 A 升至 30 A, 熔池体积增加 $10.472 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$; 电流从 30 A 升至 40 A, 熔池体积增加 $25.922 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。电流等级的增加使得熔池体积增加更快, 且在相同电流下, 阳极熔池普遍比阴极熔池大, 增加速度也快。

表 2 不同电流下阳极熔池特性参数
Table 2 Characteristic parameters of anode molten pool under different currents

电流等级/A	宽度/mm	深度/mm	体积/ 10^{-4} mm^3
20	0.070	0.025	1.985
30	0.140	0.055	17.993
40	0.192	0.081	49.810

表 3 不同电流下阴极熔池特性参数
Table 3 Characteristic parameters of cathode molten pool under different currents

电流等级/A	宽度/mm	深度/mm	体积/ 10^{-4} mm^3
20	0.063	0.015	0.808
30	0.125	0.044	11.280
40	0.181	0.070	37.202

燃弧能量由电压、电流和燃弧时间决定, 是反映电弧侵蚀的重要参数, 图 8 为不同电流下燃弧能量的变化情况。焦耳热是电弧能量的主要来源, 随着电流等级的提高, 焦耳热增大, 燃弧能量增加。

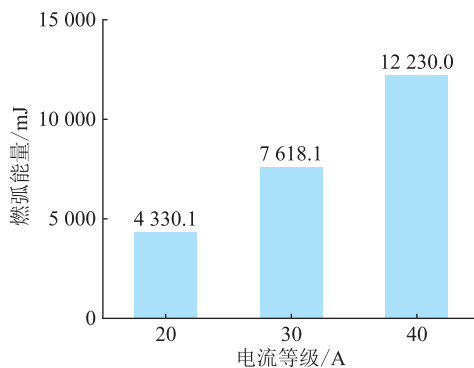


图 8 不同电流等级下燃弧能量值

Fig.8 Arc energy values at different current levels

2.3 分断速度对电弧侵蚀的影响

根据直流接触器实际工作状况, 设置触头分断速度分别为 0.1、0.2、0.3 m/s, 电弧最高温度如图 9 所示。可以看出, 电弧温度变化趋势整体相似, 电弧最高温度峰值不变, 这是由于电弧温度受电压电流影响较大, 当电压电流不变时, 电弧升高的最高温度基本不变。随着分断速度的增加, 稳定燃弧阶段电弧下降斜率更大, 燃弧时间显著减小, 分断速度分别为 0.1、0.2、0.3 m/s 时, 其燃弧时间分别为

22.1、11.5、7.8 ms。这是由于相同时间内, 当分断速度增加时, 电弧与空气接触面积更大, 散热更快, 接触电阻增加, 燃弧时间减少。

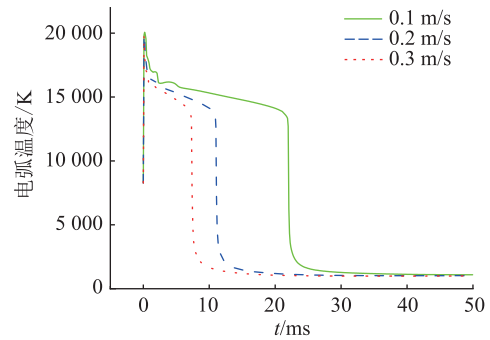


图 9 不同分断速度下电弧最高温度随时间变化曲线

Fig.9 Curves of maximum arc temperature with time at different breaking speeds

不同分断速度对触头熔池的影响如表 4、5 所示。当分断速度相同时, 阳极熔池要大于阴极熔池, 熔池宽度远大于熔池深度, 随着分断速度的增加, 熔池体积逐渐减小, 在阳极熔池中, 分断速度从 0.1 m/s 增加到 0.2 m/s, 熔池体积减小 $2.898 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$; 分断速度由 0.2 m/s 增加到 0.3 m/s, 熔池体积减小 $1.180 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。在阴极熔池中, 分断速度由 0.1 m/s 增加到 0.2 m/s, 熔池体积减小 $2.713 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$; 分断速度由 0.2 m/s 增加到 0.3 m/s, 体积减小 $0.895 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 。随着分断速度的增加, 阳极熔池体积减小量较多。

表 4 不同分断速度下阳极熔池特性参数
Table 4 Characteristic parameters of anode molten pool at different breaking speeds

分断速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	宽度/mm	深度/mm	体积/ 10^{-4} mm^3
0.1	0.097	0.039	4.883
0.2	0.074	0.025	1.985
0.3	0.060	0.016	0.805

表 5 不同分断速度下阴极熔池特性参数

Table 5 Characteristic parameters of cathode molten pool at different breaking speeds

分断速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	宽度/mm	深度/mm	体积/ 10^{-4} mm^3
0.1	0.091	0.032	4.085
0.2	0.068	0.021	1.372
0.3	0.057	0.014	0.477

不同分断速度下其燃弧能量变化如图 10 所示。可见, 分断速度由 0.1 m/s 提高到 0.2 m/s, 燃弧能量减少 47.83%; 由 0.2 m/s 提高到 0.3 m/s, 燃弧能量减少 30.96%。随着分断速度提高, 燃弧能量减少趋于平缓。

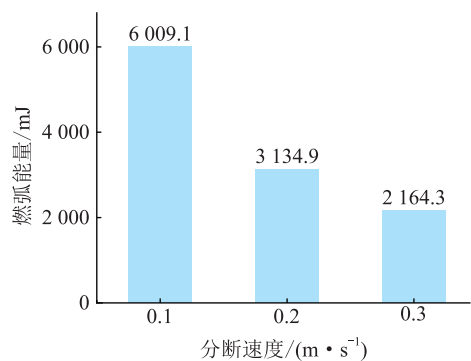


图 10 不同分断速度下燃弧能量值

Fig.10 Arc energy values at different breaking speeds

3 实验结果与分析

为验证仿真结果的准确性,采用 JF04D 电接触材料测试系统对不同电流等级实验进行验证。通过计算机调节电压为直流 48 V,电流为直流恒流 20、30、40 A,并输出实验数据。每组实验做 3 次,每次触头动作 1 000 次,取其平均值。不同电流等级下燃弧时间和燃弧能量实验结果如表 6 和表 7 所示,实验值和仿真值分别为 W_1 和 W_0 ,误差计算公式为 $|W_1 - W_0|/[0.5(W_1 + W_0)] \times 100\%$ 。

表 6 不同电流下的燃弧时间

Table 6 Arc burning time of different currents

电流等级/A	仿真燃弧时间/ms	实验燃弧时间/ms	误差百分比/%
20	19.20	21.34	10.56
30	26.80	29.29	8.88
40	36.60	37.98	3.70

表 7 不同电流下的燃弧能量

Table 7 Arc energy of different currents

电流等级/A	仿真燃弧能量/mJ	实验燃弧能量/mJ	误差百分比/%
20	4 330.10	3 497.52	21.27
30	7 618.10	5 885.69	25.66
40	12 230.10	10 195.85	18.14

从表中数据可以看出,实验测得燃弧时间与仿真结果基本一致,而实验测得燃弧能量略低于仿真结果。电流从 20 A 升高到 30 A,实验测得燃弧时间增加 37.25%,燃弧能量增加 68.28%;电流从 30 A 升高至 40 A,燃弧时间和能量分别增加 29.67%和 73.23%。这表明燃弧能量与电流等级成非线性关系,其增量呈现逐渐增大的趋势。相比于燃弧时间,电流等级对燃弧能量的影响更大,燃弧能量又是电弧侵蚀的关键影响因素之一,说明大电流对触头的侵蚀影响更严重。

4 结论

建立直流接触器电弧-触头仿真模型,分析了触头分断过程中电弧和触头的变化情况,研究了不同电流等级和分断速度下电弧侵蚀的影响,通过仿真得到以下结论:

(1) 触头在分断过程中,近阳极区电弧温度高于近阴极区电弧温度,使得阳极触头的熔池体积大于阴极触头的熔池体积,熔池呈椭圆形分布,其宽度大于深度。

(2) 电流等级由 20 A 升至 30 A,电弧温度和燃弧时间显著增加,燃弧能量增加 75.93%,加大了电弧对触头的侵蚀作用,导致熔池尺寸增大。相比于燃弧时间,电流等级对燃弧能量影响更大。

(3) 分断速度由 0.1 m/s 提高到 0.2 m/s,电弧弧柱被快速拉长,使得燃弧时间显著减少,导致燃弧能量降低 47.83%,熔池体积减小。

参考文献:

- [1] HUANG X Y, NAKAMURA Y. A review of fundamental combustion phenomena in wire fires[J]. Fire Technology, 2020, 56(1): 315-360.
- [2] 王渝红, 阳莉汶, 江伟, 等. 直流电网设备与控制策略研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 12-24. WANG Yuhong, YANG Liwen, JIANG Wei, et al. Review on equipment and control strategies of DC power grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 12-24.
- [3] 孟羽, 李兴文, 吴子豪, 等. 光伏系统直流故障电弧时频域特性及其复合模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 23-30, 40. MENG Yu, LI Xingwen, WU Zihao, et al. Research on time-frequency characteristics and composite models of DC arc faults in photovoltaic system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 23-30, 40.
- [4] 刘文轩, 廖园, 焦琳, 等. 触头材料及环境气氛对高压直流触头侵蚀影响的试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2019(4): 9-14, 25. LIU Wenxuan, LIAO Yuan, JIAO Lin, et al. Experimental study on contact erosion under different contact materials and surrounding atmospheres in HVDC relay[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(4): 9-14, 25.
- [5] 向川, 黄智慧, 董华军, 等. 真空开关电弧对阳极加热作用的仿真研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3929-3937. XIANG Chuan, HUANG Zhihui, DONG Huajun, et al. Simulation research of heating process in anode by vacuum arc[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3929-3937.
- [6] ZHANG X, REN W B, WANG S J. Experimental investigation of contact welding characteristics of electromechanical relays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8531-8539.
- [7] 伍玉鑫, 王阳明, 杨泽锋, 等. 电弧作用下浸铜碳材料烧蚀过

- 程的数值模拟[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1119-1126.
- WU Yuxin, WANG Yangming, YANG Zefeng, et al. Numerical simulation of ablation process of copper-impregnated carbon material under arc action[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1119-1126.
- [8] 王燕兵, 刘雄凤, 冯治国, 等. Cu/Ni 金属丝深熔钎焊中石墨焊接熔池温度场数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 208-211, 215.
- WANG Yanbing, LIU Xiongfeng, FENG Zhiguo, et al. Numerical simulation analysis of graphite welding pool temperature field in penetration brazing of Cu/Ni metal wires [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(7): 208-211, 215.
- [9] 忻建文, 吴东升, 李芳, 等. 小孔型等离子弧焊接条形气孔形成机理[J]. 焊接学报, 2021, 42(12): 54-61, 86, 99.
- XIN Jianwen, WU Dongsheng, LI Fang, et al. Formation mechanism of elongated cavities in keyhole plasma arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(12): 54-61, 86, 99.
- [10] 李兴文, 王云峰, 原帅, 等. 微型断路器短路开断过程中电极烧蚀特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1080-1088.
- LI Xingwen, WANG Yunfeng, YUAN Shuai, et al. Simulation research on electrode erosion characteristics of miniature circuit breaker during short circuit interruption process [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1080-1088.
- [11] 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, LYU Qishen, TIAN Tian, et al. Contact erosion characteristics under direct current air arc [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1970-1977.
- [12] 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 parameters calculation and behavior simulation of gas switching arc [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 757-771.
- [13] WANG L J, ZHANG X, HUANG X L, et al. Simulation results of influence of constricted arc column on anode deformation and melting pool swirl in vacuum arcs with AMF contacts [J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(11): 113511.
- [14] 贾文彬, 司马文霞, 袁涛, 等. 半密闭灭弧腔室内电弧运动特性的三维仿真和实验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 321-329.
- JIA Wenbin, SIMA Wenxia, YUAN Tao, et al. 3D simulation and experiment research on arc motion characteristics in the semi-enclosed arc-extinguishing chamber [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 321-329.
- [15] 刘旭晖, 朱振宇, 郭玥, 等. 一种电弧引燃电缆的电气火源模拟方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 136-142.
- LIU Xuhui, ZHU Zhenyu, GUO Yue, et al. Electrical fire source simulation for igniting cable [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 136-142.
- [16] BO K, ZHOU X, ZHAI G F. Simulation of arc dwelling behavior during bridge-type contacts opening process for high-power relay [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(6): 975-981.
- [17] 卢静雅, 翟术然, 张兆杰, 等. 基于电流模式分解的非入户式故障电弧识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 206-211.
- LU Jingya, ZHAI Shuran, ZHANG Zhaojie, et al. Non-invasive arc fault recognition based on current mode decomposition [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 206-211.
- [18] 郝莎, 徐建源, 林莘, 等. 基于隔离开关结构和操作特性的电弧放电模型研究与应用[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 131-136.
- HAO Sha, XU Jianyuan, LIN Xin, et al. Research and application of arc discharge model based on the structure and operation characteristics of disconnecter [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 131-136.
- [19] 张冠英, 赵若姿, 王尧. 基于 FCM 算法的光伏系统电弧故障检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 15-22.
- ZHANG Guanying, ZHAO Ruozhi, WANG Yao. Study on arc fault detection method of photovoltaic system based on FCM [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 15-22.
- [20] 孟羽, 李兴文, 吴子豪, 等. 光伏系统直流故障电弧时频域特性及其复合模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 23-30.
- MENG Yu, LI Xingwen, WU Zihao, et al. Research on time-frequency characteristics and composite models of DC arc faults in photovoltaic system [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 23-30.
- [21] 李静, 光明旭, 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.
- [22] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 31-39.
- LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 31-39.
- [23] 付思, 曹云东, 李静, 等. 触头分离瞬间真空金属蒸气电弧形成过程的仿真[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2922-2931.
- FU Si, CAO Yundong, LI Jing, et al. Simulation researches on vacuum metal vapor arc formation at the initial moment of contact parting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2922-2931.
- [24] 陈烜, 冷继伟, 李海峰. 基于全相位谱和深度学习的串联故障电弧识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 1-8.

- CHEN Xuan, LENG Jiwei, LI Haifeng. Series fault arc recognition method based on an all-phase spectrum and deep learning [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 1-8.
- [25] 李静, 刘凯, 曹云东, 等. 直流感触器分断过程中弧根演变及对重燃的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1241-1251.
- LI Jing, LIU Kai, CAO Yundong, et al. Arc root development and its influence on arc reigniting during the breaking process of the DC contactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1241-1251.
- [26] 刘云. 减小直流继电器触头燃弧时间的关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- LIU Yun. The research on key technologies of reducing arc durations for DC relays [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [27] 崔行磊. 直流电弧作用下触头材料的侵蚀机理和转移特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CUI Xinglei. Research on contact erosion mechanism and material transfer characteristics under direct current ARC [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [28] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- CHEN Xi. Heat transfer and flow of thermal plasma [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [29] 邹竟成. 大功率直流继电器触点侵蚀模型仿真分析及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZOU Jingcheng. Simulation analysis and experimental study on contact erosion model of high-power DC relay [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [30] 朱玉英, 李强, 王葛, 等. 深过冷银熔体热物理性质参数的研究[J]. 中国科学(G辑: 物理学 力学 天文学), 2009, 39(12): 1736-1740.
- ZHU Yuying, LI Qiang, WANG Ge, et al. Study on thermophysical parameters of deep undercooled silver melt [J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2009, 39(12): 1736-1740.
- [31] 尹健宁, 李兴文, 刘超, 等. 频率对低压断路器空气电弧燃弧特性影响的实验研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3913-3922.
- YIN Jianning, LI Xingwen, LIU Chao, et al. Experimental study on the influence of frequency on the arcing characteristic of air arc in low voltage circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3913-3922.

作者简介:



王海涛

王海涛(1973),女,博士,教授,研究方向为电器可靠性及测试技术、电器与电接触(E-mail:wanght@hebut.edu.cn);

杨博(1997),男,硕士在读,研究方向为电器可靠性及检测技术。

Arc erosion characteristics of DC contactor contacts

WANG Haitao^{1,2}, YANG Bo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province (Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China)

Abstract: The arc is generated upon contact breaking-off resulting in surface erosion in the terminals and affecting the performance of electrical contact. As there is no natural zero crossing point in the DC power supply system, the erosion caused by arcs is often more severe in DC contactors than that in AC contactors. The arc erosion effect on the contact terminals is analyzed in this paper. Based on the theory of magnetohydrodynamics, a dynamic coupling model of arc and contact terminals considering energy coupling is established. Then, the impacts of the electric current level and breaking speed on the arc erosion in contact terminals are studied by using the model. Simulation results show that the arc temperature near the anode is higher than that near the cathode. It can be noted that the arc temperature and arcing time rise significantly by increasing the current from 20 A to 30 A, which improves the arcing energy by 75.93% and thus worsening the contact erosion. Simulation results also indicate that increasing the breaking-off speed from 0.1 m/s to 0.2 m/s, results in an increase of voltage and current variation rates, a reduction of the arcing time and molten pool volume, a decrease of the arcing energy by 47.83%, and a reduction of the impact of arc erosion on the contact terminal. The experimental results are consistent with the simulations confirming the accuracy of the simulation model.

Keywords: DC contactor; magnetohydrodynamic; arc erosion; dynamic process; current rating; breaking speed

(编辑 钱悦)