

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.005

雷击燃弧瞬态过程中真空阳极触头烧蚀分析及优化

丁 璨¹, 王广凯¹, 李红兵², 师玉东¹, 袁 召³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司, 武汉 430048; 3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 灭弧室作为真空断路器的核心部件,其抗电弧烧蚀特性决定着断路器的开断性能与寿命。为此文中构建了一种考虑阳极熔池流动的雷击燃弧触头烧蚀模型,以不同电流强度作为输入条件来模拟燃弧瞬态过程,总结了电流大小在雷击燃弧瞬态过程中对阳极烧蚀的影响规律,深入剖析不同电流强度对阳极热过程产生的影响。随后在此模型的基础上设计了中心复合实验,并提出了基于神经网络与NSGA-II算法相结合的触头材料成分优化方法确定铜基多元触头材料的最优成分,最终确定触头材料质量分数的最优质量比为Cu为77.13%,Cr为5.86%,W为10.69%,Ag为5.93%,Graphene为0.39%,优化前后质量损失和烧蚀轴向速度分别降低50.2%和41.3%,最高温度降低5.63%。该研究为真空灭弧室新型触头材料开发提供理论依据和技术支持。

关键词: 真空断路器; 触头烧蚀; NSGA-II; 材料成分优化

Analysis and Optimization of Vacuum Anode Contact Ablation During Lightning Arc Transient Process

DING Can¹, WANG Guangkai¹, LI Hongbing², SHI Yudong¹, YUAN Zhao³

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430048, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As the core component of vacuum circuit breakers, the arc resistance and ablation characteristics of the arc extinguishing chamber determine the breaking performance and service life of the circuit breaker. Therefore, in this paper, a lightning arc contact ablation model considering the flow of the anode molten pool is constructed. Different current intensities are used as input conditions to simulate the transient process of arc burning. The influence law of current size on anode ablation in the transient process of lightning arc burning is summarized, and the influence of different current intensities on the anode thermal process is deeply analyzed. Subsequently, a central composite experiment is designed based on this model, and a contact material composition optimization method based on the combination of neural network and NSGA-II algorithm is proposed to determine the optimal composition of copper-based multi-component contact materials. Finally, the optimal mass ratio of contact material content was determined as Cu 77.13%, Cr 5.86%, W 10.69%, Ag 5.93%, Graphene 0.39%. Before and after optimization, the mass loss and axial ablation velocity decreased by 50.2% and 41.3% respectively, and the maximum temperature decreased by 5.63%. This research provides theoretical basis and technical support for the development of new contact materials for vacuum arc extinguishing chambers.

Key words: vacuum circuit breaker; contact ablation; NSGA-II; material composition optimization

收稿日期:2025-12-06; 修回日期:2026-02-11

基金项目:国家自然科学基金(52177143)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177143).

0 引言

随着新型电力系统建设推进, 电力需求增长与新能源规模化并网对设备性能提出更高要求^[1-3], 真空断路器凭借其突出的灭弧能力、高绝缘性能、长寿命周期及环境友好特性^[4-5], 在智能电网建设中展现出显著优势, 可有效满足设备智能化、紧凑化与高可靠性的发展需求^[6-8]。真空灭弧室作为中高压电力系统的核心元件, 其性能直接影响断路器故障电流分断的可靠性与速度, 对保障电网的安全稳定运行具有关键作用^[9-10]。

雷电过电压作为电力系统安全运行的重大威胁, 其引发的瞬态过程具有传播速度快、破坏性强等特点^[11-14]。雷击过程中, 真空灭弧室内部电场会在微秒级时间尺度发生剧烈畸变, 可能引发电场分布不均甚至绝缘击穿。特别在电网复杂化与负荷密度提升的背景下^[15-17], 传统保护措施已难以满足现代电力设备对雷击耐受能力的要求, 亟需开展相关瞬态过程的基础研究。

值得注意的是, 雷击过电压导致的瞬态电场变化会显著影响真空灭弧室的开断特性与绝缘性能^[18-20]。在此过程中, 燃弧现象引发的触头烧蚀将直接影响器件寿命与可靠性。当前针对断路器技术的研究表明, 常规方案在应对雷击过电压时存在保护能力不足的问题^[21]。阳极烧蚀作为真空灭弧室性能退化的主要诱因, 其机理涉及电弧作用下的材料相变与粒子输运过程。国内外学者通过建立电磁—流场耦合模型^[22-24]、瞬态传热模型^[25]及磁场调控模型^[26-28], 系统揭示了电流参数、磁场分布与材料特性对烧蚀行为的影响规律。沈阳工业大学团队研究发现, 触头旋转可有效降低阳极表面温度场梯度与烧蚀质量^[29], 为抗烧蚀设计提供了新思路。针对雷电冲击下断路器介质恢复特性, 文[30]建立了断路器电磁场以及气流场计算模型, 分析计算断路器在多重雷电冲击下各物理场的时变特性, 分析了多重雷电冲击下触头烧蚀角度对断路器多物理场分布特性的影响规律。文[31]研究了真空灭弧室在雷电冲击过电压下的电场分布, 并优化了灭弧室的重要结构参数。

然而, 现有研究仍存在以下局限: ①现有研究多针对雷击过程灭弧室电场和短路电流烧蚀分析, 而针对雷击瞬态过程中阳极烧蚀的动态演变机制研究尚不充分, 未能捕捉微秒级电流陡变, 特别是新型触头材料在雷击过电流工况下的烧蚀特性缺乏系统数据支撑; ②现有预测模型在瞬态过程模拟的准确性与适用性有待提升, 对熔池反冲压力、表

面作用力考虑不足, 难以满足工程优化设计需求。因此, 为全面掌握真空灭弧室在各种工况下的性能表现, 深入研究电弧重燃后触头的烧蚀情况显得尤为重要。为此, 文中将构建基于阳极熔池流动的触头烧蚀模型, 分析雷击瞬态过程中不同电流大小因素对阳极烧蚀的影响, 基于此模型, 提出神经网络—NSGAI协同优化框架, 实现铜基多元触头材料成分的精准设计, 为提升真空灭弧室抗烧蚀性能提供理论与技术支撑。

1 仿真模型建立

1.1 物理模型构建

阳极触头烧蚀涉及多个物理过程, 电弧等离子体带来的热流密度使阳极表面发生熔化、蒸发, 电弧压力、反冲压力等作用力施加于阳极表面使得液态金属流动而改变阳极表面形貌。为更精确地计算熔池形貌及烧蚀质量, 需对各物理过程逐个分析。

考虑熔池流动的真空电弧阳极烧蚀二维模型见图1。阳极尺寸为半径10 mm, 厚度5 mm, 模型的上部为电弧等离子体区域, 下部则是真空灭弧室阳极触头区域, 阳极表面热流密度由这两个区域的夹层边界输入。通过这一模型, 能够深入探究电极间等离子体向阳极的传热过程、阳极烧蚀与形变现象, 以及熔池内液态金属的流动状况。在研究液态金属流动时, 运用层流^[32]研究方法。需要指出的是, 本模型仿真并未直接考虑真空电弧, 而是把真空电弧对阳极的作用等效为压力、热流密度和电流密度等边界条件^[33]。因为真空电弧等离子体对阳极的影响, 主要体现在压力、热流密度和电流密度这几个关键层面, 所以该假设具有合理性。此外, 模型充分考虑了阳极触头熔化后熔池的流动特性, 并假定熔池满足层流流动特性, 在此基础上展开后续研究工作。

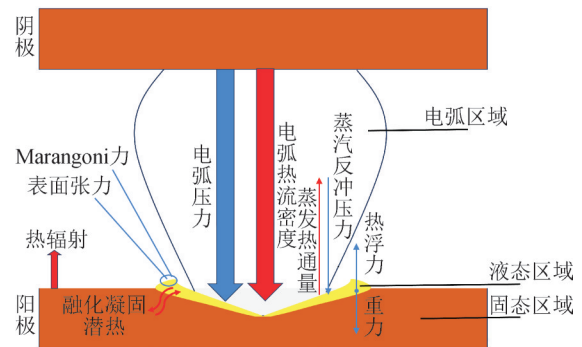


图1 电弧烧蚀下熔池形成的物理模型

Fig. 1 The physical process of arc ablation pit formation

1.2 固液相变模型

为描述激光烧蚀过程中的熔化过程, 引入热焓

孔隙法来描述固液相变过程中材料物理参数的变化,模型考虑熔化潜热,构造比热函数

$$C(T) = \begin{cases} C_s & T < T_s \\ w_1 C_s + w_2 C_l + \frac{L_f}{\Delta T} & T_s < T < T_l \\ C_l & T_l < T \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: C_s 、 C_l 分别为铜材料的固相比热和液相比热; w_1 、 w_2 为固液混合区内固态铜和液态铜的质量分数; L_f 为铜材料的熔化潜热; T_s 、 T_l 分别为触头的固相线温度与液相线温度。

1.3 界面追踪方程

为更好模拟熔池形貌,需对气液相变界面尽可能精确地追踪,为此引入 Level-Set 方法,即将界面视为高维空间的函数 $\phi(x, y, t) = 0.5$, 气相区 ϕ 取值为 0, 固液相取值为 1^[34]。采用以下对流传输方程描述交界面的运动

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_{im} \cdot \nabla \phi - m \delta(\phi) \frac{1 - \phi}{\rho_l} = \gamma \kappa \left[\varepsilon |\nabla \phi| - \phi(1 - \phi) \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (2)$$

式(2)中: ε 为界面厚度; γ 为函数初始值; u_{im} 为小孔界面速度; $\delta(\phi)$ 为界面限制函数,通过将边界条件与该函数相乘可将边界条件限制在交界处; m 为蒸发速率,其表达式为

$$m = (1 - \beta) \sqrt{\frac{m_0}{2\pi k_b T}} P_0 \exp \left[\frac{L_v}{k_b} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)中: β 为凝结系数; m_0 为原子质量; P_0 为标准大气压; L_v 为蒸发潜热; k_b 为玻尔兹曼常数; T_v 为相变温度。

通过求解方程(3),可得到 Level-Set 函数在新时刻的取值,从而捕捉到由阳极金属蒸发和液态金属流动所导致的阳极界面变化。

1.4 传热方程

由于烧蚀过程时间极短,故阳极外表面热辐射、阳极底部热传导可忽略不计,仅考虑阳极表面热通量及阳极内部热传导。电弧等离子体由阴极向阳极运动并携带大量的热流密度,认为电弧热流密度在阳极表面符合高斯分布^[35]。

$$Q_{arc} = H_p \cdot \exp \left(-\frac{r^2}{2r_0^2} \right) \quad (4)$$

式(4)中: H_p 为热流密度峰值; r_0 为热流密度正态分布的标准差。

电弧持续作用下,阳极表面产生大量金属蒸汽,并随着金属的蒸发带走大量的能量。

$$Q_{loss} = mL_v \quad (5)$$

式(5)中: m 为蒸发速率; L_v 为蒸发潜热。

1.5 动量方程

反冲压力,烧蚀过程中阳极表面喷出大量金属蒸汽,对液体表面产生法向反作用力,致使液体发生变形凹陷。

$$F_r = 0.54 P_0 \exp \left[\frac{L_v}{k_b} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right] \delta(\phi) \mathbf{n} \quad (6)$$

电弧压力,电弧等离子体的压力作用于阳极触头表面,促使阳极表面发生变形,加速熔池的形成。

$$F_{arc} = P_{max} \exp \left(-\frac{r^2}{2r_0^2} \right) \quad (7)$$

式(7)中, P_{max} 为电弧压力峰值。

表面力,液态金属表面受到法向的表面张力 F_s 和切向的 Marangoni 力 F_m ^[36]:

$$F_s = \sigma \kappa \mathbf{n} \delta(\phi) \quad (8)$$

$$F_m = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial l} \mathbf{l} \delta(\phi) \quad (9)$$

式(6)-(9)中: $\sigma = \sigma_m - A(T - T_l)$, 其中 T_l 为熔化温度; κ 为界面曲率; \mathbf{n} 为界面法向量; \mathbf{l} 为界面切向量。

重力与热浮力,为简化计算,将流体视为不可压缩流体,然而流体的重力和热浮力不可忽略,故对流体采用布辛涅斯克近似为

$$F_g = \rho g [1 - \beta_l (T - T_l)] \quad (10)$$

式(10)中: ρ 为流体密度; g 为重力加速度; β_l 为热膨胀系数。

2 燃弧过程中考虑熔池流动的阳极烧蚀瞬态过程仿真与分析

当断路器真空灭弧室遭遇雷电流冲击时,短时间内触头承受的热流峰值电流密度不同,本节将依次设置峰值电流为 20、30、40 kA,对阳极烧蚀进行仿真,并分析阳极温度分布,体积变化,阳极熔化情况,计算时间为 1 ~ 30 μs 整个燃弧阶段。

2.1 温度分布

温度—时间对比图见图 2,清晰展现出在不同电流强度影响下,阳极表面温度随时间推移而变化的情况。经对该温度—时间对比图深入分析可知,阳极表面受压力与热流共同作用,其状态从固态向液态转变,进而产生形变。起初,阳极表面开始软化,随后逐步凹陷,最终形成一个明显的凹坑。随着电流不间断地施加,凹坑的发展呈现出一定规律,其半径与深度均逐步增大。在电流通入初期,凹坑半径增大的速率相对较快;随着时间推进,凹坑深度增加的幅度也逐渐明显,反映出电流作用时

长与凹坑尺寸变化之间紧密的关联。

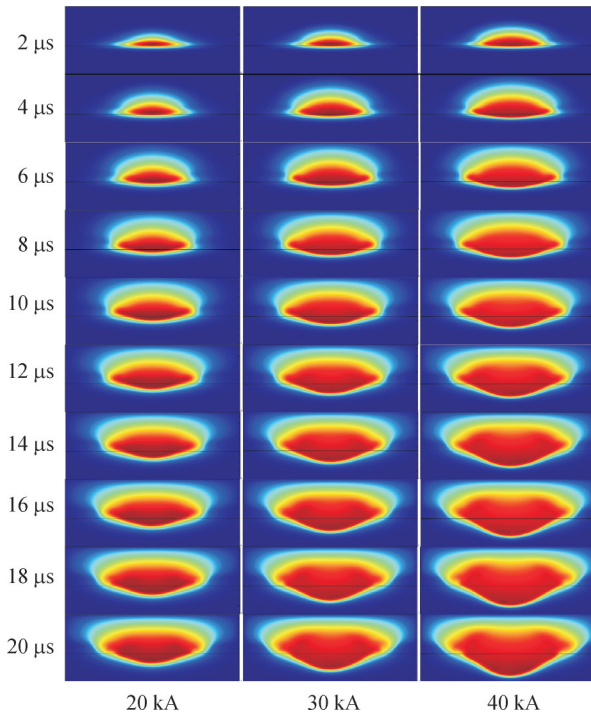


图2 温度—时间对比图

Fig. 2 Temperature-time comparison chart

在此次研究中,经多组数据对比发现:随着电流作用时间的延长,阳极温度呈现出逐步上升的趋势,与此同时,阳极内部高温区域的深度与半径也随之不断增大。从温度分布特征来看,阳极整体的温度分布相对较为不均匀,且温度最高的区域集中在阳极中心附近。值得关注的是,阳极熔池内液态金属的流动,有效促进了能量的交换,这在一定程度上使得阳极温度分布更为均匀。

当聚焦于电流强度变化对阳极的影响时,实验结果表明,随着电流的增大,阳极内部高温区域的深度与半径同样增大。在深入观察阳极表面细节时,文中注意到阳极表面边缘处的温度分布存在不均匀现象。经分析推测,这一现象极有可能是由于熔池边缘处液滴的流动或液态金属的蒸发所导致,此类微观层面的动态过程对阳极宏观温度分布产生了不可忽视的影响。

为了进一步研究温度与时间的关系,绘制了不同电流下阳极最高温度与时间的关系,见图3。由图3可得:不同电流作用下,温度升高的速率也会有所差异。20 kA时温度首次上升到最高温度附近用时 $7\ \mu\text{s}$,温度为 $3\ 209.1\ \text{K}$,而最高温度为 $3\ 259.9\ \text{K}$ 。30 kA时温度首次上升到最高温度附近用时 $4\ \mu\text{s}$,温度为 $3\ 250.5\ \text{K}$,最高温度为 $3\ 330.7\ \text{K}$ 。而40 kA时温度首次上升到最高温度附近用时 $3\ \mu\text{s}$,温度为 $3\ 275.7\ \text{K}$,最高温度为 $3\ 405.2\ \text{K}$ 。

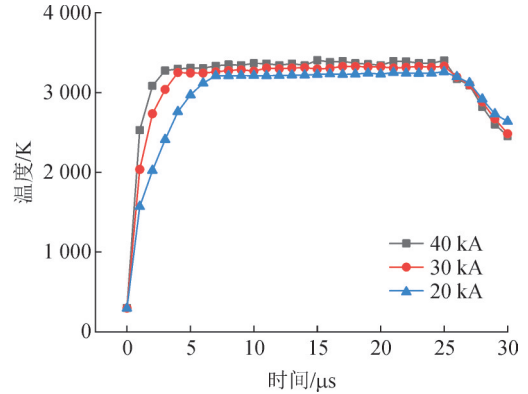


图3 不同电流大小下阳极最高温度与时间的关系

Fig. 3 The relationship between the maximum anode temperature and time under different current magnitudes

为量化液滴蒸发对温升的抑制作用,定义了蒸发耗能比($\eta_e = Q_{\text{evap}}/Q_{\text{input}}$)这一关键指标。不同电流大小下的蒸发耗能见图4。根据图4的实测数据,40 kA工况在燃弧初期即表现出显著的蒸发耗能陡增: $2\ \mu\text{s}$ 时已高达5.17%,较同期20 kA(0.01%)提升517倍。这种早期能量耗散的剧增,导致40 kA下温度在达到约 $3\ 275\ \text{K}$ 后难以大幅上升。而小电流(20 kA)因早期蒸发耗能比例低,温度得以持续上升更久,验证了液滴蒸发消耗能量是大电流下温度上升放缓的主因。随着燃弧进程进入中期阶段($5\sim 20\ \mu\text{s}$),20 kA的蒸发耗能比持续增长(从6.09%升至14.31%),40 kA则增速明显放缓(从7.50%缓增至9.88%),使得小电流工况在 $8\ \mu\text{s}$ 时完成反超。结合图3可知,电流增大使阳极温度上升速率加快,熔点到达时间大幅提前,更早引发熔化;而当阳极进入液态阶段后,金属液滴的蒸发喷溅行为消耗大量能量,依据能量守恒原理,输入电能需优先补偿液滴带走的能量,剩余用于升温的能量减少,最终表现为温度上升速率的显著降低,大电流工况下表面温度率先饱和。

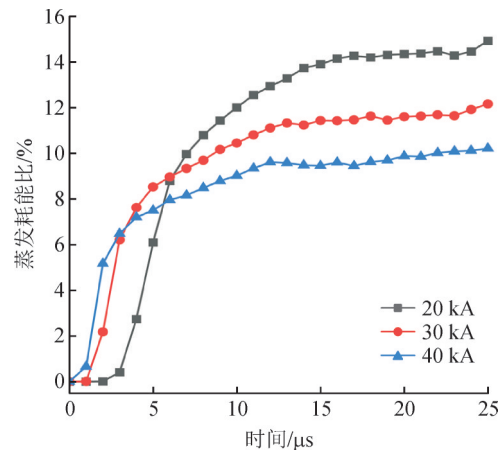


图4 不同电流大小下的蒸发耗能比

Fig. 4 The ratio of evaporation energy consumption under different current magnitudes

2.2 体积分数

本次研究聚焦于阳极材料固液混合态在整个两相流计算域内的体积分数分布特性。不同电流大小下铜材料体积分数与时间关系见图5。在可视化的示意图5中,蓝色区域代表阳极材料的固液混合相。当某一区域的体积分数取值为1时,意味着该区域完全被阳极材料占据;与之相对,红色区域表征气相,若体积分数为0,表明此区域全部为气相。而当体积分数处于0到1这个区间时,反映出该区域是阳极材料与气相的混合状态。借助对体积分数的分析,能够直观洞察阳极材料在整个计算域中的占比情况,以及随着工况变化其形态所发生的动态演变过程,为深入理解阳极在复杂流场环境下的行为提供了关键依据。

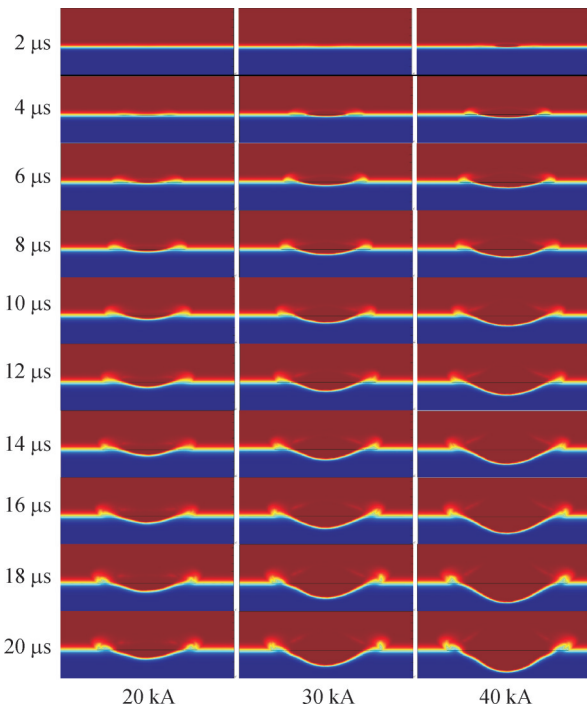


图5 不同电流大小下铜材料体积分数与时间的关系

Fig. 5 The relationship between the volume fraction of copper material and time under different current magnitudes

通过对图4的深入分析可知,阳极熔池在几何形态上呈现出半径大于深度的特征。在整个过程中,由于电弧压力与热流的共同作用,阳极表面出现金属熔化,随着液态金属被持续加热,阳极表面液态金属开始受电弧压力和蒸汽反冲压力挤压而发生变形,表面液态金属由阳极中心向四周流动,阳极中心区域开始出现凹坑,且在熔坑边缘出现明显环状凸起。随着电流的提升,大电流工况下,熔坑出现时间明显提前,且半径及深度明显增大,这是由于在大电流工况下,阳极表面受到真空电弧的热流密度和电弧压力更加剧烈,且由于温升加剧致

使金属熔化时间提前并带来更大的蒸汽反冲压力,液体气化和运动加剧。具体而言,当电流由20 kA提升至40 kA时,阳极烧蚀深度增加了48.7%,这一数据直观地表明电流增大对阳极烧蚀具有显著的加剧作用。

阳极加热产生的金属蒸汽的存在会显著降低真空灭弧室内的绝缘强度,进而对真空灭弧室的开断性能产生极为不利的影响,威胁到真空灭弧室的正常工作。真空灭弧室作为电力系统中保障安全开断的关键设备,其性能的劣化可能引发严重的电力事故,因此阳极烧蚀及相关现象的研究对于提升电力系统的可靠性与稳定性具有重要意义。

2.3 流动速度

不同电流下熔池径向与轴向速度的瞬态演变规律见图6。图6分析表明,电流强度对流动模式具有显著影响:在20 kA工况下,轴向速度峰值(3.57 m/s)虽略高于径向峰值(3.51 m/s),但径向平均速度(2.18 m/s)较轴向(1.62 m/s)高出34%,表明径向流动仍占据主导地位。随着电流增至30 kA,径向速度均值(2.64 m/s)与轴向(2.43 m/s)的差距缩小至8.6%,而40 kA时两者均值分别达2.87 m/s与2.72 m/s,径向优势进一步减弱。这种流动模式的重构与图5所示的熔池形貌演变密切相关:熔池半径与深度之比从20 kA的3.26急剧降至40 kA的1.58。此外,流动过程同时表现出强烈的动态波动特性,尤其在40 kA高电流工况下,金属蒸气反冲力引发径、轴向速度出现剧烈振荡。上述现象共同表明:低电流(20~30 kA)时熔池流动以径向主导为特征,而高电流(40 kA)下触头烧蚀加剧导致熔池半径与深度之比降低进而触发轴向流动增强,形成两种速度分量交替竞争的混合模式。

3 触头材料多目标优化设计与仿真分析

前述燃弧瞬态仿真揭示了雷击大电流下(20~40 kA)烧蚀剧增的关键机制:熔池温升引发的流体失稳与液体蒸发。这一发现直接决定了材料优化的新方向:传统提升熔点的方法已不足以抑制喷溅蒸发主导的烧蚀。因此,本研究提出“通过材料组分调控熔池稳定性”的核心思路:以仿真质量损失、烧蚀轴向速度和最高温度构建多目标优化模型。基于瞬态烧蚀仿真揭示熔池流体失稳机制并提供优化依据,从而进行材料优化设计并以此验证优化算法的有效性。

传统的触头材料在面对日益增长的电力需求时,逐渐暴露出一些局限性。例如,纯铜触头虽然具有良好的导电性,但硬度较低、耐磨性差,在频繁

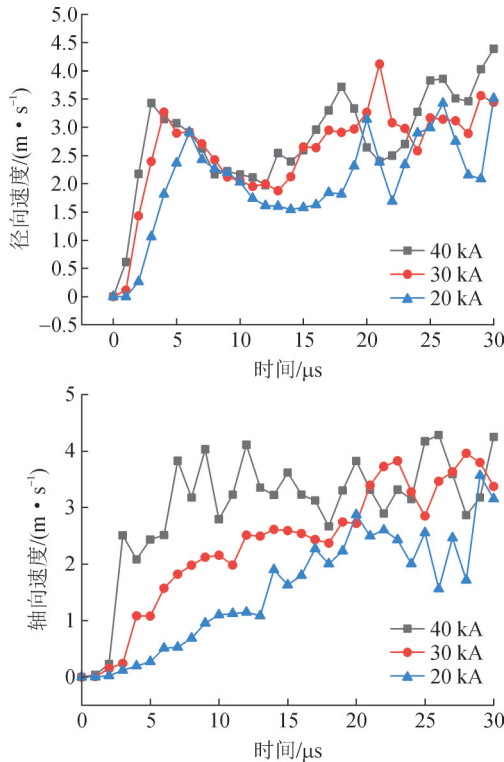


图6 不同电流大小下阳极径、轴向最大速度与时间的关系

Fig. 6 The relationship between anode diameter, axial maximum velocity and time under different current magnitudes

的开关操作中容易磨损和变形,导致接触电阻增大,影响断路器的性能和可靠性。银基触头虽然导电性和抗腐蚀性优异,但成本高昂,且资源稀缺,大规模应用受到限制。

通过合理设计和优化铜基触头多元材料的成分和制备工艺,可以实现各组成元素之间的协同作用,从而获得具有优异综合性能的触头材料,满足高压断路器在不同工况下的使用要求。这不仅有助于提高电力系统的运行效率和可靠性,减少设备故障和维护成本,还能推动电力设备制造业的技术进步,促进新能源、智能电网等领域的发展。因此,开展铜基多元触头材料性能优化及综合评估的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

3.1 触头材料成分及烧蚀机理分析

真空灭弧室触头材料通常由多种成分组成,以下是常见的几种触头材料及其物理特性,见表1。

真空灭弧室触头在开断过程中能够抑制电弧的集聚,电弧能量通过负电荷、对流传递至触头表面,导致局部熔化或蒸发,形成触头表面凹坑或凸起,使得触头表面氧化或粗糙化进而真空灭弧室性能下降。在40.5 kV断路器中,触头材料的选择需兼顾导电性、耐烧蚀性和机械强度。触头材料的烧蚀行为与其物理化学性质、电弧能量分布及服役环境

密切相关。

表1 真空灭弧室触头主要物理特性

Table 1 Main physical characteristics of vacuum interrupter contacts

材料名称	铜铬合金	铜钨合金	银钨合金
主要成分	铜、铬	铜、钨	银、钨
熔点/°C	1 080~1 300	1 600~2 800	1 200~2 800
密度/(g·cm ⁻³)	8.3~8.9	11.0~17.5	11.0~16.5
硬度(HV)	100~250	200~400	150~300
电导率/%IACS	80~90	30~60	50~80
热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	300~380	150~250	200~300
热膨胀系数/°C ⁻¹	16~18×10 ⁻⁶	8~12×10 ⁻⁶	8~12×10 ⁻⁶
弹性模量/GPa	120~140	180~250	160~200
抗电弧侵蚀性	较好	优异	优异

铜铬合金(Cu-Cr)以40%~50%铬质量分数为基础,烧蚀主要源于相界面弱化与晶界扩散效应:Cr颗粒与Cu基体的热膨胀系数差异(Cu:17×10⁻⁶/°C, Cr:6.2×10⁻⁶/°C)导致高温下界面应力集中,Cu相优先熔化形成液态通道,Cr颗粒因失去支撑而脱落,表面呈现麻点状凹坑。其适用于高海拔、污秽环境下的长寿命弧触头。

铜钨合金(Cu-W)则采用70%~80%钨骨架结构,铜钨合金(Cu-W)的烧蚀机制以两相分离与热应力开裂为主:W颗粒(熔点3 422 °C)作为骨架支撑结构,Cu相(熔点1 083 °C)在电弧高温下选择性蒸发,形成多孔状表面。热膨胀系数差异(Cu:7×10⁻⁶/°C, W:5×10⁻⁶/°C)导致界面微裂纹,W颗粒剥离成为主要烧蚀形式。掺杂碳纳米管(0.1%~0.5%)可提升Cu相导热能力,使烧蚀率降低35%,适用于高压断路器,适合作为主触头承受大电流冲击^[37]。

银钨合金(Ag-W)通过Ag40%~60%W的配比及Ni掺杂,实现接近纯银的电导率(6.3×10⁷ S/m)和优异的抗熔焊性,银钨合金(Ag-W)的烧蚀表现为Ag相迁移与W氧化剥落:Ag的低熔点(961 °C)使其在电弧作用下形成液态薄膜并蒸发,导致成分偏析与熔坑形成。W颗粒氧化生成易挥发的WO₃,表面出现麻点与粗糙化,其适用于高频继电器触点^[38]。

3种合金的烧蚀量差异本质上由材料热力学参数决定:银钨合金因Ag的高蒸气压(10⁻³ Pa)和低熔点导致烧蚀量最大,铜钨合金依赖W的高熔点(3 422 °C)和低蒸气压(10⁻⁶ Pa)实现最低烧蚀量,铜铬合金通过Cr的抗氧化性(形成Cr₂O₃膜)平衡烧蚀与导电性。实际应用中需根据工况(如电压等级、分断频率)选择配方。实际应用中,主触头优先选择铜钨合金以平衡载流与抗烧蚀性能,弧触头则根据需求在银钨合金的低电阻特性和铜铬合金的长寿命之

间权衡,特殊环境可通过表面镀银提升综合性能。

3.2 材料参数的理论计算模型

对于铜基多元合金,其等效物理参数通过混合法则计算。

介电常数 ϵ 。Voigt模型(等应变假设)

$$\epsilon_{(eq,Voigt)} = \sum_{i=1}^n V_i \epsilon_i \quad (11)$$

式(11)中: V_i 为体积分数; ϵ_i 为纯材料介电常数。

电导率 σ 。Reuss模型

$$\sigma_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\sigma_i} \right)^{-1} \quad (12)$$

热导率。Maxwell-Eucken模型

$$k_{eq} = k_{matrix} \cdot \frac{2k_{matrix} + k_{particle} - 2V_p(k_{matrix} - k_{particle})}{2k_{matrix} + k_{particle} + V_p(k_{matrix} - k_{particle})} \quad (13)$$

式(13)中: k_{matrix} 为基体热导率; $k_{particle}$ 为增强相热导率。

热膨胀系数 α 。采用线性混合法则

$$\alpha_{eq} = \sum_{i=1}^n V_i \alpha_i \quad (14)$$

该参数直接影响材料的热机械性能,需特别关注热膨胀系数差异对界面应力的影响。

弹性模量 E :

1)基础Hashin-Shtrikman模型

$$E_{eq-G} = E_m + \frac{V_p(E_p - E_m)}{1 + V_p \frac{E_p - E_m}{E_m}} \quad (15)$$

式(15)中: E_m 为基体弹性模量; E_p 为增强相弹性模量; V_p 为增强相体积分数(质量分数需转换)。

2)二维材料修正模型(石墨烯片层)。引入形状

修正因子 $\xi = \frac{l}{2h}$ (片层长厚比)

$$E_{eq-G} = E_m \left[1 + \frac{V_G}{1 - V_G} \cdot \frac{\frac{E_G}{E_m} - 1}{\frac{E_G}{E_m} + \xi} \right] \quad (16)$$

3)多元复合修正公式(协同增强)

$$E_{eq-total} = \frac{V_{Cr}}{E_{eq-HS-Cr}} + \frac{V_W}{E_{eq-HS-W}} + \frac{V_G}{E_{eq-HS-G}} + \frac{V_{Ag}}{E_{eq-HS-Ag}} \quad (17)$$

根据以上公式,将烧蚀所需参数理论计算的等效参数代入Comsol进行仿真。

3.3 触头材料优化实验设计

因为铜材料具有良好的导电性和导热性,通过添加其他元素如铬(Cr)、钨(W)、银(Ag)、石墨烯(Graphene)等,可以显著改善其综合性能。铬的加入能够提高材料的硬度、强度和耐腐蚀性,增强触头在高温和高电流条件下的稳定性;而钨具有高熔

点、高硬度和良好的耐磨性,可有效提高触头的抗烧蚀能力;银能进一步提升材料的导电性和抗电弧侵蚀性能;而石墨烯作为一种新型的二维材料,具有优异的力学、电学和热学性能,少量添加即可显著增强铜基材料的强度、硬度和导电性,同时改善其抗烧蚀和耐磨损性能。

本研究旨在以铜、铬、钨、银、石墨烯为原料,通过正交试验设计制备铜基多元触头材料,并对其性能进行优化和综合评估。正交试验设计是一种基于正交表的多因素实验设计方法,旨在通过合理安排实验点,在尽可能少的实验次数下获取全面且有代表性的实验信息,从而有效减少实验工作量,同时保证实验结果的可靠性和准确性。

采用正交表设计42组实验,研究铜—铬—钨—银—石墨烯5种合金成分质量比不同时对烧蚀性能的影响。基于各因素水平及中心复合实验设计方法,对不同质量分数的触头材料开展对比试验,试验结果见表2。

表2 CCD试验样本设计及仿真结果

Table 2 Design of CCD test samples and Simulation results

样本	质量分数/%					质量损失/ mg	烧蚀轴向 速度/ (m·s ⁻¹)	最高温 度/K
	铜	铬	钨	银	石墨烯			
1	70	2	5	3	0.5	6.0	0.50	3 151.1
2	80	2	5	7	0.1	5.9	0.47	3 142.9
3	75	4	8	5	0.1	6.3	0.55	3 199.1
4	75	4	8	5	0.3	6.1	0.48	3 150.5
5	75	2	8	5	0.3	6.8	0.50	3 202.9
:	:	:	:	:	:	:	:	:
38	80	2	5	3	0.1	6.5	0.53	3 228.7
39	80	6	5	3	0.1	5.3	0.44	3 127.2
40	80	6	11	3	0.5	5.8	0.51	3 174.3
41	80	6	5	7	0.1	5.5	0.47	3 133.6
42	70	6	11	3	0.5	5.4	0.46	3 117.7

4 基于BP神经网络与NSGA-II算法的触头材料成分优化

触头材料成分优化流程图见图7。首先运用中心复合实验方法设计包含多成分参数的数据样本。随后根据所设计的参数样本构建触头材料成分预测模型,并对该模型进行误差分析,以此验证模型的准确性。最后将构建的BP神经网络模型与NSGA-II多目标优化算法相结合,对触头材料成分进行优化,获取材料成分的非支配解集,并从该解集中选取最优解。

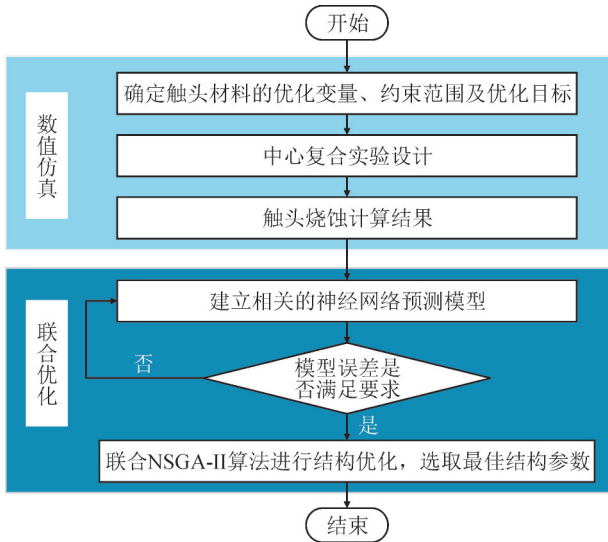


图7 触头材料优化流程图

Fig. 7 Contact material optimization flowchart

4.1 神经网络模型构建

在触头材料成分优化设计中,确保触头在短时间大电流的作用下触头烧蚀速度维持在较低的水平。基于正交试验所获取的样本集,为实现触头材料的优化,构建的神经网络模型见图8。

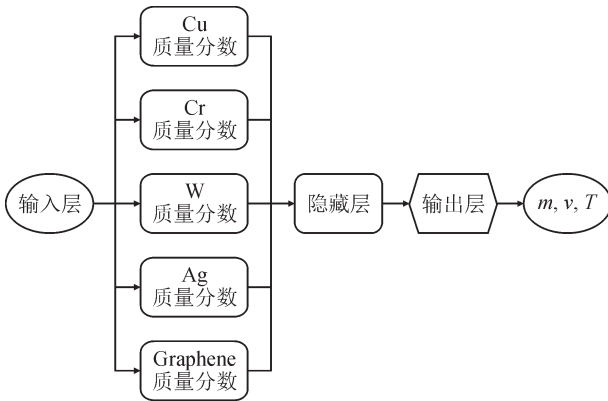


图8 触头材料成分神经网络预测模型

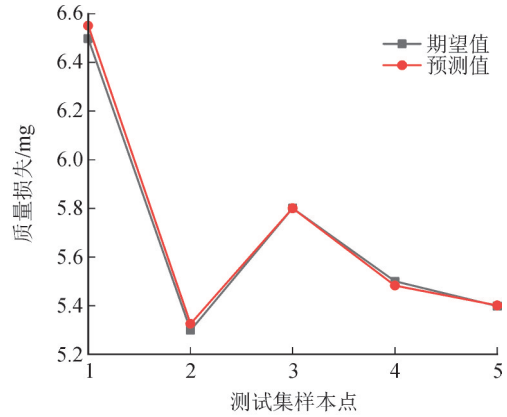
Fig. 8 Neural network prediction model for contact material composition

该神经网络模型主要由输入层、隐藏层和输出层构成。输入层包含各材料成分这些关键结构参数。中间隐含层神经元的数量与训练集样本个数保持一致,旨在充分挖掘输入数据中的复杂特征和内在关系。输出层则选取质量损失 m 、烧蚀速度 v 、最高温度 T 作为输出变量,以此精准反映真空灭弧室内部电场的关键特性,为后续的电场分析与优化提供直观有效的量化指标。

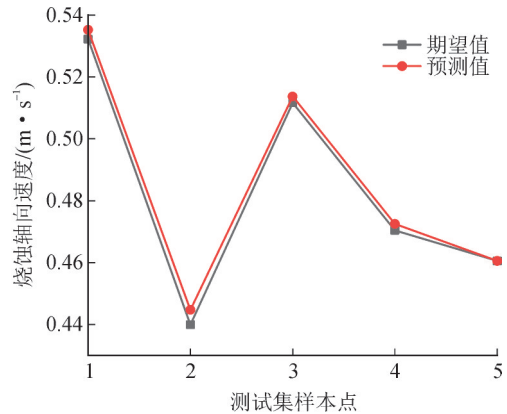
基于编程软件实现对神经网络模型的训练与预测工作。具体而言,从中心复合设计(CCD)实验表的数据中,选取前37组仿真数据,将其作为神经网络的训练集,以此对神经网络进行深度训练,使其

能够充分学习各输入参数与输出变量之间的复杂映射关系。同时,选取剩余的5组数据作为测试集,用于校验神经网络模型的预测精度。

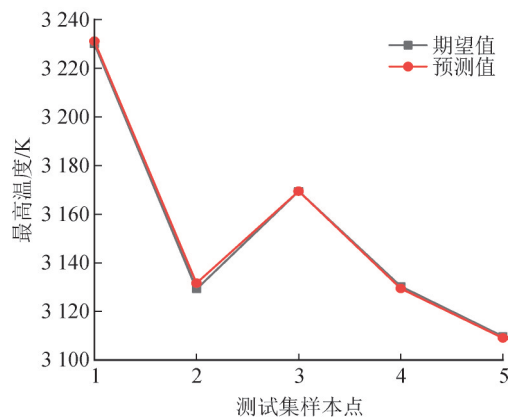
经训练与测试后,将神经网络模型各输出值的预测值与实际值进行对比,对比结果直观呈现见图9。此对比图清晰展示了模型预测值与实际值的拟合程度,为评估神经网络模型在触头材料成分预测方面的准确性提供了直观依据。神经网络模型预测误差见图10。



(a) 质量损失预测与期望输出对比



(b) 烧蚀轴向速度预测与期望输出对比



(c) 最高温度预测与期望输出对比

图9 神经网络模型预测值与实际值对比

Fig. 9 Comparison of the predicted values of the neural network model with the actual values

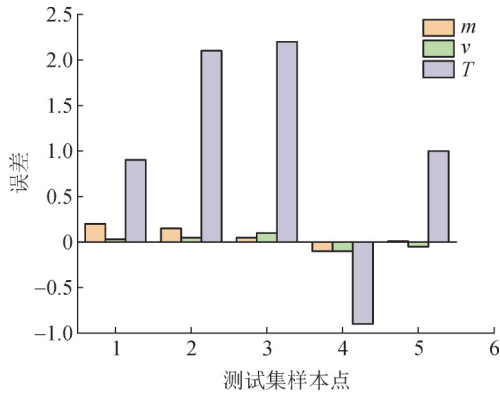


图10 神经网络模型预测误差

Fig. 10 Neural network model prediction error

在编程软件中计算神经网络模型的相关指标, 得到结果见表3。

表3 神经网络模型的相关指标数值

Table 3 The relevant index values of the neural network model

神经网络模型	均方根误差值 ER_{RMS}	相关系数 R^2
<i>m</i>	0.101 9	0.945 6
<i>v</i>	0.076 1	0.953 6
<i>T</i>	0.295 0	0.934 5

由图10和表3可得:所构建的神经网络模型在预测相关参数时预测值和实际值之间的偏差较小, 输出项的均方根误差水平较小, 而相关性系数较高。这可以充分说明该神经网络可以精准地描述各参数之间的非线性关系, 这为后续的触头材料成分优化设计及相关研究提供了可靠的技术支持。

4.2 基于NSGA-II算法的触头材料优化

NSGA-II算法于2000年被Deb等学者提出, 通过引入快速非支配排序、精英策略和拥挤度算子等策略克服了NSGA算法复杂度高、优质解不易保留的缺点^[39-41], 算法原理图见图11。

在多目标优化问题中, 一般会存在多个目标函数需要同时优化的情况。Pareto集是指在目标空间中, 不存在其他解能够在所有目标上都优于该集中的解的解集。具体而言, 对于Pareto集中的任意一个解, 不可能找到一个其他解使得这个其他解在所有目标函数上都比该解更好, 而至少在其中某一个目标函数上比该解更差。Pareto集通常包含多个不同的解, 这些解在目标空间中分布广泛, 代表了不同的目标权衡关系。Pareto前沿是Pareto集在目标空间中形成一个前沿面, 而Pareto前沿上的解是在多目标优化问题中能够达到的最优权衡解的集合^[42]。

触头材料优化是一个典型的多目标优化问题。在实际工程中, 触头材料需要同时满足多个优化目标, 且这些目标之间通常存在着相互制约的关

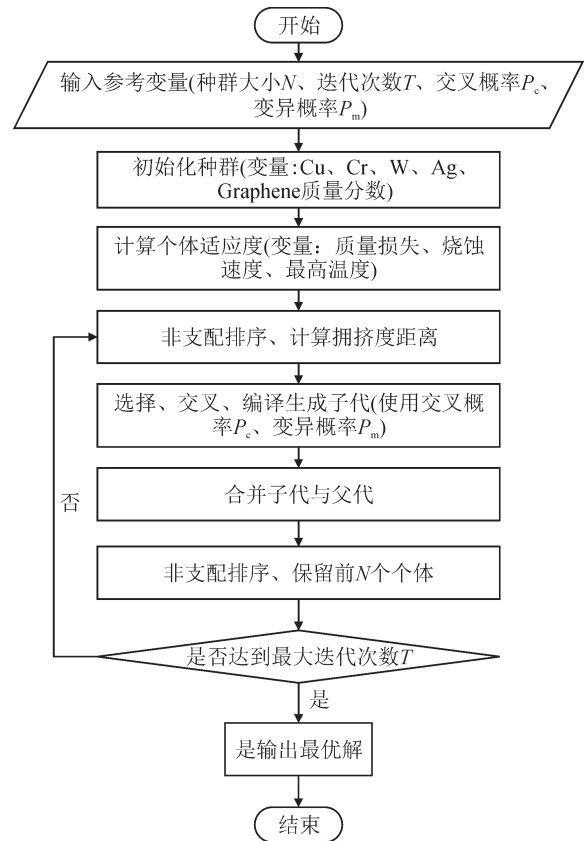


图11 NSGA-II算法原理图

Fig. 11 Schematic diagram of the NSGA-II algorithm

系, 因此难以通过单一目标优化方法满足所有目标的最优解。

1) 目标函数的选择。本次优化选取铜、铬、钨、银和石墨烯各物质质量分数作为优化变量, 选取烧蚀质量损失、烧蚀速度和最高温度为优化目标。各优化变量的取值范围严格遵循式(18)、(19)所限定区间, 以此确保优化过程在合理的参数空间内进行, 为触头材料优化奠定基础。

$$\begin{cases} \min Q = f_1(\text{Cu, Cr, W, Ag, G}) \\ \min V = f_2(\text{Cu, Cr, W, Ag, G}) \\ \min T = f_3(\text{Cu, Cr, W, Ag, G}) \end{cases} \quad (18)$$

其中触头材料优化变量的取值范围为

$$\begin{cases} 70\% \leq \text{Cu质量分数} \leq 80\% \\ 2\% \leq \text{Cr质量分数} \leq 6\% \\ 5\% \leq \text{W质量分数} \leq 11\% \\ 3\% \leq \text{Ag质量分数} \leq 7\% \\ 0.1\% \leq \text{Graphene质量分数} \leq 0.5\% \end{cases} \quad (19)$$

2) 触头材料优化结果分析与验证。经过NSGA-II算法历经多次迭代运算后, 生成的pareto非支配解集见图12。鉴于提高触头耐烧蚀的核心目标, 本研究基于多目标优化原则, 在Pareto非支配解集中, 精心筛选出质量损失、燃烧速率和最高温度均处于较低水平且差异不大的参数组合。经分析与计算,

最终确定触头材料质量比的最优成分参数: Cu 为 77.13%, Cr 为 5.86%, W 为 10.69%, Ag 为 5.93%, Graphene 为 0.39%。

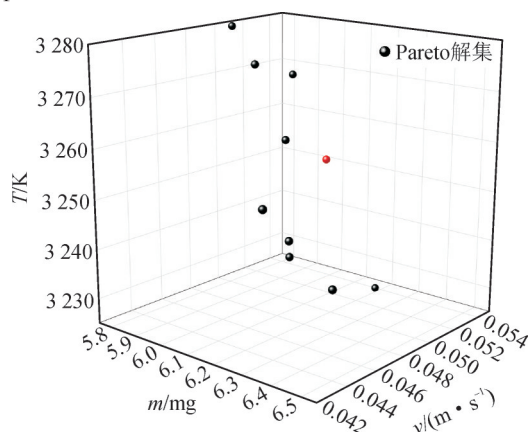


图 12 pareto 非支配解集

Fig. 12 pareto non-dominated solution set

优化前后相关的参数及优化变量对比见表 4。

表 4 优化前后的优化参数及变量对比

Table 4 Comparison of optimization parameters and variables before and after optimization

指标	优化前	优化后	百分比/%
质量损失 m/mg	12.30	6.13	50.20
烧蚀轴向速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	0.87	0.51	41.30
最高温度 T/K	3 365.20	3 175.80	5.63

4.3 多目标优化结果的可靠性分析与文献验证

现有研究为文中优化组分提供了实验与理论支持:文[43-44]研究了不同 Cr 质量分数下真空触头的抗烧蚀性能,结果表明,当 Cr 质量分数增高时触头的分断能力升高,Cr 质量分数达到 20%~30%时,分断能力最大,而随着 Cr 质量分数的继续增高,分断能力开始下降。文[45]指出添加 Fe/Mo/W 等元素能细化富 Cr 相,分散电弧侵蚀;其中 W 掺杂被证实可提高熔点与机械强度,与文中 Cr/W 协同设计思路一致。文[46-47]则直接证明微量石墨烯可显著降低铜钨合金质量损失与电弧侵蚀深度,其机制包括阻碍溶质扩散、减少液滴喷溅及加速热传导,其中发现掺杂质量分数为 0.10% 的 CuW85 合金总质量损失相对未改性材料降低了 19.9%;掺杂了石墨烯的 CuW80Cr0.15% 比 CuW80 的损失质量降低 10.66%,电弧侵蚀深度降低 92.56%,这与文中少量添加石墨烯改善触头材料其抗烧蚀性能的结论相吻合。文[46]进一步指出:在 CuCr 合金中 W 与 C 元素的加入可扩大电弧分散面积并降低电弧侵蚀(>50%),在保持电导率同时增强抗熔焊性。综上所述,文献中高熔点元素强化基体、微量石墨烯优化微观结构的结论,共同交叉验证了文中多组分协同提升耐烧蚀性

能的合理性。

5 结论

文中构建了基于阳极熔池流动的触头烧蚀模型,对燃弧瞬态过程中电流大小对阳极烧蚀的影响进行研究。借助该模型,针对不同电流大小工况下的阳极烧蚀过程展开仿真模拟,从而获取了燃弧阶段阳极的温度分布状态、熔化过程以及速度分布情况。接着利用中心复合实验和有限元仿真获取数据,研究铜基多元触头材料成分对烧蚀性能的影响。最后构建神经网络模型并结合 NSGA-II 算法对材料成分进行优化设计。经分析总结,得到以下结论。

1) 电流大小对阳极烧蚀的影响规律,电流大小与阳极热烧蚀程度紧密相关,在电极间距固定时,电流增大使阳极热烧蚀加剧,表现为熔化时间提前,熔化凹坑半径和深度增加,阳极形变更显著,熔池流动速度增大且轴向流动突出。例如,电流从 20 kA 增大到 40 kA 时,阳极烧蚀深度增加了 48.7%。当电流超出一定阈值,阳极熔池会出现金属液滴喷溅现象。这些喷溅液滴携带大量能量,可能引发电弧重燃,严重影响真空灭弧室的正常运行,威胁电力系统的安全稳定。

2) 通过运用中心复合实验与有限元仿真软件相结合的方法得到仿真样本与数据,并建立神经网络模型,研究铜—铬—钨—银—石墨烯多元触头材料成分对烧蚀性能的影响,所构建的模型具有较高的准确性,能够较好地对比触头的质量损失、烧蚀轴向速度和最高温度进行预测。

3) 联合构建神经网络模型与 NSGA-II 算法对触头材料成分进行多目标优化。确定了最优材料成分质量比参数为: Cu 为 77.13%, Cr 为 5.86%, W 为 10.69%, Ag 为 5.93%, Graphene 为 0.39%。优化后触头的质量损失、烧蚀轴向速度和最高温度均会降低,分别减小了 50.2%、41.3%、5.63%,有效增强了触头的耐烧蚀性能。

参考文献:

- [1] 王立德, 李晓武, 王青, 等. 一起 220 kV 断路器提升杆故障分析[J]. 大众用电, 2022, 37(11): 50.
WANG Lide, LI Xiaowu, WANG Qing, et al. Fault analysis of 220 kV circuit breaker lifting rod[J]. Popular Utilization of Electricity, 2022, 37(11): 50.
- [2] 张译心, 狄晨辉, 赵男, 等. 面向复合极端天气的高新能源渗透率电网风险评估技术[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 34-46.
ZHANG Yixin, DI Chenye, ZHAO Nan, et al. Risk assessment techniques for grids with high penetration of new energy under

- extreme weather conditions[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 34-46.
- [3] 朱清,阮睿,朱卫卫,等. 计及经济性的高比例新能源区域电网的不同储能类型的容量配置对比分析方法[J]. 供用电, 2024, 41(2): 12-20.
ZHU Qing, RUAN Rui, ZHU Weiwei, et al. Comparative analysis methods of capacity allocation for different energy storage types in high proportion renewable energy regional grid considering economic viability[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 12-20.
- [4] 董华军,孔一涵,董恩源,等. 基于图像序列的真空开关分闸速度检测[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2314-2320.
DONG Huajun, KONG Yihan, DONG Enyuan, et al. Breaking speed detection of vacuum switch based on sequence images[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2314-2320.
- [5] 董华军,马丽婷,李杰,等. 基于图像处理技术的真空开关分闸速度检测[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2539-2544.
DONG Huajun, MA Liting, LI Jie, et al. Opening speed detection of vacuum switch based on image processing technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2539-2544.
- [6] 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.
- [7] 丁璨,李江,袁召,等. 基于NSGA-II和BP神经网络的杯状纵磁触头结构优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6074-6082.
DING Can, LI Jiang, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of cup-shaped longitudinal magnetic contact based on NSGA-II and BP neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6074-6082.
- [8] 邹积岩,梁德世,黄翀阳,等. 110 kV 直流真空断路器模块串联开断的同步控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2627-2634.
ZOU Jiyang, LIANG Deshi, HUANG Chongyang, et al. Synchronous control of module series connection interruption in 110 kV DC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2627-2634.
- [9] 王丹,王立军,王智炜,等. 金属蒸气作用下弧后等离子体扩散过程的二维粒子模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5391-5400.
WANG Dan, WANG Lijun, WANG Zhiwei, et al. Two-dimensional particle simulation of the post-arc plasma decay process in metal vapor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5391-5400.
- [10] 赵康,漆苗. 大数据在电力系统继电保护中的应用与挑战[J]. 电子元件与信息技术, 2024, 8(6): 104-106.
ZHAO Kang, QI Miao. The application and challenges of big data in relay protection of power systems[J]. Electronic Component and Information Technology, 2024, 8(6): 104-106.
- [11] 门涛,张伟,梁祯,等. 卫星地面测控站的防雷技术[J]. 空间电子技术, 2010, 7(2): 115-118.
MEN Tao, ZHANG Wei, LIANG Zhen, et al. Lightning protection technology of satellite ground station[J]. Space Electronic Technology, 2010, 7(2): 115-118.
- [12] 陈维江,陈家宏,谷山强,等. 中国电网雷电监测与防护亟待研究的关键技术[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2009-2015.
CHEN Weijiang, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Key technologies of lightning detection and protection in China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2009-2015.
- [13] 陈家宏,赵淳,谷山强,等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.
CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [14] 李蕊,李跃,苏剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 170-176.
LI Rui, LI Yue, SU Jian, et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 170-176.
- [15] 贾德刚. 110 kV 变电站的电气设计与防雷保护分析[J]. 工程建设与设计, 2022, (14): 42-44.
JIA Degang. Electrical design and lightning protection analysis of 110 kV substation[J]. Construction & Design for Engineering, 2022, (14): 42-44.
- [16] 蔡志峰. 电力系统中电气主设备继电保护技术刍议[J]. 中国新通信, 2021, 23(13): 153-154.
CAI Zhifeng. A discussion on relay protection technology for main electrical equipment in power systems[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(13): 153-154.
- [17] 蔡志峰. 电力系统中电气主设备继电保护技术研究[J]. 光源与照明, 2021(6): 81-82.
CAI Zhifeng. Research on relay protection technology of main electrical equipment in power system[J]. Lamps and Lighting, 2021(6): 81-82.
- [18] 冯海文,刘晓明,李龙女,等. 电器电场有限元精细求解器研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5789-5796.
FENG Haiwen, LIU Xiaoming, LI Longnü, et al. Finite element method algorithm with precise solver for electric apparatus electric field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5789-5796.
- [19] 刘晓明,韩颖,王尔智,等. 基于多物理场耦合的高压SF₆断路器混沌电弧模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 165-172.
LIU Xiaoming, HAN Ying, WANG Erzhi, et al. Chaos of arc model for SF₆ circuit breaker based on coupled multiple-physical field simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 165-172.
- [20] 孙巍,于琪,刘洋,等. 12 kV 真空灭弧室内部电场数值计算与分析[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(3): 214-218.
SUN Wei, YU Qi, LIU Yang, et al. Numerical calculation and analysis of internal electric field of 12 kV vacuum interrupter[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(3): 214-218.
- [21] 杨焰. 新时期分布式电源的配电网规划与优化运行[J]. 电工技术, 2023(s1): 259-261.

- YANG Yan. Distribution network planning and optimal operation of distributed power sources in the new era[J]. *Electric Engineering*, 2023(s1): 259-261.
- [22] BOXMAN R L. Handbook of vacuum arc science and technology: Fundamentals and applications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995.
- [23] BEILIS I I, KEIDAR M, BOXMAN R L, et al. Theoretical study of plasma expansion in a magnetic field in a disk anode vacuum arc [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(2): 709-717.
- [24] LANGLOIS Y, CHAPELLE P, JARDY A, et al. On the numerical simulation of the diffuse arc in a vacuum interrupter[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(11): 2338-2345.
- [25] WANG Lijun, JIA Shenli. Modelling and simulation of anode activity in high - current vacuum arc[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(14): 145203-145203.
- [26] KEIDAR M, SCHULMAN M B. On the effect of an axial magnetic field on the high - current vacuum arc[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(1): 347-350.
- [27] KEIDAR M, BEILIS I, BOXMAN R L, et al. 2D expansion of the low - density interelectrode vacuum arc plasma jet in an axial magnetic field[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, 29(7): 1973-1983.
- [28] SHMELEV D L, ORESHKIN V I, UIMANOV I V. Hybrid numerical simulation of high-current vacuum arc taking into account secondary plasma generation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(8): 3478-3483.
- [29] 严天宇, 曹云东, 付 思. 触头旋转情况下真空电弧对阳极烧蚀的影响[J]. *电器与能效管理技术*, 2021(5): 1-4.
- YAN Tianyu, CAO Yundong, FU Si. Influence of vacuum arc on anode ablation with rotating contact[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2021(5): 1-4.
- [30] 吕云龙. 多重雷电冲击下断路器介质恢复特性与结构优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- LYU Yunlong. Dielectric recovery characteristics and structure optimization of circuit breaker under multiple lightning impulse [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [31] DING Can, SHI Yudong, LIU Jiayu, et al. Structural optimization design of vacuum interrupter based on transient electric field distribution[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2025, 20(6): 841-852.
- [32] 姜雨孜, 修士新, 林杏宇, 等. 横磁触头间弧根运动及阳极动态行为研究[J]. *高电压技术*, 2025, 51(2): 708-717.
- JIANG Yuzi, XIU Shixin, LIN Xingyu, et al. Research on arc root motion and anode dynamic behavior between transverse magnetic field contacts[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(2): 708-717.
- [33] 张在秦, 刘志远, 王 闯, 等. 大电流真空电弧中阳极熔化过程的实验与仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(7): 2143-2152.
- ZHANG Zaiqin, LIU Zhiyuan, WANG Chuang, et al. Experimental and numerical study on anode melting in high current vacuum arcs[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 2143-2152.
- [34] 杨 银. 基于水平集方法的不可压两相流的数值模拟[J]. *工程数学学报*, 2013, 30(2): 243-251.
- YANG Yin. Numerical simulation of incompressible two phase flows based on level set method[J]. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2013, 30(2): 243-251.
- [35] 田云博, 王振兴, 马 慧, 等. 大电流真空电弧阳极熔蚀过程的热力学仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 1021-1027.
- TIAN Yunbo, WANG Zhenxing, MA Hui, et al. Thermodynamics simulation of the anode erosion process under high-current vacuum arcs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4): 1021-1027.
- [36] KANG Y, JUNG I H. Model for surface tension of pure liquid metals: Revisit to Iida's model[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55(5): 3698-3710.
- [37] 夏春勇, 杨长龙, 多俊龙, 等. 中高压开关用Cu基触头材料研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(5): 598-605.
- XIA Chunyong, YANG Changlong, DUO Junlong, et al. Research progress in Cu - based contact materials for medium and high voltage switches[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(5): 598-605.
- [38] 费家祥, 李小珍, 刘映飞, 等. 银钨与银碳化钨电触头耐腐蚀能力研究[J]. *电工材料*, 2023(5): 15-18.
- FEI Jiaxiang, LI Xiaozhen, LIU Yingfei, et al. Study on corrosion resistance of AgW and AgWC electrical contacts[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2023(5): 15-18.
- [39] 唐艺军, 王艳灵, 孙浩强. 基于改进NSGA- II算法的高维多目标柔性冲压车间生产调度优化[J]. *锻压技术*, 2023, 48(11): 204-211.
- TANG Yijun, WANG Yanling, SUN Haoqiang. Production scheduling optimization on high dimensional multi - objective flexible stamping workshop based on improved NSGA- II algorithm [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48(11): 204-211.
- [40] HAN Huaizhi, YU Ruitian, LI Bingxi, et al. Multi-objective optimization of corrugated tube with loose-fit twisted tape using RSM and NSGA-II[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019(131): 781-794.
- [41] 吴小萍, 段贤伟, 杜鹏程, 等. 基于NSGA- II算法的高速铁路声屏障高度多目标优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(6): 1369-1374.
- WU Xiaoping, DUAN Xianwei, DU Pengcheng, et al. Multi - objective optimization of noise barrier height for high - speed railway based on NSGA - II algorithm[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(6): 1369-1374.
- [42] 方文彬. 考虑信息诱导的城市交通网络设计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- FANG Wenbin. Urban traffic network design considering information guidance[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [43] 刘 凯, 王小军, 张石松, 等. 真空灭弧室用CuCr触头材料制备方法及其应用[J]. *真空电子技术*, 2019(5): 33-37.
- LIU Kai, WANG Xiaojun, ZHANG Shisong, et al. The application and preparation methods of CuCr contact material in vacuum interrupters[J]. *Vacuum Electronics*, 2019(5): 33-37.
- [44] 薄祥来, 刘思远, 谢洪涛, 等. CuCr55电极触头真空电弧燃弧与

- 裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 23-27.
- YU Zhuoqi, GAO Jinwen, WANG Kesheng, et al. Research on crack defect detection method for GIS basin-type insulators based on modal analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 23-27.
- [19] 徐志钮, 郭一帆, 李先锋, 等. 机械缺陷对GIS外壳振动影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 156-164.
- XU Zhiniu, GUO Yifan, LI Xianfeng, et al. Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 156-164.
- [20] 王昕宇. 基于振动信号的GIS电接触故障特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- WANG Xinyu. Study of electrical contact fault characteristics of GIS based on vibration signals[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [21] 于卓琦. 裂纹缺陷对GIS盆式绝缘子的影响及检测方法研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2021.
- YU Zhuoqi. Influence of crack defect in GIS basin insulator and its detection method[D]. Changchun: Northeast Electric Power University, 2021.
- [22] 苏旭辉, 龙伟, 任成君, 等. GIS隔离开关不同接触状态下的温升特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 121-128.
- SU Xuhui, LONG Wei, REN Chengjun, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnecter under different contact conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 121-128.
- [23] 曹双鹏. 基于多传感融合的GIS内隔离开关故障诊断方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.
- CAO Shuangpeng. Research on fault diagnosis method of disconnecter in GIS based on multi-sensor fusion[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2021.
- [24] 郝金鹏. 外壳振动信号在GIS故障诊断中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- HAO Jinpeng. Research on the application of shell vibration signals in GIS fault diagnosis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [25] 李国栋, 俞华, 刘宏, 等. GIS设备内外部紧固松动机械缺陷振动特性对比分析研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 12-19.
- LI Guodong, YU Hua, LIU Hong, et al. Comparative analysis and research on vibration characteristics of internal and external fastening loose mechanical defects of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 12-19.
- [26] 王扬程, 关向雨, 陈志鹏, 等. 基于结构声强法的GIS机械振动传递特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5162-5171.
- WANG Yangcheng, GUAN Xiangyu, CHEN Zhipeng, et al. Energy transfer characteristics of GIS mechanical vibration based on structural intensity method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5162-5171.
- [27] 岳嵩, 朱勇, 何龙寿, 等. 基于改进动态电弧模型的GIS快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 114-120.
- YUE Song, ZHU Yong, HE Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [28] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. 基于机-热-电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
- ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.
- 张杰(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化(通信作者)(E-mail: zhangjiezd@163.com)。
- ~~~~~
- (上接第53页)
- 烧蚀特性[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 1-9.
- BO Xianglai, LIU Siyuan, XIE Hongtao, et al. Vacuum arc ignition and ablation characteristics of CuCr55 electrode contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 1-9.
- [45] 赵启, 韩金儒, 刘伟, 等. 真空灭弧室CuCr触头抗电弧烧蚀和抗熔焊研究与改进[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 1-10.
- ZHAO Qi, HAN Jinru, LIU Wei, et al. Research and improvement on resistance to arc ablation and melt welding of CuCr contacts in vacuum interrupter chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 1-10.
- [46] 韩智云, 王梦溪, 任瀚文, 等. 石墨烯/铜钨合金触头电弧烧蚀的固-液相变动力学模拟与烧蚀程度微观表征[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8490-8501.
- HAN Zhiyun, WANG Mengxi, REN Hanwen, et al. Kinetic simulation of the solid-liquid phase transition and the microscopic characterization of the electric arc ablation of graphene/copper-tungsten alloy contacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8490-8501.
- [47] 任瀚文, 杨亚腾, 卞国荣, 等. 燃弧冲击下石墨烯改性铜钨合金触头的烧蚀损伤特性与增强机理[J/OL]. 电工技术学报: 1-13 [2025-12-06]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250508>.
- REN Hanwen, YANG Yateng, BIAN Guorong, et al. Ablative damage characteristics and enhancement mechanism of graphene-modified copper-tungsten alloy contacts under arc impact[J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-13 [2025-12-06]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250508>.
- [48] CHANG Yanli, ZHENG Wei, ZHOU Zhiming, et al. Preparation and performance of Cu-Cr contact materials for vacuum switches with low contact pressure[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(11): 5647-5654.
- 丁璨(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高压开关电器的实验、仿真及理论计算(E-mail: dingcan@ctgu.edu.cn)。
- 王广凯(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压开关电器烧蚀和磨损的仿真和理论计算(通信作者)(E-mail: wangguangkai@ctgu.edu.cn)。