

封闭容器内部短路燃弧金属烧蚀对热—力效应的影响分析

黎 鹏^{1,2}, 高野荷^{1,2}, 刘 畅³, 洪倩莹⁴, 刘启辉^{1,2}, 吴 田^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网邯郸供电公司, 河北 邯郸 056035; 4. 国网浙江省电力有限公司磐安县供电公司, 浙江 磐安 322300)

摘要: 金属封闭开关设备内部发生短路燃弧故障时, 电弧烧蚀金属材料生成的金属蒸气是影响热—力效应的重要因素之一, 但目前仍缺乏金属烧蚀量对热—力效应影响的定量研究。基于磁流体动力学(MHD)理论与金属蒸气的质量浓度方程, 建立了考虑金属烧蚀的短路电弧数学模型, 并在计算模型内部放置带孔金属板, 通过改变金属板孔径大小控制金属烧蚀量, 以定量评估金属烧蚀量对封闭容器内部短路燃弧产生的热—力效应的影响。结果表明: 铜、铁金属板孔径越小, 金属烧蚀量越大, 封闭容器内压力升与最高温升越低; 相同孔径下, 铜金属板蒸发质量高于铁金属板, 且安装铜金属板时获得的压力升与最高温升均低于安装铁金属板。

关键词: 短路燃弧故障; 金属蒸气; 热—力效应; 磁流体动力学; 数值模拟

Analysis of the Influence of Metal Erosion on the Thermal-pressure Effect of Short-circuit Arcing Inside a Closed Container

LI Peng^{1,2}, GAO Yehe^{1,2}, LIU Chang³, HONG Qianying⁴, LIU Qihui^{1,2}, WU Tian^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Grid Handan Power Supply Company, Hebei Handan 056035, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Pan'an County Power Supply Company, Zhejiang Pan'an 322300, China)

Abstract: When a short-circuit arcing fault occurs inside a metal-enclosed switchgear, the metal vapor generated by arc erosion of metal materials is one of the important factors affecting the thermal-pressure effect. However, there is still a lack of quantitative research on the effect of metal erosion on the thermal-pressure effect. Based on the magnetic hydro-dynamics theory and the mass concentration equation of metal vapor, a mathematical model of short-circuit arc considering metal erosion is established. A perforated metal plate is placed inside the calculation model, and the amount of metal erosion is controlled by changing the inner diameter of the metal plate, so as to quantitatively evaluate the effect of metal erosion on the thermal-pressure effect of short-circuit arcing inside the closed container. The results show that the smaller the inner diameter of copper and iron metal plates, the greater the amount of metal erosion, and the lower the pressure rise and the highest temperature rise in the closed container; under the same inner diameter, the evaporation mass of copper metal plate is higher than that of iron metal plate, and the pressure rise and the highest temperature rise obtained when the copper metal plate is installed are lower than those when the iron metal plate is installed.

Key words: short-circuit arcing fault; metal vapor; thermal-pressure effect; magnetic hydro-dynamics; numerical simulation

2)材料相变物性参数仅随温度变化。

3)当短路电流固定时,不同计算条件下电极的烧蚀情况基本一致,仅需调整金属板孔径 d 改变金属烧蚀量,因此在仿真过程中不考虑电极蒸发产生的金属蒸气,金属蒸气由带孔金属板烧蚀产生。

1.2 数学模型

1.2.1 电弧模型

电弧模型基于磁流体动力学理论建立,包含流体动力学方程、电磁场方程。其中,流体动力学方程包含质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程。电磁场采用 Maxwell 方程组进行描述。

质量守恒方程:

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

$$S_m = m_v (\Delta S / \Delta V) \quad (2)$$

$$m_v = q_v / h_v \quad (3)$$

动量守恒方程:

轴向(z)为

$$\frac{\partial(\rho z)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} z) = \text{div}(\eta \text{grad} z) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_z \quad (4)$$

径向(r)为

$$\frac{\partial(\rho r)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} r) = \text{div}(\eta \text{grad} r) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_r \quad (5)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} H) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} H\right) + S_T \quad (6)$$

$$S_T = \sigma E^2 - q_{rad} + q_\eta + S_m h_i + S_{rea} \quad (7)$$

式(1)-(7)中: $\mathbf{v}$ 为计算区域的流场速度矢量, ρ 、 p 、 η 、 λ 、 c_p 、 H 依次为气体密度、压强、动力粘度、导热系数、比热容和焓; S_m 为质量源项; m_v 为金属板的蒸发速度; q_v 为金属板蒸发的能量通量; h_v 为金属板材料的蒸发潜热; ΔV 是与金属板烧蚀部分表面相毗邻的网格体积; ΔS 为该网格单元在金属板表面上的面积; S_z 、 S_r 分别为轴向和径向的洛伦兹力;能量方程源项由焦耳热源项 σE^2 、辐射源项 q_{rad} 、粘性耗散项 q_η 、金属蒸气内能 $S_m h_i$ 以及金属蒸气与周围气体发生化学反应吸收或释放的能量 S_{rea} 组成。化学反应类型见表1。

表1 不同金属蒸气发生的化学反应及生成物

Table 1 Chemical reactions and products of different metal vapors

金属	化学反应式	生成物
----	-------	-----

Cu	Cu+1/2O ₂ =CuO+155 kJ/mol	CuO
	Cu+1/4O ₂ =1/2Cu ₂ O+168 kJ/mol	Cu ₂ O
Fe	Fe+3/4O ₂ =1/2Fe ₂ O ₃ +411 kJ/mol	Fe ₂ O ₃
	Fe+2/3O ₂ =1/3Fe ₃ O ₄ +373 kJ/mol	Fe ₃ O ₄

通过求解计算区域的电磁场分布,求出能量方程中的焦耳热源项以及动量方程中的洛伦兹力源项。根据 Maxwell 方程组,求解得到电位 φ

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \varphi \quad (8)$$

电流密度为

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

磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (10)$$

式(8)-(10)中: $\mathbf{E}$ 是电场强度; $\mathbf{A}$ 是磁矢势分量。

封闭容器内部短路燃弧时,内部气流通常处于湍流状态,故选取适合多数工程流场计算的 k - ε 模型^[21-22]进行计算。

1.2.2 辐射模型

电弧燃烧会辐射巨大的能量,不可忽略空气自身的重吸收效应。六波段 P-1 辐射模型已经被应用于灭弧室的燃弧计算^[23]中,这种方法可计算空间中任意一点的辐射自吸收效应,该方法将空气光谱划分为6个波段,每一波段对应一个平均吸收系数 k_{am} ,通过6个平均吸收系数可分别求解每个波段对应的方程,进而计算得到电弧的辐射能量,具体如下:

$$\text{div}(\Gamma_i \text{grad} G_i) + S_{Gi} = 0 \quad (11)$$

$$\Gamma_i = 1/3k_{am} \quad (12)$$

$$S_{Gi} = 4k_{am} \pi B_i - k_{am} G_i \quad (13)$$

$$\text{div} Q_{rad} = \int_0^\infty k_{am} (4\pi B_i - G_i) \quad (14)$$

式(11)-(14)中: Γ_i 为各个波段所对应的扩散系数; G_i 为各个波段的入射辐射强度; S_{Gi} 为方程的源项; B_i 为各个波段的光谱普特克函数。

1.2.3 组分输运方程

相较于传统的磁流体动力学电弧模型,添加组分输运方程来描述金属蒸气在电弧气体中的对流和扩散效应

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} C) = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (15)$$

式(15)中: C 为金属蒸气质量浓度; D 为二元扩散系数。

1.2.4 金属板—电弧交界面建模

通过在电弧与金属板交界面引入能量守恒方程来计算贡献给金属蒸发的能量，金属板表面能量平衡方程为

$$q_v = q_{con,m} = \lambda_m \frac{(T_a - T_m)}{\Delta h / 2} \quad (16)$$

式(16)中： $q_{con,m}$ 为热传导的能量； λ_m 为金属板材料的热导率； T_a 为邻近金属板表面一层网格的温度； T_m 为金属板表面温度； Δh 为邻近金属板表面一层网格的厚度。

1.2.5 边界条件

对于流体场，在壁面与等离子体交界面上设置非滑移边界条件，空气的初始速度为 0。对于温度场，容器外壁均为恒温 300 K，空气域的温度初始值为 300 K。流体与固体接触区域为耦合边界。初始电弧温度为 16 000 K、半径 5 mm，设置于电极之间。对于磁场，由于容器体积相较于电弧要大得多，因此在器壁处的磁矢势被设置为 0。对于电场，在阴极底表面处施加零电势，在阳极端入口处的边界条件通过电流密度定义，电流密度为

$$j = \frac{I}{S_A} \quad (17)$$

式(17)中： j 为电流密度； I 为电弧电流； S_A 为电极的横截面积。

2 仿真结果及分析

2.1 考虑金属蒸气对内部热—力效应的影响

安装孔径 $d=20$ mm 的铜金属板时，是否考虑金属板熔化、金属蒸气发生化学反应 3 种计算条件下容器内部的压力升、温升及金属板蒸发质量的变化情况见图 2。由图 2 可见，不考虑金属板熔化(金属板绝热状态)时压力升与温升最高，因为此时输入的能量仅为电弧产生的焦耳热，且辐射在能量耗散中占主导地位，剩余能量使得容器内部压力与温度升高。考虑金属板烧蚀后，由于部分能量通过金属熔化、蒸发所消耗，使得监测点处压力升降低约 17%，最高温升也从 2 790 K 降至 1 840 K。考虑化学反应时，输入能量还包括金属蒸气发生氧化反应释放的能量，因此容器内部的压力升、温升与金属板蒸发质量均有增加，压力升结果升高 3%，最高温升也增加约 130 K，金属板蒸发质量增加 7%。考虑金属板熔化及金属蒸气发生化学反应的计算条件与实际情况最

接近，获得的计算结果相较其他两种方法也要更加准确。后续计算结果均在考虑金属板熔化且金属蒸气发生化学反应计算条件下得出。

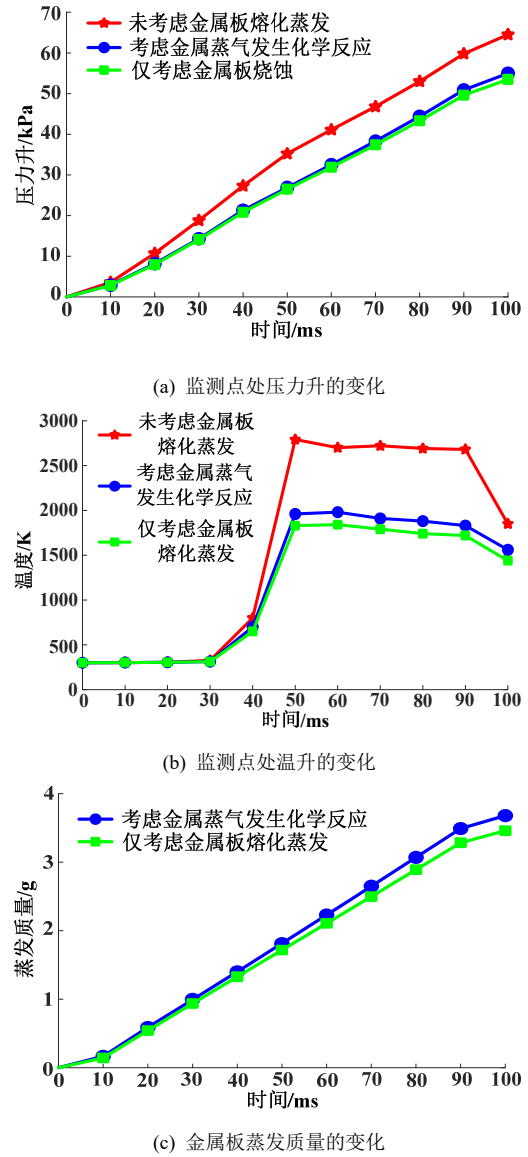


图 2 压力升、温升与金属板蒸发质量的变化

Fig. 2 The change of pressure rise, temperature rise and metal plate evaporation mass

2.2 金属烧蚀量对内部压力升的影响

内置孔径 d 为 40、30、20 mm 的金属板时不同时刻容器内部温度与金属蒸气分布见图 3、4。初始时刻，电弧高温区域集中在弧根位置，有向外膨胀的趋势。金属板孔内侧被高温气体覆盖，生成微量的铜蒸气，随着电弧的持续燃烧，高温气体覆盖的区域越来越大，在 50 ms 时，金属板上下表面几乎全部被高温气体覆盖，生成的金属蒸气也随之增多，且受等离子体喷流的推动作

用, 铜蒸气扩散至更远处, 内置 3 种孔径金属板的容器器壁附近均有约 10% 的蒸气浓度分布。而铜蒸气在靠近电极处浓度最高, 因为金属板孔径越小, 距电弧更近, 金属板蒸发质量更大, 内置孔径 40、30、20 mm 金属板时电极附近铜蒸气浓度分别达到 50.1%、57.9%、74.5%。

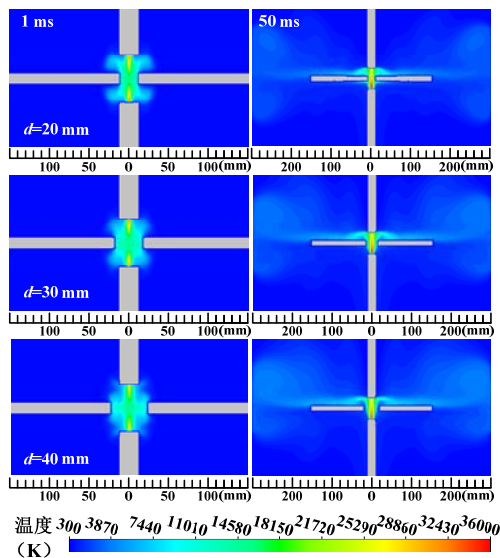


图 3 容器内部温度分布

Fig. 3 Temperature distribution inside the container

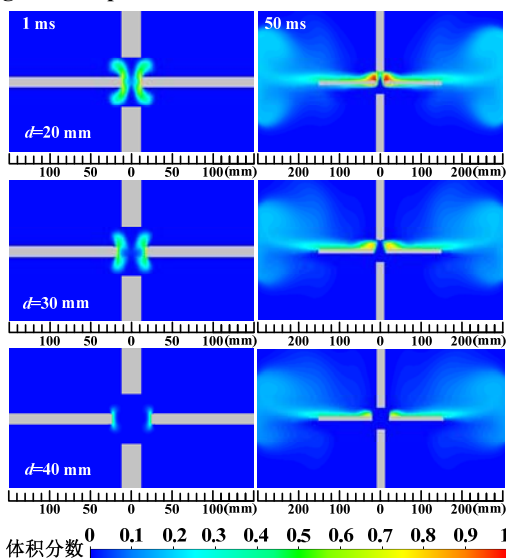


图 4 容器内部铜蒸气分布

Fig. 4 Distribution of copper vapor inside the container

不同孔径铜金属板在烧蚀过程中的蒸发质量随时间变化见图 5。前 10 ms, 因为仅金属板孔内侧处于高温环境下, 只有小部分金属蒸发, 不同孔径金属板蒸发质量差异很小。随着燃弧发展, 铜金属板表面被高温侵蚀的区域增大, 蒸发的速度也逐渐加快, 孔径小的金属板蒸发速度更快。燃弧至 100 ms 时, 孔径 d 为 40、30、20 mm

的金属板蒸发质量分别为 2.2、2.68、3.68 g。

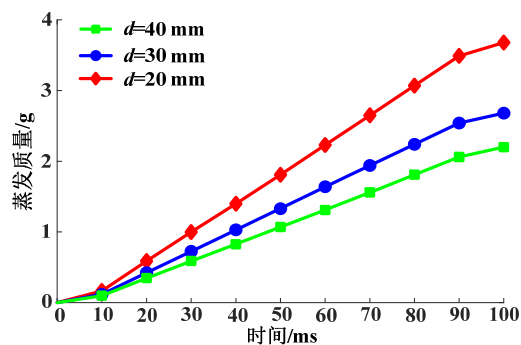
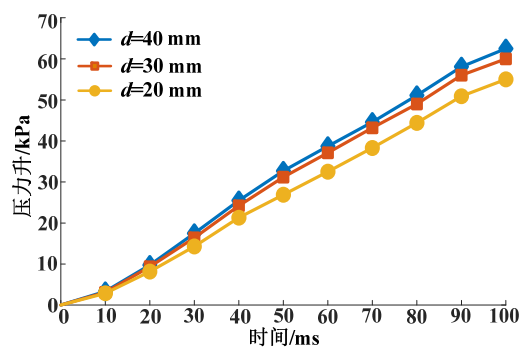


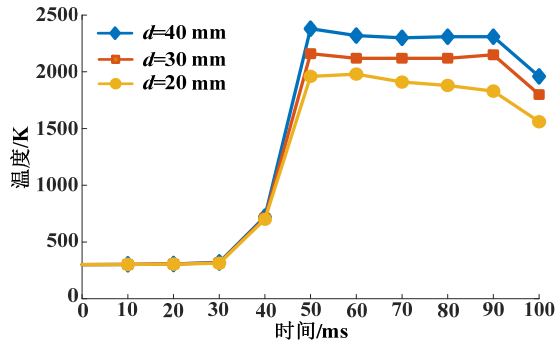
图 5 金属板蒸发质量的变化

Fig. 5 The change of evaporation mass of metal plate

安装不同孔径金属板情况下, 监测点处压力升与温升变化规律见图 6。由图 6 可知: 金属板孔径越小, 压力升与温升也越小, 这是由于铜金属熔化、蒸发消耗的能量高于铜蒸气与周围空气发生化学反应释放的能量, 使得容器内部贡献给压力与温度上升的能量会相应的减小。且由图 5 可知孔径 20 mm 的金属板蒸发质量最大, 因此消耗的能量更多, 得到监测点处的最高压力升仅 55 kPa, 与金属板孔径 40、30 mm 时相比, 内部压力升分别降低了 12%、9.8%。安装孔径 20 mm 的金属板时内部最高温升为 1980 K, 与金属板孔径 40 mm 和 30 mm 相比, 分别降低了 340 K 和 140 K。



(a) 监测点处压力升的变化



(b) 监测点处温升的变化

图 6 不同金属板孔径下压力升与温升的变化

Fig. 6 The change of pressure rise and temperature rise under different metal plate inner diameters

2.3 金属板材质对内部热—力效应的影响

将金属板材质更换为另一种开关设备中常用的金属铁，对比不同材质金属板烧蚀产生蒸气对内部热—力效应的影响。

燃弧 100 ms 时，两种材质金属板在不同孔径下的蒸发质量见图 7。由图 7 可见，随着孔径的增大，两种材质金属板的蒸发质量均减少，且在相同孔径下，铜金属板的蒸发质量要高于铁金属板，这是因为铜有着更低的熔点，且蒸发所需的能量更少。

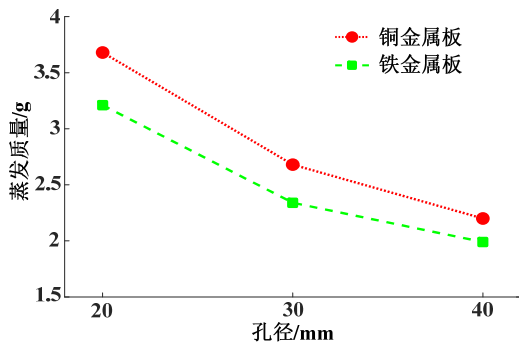
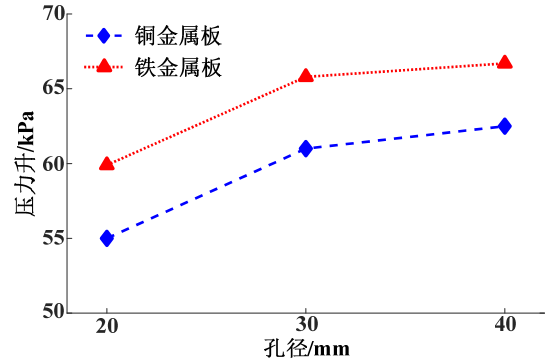


图 7 金属板蒸发质量的变化

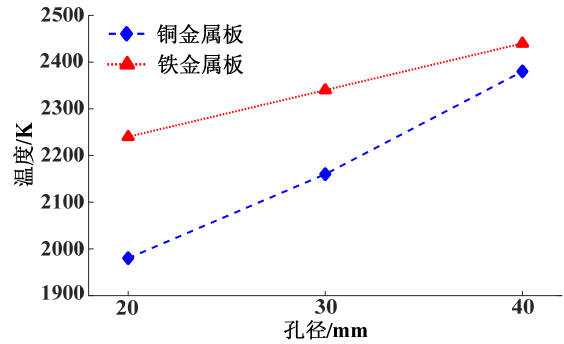
Fig. 7 The change of evaporation mass of metal plate

不同金属板材质下内部最大压力升与温升随孔径的变化见图 8。由图 8 可见，金属板孔径相同的条件下，安装铜金属板时内部的最大压力升与温升均低于铁金属板。当孔径为 20 mm 时，安装铜金属板时内部压力升为 55 kPa，最高温升为 1980 K；而安装铁金属板时内部压力升为 60 kPa，最高温升为 2240 K。分析认为：虽然铁熔化、蒸发所消耗的能量为 561.4 kJ/mol 要高于铜消耗的能量 440.1 kJ/mol，但铁蒸气发生氧化反应

所释放的能量更大(见表 1)，使得铁金属板熔化、蒸发时容器内部气体吸收的能量更高，内部压力升与温升也随之增加。



(a) 监测点处的最大压力升



(b) 监测点处的最大温升

图 8 不同金属板材质下最大压力升与温升的变化

Fig. 8 The change of maximum pressure rise and temperature rise under different metal plate materials

3 结论

文中建立了考虑金属烧蚀的短路燃弧热—力效应计算模型。并针对含有带孔金属板的封闭容器，开展了不同金属板孔径、材质的短路燃弧热—力效应仿真计算，分析了金属烧蚀量、金属蒸气类型对封闭容器内部热—力效应的影响。获得的结论如下：

1)铜、铁金属板在燃弧过程中熔化、蒸发生成金属蒸气，最终金属板蒸发质量均随孔径的减小而增大，容器内部压力升与最高温升随着蒸发质量的增加而降低。对于铜金属板，孔径 20 mm 比孔径 40 mm 蒸发质量多约 1.48 g，内部压力升降低 12%，最高温升降低约 340 K。对于铁金属板，孔径 20 mm 比孔径 40 mm 蒸发质量多约 1.21 g，内部压力升降低 11%，最高温升降低约 200 K。

2)在金属板孔径相同条件下，铜金属板蒸发质量高于铁金属板，且安装铜金属板时获得的压

力升与最高温升均低于安装铁金属板。金属板孔径为 20 mm 时, 结果差异最显著, 铜金属板蒸发质量比铁金属板高 0.47 g, 金属板材质为铜时内部压力升和最大温升分别为 55 kPa、1 980 K, 相较铁金属板分别降低了 5 kPa、260 K。

参考文献:

- [1] 阮江军, 黎 鹏, 黄道春, 等. 中压开关柜内部短路燃弧热—力效应研究综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3340-3351.
RUAN Jiangjun, LI Peng, HUANG Daochun, et al. Review on thermal-mechanical effects research of MV switchgear due to internal short circuit arcing[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3340-3351.
- [2] 徐广昊, 董 明, 郭晨希, 等. 用于开关柜状态监测传感器的射频取能技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3135-3144.
XU Guanghao, DONG Ming, GUO Chenxi, et al. Radio frequency energy acquisition technology for the state monitoring sensor of switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3135-3144.
- [3] 张 亮, 陈丽安, 王文勇. 252 kV GIS 内部燃弧故障压升计算及壳体烧穿概率研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 44-51.
ZHANG Liang, CHEN Lian, WANG Wenyong. Calculation of pressure rise and study on enclosure burn?through probability due to internal arc faults in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 44-51.
- [4] 李 美, 郭鹏程, 王一玮, 等. 密闭腔体内部故障电弧的辐射特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2021-2029.
LI Mei, GUO Pengcheng, WANG Yiwei, et al. Radiation characteristics of internal fault arc in an enclosed tank[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2021-2029.
- [5] 黎 鹏, 刘 畅, 吴泳聪, 等. 基于 NSGA-II 算法的高压开关柜泄压通道优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2013-2020.
LI Peng, LIU Chang, WU Yongcong, et al. Optimization design of pressure relief channel for HV switchgear based on NSGA-II[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2013-2020.
- [6] 刘官耕, 杜松怀, 苏 娟, 等. 低压电弧故障防护技术研究与发展趋势[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 305-313.
LIU Guangeng, DU Songhuai, SU Juan, et al. Research on LV arc fault protection and its development trends[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 305-313.
- [7] 李 玲, 刘成学. 中压开关柜内部故障电弧计算及防护措施[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 131-138.
LI Ling, LIU Chengxue. Calculation and prevention of internal fault arc in medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 131-138.
- [8] 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB/T 3906—2020[S].2020.
Guidance for the extension of validity of type tests of AC metal enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB/T 3906—2020[S].2020.
- [9] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674—2020[S].2020.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674—2020[S].2020.
- [10] 黎 鹏, 屈莹莹, 吴 田, 等. 电极类型对封闭容器内部短路燃弧特性及压力升的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1308-1314.
LI Peng, QU Yingying, WU Tian, et al. Influence of electrode types on arcing characteristics and pressure rise due to internal short-circuit arcing in a closed container[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1308-1314.
- [11] TANAKA S, MIYAGI T, IWATA M, et al. Reduction in pressure rise due to internal arcing using melting and vaporization of metal[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 328-335.
- [12] IWATA M, TANAKA S I, MIYAGI T, et al. Influence of perforated metal plate on pressure rise and energy flow due to internal arcing in a container with a pressure-relief opening[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1292-1300.
- [13] UZELAC N, DULLNI E, KRIEDEL M, et al. Application of simplified model for the calculation of the pressure rise in MV switchgear due to internal arc fault[C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stockholm, Sweden: IET,

- 2013: 10-13.
- [14]FRIBERG G, PIETSCH G J. Calculation of pressure rise due to arcing faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 365-370.
- [15]RONG Mingzhe, LI Mei, WU Yi, et al. 3-D MHD modeling of internal fault arc in a closed container[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1220-1227.
- [16]LI Mei, ZHANG Junpeng, HU Yang, et al. Simulation of fault arc based on different radiation models in a closed tank[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(5): 549-553.
- [17]LI Mei, WU Yifei, LIU Jia, et al. Aluminum erosion due to fault arcing and its effects on temperature and pressure in a closed air vessel[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(10): 3487-3494.
- [18]马 强, 荣命哲, MURPHY A B, 等. 考虑电极烧蚀影响的低压断路器电弧运动特性仿真及实验[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 115-120.
- MA Qiang, RONG Mingzhe, MURPHY A B, et al. Simulation and experimental research on air arc movement characteristics in low-voltage circuit breaker considering electrodes erosion[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 115-120.
- [19]马云双, 高国强, 朱光亚. 高速列车弓网电弧温度场特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3597-3603.
- MA Yunshuang, GAO Guoqiang, ZHU Guangya. Numerical simulation and analysis of temperature distribution of pantograph-catenary arc characteristics of high-speed train[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3597-3603.
- [20]韩伟锋, 高国强, 刘贤纳, 等. 弓网电弧磁流体动力学模型[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 21-26.
- HAN Weifeng, GAO Guoqiang, LIU Xianrui, et al. MHD model of pantograph-catenary arc[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 21-26.
- [21]朱志豪, 赵芳帅, 袁端磊, 等. 城市轨道交通大容量直流快速断路器的研发[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 417-423.
- ZHU Zhihao, ZHAO Fangshuai, YUAN Duanlei, et al. Research and development of high-power and high-speed DC circuit breaker for urban rail transit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 417-423.
- [22]WU Y, LI M, RONG M, et al. Experimental and theoretical study of internal fault arc in a closed container[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(50): 505204.
- [23]吴 翊, 荣命哲, 杨 飞, 等. 引入6波段P-1辐射模型的三维空气电弧等离子体数值分析[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5761-5767.
- WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Fei, et al. Introduction of 6-band P-1 radiation model for numerical analysis of three-dimensional air arc plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5761-5767.
- 黎 鹏(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电工装备电磁多物理场分析、输变电设备外绝缘等(E-mail: lipeng_ctgu@163.com)。
- 高野荷(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 836636529@qq.com)。