

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.007

电极烧蚀对密闭容器内空气故障电弧的影响

袁端磊¹, 王海燕¹, 杨芳¹, 朱志豪¹, 费翔¹, 李美², 吴翊²

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要:文中基于磁流体动力学理论(MHD)建立了密闭容器内空气故障电弧的二维数学模型,研究了铜电极烧蚀金属蒸汽对故障电弧的影响。在充分考虑由电极烧蚀引起的熔化、蒸发及化学反应等不同能量传递过程的基础上,通过求解质量、动量、能量、电磁场守恒方程以及金属蒸汽浓度方程描述故障电弧内部的流体动力学和电磁场耦合过程。计算获得了电弧等离子体的温度、压力和铜蒸汽浓度分布。比较分析了考虑和不考虑电极烧蚀情况下的计算结果,研究表明电极烧蚀铜蒸汽对压力上升的影响很小,这主要归因于内部能量平衡的变化。此外,电弧电压对铜蒸汽的存在也不敏感。压力上升、电极烧蚀质量和电弧电压的仿真结果和实验结果相一致,验证了故障电弧仿真模型的有效性。

关键词:故障电弧; 数学模型; 电极烧蚀; 压力上升

Influence of Electrode Erosion on Air Fault Arc in a Closed Container

YUAN Duanlei¹, WANG Haiyan¹, YANG Fang¹, ZHU Zhihao¹, FEI Xiang¹, LI Mei², WU Yi²

(1. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A two-dimensional model for fault arc in a closed chamber is developed based on magnetic-hydrodynamic theory to investigate the effect of metal vapour eroded from copper electrodes on fault arc. Different energy transfer mechanisms including melting, evaporation and chemical reaction due to metal vaporization are taken into account. By solving the conservation equations for mass, momentum, energy, electromagnetic field and mass fraction of copper vapour, the coupling effect between the gas hydrodynamic and electromagnetic field is described. The distributions of temperature, pressure and mass fraction of copper vapour are simulated. Comparisons are made between the calculation results with and without electrode erosion. Results show that the copper vapour eroded from electrodes has little influence on pressure rise, which mainly attributes to the change of internal energy balance. In addition, the arc voltage is also not sensitive to the presence of copper vapour. The simulated pressure rise, electrode erosion mass and arc voltage agree with the experimental results, which proves that validity of the numerical model.

Key words: fault arc; numerical model; electrode erosion; pressure rise

0 引言

密封型电力开关设备被频繁广泛用于电力系统输配电网中,当在密封型开关设备中发生故障电弧时,会产生剧烈的压力、热、辐射和声效应。巨大的电弧能量加热周围的气体,导致容器内的压力迅速上升并在空间内传播^[1-2],这不仅会威胁操作人员的安全,而且对周围设备造成严重冲击^[3]。同时,由于故障电弧的电流通常非常大,因此导体电极烧蚀产生大量的金属蒸汽,并通过对流扩散注入电弧

等离子体中。这些金属蒸汽云改变了等离子体的热力学和输运参数^[4]。特别的,金属蒸汽在故障电弧的内部能量平衡中扮演了很关键的角色^[5-6]。而压力上升严重受能量平衡过程影响,因而金属蒸汽的存在也可能影响压力上升。

众所周知,开关电弧和焊接电弧中金属蒸汽的影响研究一直以来都受到关注^[7-8]。通常来讲,金属蒸汽会显著改变电弧等离子体的电导率,降低电弧温度。当前对于故障电弧研究,金属蒸汽对压力上升的影响主要是通过实验方法来开展^[5,9]。Tanaka

等人实验研究了不同电极材料对密闭容器内空气故障电弧的影响^[6]。在故障电弧压力上升的计算方法中,主要包括标准计算方法(SCM)和计算流体力学(CFD)方法^[10-11],金属蒸汽不能被很好的考虑,这是因为故障电弧本身没有被具体建模,导致金属蒸汽的微观作用机理不能被模拟。随着磁流体动力学电弧模型被成功应用于故障电弧仿真中^[12-13],它可以提供更全面丰富的电弧信息,如电弧温度、压力分布以及电弧电压,而这些参量的测量通常都比较困难。此外,它也可以使电极烧蚀金属蒸汽对故障电弧影响的理论研究成为可能。

文中采用磁流体动力学方法,通过求解质量、动量、能量、电磁场守恒方程以及金属蒸汽浓度方程,建立了空气故障电弧的二维数值模型,研究了金属蒸汽对故障电弧特性的影响。通过计算获得了故障电弧温度、压力分布以及电弧电压特性,并与实验结果进行了比较。

1 计算方法

1.1 计算模型

密闭容器的几何结构见图1(a)。由于容器结构的对称性,建立了一个二维轴对称模型以减少计算时间和成本,见图1(b)。燃弧位置为腔体中心,上下两根棒状铜电极对称分布于整个容器中,电极直径为0.02 m,间距为0.03 m。容器内充1个大气压的空气,电弧电流为1~20 kA的直流,燃弧时间为0.1 s。

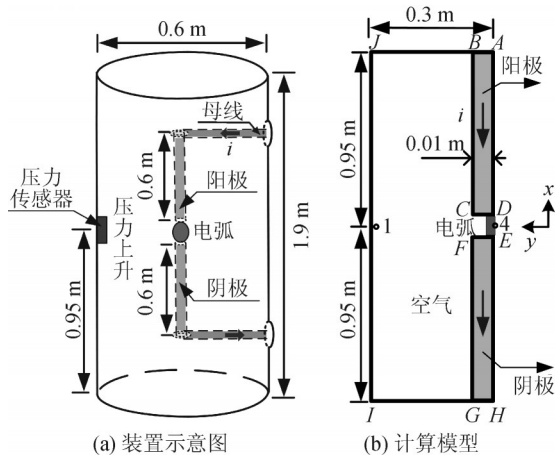


图1 容器几何结构图

Fig. 1 Geometry structure of the container

1.2 控制方程

1.2.1 电弧等离子体建模

基于磁流体动力学理论,从气体的质量、动量和能量守恒出发,耦合电磁场和金属蒸汽浓度守恒方程,建立了故障电弧数学模型。假设电弧等离子

体处于局部热力学平衡态。采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型描述了流体状态。空气和铜蒸汽等离子体的物性参数来源于文[14]。守恒方程的归一化形式为

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \mathbf{V}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi \text{grad}} \Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

式(1)中: Φ 为守恒方程的场变量, ρ_{thc} 为气体密度; $\mathbf{V}$ 为速度; Γ_{Φ} 为扩散系数; S_{Φ} 代表源项,方程中的变量和参数见表1。

表1 变量和参数

Table 1 Variable and parameters

方程	Φ	Γ_{Φ}	S_{Φ}
质量	1	0	S_m
动量	v_z	η	S_z
	v_r	η	S_r
能量	h	λ/c_p	$\sigma E^2 - q_{\text{rad}} + q_{\eta} + S_m h_i + S_{\text{rea}}$
电场	φ	σ	0
	A_z	1	$\mu_0 j_z$
磁场	A_r	1	$\mu_0 j_r - \frac{A_r}{r^2}$
浓度	X_i	ρD	0

表1中: z 、 r 为轴向和径向方向; S_z 、 S_r 为动量源项分量; A_z 、 A_r 为磁矢位分量; X_i 金属蒸汽质量浓度; η 、 λ 、 c_p 和 σ 分别为粘滞系数、热导率、比热和电导率; D 为金属蒸汽的扩散系数; h 为比焓; φ 为电位; σE^2 代表焦耳热; q_{rad} 为辐射损失; q_{η} 为粘滞损耗; S_{rea} 为电极蒸发的金属蒸汽与周围气体之间化学反应所产生的化学能量; S_m 为质量源项; h_i 代表金属蒸汽的等效总焓。

$$S_m = \begin{cases} m(\Delta S/\Delta V) & \text{电弧区域} \\ 0 & \text{鞘层区域} \end{cases} \quad (2)$$

$$m = q_{\text{vap}}/h_v \quad (3)$$

式(2)、(3)中: m 为铜电极的蒸发速度; q_{vap} 为电极蒸发所需要的能量通量; h_v 为蒸发潜热; ΔV 是与烧蚀电极表面相毗邻的网格体积; ΔS 为该网格单元在金属表面上的面积。

电场强度 E , 电流密度 J 和磁感应强度 B 通过下面的电磁场关系计算得到:

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

1.2.2 电弧—电极交界面建模

由于电弧与电极交界面的相互作用有着非常复杂的物理现象,文中从能量守恒出发,分别在电弧—阴极交界面及电弧—阳极交界面处引入能量

平衡方程来求解电极蒸发速度,用宏观的方法考虑了电极蒸发过程。

在阴极表面,电弧注入给阴极的能量主要包括离子轰击热 q_{ion} 、电弧的热传导 $q_{\text{con,arc}}$ 及电弧向电极的辐射热 $q_{\text{rad,arc}}$,电极表面流出的能量主要有通过传导进入电极的热通量 $q_{\text{con,c}}$ 、阴极电子发射冷却电极的能量 q_{ee} 、电极材料蒸发的能量 q_{vap} 和金属表面的黑体辐射热量 $q_{\text{rad,c}}$ 。由于 $q_{\text{rad,c}}$ 和 $q_{\text{rad,arc}}$ 和其他能量通量相比较小^[15],可以忽略不计,因此,阴极表面的能量平衡方程可写成如下的形式

$$q_{\text{con,c}} + q_{\text{ee}} + q_{\text{vap}} = q_{\text{ion}} + q_{\text{con,arc}} \quad (7)$$

因此,阴极表面的蒸发速度为

$$m = \frac{q_{\text{vap}}}{h_v} = \frac{-\lambda_{\text{arc}} \frac{\partial T}{\partial y} + j_i (V_c + V_i - \Phi_c + \frac{5k_B}{2e} T_c) + \lambda_{\text{cath}} \frac{\partial T}{\partial y} - |j_e| \Phi_c}{h_v} \quad (8)$$

和阴极情况类似,阳极表面的能量平衡可以表达为

$$q_{\text{vap}} + q_{\text{con,a}} = q_{\text{con,arc}} + q_e \quad (9)$$

阳极表面的蒸发速度为

$$m = \frac{q_{\text{vap}}}{h_v} = \frac{-\lambda_{\text{arc}} \frac{\partial T}{\partial y} + |j_n| [\Phi_a + V_a + \frac{5k_B}{2e} (T_g - T_a)] + \lambda_{\text{ano}} \frac{\partial T}{\partial y}}{h_v} \quad (10)$$

式(10)中: T 为电弧温度; λ_{arc} 为电弧等离子体热导率; j_n 为毗邻阳极表面的电流密度分量; Φ_a 为阳极功函数, V_a 为阳极压降; k_B 为玻尔兹曼常数; T_g 和 T_a 分别为电弧和阳极交界面的气体温度和阳极表面温度; λ_{ano} 为阳极材料热导率; j_i 为离子电流密度; j_e 电子电流密度; V_c 为阴极鞘层压降; V_i 为等离子体气体的电离能; Φ_c 阴极材料的功函数; e 为电子电荷大小; T_c 为阴极斑点温度; λ_{cath} 阴极材料热导率。

1.2.3 固体电极建模

固体电极内的能量输运主要包含欧姆热、热传导和熔化。文中采用了焊接电弧中广泛应用的焓方法来模拟电极内部的熔化现象,通过引入液体分数 f_L 说明相变过程,进而将潜热相加入能量方程^[16]。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m c_p T) - \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) = \sigma E^2 - \frac{\Delta H_L}{c_p} \frac{\partial f_L}{\partial t} \quad (11)$$

式(11)中: ρ_m , c_p , T , λ_m 和 σ 分别为电极材料的密

度、比热、温度、热导率和电导率; ΔH_L 为金属的熔化潜热。 f_L 可以被线性化为^[16]

$$f_L = \begin{cases} 0 & T < T_m \\ 1 & T > T_m \end{cases} \quad (12)$$

2 仿真结果分析

不同时刻故障电弧等离子体的温度分布见图2,对应的铜蒸汽浓度分布见图3。初始电弧为一高温弧柱。随着电弧电流增加,1.5 ms时电弧开始向外膨胀,微量的铜蒸汽主要聚集在电极表面区域。伴随着等离子体喷流的形成,近电极表面的铜蒸汽被高速轴向气流驱动到弧柱中心。3.1 ms之后,电极蒸发也逐渐增强,中心弧柱几乎处于纯蒸汽环境。15 ms之后,电流达到最大值,电弧趋于稳定燃烧。周围的气体温度也不断上升,高温区域覆盖的面积越来越大。在这个阶段,受等离子体喷流的推动作用,越来越多的蒸汽沿着喷流方向扩散至更远的空间。90 ms时,电流开始减小,并且电弧温度也快速下降。虽然金属蒸汽增加的速度减慢,但是金属蒸汽覆盖的面积几乎维持不变,在离电弧稍远的位置维持约35%的浓度分布。最终,电弧过零熄灭,只有一团高温气体残余在空间。

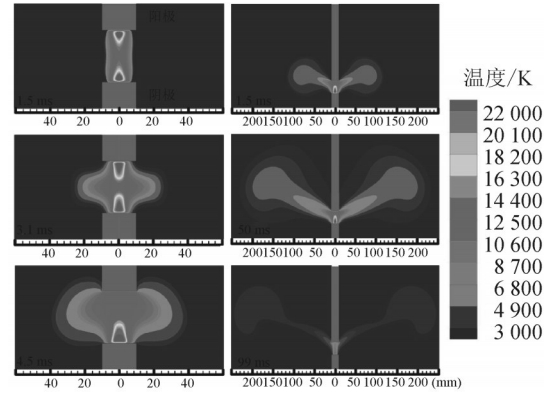


图2 电弧等离子体温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of arc plasma

容器内的压力分布见图4。随着电弧能量连续不断的注入,周围气体被加热,气体内能逐渐增加,进而引起腔体内压力上升。伴随着电弧向外扩散延伸,聚集在电弧中心的高压以压力波的形式向周围空间传播。当压力波到达器壁,发生压力波反射。由于压力波的传播速度和音速相当,因此,腔体内的压力立即达到平衡,呈现均匀分布。

10 kA 考虑和不考虑电极烧蚀情况下计算的压力上升见图5。由图5可以看到,两种情况下计算的压力上升几乎相同,这可以通过故障电弧的内部能

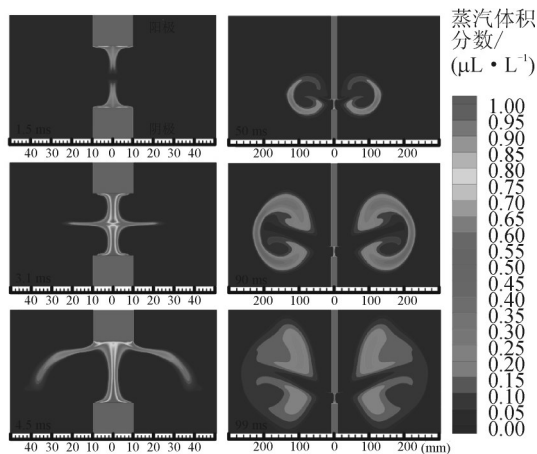


图3 铜蒸汽分布

Fig. 3 Distribution of copper vapour concentration at different times

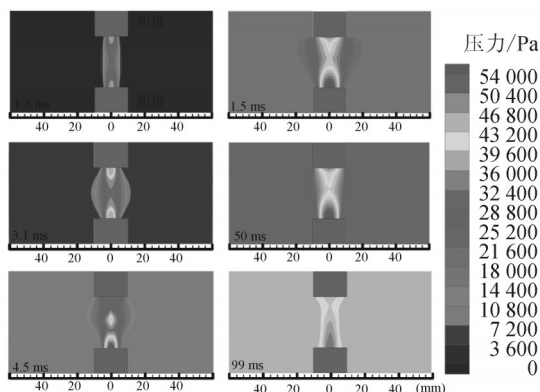


图4 容器内部压力分布

Fig. 4 The pressure distribution in the enclosed container
量平衡来解释。当考虑金属蒸汽后,铜电极烧蚀金属蒸汽和周围气体所产生的氧化反应释放的能量和电极熔化蒸发吸收的能量之间差异较小,因此贡献给压力上升的气体内能增加几乎维持不变。由此可见,铜蒸汽的存在对故障电弧的压力上升影响很小。还可以看到,考虑烧蚀计算的压力上升和实验^[13]更接近。

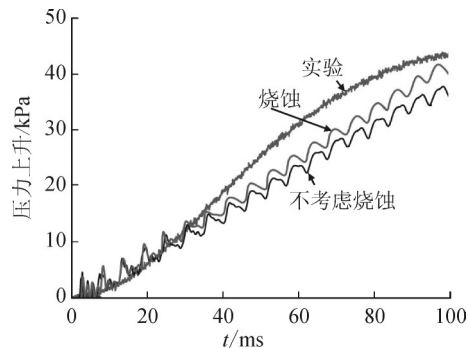


图5 考虑和不考虑电极烧蚀计算的压力上升

Fig. 5 Pressure rise versus time with and without erosion

铜电极烧蚀过程的蒸发质量随时间的变化见

图6。在初始15 ms,由于电流很小,因此蒸发质量的增加速度较慢。15 ms之后,电流达到最大值,蒸发速度也越来越快。在电弧稳定燃烧阶段,随着电弧能量的连续累积,蒸发质量几乎线性增加。85 ms之后,电弧电流开始下降,蒸发速度也趋于缓慢。直到100 ms,电弧熄灭,铜蒸汽质量达到最大值。可以看到,100 ms时,计算的蒸发质量比测量结果偏低^[13],这可能是由于实验收集金属液滴过程中,网筛不可能把所有尺寸的液滴都收集,存在遗漏的现象,因此导致蒸发质量偏高。

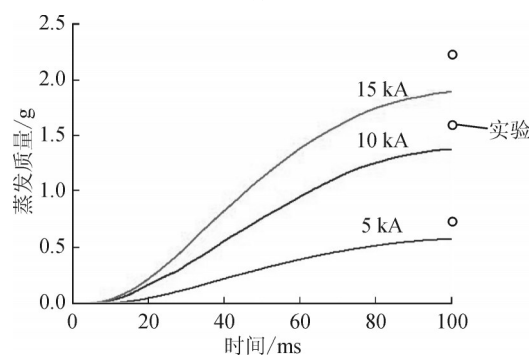


图6 铜电极蒸发质量随时间的变化

Fig. 6 The vaporized mass of electrodes versus time

不同电弧电流情况下计算和实验的压力上升见图7。仿真的曲线和实验结果^[13]都比较接近。特别对于小电流,由于电极烧蚀不严重,因此计算的压力上升和实验非常接近。大电流下,更多的电弧能量导致电极烧蚀严重,因此计算和实验结果之间的差异较大。

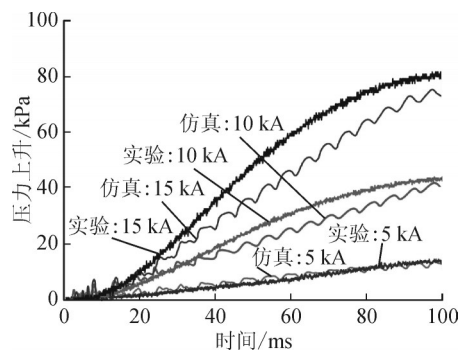


图7 不同电流计算和实验的压力上升

Fig. 7 Time-dependence of pressure rise for different arc currents in the calculation and experiment

电弧电流10 kA情况下计算和实验的电弧电压见图8。它们的趋势很相似。当考虑电极烧蚀后,电弧电压发生略微减小,这是因为铜蒸汽的存在增强了电弧等离子体的电导率,见图9。考虑烧蚀后的电弧电压比不考虑烧蚀情况只降低了约5.4%,因此铜蒸汽对电弧电压影响较小。

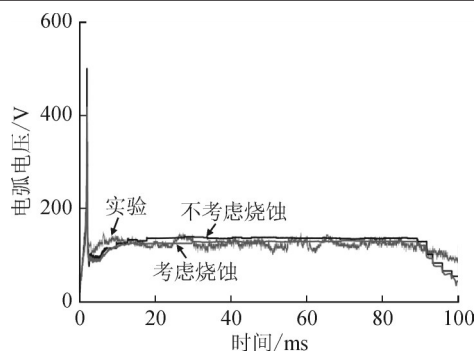


图8 电弧电压的试验和仿真结果

Fig. 8 Comparison of arc voltage in the experiment and calculation

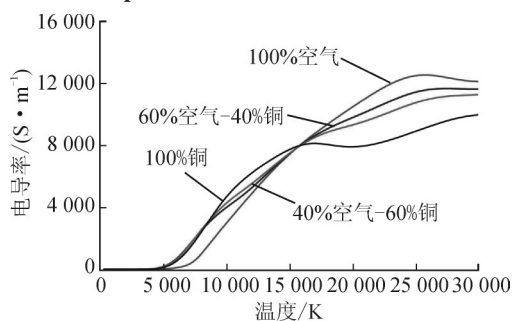


图9 空气—铜混合等离子体的电导率

Fig. 9 Electrical conductivity of Cu-air mixture

3 结语

文中基于MHD方法建立了密闭容器内空气故障电弧数学模型,研究了电极烧蚀金属蒸汽对故障电弧特性的影响。计算分析了电弧温度、压力和铜蒸汽浓度分布。通过将仿真的压力上升,电极烧蚀质量和电弧电压与实验进行对比,发现其一致性很好,从而验证了所建立模型的有效性和准确性。通过比较考虑和不考虑电极烧蚀的计算结果,发现铜蒸汽的存在对压力上升和电弧电压影响很小。

参考文献:

- [1] 年培新,罗时璜,董葆生,等. 低压配电领域中的故障电弧防护[J]. 低压电器,2000(1):22-26.
NIAN Peixin, LUO Shihuang, DONG Baosheng, et al. Arc fault protection In the field of low-voltage distribution[J]. Low Voltage Apparatus, 2000(1):22-26.
- [2] 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.
- [3] 蔡彬,陈德桂,吴锐,等. 开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置[J]. 电工技术学报,2005,20(10):83-87.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Rui, et al. Online detecting and

protection system for internal faults arc in switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10):83-87.

- [4] 熊泰昌. 内部电弧故障试验情况下中压开关柜强度计算[J]. 高压电器,2002,38(3):42-44.
XIONG Taichang. Strength calculation of medium voltage switchgear under internal arc-fault test[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3):42-44.
- [5] CRESSAULT Y, HANNACHI R, TEULET P H, et al. Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas[J]. Plasma Sources Sci. Technol., 2008, 17(3):035016.
- [6] ZHANG X, PIETSCH G J, GOCKENBACH E. Investigation of the thermal transfer coefficient by the energy balance of fault arcs in electrical installations[J]. IEEE Trans. Power Del., 2006, 21(1):425-431.
- [7] TANAKA S, MIYAGI T, OHTAKA T, et al. Influence of electrode material on pressure-rise due to arc in a closed chamber[J]. Electr Eng. JPN., 2011, 174(4):9-18.
- [8] ZHANG J L, YAN J D, FANG M T C. Electrode evaporation and its effects on thermal arc behavior[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2004, 32(3):1352-1361.
- [9] SCHNICK M, USSEL U F, HERTEL M, et al. Metal vapour causes a central minimum in arc temperature in gas-metal arc welding through increased radiative emission[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2010, 43(2):022001.
- [10] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G J. Influence of arc current on fraction K_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container[C]//Proc. 17th Int. Conf. Gas Discharges and Their Applications. 2008:189-192.
- [11] FRIBERG G, PIETSCH G J. Calculation of pressure rise due to arcing faults[J]. IEEE Trans. Power Del., 1999, 14(2):365-370.
- [12] ZHANG X, ZHANG J, GOCKENBACH E. Calculation of pressure and temperature in medium-voltage electrical installations due to fault arcs[J]. J. Phys. D:Appl. Phys., 2008, 41(10):105206.
- [13] WU Y, RONG M Z, LI X W, et al. Numerical analysis of the effect of the chamber width and outlet area on the motion of an air arc plasma[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2008, 36(5):2831-2838.
- [14] LINDMAYER M, PAULKE J. Arc motion and pressure formation in low voltage switchgear[J]. IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. A., 1998, 21(1)33-39.
- [15] WU Y, LI M, RONG M Z, et al. Experimental and theoretical study of internal fault arc in a closed container[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2014, 47(50):505204.
- [16] RONG M Z, MA Q, WU Y, et al. The influence of electrode erosion on the air arc in a low-voltage circuit breaker[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(2):023308.

袁端磊(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事高压电器产品的研发工作。