

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.001

密闭腔体内空气故障电弧辐射模型的研究

李 美, 郭鹏程

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文基于磁流体动力学(MHD)法研究了密闭腔体内空气故障电弧的辐射模型。采用热电偶和光电倍增管相结合的方法测量了故障电弧辐射能量的暂态变化过程。采用净辐射系数(NEC)模型、基于 NEC 的半经验模型和 P1 三种辐射模型计算故障电弧的辐射传递过程, 通过不同模型计算的辐射能量和压力上升与实验测量结果进行比较, 研究了不同辐射模型对空气故障电弧压力上升的影响。结果表明, 低温区域的重吸收效应严重影响故障电弧的能量传输, 对压力上升有着重要的贡献。NEC 模型由于忽略了重吸收效应因此严重低估了压力上升, 不适于故障电弧计算。与 NEC 模型相比, P1 和 $0.7 < \alpha < 0.83$ 的半经验模型更适合计算故障电弧的压力上升。

关键词: 故障电弧; MHD 方法; 辐射模型; 压力上升

中图分类号: TM591

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0269-07

Research on radiation model of air fault arc in a closed tank

LI Mei, GUO Pengcheng

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper presents a research on radiation model of fault arc in a closed air tank by the magneto-hydrodynamic (MHD) method. A hybrid method combining the thermopile and photo-multiplier is proposed to measure the transient process of radiated energy emitted by fault arc. Three radiation models including net emission coefficient (NEC), semi-empirical based on NEC as well as P1 model are employed to calculate the radiation transfer of fault arc. By comparing the calculated arc radiation energy and pressure rise by different radiation models with their experimental results, the influence of radiation model on pressure rise for air fault arc is investigated. The results show that the re-absorption effect in the low-temperature region affects the energy transport of fault arcs seriously and has a dominant contribution to pressure rise. NEC model is not suitable to the calculation of fault arc because the pressure rise is severely underestimated due to the neglect of the re-absorption effect. Compared with NEC model, P1 and the semi-empirical model with $0.7 < \alpha < 0.83$ are more suitable in calculating the pressure rise of fault arc.

Key words: fault arc; MHD method; radiation model; pressure rise

密闭式电力装置广泛应用于输配电系统, 如果在密闭式电力装置中发生电弧故障, 则会在极短的时间内释放大量能量, 导致压力急剧上升。这不仅可能损坏周围设备和建筑物, 而且可能威胁操作人员安全。故障电弧引起的压力上升严重受内部能量

平衡过程的影响^[1]。特别是对于辐射, 是能量平衡中很重要的损失项^[1]。高温电弧发射从远紫外区到远红外区的辐射光谱。电弧发射的辐射不完全贡献给内部压力上升, 只有被周围气体吸收的那部分辐射会导致压力增加。不被气体吸收的辐射能量将作

收稿日期: 2018-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707145, 51807162)

作者简介: 李美, 女, 讲师, 博士, 研究方向为电弧电接触理论及其应用。E-mail: dl_limei@163.com

通讯作者: 郭鹏程, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为流体机械流体动力学及优化设计、水力发电技术、清洁能源高效利用与运行安全等。E-mail: guoyicheng@126.com

用在器壁和电极上,不会贡献给压力增加。因此,辐射作为故障电弧内部能量平衡的主导能量运输机理,对故障电弧特性有着不可忽视的影响。

近年来,密闭开关柜内故障电弧引起的压力特性受到了越来越多的关注。Friberg^[2]采用标准计算方法计算了故障燃弧的压力上升;Iwata^[3]基于计算流体动力学法开展了密闭腔体内故障电弧压力特性的评估;熊泰昌^[4]基于爆炸原理计算了开关柜内部故障电弧向周围空气的推进速度和压力应力;李朝顺^[5]和黄锐^[6]等通过故障电弧能量和压力冲击的简化关系计算了空气开关柜中压力冲击波的变化;蔡彬等^[7]采用有限元分析法仿真计算了开关柜壳体的最大冲击载荷。然而,在上述方法中,电弧本身没有进行具体的建模,而是被简化为孤立的热源,这使得故障电弧的流场、电磁场和辐射场之间的复杂耦合作用没有被考虑。另外,故障电弧的压力计算依赖于实验测试数据^[1,2],即只有将提前获得的实验数据拟合到仿真中,才可以开展压力的计算。在故障电弧辐射的测量方面,Tanaka 等^[1]通过采用一假设的恒定比例测量了空气故障电弧相对辐射能量的大小;Fjeld 等^[8]测量了非密闭空间内空气故障电弧的相对辐射强度;其他学者^[9, 10]则是采用已有自由燃烧电弧的经验数据评估了故障电弧的辐射损失。关于故障电弧辐射的理论研究则相对较少。文献[11]基于一种粗略的经验表达式计算了故障电弧的辐射损失;文献[12]基于其他学者的实验数据研究了 P1 模型计算故障电弧辐射传递的有效性。然而,以上的研究成果还难以从实验和理论层面准确全面地评估故障电弧的辐射能量变化过程以及辐射和压力特性之间的关系。

近年来,磁流体动力学模型被成功地应用于密闭容器中故障电弧的研究^[12],这使得通过仿真方法对故障电弧进行数值分析成为可能。本文基于磁流体动力学理论建立了密闭腔体内空气故障电弧的二维模型,并通过实验和仿真研究了不同辐射模型对故障电弧辐射能量和压力特性的影响,确定了适于故障电弧辐射计算的有效模型。

1 实验装置和结果

1.1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。它由圆柱壳体、电极棒、进口和出口组成。燃弧位置为腔体中心点,通过铜丝起弧的方式点燃电弧。容器内充气气体为一个大气压的空气,电极间距为 30mm,电极材料为纯铜。通过电弧弧柱的电流为 1~20kA 的直流电

流,燃弧时间为 0.1s。

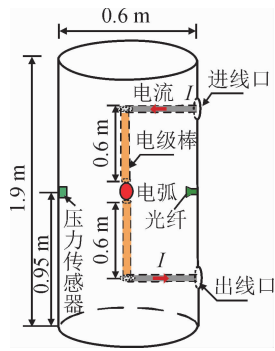


图 1 实验装置
Fig. 1 Experiment setup

1.2 实验方法

图 2 给出了实验接线原理图。采用实验室中 2kV DC、22.5MVA 的直流电源来产生故障电弧,实验测试电压为 1.5kV。实验前,试品电极通过铜丝实现电气连接,断路器和隔离开关处于打开状态。实验时,隔离开关先闭合,而后断路器闭合,回路导通,铜丝被点燃,产生故障电弧,整个燃弧过程的持续时间由断路器控制。

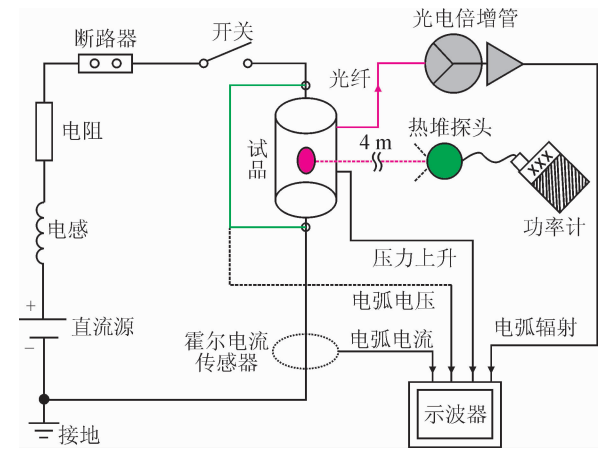


图 2 实验接线原理图
Fig. 2 Arrangement of the experimental apparatus

腔体内的压力上升变化通过腔体内壁安装的美国 PCB 公司的 102B16 型压电传感器测量,电弧电压采用高压探头(Tektronix-P6015A)进行测量,电弧电流采用 CS20000HC 系列霍尔电流传感器进行采集测量,电弧暂态相对辐射功率由光纤收集并传输到光电倍增管(PMTH-S1-PR928)进行测量,电弧总绝对辐射能采用以色列 Ophir 公司的 12A 型热堆探头透过石英玻璃观察窗测量,并由功率计显示测量结果。其中,热堆探头放置在距离电弧 4m 处,是为了将电弧作为一个点光源看待^[13],电弧向周围空间呈球状发射辐射光强,则热堆探头接收到的电弧辐射能是距离电弧 4m 远处的球面上的一个

小接收面积的能量。通过热堆探头测量的绝对辐射能来校准光电倍增管测得的相对辐射功率,便可以计算电弧发射的绝对辐射能的暂态变化过程。压力、电弧电流、电压和电弧相对辐射功率信号均同步接入示波器进行波形、数据的采集记录。

1.3 实验结果

图3给出了10 kA 电弧电流情况下测得的典型实验波形。在初始的几个 ms 内,由于铜丝的快速熔化和蒸发,电弧电压迅速上升并出现一个陡峭的点燃峰值。与此同时,电弧开始向外发射明亮的弧光,光电倍增管的阴极接收电弧的辐射光,诱导其内产生光电流,并通过采样电阻转化为电压输出。之后,电弧趋于稳定燃烧。随着燃弧时间的增加,电弧能量连续不断的注入,电弧快速向外膨胀,高温区域覆盖得也越来越多。电弧能量通过传导、对流和辐射向周围传递,加热周围气体,引起气体内能增加,进而导致内部压力快速增加。同时,电弧能量的累积使得电弧发射辐射增强,辐射功率趋于上升,并在一定范围内发生连续的波动。 $t=85\text{ ms}$ 时,回路断路器断开,电弧电流开始下降,由于系统中电感的存在,电弧电流不能立即下降到0。直到 $t=100\text{ ms}$ 时,电流减小至零,燃弧过程结束,不再有电弧能量注入,电弧熄灭,最大压力上升出现,电弧辐射功率也降低为0。

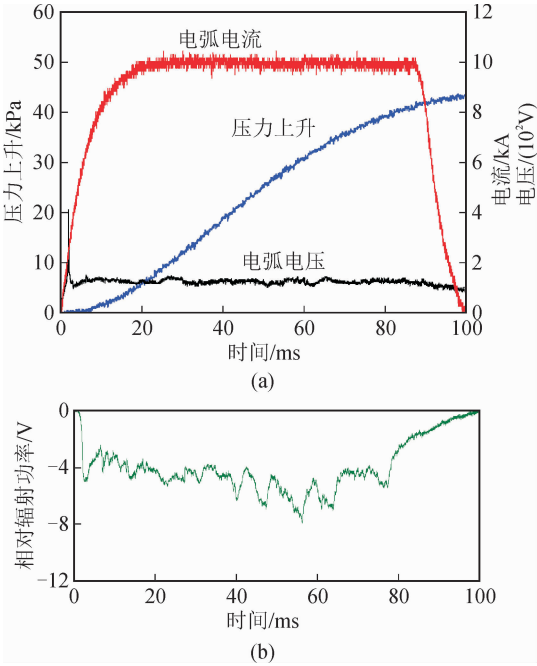


图3 10kA 电弧电流测得的典型实验波形
Fig.3 Typical measured waveform at arc current of 10 kA

图4给出了不同电弧电流下测量的压力上升变化。电弧电流越大,注入的电弧能量越多,导致更多

的能量用于增加气体内能,因此压力上升增加。

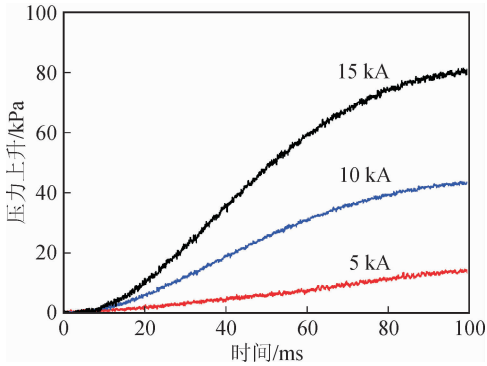


图4 不同电弧电流下测量的压力上升
Fig.4 Measured pressure rises at different arc currents

图5给出了测量的电弧绝对辐射能量的变化。在实验开始的几个 ms,铜丝被加热到蒸发温度并形成电弧,辐射能量开始增加,约 3ms 时,铜丝全部熔化蒸发。之后,电弧电流快速上升,焦耳热快速增加,电弧辐射强度逐渐增强,导致辐射能量迅速增加。85ms 之后,随着电弧电流下降,电弧能量增加缓慢,电弧辐射的增加也趋于平缓。

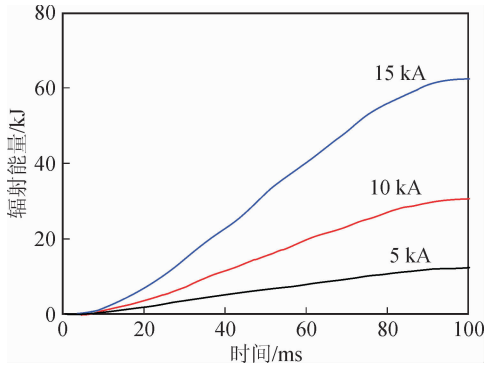


图5 不同电弧电流下测量的电弧辐射能量
Fig.5 Measured radiation energy at different arc currents

2 数值模型

2.1 计算几何

由于所设计的故障电弧实验腔体结构的对称性,本文建立了一个二维轴对称模型以减少计算的时间和成本,如图6所示。

2.2 计算方法

本文基于磁流体动力学理论,通过求解包含质量、动量、能量和电磁场的一组守恒方程,描述故障电弧内部的流体动力学和电磁场耦合过程。假设电极烧蚀不考虑,等离子体处于热力学平衡状态,流体处于湍流状态,通过标准 $k-\epsilon$ 模型描述^[3]。空气等离子体热力学参数(密度、比焓,比商、比热和声速)和输运系数(电导率、热导率、黏滞系数和扩散系数)

随温度和压力的变化,来源于文献[14]。

守恒方程的统一形式为:

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

其中, Φ 表示每个守恒方程的场变量; ρ 为等离子体密度; \mathbf{V} 气体速度; Γ_{Φ} 为扩散系数; S_{Φ} 代表每个方程的源项,方程的变量和参数如表 1 所示。

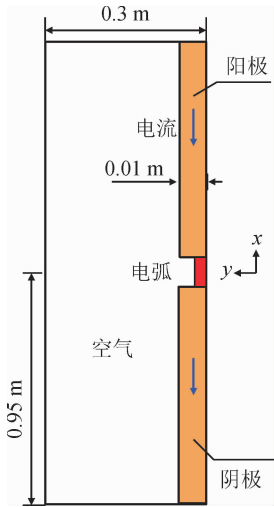


图 6 计算模型
Fig. 6 Calculation model

表 1 变量和参数

Tab. 1 Variables and parameters

守恒方程	Φ	Γ_{Φ}	S_{Φ}
质量	1	0	0
动量	v_z	η	S_z
	v_r	η	S_r
能量	h	λ/c_p	$\sigma E^2 - q_{\text{rad}} + q_{\eta}$
电场	φ	σ	0
磁场	\mathbf{A}_z	1	$\mu_0 j_z$
	\mathbf{A}_r	1	$\mu_0 j_r - \frac{\mathbf{A}_r}{r^2}$

表中, z 、 r 代表轴向和径向; v 、 h 、 φ 、 \mathbf{A} 分别为速度、焓、电势和磁矢量; η 、 λ 、 c_p 和 σ 分别为黏滞系数、热导率、比热和电导率; S 为守恒方程的源项; q_{rad} 为辐射损失, q_{η} 为流体黏滞损耗, E 为电场强度, μ_0 为磁导率, j 为电流密度。

2.3 辐射模型

在高温高压电弧中,热辐射是电弧等离子体中非常重要的热交换方式。对于故障电弧的建模,作为能量守恒方程源项的一部分,辐射损耗应该被很好地考虑。在过去几十年中,净辐射系数(NEC)法^[15]和半经验 NEC 模型^[16]已被成功地用于计算开关电弧的辐射传递过程。随着计算机性能的快速

提升,P1 模型^[17]近年来也受到了越来越多的关注。然而,这些辐射模型主要是针对开关电弧中的辐射建模,还未广泛地应用于内部故障电弧的计算中。鉴于此,本文基于 NEC、半经验 NEC 和 P1 模型来计算故障电弧的辐射传递过程,以确定最优辐射模型。

1) NEC 法

NEC 法是 Lowke 于 1974 年首次提出来计算电弧等离子体高温区域辐射损失的方法^[15],即:

$$q_{\text{rad}} = 4\pi\epsilon_n \quad (2)$$

式中: ϵ_n 是净辐射系数^[18]。

然而,该方法只考虑了电弧中心高温区域辐射能量的发射,忽略了辐射重吸收效应。

2) P1 模型

P1 模型自 1966 年被提出以来已经成功应用于辐射传递的建模中^[17]。在这种方法中,空气光谱被分成 6 个波段,Gleizes 采用平均系数法获得了每个波段的平均吸收系数。因此,可以采用平均吸收系数对每个波段求解 P1 方程计算辐射传递。入射辐射的 P1 方程为^[17]:

$$\text{div}\left(\frac{1}{3k_{a\lambda}}\text{grad}G_{\lambda}\right) + S_{G_{\lambda}} = 0 \quad (3)$$

$$S_{G_{\lambda}} = k_{a\lambda}(4\pi B_{\lambda} - G_{\lambda}) \quad (4)$$

式中: G_{λ} 是入射辐射; $k_{a\lambda}$ 是光谱吸收系数; $S_{G_{\lambda}}$ 是辐射方程的源项; B_{λ} 是光谱普朗克函数。

3) 半经验 NEC 模型

Zhang 等^[16]在考虑了电弧周围低温区域辐射能量自吸收问题的基础上,提出了一种半经验 NEC 的计算模型。该模型假设电弧是轴对称,并且电弧温度沿着径向单调递减。根据该原则,电弧可以被划分为三个区域。

a) 中心电弧区 ($\alpha T_0 < T \leq T_0$)。电弧只向外发射辐射且净辐射损失为正, T 为等离子体温度, T_0 为电弧轴线上的温度, αT_0 为重吸收层的起始温度, α 为温度边界系数,其中辐射能量源项的计算方法见式(1)。

b) 重吸收区域 ($4\,000\text{K} \leq T < \alpha T_0$)。来自电弧中心的辐射在该区域被重吸收,电弧的吸收大于辐射,净发射损失为负。假设电弧核心区的总辐射能量为 Q ,重吸收的比例为 s ,则 sQ 的能量在重吸收区被吸收,并且 sQ 的辐射能量在重吸收区沿径向的分布为:

$$q_{\text{rad}} = q_0 \left[1.1 - \left(\frac{R_{4k} + R_{\alpha} - 2r}{R_{4k} - R_{\alpha}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: q_0 为重吸收区能量源项的最大值; R_{4k} 对应

4 000 K等温线半径; R_a 对应 αT_0 等温线半径。

c) 热层 ($T < 4\ 000\text{ K}$)。等离子体既不辐射也不吸收,辐射的能量源项为 0,即:

$$q_{\text{rad}} = 0 \quad (6)$$

由于缺少辐射测量的相关实验数据,因此半经验模型中重吸收层的起始温度 αT_0 和被重吸收的辐射比例都是未知的。以超音速喷嘴中的氮气电弧 $\alpha = 0.83$ 作为参考^[16],通过将不同 α (α 取 0.5、0.6、0.7、0.83 和 0.9) 计算的辐射损失和压力上升与实验结果进行对比,以确定半经验模型中合适的温度边界系数 α 。S. Ramakrishnan 等^[19] 认为电弧中心辐射的 90% 被吸收。考虑到自由燃烧电弧和故障电弧的相似性,本文选择 90% 的重吸收比例用于故障电弧的辐射计算。

3 计算结果与分析

图 7 比较了 10 kA 电弧电流情况下基于不同 α (0.5、0.6、0.7、0.83 和 0.9) 的半经验模型计算的压力上升。

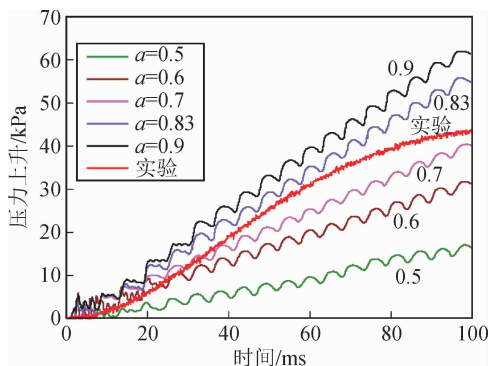


图 7 不同 α 情况下基于半经验模型计算的压力上升
Fig. 7 Calculated pressure rises for different α 's by the semi-empirical model

可以看到,随着 α 的增大,这些不同 α 计算的压力上升在初始的 20 ms 内彼此都比较接近,这可能是由于较短的时间内它们累计的辐射损失差别不大。此外,计算的压力曲线和实验结果也都很接近。之后,随着燃弧时间的持续,不同 α 计算的压力幅值差距逐渐增大。 α 越大,压力上升越高,这主要归因于电弧的辐射能量损失变化。对于电弧的辐射能量损失,其等于电弧发射的总辐射和被吸收的总辐射之差:

$$Q_{\text{rad-loss}} = Q_{\text{emitting}} - Q_{\text{absorbed}} = \sum_{i=1}^N q_{i,\text{rad}} \cdot \Delta V \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{rad-loss}}$ 为辐射能量损失; Q_{emitting} 为发射的总辐射; Q_{absorbed} 为被吸收的总辐射; i 为第 i 个网格; N

为总网格数; $q_{i,\text{rad}}$ 为第 i 个网格上的净辐射损失; ΔV 为总控制体积; Δt 为时间步长。

图 8 给出了 10 kA 电弧电流情况下不同 α 计算的电弧辐射能量。可以看到, α 越大,电弧中心向外发射辐射占据的区域覆盖得越小,因此发射的净辐射越少。同时,辐射能量的上升速度也减慢,这意味着更多的能量被周围气体吸收,因此导致更高的压力上升。根据图 7 和图 8, α 取 0.7 和 0.83 所计算的辐射能量都能很好地包络实验曲线。和其他 α 值相比, α 取 0.7 和 0.83 的仿真结果更接近于实验。由此推断, $0.7 < \alpha < 0.83$ 的辐射模型适于故障电弧的计算。

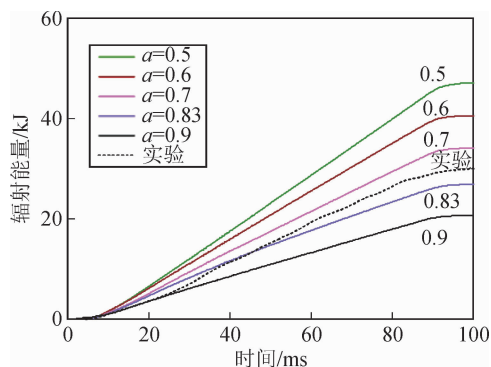


图 8 10 kA 电流不同 α 情况下电弧辐射能量的变化
Fig. 8 Time-dependence of radiation energy for different α 's at current of 10 kA

图 9 给出了 10 kA 电流情况下基于 $\alpha = 0.7$ 的半经验辐射模型计算的电弧等离子体的温度分布。初始阶段,电弧电流很小,电弧基本为一高温弧柱。3 ms 之后,随着电弧电流的增加,电弧开始向外膨胀,电极表面等离子体喷流形成。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。90 ms 时,电流开始减小,并且电弧温度也快速下降。最终,电弧过零熄灭,只有一团高温气体残余在空间。

图 10 给出了 10 kA 电弧电流情况下基于 NEC、P1 模型和 $\alpha = 0.7$ 的半经验模型计算的辐射能量变化。可以看到,采用 P1 和 $\alpha = 0.7$ 的半经验模型计算的辐射能量和实验结果比较接近;相反,NEC 方法计算的辐射能量远低于测量结果。引起这种现象的原因是,NEC 模型忽略了电弧周围较低温区域的重吸收效应,造成了过量的电弧辐射损失。

图 11 给出了不同辐射模型计算的电弧辐射能量变化。NEC 模型计算的电弧辐射能量显著偏高,比 P1 和半经验模型计算的辐射能量分别高了约 54% 和 62%,这意味着 NEC 模型中贡献给气体内能增加的能量大大降低,因此压力上升也显著偏小。

另外,由于计算中采用的是纯空气的 P1 系数,没有考虑铜蒸汽对 P1 吸收系数的影响,而金属蒸汽的存在通常会增强电弧的辐射发射,因此,P1 模型计

算的电弧辐射比实验结果偏小,压力上升比实验结果偏大。

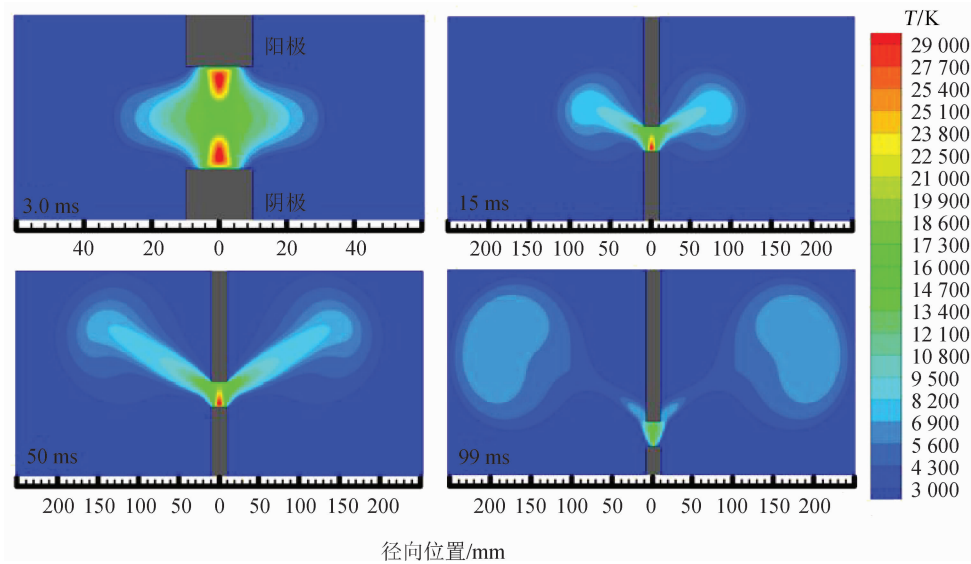


图 9 电弧等离子体的温度分布
Fig. 9 Temperature distribution in the arc region

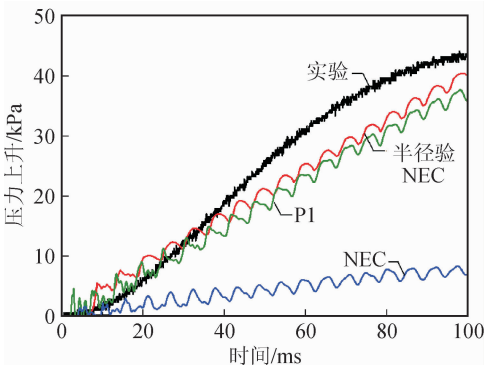


图 10 不同辐射模型计算的压力上升
Fig. 10 Calculated pressure rise by different radiation models

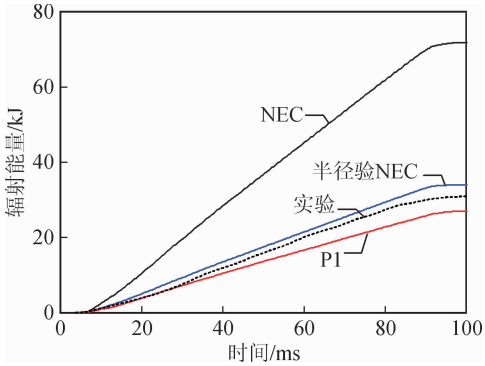


图 11 不同辐射模型计算的电弧辐射能量变化
Fig. 11 Time-dependence of calculated radiation energy by different radiation models

图 12 给出了基于 $\alpha = 0.7$ 的半经验模型计算的不同电流情况下的压力上升和实验结果。可以看

到,计算的压力上升曲线和实验结果很接近。特别对于小电流,由于电极烧蚀影响较小,因此计算的压力上升和实验很吻合。对于大电流,高的电弧能量导致电极烧蚀加重,所以计算和实验的压力差别相对较大。然而,10kA 和 15kA 情况下最大压力上升的误差分别只有 8.1% 和 9.6%。

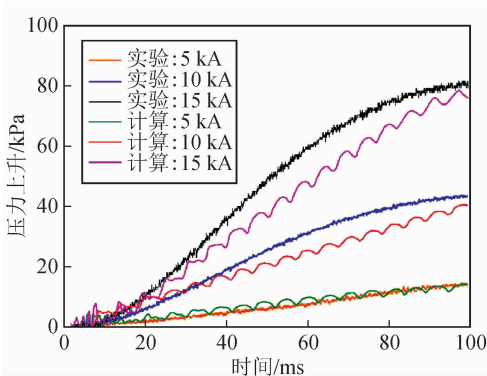


图 12 不同电流情况下计算和实验的压力上升
Fig. 12 Calculated and measured pressure rise at different arc currents

4 结 语

本文基于磁流体动力学理论建立了密闭腔体内空气故障电弧二维数学模型,研究了 NEC、半经验 NEC 和 P1 模型对密闭空气容器内故障电弧压力上升特性的影响,重点分析了半经验 NEC 模型中重吸收层不同温度边界对故障电弧辐射和压力上升的

影响。结果表明,故障电弧低温区域的辐射重吸收效应对压力上升有很重要的贡献,计算中必须予以考虑。NEC方法计算的压力上升远低于实验结果,这是因为NEC方法忽略了电弧周围较低温区域的重吸收效应,导致贡献给压力上升的气体内部能大大减小。和NEC法相比, $0.7 < \alpha < 0.83$ 的半经验模型和P1模型由于考虑了电弧重吸收效应,因此更适用于空气故障电弧的仿真计算。

参考文献:

- [1] TANAKA S, MIYAGI T, OHTAKA T, et al. Influence of electrode material on pressure-rise due to arc in a closed chamber[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2011, 174(4): 9-18.
- [2] FRIBERG G, PIETSCH G J. Calculation of pressure rise due to arcing faults[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(2): 365-370.
- [3] IWATA M, TANAKA S, OHTAKA T. CFD calculation of pressure rise due to internal AC and DC arcing in a closed container[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(3): 1700-1709.
- [4] 熊泰昌. 高压开关柜防护内部电弧故障的结构强度计算与试验研究[J]. *上海电器技术*, 2002, 3(3): 3-7, 10.
XIONG Taichang. Strength calculation and test research of high-voltage switchgear against internal arc faults[J]. *Shanghai Electric Appliance Technology*, 2002, 3(3): 3-7, 10.
- [5] 李朝顺. 开关柜内燃弧时等效强度校验计算[J]. *东北电力技术*, 2007, (2): 27-29.
LI Chaoshun. Checkup calculation of equivalent strength during arch burning in the switch cabinet[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2007, (2): 27-29.
- [6] 黄锐, 胡毅亭, 马炳烈, 等. 开关柜内部电弧故障产生力和热的计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 125-130.
HUANG Rui, HU Yiting, MA Binglie, et al. Calculation model for the effects of force and heat produced by inner arc fault in switchgear cabinet[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 125-130.
- [7] 蔡彬, 陈德桂, 吴伟光, 等. 开关柜耐受最大冲击载荷的冲击动力学研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4): 124-130.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Weiguang, et al. Research of shock dynamics on withstanding the maximal shock load in switchgear assemblies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(4): 124-130.
- [8] FJELD E, HAGEN S T, BJERKETVEDT D, et al. Radiation measurements of high current arcs in air[C]//30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, August 28-30, 2011, Belfast, UK, 2011: C11.
- [9] 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]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, September 7-12, 2008, Cardiff, UK, 2008: 189-192.
- [10] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G J. Influence of current and electrode material on fraction k_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container during internal arcing [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3): 2028-2029.
- [11] ZHANG X, PIETSCH G, ZHANG J S, et al. Fundamental investigation on the thermal transfer coefficient due to arc faults[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(3): 1038-1045.
- [12] WU Y, LI M, RONG M Z, 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.
- [13] YOKOMIZU Y, MATSUMURA T. Radiation power of SF_6 arc in current range from 500 to 20 000 A at pressures of 0.1 and 0.4 MPa[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(12): 125203.
- [14] MURPHY A B. Transport coefficients of air, argon-air, nitrogen-air, and oxygen-air plasmas[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1995, 15(2): 279-307.
- [15] LOWKE J J. Predictions of arc temperature using approximate emission coefficients for radiation losses[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1974, 14(2): 111-122.
- [16] ZHANG J F, FANG M T C, NEWLAND D B. Theoretical investigation of a 2 kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987, 20(3): 368-379.
- [17] CHENG P. Dynamics of a radiating gas with applications to flow over a wavy wall[J]. *AIAA Journal*, 1966, 4(2): 62-72.
- [18] NAGHIZADEH K Y, CRESSAULT Y, GLEIZES A. Net emission coefficient of air thermal plasmas[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(22): 2925-2934.
- [19] RAMAKRISHNAN S, STOKES A D, LOWKE J J. An approximate model for high-current free-burning arcs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1978, 11(16): 2267-2280.