

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.030

特高压大型充油设备电弧燃爆过程 压力传播特性研究*

罗传仙^{1,2}, 田洪迅³, 黄勤清^{1,2}, 杨旭^{1,2}, 刘正阳^{1,2}, 周文^{1,2}, 储后广⁴, 韩雪峰⁴

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 武汉 430074;

2. 国网电力科学研究院 武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;

3. 国家电网有限公司, 北京 100032; 4. 国网新疆电力有限公司 电力科学研究院, 乌鲁木齐 830063)

摘要: 大型充油设备油箱内部区域发生局部高压放电时, 会使放电区域变压器油瞬间气化并产生爆炸压力波。为了研究上述过程中压力波在变压器油箱内部以及升高座区域的传播特性, 依据实际实验情况建立三维几何模型, 并划分多面体网格, 采用 FLUENT 软件进行数值模拟。计算过程中通过 Profile 文件在放电区域加载实际放电能量曲线, 并且通过气液两相流模型考虑气体和液体的可压缩性对其进行计算求解。结果表明: 电弧能量 4.929 MJ、持续时间 58.6 ms 情况下, 计算得到升高座顶部监测点压力峰值为 1.21 MPa, 油箱左侧顶部位置监测点压力峰值 4.62 MPa, 油箱右侧顶部位置监测点压力峰值 3.79 MPa; 升高座区域内达到的压力峰值随着距离故障点位置的增加而不断减小。将仿真得到的不同监测点位置压力峰值以及压力变化趋势与实验结果进行对比, 二者具有较好的一致性, 验证了仿真计算模型的有效性。通过数值模拟手段建立油箱内电弧故障放电仿真模型并求解, 可获得油箱及升高座内各位置的详细压力变化曲线及三维空间内压力波传播规律, 能够极大地减少放电实验所产生的人力和物力损耗, 并为变压器油箱内电弧燃爆事故预防提供有效的理论依据。

关键词: 电弧燃爆; 变压器油箱; 超压峰值; 数值仿真

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0217-06

Research on Pressure Propagation Characteristics of Ultra-high Pressure by Large Oil-filled Equipment during Arc Explosion

LUO Chuan-xian^{1,2}, TIAN Hong-xun³, HUANG Qin-qing^{1,2}, YANG Xu^{1,2},
LIU Zheng-yang^{1,2}, ZHOU Wen^{1,2}, CHU Hou-guang⁴, HAN Xue-feng⁴

(1. Nari Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nari Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

3. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: When the local high voltage discharge occurs in the internal area of a converter transformer oil tank, the transformer oil in the discharge area will be vaporized instantly and explosion pressure wave will be generated. In order to study the propagation characteristics of the pressure wave in the transformer tank and elevated seat area in the above process, a three-dimensional geometric model was established and divided into polyhedral meshes according to the actual experimental situation. For numerical simulation, a fluent software was used. During the calculation, the

收稿日期: 2023-01-16

作者简介: 罗传仙(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事输变电设备运维与状态诊断研究, (E-mail) 965740144@qq.com。

基金项目: 特高压大型充油设备关键部件故障机理与发展特性研究(5500-202055416A-0-0-00)

actual discharge energy curve was loaded in the discharge area through the profile file, and the compressibility of gas and liquid was considered through the gas-liquid two-phase flow model. The results show that when the arc energy is 4.929 MJ and the duration is 58.6 ms, the peak pressures at the monitoring point on the top of the elevated seat, on the left and right top of the oil tank are 1.21 MPa, 4.62 MPa and 3.79 MPa, respectively. The pressure peak in the elevated seat area decreases with the increase of the distance from the fault point. The simulated pressure peak and pressure variation trends obtained by simulation at different monitoring points display a satisfied consistence with the experimental results, which verifies the effectiveness of the simulation calculation model. By establishing and solving the arc fault discharge simulation model in the oil tank through numerical simulation, the detailed pressure variation curve and the pressure wave propagation law in the three-dimensional space can be obtained. It can greatly reduce the loss of manpower and material resources caused by the discharge experiment, and provide an effective theoretical basis for the prevention of arc explosion accident in the transformer oil tank.

Key words: arc explosion; transformer tank; peak overpressure; numerical simulation

特高压大型充油设备绝缘故障位置主要集中在高压套管和升高座区域,这些区域普遍具有空间狭小、场强高、结构复杂的特点。其中,高压套管导致故障约占变压器故障事故的37.3%^[1]。故障位置发生绝缘击穿后会使得油箱内部变压器油瞬间气化产生爆炸压力波,压力如果不能及时泄放极易引发更为严重的变压器油蒸气燃爆事故。因此,分析电弧爆炸过程中油箱内部压力分布与变化情况对于油箱安全防护设计有重要的参考价值。

Ben Landis 为了研究变压器和分接开关电弧爆炸危害及其预防措施^[2,3],在大型变压器上进行了电弧放电实验,并通过数值模拟方法深入研究其物理现象;结果表明在无保护的情况下,变压器油箱内部压力不能及时泄放,应使用快速降压方法对分接开关时和油箱进行保护。陈杨和杨廷胜等人提出了新型变压器油溶解气体在线检测装置和检测方法^[4,5],为变压器油中气体的在线测量和精度提供了参考。陈城和马鑫等人提出了变压器故障识别方法^[6,7],为电力系统多特征故障识别提供了有效帮助。夏红军等人基于有限元分析方法和计算流体力学方法建立了油浸式变压器内部电弧故障下的温度场模型^[8],计算过程中将放电材料和电弧能量作为热源,考虑了冷却降温措施和壁面的辐射换热,获得了变压器内部的温度场分布,并验证了仿真模型的准确性。闫晨光等人为了研究变压器油箱开裂原因^[9-11],通过有限元仿真方法,研究了变压器内部发生故障后油箱内压力变化情况,获得了不同时刻油箱内压力分布云图及不同位置的压力时程曲线。由于变压器油长期在高温下工作^[12],郑雨秋等人研究了不同温度对变压器油气/雾的爆炸下限的影响^[13],研究发现随着温度的升高,变压器油的燃爆危险性增大。赵欣宇等人研究了不同泄放面积和变压器油蒸气量对爆炸压力的影响^[14],结果表明小面

积泄放口的泄放效果并不理想,在设计允许的情况下,应尽可能增大泄放面积。周远翔等人通过实验证明变压器油在交直流复合电场和直流电场下的绝缘性能比交流电场情况要差^[15],并引入小桥理论的极化过程解释了纹波因数越小击穿电压越低这一物理现象。刘泽洪等人通过搭建变压器网侧升高座区域油箱内的电弧放电故障模拟实验平台^[16,17],进行了大电流、高爆燃容量模拟短路实验,获得了不同燃弧能量下升高座内部压强时域变化曲线,实验结果表明电流从20 kA增加至40 kA时,筒壁上压强峰值将从0.79 MPa增加至1.17 MPa,并证明了压力释放阀装置的关键作用。Ryan Brady为降低变压器爆炸后果^[18-20],提出了一种避免变压器油箱破裂的策略,并通过实验证明通过第一个动态压力峰值激活减压装置,可以在毫秒时间尺度内排空变压器中的油,进而有效防止油箱爆炸。

采用实验手段对换流变压器油箱内的燃弧故障进行研究条件苛刻,且具有相当的危险性,同时也很难揭示故障过程整个内部三维空间的压力演变。因此本研究采用计算流体力学方法建立升高座油箱内电弧故障的仿真模型并进行求解,深入研究油室和升高座中的压力变化及其传播过程,并与实验数据进行对比,验证了计算模型的准确性。研究可为大型充油设备内电弧燃爆的安全防护提供科学参考。

1 电弧加载工况

对油箱电弧放电实验过程中的电压与电流变化情况记录,并作为数值仿真的计算条件,实验在苏州电力科学研究院进行。电弧燃爆过程电流与电压随时间变化曲线见图1。

从图1可知,电弧放电过程持续时间较短,在58.6 ms的时间尺度内即结束。电弧爆炸过程中电压与电流变化剧烈,其中电流呈现较明显的周期性

规律,周期约为 20 ms,峰值电流 44 554 A;电压变化呈现出一定不规则性,峰值电压为 6.6 kV。故障过程中释放的电弧总能量为 4.929 MJ。

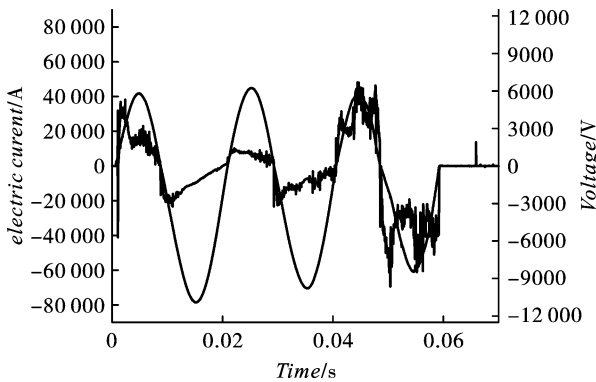


图 1 电流与电压曲线

Fig. 1 Current vs voltage curves

2 数值建模

2.1 几何模型与网格划分

参照实验过程中所用的实际变压器油箱以及升高座尺寸建立三维几何模型,具体几何结构如图 2 所示。

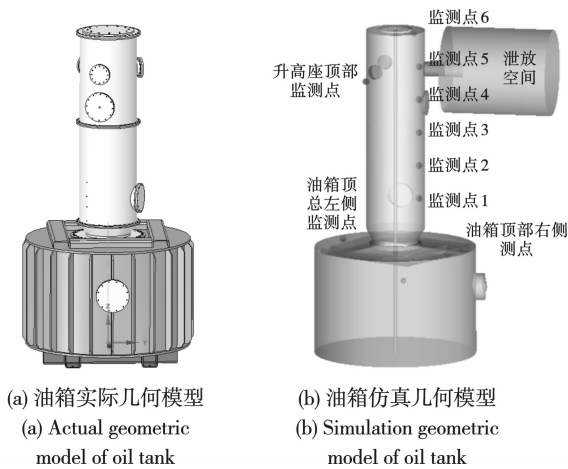


图 2 三维模型建立

Fig. 2 3D model creation

图 2 为仿真的三维几何模型,从图中可以看出整个计算域主要包含油箱、升高座、外部泄放空间三部分,升高座与外部泄放空间通过泄爆片连接。油箱位于底部,其形状为圆柱形,直径 3 m,高 2 m。升高座位于油箱上部,其中轴线与油箱中轴线为同一直线,升高座直径 1.1 m,高 4 m。DN250 反拱形泄爆片位于升高座上上部区域,直径为 250 mm,泄放开启压力 250 kPa。故障放电位置处于油箱内部,距离中轴线 0.18 m,距离油箱底部 1.34 m,放电电极间距为 0.01 m。参照实验过程在油箱以及升高座内

部不同位置设定 3 个计算监测点,用以捕捉仿真计算过程该位置的电压变化情况,并在升高座内设置监测点 1~6 来观察升高座内压力变化。

依据建立的三维几何模型构建数值仿真的计算域,并进行网格划分实现空间离散。整体网格与局部细节网格见图 3。

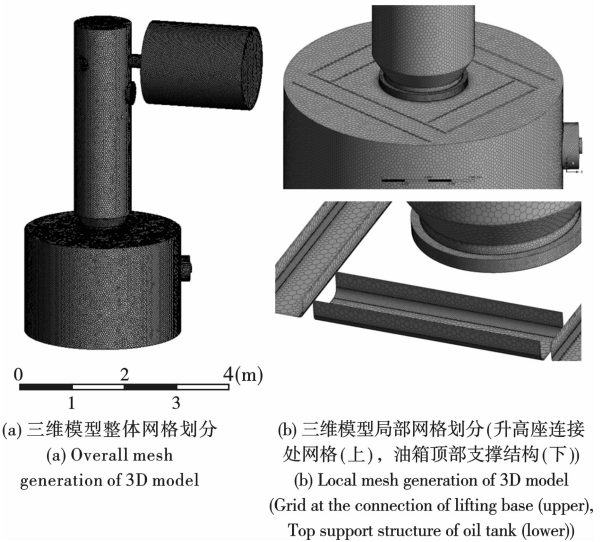


图 3 三维模型网格划分

Fig. 3 3D model meshing

图 3 展示了计算域的网格划分情况。在网格划分过程中对于内部流体域采用四面体网格划分方式,对壁面附近区域生成边界层并进行网格加密。由于多面体网格相比四面体网格具有更好的形状适应性以及在计算中更容易收敛等优势,在计算前将四面体网格基于网格节点转化为多面体网格,并进行网格光滑,优化网格质量。优化后的多面体网格数为 675719,电弧故障区域最小网格尺寸为 1 mm。

2.2 数值模型

以纳维-斯托克斯方程组为基础,建立三维可压缩气液两相流过程的数学模型,并采用有限体积法进行求解。气液两相流计算选用流体体积函数模型 (Volume of Fluid, 简称 VOF)。对于泄放过程的湍流现象,采用 k-ε 双方程湍流模型计算。所建立数学模型的主要方程如下。

质量守恒

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g V_j) = 0 \quad (1)$$

动量守恒

$$\frac{\partial (\rho_g V_{gj})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_{gj} V_{gi})}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \frac{\rho P}{\tau_r} (V_{pi} - V_{gi}) \quad (2)$$

能量守恒

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho + E) + \nabla [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla [k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j j_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})] + S_h \quad (3)$$

气体状态

$$P = \rho RT \quad (4)$$

液体状态方程

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n = \frac{M}{M_0} \quad (5)$$

式中: P 为压力,Pa; t 为时间,s; T 为温度,K; μ 为流体动力粘度,Pa·s; ρ 为流体密度,kg/m³; ρ_0 为参考压力下的液体密度,kg/m³; κ_0 为参考压力下的体积模量; n 为密度指数,取值为7.15; M 为体积模量。

湍流方程

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: G_k 与 G_b 分别为平均速度梯度以及浮力影响所产生的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; μ_t 为湍流粘性系数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为默认值常数;湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

3 仿真结果验证与分析

3.1 不同位置监测点压力变化对比

计算过程中设置与实验压力测试过程中位置相同的3个监测点,具体位置如图2所示。电弧爆炸过程中不同时刻监测点位置压力变化计算结果与实验结果对比见图4。

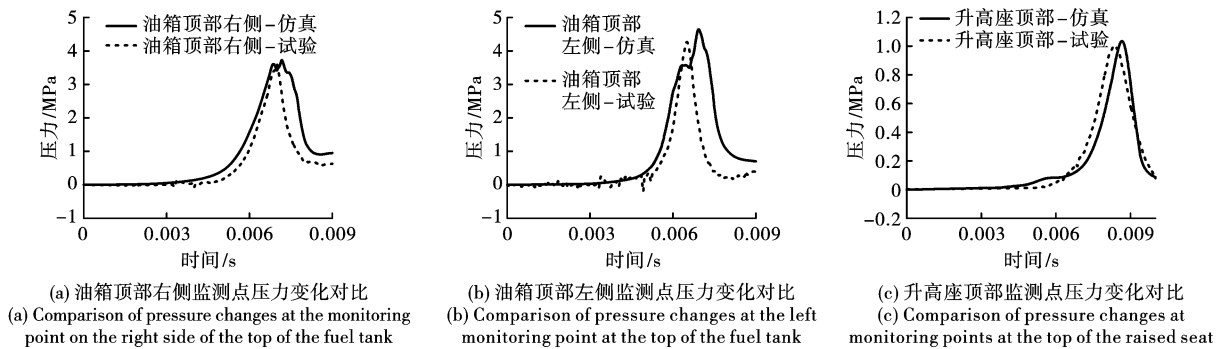


图4 不同位置监测点压力变化对比

Fig. 4 Comparison of pressure changes at monitoring points at different locations

图4分别展示了换流变压器油箱与升高座内部不同监测点位置的仿真与实验数据对比。从图中可以看出仿真所获得的压力峰值以及压力随时间变化规律与实验基本一致,验证了该模型在计算上的有效性。从图4(a)和图4(b)可以看出,油箱顶部右侧和左侧位置的监测点相比,其压力峰值到达时间早0.2 ms,这是由于故障位置距油箱顶部右侧监测点位置较近导致的。2个监测点的压力峰值分别为3.79 MPa和4.62 MPa,油箱顶部左侧压力峰值更大。通过对试验数据以及监测点位置进行分析可知,油箱顶部右侧压力监测点距离内部凹槽形状钢结构较近,凹槽形状对该位置压力监测点的压力值产生一定阻挡作用,因此造成了油箱顶部左侧压力监测点峰值大于右侧。顶部监测点位置距离故障点位置较远,因此到达压力峰值时间相对滞后,在电弧故障后8.7 ms,达到压力峰值1.03 MPa。

3.2 电弧爆炸过程压力变化分析

为详细研究换流变压器油箱内压力的传播过程,通过创建油箱中轴线的竖直截面,选取故障后不同时刻的截面压力云图进行分析,见图5。

从图5可以看出,随着油箱中电弧燃爆故障发生,高压区首先出现在电弧故障位置;这是由于电弧放电瞬间对放电区域注入大量能量,温度急速上升,使放电区域内的变压器油发生裂解,产生大量气体,形成高压气泡;而后高压气泡向四周膨胀挤压周围液体,将压力以球面波的形式传递至绝缘油中。压力波首先与右侧壁面接触并发生反射,而后反射波与故障点产生的压力波在左侧壁面发生汇聚,导致左侧壁面压力大于右侧压力,从而使油箱顶部左侧监测点压力峰值较高。5.5 ms后压力波从油箱内向升高座传递,在7.5 ms时与泄压阀充分接触并达到泄压阀开启压力,升高座内压力开始向外释放。

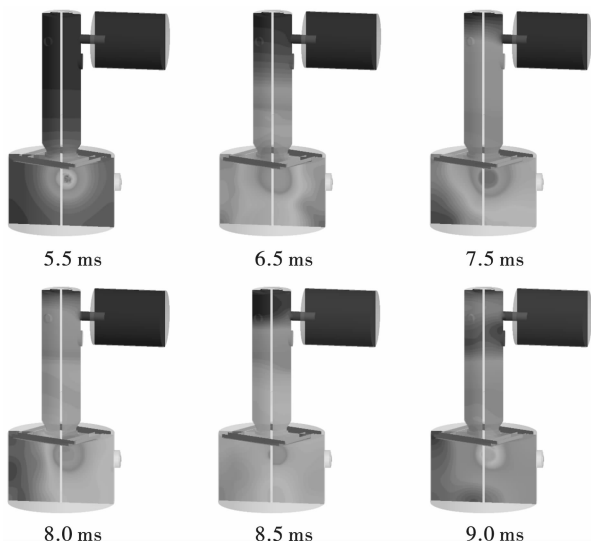


图5 压力演变计算结果

Fig. 5 Calculation results of pressure evolution

3.3 不同距离压力峰值分析

为了研究到故障点不同距离位置监测点的压力峰值变化,选取升高座内不同位置监测点压力时程曲线进行分析,其压力变化曲线如图6所示。

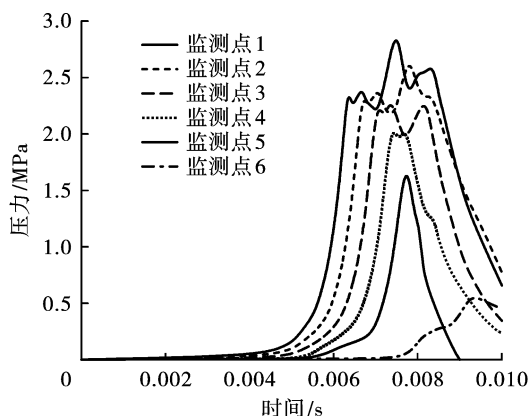


图6 升高座内各监测点压力变化

Fig. 6 Pressure change of each monitoring point in the raised seat

由图6可以看出,监测点1~6压力峰值从2.75 MPa逐渐降低至0.72 MPa,说明升高座区域监测点距故障点距离越远,压力衰减越大,导致压力峰值越低;且距离泄压阀越近,峰值压力降低得越明显。7.5 ms时刻泄压阀打开,对比泄压阀开启后其附近的监测点5与监测点6可知,监测点6的峰值压力明显降低,这是因为压力波在经过泄压阀后泄放了部分压力。在泄压过程中,由于故障区仍处于持续放电状态,因此故障区仍然会持续产生一定压力;但由于泄压阀已经开启,因此后续产生的压力较

低,均低于第一次压力峰值。通过以上研究说明泄压阀的存在可以有效降低电弧故障后油室与升高座内部高压持续时间,防止油箱产生整体破裂的严重后果。

4 结论

基于计算流体力学仿真方法对变压器油箱内电弧爆炸过程压力变化进行了数值模拟,结合实验数据进行分析,得到以下主要结论。

(1)通过求解以N-S方程组为基础构建的数值模型可以较好地模拟油箱内电弧爆炸的压力传播过程,计算得到的压力变化曲线与实测曲线变化规律基本一致,证明了仿真模型的有效性。

(2)电弧故障位置位于油箱内部区域时,油箱壁面所承受的压力明显高于升高座壁面,油箱壁面压力峰值可达4.42 MPa,为升高座上部压力峰值的3.65倍。

(3)对升高座区域到电弧爆炸中心点不同距离位置出现的压力峰值进行了统计,其整体规律为随着距离的增加压力峰值不断下降。升高座区域不同位置达到的压力峰值均小于3 MPa。

参考文献 (References)

- [1] 陈涛,赵力增,傅学成,等.大型换流变压器火灾事故特点与灭火方案[J].消防科学与技术,2020,39(8):1138-1141.
- [1] CHEN Tao, ZHAO Li-zeng, FU Xue-cheng, et al. Fire accident characteristics and firefighting solutions of large converter transformer[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8):1138-1141. (in Chinese)
- [2] BEN Landis, RYAN Brady, MARGARETA Petrovan-boiarciuc, et al. Investigation of an internal arcing event in an on load tap changer using fluid structure interaction[C] // Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2010, v4, Fluid-Structure Interaction: ASME, 2010:61-68.
- [3] BEN Landis, SEBASTIEN Muller, MARGARETA Petrovan-boiarciuc, et al. Prevention of transformer tank explosion part 4: development of a fluid structure interaction numerical tool[C] // Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2009, v4, Fluid-Structure Interaction: ASME, 2009:45-53.
- [4] 陈杨,戴景民,王振涛,等.基于近红外TDLAS变压器油中溶解气体在线检测装置[J].光谱学与光谱分析,2021,41(12):3712-3716.

- [4] CHEN Yang, DAI Jing-min, WANG Zhen-tao, et al. A near-infrared TDLAS online detection device for dissolved gas in transformer oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(12):3712-3716. (in Chinese)
- [5] 杨廷胜, 卢志鹏, 苗厚利. 基于 PMS 的设备故障数据分析模型构建及仿真[J]. 粘接, 2022, 49(7):165-169, 174.
- [5] YANG Ting-sheng, LU Zhi-peng, MIAO Hou-li. Construction and simulation of equipment fault data analysis model based on PMS[J]. Adhesion, 2022, 49(7):165-169, 174. (in Chinese)
- [6] 陈 城, 闫永昶. 变电站变压器异常状态监测数据可视化方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(6):204-207.
- [6] CHEN Cheng, YAN Yong-xu. Visualization method of transformer abnormal condition monitoring data in substation[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(6):204-207. (in Chinese)
- [7] 马 鑫, 尚毅梓, 胡 昊, 等. 基于数据特征增强和残差收缩网络的变压器故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3):175-183.
- [7] MA Xin, SHANG Yi-zi, HU Hao, et al. Identification method of transformer fault based on data feature enhancement and residual shrinkage network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3):175-183. (in Chinese)
- [8] 夏红军, 徐红艳, 俞啸玲, 等. 内部电弧故障下油浸式变压器热点温升建模分析[J]. 农村电气化, 2019(10):24-27.
- [8] XIA Hong-jun, XU Hong-yan, YU Xiao-ling, et al. Modeling and analysis of hot spot temperature rise of oil immersed transformer under internal arc fault[J]. Rural Electrification, 2019(10):24-27. (in Chinese)
- [9] 闫晨光, 张保会, 郝治国, 等. 电力变压器油箱内部故障压力特征建模及仿真[J]. 中国电机工程学报, 2014(1):179-185.
- [9] YAN Chen-guang, ZHANG Bao-hui, HAO Zhi-guo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(1):179-185. (in Chinese)
- [10] 闫晨光, 郝治国, 张保会, 等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3):180-187.
- [10] YAN Chen-guang, HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3):180-187. (in Chinese)
- [11] 闫晨光, 徐 彻, 曹 培, 等. 电力变压器瓦斯继电器暂态动作特性研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5):1-7.
- [11] YAN Chen-guang, XU Che, CAO Pei, et al. Research on transient characteristics of power transformer gas relay[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(5):1-7. (in Chinese)
- [12] 郑龙琨. 油浸式变压器事故油池的设计[J]. 氯碱工业, 2022, 58(3):41-42.
- [12] ZHENG Long-xian. Design of accident oil pool for oil immersed transformer[J]. Chlor-Alkali Industry, 2022, 58(3):41-42. (in Chinese)
- [13] 郑秋雨, 刘 琳, 武保林, 等. 典型电力用油的油气/雾燃爆危险性研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6):849-851.
- [13] ZHENG Qiu-yu, LIU Lin, WU Bao-lin, et al. Study on deflagration risk of typical oil gas/mist in electric power industry[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(6):849-851. (in Chinese)
- [14] 赵欣宇, 杨黎波, 董一夫, 等. 变压器油蒸气爆炸与泄爆过程数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(8):31-35.
- [14] ZHAO Xin-yu, YANG Li-bo, DONG Yi-fu, et al. Numerical simulation of transformer oil vapor explosion and venting process[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(8):31-35. (in Chinese)
- [15] 周远翔, 姜鑫鑫, 陈维江, 等. 交直流复合电压下变压器油中电弧放电及产气特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(7):1584-1589.
- [15] ZHOU Yuan-xiang, JIANG Xin-xin, CHEN Wei-jiang, et al. Arcing discharge and gas generation characteristics of transformer oil under combined AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7):1584-1589. (in Chinese)
- [16] 刘泽洪, 卢理成, 周远翔, 等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13):4688-4697, 29.
- [16] LIU Ze-hong, LU Li-cheng, ZHOU Yuan-xiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13):4688-4697, 29. (in Chinese)
- [17] 刘泽洪, 余 军, 郭贤珊, 等. ± 1100 kV 特高压直流工程主接线与主回路参数研究[J]. 电网技术, 2018, 42(4):1015-1022.
- [17] LIU Ze-hong, YU Jun, GUO Xian-shan, et al. Study on main connection line and main circuit parameters of ± 1100 kV UHVDC[J]. Power System Technology, 2018, 42(4):1015-1022. (in Chinese)

- system under high temperature[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17):12-17. (in Chinese)
- [11] 凌天龙,吴帅峰,刘殿书,等. 砂岩 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数确定[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2211-2216.
- [11] LING Tian-long, WU Shuai-feng, LIU Dian-shu, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook model parameters for sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8):2211-2216. (in Chinese)
- [12] 夏昌敬,桂乐乐,谭金彪,等. 冲击载荷作用下岩石动态力学性能的数值分析[J]. *弹道学报*, 2009, 21(3): 11-14.
- [12] XIA Chang-jing, GUI Le-le, TAN Jin-biao, et al. Numerical analysis of dynamic mechanical properties of rocks under impact load[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(3):11-14. (in Chinese)
- [13] 夏正兵. 硅酸盐混凝土与岩石材料的动态力学性能比较研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(3): 124-127, 148.
- [13] XIA Zheng-bing. Dynamic mechanical performance comparison between silicate concrete and rock[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(3):124-127, 148.
- [14] 卢芳云,陈 荣,林玉亮,等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [14] LU Fang-yun, CHEN Rong, LIN Yu-liang, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [15] 胡石胜. 霍普金森压杆技术[J]. *兵器材料科学与工程*, 1991(11):40-47.
- [15] HU Shi-sheng. Hopkinson pressure bar technology[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1991(11): 40-47. (in Chinese)
- [16] 王礼立,王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. *爆炸与冲击*, 2005(1):17-25.
- [16] WANG Li-li, WANG Yong-gang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005(1):17-25. (in Chinese)
- [17] RAMZI Othman. The Kolsky-Hopkinson bar machine[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG part of Springer Nature, 2018.
- [18] ZHANG Qian-bing, ZHAO Jian. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4):1411-1478.
- [19] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [19] WANG Li-li. Foundations of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [20] XIA Kai-wen, YAO Wei. Dynamic rock tests using split Hopkinson(Kolsky) bar system- A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1):27-59.
- [21] 李成武,王金贵,解北京,等. 基于 HJC 本构模型的煤岩 SHPB 实验数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1):158-164.
- [21] LI Cheng-wu, WANG Jin-gui, XIE Bei-jing, et al. Numerical simulation of SHPB tests for coal by using HJC model[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1):158-164. (in Chinese)
- [22] 方 秦,孔祥振,吴 昊,等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. *工程力学*, 2014, 31(3):197-204.
- [22] FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3):197-204. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第 222 页)

- [18] RYAN Brady, SEBASTIEN Muller, MARGARETA Petrovan-boiarciuc, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 3; design of efficient protections using numerical simulations [C] // *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2009*, v3, Design and Analysis: ASME, 2009:667-675.
- [19] SEBASTIEN Muller, RYAN Brady. Prevention of transformer tank explosion PART 1: Experimental tests on large transformers [C] // *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2008*, vol 4, Fluid-structure interaction: ASME, 2008:357-365.
- [20] RYAN Brady, SEBASTIEN Muller. Prevention of transformer tank explosion PART 2: Development and application of a numerical simulation tool [C] // *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2008*, vol 4, Fluid-structure interaction: ASME, 2008:49-58.

英文编辑:陈东方