

分体式有载分接开关结构可靠性验证及优化

李元琦¹, 葛亦宁¹, 汪黎¹, 邵宇航², 李金忠³, 汪可⁴, 刘轩东¹,
李刚⁴, 李戈琦⁴

(1. 西安交通大学 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 国网天津市电力公司高压分公司, 天津 300232;
3. 国家电网有限公司, 北京 100031; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:有载分接开关在切换过程中有概率导致电气故障引起事故, 新型有载分接开关通过分体式设计将切换油室与变压器主体隔离, 理论上降低了变压器燃爆的可能。为了验证新型分体式有载分接开关设计的可行性, 尤其是电弧故障下分体式结构间引线套管等关键隔离结构的可靠性, 基于压力声学法以及声固耦合法建立了仿真模型, 结合压力-应力特性对电弧故障能量的影响、电弧故障位置的影响以及电弧故障发生于引线套管附近直接冲击隔离结构的极端情况进行了分析。研究结果表明: 当故障发生于切换油室内部时, 故障能量的升高以及故障源对泄压装置的远离均会导致分体油箱内部承受压强增大; 副油箱的存在对主油箱能起到有效的保护作用; 极端情况下, 引线套管可靠, 而油室底座、油箱联通结构等部位存在应力集中, 具有形变、破损风险。基于研究结果对相应结构进行了优化设计, 应力分布明显改善。

关键词:有载分接开关; 电弧故障; 分体式布置; 有限元仿真; 压力分布; 应力分布

DOI:10.15938/j.emc.2025.07.002

中图分类号: TM403.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2025)07-0012-10

Reliability verification and optimization of split-type on-load tap changer structure

LI Yuanqi¹, GE Yining¹, WANG Li¹, SHAO Yuhang², LI Jinzhong³, WANG Ke⁴,
LIU Xuandong¹, LI Gang⁴, LI Geqi⁴

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company High Voltage Branch, Tianjin 300232, China;
3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The on-load tap changer (OLTC) has a risk of electrical faults during switching, potentially leading to accidents. A new split-type design was proposed, in which the switching oil chamber is isolated from the transformer body, theoretically reducing the likelihood of explosions. To validate this de-

收稿日期: 2024-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2402100)

作者简介: 李元琦(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压电力设备绝缘状态检测与试验技术;

葛亦宁(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压电力设备绝缘状态检测与试验技术;

汪黎(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压电力设备绝缘状态检测与试验技术;

邵宇航(1998—), 男, 硕士, 研究方向为特高压电力设备绝缘状态检测与试验技术;

李金忠(1974—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为变压器及电抗器相关技术;

汪可(1987—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为变压器及电抗器相关技术;

刘轩东(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流电力设备设计、气体绝缘与放电等离子体、高功率脉冲源、气体开关及应用;

李刚(1993—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为变压器及分接开关相关技术;

李戈琦(1994—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为变压器及分接开关相关技术。

通信作者: 刘轩东

sign—particularly the reliability of key isolation structures such as the lead bushing under arc fault conditions—a simulation model was developed using pressure-acoustic and acoustic-structural coupling methods. The effects of fault energy, fault location, and extreme scenarios where the arc fault impacts the isolation structure near the lead bushing were analyzed. The results show that increased fault energy and a fault source located further from the pressure relief device lead to higher pressure inside the split oil tank. The auxiliary oil tank provides effective protection for the main tank. In extreme cases, the lead bushing remains reliable, but regions such as the oil chamber base and tank connections are prone to stress concentration and potential damage. Based on these findings, structural optimization is shown to improve stress distribution.

Keywords: on-load tap changer; arc fault; separate arrangement; finite element simulation; distribution of pressure; distribution of stress

0 引言

有载分接开关(on-load tap changer, OLTC)作为电力变压器和换流变压器的核心部件,能够通过档位的调节对变压器的输出电压进行在线切换,使得变压器的输出在不切断负荷的条件下保持相对稳定,在输电系统中发挥着至关重要的作用^[1-3]。OLTC的切换过程涉及复杂的结构联动以及大量零部件的整体配合^[4-5],其中任何零部件的机械故障都可能导致切换动作的中断,进而引起电气故障^[6-8]。为了减小OLTC电气故障对变压器主体地影响,新型的分体式OLTC将切换开关安置在附属油箱内,以此实现风险源与变压器主体的隔离^[9]。目前该结构仍处于考核验证阶段,因此,对于分体式OLTC的可靠性研究有着重大的参考意义。

油中电弧放电通道的形成以及气泡的膨胀是产生电弧故障的主要原因^[10-13],而油中电弧故障所产生的高幅值压强则是导致油箱等结构被破坏的关键因素。宋冬冬等学者^[14]提出基于能量守恒的电弧能量监测方法,发现OLTC电弧故障能量的差异很大。贾云飞等学者^[15]将电弧故障产生的压力波分为前期的快速振荡时期以及后期的持续上升时期2个阶段。闫晨光等^[16-17]通过有限元仿真得到了故障能量与油压幅值和油箱应力之间的关系。李金忠等^[18]借助流体力学的仿真方法,梳理了电弧故障发生时压力波的产生以及发展过程。周盟等^[19]发现换流变压器内电弧故障的发生会使得气泡快速膨胀进而引起油室压力骤升,并且油压的升高与故障能量之间存在正相关的关系。

OLTC发生电弧故障时的压力特性已得到广泛

的关注,而对于分体式OLTC,相关规律尚有待探索。在之前的研究中^[20],已分析了特定能量的电弧故障发生于切换油室内特定位置对分体油箱结构的影响,以及当油室底座泄漏时压力进入油箱对关键结构的冲击。然而,主副油箱间引线套管等关键隔离结构的可靠性需要进一步验证。并且,考虑到电弧故障能量对油箱内压力的影响以及多代OLTC结构布局下电弧故障易发位置的差异性,本文建立声固耦合瞬态仿真模型,进一步对电弧故障能量和故障位置的影响进行分析,考核电弧故障发生于引线套管附近背包油箱中的极端工况下分体式OLTC的结构可靠性,提出结构优化方案。

1 电弧故障压力分析方法

1.1 电弧压力源模型

封闭容器中电弧故障引起的压力升高可以分为冲击型压升过程以及准静态压升过程,典型压力曲线如图1所示^[21]。冲击型压升过程对应图1中0~0.05 s的压强曲线,液电效应在这个阶段对压强的变化起到了主导作用^[22],随着电弧通道内介质的汽化,液电效应减弱,冲击波迅速衰减;而准静态压升过程则对应图1中0.05~0.4 s的部分,主要是变压器油汽化、分解所产生气体的受热膨胀引起^[23-24],该阶段中压升较为平缓且无突变,可近似为恒容升温膨胀。

液电效应过程冲击波峰值压力与电弧能量之间的关系可以近似用Touya公式^[25]表示为

$$P_p = \frac{900}{D} E_b^\alpha \quad (1)$$

其中: P_p 为液电效应冲击波在特定位置的峰值压

力, MPa; D 为该位置与电弧源间的距离, mm; E_b 为电弧注入能量, kJ; α 为常数, 需根据实际的实验结果拟合得到, 其与引弧电极尺寸、间距相关, 结合实验数据拟合结果, 在本研究中取 0.35 ~ 0.37。

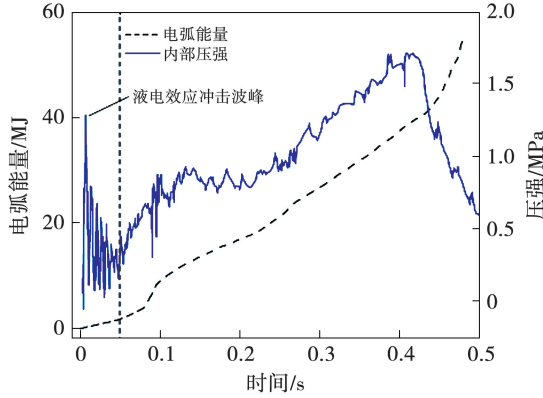


图1 密闭容器中电弧故障典型压力曲线

Fig.1 Typical pressure curve of arc fault in sealed container

恒容增温膨胀效应过程电弧能量与压升之间的关系, 参考文献[16-17]提出的电源故障压力震源模型进行建立, 得到故障气泡压强与电弧能量的关系为

$$dp_{\text{gas}} = \frac{R\alpha_{\text{heat}}}{C_{\text{gas}}V_{\text{gas}}}dW_{\text{arc}} \quad (2)$$

其中: p_{gas} 为气体压强; R 为普适气体恒量; α_{heat} 为能量转化系数; C_{gas} 为气体热容; V_{gas} 为混合气体体积; W_{arc} 为电弧能量。混合气比热容服从叠加规律, 本文 C_{gas} 取 2.16 kJ/(kg · K)。

1.2 压力波传输模型

压力波传输的本质是声波的传输, 可采用压力声学法结合流体力学模型建立连续流体控制方程。

假设系统外力只有体积力和面积力, 借助动量守恒方程(N-S方程)可知系统内流体动量的变化率等于外力之和, 即

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F} \quad (3)$$

其中: t 为时间变量, s; ρ 为流体密度, kg/m³; $\mathbf{u}$ 为速度场, m/s; $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量, N/m²; $\mathbf{F}$ 为体积力, N/m³。

系统内能的流动过程可以借助能量守恒关系进行描述, 即

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho s \mathbf{u}) = \frac{1}{T} [-\nabla \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{u})] \quad (4)$$

其中: s 为熵, J/(kg · K); T 为温度, K。

当假设压力波传输为绝热过程时, 系统空间内某一点的压强 p 为该单元的速度场 $\mathbf{u}$ 、单元密度 ρ 和时间 t 的函数。可得压力波传播的瞬态波动方程为

$$\frac{1}{\rho c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p_t - \frac{\delta}{\rho c^2} \cdot \frac{\partial \nabla p}{\partial t} \right) \quad (5)$$

其中: 内部压强 p 的值为背景压力和实际压力变化的叠加; δ 为压力波扩散率, 与流体黏度相关。

认为各材料均为各向同性, 载荷与应力间的关系可借助瞬态力学平衡方程描述如下:

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v \quad (6)$$

其中: ρ_s 为固体结构的密度; $\mathbf{u}_s$ 表示结构微单元位移; $\mathbf{S}$ 为应力张量; $\mathbf{F}_v$ 表示应力密度。

在流体与固体边界设置声压-结构边界耦合条件用于描述压力波与固体结构的相互作用, 即:

$$\left. \begin{aligned} -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p_t \right) &= -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_n; \\ \mathbf{F}_A &= p_t \mathbf{n}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{u}_n$ 为结构单元位移的二阶导数, 即加速度; p_t 为流体压强; $\mathbf{n}$ 为结构表面的法向量; $\mathbf{F}_A$ 为结构的面积载荷。

在泄压阀出口处采用洛平条件控制压力传输阻抗, 当压强高于设定值(110 kPa)时, 将边界阻抗从变压器油与金属固体的耦合转变为变压器油与空气的耦合, 以模拟油室顶部压力释放阀在动作时的压力泄放效果。

1.3 仿真模型的建立和验证

建立 ±110 kV 分体式 OLTC 油箱仿真模型如图2所示, 主油箱(A油箱)与附属油箱(B油箱)之间以加厚隔板隔离, 并通过引线套管达成电气连接, 切换油室位于B油箱内。为简化模型, 忽略了人孔, 注油管道等结构, 同时, 由于A油箱受压力的直接影响较小, 忽略了A油箱内部结构。

变压器油箱外壳采用 Q235 结构钢, 油室法兰、引线套管法兰和油室底部选用铝合金材料, 油室绝缘筒采用环氧浇注玻璃纤维, 引线套管主绝缘为环氧树脂, 箱体和油室填充介质选用变压器油, 主要材料的物理参数如表1所示。

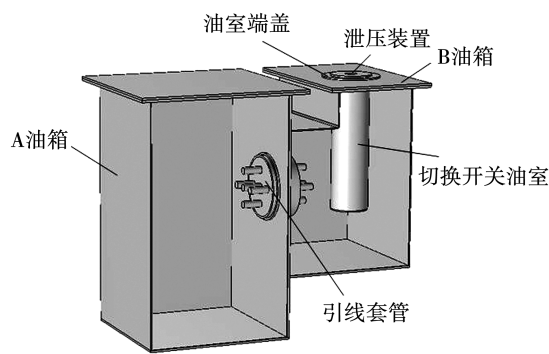


图 2 分体式实验油箱三维模型

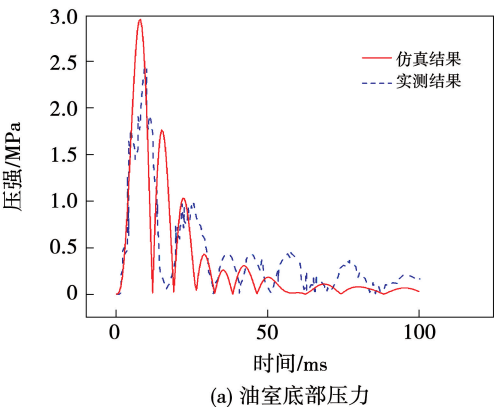
Fig. 2 3D model of split-type experimental oil tank

表 1 主要材料物理参数

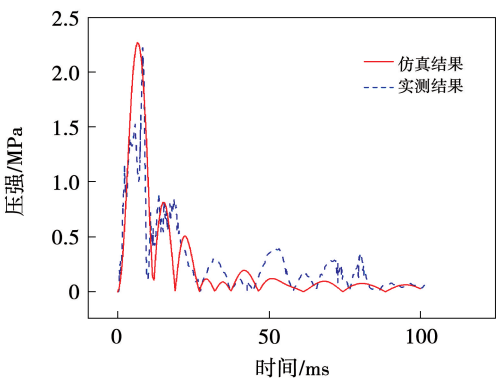
Table 1 Main physical parameters of materials

材料	声速/ (m/s)	密度/ (kg/m ³)	动力黏度/ (Pa·s)	杨氏模 量/Pa	泊松比
结构钢	5 900	7 850	—	2×10^{11}	0.30
铝合金	6 320	3 900	—	7×10^{10}	0.33
变压器油	1 260	879	0.02	—	—
环氧玻璃钢	3 080	1 800	—	15×10^9	0.30
环氧树脂	2 540	1 673	—	1×10^9	0.38

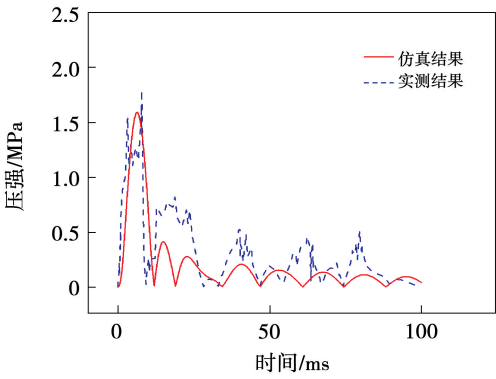
与某次国家电网公司组织的分体式 OLTC 燃弧试验进行对照,试验电弧电流为 63 kA,电弧能量约为 4.1 MJ(记为 E_0),电弧故障源位于 B 油箱内的切换油室内部,位于切换油室的中上部,距离油室底部 1 140 mm。在泄压装置可靠动作时,对切换开关油室内部不同位置压强变化的实测与仿真结果进行对比,如图 3 所示,可见各位置压强曲线仿真结果与实测结果变化趋势较为接近,以此验证了仿真模型的准确性。本文的压强、应力数据均选用以大气压为基准的相对值。



(a) 油室底部压力



(b) 油室中部压力



(c) 油室顶部压力

图 3 油室内各位置压强曲线

Fig. 3 Pressure curves at various points inside the chamber

2 结构可靠性分析及优化设计

2.1 电弧故障能量的影响

在实际的电弧故障中,电流强度、变压器油静压水平以及电极距离等均会对故障能量产生影响。为此,设置电弧故障源于切换油室中上部距离油室底部 1 140 mm 处,改变电弧能量为 $0.2E_0 \sim 3E_0$,即 0.8 ~ 12.3 MJ 展开研究。

在不同故障能量下,燃弧过程中切换油室底部、中部、顶部的油压如图 4 所示。可以看出,电弧故障发生后,油室内各位置的压强具有相似的激增与波动衰减趋势。油室底部和中部的压强在陡升至最大值后,会经历 2 ~ 3 个峰值较高的压强脉动,随后缓慢衰减;而油室顶部由于靠近泄压阀,泄压较为及时,压强在陡升至最大值后随即快速降低至较低水平。此外,由图 4 可知,故障能量越高,油室内部压强越难在短时间内降低,这意味油室内部高压强持续的时间越久,对机械结构造成的威胁也越大。

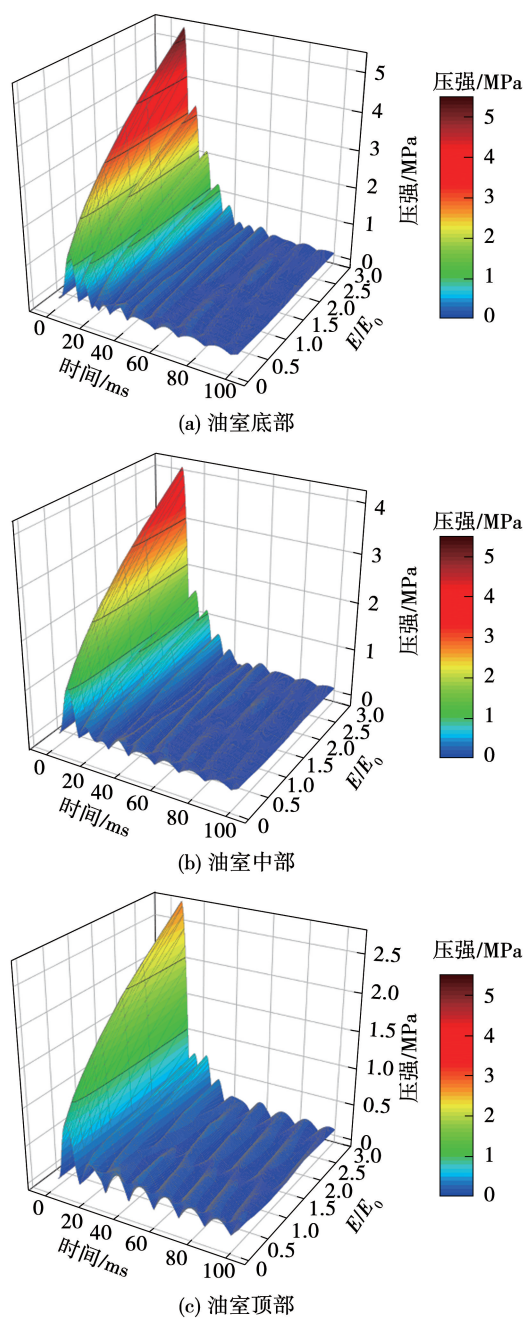


图4 油室内压强的波动情况

Fig. 4 Pressure fluctuations inside oil chamber

不同故障能量下,油室底部、中部、顶部压强的最大值如图5所示。可见,各位置的最大压强均与故障能量具有较强的正相关性,随着故障能量由 $0.2E_0$ 增大至 $3E_0$,油室底部、中部和顶部油压分别升高约301%、297%和247%,且压强随故障能量增加的升高具有一定的饱和趋势。

分体油箱最大压强与故障能量间的关系如图6所示,当故障能量由 $0.2E_0$ 增大至 $3E_0$ 时,A、B油箱压强最大值分别升高约330%和324%。当故障能

量达到约 $0.5E_0$ 时,B油箱压强达到了变压器油箱的限值(55 kPa);而A油箱在故障能量达到约 $1.75E_0$ 时才达到这一限值,耐受电弧能量的能力远远高于附属B油箱,这验证了分体式设计对主油箱的保护作用。

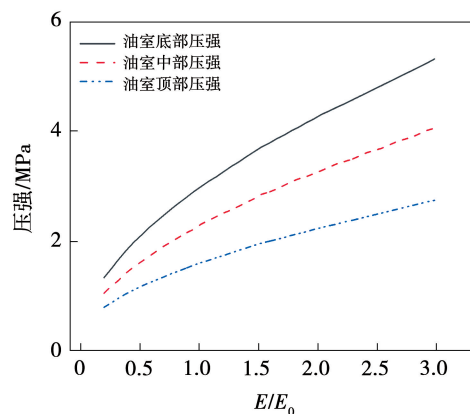


图5 油室内最大压强与故障能量的关系

Fig. 5 Relationship between maximum pressure inside oil chamber and fault energy

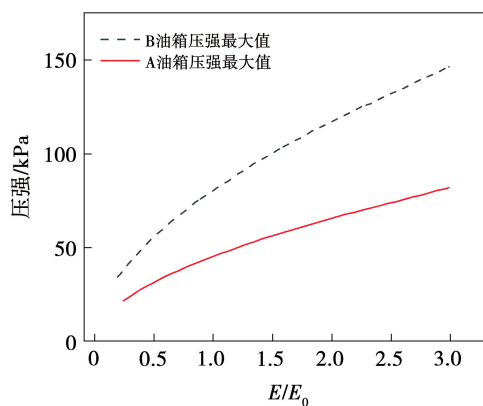


图6 分体油箱最大压强与故障能量的关系

Fig. 6 Relationship between maximum pressure in split oil tank and fault energy

切换油室和分体油箱各机械结构所承受的应力与内部压强水平直接相关。图7为分接开关油室和分体油箱应力集中部位的最大应力与故障能量间的关系。可见,当故障能量由 $0.2E_0$ 增大至 $3E_0$ 时,切换油室顶盖的最大应力由51 MPa升高至166 MPa,升高约224%;油室底座的最大应力由197 MPa升高至791 MPa,升高约302%;分体油箱联通壁应力最大值由12 MPa升高至49 MPa,升高约323%;B油箱顶盖最大应力由38 MPa升高至179 MPa,升

高约 372%; L 形结构最大应力由 74 MPa 升高至 355 MPa, 升高约 378%。

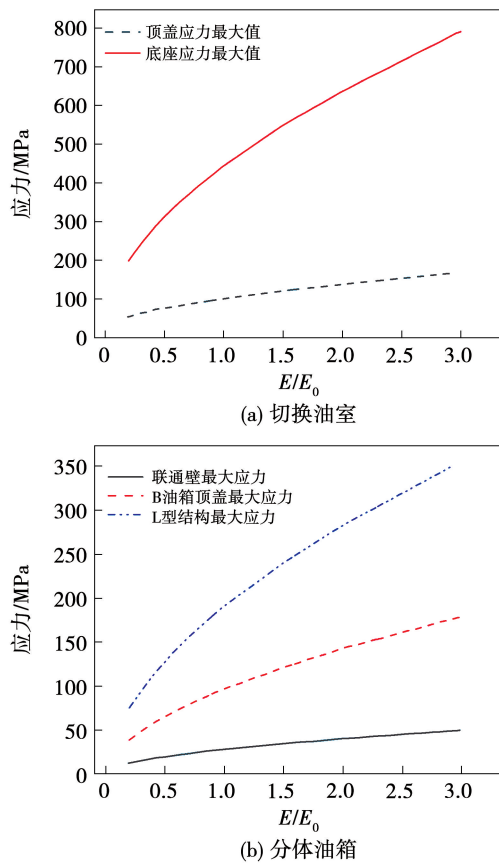


图 7 切换油室和分体油箱应力最大值与故障能量的关系

Fig. 7 Relationship between the maximum stress in switching oil chamber and the split oil tank and fault energy

由应力特性可知,分体式油箱结构薄弱环节出现在油室底座和 L 形结构,并且随着故障能量增大,油室底座和 L 形结构的应力最终超出了材料的耐受强度,具有形变和破裂的风险。

2.2 电弧故障位置的影响

保持故障源的能量输入为 E_0 , 分别将故障源设置在油室内距离油室底部 280、630、1 280 mm 处, 对应触头的中下部、中部和中上部, 对比研究故障位置对压力产生特性的影响。

电弧故障位置的改变主要影响油室结构的形变和振动, 进而影响分体油箱的内部压强。如图 8 所示为不同故障位置下 A、B 油箱内部的压强变化曲线。由图 8 可知, 当故障源位于油室下部时, A 油箱和 B 油箱的压强峰值最高, 分别约为 48 kPa 和

104 kPa, 相比于故障源位于油室中上部的情况分别升高约 14% 和 52%。由对比结果可知, 当故障源位于远离泄压阀出口位置时产生的压强峰值较高, 在此类位置发生电弧故障时对切换油室和分体油箱结构的破坏力也更大。

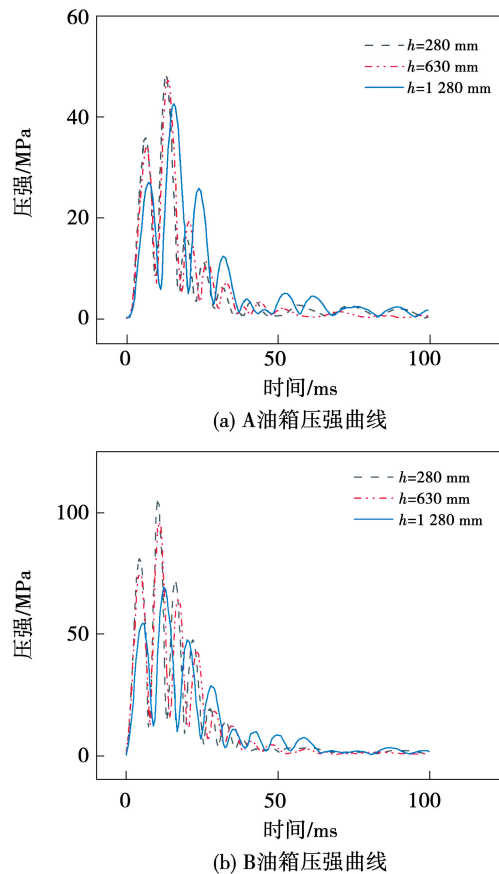


图 8 故障源位于不同位置时分体油箱内部的压强曲线

Fig. 8 Pressure curves inside split oil tank when fault source is located at different positions

电弧故障发生的位置改变时, 压力波对结构的冲击作用将出现差异, 图 9 为故障源在不同位置时应力集中结构产生的最大应力。从中可以看出在不同故障位置下, 应力集中最严重的部位仍出现于油室底座和 L 形结构, 与前文结论一致。并且, 通常故障发生于油室中上部 (靠近泄压阀) 时产生的结构应力较小, 当故障位置位于远离泄压阀出口的位置时, 故障应力将升高 10% ~ 30%。

根据仿真结果, 对于实际的组合型 OLTC, 应在设计时将切换电极置于油室中上部以降低电弧故障对各结构的冲击损伤。

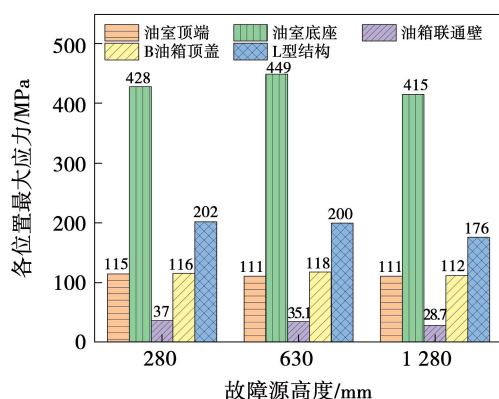


图9 故障源在不同位置时各结构产生的最大应力

Fig. 9 Maximum stress generated in each structure when the fault source is located at different positions

2.3 极端电弧故障下关键结构可靠性分析

由上述研究可知,电弧故障发生在油室内部时,引线套管并不会出现明显的应力集中情况,然而考虑到其电气结构的特殊性,有必要对其可靠性进行进一步验证。因此,保持故障源的能量输入为 E_0 , 设置故障源于切换油室外的引线套管附近,如图10所示,对电弧故障伴随的压力-应力特性进行了研究。

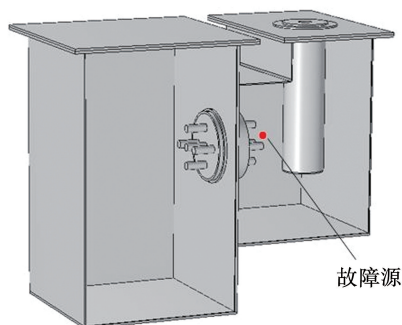


图10 引线套管附近电弧故障源示意图

Fig. 10 Schematic diagram of arc fault source arrangement near lead bushing

计算故障过程中A、B油室内部的平均压强,得到其变化曲线图如图11所示。可见在大多数情况下,B油箱的压强水平仍高于A油箱,这再次验证了分体式油箱对主油箱保护作用的有效性。对于B油箱来说,油箱内部的压强在燃弧后迅速升高,直至25 ms左右达到峰值并缓慢下降,最终在80 ms左右进入下一个波动周期。对比故障源位于油室内部的情况而言,压强的波动变慢,这将导致B油箱

结构较长时间承受高幅值压强的作用。

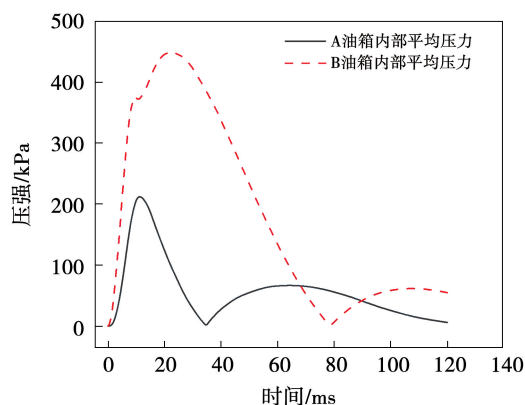
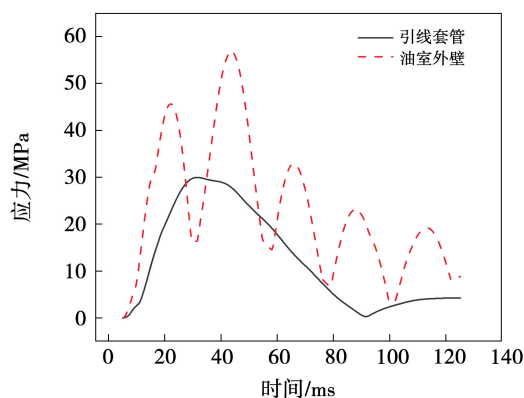


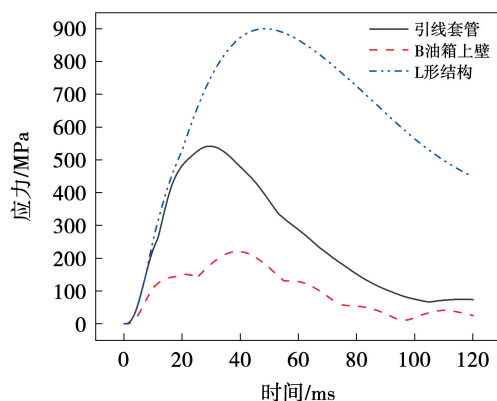
图11 故障源位于引线套管附近时分体油箱压强曲线

Fig. 11 Pressure curve of separate oil tank when the fault source is located near the lead bushing

该情况下的电弧故障过程中,除重点关注的引线套管外,整体油箱结构的最大应力集中在A、B油箱联通壁、B油箱上盖板、L形结构以及油室外壁。各结构最大应力随时间的变化关系如图12所示。



(a) 引线套管与油室外壁



(b) 油箱关键结构

图12 关键结构体最大应力随时间变化关系

Fig. 12 Time-varying relationship of maximum stress

由图 12(a) 可知引线套管的最大应力大约在 30 MPa 左右, 而油室外壁的最大应力达到了约 60 MPa, 对于环氧树脂材料 50 ~ 100 MPa 的应力极限而言, 基本可以认为引线套管是可靠的, 而油室外壁将存在一定的形变风险。

由图 12(b) 可知, B 油箱上壁最大应力约为 200 MPa, 略低于结构钢材料的屈服强度; 而 A、B 油箱联通壁以及 L 形结构的最大应力分别约为 550 MPa 和 900 MPa, 远远超过结构钢屈服强度, 具有局部开裂的风险。

2.4 油室及分体油箱结构优化设计

对包含极端情况在内的各种电弧故障下分体式油箱结构可靠性进行了分析, 验证了关键隔离结构-引线套管的可靠性。同时, 在 OLTC 切换油室底座及分体式油箱部分组件处仍存在结构弱点, 需要对关键结构进行冲压优化设计。

油室自身为桶式结构, 电弧故障产生的压力波倾向于向两端汇聚, 在油室顶盖以及底座区域产生应力集中。油室顶盖由于配置有压力释放阀, 能够及时泄放压力; 而对于油室底座而言, 压力难以及时得到释放, 将产生极高的应力, 易发生破裂。对油室底座进行冲压优化设计, 在设计二维回转模型时, 通过降低大曲率点的曲率, 减少了油室底座的几何突变, 示意图如图 13 所示。

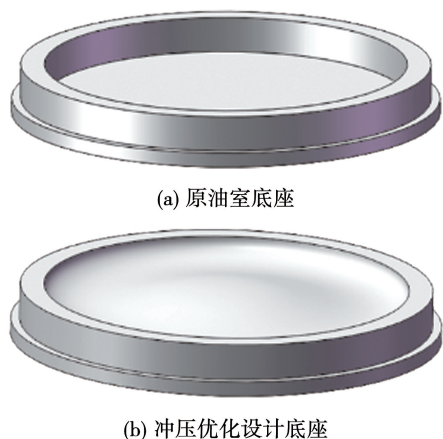


图 13 油室底座冲压结构优化设计示意图

Fig. 13 Schematic diagram of structural optimization design for the oil chamber base

分别对优化前后的油室底座在相同条件燃弧过程中所承受的应力进行分析, 得到其最大应力随时间变化曲线如图 14 所示。可以看到, 经冲压优化

后, 油室底座的应力最大值由约 441 MPa 降至约 220 MPa, 降低约 50%。

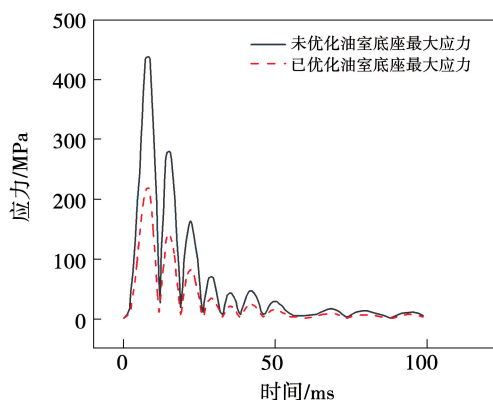


图 14 原油室底座与冲压油室底座的最大应力

Fig. 14 Maximum stress of original oil chamber base and stamped oil chamber base

图 15 展示了最大应力时刻优化前后油室底座的应力分布云图。可见在经过冲压优化后, 底座应力分布趋于均匀, 应力幅值明显降低, 应力弱点基本消除, 如图 15(b) 所示。

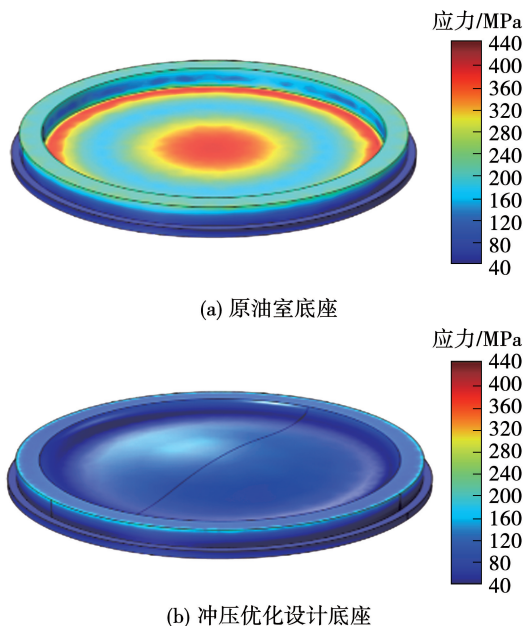


图 15 原油室与优化后油室底座的应力分布云图

Fig. 15 Stress distribution contour map of original oil chamber base and the optimized oil chamber base

当 OLTC 油室底座破裂或电弧故障发生于油室外部时, 分体油箱内压力将显著升高, 对各机械组件造成较大的威胁。对油箱结构进行优化设计: 将切

换油室所在的 B 油箱外壁优化为圆弧形结构,以增强其吸收压力波动能的能力、有效消除应力弱点;同时在 A、B 油箱间设计加强筋加固联通结构,增强分体式油箱关键连接部位的可靠性。优化设计示意图如图 16 所示。

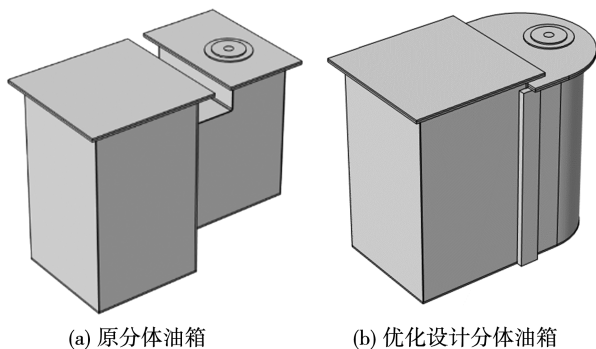


图 16 分体油箱结构优化设计示意图

Fig. 16 Schematic diagram of structural optimization design for split oil tank

分别对优化前后的分体油箱在相同条件燃弧过程中的应力最大值进行分析。由图 17 所示,原油箱燃弧过程中应力最高达到 500 MPa,存在较高的破裂或变形风险;而优化后的分体油箱应力水平明显降低,最大应力约 110 MPa,整体结构相对较安全。

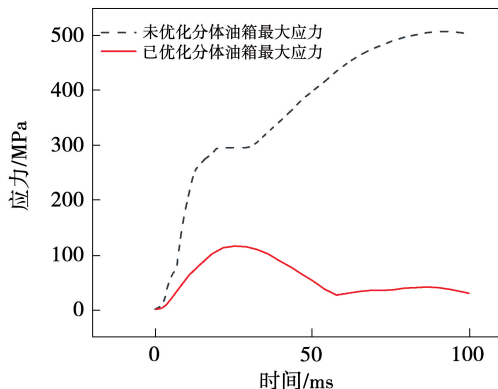


图 17 原分体油箱与优化分体油箱的最大应力

Fig. 17 Maximum stress of original split oil tank and the optimized split oil tank

3 结 论

本文研究了包含极端工况的多工况电弧故障下分体式 OLTC 内部的压力-应力特性,并对分体式 OLTC 做出了结构可靠性分析和结构优化设计,得出以下结论:

1)故障能量的升高将使得峰值压强显著升高,当故障能量由 0.82 MJ 增大至 12.3 MJ,油室底部、中部、顶部的油压分别升高 302%、297%、247%,B 油箱和 A 油箱压强分别升高 324% 和 330%,且油室底座以及油箱连接部位应力升高显著。

2)油室内部压强峰值与故障源位置有关,故障源距离泄压装置(油室顶部)越远,燃弧故障产生的压强峰值越高。当故障源在中下部时,A 油箱和 B 油箱的压强峰值较故障源位于中上部时分别升高约 14% 和 52%,同时分体油箱联通壁和 L 形结构的应力将升高 10%~30%。

3)验证了故障源位于引线套管附近的极端情况下引线套管的可靠性,确认了电弧故障发生时分体式油箱的薄弱结构为 OLTC 油室底座以及分体油箱连通壁等。并对关键结构进行了冲压优化设计,实现了应力分布地明显改善。

参 考 文 献:

- [1] 吉锋,刘军. 有载分接开关的结构和工作原理[J]. 变压器, 1989(2): 30.
JI Feng, LIU Jun. Structure and working principle of on-load tap changers [J]. Transformer, 1989(2): 30.
- [2] 阳瑞霖,莫凡,金艳,等. 基于重心平均动态时间规整算法的有载分接开关机械故障诊断[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1515.
YANG Ruilin, MO Fan, JIN Yan, et al. Diagnosis for mechanical faults of on-load tap changer based on barycenter averaging dynamic time warping [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1515.
- [3] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893.
WANG Shaowu, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6893.
- [4] 张德明. 真空分接开关技术的论述(1) [J]. 变压器, 2011, 48(8): 54.
ZHANG Deming. Discussion on vacuum tap changer technology (1) [J]. Transformer, 2011, 48(8): 54.
- [5] 刘雪丽,李金忠,高飞,等. ± 800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5350.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ± 800 kV direct current convertor transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350.
- [6] DUAN Ruochen, WANG Fenghua. Fault diagnosis of on-load tap-

- changer in converter transformer based on time-frequency vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3815.
- [7] 赵彤, 李庆民, 陈平. OLTC 振动信号特征提取的动力学分析方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 41.
ZHAO Tong, LI Qingmin, CHEN Ping. Dynamic analysis method for feature extraction of mechanical vibration signals of on-load tap changers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 41.
- [8] 段若晨, 王丰华, 周荔丹, 等. 利用窄带噪声辅助多元经验模态分解算法检测换流变压器有载分接开关机械状态[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 182.
DUAN Ruochen, WANG Fenghua, ZHOU Lidan, et al. Mechanical condition detection of on-load tap-changer in converter transformer based on narrowband noise assisted multivariate empirical mode decomposition algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 182.
- [9] 肖日明. 分离式分接开关: CN111900000A[P]. 2020-11-06.
- [10] 熊佳明. 吉瓦—百千安级冲击放电电弧的冲击波超压作用分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [11] ENGEL T, KRISTIANSEN M, KROMPHOLZ H. Expansion of hydrogen arcs driven by oscillating currents[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(5): 959.
- [12] HABIBI M. Study of shock wave and magnetic pressure effects on the rail gap switch surface used at the APF plasma focus device[J]. Journal of Fusion Energy, 2011, 30(2): 133.
- [13] DRABINKA S I. The theory of the development of the channel in the spark discharge[J]. J. Expt. Phys. USSR, 1954, 21: 473.
- [14] SONG Dongdong, MA Jiwei, MA Yuquan, et al. Research on the switching arc loss of on-load tap changer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 180793.
- [15] 贾云飞, 贾双瑞, 罗迅, 等. 变压器内部电弧故障快速检测方法研究与对比[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2158.
JIA Yunfei, JIA Shuangrui, LUO Xun, et al. Research and comparison on rapid detection methods of transformer internal arc fault[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2158.
- [16] 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, 34(1): 179.
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179.
- [17] 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.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 180.
- [18] 李金忠, 汪可, 任家帆, 等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7651.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651.
- [19] 周盟, 罗传仙, 郭家旭, 等. 换流变压器内部电弧故障超压仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(5): 68.
ZHOU Meng, LUO Chuanxian, GUO Jiaxu, et al. Numerical study on overpressure caused by arcing faults inside a converter transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(5): 68.
- [20] 邵宇航, 吕晓露, 李金忠, 等. 电弧故障时分体式有载分接开关结构失效风险仿真研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(7): 129.
SHAO Yuhang, LÜ Xiaolu, LI Jinzhong, et al. Simulation study on the risk of structural failure in separate type on-load tap changers during arc faults[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(7): 129.
- [21] 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.
LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4688.
- [22] 曹隆建. 工频强电流电弧在非密闭充油容器中形成的压力[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(2): 69.
CAO Longjian. On pressure generation in an unsealed oil container by high current[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(2): 69.
- [23] YAN Chenguang, XU Che, LIU Hao, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483.
- [24] MULLER S, BRADY R. Prevention of transformer tank explosion, part 1: experimental tests on large transformers[C]//2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 27-31, 2008, Chicago, USA. 2008: 357.
- [25] TOUYA G, REESS T, PÉCASTAING L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(24): 5236.

(编辑:刘琳琳)