第62卷　第4期:0082-0088
2026年4月16日

高压电器
High Voltage Apparatus

Vol.62,No.4:0082-0088
Apr. 16, 2026

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.009

含压力释放阀升高座应对内部电弧故障的数值模拟研究

邓军[1], 谢志成[1], 关庆罡[2], 陈星[2], 周海滨[1], 付瑶[2],
王宁[2], 郝蕊[3], 徐强[3], 陈健云[3]
（1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，广州　510663；2. 沈阳变压器研究院有限公司，沈阳　110000；
3. 大连理工大学工程抗震研究所，辽宁 大连　116024）

摘要：变压器发生内部电弧放电故障时，如不能有效泄压将导致破坏爆炸，为减少爆炸的隐患和经济损失进行了变压器加装泄压装置数值模拟研究。在变压器升高座模型上，加装了压力释放阀的泄压装置，同时设置了未加装压力释放阀的升高座模型作为对照组，对比分析了泄压装置对变压器升高座抗爆的影响。运用Autodyn软件建立了变压器升高座CEL多物质流固耦合模型，进行爆炸模拟和动力结果分析，得到变压器爆炸动态响应的变形云图和应力云图，通过与试验结果的对比，验证了所建耦合模型的可靠性。在此基础上，通过在变压器升高座内壁上布置测点，得到爆炸动态响应的压强曲线和应力曲线，掌握了内爆过程中封闭装置内壁超压分布情况，进一步揭示内爆规律。结果表明：与未设置泄压装置的仿真结果进行对比分析，增加压力释放阀泄压装置能够安全、可靠的预防变压器超压爆裂损坏，研究结果有助于变压器防爆装置的合理优化设计，避免变压器油箱内部电弧放电真实尺寸模拟试验的复杂性与危险性。

关键词：变压器；升高座；防爆；压力释放阀；数值模拟

Numerical Simulation Study on the Elevated Base with Pressure Relief Device in Response to Internal Arc Faults

DENG Jun[1], XIE Zhicheng[1], GUAN Qinggang[2], CHEN Xing[2], ZHOU Haibin[1], FU Yao[2],
WANG Ning[2], HAO Rui[3], XU Qiang[3], CHEN Jianyun[3]
(1. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Shenyang Transformer Reaearch Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 3. Institute of Seismic Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: In case of internal arc discharge in the transformer, if the pressure can not be effectively released, it will lead to destructive explosition.Therefore, a numerical simulation study on installing pressure relief devices to transformers is conducted to reduce explosion risk and economic losses.A pressure relief device with pressure relief valve is installed on the elevated base model of transformer and, at the same time, the elevated base model without installing pressure relief valve is set as the control group. The influence of pressure relief device on the anti-explosion of transformer elevated base is compared and analyzed. The Autodyn software is used to set up the CEL multi-material fluid-solid coupling model of the transformer elevated base for explosion simulation and dynamic result analysis. The deformation cloud diagram and stress cloud diagram of the explosion dynamic response of transformer are obtained. By comparing with the test results, the reliability of the coupling model is verified through comparison with the test results. On this basis, the pressure curve and stress curve of the explosion dynamic response are obtained by

---

收稿日期：2025-08-10；　修回日期：2025-11-05

arranging the measuring points on the inner wall of the elevated bushing of transformer. The overpressure distribution on the inner wall of the closed device during the implosion process is mastered，and the implosion pattern is revealed further. The results show that compared with the simulation results without setting pressure relief device，installation of pressure relief device with pressure relief valve can safely and reliably prevent overpressure burst damage of transformer. The study results are helpful to the reasonable optimization design of explosion-proof device of transformer and avoid the complexity and danger of the real size simulation test of the arc discharge inside the transformer tank.

Key words: transformer；elevated base；explosion-proof；pressure relief valve；numerical simulation

0　引言

变压器是变电站的核心设备，如果出现故障，可能会引发剧烈爆炸，对人员和设备造成巨大威胁，给社会经济带来严重损失[1-5]。针对由于设备老化，变压器内部绝缘油氧化可能引发的内部故障，变压器通常装设有气体继电器和防爆膜等抗爆措施用于切断故障及释放油箱压力[6-11]，但由于存在反应速度不足等问题，国内外变压器爆炸事故屡有发生。

加拿大魁北克电力管理部门与ABB公司联合调查研究[12]发现变压器油箱盖通过螺栓连接不如焊接耐压，通过增强变压器油箱机械强度来达到提高变压器器箱的最大承压能力；安装有排油注氮装置[13]的变压器在内部发生故障后，该装置能在极短时间内释放高压状态的油、气混合物，降低油箱内部压力，同时通过向故障变压器内部注入氮气来起到冷却和恒压作用，从而避免变压器油箱发生开裂或爆炸；气体继电器[14-15]可根据油气的流速大小来判断变压器内部是否发生故障，及时切除油箱内部故障，从而减少电弧持续时间，但气体继电器动作速度较慢，在变压器发生大能量内部故障时，油箱内部压力急剧上升，在气体继电器动作之前，变压器已经超压破坏。

文中在变压器升高座模型上，加装了压力释放阀的泄压装置，同时设置了未加装压力释放阀的升高座模型作为对照组，对比分析了泄压装置对变压器升高座抗爆的影响。运用Autodyn软件建立了变压器升高座CEL多物质流固耦合模型，得到变压器内部故障后油箱内压力升高变化情况，获得不同时刻下油箱内部压力分布云图及不同位置压强升高曲线，研究结果有助于变压器防爆装置的进一步合理优化设计与应用提供相关参考。

1　原理与方法

1.1　变压器电弧故障原理

变压器内部有大量的绝缘油，当存在由于局部缺陷等造成的内部电弧与绝缘油相接触时，绝缘油受到高温或电弧作用，被汽化裂解，产生大量混合气体，气泡内压强随故障的持续而剧增，导致油箱内部压强的骤升，最后超过变压器油箱承压极限时将导致变压器发生破裂[16-18]。因此，变压器的防爆泄压[19]是值得深入研讨的重要课题。

当变压器发生短路故障时，所产生的电弧能量[20-21]为

$$W_{\mathrm{arc}}=\int_0^{\Delta t} u_{\mathrm{arc}} i_{\mathrm{arc}}\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式(1)中：W_{arc}为电弧能量；Δt为电弧持续时间；u_{arc}为电弧两端电压；i_{arc}为电弧电流。

绝缘油受到高温或电弧作用，被汽化裂解，产生大量混合可燃气体，产气量公式[16]为

$$V_{\mathrm{gas}}=0.44\ln\left(W_{\mathrm{arc}}+5\,474.3\right)-3.8 \tag{2}$$

气泡内压强随故障的持续而剧增，导致油箱内部压强的骤升，过热绝缘油蒸汽内部压强公式为

$$P_{\mathrm{gas}}=(\gamma_{\mathrm{gas}}-1)\rho_{\mathrm{gas}}\mu_{\mathrm{gas}} \tag{3}$$

1.2　压力释放阀

压力释放阀采用弹簧压紧膜盘结构，当变压器内部发生故障时，故障点附近产生大量气体，达到泄压阀开启压力时，变压器油将排出，变压器内部压力迅速降低，泄压阀恢复到正常状态，可重复利用。压力释放阀开启时间不大于2 ms，能够自行恢复，但最大泄放口径小于150 mm[22]。

2　数值模型

文中通过模拟变压器内部不同短路电流下引起的电弧放电，研究故障电弧所产生的压力对变压器模型强度的影响[23-24]。在变压器升高座内壁上布置测点，检测内部筒壁上的压力，分析电弧故障时变压器内油箱压力分布。

2.1　升高座模型

文中所建立的升高座模型见图1，为圆柱形结构，升高座主体、顶部角钢与底部钢管模型采用

Lagrange单元模拟，材料为Q235，标准强度235 MPa，内壁直径为1 500 mm，高度为1 600 mm；装置下部设有安装法兰，用于安装引弧电极，放电位置在法兰中点距离底部水平面高度为500 mm。顶部安装防爆膜和阀门有效口径为ϕ130，开启压力为55 kPa的压力释放阀。Euler单元覆盖整个升高座模型，上部为空气，下部为绝缘油[25−26]，Euler单元随着材料在固定网格中运动，界面不断重新定义。

图1　加装泄压装置的升高座模型

Fig. 1　Model of a elevated base with pressure relief device

2.2　材料模型

所有主体结构件均采用Q235钢制成。弹性范围内的模量为210 GPa。弹性极限为235 MPa，所使用的泊松比是0.3。底部与升高座筒身焊接而成，焊缝单元进行弱化调整来模拟焊缝与母材连接处强度降低的情况。升高座各部位材料力学性能参数见表1。

表1　升高座各部位材料力学性能参数

Table 1　Mechanical properties of materials for all parts of the elevated base

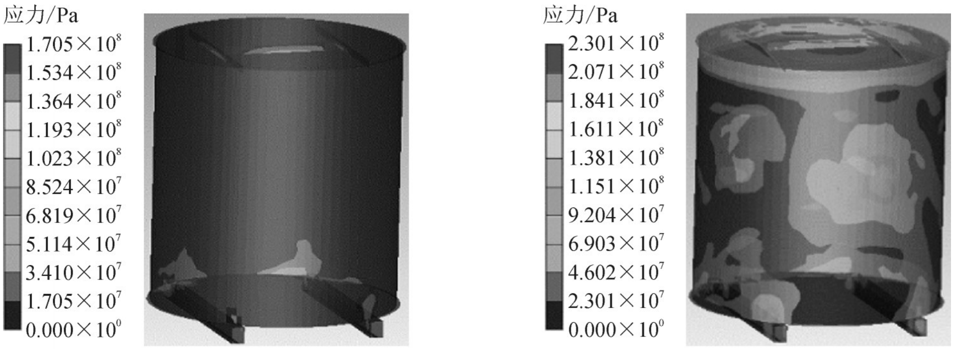
材料参数	升高座筒壁	角钢	钢管	焊缝
弹性模量/GPa	206	206	206	170
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3
密度/(kg·m^{-3})	7 850	7 850	7 850	7 850
切向模量/GPa	80	80	80	68
屈服强度/MPa	235.00	235.00	235.00	199.75

3　数值结果

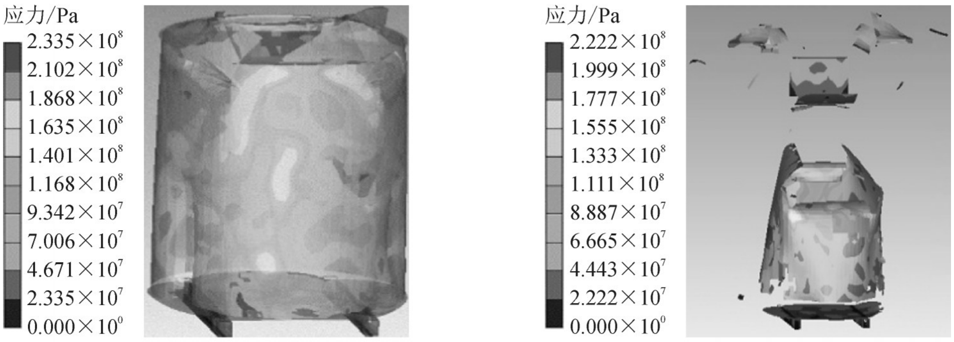
加装泄压装置，能够及时排出故障电弧产生的气体，降低变压器内部压力，成功地阻止电弧故障引起的爆炸事故的发生[27−30]。进行加装泄压装置与未加装泄压装置的结果对比分析，以研究压力释放装置的作用效果和燃爆过程中压力变化。

3.1　未加装泄压阀的升高座数值结果

电弧能量16 MJ情况下，未加装泄压阀升高座整体应力云图变化过程见图2。在电弧能量16 MJ下，模拟电弧放电时间为300 ms。在220 ms时，升高座顶部最先开始破坏，在300 ms电弧放电持时过后，整个结构已经完全破坏，升高座结构整体和焊缝部分应力远大于许用应力。在300 ms电弧放电持时过后变压器升高座结构整体最大变形为6 591 mm，筒身整体与底部焊缝连接处断开。



(a) 100 ms　　(b) 150 ms

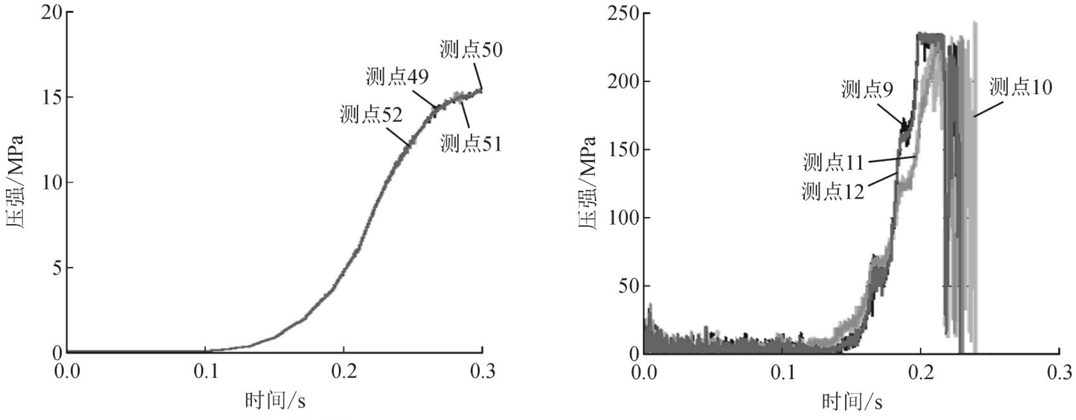


(c) 220 ms　　(d) 250 ms

图2　不同时刻未加装泄压阀升高座整体应力云图

Fig. 2　Overall stress cloud diagram of elevated base without pressure relief valve at different times

升高座顶部圆周测点压强和应力时程曲线见图3，随着电弧持续放电，油箱内部一直产生气体，因而内部压强持续增大。在220 ms时，升高座顶部测点应力骤降，升高座顶部发生破坏。



(a) 压强时程曲线　　(b) 应力时程曲线

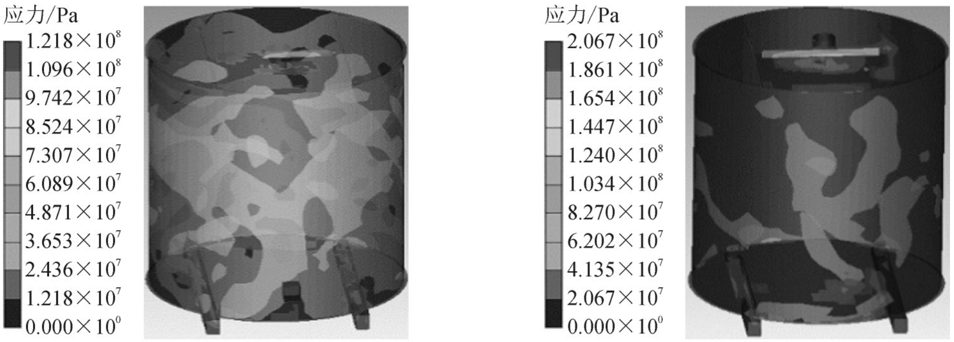
图3　未加装泄压阀升高座顶部圆周测点时程曲线

Fig. 3　Timing curve of the circumferential measurement point at the top of the elevated base without the pressure relief valve

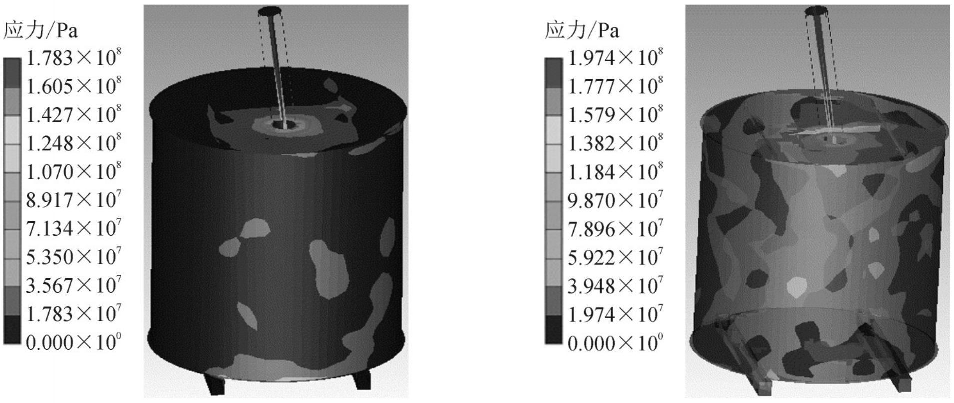
3.2　加装泄压阀的升高座数值结果

电弧能量16 MJ情况下，加装泄压阀升高座整体应力云图变化过程见图4。据设计要求，在升高座顶部加装ϕ130，开启压力为55 kPa的压力释放阀。在0~300 ms持时内加载16 MJ的电弧能量，放电位置不变，模拟其应力应变、压强变化过程。结果表明，结构在电弧能量16 MJ工况下，变压器升高座结构整体最大变形为366.6 mm；升高座结构整体和焊缝部分的应力小于许用应力，说明升高座顶部加装ϕ130，开启压力为55 kPa的压力释放阀在电弧能量16 MJ工况下有一定安全裕度。

升高座顶部圆周测点压强和应力时程曲线见图5，压力释放阀在105 ms动作后，随着电弧持续放电，油箱内部产生的气体从泄压阀排出，内部压强整体趋势不再增大。升高座顶部测点应力也趋于减小，升高座未发生破坏。



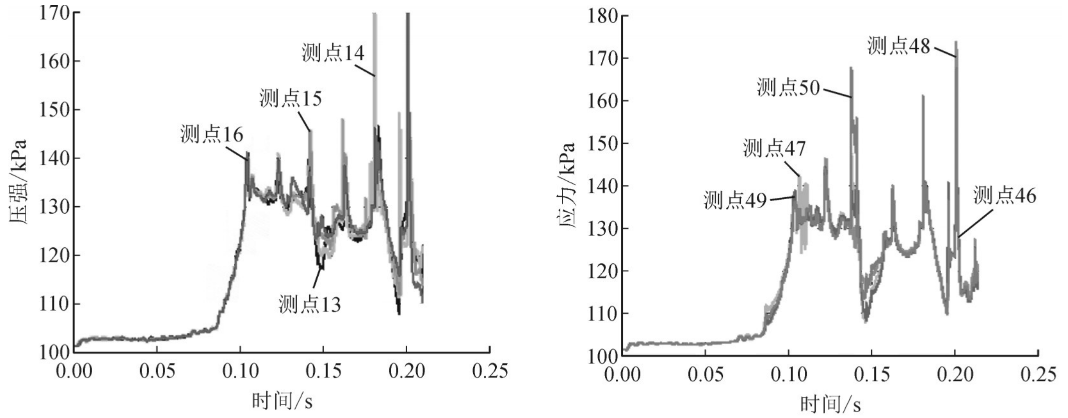
(a) 100 ms　　(b) 150 ms



(c) 220 ms　　(d) 250 ms

图4　不同时刻加装泄压阀升高座整体应力云图

Fig. 4　Overall stress cloud diagram of elevated base with pressure relief valve at different times



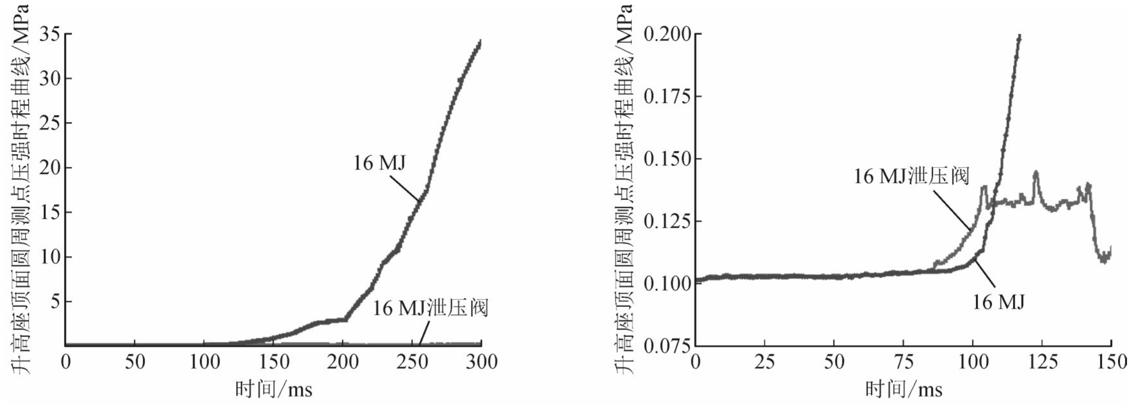
(a) 压强时程曲线 (b) 应力时程曲线

图5 加装泄压阀升高座顶部圆周测点时程曲线

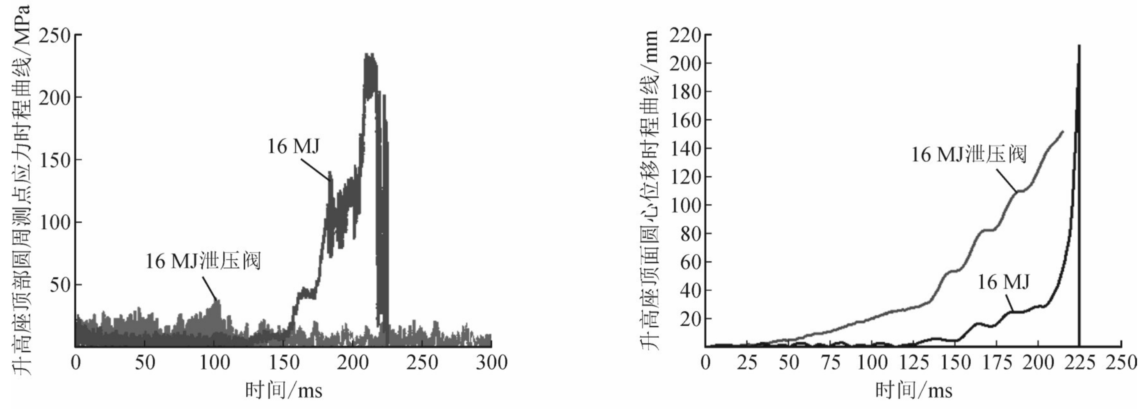
Fig. 5 Timing curve of the circumferential measurement point at the top of the elevated base with a pressure relief valve

3.3 对比分析

16 MJ升高座加装泄压阀与未加装对应的压强、应力与位移时程变化曲线对比情况见图6。在无措施电弧能量16 MJ下，在220 ms时，升高座顶部最先开始破坏，在300 ms电弧放电持时过后，整个结构已经完全破坏，升高座结构整体应力远大于许用应力，升高座结构整体最大变形为6 591 mm。在加装泄压阀的电弧能量16 MJ下，在300 ms电弧放电持时过后，整个结构与焊缝均未破坏，且在105 ms压力释放阀动作后，升高座内部产生的气体从泄压阀排出，测点的压强不再上升，趋于稳定(图6(a)、(b))，且测点的应力的上升趋势有明显的抑制(图6(c))，保证了升高座顶部不破坏。



(a) 0~300 ms顶部圆周测点压强时程曲线 (b) 0~150 ms顶部圆周测点压强时程曲线

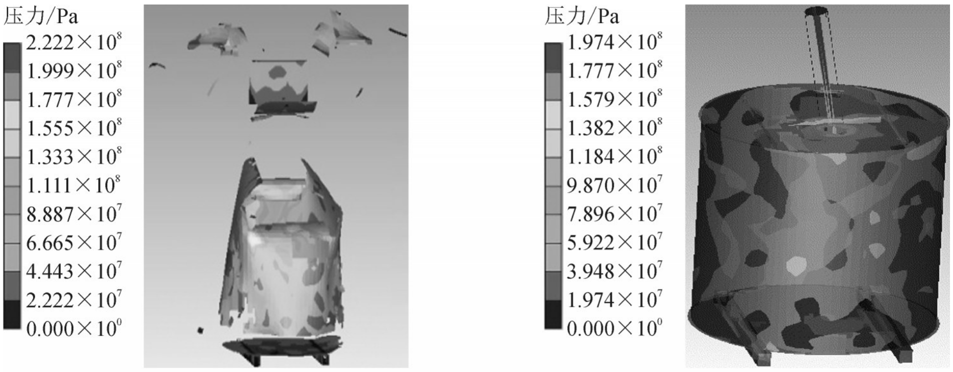


(c) 顶部圆周测点应力时程曲线 (d) 顶部圆心位移时程曲线

图6 16 MJ升高座加装泄压阀与未加装对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of 16 MJ elevated base with and without pressure relief valve

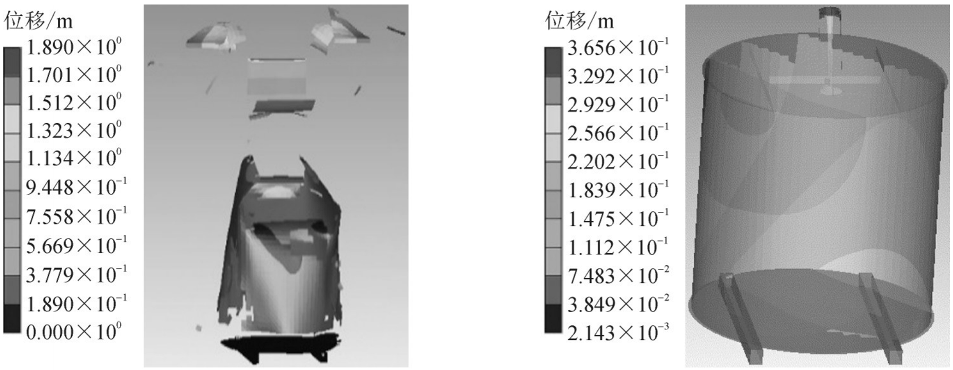
16 MJ升高座未加装泄压阀与加装对应的整体应力云图对比情况见图7，16 MJ升高座未加装泄压阀与加装对应的整体位移云图对比情况见图8。在同一电弧能量和同一时刻下，未加装泄压阀的升高座模型发生大规模破坏，整体位移较大，而加装泄压阀的升高座模型因内部压力得到释放完好无损。



(a) 未加装泄压阀　　(b) 加装泄压阀

图7　电弧能量16 MJ下250 ms升高座整体应力云图

Fig. 7　The overall stress cloud diagram of 250 ms elevated base under arc energy of 16 MJ



(a) 未加装泄压阀　　(b) 加装泄压阀

图8　电弧能量16 MJ下250 ms升高座整体位移云图

Fig. 8　The overall displacement cloud diagram of 250 ms elevated base under arc energy of 16 MJ

对比两种情况下升高座结构主要部件的应力分布与最大位移情况见表2。由表2可得，未加装泄压阀的升高座模型整个结构已经完全破坏，升高座结构整体和焊缝部分应力达到破坏强度，远大于许用应力(升高座为235 MPa，焊缝为199.75 MPa)；加装泄压阀的升高座模型没有破坏，整体位移明显减小，结构整体的应力均小于许用应力。综上所述，加装压力释放阀在升高座顶部能够提升整体的抗爆能力。

表2　升高座主要部件的最大应力与最大位移

Table 2　Maximum stress and displacement of main components of elevated base

项目	未加装泄压阀	加装泄压阀
升高座整体最大位移/mm	6 591.0	366.6
升高座最大正应力/MPa	达到破坏强度	197.40
焊缝最大正应力/MPa	达到破坏强度	71.56

4　结语

文中在变压器升高座模型上，加装了压力释放阀的泄压装置，同时设置了未加装压力释放阀的升高座模型作为对照组，对比分析了泄压装置对变压器升高座抗爆的影响。两个模型中电弧放电时间、故障位置、电弧电流、电弧电压均未改变，区别仅为是否加装泄压装置。泄压装置未开启前，变压器箱体结构未破坏，箱体内部其他结构并未发生明显改变。经过对比分析得到以下结论：根据模拟结果的压强曲线可知，在升高座上安装泄压装置，当模型内部压力达到一定值时，压力释放阀开启使得变压器能够及时排出故障导致的可燃气体，箱体内部的压强不再增大，趋于稳定，避免了结构爆炸的发生。结果初步证明，为避免变压器油箱内部电弧放电真实尺寸模拟试验的复杂性与危险性，运用Autodyn软件建立了变压器CEL多物质流固耦合模

型，可成功完成爆炸模拟和动力结果分析，有助于变压器防爆装置的合理优化设计。

参考文献：

[1] 程 林，周 盟，郭家旭，等.特高压换流变压器压力释放阀布置方式[J]. 电网与清洁能源，2024，40(4)：44-53.
CHENG Lin，ZHOU Meng，GUO Jiaxu，et al.A study on the arrangement of pressure relief devices in UHV converter transformers[J]. Power System and Clean Energy，2024，40(4)：44-53.

[2] 林 鹏，张 森，陈 根，等.电力变压器在线油色谱装置运维检修模式探讨及建议[J]. 变压器，2024，61(1)：58-61.
LIN Peng，ZHANG Sen，CHEN Gen，et al.Discussion and suggestions on operation and maintenance mode of online oil chromatography device for power transformer[J]. Transformer，2024，61(1)：58-61.

[3] 桑 旺，卢 琴，王志同，等.新能效电力变压器的优化策略[J]. 变压器，2024，61(8)：28-32.
SANG Wang，LU Qin，WANG Zhitong，et al.Optimization strategy for new energy efficient power transformers[J]. Transformer，2024，61(8)：28-32.

[4] 梁 栋，朱建华，张 翠，等.变压器状态评估及故障诊断研究综述[J]. 变压器，2024，61(2)：35-43.
LIANG Dong，ZHU Jianhua，ZHANG Cui，et al.Review of transformer condition assessment and fault diagnosis[J]. Transformer，2024，61(2)：35-43.

[5] 杨金鑫，廖才波，胡 雄，等.基于DGA与TPE-LightGBM的变压器故障诊断[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(4)：70-77.
YANG Jinxin，LIAO Caibo，HU Xiong，et al.Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-LightGBM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(4)：70-77.

[6] BARKAN P，DAMSKY B L，ETTLINGER L F，et al.Overpressure phenomena in distribution transformers with low impedance faults：Experiment and theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1976，95(1)：37-48.

[7] 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.
ZHAO Xinyu，YANG Libo，DONG Yifu，et al.Numerical simulation of transformer oil vapor explosion and venting process[J]. Industrial Safety and Environmental Protection，2021，47(8)：31-35.

[8] 周鸿铃，李光茂，李国城，等.油浸式电流互感器膨胀器异常变形的故障分析[J]. 变压器，2024，61(9)：45-49.
ZHOU Hongling，LI Guangmao，LI Guocheng，et al.Fault analysis of abnormal deformation of oil-immersed current transformer expander[J]. Transformer，2024，61(9)：45-49.

[9] 马宏明，金 硕，程志万，等. 一起高压开关用防爆膜异常原因分析及处理[J]. 高压电器，2021，57(11)：232-236.
MA Hongming，JIN Shuo，CHENG Zhiwan，et al. Analysis and treatment on abnormality of rupture disc for high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(11)：232-236.

[10] 姜 岚，陈云桥，王 爽，等.基于实际气体模型的油浸式变压器爆炸应力分布研究[J]. 变压器，2024，61(1)：29-34.
JIANG Lan，CHEN Yunqiao，WANG Shuang，et al.Study on stress distribution of oil-immersed transformer explosion based on actual gas model[J]. Transformer，2024，61(1)：29-34.

[11] 冯玉辉，高 超.一种新型智能气体继电器的开发研制[J]. 变压器，2025，62(2)：15-20.
FENG Yuhui，GAO Chao.Development and research of new type of intelligent gas relay[J]. Transformer，2025，62(2)：15-20.

[12] ABI-SAMRA N，ARTEAGA J，DAROVNY B，et al.Power transformer tank rupture and mitigation-a summary of current state of practice and knowledge by the task force of IEEE power transformer subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2009，24(4)：1959-1967.

[13] 谭文强，宋 宇. 排油注氮装置停电功能检测方法研究[J]. 光源与照明，2021(1)：88-89.
TAN Wenqiang，SONG Yu.Research on power failure function detection method of oil discharge and nitrogen injection device[J]. Lamps and Lighting，2021(1)：88-89.

[14] 卢音赐. 电力变压器继电保护配置及常见故障分析[J]. 大众用电，2021(11)：57-58.
LU Yinci.Relay protection configuration and common fault analysis of power transformer[J]. Popular Utilization of Electricity，2021(11)：57-58.

[15] 龚 立，阮仁俊，陈昊宇，等. 电力变压器防爆技术与减压措施研究[J]. 变压器，2012，49(4)：43-47.
GONG Li，RUAN Renjun，CHEN Haoyu，et al.Research on power transformer explosion-proof technologies and pressure mitigation measures[J]. Transformer，2012，49(4)：43-47.

[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)：179-185.
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)：179-185.

[17] 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.
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)：4688-4697.

[18] DASTOUS J B，LANTEIGNE J，FOATA M. Numerical method for the investigation of fault containment and tank rupture of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2010，25(3)：1657-1665.

[19] FOATA M，IORDANESCU M，HARDY C.Computational methods for the analysis of explosions in oil-insulated electrical equipment[J]. IEEE Transactions on Power Systems，1988，3(1)：286-293.

[20] DASTOUS J B，FOATA M.Analysis of faults in distribution transformers with MSC/PISCES-2DELK[C]//MSC World Users' Conference.Los Angeles，USA：MSC Software，1991：1-13.

[21] YAN Chenguang，HAO Zhiguo，ZHANG Song，et al.Numerical methods for the analysis of power transformer tank deformation and rupture due to internal arcing faults[J]. PLOS One，2015，10(7)：e0133851.

(下转第97页)

[12] 张美蓉. ZnO压敏陶瓷老化机理的研究[D]. 西安：西安交通大学，1991.
ZHANG Meirong.Study on aging mechanism of ZnO varistor ceramics[D]. Xi'an：Xi'an Jiaotong University，1991.

[13] 吕庆敖，王维刚，邢彦昌，等. 电磁轨道炮铁磁材料对铜带内电流分布的影响[J]. 强激光与粒子束，2015，27(10)：268-271.
LYU Qing'ao，WANG Weigang，XING Yanchang，et al.Effect of ferromagnetism material on current distribution in copper strips for electromagnetic railguns[J]. High Power Laser and Particle Beams，2015，27(10)：268-271.

[14] 王建庆，秦立荣，关士辉，等. 油田电网氧化锌避雷器应用及运行寿命的预判[J]. 油气田地面工程，2010，29(12)：67-69.
WANG Jianqing，QIN Lirong，GUAN Shihui，et al.Application of zinc oxide arrester in oilfield power network and its prejudgment of operation life[J]. Oil-gasfield Surface Engineering，2010，29(12)：67-69.

[15] WARYCHA J，MIELCAREK W，LESIUK G.On the relationship between modification of Bi_2O_3 by Sb and type of grain boundaries in ZnO-based varistors[J]. Engineering Failure Analysis，2021(122)：105251.

[16] LEI Ming，LI Shengtao，JIAO Xiaodong，et al. The influence of CeO_2 on the microstructure and electrical behaviour of ZnO-Bi_2O_3 based varistors[J]. Journal of Physics D：Applied Physics，2004，37(5)：804-812.

[17] BARSOUM M W，ELKIND A，FADEL A S.Low breakdown voltage varistors by grain boundary diffusion of molten Bi_2O_3 in ZnO[J]. Journal of the American Ceramic Society，1996，79(4)：962-966.

[18] LI Keyan，XUE Dongfeng.Estimation of electronegativity values of elements in different valence states[J]. Journal of Physical Chemistry A，2006，110(39)：11332-11337.

[19] LENGAUER M，RUBEŠA D，DANZER R.Finite element modelling of the electrical impulse induced fracture of a high voltage varistor[J]. Journal of the European Ceramic Society，2000，20(8)：1017-1021.

[20] 李盛涛，刘辅宜，宋晓兰，等. 关于氧化锌非欧姆陶瓷老化机理的新见解[J]. 中国电机工程学报，1993，13(s1)：43-47.
LI Shengtao，LIU Fuyi，SONG Xiaolan，et al. New idea of degradation mechanism of ZnO nonohmic ceramics[J]. Proceedings of the CSEE，1993，13(s1)：43-47.

[21] 张树高，季幼章. 氧化锌压敏电阻的老化机理[J]. 功能材料，1993(6)：529-532.
ZHANG Shugao，JI Youzhang.Degradation mechanism of ZnO varistors[J]. Journal of Functional Materials，1993(6)：529-532.

[22] MARKUS L，DOMAGOJ R，ROBERT D.Finite element modelling of the electrical impulse induced fracture[J]. Journal of the European Ceramic Society，2000，20(8)：1017-1021.

[23] 王博闻，蒋正龙，陆佳政，等. 500 kV防冰防雷复合绝缘子防雷特性仿真研究[J]. 电网技术，2017，41(7)：2393-2400.
WANG Bowen，JIANG Zhenglong，LU Jiazheng，et al.Simulation study of lightning protection performance of 500 kV anti-icing and anti-thunder composite insulator[J]. Power System Technology，2017，41(7)：2393-2400.

王博闻(1989—)，男，博士研究生，高级工程师，主要从事高电压技术、电网防灾减灾、高性能非线性电阻及避雷器等研究(通信作者)(E-mail：764819403@qq.com)。

(上接第88页)

[22] 陈梁远，黎大健，赵　坚. 变压器防爆保护系统泄压装置研究[J]. 广西电力，2015，38(2)：51-52.
CHEN Liangyuan，LI Dajian，ZHAO Jian.Research on a pressure-relieving equipment of transformer explosion proof protection system[J]. Guangxi Electric Power，2015，38(2)：51-52，79.

[23] DASTOUS J B，TASCHLER E，BÉLANGER S，et al.A comparison of numerical methods for modeling overpressure effects from low impedance faults in power transformers[J]. Procedia Engineering，2017(202)：202-223.

[24] BRODEUR S，LÊ V，CHAMPLIAUD H.A nonlinear finite-element analysis tool to prevent rupture of power transformer tank[J]. Sustainability，2021，13(3)：su13031048.

[25] DASTOUS J B，FOATA M，HAMEL A.Estimating overpressures in pole-type distribution transformers. II. prediction tools[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2003，18(1)：120-127.

[26] FOATA M，DASTOUS J B. Power transformer tank rupture prevention[R]. France：CIGRE，2010.

[27] 戴缘生，周谷亮，芮　颖，等. 电力变压器用压力释放阀动作特性及现场校验的探讨[J]. 变压器，2014，51(2)：58-61.
DAI Yuansheng，ZHOU Guliang，RUI Ying，et al.Discussion on action characteristic and on-site check of pressure relief device for power transformer[J]. Transformer，2014，51(2)：58-61.

[28] 姜宏志. 大型变压器压力释放阀布置的研究[J]. 变压器，1997(7)：17-19.
JIANG Hongzhi.Study on pressure relief valve arrangement for large transformers[J]. Transformer，1997(7)：17-19.

[29] 郭正位，刘湘莅，郭新菊，等. 油浸式变电站主变压室泄压面积研究[J]. 消防科学与技术，2015，34(3)：303-306.
GUO Zhengwei，LIU Xiangli，GUO Xinju，et al.Research on the area of pressure release of oil-immersed transformer rooms of substations[J]. Fire Science and Technology，2015，34(3)：303-306.

[30] 马宏明，杨明昆，程志万. 高压开关用防爆膜选型及运维探讨[J]. 云南电力技术，2020，48(s1)：98-99.
MA Hongming，YANG Mingkun，CHENG Zhiwan.Selection，operation and maintenance of explosion-proof film for high voltage switch[J]. Yunnan Electric Power，2020，48(s1)：98-99.

邓　军(1985—)，男，博士研究生，正高级工程师，主要研究方向为电工装备智能检测与诊断技术(E-mail：165284950@qq.com)。

王　宁(1983—)，女，硕士，高级工程师，从事变压器高电压试验技术的研究工作(通信作者)(E-mail：wangning@stri.com.cn)。