

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.06.007

12 kV 真空灭弧室绝缘结构电场分析及优化设计

戴冬云, 刘书泉, 游一民, 彭振搏, 习环宇

(厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 由于12 kV真空灭弧室工频电压老炼试验时,瓷壳内部出现局部击穿现象,需要对其内部结构进行研究,寻找一种改善灭弧室内部电位分布的绝缘优化方案。文中根据真空灭弧室的实际尺寸建立了三维电场计算模型,采用有限元计算得到了各部分的电场分布。对真空灭弧室的动静触头和屏蔽罩的绝缘强度进行了分析,根据其计算结果,对触头片边缘圆角、半径及其开槽宽度进行了优化,并对屏蔽罩的构造进行了改进,基于该优化方案进行电场分析,最后优化后的样机通过了工频电压老炼试验验证。

关键词: 12 kV真空灭弧室; 电压老炼; 电场仿真; 绝缘试验

Electric Field Analysis and Optimization Design of Insulation Structure of 12 kV Vacuum Interrupter

DAI Dongyun, LIU Shuquan, YOU Yimin, PENG Zhenbo, XI Huanyu

(School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: Due to the local breakdown phenomenon inside the porcelain shell during the power frequency voltage burn-in test of 12 kV vacuum interrupter, it is necessary to study its internal structure to find an insulation optimization solution to improve the internal potential distribution of the interrupter. In this paper, a three-dimensional electric field calculation model is set up based on the actual size of the vacuum interrupter, and the electric field distribution of each part is obtained by finite element calculation. The insulation strength of the moving and stationary contacts as well as the shield of the vacuum interrupter is analyzed. According to the calculation results, the edge fillet, radius and slot width of the contact piece are optimized and the structure of the shield is improved. The electric field analysis is performed on the basis of the optimization scheme. Finally, the optimized prototype passed the power frequency voltage burn-in test verification.

Key words: 12 kV vacuum interrupter; voltage aging; electric field simulation; insulation test

0 引言

真空灭弧室以其优良的绝缘性能在中国已得到广泛应用,特别是在中高压领域,由于SF₆作为温室效应气体已被限制使用,真空灭弧室正在逐步取代SF₆灭弧室^[1-4]。真空与其他绝缘介质相比,具有优越的绝缘性能,但是由于灭弧室触头表面的洁净度、微观的平整度、表面微粒的存在等因素,使其绝缘具有不稳定性^[5-6]。

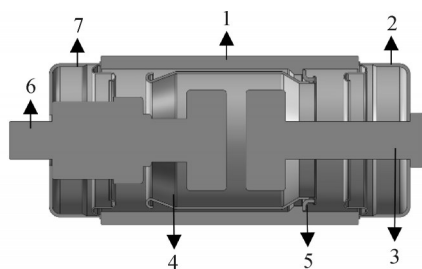
为了提高真空灭弧室的绝缘性能,在生产中需要对其进行“老炼”处理,老炼是否彻底将直接关系到真空灭弧室弧后的动态介质恢复,因此如何通过老炼试验进一步提升触头间的绝缘水平十分重要。电压老炼利用放电的方式,除去触头表面残留气体、杂质和加工毛刺,“钝化”电极表面。经过老炼后,极大改善了触头的表面状态,使触头表面的击穿电压逐渐提高,大大增强灭弧室的绝缘性能^[7]。

在生产中,为了提高灭弧室的绝缘水平,经常会出现过度老炼的情况,老炼所加电压过高,触头

表面残留的杂质喷溅到瓷壳表面, 瓷壳局部击穿, 无法通过 12 kV 真空灭弧室冲击耐压水平试验^[8-11]。文中运用 Ansys 软件对真空灭弧室进行电场仿真分析, 采用有限元分析方法对模型进行求解, 得到灭弧室内各部分的电场分布, 提出了优化方案并进行电场分析^[12-16], 优化后的样机通过了电压老炼试验验证。

1 真空灭弧室结构

真空灭弧室三维结构见图 1。其主要由绝缘外壳、屏蔽罩、动静触头、动静导杆、支撑盘以及波纹管组成, 灭弧室外壳材料为陶瓷。真空灭弧室内电场的大小及其分布是否均匀都会影响其绝缘强度, 触头表面电场分布不均匀, 将会导致触头间隙电场能量集中, 触头间不断发生场致发射, 最后导致间隙击穿^[17-19]。当真空灭弧室开断电流时, 电弧放出的金属蒸汽在电弧电流过零时会迅速扩散, 遇到触头或屏蔽罩表面会立即凝结。因此, 触头片结构和屏蔽罩的合理设计对真空灭弧室的绝缘性能至关重要^[20-25]。



1—绝缘外壳; 2—动端罩; 3—动触头; 4—屏蔽罩; 5—连接环;
6—静触头; 7—静端罩。

图1 真空灭弧室结构

Fig. 1 Structure of vacuum interrupter

2 电场参数设置

2.1 电场仿真边界条件

根据《GB/T 11022—2020 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》, 12 kV 真空灭弧室需达到的绝缘水平见表 1。在仿真时, 在真空灭弧室周围建立空气域, 在空气域内进行精细化网格剖分。真空灭弧室的静端触头为高电位, 取其峰值电压为高电位电压, 动端触头接地, 屏蔽罩为悬浮电位, 无限远边界为零电位。计算所涉及到的材料介电常数见表 2。

2.2 计算求解

在进行网格剖分时, 采取分区域剖分, 对每一部件进行精细化的四面体网格剖分, 整体计算区域剖分产生的四面体网格数为 2 946 070。整个模型

表1 12 kV 真空灭弧室的额定绝缘水平

Table 1 Insulation level of 12 kV vacuum interrupter

额定绝缘水平	相对地	灭弧室断口
工频耐受电压 (有效值)/kV	42	48
雷电冲击耐受电压 (峰值)/kV	75	85

表2 常用材料介电常数

Table 2 Dielectric properties of the materials involved

材料	空气	真空	瓷壳
相对介电常数	1.0	1.0	6.0

的单元多, 求解计算量大, 采用基于有限元法的 Ansys Workbench 软件进行计算。

3 仿真结果与分析

优化前真空灭弧室整体电场与电位分布见图 2。从图 2 中看出: 灭弧室整体场强最大值出现在触头表面; 动端触头表面场强最大值为 2.09×10^7 V/m; 静端触头表面场强最大值为 2.06×10^7 V/m; 屏蔽罩场强最大值位于靠近静触头端部, 最大值为 1.8×10^7 V/m。

单位: V/m

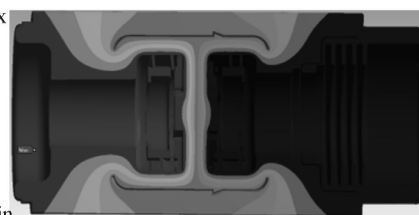
2.0978×10^7 max
 1.7319×10^7
 1.3659×10^7
 1.0000×10^7
 8.3333×10^6
 6.6667×10^6
 5.0000×10^6
 3.3333×10^6
 1.6667×10^6
 4.7413×10^{-24} min



(a) 电场分布

单位: mV

6.7872×10^7 max
 6.0331×10^7
 5.2789×10^7
 4.5248×10^7
 3.7707×10^7
 3.0165×10^7
 2.2624×10^7
 1.5083×10^7
 7.5413×10^6
 -7.5673×10^{-19} min



(b) 电位分布

图2 真空灭弧室电场与电位分布

Fig. 2 Electric field and potential distribution of vacuum interrupter

触头表面电场分布见图 3。其最大值出现在触头片开槽尖端, 触头片边缘场强最大达 1.55×10^7 V/m。触头片槽尖端场强过大, 将导致间隙电场能量集中, 触头间不断发生场致发射, 最后导致间隙击穿。因此, 需要对动静触头片进行优化。动触头场强最大点图见图 4。

3.1 触头片边缘圆角对电场分布的影响

原触头片圆角为 1 mm, 分别对其进行 1.5、

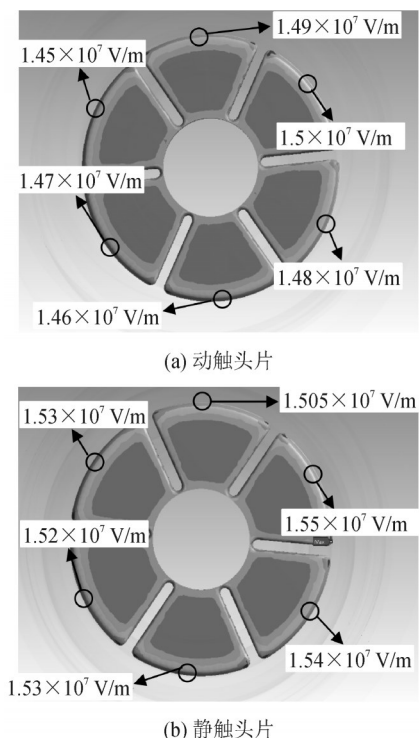


图3 触头片表面电场分布

Fig. 3 Electric field distribution on the surface of the contact piece

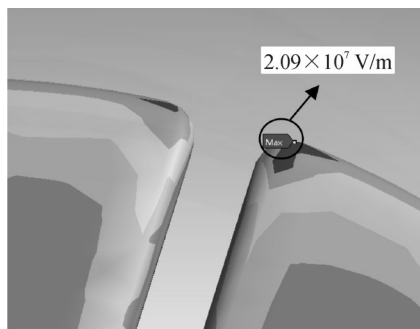


图4 动触头场强最大点

Fig. 4 The maximum field strength of the moving contact

2 mm 圆角改进, 2 mm 圆角时触头结构见图5。仿真后发现: 触头片边缘2 mm 圆角时优化效果最佳, 动端场强最大值为 1.81×10^7 V/m, 出现在开槽尖端, 相比改进前减小了约 13.8%; 静端场强最大值为 1.87×10^7 V/m, 出现在开槽尖端, 相比改进前减小了约 9.5%; 动静触头片边缘场强在 1.2×10^7 V/m 左右, 相比改进前减小了约 20%。

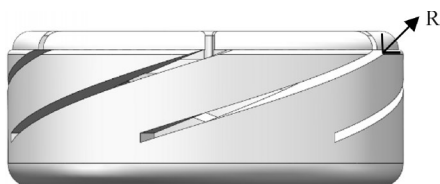


图5 2 mm 圆角触头结构

Fig. 5 2 mm rounded contact structure

说明不同的触头片边缘圆角半径对触头片边

缘场强影响较大, 增大半径有助于触头表面电场优化。但只改变边缘圆角不足以优化灭弧室的整体电场分布, 文中后续将在 2 mm 边缘圆角基础上做进一步改进。

3.2 触头片开槽直径对电场分布的影响

基于上述改进后, 改变触头片开槽宽度分别为 0.8、1、1.2、1.5、1.8 mm, 触头片结构见图6。对触头片网格进行局部细化, 分别对 4 组模型进行仿真, 其场强最大值见图7。由图7可知, 随着开槽宽度的不断增大, 触头片表面的最大场强呈增大的趋势, 开槽宽度为 0.8 mm 时, 静触头表面场强最低。见图8, 由于场强最大值出现在触头片内径, 内径与槽之间相距仅 0.5 mm, 触头片极易发生击穿。

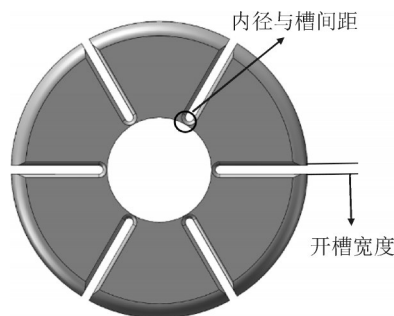
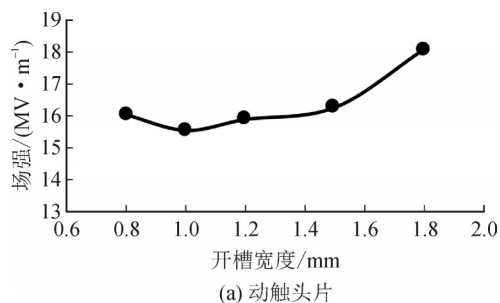
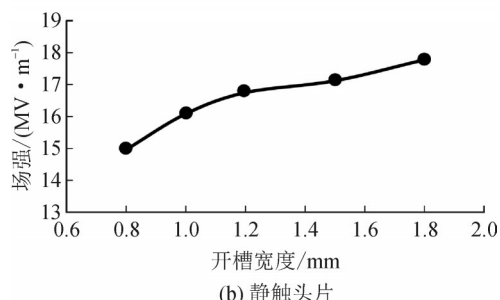


图6 触头片结构模型

Fig. 6 The structural model of the contact plate



(a) 动触头片



(b) 静触头片

图7 不同开槽宽度电场强度最大值

Fig. 7 Maximum electric field intensity under different slotting width

当开槽宽度为 1 mm 时, 动触头片场强最大值为 1.5×10^7 V/m, 静触头片场强最大值为 1.61×10^7 V/m, 都出现在开槽外径尖端, 其边缘场强都为 1.2×10^7 V/m。因此, 在边缘圆角为 2 mm、触头片开槽宽度为 1 mm 时, 其优化效果最好。

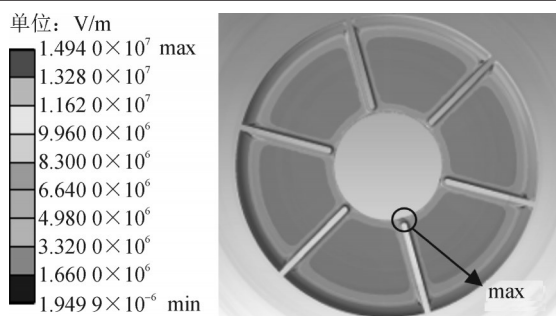


图8 开槽0.8 mm时静触头片表面电场分布

Fig. 8 The electric field distribution on the surface of the static contact piece when slotting 0.8 mm

3.3 触头阶梯化对电场分布的影响

在边缘圆角2 mm、开槽宽度1 mm的情况下,分别减小触头片半径0.5、1 mm,使触头片与触头座“阶梯化”,可以增大其绝缘强度,见图9。当触头片半径减小1 mm时,静触头端部仿真结果见图10,其场强最大值出现在触头座开槽尖端,最大值为 1.68×10^7 V/m;当触头片半径减小0.5 mm时,静端场强最大值出现在触头片开槽尖端,最大值为 1.56×10^7 V/m,动静触头片边缘场强都在 1.2×10^7 V/m左右浮动。

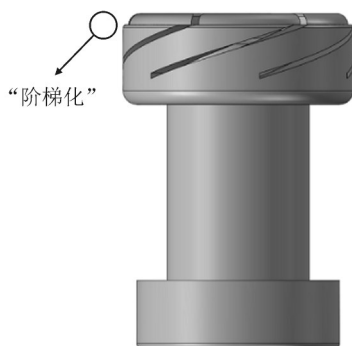


图9 触头片半径减小0.5 mm时触头模型

Fig. 9 Contact model when the radius of the contact piece is reduced by 0.5 mm

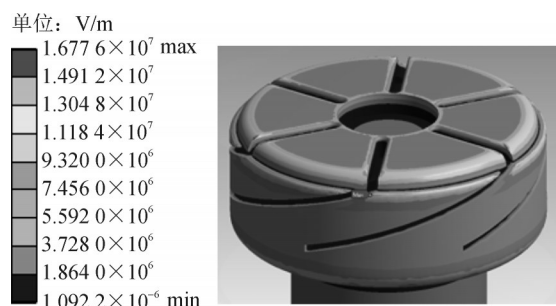


图10 触头片半径减小1 mm时静触头电场分布

Fig. 10 The electric field distribution of the static contact when the radius of the contact piece is reduced by 1 mm

与前述改进对比发现:改变触头片半径可以减小场强最大值的大小及其分布,但触头片边缘场强不会受其影响。

3.4 连接环位置对电场分布的影响

绝缘外壳主要材料为陶瓷,屏蔽罩所用材料为不锈钢,在产品装配中需要用连接环将其熔焊在一起。连接环主要由铜构成,因此连接环的位置也会对灭弧室内部电场有一定影响,优化前后的连接环位置见图11(a)、(b)。当连接环在屏蔽罩端部时,连接环与瓷壳相交边缘场强达 9×10^6 V/m;优化后,连接环在屏蔽罩中心位置,连接环与瓷壳相交边缘场强仅 3×10^5 V/m。

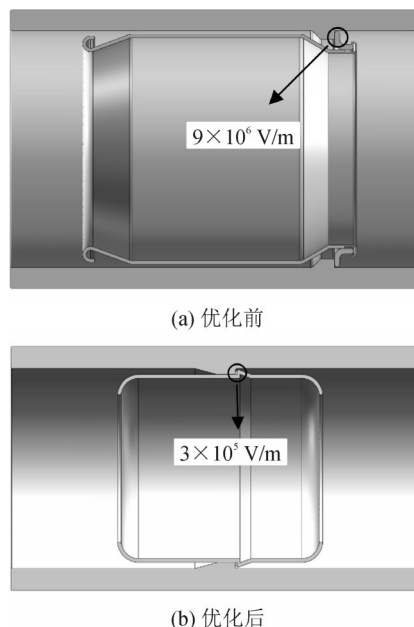


图11 绝缘外壳、屏蔽罩和连接环

Fig. 11 Insulating housing, shielding cover and connecting ring

由此发现:连接环在端部场强过大,瓷壳发生局部击穿的概率增大;将连接环置于屏蔽罩和瓷壳中间,有效降低了瓷壳局部场强。

3.5 优化前后灭弧室内部结构电场对比

根据优化仿真结果,动静端触头表面场强明显下降,瓷壳与屏蔽罩连接环处场强降低。优化前后电场大小见表3。

表3 优化前后真空灭弧室内部结构电场强度最大值对比

Table 3 Comparison of the maximum electric field intensity of the internal structure of the vacuum interrupter before and after optimization

内部结构	$E/(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$		优化前后差值百分比/%
	优化前	优化后	
动触头	2.09×10^7	1.53×10^7	26.7
静触头	2.06×10^7	1.55×10^7	24.4
触头边缘	1.55×10^7	1.24×10^7	19.1
屏蔽罩	1.83×10^7	1.65×10^7	10.0
连接环	0.90×10^7	0.03×10^7	96.7

从表3的分析结果可以看出,对真空灭弧室触头片进行上述优化后,对动静触头电场分布有很大改善,优化后最大电场降低24%以上;触头边缘场强降低19.1%,有效减小了触头击穿概率,提高了真空灭弧室断口间的绝缘水平。针对屏蔽罩的结构进行改进后,瓷壳与屏蔽罩的连接环处场强降低96.7%,屏蔽罩端部场强降低10%,大幅提高了真空灭弧室内部结构的绝缘水平。

4 试验验证

通过对真空灭弧室触头片的优化设计,根据电场仿真结果研制出一批样机。按照《GB/T 11022—2020 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要

求》中对12 kV电压等级开关设备的绝缘要求,对优化后的样机进行工频电压老炼。其中,图12(a)为试验场地,图12(b)为其中一个真空灭弧室。试验结果见图13。

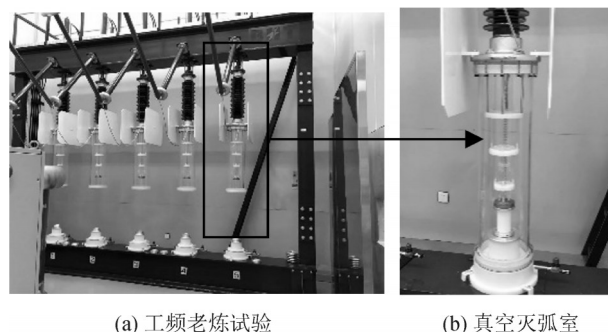


图12 试验场地

Fig. 12 Test site

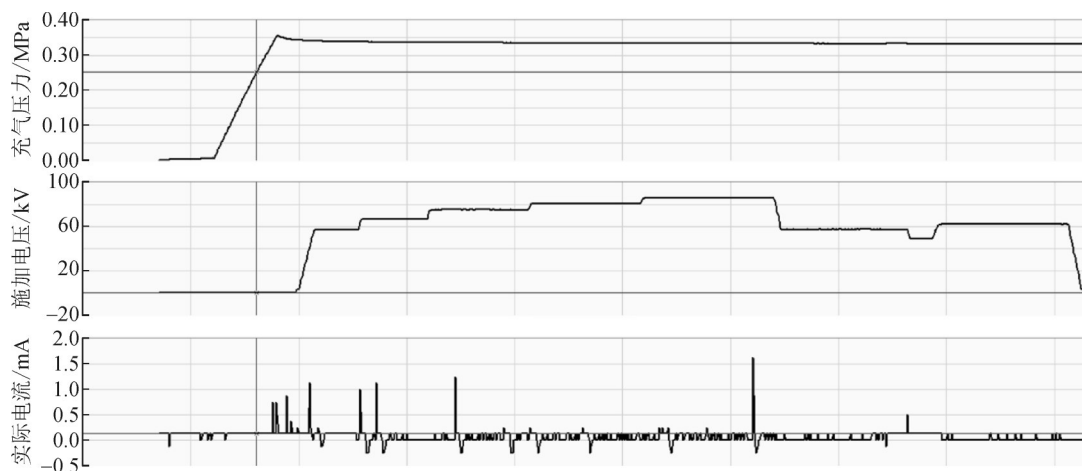


图13 试验结果

Fig. 13 Test results

在老炼试验中,针对12 kV真空灭弧室采取七段加压法,从较低的电压逐步上升到标准规定工频耐压值,稳定时间为1 min,然后再提高工频电压,每个阶段的电压值稳定在设定值。泄漏电流发生后回落到零,且其大小最大不超过2 mA,样机未发生击穿现象,老炼后的实际雷电冲击耐压平均水平约为85 kV。

5 结论

文中采用有限元软件对12 kV真空灭弧室进行电场仿真优化,结论如下:

1)根据原模型电场仿真结果,屏蔽罩端部、屏蔽罩与陶瓷交界处、动静触头片槽尖端是场强集中处,也是真空灭弧室优化改进的关键部位。

2)当触头片边缘圆角2 mm、开槽宽度1 mm、将触头“阶梯化”时,动触头最大场强由 2.09×10^7 V/m降至 1.53×10^7 V/m,降低26.7%;静触头最大场强由

2.06×10^7 V/m降至 1.55×10^7 V/m,降低24.4%;触头边缘最大场强由 1.55×10^7 V/m降至 1.24×10^7 V/m,降低19.1%;瓷壳与屏蔽罩的连接环处场强降低96.7%,屏蔽罩端部场强降低10%。

3)优化后,有效改善了整体电场分布;改善了瓷壳与连接环交界处电场分布,降低了瓷壳击穿概率;根据优化结果:对触头和屏蔽罩电场分布的改进,均提高了真空灭弧室绝缘能力。文中的优化设计方案最终通过雷电冲击耐压水平试验测试,老炼后的实际雷电冲击耐压平均水平约为85 kV。

参考文献:

- [1] 郭黎黎,王平,韩辰光,等. 12 kV氮气绝缘开关柜中真空灭弧室外绝缘结构的电场优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 152-159.
GUO Lili, WANG Ping, HAN Chenguang, et al. Electric field optimization design of vacuum arc extinguishing outdoor insulation structure in 12 kV nitrogen insulated switch-

- gear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 152-159.
- [2] 董盼, 杨鑫, 贾鹏飞, 等. 10 kV 高压开关柜安全性能的提升方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2733-2742.
DONG Pan, YANG Xin, JIA Pengfei, et al. Improve method the safety performance of 10 kV high voltage switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2733-2742.
- [3] 刘韬, 马志瀛. 高压真空灭弧室内部电场分布的影响因素[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 136-139.
LIU Tao, MA Zhiying. Influencing factors of electric field distribution in high-voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 136-139.
- [4] 刘畅, 李仁峰, 李小钊, 等. 老炼后真空灭弧室触头表面击穿位置分布研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 81-86.
LIU Chang, LI Renfeng, LI Xiaozhao, et al. Research on the breakdown position distribution of the contact surface of the vacuum interrupter after aging[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 81-86.
- [5] 赵力楠. 固封极柱真空灭弧室瓷壳长度的优化设计[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 97-100.
ZHAO Linan. Optimum design of the length of the porcelain shell of the vacuum interrupter with a solid-sealed pole[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 97-100.
- [6] LIU Zhiyuan, WANG Jimei, XIU Shixin, et al. Development of high-voltage vacuum circuit breakers in China[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 856-865.
- [7] 李敏, 王南南. 老炼方式对 40.5 kV 真空灭弧室投切背对背电容器组的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 167-171.
LI Min, WANG Nannan. The influence of the aging method on the 40.5 kV vacuum interrupter switching back-to-back capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 167-171.
- [8] 高压开关柜和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards 6.2: Insulation test: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
- [9] 王丽娜, 赵智忠, 郭雪, 等. 72.5 kV 高压真空灭弧室内部电场的优化设计[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 19-23.
WANG Lina, ZHAO Zhizhong, GUO Xue, et al. Optimal design of the electric field inside the 72.5 kV high voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 19-23.
- [10] 邱志斌, 黄道春, 阮江军. 72.5 kV 真空灭弧室电位和电场分布研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 36-42.
QIU Zhibin, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun. Study on the electric potential and electric field distribution of 72.5 kV vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 36-42.
- [11] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 西安: 西安交通大学, 2007.
LIU Qichang. Electrical insulating structure design principle[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 16-22.
- [12] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 62-92.
ZHOU Zecun, SHEN Qigong, FANG Yu, et al. High voltage technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 62-92.
- [13] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 58-78.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 148-172.
- [14] 王文成, 张朋, 李秀峰, 等. 12 kV 真空断路器灭弧室结构对电场分布影响的仿真研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021(11): 1031-1038.
WANG Wencheng, ZHANG Peng, LI Xiufeng, et al. Simulation study on the influence of 12 kV vacuum circuit breaker interrupter structure on electric field distribution[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2021(11): 1031-1038.
- [15] 刘世柏, 李小钊, 薛从军, 等. 24 kV 真空灭弧室内部电场结构优化[J]. 科学技术创新, 2020(32): 20-22.
LIU Shibai, LI Xiaozhao, XUE Congjun, et al. Optimization of the internal electric field structure of the 24 kV vacuum interrupter[J]. Science and Technology Innovation, 2020(32): 20-22.
- [16] 刘庆, 李永林, 沈靖宇, 等. 真空中火花老炼对棒—板电极表面状况的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 79-85.
LIU Qing, LI Yonglin, SHEN Jingyu, et al. The effect of spark aging in vacuum on the surface conditions of rod-plate electrodes[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 79-85.
- [17] 王建华, 耿英三, 刘志远, 等. 高电压等级真空开断技术[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 1-11.
WANG Jianhua, GENG Yingsan, LIU Zhiyuan, et al. High voltage level vacuum switching technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 1-11.
- [18] 毕迎华, 李旭旭, 李元钊, 等. 一种应用于 126 kV 高电压等级真空灭弧室的新型触头结构及其燃弧特性[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 56-63.
BI Yinghua, LI Xuxu, LI Yuanzhao, et al. A new type of contact structure and its arcing characteristics used in 126 kV high-voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 56-63.
- [19] 程显, 李鑫, 葛国伟, 等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 820-828.
CHENG Xian, LI Xin, GE Guowei, et al. Insulation configuration and optimization of integrated self-equalizing vacu-

- um interrupter for series connection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 820-828.
- [20] 卢新强. 动静触头不同间距对真空灭弧室触头杯状电场的影响[J]. 电子制作, 2020(17): 93-94.
- LU Xinqiang. The influence of different distances between moving and static contacts on the cup-shaped electric field of vacuum interrupter contacts[J]. Electronic Manufacturing, 2020(17): 93-94.
- [21] 马 慧, 刘志远, 耿英三, 等. 高电压等级真空灭弧室绝缘设计研究[J]. 真空电子技术, 2019(5): 7-13.
- MA Hui, LIU Zhiyuan, GENG Yingsan, et al. Research on insulation design of high-voltage vacuum interrupter[J]. Vacuum Electronic Technology, 2019(5): 7-13.
- [22] 黄永宁, 余 晓, 樊益平, 等. 363 kV 多断口快速真空断路器电场仿真分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 19-24.
- HUANG Yongning, YU Xiao, FAN Yiping, et al. Electric field simulation analysis of 363 kV multi-break fast vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 19-24.
- [23] 陈鹤冲, 陈轩恕, 杜 玮, 等. 40.5 kV 真空灭弧室内部电场强度分布的仿真分析[J]. 宁夏电力, 2019(3): 52-58.
- CHEN Hechong, CHEN Xuanshu, DU Wei, et al. Simulation analysis of electric field intensity distribution inside 40.5 kV vacuum interrupter[J]. Ningxia Electric Power, 2019(3): 52-58.
- [24] 崔高鹏, 薛明亮, 冯佳伦. 2 000 m 高原型 27.5 kV 铁道单相断路器用真空灭弧室的老炼研究[J]. 真空电子技术, 2019(1): 70-74.
- CUI Gaopeng, XUE Mingliang, FENG Jialun. Aging research on vacuum interrupter for 27.5 kV railway single-phase circuit breaker of 2 000 m high prototype[J]. Vacuum Electronic Technology, 2019(1): 70-74.
- [25] 薛 峰, 李 敏, 林亮伟, 等. 电流老炼工艺参数对真空灭弧室触头老炼效果的影响[J]. 电器与能效管理技术, 2022(10): 44-47.
- XUE Feng, LI Min, LIN Liangwei, et al. Influence of current conditioning process parameters on contact surface morphology in vacuum interrupter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(10): 44-47.
- 戴冬云(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能配电网系统的研究及智能开关设备的研发(E-mail: dongy82@163.com)。
- 刘书泉(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压开关设备绝缘技术研究(E-mail: shuquan1997@163.com)。

(上接第 49 页)

- LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnecter based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.
- [29] 李 凯, 许洪华, 陈冰冰, 等. GIS 振动机理及固有频率研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(3): 14-18.
- LI Kai, XU Honghua, CHEN Bingbing, et al. Research of vibration mechanism and natural frequency in GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3): 14-18.
- [30] 詹海峰. 基于振声联合分析的 GIS 设备机械故障诊断[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- ZHAN Haifeng. Mechanical fault diagnosis of GIS equipment based on joint analysis of vibration and sound[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- 徐 惠(1993—), 女, 工程师, 主要从事输变电设备检测及监测技术研究(E-mail: 1162246795@qq.com)。