

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.010

10 kV 整只避雷器冲击老化特性研究

王博闻^{1,2}, 陆佳政^{1,2}, 林天煜³, 付志瑶^{1,2}, 龙剑涛^{1,2}, 石鑫^{1,2}

(1. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410129; 2. 国网湖南省电力有限公司防灾减灾中心, 长沙 410129;
3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 金属氧化物避雷器由于优异的非线性特性在输电线路雷击防护方面得到了充分的应用,但雷击电流过大时,避雷器常常由于冲击老化出现故障,甚至炸裂,严重影响电网运行安全。文中基于搭建的冲击大电流试验平台,测试不同电流幅值下整只避雷器的耐受冲击次数以及在冲击老化过程中直流1 mA下的参考电压(U_{1mA})和阻性电流 I_L 的变化规律,表明避雷器的冲击寿命具有临界性并通过电子扫描显微镜(SEM)以及光电子能谱(XPS)的微观表征对其进行机理解释。同时通过基于随机Voronoi网络的电阻片热-力有限元仿真分析以及电阻片釉层加热试验对避雷器在冲击老化过程中的失效形式进行分析:电阻片晶粒出现局部熔融后电阻片温升剧烈上升,由于局部过热使得釉层融化,导致沿面闪络;同时,电阻片局部融化后,电流与热量的集中导致应力远大于电阻片的极限值,从而出现炸裂。最终提出了一种新的线路避雷器损坏预测方法:通过基于雷电流幅值的经验公式对冲冲击寿命进行预测,通过雷电流幅值概率建立雷击次数与落雷密度的关系,从而得到避雷器损坏率与落雷密度的经验公式。

关键词: 整只避雷器; 氧化锌电阻片; 冲击老化; 阻性电流; 寿命预测

Research on the Impulse Aging Characteristics of a Complete 10 kV Arrester

WANG Bowen^{1,2}, LU Jiazheng^{1,2}, LIN Tianyu³, FU Zhiyao^{1,2}, LONG Jiantao^{1,2}, SHI Xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410129, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Disaster Prevention and Reduction Center, Changsha 410129, China;
3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Metal oxide surge arrester is widely used in lightning protection for transmission lines due to its excellent nonlinear characteristics. However, in case of excessively high lightning current, the arrester often fails due to impulse aging, or even rupture, severely impacting the operational safety of power grids. In this paper, based on the constructed impulse high current test platform, in this paper the number of withstanding impulse of the a complete arrester under different current amplitudes, as well as the variation of the reference voltage(U_{1mA}) under DC 1 mA and the resistive current I_L during the impulse aging process are tested, indicating that the impulse life of the arrester has a critical nature, and the mechanism is explained through microscopic characterization using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). At the same time, through the stochastic Voronoi network based resistor diss heat - force finite element simulation analysis and resistor disc glaze layer heating test on the lightning arrester in the impact aging process of the failure of the form of analysis, it is concluded that after localized melting occurs in the resistor disc grains, the temperature rise of the resistor disc becomes severe. This localized overheating causes the melting of the glaze layer, leading to surface flashover. At the same time, the concentration of current and heat after the localized melting of the resistor disc results in stresses far greater than the limit value of the resistor disc, thus causing cracking. Finally, a new damage prediction method for line arrester is proposed. The impulse life is predicted by the empirical formula based on the lightning current amplitude, and the relationship between the num-

收稿日期:2025-09-16; 修回日期:2025-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U23B2080)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U23B2080).

ber of lightning strikes and the density of falling lightning is set up by the probability of lightning current amplitude, thus obtaining the empirical formula of the damage rate of the arrester and the density of falling lightning.

Key words: a complete arrester; ZnO varistor; impulse aging; resistive current; lifetime prediction

0 引言

金属氧化物避雷器是用于输变电设备过压保护的重要装备^[1]。正常运行状态下的避雷器由于电阻片保护处于高阻抗状态,当线路中的过电压超过压敏电压时,避雷器将迅速呈现低阻抗特性,从而吸收过电压产生的能量,保护线路的安全,并渐渐恢复高阻抗特性。但在电力系统运行过程中,避雷器通常要经历雷击、受潮、产品质量问题等因素的影响,在长时间运行状态下,会出现一定的老化现象,使得其对地绝缘性能变差、漏电流增大等,影响电力系统的安全运行^[2]。

当避雷器遭受冲击过电压时,短时间内将吸收大量的能量,从而产生高电压梯度、大电流密度的现象,使得避雷器发热升温,在老化状态下可能导致避雷器损坏,影响电力系统状态。有许多学者对避雷器的老化特性做出了大量的研究。Zhang等人^[3]研究了电阻片的老化失效过程,发现电阻片在多次雷击冲击后的宏观失效模式与高频电流冲击次数呈正相关,超过一定脉冲阈值将导致电参数迅速劣化,直至边角开裂破坏。黄海博^[4]等人通过研究氧化锌电阻片的直流老化特性发现传统的老化标准存在一定的局限。文[5]中通过不同波形对于氧化锌电阻片流通性的影响发现高频冲击电流对电阻片的热应力更为显著。文[6-7]针对不同电压等级的避雷器进行了多次标准雷电流冲击耐受性实验,发现避雷器的耐受性存在一定阈值,当实验次数高于该阈值时,避雷器的小电流及残压特性明显劣化。Salles等人^[8]研究了不同温度下避雷器的老化过程与高频冲击电流次数、避雷器温度和放电电流幅值的关系,发现了避雷器温度对避雷器老化的影响。文[9-10]研究发现电阻片的穿孔和破裂,往往与电流分布和热量分布不均匀有关,对于电气均匀性较差的设备,将更易穿孔和破裂。许多学者发现氧化锌电阻片的老化主要与势垒的退化有关,目前离子迁移是一种被广泛接受的老化机制,即缺陷的扩散机制^[11-12]。

上述研究都表明避雷器的老化受冲击电流与冲击次数的共同影响,且两者均存在阈值,当超过阈值时避雷器的电气性能将严重劣化,并在应力的作用下,导致结构体穿孔破损。但有关冲击电流幅

值对避雷器老化特性影响的研究仍不够系统。通常认为,在冲击电压的作用下,电阻片存在集肤效应与边缘效应,导致避雷器的热量分布不均匀,最终造成避雷器的损坏^[13],对避雷器老化特性分析不全面且影响因素的作用机制不明晰;未考虑整只避雷器内部,不同电流幅值对避雷器产生的热量、应力分布对避雷器老化特性的影响;同时,对线路防雷避雷器的布置也多处于经验状态^[14]。因此,开展整只避雷器冲击老化特性研究,理清冲击电流幅值与冲击次数的影响规律,为科学预测避雷器冲击寿命以及线路避雷器差异化防雷提供理论指导具有十分迫切的应用价值。

文中搭建了试验平台测试了不同电流对避雷器的冲击寿命的影响,分析了避雷器在不同冲击电流作用下的冲击耐受次数,获得了避雷器冲击寿命临界值与雷电流幅值的经验公式;结合SEM微观分析、XPS分析、随机Voronoi网络的电阻片热量与应力有限元仿真分析解释了避雷器冲击寿命的临界性特征和失效形式。基于避雷器的冲击寿命经验公式提出了一种新的线路避雷器损坏预测方法,为避雷器的现场应用提供理论指导。

1 冲击试验及样本

为了研究不同等级冲击电流对整只避雷器的电气特性劣化的影响,文中对避雷器进行了4/10 μs 冲击大电流下不同电流峰值的冲击实验,电阻片尺寸为 $\phi 35 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$,整只避雷器1 mA参考电压为20.2~21 kV,0.75倍 $U_{1\text{mA}}$ 下的泄漏电流为8~15 μA 。

文中所搭建的冲击大电流试验平台见图1,实物图见图2。

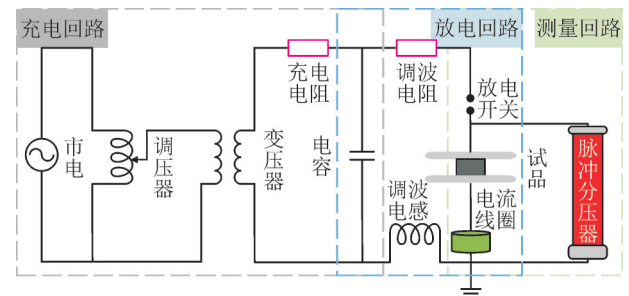


图1 大电流冲击测试平台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high current impulse test platform



图2 整只避雷器大电流冲击试验平台实物

Fig. 2 The surge high current test platform of the arrester

当充电电容在升压装置下预充电至预设合适电压后,空气开关将闭合,线路导通,此时充电电容与调波电阻 R_s 和调波电感 L_s 串联后对待检测设备进行放电,最高工作电压为900 kV,最大输出电流幅值为120 kA;测试结果由脉冲分压器对放电电压进行测量;同时通过 Pearson 2100 电流线圈对放电电流进行,电流与电压波形参数通过 Yokogawa DL850E 示波记录仪存储。试验的冲击电流波形及电阻片残压波形见图3。试验中,测试室温度 20 °C,空气湿度 54%。

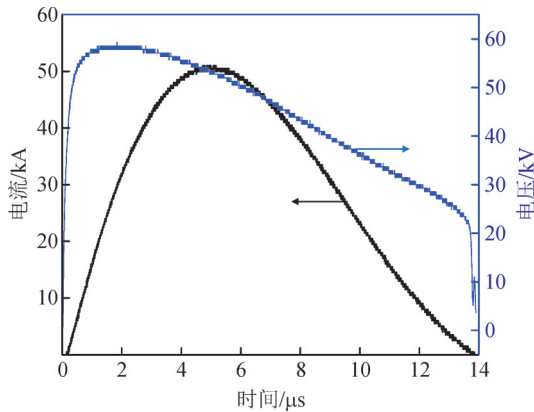


图3 4/10 μs 冲击大电流波形及电阻片残压波形

Fig. 3 4/10 μs high current impulse waveform and residual voltage waveform of ZnO varistor

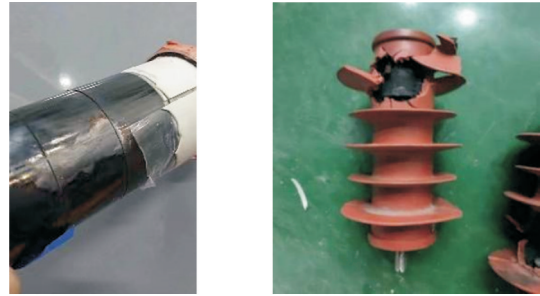
试验的冲击电流峰值大小分别20、40、60、75、85 kA,试验过程记录每组试验的转移电荷数。为了排除温度累积效应对试验结果的影响,每次试验结束后对避雷器进行冷却至室温处理。

2 整只避雷器冲击电流试验结果及分析

2.1 冲击电流试验结果

不同电流形式下,整只避雷器中电阻片的失效形式见图4,本次试验中避雷器参考电压(U_{1mA})和阻性电流(I_L)在不同电流幅值下随着冲击试验次数的

变化趋势分别见图5、6,其中参考电压在直流电流为1 mA下测试,阻性电流则通过静电电压表在避雷器持续运行交流电压下进行测试,测出电压 U 、总泄漏电流 I 以及二者之间的相位差 θ ,然后根据公式 $I_L=I\cos\theta$ 计算得出阻性电流。文中不同电流幅值下的 U_{1mA} 、 I_L 以及冲击寿命的每个实验点均由5个电阻片在同一实验条件下的实验数据均值获得。



(a) 沿面闪络

(b) 炸裂

图4 避雷器在冲击电流下的失效形式

Fig. 4 Failure modes of arrester under impulse current

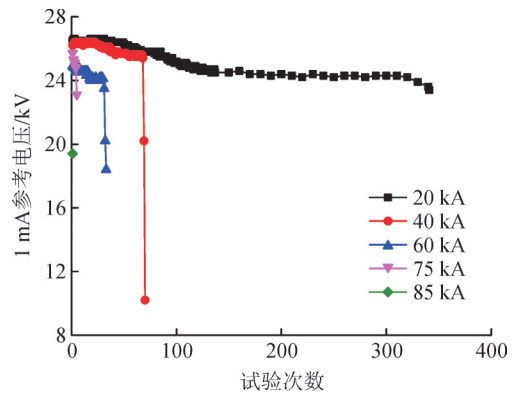


图5 避雷器参考电压与试验次数变化趋势

Fig. 5 Trend of arrester reference voltage with the number of test

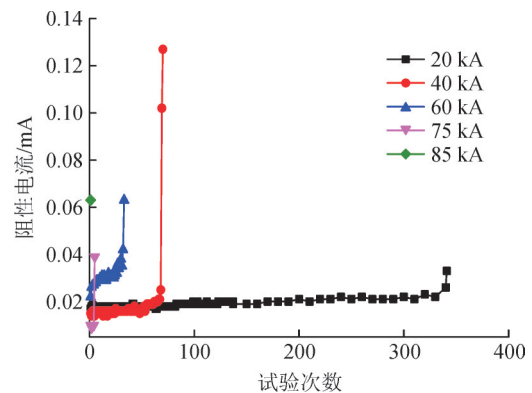


图6 避雷器阻性电流与试验次数变化趋势

Fig. 6 Trend of arrester reference resistive current with the number of test

测试结果见表1。不同电流下 I_L 与 U_{1mA} 的值随着冲击次数的变化见表1。测试结果表明:随着冲

击电流冲击次数的增加, U_{1mA} 会下降, 而其阻性电流则会增加。通过不同阻性电流增加百分比时以及不同 U_{1mA} 下降百分比时的冲击次数, 可以发现氧化

锌电阻片的冲击寿命具有临界特性, 即一旦冲击次数达到一个临界值, 避雷器出现沿面闪络或者炸裂, 将导致阻性电流显著上升, U_{1mA} 显著下降。

表1 分组待测避雷器冲击电流典型测试结果

Table 1 Typical test results of impulse current of all arresters to be tested

序号	电流幅值/kA	通过电荷/C	冲击寿命	不同 I_r 增加百分比时的冲击次数			不同 U_{1mA} 下降百分比时的冲击次数		
				50%	100%	150%	1%	5%	10%
1	20	0.17	341	3	117	331	50	99	330
2	40	0.36	70	1	49	62	34	69	70
3	60	0.50	33	1	15	32	3	30	31
4	75	0.58	5	1	2	4	2	4	5
5	85	0.70	1	1	1	1	1	1	1

2.2 试验结果分析

2.2.1 避雷器冲击寿命分析

如2.1中所述, 冲击下避雷器的失效主要为两种形式: 沿面闪络和炸裂。根据表1, 失效后避雷器的 U_{1mA} 会下降, 下降比例50%~80%; 同时, 阻性电流上升, 上升比例约为6~20倍。通过测试分析, U_{1mA} 下降超过10%, 阻性电流增加超过100%, 避雷器已经达到了其寿命的临界值, 再次冲击后避雷器出现炸裂等现象。同时试验也表明, U_{1mA} 下降超过5%后, 对于20 kA左右的小电流, 其冲击寿命仅达到了整体寿命的50%左右, 但是对于40 kA以上的电流, 此时已接近其冲击寿命。避雷器冲击寿命临界值与雷电流幅值的关系见图7, 通过数据拟合, 可以得到

$$y = 2246.5e^{-0.084x} \quad (1)$$

式(1)中: y 为冲击寿命即耐受雷电流冲击次数; x 为雷电流幅值。通过此经验公式可以推导避雷器的寿命情况。

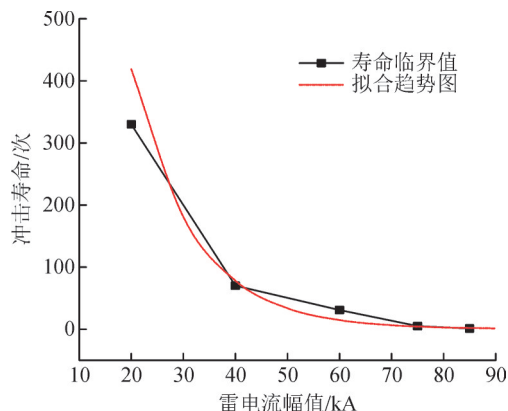


图7 避雷器冲击寿命临界值与雷电流幅值的关系

Fig. 7 Relationship between arrester critical life and lightning current amplitude

2.2.2 U_{1mA} 和阻性电流的拐点原因分析

ZnO 压敏电阻设计为以下成分: 94.84 mol%

ZnO, 1.00 mol% Sb_2O_3 , 0.80 mol% Co_2O_3 , 0.35 mol% Cr_2O_3 , 0.75 mol% MnO_2 , 1.50 mol% SiO_2 , 0.01 mol% Al_2O_3 和 0.75 mol% Bi_2O_3 。将冲击大电流试验后的电阻片样品定位破碎取样、并对断面进行多次乙醇超声洗涤, 制样进行形貌分析。同时对不同通流(0、55、75、95、100 kA)电阻片开展了 XPS 光谱分析测试, 见图8。

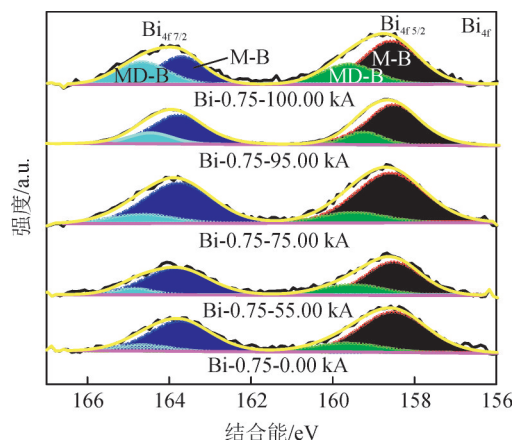


图8 XPS 光谱分析测试

Fig. 8 XPS spectroscopy analysis test

M-B 是指纯 Bi_2O_3 中的 Bi 含量, 随着冲击电流增大而下降。MD-B 是指当 Al、Mn 迁移 Bi_2O_3 中时, 这一类 Bi_2O_3 中的 Bi 含量(反映熔化过程中粒子迁移现象)随着冲击电流增大而增多。该现象表明了确实存在 Bi 的熔化过程, 与 Al、Mn 等物质进行了结合^[15-18]。

当电流幅值为 75.00 kA 时, 通过电子扫描显微镜 SEM(Regulus 8100, Hitachi, Japan) 可以观察到新的大型氧化锌颗粒, 并且晶粒周围小氧化锌颗粒存在, 熔融 Bi_2O_3 促进原始小氧化锌颗粒再结晶和生长, 因此印证了大电流下存在局部的熔融现象, 见图9。

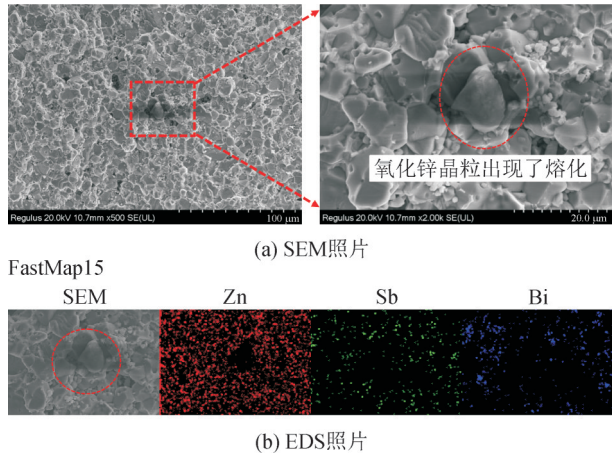


图9 75 kA 冲击电流后电阻片 SEM 和 EDS 测试
Fig. 9 SEM and EDS testing of varistor after 75 kA impulse current

当更多的掺杂离子进入 Bi_2O_3 晶体晶格中, 增加了晶界处的导电粒子, 可以提高 ZnO 电阻片中的 I_L , 降低 U_{1mA} 。因此当电流在 100.00 kA 时, 熔融后的氧化锌, 其材料的通流性能下降, 导致其他区域通流上升, 当融化区域达到一定比例后, 其通流密度达到了电阻片的临界值, 可以看出试样的微观结构较为松散, 大部分 ZnO 晶粒破碎成小颗粒, 这种现象可能是由于试样内部局部产生较高的温度, 从而产生较强的热应力, 破坏了原有 ZnO 晶粒之间的结合, 导致 ZnO 电阻片失效, 见图 10。

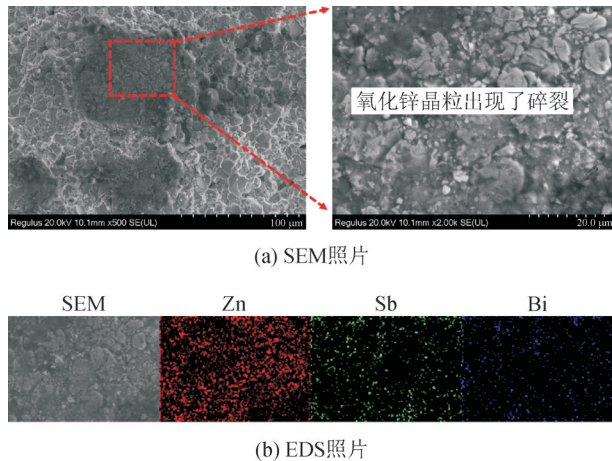


图10 100 kA 冲击电流后电阻片 SEM 和 EDS 测试
Fig. 10 SEM and EDS testing of varistor after 100 kA impulse current

综上, 考虑离子浓度梯度所导致的热扩散^[19]以及氧化锌老化线性链理论^[20], 冲击老化过程中存在压敏非线性链向线性链的转换, 且随着冲击次数的增多, 熔穿的晶界层逐渐增多, 当晶界层熔穿区域达到一定体积时, ZnO 电阻片再经受电流冲击就会由于局部高温导致缺陷喷发, 从而形成贯穿性熔孔, 导致劣化。

为了进一步论证冲击大电流作用下引起氧化锌晶粒出现碎裂, 而非试验过程中电阻片表层或裂损断面的脏污, 结合图 8、10 中不同幅值冲击电流后电阻片 SEM 和 EDS 测试结果, 文中对图 10 中氧化锌晶粒碎裂处进行了能谱分析, Zn , Sb 和 Bi 元素的分布相似, 这说明图 10 中阴影部分为 ZnO 本体, 因为脏污中存在 Sb 和 Bi 元素的可能性不大。

2.2.3 整只避雷器损坏特征分析

由 2.1 的试验及分析可知, 一旦冲击次数达到临界值, 避雷器出现沿面闪络或者炸裂, 伴随着阻性电流显著上升以及 U_{1mA} 显著下降, 见图 4。冲击大电流对电阻片的破坏由电—热—力共同作用, 因此开展电阻片流通冲击电流后的热量与应力的仿真分析。基于随机 Voronoi 网络来模拟 ZnO 电阻片不均匀的微观结构, 见图 11。通过有限元仿真软件来实现 ZnO 电阻片微观结构的“电—热—力”耦合仿真计算模型。冲击电流施加于 ZnO 电阻片时, 作用时间很短为 μs 级别, 冲击电流作用于电阻片的暂态过程可简化为一个热绝缘过程, 仿真参数见表 2。

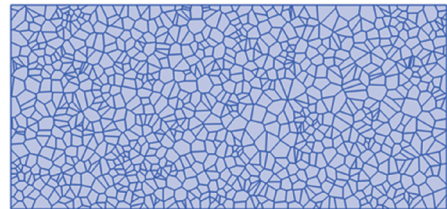


图11 ZnO 电阻片微观结构的随机 Voronoi 网络
Fig. 11 Stochastic Voronoi network of ZnO varistor microstructure

表 2 仿真模型中的相关参数及取值

Table 2 Relevant parameters and values in the simulation model

参数	取值
ZnO 晶粒的电导率 $\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	50
相对介电常数 ϵ_r	8.5
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	5 420
热导率 $k/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$	15
比热容 $C_p/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$	500
热膨胀系数 $\alpha/(\text{C}^{-1})$	4.86×10^{-6}
弹性模量 E/GPa	70
泊松比 μ	0.30

几何模型是在同样的区域范围内借助 Wolfram Mathematica 软件中的 VoronoiMesh 函数和 RandomReal 函数, 编程实现含有 1 014 个晶粒的 Voronoi 网络的随机构建, 晶粒大小设置为 $10\ \mu\text{m}$ 。

通过设置压敏电阻几何模型区域的边界来定义电场边界条件。上边界规定所施加的电压, 下边界则定义为接地状态, 设置为 0 V。左、右垂直边缘

是定义的电绝缘边界。物理模型部分由于涉及到电场、热场和力场的多物理场耦合,除上述电场的相关定义外,还需定义有限空间区域内的热学和力学方程。热场由扩散方程(2)计算

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为质量密度, kg/m^3 ; k 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; Q 为由电场($J \cdot E$)产生的单位体积功率耗散, W/m^3 。不均匀电流分布的焦耳效应引起的不均匀温升会产生热应力,当该应力大于压敏电阻的机械强度时,会产生裂纹,甚至直接导致破裂^[21]。热应力引起的热应变由式(3)表示

$$\varepsilon_{th} = \alpha_t \Delta T \quad (3)$$

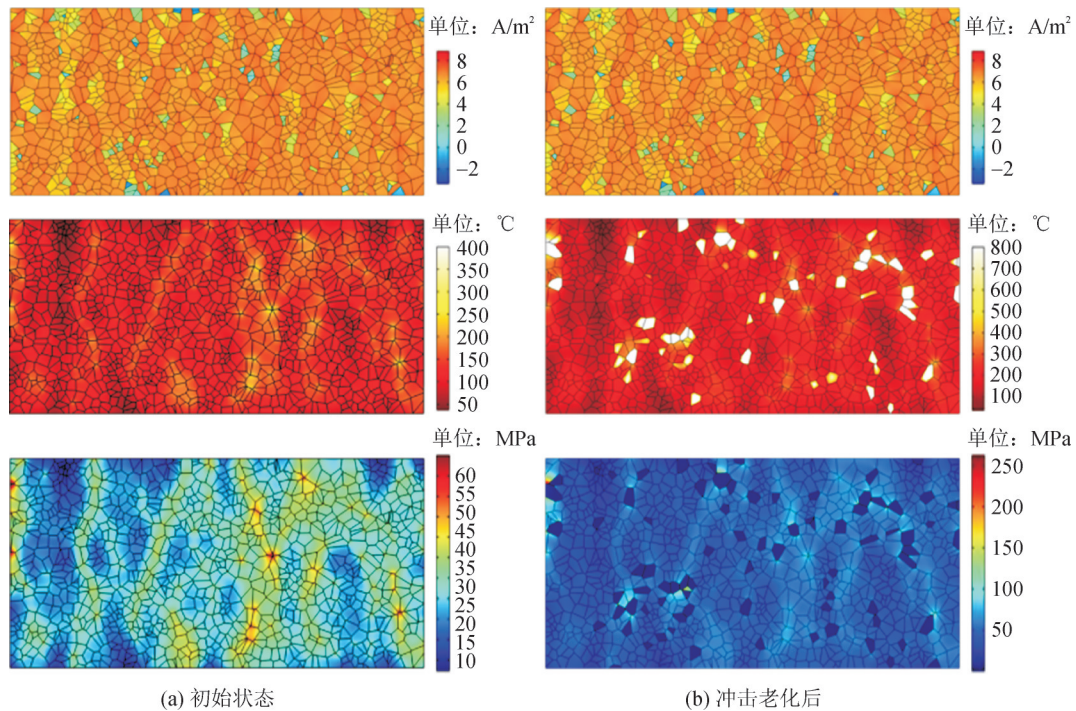
式(3)中: ε_{th} 为热应变; α_t 为热膨胀系数; ΔT 为温度变化量。热应变等于热膨胀系数和温度变化量的乘积。在求解区域内通过式(2)、(3),可将电、热、力多物理场耦合,从而进行有限元求解分析。

冲击老化前后 ZnO 电阻片微观结构的电流密度分布(\log_{10} 下的数据)、热量分布、应力分布见图 12,由图 12 可以看到,对于多次冲击老化后的电阻片,其微观结构中局部非线性的晶界结构已被破坏,局部晶粒出现熔融,在冲击下电导率进一步增大。此时熔融部分面积占比约为 8%,同时根据国标《GB/T 11032—2020 交流无间隙金属氧化物避雷器》在重

复转移电荷试验流程中的规定,试验评价标准之一为参考电压的变化不超过 5%,因此文中以此为依据对比不同通流条件下 U_{1mA} 下降 5% 时的仿真结果,并设定熔融晶粒占比为 8%。

从仿真结果来看,晶粒破坏对 ZnO 电阻片微观结构的电流分布影响不大,只对局部电流分布有所影响,而仿真结果也显示温度集中处和应力集中处都集中在冲击老化后破坏的晶粒处。仿真表明晶粒出现了局部的熔融后,电阻片的温升剧烈增大,最大温升达到了 803°C ,见表 3。

为测试 ZnO 电阻片侧面绝缘用玻璃釉的溶解温度,将玻璃粉压制成直径 4 mm、高度为 5 mm 的圆柱体。从 15°C 升温至 550°C ,采用程序控温方式设定升降温速率 $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$,每 1°C 采集 1 张图片。从图 13 中可以明显的看出, 450°C 时,玻璃釉就开始软化,体积缓慢收缩。 $480\sim 485^\circ\text{C}$ 时,玻璃釉圆柱体软化收缩至圆球状。从 490°C 时,玻璃釉出现开始缓慢坍塌,由圆球状缓慢转变成半球状。至 500°C 时,已完全坍塌成半球状。继续升高温度至 550°C ,样品状态无明显变化。表明 500°C 是一个明显的温度转变点。因此当出现局部的高温时,釉层融化,绝缘性能下降,导致沿面闪络,见图 4(a)。同时,由于电阻片的极限应力为 60MPa ^[22],局部融化后,电阻片



(a) 初始状态

(b) 冲击老化后

图 12 冲击老化前后 ZnO 电阻片微观结构的电流分布、热量分布、应力分布

Fig. 12 Current distribution, heat distribution, and stress distribution in the microstructure of ZnO varistor before and after impulse current aging

表3 冲击老化前后 ZnO 电阻片微观结构的温度和应力值
Table 3 Temperature and stress values of ZnO varistor microstructure before and after impulse current aging

参数	冲击前	冲击后
温度平均值/°C	179.5	302.4
温度最大值/°C	400.6	803.4
应力平均值/MPa	44.4	44.5
应力最大值/MPa	60.4	307.8

的电流与热量集中,导致应力远大于电阻片的极限值,因此出现了电阻片炸裂,见图 4(b)。

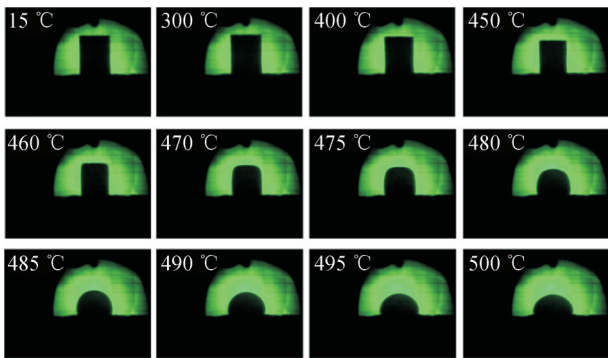


图13 不同温度下玻璃釉变化情况

Fig. 13 Variation of glaze at different temperatures

3 避雷器运行寿命预测

根据上述避雷器整只测试结果,可以发现避雷器的老化程度、冲击电流大小、冲击次数对避雷器失效均存在影响。传统的避雷器寿命因为避雷器自身性能,工作环境等等原因,导致同一批次避雷器寿命均存在差别。为了更好地满足电网稳定运行的需求,往往需要能够提前预判避雷器是否能正常工作。对此常见的氧化锌避雷器运行寿命预测有以下5种常见预测方法:固定运行年限法、试验数据临界值法、差值预判法、在线监督法、抽检试验^[14]。这些方法往往基于避雷器运行经验值或者短时间的运行差值从而获得预测值,在线路实际应用中差异性过大,往往单一避雷器寿命无法准确描述地区避雷器损坏情况,某地区避雷器损坏数量往往与避雷器冲击寿命、雷击次数、雷电流幅值等有关,线路避雷器的损坏预测更是难上加难。

为了更好预测避雷器寿命与指导线路避雷器差异化防雷安排,文中对整只避雷器大电流冲击测试结果进行分析,将避雷器整只冲击老化试验冲击电流幅值与冲击次数数据进行拟合,获得避雷器在不同电流下的冲击寿命预测公式 $S(I)$,其表达式为: $S(I)=2\ 246.5e^{-0.084I}$,其中 I 为冲击电流大小。

此外,为了更好配置线路差异化防雷布置,根

据文[23]中对输电线路雷击分布、雷电流概率的仿真计算分析,结合上述整只避雷器冲击试验所获得的避雷器寿命预测公式,文中提出了一种新的线路避雷器损坏预测方法:

首先,通过上述试验拟合获得了避雷器在不同电流下的冲击寿命预测公式 $S(I)$ 。

其次,线路避雷器受特定雷击过电压的次数与概率,与各个地区、各个区段的落雷密度 N ,雷电流幅值概率 $f(I)$ 、安装避雷器地区的线路的实际长度 L 、引雷宽度 Y 等有关,因此可以通过雷电流幅值概率建立雷击次数与落雷密度的关系。

即,根据需要安装避雷器地区的雷电流幅值分布情况获得雷电流幅值概率公式 $f(I)$,并在计算雷电流幅值概率时对老化过程中不同雷电流占比进行加权处理,假设雷击在分析的区域是均匀分布,则不同雷电流下避雷器遭受的雷击次数 $n=f(I)\cdot L\cdot Y\cdot N$;通过对比不同电流下的冲击寿命 S 和不同雷电流下避雷器遭受的雷击次数 n ,得到 a 年内避雷器的损坏次数 $m=a\cdot n-S$ 。

例如,某地区采用10 kV无避雷线防雷措施,每70 m安装一组避雷器,雷电的落雷概率公式为

$$f(I) = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{I-5}{26.96} \right)^{3.5}} - \frac{1}{1 + \left(\frac{I+5}{26.96} \right)^{3.5}} \right] \quad (4)$$

分析表明,例如当采用通流能力为65 kA的避雷器,并以文中实验获得的冲击寿命经验公式为基准,则当落雷密度为5次/(km²·a)时,10年损坏率为1.03%。随着落雷密度的增大,损坏率上升。可以得到避雷器损坏率与落雷密度的经验公式为

$$s = 0.002\ 1N^{1.007\ 3} \quad (5)$$

根据冲击寿命与避雷器遭受的雷电冲击情况进行综合分析,即可获得不同地区、不同落雷情况下避雷器运行寿命;依据冲击大电流实验获得的冲击寿命与计算得到的避雷器运行寿命,与设计寿命进行对比分析,获得该设计寿命下避雷器应该具备通流能力,可有效指导差异化配置防雷设备。地闪密度与避雷器损坏率的关系见图14。

4 结论

文中对针对氧化锌避雷器与电阻片开展了冲击大电流老化实验研究,并通过微观表征及有限元仿真分析进行机理解释。主要结论如下:

1)获得了避雷器冲击寿命基于电流幅值的经验公式。冲击大电流下避雷器的冲击寿命具有临界

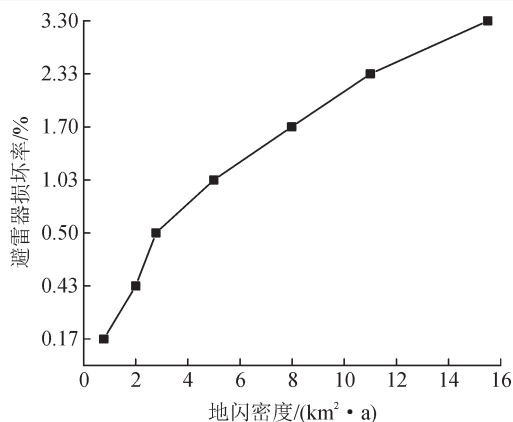


图14 地闪密度与避雷器损坏率的关系

Fig. 14 Relationship between grounding flashover density and arrester damage rate

性,直流1 mA参考电压和阻性电流分别随着冲击次数的增加而下降和增大,并且存在明显的突变过程。一旦冲击次数达到一个临界值,阻性电流突然显著上升,1 mA下的参考电压显著下降。

2)通过SEM及XPS微观表征对避雷器在冲击老化过程中 U_{1mA} 和泄漏电流的拐点进行机理解释:大电流下电阻片内部的晶粒存在局部的熔融现象,更多的掺杂离子进入 Bi_2O_3 晶体晶格中,增加了晶界处的导电粒子,可以提高ZnO电阻片中的 I_L ,降低 U_{1mA} 。因此熔融后的氧化锌,融化后的材料其通流性能下降,导致其他区域通流上升,当融化区域达到一定比例后,其通流密度达到了电阻片的临界值,可以看出试样的微观结构较为松散,大部分ZnO晶粒破碎成小颗粒,因此大电流下的局部融化过程导致了避雷器的最后失效。

3)冲击大电流下整只避雷器出现了炸裂和沿面闪络的失效形式。基于热-力仿真分析及釉面加热试验可知,晶粒出现了局部熔融后,电阻片的温升剧烈上升。由于电阻片的釉层的溶解温度为 $450\text{ }^\circ\text{C}$,因此当出现局部的高温时,釉层融化,导致沿面闪络。同时,由于电阻片的极限应力为 60 MPa ,局部融化后,电阻片的电流与热量集中,导致应力达到 307.8 MPa 远大于电阻片的极限值,因此出现了电阻片炸裂。

4)提出了一种新的线路避雷器损坏预测方法。通过雷电流幅值概率建立雷击次数与落雷密度的关系,从而得到避雷器损坏率与落雷密度的经验公式。分析表明通流能力为 65 kA 的避雷器,当落雷密度为 $5\text{次}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 时,10年损坏率为 1.03% 。随着落雷密度的增大,损坏率上升。

参考文献:

- [1] KHODSUZ M, MIRZAI M, SEYYEDBARZEGAR S. Metal oxide surge arrester condition monitoring based on analysis of leakage current components[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015(66): 188-193.
- [2] 唐明良,李佑光,曹洪亮. 综合消噪算法在金属氧化物避雷器在线监测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 45-49. TANG Mingliang, LI Youguang, CAO Hongliang. Application of comprehensive denoising algorithm to on-line monitoring of MOA [J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(2): 45-49.
- [3] ZHANG Chunlong, XING Honghan, LI Pengfei, et al. An experimental study of the failure mode of ZnO varistors under multiple lightning strokes[J]. Electronics, 2019, 8(2): 2.
- [4] 黄海博,孙伟,万翔,等. ZnO压敏电阻直流老化特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(4): 22-29. HUANG Haibo, SUN Wei, WAN Xiang, et al. DC aging characteristics of ZnO varistors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4): 22-29.
- [5] 王博闻,方针,李化,等. 不同波形对于氧化锌电阻片通流性能的影响分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 197-204. WANG Bowen, FANG Zhen, LI Hua, et al. Analysis of influence of different waveforms on current performance of zinc oxide varistor [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 197-204.
- [6] 许志荣,唐军,陈德智,等. 10 kV 配电用避雷器常见故障类型分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(3): 62-66. XU Zhirong, TANG Jun, CHEN Dezhi, et al. Analysis of 10 kV distribution arrester common fault types[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(3): 62-66.
- [7] 林楚标,廖永力,李锐海,等. 110 kV 整只氧化锌避雷器雷电冲击老化特性研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 40-45. LIN Chubiao, LIAO Yongli, LI Ruihai, et al. Research on degradation performance of 110 kV full-scale ZnO MOA under lightning impulses[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 40-45.
- [8] DE SALLES C, MARTINEZ M L B, DE QUEIROZ Á A A. Ageing of metal oxide varistors due to surges[C]//2011 International Symposium on Lightning Protection. Brazil: IEEE, 2011: 171-176.
- [9] WANG H, BARTKOWIAK M, MODINE F A. Non-uniform heating in Zinc oxide varistors studied by infrared imaging and computer simulation[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(8): 2013-2022.
- [10] 陈青恒,何金良,谈克雄,等. 氧化锌非线性电阻片微观结构及特性对电流分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 62-66. CHEN Qingheng, HE Jinliang, TAN Kexiong, et al. Influences of the microstructure on current distribution in ZnO varistors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 62-66.
- [11] 张鹏,张彬,鞠晓雨,等. SnO_2 与ZnO压敏电阻特性比较分析[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(7): 23-26. ZHANG Peng, ZHANG Cheng, JU Xiaoyu, et al. Characteristic comparative analysis between SnO_2 and ZnO varistors[J]. Electronic Components & Materials, 2012, 31(7): 23-26.

- [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 Jiazhen, 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, LÉ V, CHAMPLAUD 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)。