

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.005

湿热环境异常发热复合绝缘子电热耦合仿真分析

刘宇, 李光茂, 朱晨, 杨森, 周鸿铃, 莫文雄

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510420)

摘要: 复合绝缘子运行中异常发热现象频发, 其中老化与表面污秽是导致发热的主要原因。文中采用有限元多物理场仿真, 结合实测获得的材料参数, 分别建立了正常运行、湿热老化、局部涂污及整体涂污等4种典型工况下的复合绝缘子仿真模型, 根据湿热老化以及表面污秽的不同发热特征, 分别建立静电、电流场两种模型。通过电场计算分析发现: 湿热老化后复合绝缘子沿面电场增大、界面电场降低; 局部涂污复合绝缘子在涂污处电场稍微下降; 整体涂污复合绝缘子由于沿面电流增大造成电场畸变严重。通过以电介质损耗为接口的耦合热场以及电流场-热场耦合的电热联合仿真与试验结果对比发现: 正常与局部涂污复合绝缘子基本无温升; 湿热老化与整体涂污复合绝缘子温升明显, 但温度梯度方向相反。仿真计算所得绝缘子最大温升位置与试验结果相同, 试验结果与仿真计算结果基本吻合。

关键词: 复合绝缘子; 湿热老化; 污秽; 多物理场仿真; 异常发热

Electrothermal Coupling Simulation Analysis of Composite Insulators with Abnormal Heat in Humid and Hot Environment

LIU Yu, LI Guangmao, ZHU Chen, YANG Sen, ZHOU Hongling, MO Wenxiong

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: Abnormal heating phenomenon of composite insulator occurs frequently in operation, of which the main reason is aging and surface contamination. In this paper, the simulation model of composite insulator under such four typical conditions as normal operation, humid and hot aging, partial and overall contamination is set up respectively by the use of FEM multi-physical field simulation in combination with the measured material parameters. Such two kinds of models as electrostatic and current fields are set up respectively in accordance with the different heating characteristics of humid and hot aging as well as surface contamination. It is found through electric field calculation that the electric field along the surface of the composite insulator after humid and hot aging increases and that the interface electric field decreases. The electric field of partial contaminated composite insulator at the contamination point decreases slightly and the electric field distortion of the overall contaminated composite insulator due to increase of current of the surface is serious. It is found by comparing the electrothermal joint simulation and test result of coupling thermal field with dielectric loss as interface and current field filed -thermal field coupling that the normal and partial contaminated composite insulator has basically no temperature rise; while the temperature rise of the composite insulator with humid and hot aging and overall contamination is obvious but the the temperature gradient direction is opposite. It is concluded through the simulation calculation that the position of maximum temperature rise and the test result are identical and the test result and the simulation calculation result are basically in agreement.

Key words: composite insulator; hygrothermal aging; contamination; multi-physical field simulation; abnormal heating

0 引言

由于复合绝缘子具有防污闪性能优异、重量

轻、机械强度高、安装维护方便等诸多优点, 现已广泛应用于交直流高压及超特高压输电线路, 有效提高了输电线路的可靠性与安全性。

收稿日期: 2022-02-05; 修回日期: 2022-04-09

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20190110)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZHKJXM20190110).

尽管复合绝缘子的耐污闪性能优异,但其在湿热环境下的运行仍存在一定问题^[1-5],其中包括积污导致复合绝缘子的异常温升^[6-10];另一方面,高温高湿地区运行的复合绝缘子也时常出现异常温升现象。广东电网公司佛山供电局魏远航^[11]提出复合绝缘子异常发热现象可分为3大类:水分侵入引起发热、复合绝缘子老化引起发热以及局部放电引起发热。而针对复合绝缘子异常发热现象,清华大学张中浩等人^[12]对护套受潮后复合绝缘子电场分布进行了模拟,发现绝缘子端部电场升高,从而引起更大的介质损耗,此外,清华大学王黎明^[13]等人对环境湿度对复合绝缘子电场影响进行了仿真,结合温升试验表明,随着环境相对湿度升高,复合绝缘子红外测温结果上升,介损角正切值逐步增大并趋于饱和。

综上所述,复合绝缘子发热原因可分为3类:①电阻变化所致的焦耳热;②电介质介电性能变化所致的介质损耗发热;③局部放电所致的放电发热。然而大部分研究仅就电场模拟对复合绝缘子进行模拟,单从电场出发进行异常发热分析,缺少对不同异常发热条件下的电热耦合模型构建。因此本研究将针对复合绝缘子中的介损以及沿面泄漏电流所引起的发热进行进一步的模拟仿真。本研究构建了复合绝缘子湿热老化以及表面污秽电场与电热耦合仿真模型,同时结合试验与仿真分析复合绝缘子在不同条件下的电场特性以及所导致的异常发热特性。

1 模型构建

1.1 试样

为便于后续进行试验对比,文中选取以高压输电线路FXBW-500/120棒型悬式复合绝缘子结构参数设计为基础的短串复合绝缘子进行建模。复合绝缘子尺寸结构与实际试样见图1。

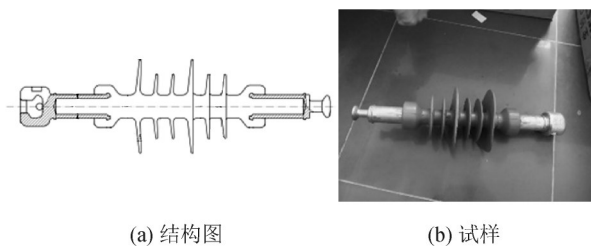


图1 短串复合绝缘子

Fig. 1 Short-string composite insulator

1.2 仿真模型建立

由于文中研究对象为试验室环境下的复合绝缘子,忽略了杆塔与导线等结构,采用二维轴对称模块对复合绝缘子进行建模,见图2。根据 Dirichlet

边界条件,文中建模以绝缘子为中心,设置了半径3 000 mm的人工边界,将复合绝缘子开域转化为有限域求解。

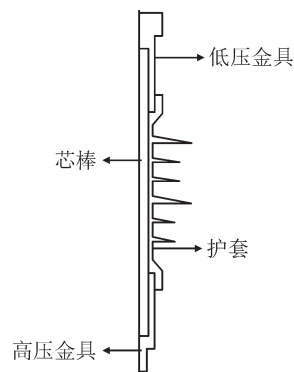


图2 复合绝缘子二维轴对称模型

Fig. 2 Two dimensional axisymmetric model of composite insulator

根据IV级污区的爬电比距配置结合试验室现场试验条件,对短串样品在高压端施加40 kV电压,低压端和远场接地。

文中共设置4种模型:①正常复合绝缘子;②局部(第1组伞)涂污复合绝缘子;③整体涂污复合绝缘子;④水煮(湿热)老化复合绝缘子。污秽根据试验室条件,采用均匀涂污模型,污秽厚度与文[14]一致,设置为0.06 mm。模型见图3。

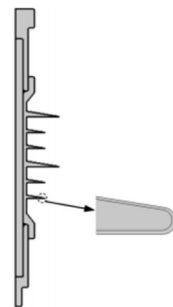


图3 涂污复合绝缘子模型

Fig. 3 Model of composite insulator with pollution

2 复合绝缘子电场仿真计算

通常情况下,因为绝缘介质具有极高的电阻率,仅考虑介质电容效应^[9-10]。但是在贯穿性污秽条件下,由于湿污层电阻率较小,贯穿型污秽会导致复合绝缘子沿污秽层产生较大的泄漏电流,导致整只绝缘子表面电势分布变化进而影响电场分布^[15]。因此整体涂污复合绝缘子采用电流场计算其电场分布,其余模型仍旧采用静电场进行分析。

2.1 水煮老化复合绝缘子电场分析

文中首先对新制作的以及湿热老化后的复合绝缘子硅橡胶伞套和芯棒开展了介电谱试验,其中

分别对硅橡胶以及芯棒采用 100 ℃ 水煮 8 天模拟湿热老化过程。采用宽频介电谱测量样品在工频 50 Hz、室温 20 ℃ 下的相对介电常数 ϵ' 以及介质损耗角正切 $\tan\delta$ (介损因数),各材料老化特征量见表 1。

表 1 样品介电参数

Table 1 Dielectric parameters of sample		
样品	ϵ'	$\tan\delta/\%$
标准硅橡胶	4.20	4.06
老化硅橡胶	6.64	7.63
标准芯棒	6.55	4.67
老化芯棒	13.51	40.10

由表 1 可以发现,水煮后的硅橡胶以及芯棒的相对介电常数值变大,其中硅橡胶介电常数增长了 58%,芯棒相对介电常数增长了 106%,约为老化前的 2 倍。

标准材料参数下短串复合绝缘子电场分布见图 4。护套沿面与芯棒—护套界面的轴向电场数值见图 5。

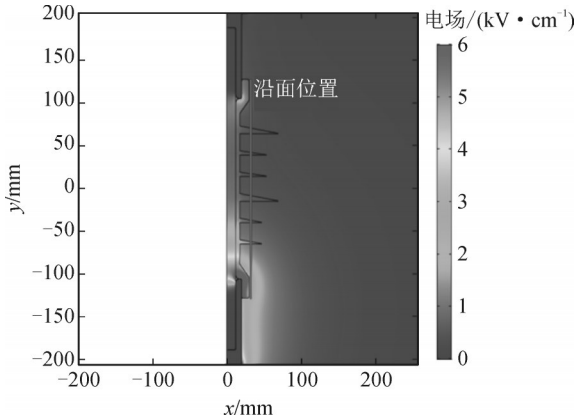


图 4 复合绝缘子场强分布

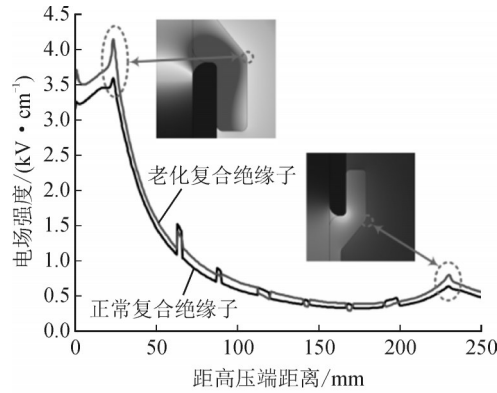
Fig. 4 Electric field strength distribution of composite insulator

由图 5 可知,经过湿热老化后的复合绝缘子,其护套沿面场强畸变增大,老化后绝缘子护套端部场强增大 15.6%。界面场强畸变程度降低,界面端部场强约降低了 16.9%。在静电场中,由于单一介质体电荷密度 ρ 不会改变,因此电场强度与介质相对介电常数成反比。

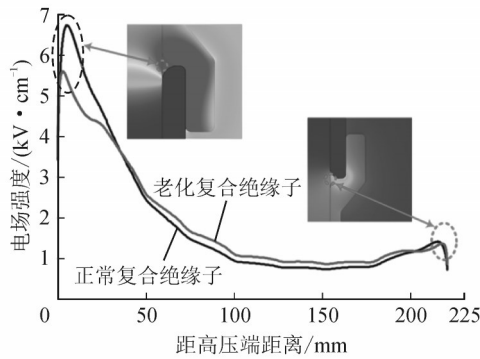
由图 5(a)可发现,复合绝缘子硅橡胶护套相对介电常数增大,其端部电场也同时增大,这是由于绝缘子属于多层介质结构,当其护套与芯棒老化时,两种介质的相对介电常数具有不同变化规律,其等效介电常数不再为线性变化的常数。

此种情况下,可对不同电位梯度方向采用电容等效模型对其电场进行分解。由于复合绝缘子的旋转对称特性,故仅对其介质轴向以及切向两个方向进行分析即可。选取高压端部界面以及沿面上的一点,见图 6(a)、(b)计算沿切向与轴向,见图 6(c)电

场强度,结果见表 2。



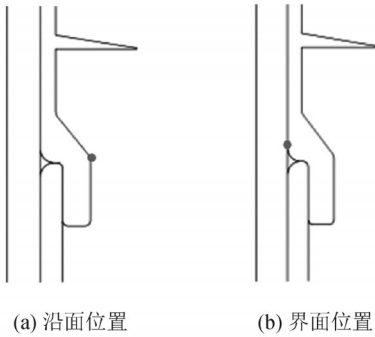
(a) 沿面电场



(b) 界面电场

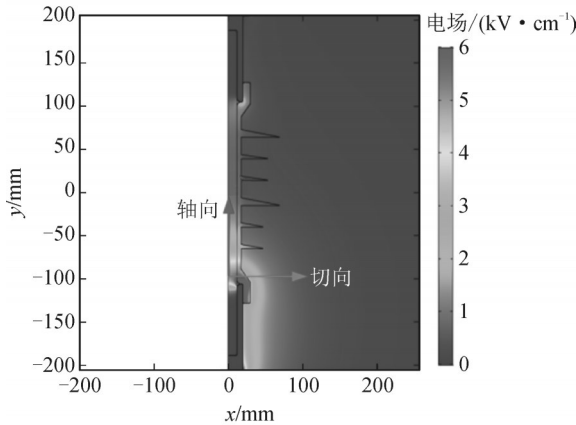
图 5 正常、老化复合绝缘子轴向电场

Fig. 5 Axial electric field of normal and aged composite insulator



(a) 沿面位置

(b) 界面位置



(c) 界面位置

图 6 电场分解图

Fig. 6 Decomposed diagram of electric field

表2 高压端不同方向电场

方向	Table 2 Electric field of different direction at high voltage terminal			
	正常界面	老化界面	正常沿面	老化沿面
切向电场	0.090	0.241	3.260	3.820
轴向电场	6.144	4.850	1.330	1.210
电场强度	6.145	4.855	3.525	4.005

由表2可见,绝缘子轴向电场变化符合单一介质电场随介电常数变化规律,随着介质相对介电常数增大,其轴向电场强度降低。根据表2切向电场数据可以发现,老化绝缘子界面与沿面电场变化规律与轴向电场规律相反。这是因为切向电场属于多层介质(芯棒—护套—空气)体系。对于简单平行多层介质,有

$$U = \sum_{i=1}^n E_i d_i \quad (1)$$

同时在介质交界处,其必须满足

$$E_1 \varepsilon_1 = E_2 \varepsilon_2 = \dots = E_n \varepsilon_n \quad (2)$$

据式(1)、(2)可解得不同介质内电场强度

$$E_1 = \frac{U}{\varepsilon_i \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\varepsilon_j}} \quad (3)$$

据式(2)可知,多层介质系统电场强度不再与介质介电常数成单纯反比关系,各介质电场强度在界面将发生突变,其突变程度可采用相对介电常数比值 k 进行表征。

$$k = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \quad \varepsilon_i \geq \varepsilon_j \quad (4)$$

距离高压金具10 mm处复合绝缘子沿切向距离的切向电场见图7。可以发现老化后,绝缘子芯棒内部、芯棒—护套界面、沿面以及沿面空气切向电场强度增大,而护套内部切向电场强度降低。在护套—芯棒($k=2.03$)、护套—空气界面处($k=6.64$),后者切向电场突变更大。同时根据表2与图7可发现,临近高压端,复合绝缘子界面电场主要由于其轴向电场决定,而沿面电场主要由于其切向电场决定。

2.2 积污复合绝缘子电场分析

对局部涂污以及整体涂污复合绝缘子进行了泄漏电流分析。经计算得到护套沿面泄漏电流见图8。

由图8可知,局部涂污后复合绝缘子尽管在污层部位泄漏电流增大,但由于两端污秽介质电阻较大,无法产生较大的贯穿性泄漏电流,泄漏电流最大值为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ 。而整体涂污绝缘子的污秽层与金具连接形成了回路,导致绝缘子沿污秽产生了较大的泄漏电流,峰值约为 0.95 A/m^2 。

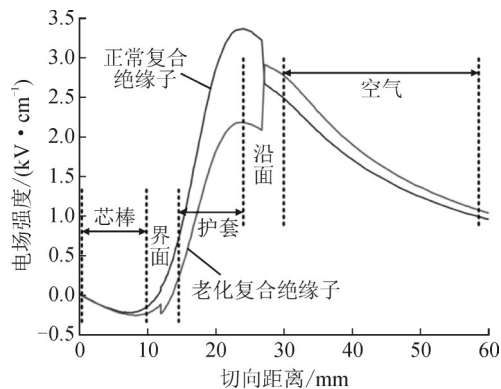
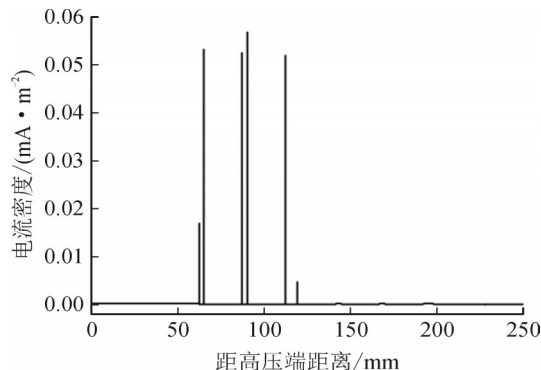
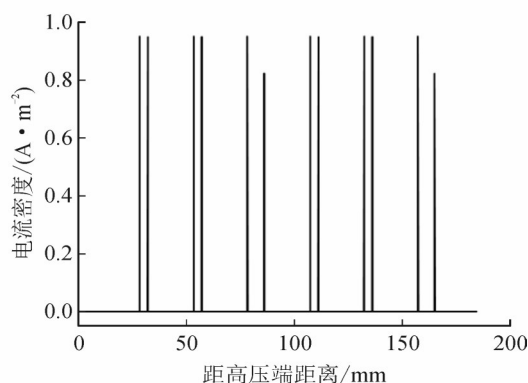


图7 复合绝缘子切向电场

Fig. 7 Tangential electric field of composite insulator



(a) 局部涂污绝缘子沿面电流密度



(b) 整体污绝缘子沿面电流密度

图8 整体、局部涂污复合绝缘子电流密度

Fig. 8 Current density of overall and local polluted composite insulator

采用电流场以及静电场分别对局部涂污与整体涂污复合绝缘子进行电场计算,其中污秽介电常数取 $81^{[16]}$ 。两种绝缘子的电场仿真结果分别见图9、10。

据图9、10可知,局部涂污复合绝缘子场强较之正常复合绝缘子变化不大。而整体涂污复合绝缘子场强畸变严重,其中绝缘子伞裙部位电场增长最大,约为未涂污时的6倍,从图10(a)可以看出,复合绝缘子伞裙部位电场强度较大,这是由于污秽沿伞裙结构边缘分布,见图11(a),假设电势沿污秽层均匀分布,可将电场计算式简化为

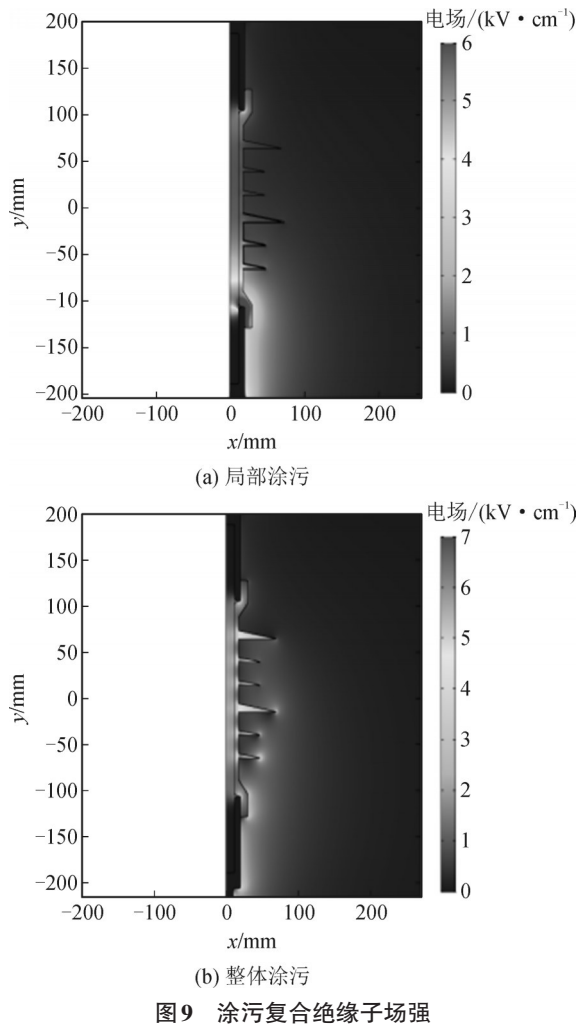


图9 涂污复合绝缘子场强

Fig. 9 Electric field of composite insulator with pollution

$$E=\frac{U}{d}$$

(5)

由于空气介质 d_1 大于护套伞裙 d_2 ,因此伞裙处场强将明显大于空气间隙场强。从界面场强进行分析,见图11(b),由于污层电导率较大,使得电势沿绝缘子轴向更加均匀地分布,电压降不再集中于端部区域,导致整体涂污绝缘子在界面端部处的场强会大大降低^[17~20]。

3 复合绝缘子电致热研究

3.1 湿热老化复合绝缘子介质损耗发热仿真分析

引入复介电常数后,电介质极化后电场即其电感应强度与原电场强度出现了相位差,导致了介质损耗产生^[21~23]。

以介电损耗结果传热热源接口导入复合绝缘子热场分析模型。由于试验在较小密闭空间内进行,因此模型边界空气自然传热系数设定为3 W/(m²·K)。其中模型各部分热学参数见表3。

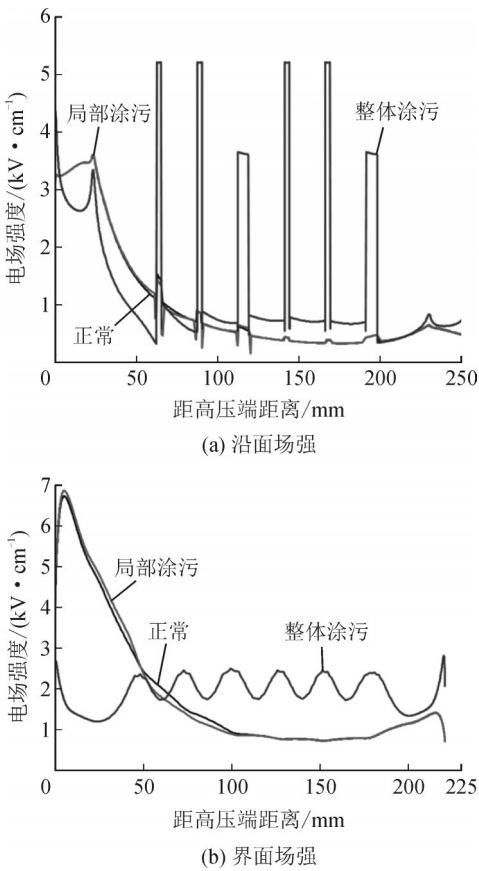


图10 不同缺陷复合绝缘子轴向电场

Fig. 10 Electric field of composite insulator with different defects

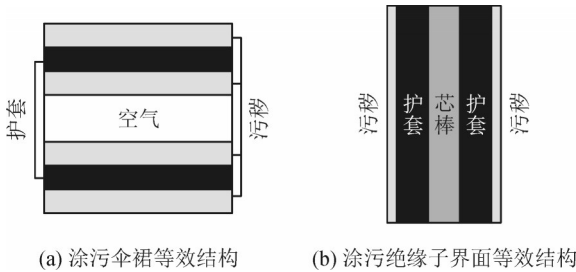


图11 涂污复合绝缘子等效结构

Fig. 11 Equivalent structure of composite insulator with pollution

表3 材料热性能参数

Table 3 Thermal properties of materials

材料	导热系数/ [W·(m ² ·K) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)	恒压热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]
硅橡胶	0.20	1 350	1 200
芯棒	0.20	2 096	750
金具	43.53	7 850	480
污秽	8.00	2 310	820

短串复合绝缘子温度分布云图以及其护套—芯棒界面稳态后的温度分布分别见图12、13。

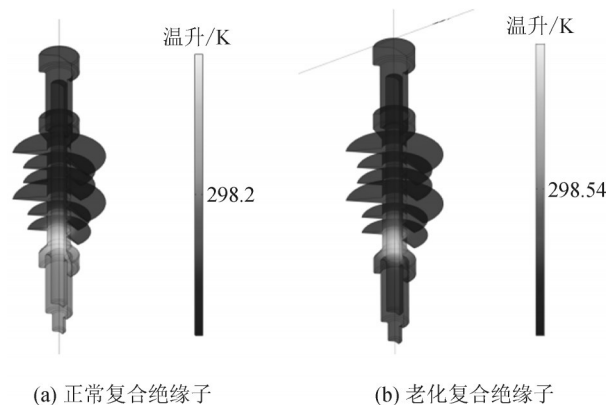


图12 复合绝缘子介损发热温度云图

Fig. 12 Dielectric loss heating temperature nephogram of composite insulator

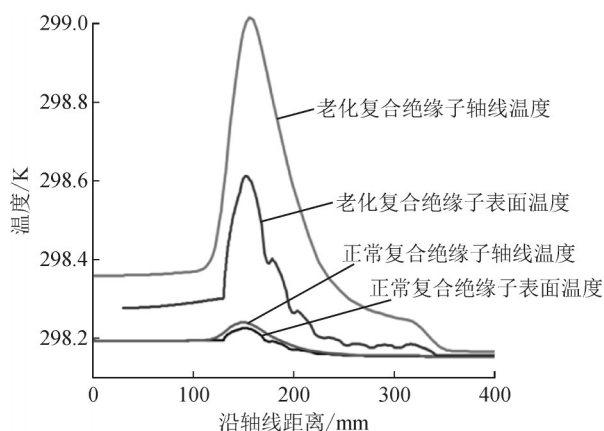


图13 复合绝缘子介损发热温度

Fig. 13 Dielectric loss heating temperature of composite insulator

从图12、13中可以看出,复合绝缘子介损温升主要集中在高压金具末端致高压第2片伞处的位置。两种绝缘子温升最高出现在芯棒轴线上,位于第1片小伞与高压金具之间,距离第1片伞约17 cm处,未老化复合绝缘子轴线最高温度为298.24 K,最大温升为0.09 K,表面最高温度为298.225 K,表面最大温升为0.075 K。可以发现,正常复合绝缘子几乎无介损发热的情况。对于老化复合绝缘子,计算所得轴线最高温度为298.92 K,最大温升为0.77 K,表面最高温度为298.61 K,表面最大温升为0.46 K。从图13数据可以看出,短串复合绝缘子介损所造成的是由内致外的发热。这是由于芯棒老化后其介损因数较大,损耗与发热主要集中于高压端芯棒处。

3.2 涂污复合绝缘子发热仿真分析

两种涂污绝缘子的热场分布结果分别见图14、15。

从图14、15中可以看出,局部涂污复合绝缘子基本无温升,其中由微小泄漏电流所造成的温升约为0.000 5 K,位于局部污秽处,从数量级来看,可视作绝缘子几乎没有明显温升。整体涂污复合绝缘子最高发热温度为300.57 K,位置处于第1、2片小伞之间的护套处,温升达到了2.42 K,而轴线处最高

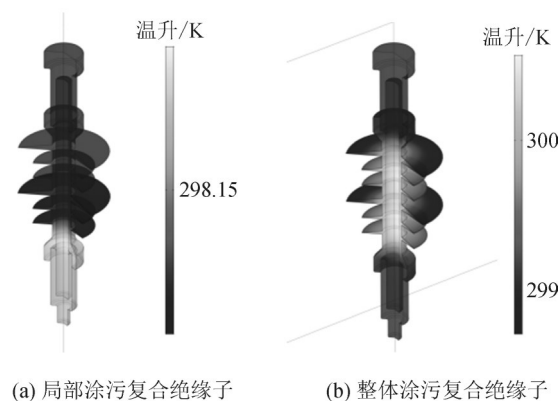


图14 涂污复合绝缘子发热温度云图

Fig. 14 Temperature nephogram of composite insulator with pollution

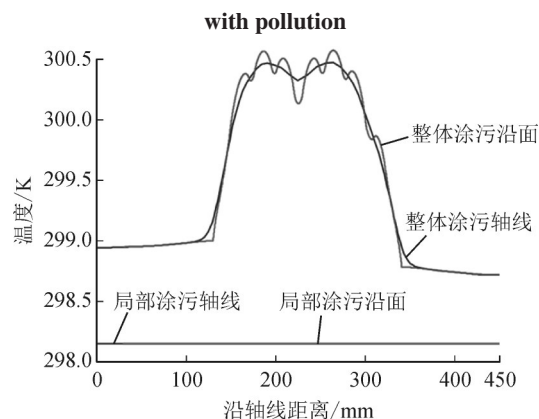


图15 涂污复合绝缘子温度分布

Fig. 15 Temperature distribution of composite insulator with pollution

温度为300.47 K,温升为2.32 K。

可以发现与介损发热不同,污秽发热是由于沿面电流增大而引起的由外致内的发热。污秽发热与介损发热的最大温升位置不同,这是由于模型污秽层均匀分布,其沿面所产生的热量亦较为均匀分布,但由于端部金具具有极好的导热性能,促进了接近金具处护套的热量散失,同时伞套部位增大了污秽散热表面积,较之其他部位温度更低,这导致了涂污绝缘子发热最高的部位既不在绝缘子端部也不在绝缘子伞套位置,而是出现在了第1、2片伞之间(见图16)。整体涂污复合绝缘子最大发热部位较湿热老化复合绝缘子更靠近中部,也是工程中复合绝缘子干区首先出现位置^[24-26]。

3.3 试验室复合绝缘子异常发热试验

根据所建立的4种复合绝缘子模型,对试验用短串复合绝缘子采用同样的缺陷处理方式。其中1号绝缘子不做处理,2号绝缘子采用100℃浸泡水煮6天,3号绝缘子高压端伞裙涂污秽,对4号绝缘子进行整体涂污。

对1、2号复合绝缘子施加40 kV工频交流电压,对3、4号绝缘子施加40 kV直流电压。排除了湿

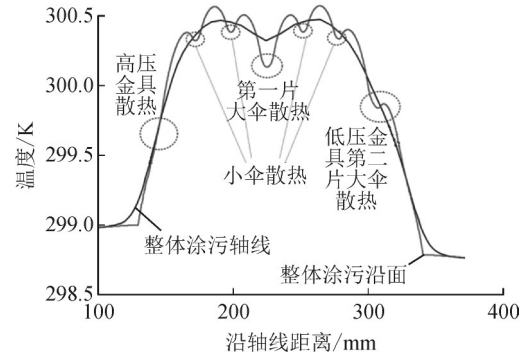


图 16 涂污绝缘子散热特性

Fig. 16 Heat dissipation characteristics of insulators with pollution

污在交流电下同样会出现的电介质损耗, 保证 3、4 号绝缘子热源仅来自于沿面电流所产生的焦耳热。加压时间为 40 min, 利用红外热像仪检测绝缘子发热状态, 得到不同复合绝缘子在加压情况下其整体温升随时间的变化规律。试验结果见图 17、18。

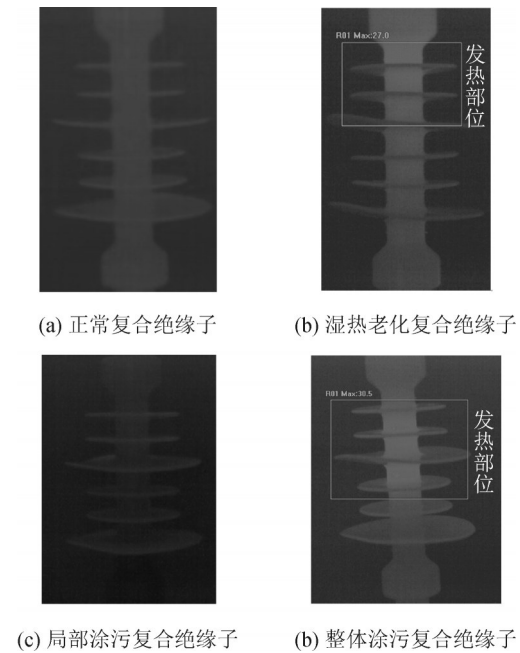


图 17 红外测试图

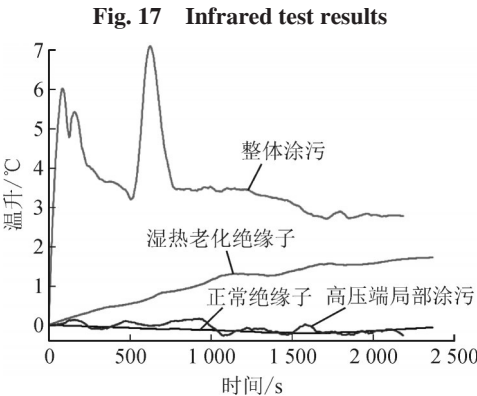


图 18 红外温升时域特性曲线

Fig. 18 Time-domain temperature rise characteristic curve

从 4 种绝缘子温升时域特性可以看出正常绝缘子与湿热老化绝缘子的温度时域特性曲线比较平稳, 未出现大幅度波动, 而局部涂污以及整体涂污复合绝缘子温度曲线波动剧烈, 造成这种现象的原因是人工涂污导致污秽并未完全均匀分布, 无法保证绝缘子护套每一处污秽的浓度、厚度完全相同, 同时由于污层包含一定水分, 在加压时随着水分散失其沿面电流会产生较大变化, 最终导致其沿面温升产生波动, 但当水分耗散降低, 沿面电流稳定时, 其温升也达到了稳定^[27-28]。

从图 17 可以看出, 湿热老化复合绝缘子发热位于高压端, 温升最大部位处于绝缘子靠近高压金具端部, 而整体涂污复合绝缘子则整个护套都出现了明显的温升, 且温升最大出现在高压端第 1、2 片小伞之间, 这与仿真结果相吻合。仿真模型计算结果与试验结果的对比见表 4。

表 4 结果对比

Table 4 Results contrast				
参数	正常绝缘子	老化绝缘子	局部涂污	整体涂污
仿真最大稳定温升/K	0.075 0	0.460 0	0.000 5	2.420 0
试验最大稳定温升/K	0.000 0	1.720 0	0.000 0	2.790 0
仿真温升最大位置	无	高压第 1 片伞—高压金具	无	高压第 1 片伞—第 2 片伞
试验温升最大位置	无	高压第 1 片伞—高压金具	无	高压第 1 片伞—第 2 片伞

从仿真与试验结果对比可以发现, 两者结果存在一致与不同之处。其中新绝缘子与局部涂污绝缘子在仿真与试验中均未出现温升, 而试验与仿真中湿热老化复合绝缘子与整体涂污复合绝缘子出现明显温升, 且最大温升位置一致, 但温升具体数值存在一定差异。

试验老化复合绝缘子温升大于仿真结果, 这一点可根据硅橡胶吸湿透湿特性进行推断说明, 复合绝缘子在湿热老化过程中水分透过硅橡胶, 会在硅橡胶护套与芯棒两者界面之间残余, 形成水膜薄层, 在交流电作用下, 不仅硅橡胶与芯棒产生了介质损耗, 界面上的水分也会由于极化而产生损耗, 因此导致了试验温升大于仿真温升^[29]。

整体涂污复合绝缘子试验温升略大于仿真结果, 造成这个差异的因素较多, 主要原因是由于人工涂污, 无法如同仿真建模一样使得污秽完全均匀

分布到复合绝缘子上,无法保证绝缘子每个涂污部位的污秽浓度完全相同,这一点也可以从红外试验的温升时域特性曲线可以看出,较薄的污秽层会使得复合绝缘子整体沿面电流降低,从而导致整体温升的下降。同时受环境温度以及加压时间影响也会导致温度出现变化。

4 结论

1)由试验所得材料参数进行电场仿真计算,结果表明湿热老化后的复合绝缘子,其护套沿面场强畸变增大,护套端部场强增大约15.6%。界面场强畸变程度降低,界面端部场强约降低了16.9%。

2)高压端,复合绝缘子界面属于单一介质问题,其电场主要由轴向电场决定,而沿面属于多介质配合问题,其电场主要由切向电场决定,介电常数比可表征复合绝缘子切向电场突变程度。

3)湿热老化复合绝缘子高压端在交流电压下产生了明显温升,温度梯度是从芯棒向外,介质损耗是导致温升的主要因素;最大温升位置位于高压端部场强与介损因素最大位置—高压金具与第1片伞之间,该位置在实际运行中极易发生热击穿。湿热老化复合绝缘子温升仿真结果远小于试验温升,表明除了芯棒与护套所产生的交流介损外,湿热老化复合绝缘子还存在其他热源。

4)整体涂污复合绝缘子在直流电压下出现明显温升,温度梯度是从外部护套向内,污秽电导损耗是导致温升的主要因素;最大温升位置为污秽干区起始位置—高压端第1、2片伞之间;在实际运行中,若绝缘子表面存在污秽,则该位置将最先形成干区。整体涂污复合绝缘子温升仿真与试验温升存在差异,这是由于试验时人工涂污不均匀,且在加压过程中,污秽存在水分散失,其电导参数会随着加压时间而改变。

文中基于试验测试所得材料参数对复合绝缘子进行了电热耦合仿真分析,仿真结果更能客观反映实际湿热环境下复合绝缘子的运行情况,研究结果可为复合绝缘子运维提供参考。

参考文献:

- [1] 徐康泰,屠幼萍,李天福,等.500 kV 交流岭深线路复合绝缘子的积污特性[J]. 高压电器,2014,50(12):1-6.
XU Kangtai, TU Youping, LI Tianfu, et al. Contamination characteristics of composite insulators on 500 kV Ling-Shen transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12):1-6.
- [2] 屠幼萍,陈静静,许 卓,等.长期运行复合绝缘子憎水性的非均匀变化特性[J]. 高电压技术,2013,39(6):1469-1475.
TU Youping, CHEN Jingjing, XU Zhuo, et al. Uneven change characteristic of composite insulators hydrophobicity in long-time service[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1469-1475.
- [3] 彭 静,赵 磊,井 谦,等.复合绝缘子用聚烯烃材料憎水性试验及分析[J]. 电瓷避雷器,2020(5):225-230.
PENG Jing, ZHAO Lei, JING Qian, et al. Experimental study and analysis on the hydrophobicity of polyolefin material for composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(5):225-230.
- [4] 袁文海,刘 彪,王 喆,等.基于引导滤波算法的绝缘子憎水性图像去噪研究[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(3):135-140.
YUAN Wenhai, LIU Biao, WANG Zhe, et al. Denoising of insulator hydrophobic image based on the guided filtering algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):135-140.
- [5] 段明明,王 聰,屠幼萍,等.复合绝缘子护套与芯棒界面粘接性及界面质量检测方法研究[J]. 高压电器,2016,52(9):132-137.
DUAN Mingming, WANG Cong, TU Youping, et al. Study of interface adhesion and interface quality detection between housing and core rod of composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):132-137.
- [6] 程养春,李成榕,陈 勉,等. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 电网技术,2005,29(5): 57-60.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, CHEN Mian, et al. Research on heating mechanism of composite insulator of high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 57-60.
- [7] 王祖林,黄 涛,刘 艳,等. 合成绝缘子故障的红外热像在线检测[J]. 电网技术,2003,27(2):17-20.
WANG Zulin, HUANG Tao, LIU Yan, et al. Reason analysis of decay-like aging for composite insulator[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 17-20.
- [8] 万书亭,冉 斌,王志欢. 基于振动响应多维联合特征的瓷支柱绝缘子故障识别方法[J]. 广东电力,2020,33(9):18-26.
WAN Shuting, RAN Bin, WANG Zhihuan. Fault identification method of porcelain post insulator based on combined characteristics of multi dimensional vibration response[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(9):18-26.
- [9] 王黎明,张中浩,成 立,等.复合绝缘子护套受潮对端部异常温升的影响[J]. 电网技术,2016,40(2):608-613.
WANG Liming, ZHANG Zhonghao, CHENG Li, et al. Effect of damp sheath on abnormal temperature rise at end of composite insulator[J]. Power Grid Technology, 2016, 40(2):608-613.

- [10] 魏远航, 陈润华. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 高电压技术, 2007, 32(5):25-28.
WEI Yuanhang, CHEN Ruihua. Research on abnormal heat of composite insulator in high voltage transmission power line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 32(5):25-28.
- [11] 王黎明, 付铠玮, 梅红伟, 等. 环境湿度对复合绝缘子红外测温的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(6):1955-1961.
WANG Liming, FU Kaiwei, MEI Hongwei, et al. Influence of environmental humidity on infrared measurement temperature of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6):1955-1961.
- [12] 蒋兴良, 任晓东, 韩兴波, 等. 不同布置方式对交流绝缘子串人工污秽闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4):896-905.
JIANG Xingliang, REN Xiaodong, HAN Xingbo, et al. Influence of different layout methods on artificial pollution flash-over characteristics of AC insulator strings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4):896-905.
- [13] 王平, 李抗, 耿江海, 等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14):93-98.
WANG Ping, LI Kang, GENG Jianghai, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14):93-98.
- [14] 甘艳, 阮江军, 邬雄. 有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J]. 高电压技术, 2006, 31(8):52-55.
GAN Yan, RUAN Jiangjun, WU Xiong. Static electric field numerical calculation of three dimensions geoelectric object[J]. High Voltage Engineering, 2006, 31(8):52-55.
- [15] 王巨丰, 韩力, 卢辛, 等. 基于气吹灭弧模型研究工频电弧发展及抑制机理[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 104-109.
WANG Jufeng, HAN Li, LU Xin, et al. Study on the development of power frequency arc and suppression mechanism based on gas-blown arc-extinguishing model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 104-109.
- [16] 刘向实. 污秽条件下复合绝缘子电场仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5):31-36.
LIU Xiangshi. Study on electric field distribution of composite insulator under pollution conditions[J]. Electric Porcelain Lightning Arrester, 2014(5):31-36.
- [17] 胡元潮, 逢春涛, 安韵竹, 等. 鸟粪对 35 kV 一体化防雷绝缘子电场分布影响研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 105-111.
HU Yuanchao, PANG Chuntao, AN Yunzhu, et al. Influence of bird manure on electric field distribution of 35 kV integrated lightning protection insulator[J]. Smart Power, 2020, 48(6):105-111.
- [18] 王振华. 淋雨复合支柱绝缘子电场分布仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
WANG Zhenhua. Electric field optimization of composite post insulators under wet condition[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [19] 夏欣, 淡淑恒, 李翔宇. RTV 涂层对 10 kV 绝缘子电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2020(1):136-141.
XIA Xin, DAN Shuheng, LI Xiangyu. Influence of RTV coating on the electric field distribution of 10 kV insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):136-141.
- [20] LIU Ying, ZHANG Shendong, CAO Xiaolong, et al. Simulation of electric field distribution in the XLPE insulation of a 320 kV DC cable under steady and time-varying states[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3):954-964.
- [21] 梁曦东, 高岩峰. 复合绝缘子酥朽断裂研究(一): 酥朽断裂的主要特征、定义及判据[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4778-4786.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng. Study on decay-like fracture of composite insulator: Part I: The principal character, definition and criterion of decay-like fracture[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4778-4786.
- [22] PIHERA J, MARTINEK P, KLASNA J, et al. Partial discharges of thermally and electrically aged insulation[C]// IEEE Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. Virginia Beach, VA, USA: IEEE, 2009: 39-42.
- [23] BOUHAOUCE M, MEKHALDI A, TEGUAR M. Improvement of electric field distribution by integrating composite insulators in a 400 kV AC double circuit line in Algeria[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6):3549-3558.
- [24] LIU Ying, ZHANG Shendong, CAO Xiaolong, et al. Simulation of electric field distribution in the XLPE insulation of a 320 kV DC cable under steady and time-varying states[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3):954-964.
- [25] 谢从珍, 刘珊, 刘芹, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴向电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4):922-928.
XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):922-928.
- [26] 邓维, 史志强, 刘卫东, 等. 电位分布法带电检测 500 kV 氧化锌避雷器内部缺陷的研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 23-28.
DENG Wei, SHI Zhiqiang, LIU Weidong, et al. Fault diagnosis of 500 kV MOA based on electric field and potential distribution characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):23-28.

- quench detection and protection method for a superconducting cable based on distributed optical fiber temperature measurement technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14):76-84
- [35] 王雪菲, 李京, 陈平, 等. 基于行波波形综合相似度比较的电缆故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1):51-59.
WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping, et al. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1):51-59.
- [36] 张宏亮, 张丝钰, 刘鹏, 等. 高温下纳米氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的载流子特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12):3814-3823.
ZHANG Hongliang, ZHANG Siyu, LIU Peng, et al. Characteristics of charge carrier of epoxy resin based nanocomposites filled with graphene oxide at high temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12):3814-3823.
- [37] 虞艳强. 微乳液法 SiO₂ 纳米粒子合成的介电谱原位监测及生长机理探究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
YU Yanqiang. In situ monitoring via dielectric spectroscopy and particle growth mechanism investigation on the synthesis of silica nanoparticles with microemulsion method [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [38] 查俊伟, 田娅娅, 刘雪洁, 等. 本征型耐高温聚酰亚胺储能电介质研究进展[J]. 高电压技术, 2021, 47(5):1759-1770.
ZHA Junwei, TIAN Yaya, LIU Xuejie, et al. Research progress of intrinsic high temperature resistant polyimide for energy storage dielectrics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1759-1770.
- [39] 李化, 方田, 张晨晨. 电容器级新型储能电介质的储电性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2):54-58.
LI Hua, FANG Tian, ZHANG Chenchen. Study on electrical storage performance of capacitor level new energy storage dielectrics[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2):54-58.
- [40] 姜允鹏. 聚乙烯绝缘材料电导与空间电荷特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
JIANG Yunpeng. Conductance and space charge characteristics of polyethylene insulation materials[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- 李光茂(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压设备管理及状态评价工作(E-mail: lgm19870621@126.com)。
周鸿铃(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压设备试验研究。
-
- (上接第 39 页)
- [27] WANG R, XIE C Z, LUO S K, et al. The influence mechanism of nanoparticles on the dielectric properties of epoxy resin[J]. RSC Adv., 2019, 9(34):19648-19656.
- [28] WANG R, XIE C Z, ZENG L L, et al. Thermal decomposition behavior and kinetics of nanocomposites at low-modified ZnO content[J]. RSC Adv., 2019, 9(2):790-800.
- [29] AHMADI M, ANSARI R, ROUHI S. Fracture behavior of the carbon nanotube/carbon fiber/polymer multiscale composites under bending test - A stochastic finite element method[J]. Mechanics of Advanced Materials & Structures, 2018, 26(13):1-9.
- [30] ZHANG Xian, ZHANG Pengcheng, YANG Qingxin, et al. Magnetic shielding design and analysis for wireless charging coupler of electric vehicles based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):71-79.
- 刘宇(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压设备试验研究及状态评价研究(E-mail: liuyu0703@gzps.corp.csg)。
李光茂(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压设备管理及状态评价工作(E-mail: lgm19870621@126.com)。
朱晨(1995—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压设备试验研究及状态评价研究。
杨森(1989—), 男, 本科, 从事电力设备预防性试验、状态检测研究。
周鸿铃(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压设备试验研究。
莫文雄(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 高压设备技术管理及试验研究。