

# 高压开关柜用介电功能梯度绝缘隔板电场调控特性分析

沈海波<sup>1</sup>, 卞秋野<sup>1</sup>, 孙永健<sup>2</sup>, 史德生<sup>1</sup>, 郭振伟<sup>1</sup>

(1. 国网山东省电力公司利津县供电公司, 山东 东营 257400;

2. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257000)

**摘要:**针对高压开关柜中绝缘隔板电场分布不均匀、局部电场畸变严重容易导致绝缘故障的问题,将介电功能梯度材料引入到绝缘隔板的制备中,提出了内部绝缘结构优化和表面绝缘结构优化两种优化方案。通过改变材料的介电常数上限、绝缘隔板厚度以及表面涂层厚度等参数进行电场、温度场仿真计算,对比分析其对电场分布优化效果的影响,最后对两种优化方案进行了仿真及介质损耗特性试验对比。结果表明:相较于传统的匀质绝缘隔板,在不考虑开关柜内部运行环境因素影响的条件下,改变内部绝缘结构和增加表面涂层都可以使沿面最大场强降低。当绝缘隔板厚度增加到 12 mm 时电场优化效果最优,沿面最大场强可降低 69.8%;当表面涂层厚度为 1 mm 时电场优化效果最优,沿面最大场强可降低 62.9%。通过仿真及试验对比证明,内部绝缘结构优化的隔板电场调控效果及绝缘性能更优。

**关键词:**高压开关柜;介电功能梯度;绝缘隔板;电场调控;介质损耗

## Analysis on electric field control characteristics of dielectric functional gradient insulation partitions for high voltage switchgear

SHEN Haibo<sup>1</sup>, BIAN Qiuye<sup>1</sup>, SUN Yongjian<sup>2</sup>, SHI Desheng<sup>1</sup>, GUO Zhenwei<sup>1</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Lijin County Power Supply Company,

Dongying 257400, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Dongying Power Supply Company, Dongying 257000, China)

**Abstract:** In view of the problem of uneven electric field distribution and severe local electric field distortion in insulation partitions of high-voltage switchgear, dielectric functional gradient materials were introduced into the preparation of insulation partitions, and two optimization schemes, which are internal insulation structure optimization and surface insulation structure optimization, were proposed. By changing the upper limit of dielectric constant of material, the thickness of insulation partition, and the thickness of surface coating, electric field and temperature field simulation calculations were carried out to compare and analyze their effects on the optimization of electric field distribution. Finally, simulations and dielectric loss characteristics tests were conducted to compare the two optimization schemes. The results show that compared to the traditional homogeneous insulation partitions, changing the internal insulation structure and adding surface coatings can reduce the maximum field strength along the surface without considering the influence of internal operating environmental factors in the switchgear. When the thickness of insulation partition increases to 12 mm, the electric field optimization effect is optimal, and the maximum field strength along the surface can be reduced by 69.8%. When the surface coating thickness is 1 mm, the electric field optimization effect is optimal, and the maximum field strength along the surface can be reduced by 62.9%. Through simulation and experimental comparison, it is proved that the partition with optimized internal insulation structure has better electric field control effect and insulation performance.

**Key words:** high voltage switchgear; dielectric functional gradient; insulation partition; electric field regulation; dielectric loss

## 0 引言

随着电力系统向超高压/特高压、大容量、交直

流输电方向发展,高压开关柜向高电压、小型化以及紧凑型方向发展,对设备电气绝缘性能的要求日趋严苛,其运行过程中绝缘系统(特别是固体绝缘)故障造成的问题也更加突出<sup>[1-3]</sup>。传统绝缘构件的材料电导率、介电常数等无法实现连续过渡,导致局部电场容易发生畸变,引起设备内部局部放

**基金项目:**国网山东省电力公司科技项目资助,“应用于高盐雾环境的高压开关柜绝缘件制备技术研究”(520616230006)。

电,加快绝缘材料的老化,增大了高压开关柜出现绝缘故障的概率<sup>[4-6]</sup>。目前高压开关柜中的绝缘隔板制备主要采用SMC材料,相较于环氧树脂而言,SMC材料绝缘性能更好且强度高、耐腐蚀,但在高压开关柜实际运行中发现,SMC绝缘隔板也会出现断裂或表面击穿故障<sup>[7-9]</sup>。因此研究性能优异的绝缘材料,优化绝缘装置及构件的绝缘结构,对提高高压开关柜的运行可靠性具有重要作用。

近年来,有研究将功能梯度材料(functionally graded materials,FGM)概念应用于电气领域<sup>[10-12]</sup>,通过改变绝缘材料的介电特性(电导率/介电常数)来调控电场分布,达到缓解局部场强过大、降低闪络电压的目的<sup>[13-15]</sup>。文献[16-18]提出了表面介电功能梯度绝缘子的概念,即不改变绝缘子几何结构的条件下,在绝缘子表面增加介电梯度层,从而能达到提升电场均匀度和降低闪络电压的目的。文献[19]分别对体梯度和表面梯度绝缘子进行了介电参数分布优化设计,对比了体梯度和表面梯度之间的优化效果并对其中影响优化效果的因素进行了分析。然而国内外的研究大多是针对介电梯度绝缘子的优化及分析<sup>[20-21]</sup>,对介电梯度绝缘隔板电场调控特性的研究相对较少<sup>[22-23]</sup>。

本文以高压开关柜绝缘隔板为研究对象,基于FGM调控电场分布机理建立绝缘隔板几何模型,对其电场、温度场进行仿真计算。研究改善电场分布不均匀的两种方案,一种是通过改变绝缘隔板厚度以及介电常数上限来优化内部绝缘结构,一种是通过改变表面涂层厚度以及表面电导率来优化表面绝缘结构,对比分析两种方案对绝缘隔板电场分布的调控效果。在此基础上制作出两种绝缘隔板的试样,并通过试验的方法分析对比其介质损耗特性。

## 1 介电功能梯度绝缘隔板调控电场分布机理分析及模型建立

### 1.1 功能梯度材料调控电场分布机理分析

按照调控的介电参数,可将FGM分为两种类型:介电常数FGM( $\epsilon$ -FGM)和电导率FGM( $\gamma$ -FGM),通过高斯定理等可以推导出 $\epsilon$ -FGM调控电场分布的机理。以图1中的绝缘隔板为例,施加实际工频电压和雷击电压,在不考虑电导影响的前提下,将介质电场设为静电场。

图1中, $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ 分别为介质1和介质2的介电常

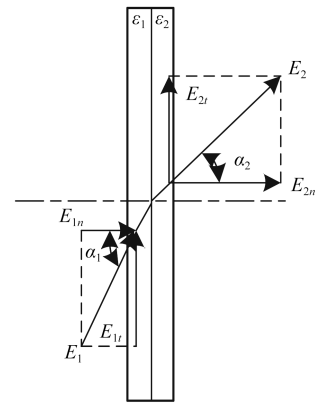


图1 双层介质结构绝缘隔板

Fig.1 Double layer dielectric structure insulation partition

数; $E_1$ 和 $E_2$ 分别为介质1和介质2的电场强度; $\alpha_1$ 为 $E_1$ 与分界面垂线的夹角; $\alpha_2$ 为 $E_2$ 与分界面垂线的夹角。由于介质分界面上不存在自由电荷,则分界面两侧电通密度 $D$ 的法向分量连续,分界面两侧电场强度 $E$ 的切向分量连续<sup>[24]</sup>,可得式(1)~(2)。

$$D_{2n} = D_{1n} \quad (1)$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $D_{1n}$ 、 $D_{2n}$ 为分界面两侧电通密度 $D$ 的法向分量; $E_{1t}$ 、 $E_{2t}$ 为分界面两侧电场强度 $E$ 的切向分量。

$D_1$ 、 $D_2$ 分别为介质分界面两侧的电通密度,由于 $D_1 = \epsilon_1 E_1$ 和 $D_2 = \epsilon_2 E_2$ ,根据式(1)、式(2)可以得到 $E_1 \sin \alpha_1 = E_2 \sin \alpha_2$ 、 $\epsilon_1 E_1 \cos \alpha_1 = \epsilon_2 E_2 \cos \alpha_2$ ,两式相除,可得式(3)。

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (3)$$

因此当绝缘隔板和空气的分界面不与电极表面垂直时,位于介质交界面与电极表面夹角 $<90^\circ$ 的一侧,介电常数较小的介质中等位线出现压缩现象,场强升高。

可以通过控制绝缘隔板的介电常数梯度分布来调控电场分布,绝缘隔板的介电常数分布可通过调节不同介电常数叠层( $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\dots$ 、 $d_i$ )的介电常数来实现。在由 $i$ 层电介质叠层制备出的长方体中,施加交流电压 $U$ ,在隔板表面分得的最大场强如式(4)所示。

$$E_{i,\max} = U \cdot \frac{\epsilon_i}{d_i} \quad (4)$$

式(4)中: $d_i$ 为第 $i$ 层叠层的厚度; $\epsilon_i$ 为第 $i$ 层绝缘隔板的介电常数; $E_{i,\max}$ 为第 $i$ 层电介质叠层制备的长方体的表面最大场强。

因此,调控电介质径向介电常数分布可以实现

对整个绝缘隔板沿面电场分布的优化。在电场强度大的区域采用高介电常数的电介质，在电场强度小的区域采用低介电常数的电介质，使场强分布更加均匀。

### 1.2 建立高压开关柜绝缘隔板几何模型

以 10 kV 高压开关柜为例，在实际开关柜中，母线室结构复杂，柜体上绝缘子的安装孔、穿墙套管等结构剖分计算难度大，但对计算结果影响不大可以忽略不计，因此建立简化的 10 kV 高压开关柜母线室模型，如图 2 所示。

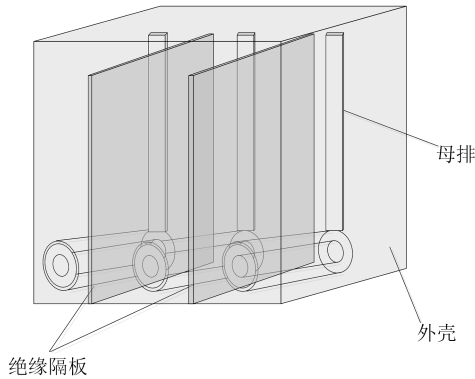


图 2 10 kV 高压开关柜母线室几何模型  
Fig.2 Geometric model of 10 kV high voltage switch compartment

对母线室几何模型设定电场计算的边界条件，由于母排正常运行工况下电压幅值为 14.1 kV，将 ABC 相母排电压分别设置为 0、14.1 kV、0，开关柜外壳设置为接地。剩下的所有内部边界设置为连续，其余外部边界设置为电绝缘。

本文对绝缘隔板的优化提出了内部绝缘结构优化和表面绝缘结构优化两种方案，以 10 kV 高压开关柜母线室中的绝缘隔板为对象展开研究。将绝缘隔板简化为长方形薄板，建立几何仿真模型如图 3 所示，整个模型置于空气中(介电常数为 1)，传统的绝缘隔板相对介电常数  $\epsilon$  是均匀的，其值设为 5。

图 3(a)为传统的匀质绝缘隔板模型，长、宽、高分别为 400、6、600 mm。在绝缘隔板内部绝缘结构优化中，采用叠层制备的方法将绝缘隔板均匀分为  $M$  个等厚度的叠层，每层的介电常数为  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_M$ ，如图 3(b)所示。在绝缘隔板表面绝缘结构优化中，绝缘隔板左右两面都增加一层涂层，将其均匀分为  $M$  个等厚度、平行于隔板的叠层，每层的相对介电常数为  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_M$ ，如图 3(c)所示。在优化过程中，每层

的介电常数是一定的。

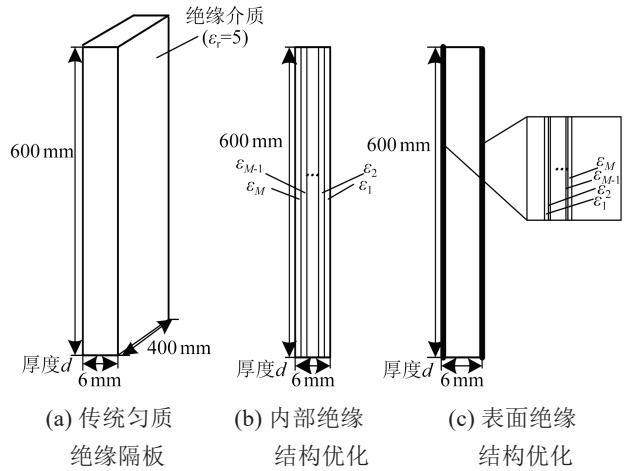


图 3 绝缘隔板仿真模型

Fig.3 Simulation model of insulation partition

## 2 绝缘隔板内部绝缘结构优化效果分析

### 2.1 相对介电常数对电场调控的优化效果分析

材料的介电常数是影响绝缘隔板电场分布的重要因素，一般来说材料的介电常数都是不变的，但是利用叠层制备的方法可以改变材料的介电常数上限值。设绝缘隔板厚度  $d=6$  mm，介电常数下限为 5，令相对介电常数上限  $\epsilon_{\text{rmax}}$  变化范围为 5~200。通过比较绝缘隔板表面最大场强  $E_{\text{max}}$  的大小来反映电场调控的效果，仿真结果如图 4 所示，图中  $\epsilon_{\text{rmax}}=5$  对应优化前的传统绝缘隔板，此时绝缘隔板表面最大场强为 6.27 kV/mm。由图 4 可知，相对介电常数上限  $\epsilon_{\text{rmax}}$  的值越大，绝缘隔板表面最大场强  $E_{\text{max}}$  越小。当  $\epsilon_{\text{rmax}}=20$  时， $E_{\text{max}}$  降为 3.56 kV/mm，比优

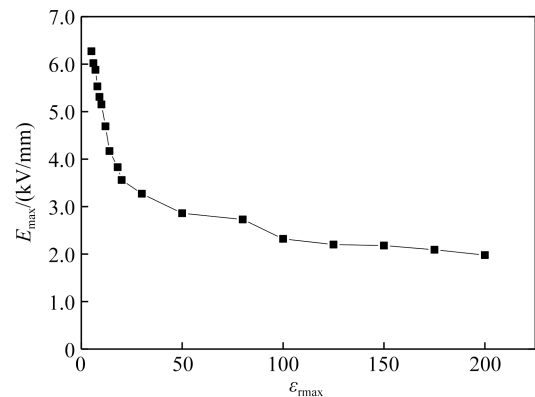


图 4 相对介电常数上限对绝缘隔板表面最大场强  $E_{\text{max}}$  的影响

Fig.4 Effect of upper limit of relative dielectric constant on the maximum field strength  $E_{\text{max}}$  on the surface of insulation partition

化前降低了 41.7%；当  $\epsilon_{\text{rmax}}=50$  时， $E_{\text{max}}$  降为 2.86 kV/mm，比优化前降低了 54.3%；继续增加  $\epsilon_{\text{rmax}}$  的值到 100 时， $E_{\text{max}}$  降为 2.32 kV/mm，比优化前降低了 62.9%，而且接近优化阈值，继续增加  $\epsilon_{\text{rmax}}$  的值， $E_{\text{max}}$  不再大幅降低。总之，增大相对介电常数对绝缘隔板的电场分布具有显著的优化效果。

## 2.2 绝缘隔板厚度对电场调控的优化效果分析

绝缘隔板厚度是优化梯度绝缘及调控电场分布的影响因素之一，通过增加叠层厚度来增加绝缘隔板厚度，分析隔板厚度对其电场分布的影响。保持介电常数下限为 5，介电常数上限为 100，叠层数为 13，初始厚度设为 6 mm，逐渐增加叠层的厚度到 16 mm，仿真结果如图 5 所示。图中  $d=6$  mm 对应优化前的传统匀质绝缘隔板，此时绝缘隔板表面最大场强为 6.27 kV/mm。

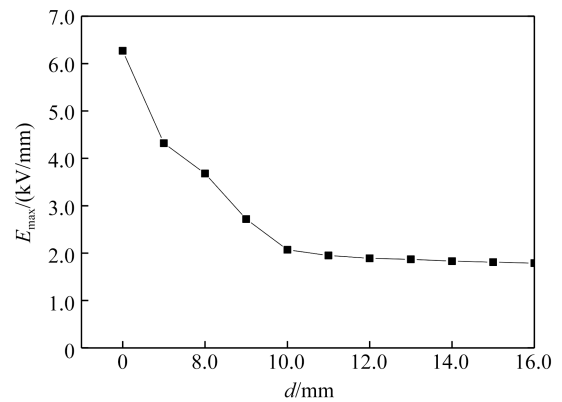
由图 5(a)可以看出，当绝缘隔板厚度  $d$  逐渐增加时，绝缘隔板的表面最大场强  $E_{\text{max}}$  逐渐降低。当  $d=10$  mm 时， $E_{\text{max}}$  已降至 2.07 kV/mm，与优化前相比降低了 66.9%，具有明显的优化效果；当  $d=12$  mm 时，表面最大场强  $E_{\text{max}}$  降为 1.89 kV/mm，与优化前相比降低了 69.8%，并且逐渐接近阈值，继续增加厚度  $d$ ， $E_{\text{max}}$  不再大幅降低。

图 5(b)为绝缘隔板优化前的开关柜母线室电场分布图，由图可知，靠近触头盒区域和母排区域的绝缘隔板电场分布较集中，图 5(c)为图 5(b)中切面所在位置的绝缘隔板截面电场云图，可以更好地观察到绝缘隔板上的电场分布。由图 5(c)可知，不同介电常数材料交界处的电场强度会升高。这是由于不同材料分界面处的电位移矢量是连续的，而材料交界处的介电常数会产生突变，导致此处的电场出现畸变。当不同介质厚度增加时，分界面处的电场畸变现象会被抑制。此外，由图 5(c)可知，绝缘隔板电场分布的均匀程度随隔板厚度  $d$  的增加而提高。

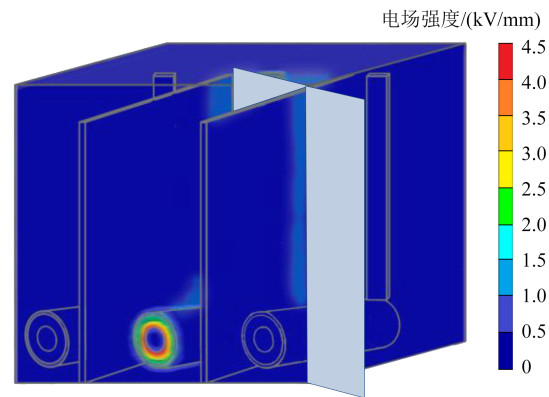
## 2.3 绝缘隔板厚度和相对介电常数上限对电场优化的综合影响

2.1 节和 2.2 节分别研究了相对介电常数上限和绝缘隔板厚度对电场调控效果的影响，但两个因素对电场的优化效果会互相影响，因此使  $\epsilon_{\text{rmax}}$  和  $d$  两个因素同时改变，研究其对绝缘隔板电场优化的综合影响，仿真结果如图 6 所示。

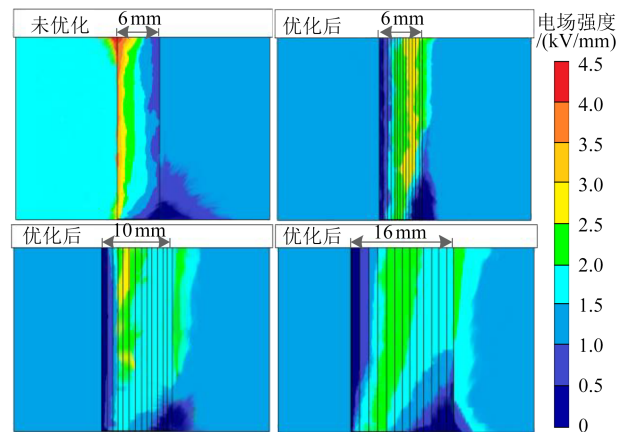
由图 6 可知，从表面最大场强  $E_{\text{max}}$  的下降效果来看，随着一个因素  $\epsilon_{\text{rmax}}$  (或  $d$ ) 的值增加，若要达到



(a) 表面最大场强  $E_{\text{max}}$



(b) 母线室电场分布



(c) 绝缘隔板电场云图

图 5 绝缘隔板厚度  $d$  对电场调控的优化效果

Fig.5 Optimization effect of insulation partition thickness  $d$  on the electric field regulation

更显著的优化效果，另一个因素  $d$  (或  $\epsilon_{\text{rmax}}$ ) 的值也要相应增加；当  $\epsilon_{\text{rmax}}$  和  $d$  两个因素同时改变时， $E_{\text{max}}$  的下降速度比改变单个因素时更快。

## 3 绝缘隔板表面绝缘结构优化效果分析

### 3.1 绝缘隔板表面涂层厚度对电场调控的优化效果分析

表面涂层厚度  $d_0$  是影响电场调控优化效果的

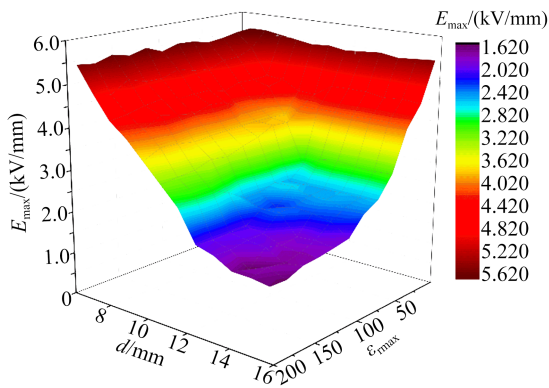


图6  $\epsilon_{rmax}$  和  $d$  对电场优化的综合影响

Fig.6 Comprehensive influence of  $\epsilon_{rmax}$  and  $d$  on the electric field optimization

一个关键因素。本文通过增加表面涂层叠层厚度来改变绝缘隔板表面涂层厚度  $d_0$  (范围为 0.01~3 mm, 占绝缘隔板厚度  $d$  的 0.3%~100%), 设相对介电常数下限为 5, 上限  $\epsilon_{rmax}$  为 100, 通过仿真计算分析表面涂层厚度  $d_0$  对电场的优化效果, 结果如图 7 所示。

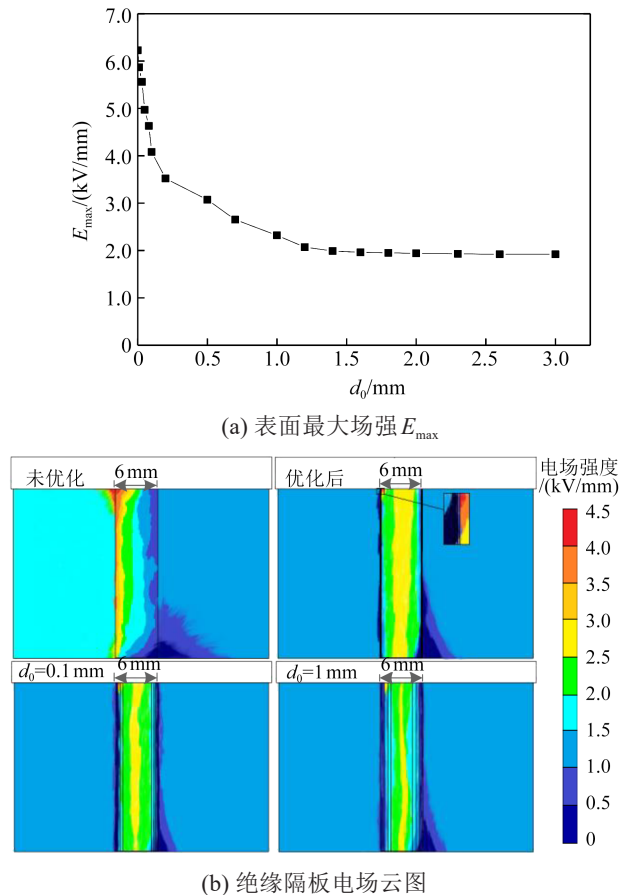


图7 表面涂层厚度  $d_0$  对电场调控的优化效果

Fig.7 Optimization effect of surface coating thickness  $d_0$  on the electric field regulation

从图 7(a)可以看出, 表面涂层厚度  $d_0$  越大 (与绝缘隔板厚度的比值越大), 绝缘隔板表面最大场强越小。当  $d_0=0.01$  mm (占隔板厚度的 0.3%) 时, 优化后的绝缘隔板表面最大场强为 5.87 kV/mm, 比优化前降低了 5.7%; 当  $d_0=0.1$  mm (占隔板厚度的 3%) 时, 表面最大场强为 4.08 kV/mm, 比优化前降低了 34.5%; 当  $d_0=1$  mm (占隔板厚度的 30%) 时, 表面最大场强为 2.32 kV/mm, 比优化前降低了 62.9%, 并逐渐达到饱和; 随着涂层厚度  $d_0$  的继续增加, 表面最大场强不再明显减小。

由图 7(b)可知, 与内部绝缘结构优化相似, 表面绝缘结构优化的叠层分界面处也会出现电场增强现象, 但随着表面涂层厚度的增加, 该现象会得到抑制, 且绝缘隔板电场分布的均匀程度也有所提高。

### 3.2 表面电导率对电场调控的优化效果分析

高压开关柜中绝缘隔板的表面电导率也是影响其电场分布的主要因素。由于表面电导率受温度的影响较大, 本文在室温 298 K 的条件下, 考虑热传导、热辐射和热对流 3 种传热过程对绝缘隔板进行温度场分布仿真计算。图 8 为在室温 298 K 下加压使元件初始发热和达到稳态时绝缘隔板内部及周围的温度分布, 可以看出隔板上有明显的温度差。电导率会随温度升高而增大, 不同温度梯度会影响绝缘隔板的沿面电场分布。

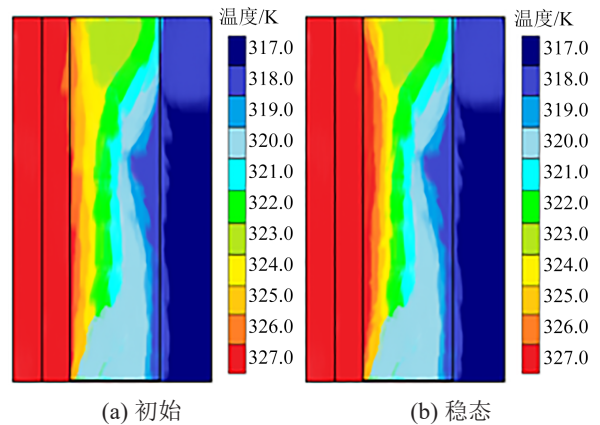


图8 室温 298 K 下绝缘隔板内部及周围温度分布

Fig.8 Temperature distribution inside and around insulation partition under 298 K

本节对绝缘隔板进行表面涂层, 先对传统绝缘隔板表面进行打磨处理, 然后将环氧树脂纳米复合涂层涂覆在绝缘隔板表面, 以达到提高表面电导率和均匀场强的目的。控制相对介电常数上限  $\epsilon_{rmax}$  为

100, 下限  $\epsilon_{\min}$  为 5, 初始厚度  $d$  设为 6 mm, 表面涂层厚度  $d_0$  为 1 mm,  $x$  为沿面距离, 通过改变其表面电导率来改善沿面电场分布。在室温 298 K 条件下不同电导率的绝缘隔板沿面电场分布如图 9 所示。由图 9 可以看出, 在  $x$  小于 0.5 mm 时, 绝缘隔板的表面电导率为 0.1 pS/m 时, 其沿面最大场强最小, 且与表面电导率为 1 pS/m、10 pS/m 时相比场强分布更加均匀。考虑温度对表面电导率的影响, 保持表面电导率为 0.1 pS/m 时, 在不同环境温度下绝缘隔板的沿面电场分布如图 10 所示。由图 10 可以看出, 表面电导率受温度影响明显, 环境温度越高, 绝缘隔板的沿面最大场强越高, 电场分布越不均匀, 可控性差。

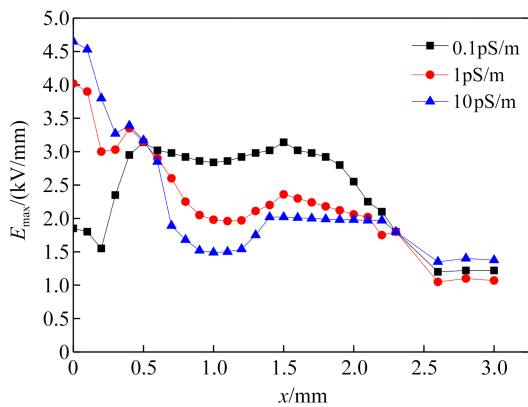


图 9 室温 298 K 下不同电导率的绝缘隔板沿面电场分布  
Fig.9 Electric field distribution along the surface of insulation partition with different conductivities at 298 K

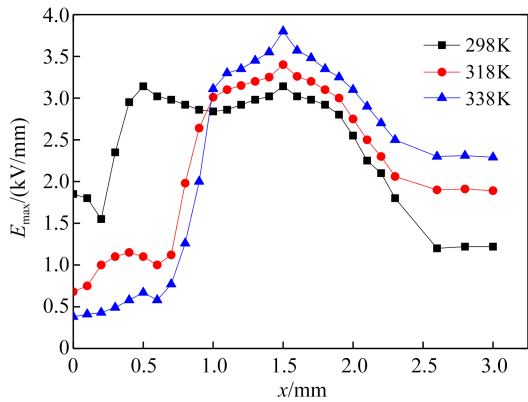


图 10 表面电导率为 0.1 pS/m 时不同环境温度下的绝缘隔板沿面电场分布  
Fig.10 Distribution of electric field along the surface of insulation partition with 0.1 pS/m of surface conductivity at different environmental temperatures

### 3.3 绝缘隔板表面涂层厚度和表面电导率对电场优化的综合影响

由上文分析可知, 改变绝缘隔板表面涂层厚度

$d_0$  和表面电导率  $\gamma$  都会影响绝缘隔板表面电场的优化效果, 其中电导率  $\gamma$  对电场分布的优化效果受温度影响明显, 可调控性差。考虑到这两个因素对优化效果的影响会相互制约, 综合考虑  $\gamma$  和  $d_0$  对绝缘隔板表面电场优化的影响, 仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知, 在电导率  $\gamma$  和涂层厚度  $d_0$  同时变化时, 表面最大场强变化主要受涂层厚度  $d_0$  的影响, 随着  $d_0$  的增加, 表面最大场强逐渐减小, 达到饱和阈值之后  $E_{\max}$  下降幅度大幅减小。

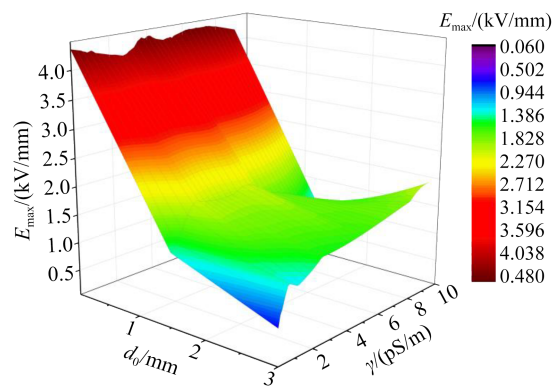


图 11  $\gamma$  和  $d_0$  对电场优化的综合影响  
Fig.11 Comprehensive effect of  $\gamma$  and  $d_0$  on the electric field optimization

## 4 绝缘隔板内部绝缘结构优化与表面绝缘结构优化的仿真及试验对比

### 4.1 电场调控效果仿真分析

本节对绝缘隔板内部绝缘结构及表面绝缘结构的电场优化效果进行对比分析, 研究两种方案调控电场效果的差异。将  $\epsilon_{\max}$  控制在 5~200, 改变绝缘隔板厚度  $d$  以及表面涂层厚度  $d_0$ , 对比分析两者对电场优化效果的差异, 结果如图 12 所示。

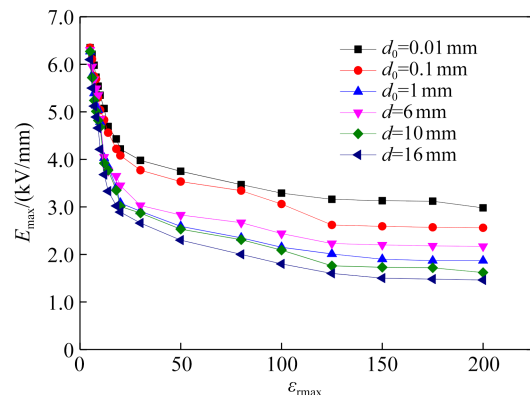


图 12  $\epsilon_{\max}$ 、 $d$  以及  $d_0$  对电场优化效果差异的影响  
Fig.12 Influence of  $\epsilon_{\max}$ ,  $d$ , and  $d_0$  on the difference in electric field optimization effect

由图 12 可知,随着  $\epsilon_{rmax}$  的改变,可以发现:①当  $\epsilon_{rmax} < 10$  时,内部绝缘结构优化后绝缘隔板的表面最大场强  $E_{max}$  均大于 4.68 kV/mm,具有明显的优化效果;②  $\epsilon_{rmax}$  取值在 10~100 范围内时,  $E_{max}$  最高为 4.68 kV/mm,最低可达到 2.09 kV/mm,且  $E_{max}$  的降低速率逐渐减慢;③  $\epsilon_{rmax} > 100$  时,两种方案调控电场的效果趋于最优,随着  $\epsilon_{rmax}$  的增加,  $E_{max}$  不再明显降低。

从图 12 还可以看出,随着绝缘隔板厚度  $d$  和表面涂层厚度  $d_0$  的改变,可以发现:①当  $d > 10$  mm 时,不管  $\epsilon_{rmax}$  取何值,改变内部绝缘结构的  $E_{max}$  都小于改变表面绝缘结构的  $E_{max}$ ;②当  $\epsilon_{rmax}$  取值在 10~100 范围内时,如果表面涂层厚度  $d_0 > 0.1$  mm,则两者的  $E_{max}$  差异较小,当表面涂层厚度  $d_0 < 0.1$  mm 时,内部绝缘结构优化效果大于表面绝缘结构优化效果,两者的  $E_{max}$  差异较大。

考虑到在高湿度环境中,空气中的水分子在电场的作用下会发生极化,改变原有的电场分布,使绝缘隔板的绝缘性能受到一定程度的影响。选取  $d = 12$  mm 的绝缘隔板和  $d_0 = 1$  mm 的绝缘隔板,设相对介电常数下限为 5,上限  $\epsilon_{rmax}$  为 100,研究改变环境湿度对最大击穿场强的影响,结果如图 13 所示。

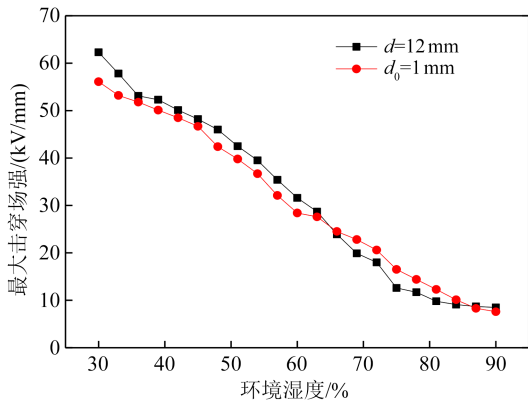


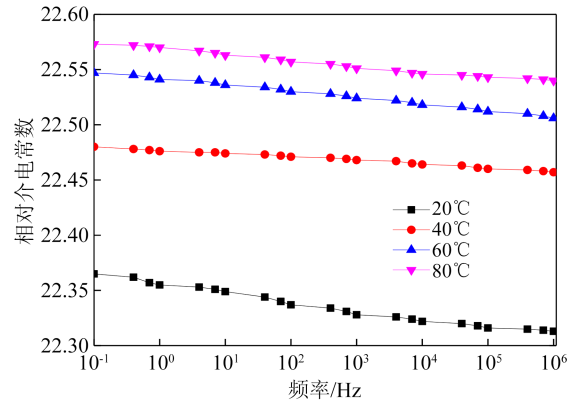
图 13 环境湿度对绝缘隔板最大击穿场强的影响  
Fig.13 Influence of environmental humidity on the maximum breakdown field strength of insulation partitions

由图 13 可知,两种绝缘隔板的最大击穿场强随环境湿度增大而降低,环境湿度为 90% 时,  $d = 12$  mm 的绝缘隔板和  $d_0 = 1$  mm 的绝缘隔板最大击穿场强相比环境湿度为 30% 时分别降低了 86.3% 和 86.5%,在高湿度环境下其绝缘性能相近。

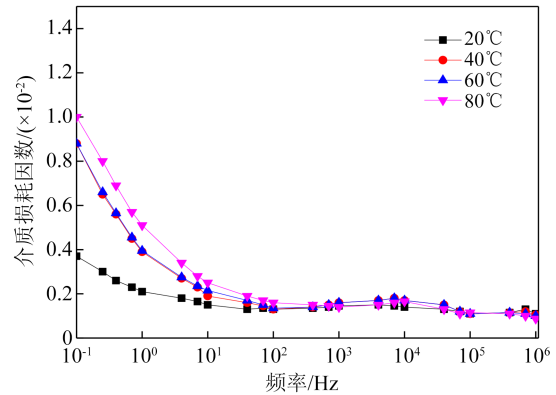
#### 4.2 介质损耗特性试验分析

以仿真得到的最优数据为依据制作出试样 A

(内部绝缘结构优化)和 B(表面绝缘结构优化),A 试样的相对介电常数上限  $\epsilon_{rmax} = 23.2$  (绝缘隔板厚度  $d = 12$  mm),B 试样的相对介电常数上限  $\epsilon_{rmax} = 37.4$  (涂层厚度  $d_0 = 1$  mm)。对两种试样进行烘干并用无水乙醇擦拭后再进行宽频介电谱试验,测试温度为 20~80℃,频率为  $10^{-1} \sim 10^6$  Hz,测试过程中在试样最中间处取样,结果如图 14~15 所示。



(a) 相对介电常数



(b) 介质损耗因数

图 14 绝缘隔板试样 A 的介电谱

Fig.14 Dielectric spectra of insulation partition sample A

由图 14(a)、图 15(a)可知,绝缘隔板 A、B 试样的相对介电常数  $\epsilon_r$  随着温度的升高而增大。同时  $\epsilon_r$  随着频率的升高而减小,但减小幅度不大。B 试样的  $\epsilon_r$  大于 A 试样,随温度和频率的变化,两者  $\epsilon_r$  的变化趋势基本一致。

由图 14(b)、图 15(b)可知,绝缘隔板 A、B 试样的介质损耗因数  $\tan\delta$  均在频率低时较大,且随温度的升高而增大,随频率升高而减小。当频率  $< 10$  Hz 时,  $\tan\delta$  受温度影响较大,且随频率的升高  $\tan\delta$  减小的速率相对较快。当频率为  $10^2 \sim 10^5$  Hz 时,温度和频率变化时,  $\tan\delta$  几乎不变且有一个不明显的损耗峰。绝缘隔板 A、B 试样的  $\tan\delta$  随温度和频率升高

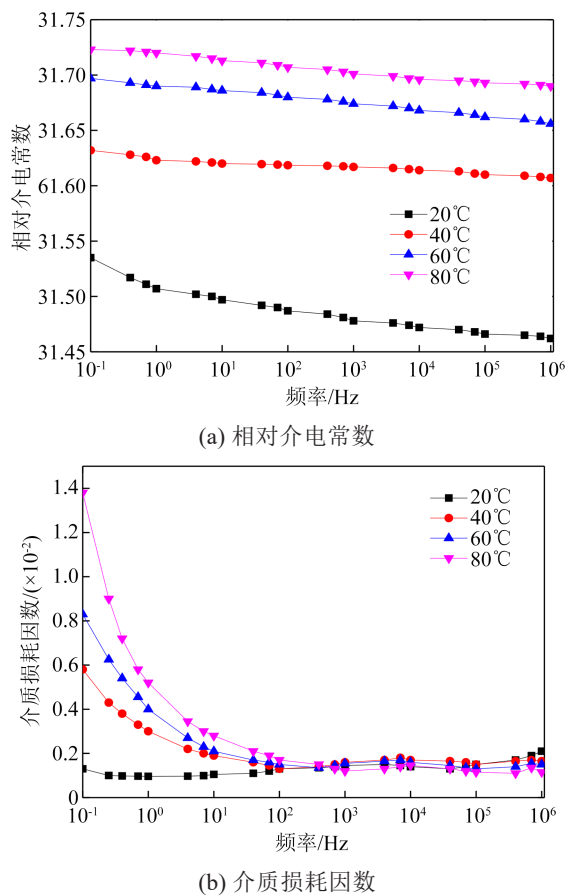


图15 绝缘隔板试样B的介电谱

Fig.15 Dielectric spectra of insulation partition sample B

的变化趋势一致,但随温度升高B试样 $\tan\delta$ 增大的幅度相对A试样较大,且当频率升高时, $\tan\delta$ 减小的速率快。

## 5 结论

本文基于FGM调控电场分布机理,对高压开关柜绝缘隔板模型进行了内部和表面绝缘结构优化,对比分析了电场调控优化效果,得到如下结论:

(1)相比于传统的匀质绝缘隔板,改变内部绝缘结构的介电梯度绝缘隔板表面最大场强 $E_{\max}$ 最大可降低69.8%(此时绝缘隔板厚度为12 mm),改变表面绝缘结构的介电梯度绝缘隔板 $E_{\max}$ 最大可降低62.9%(此时表面涂层厚度为1 mm),使电场分布更加均匀。在相同湿度环境条件下,两者绝缘性能相近。

(2)对绝缘隔板电场分布优化起关键作用的因素为绝缘隔板厚度 $d$ 、介电常数上限 $\epsilon_{\max}$ 和表面涂层厚度 $d_0$ 。随着 $d$ 、 $\epsilon_{\max}$ 或 $d_0$ 的增大,绝缘隔板的表面最大场强 $E_{\max}$ 会逐渐减小,并在达到一定阈值后趋

于饱和。

(3)与表面绝缘结构优化方案相比,内部绝缘结构优化方案的电场调控效果更为明显。通过改变表面绝缘结构调控电场分布,当涂层厚度 $d_0 > 0.1$  mm时,表面绝缘结构优化与内部绝缘结构优化电场调控效果差异较小;而当涂层厚度 $d_0 < 0.1$  mm时,表面绝缘结构优化与内部绝缘结构优化电场调控效果差距较大。

(4)本文依据仿真计算所得结论制作出绝缘隔板试样,并进行了介质损耗特性分析,试验结果表明采用内部绝缘结构优化方案的绝缘隔板性能更优。

从实际生产的角度,选择改变绝缘隔板厚度 $d$ 、介电常数上限 $\epsilon_{\max}$ 还是表面涂层厚度 $d_0$ ,需要综合考虑多方面因素确定,例如制作工艺、材料特性、力学特性等。此外,选择改变绝缘隔板内部结构还是增加表面涂层优化电场均匀程度,也要考虑具体的实际应用决定。

## 参考文献 References

- [1] LI C, LIN C, HU J, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges-part I: charge transport and control strategy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018,25(4).
- [2] 吴泽华,田汇冬,靳守锋,等. 252 kV紧凑型GIL三相三支柱绝缘子绝缘结构设计与优化[J]. 高电压技术,2020,46(6):2030-2039.  
WU Z H, TIAN H D, JIN S F, et al. Insulation structure design and optimization of 252 kV compact GIL three phase three pillar insulators[J]. High Voltage Technology,2020,46(6):2030-2039.
- [3] 任士荣. 35 kV高压开关柜绝缘性能加强改造[J]. 冶金动力, 2020(12):16-17.  
REN S R. Improvement of insulation performance of 35 kV high voltage switchgear[J]. Metallurgical Power,2020(12):16-17.
- [4] 李进,梁虎成,杜伯学. 气体绝缘直流设备气固界面电场分布特性与调控方法研究进展[J]. 高电压技术,2019,45(8):2619-2628.  
LI J, LIANG H C, DU B X. Research progress on the distribution characteristics and control methods of gas-solid interface electric field in gas insulated DC equipment [J]. High Voltage Technology, 2019,45(8):2619-2628.
- [5] 郑小梅. 关于12 kV高压开关柜绝缘故障分析[J]. 新型工业化, 2021,11(1):116-117.  
ZHENG X M. Analysis of insulation faults in 12 kV high voltage switchgear[J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(1): 116-117.
- [6] 王井飞,张强,李祥斌,等. 特高压直流输电工程GIL三支柱绝缘子故障分析及改进措施[J]. 高压电器,2020,56(1):246-252.  
WANG J F, ZHANG Q, LI X B, et al. Fault analysis and improvement measures of GIL three pillar insulators in ultra high voltage

- direct current transmission projects[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(1):246-252.
- [7] 黎卫国,张长虹,杨旭,等. 500 kV GIL 三支柱绝缘子炸裂故障分析与防范措施[J]. 电瓷避雷器,2019(3):221-227.  
LI W G, ZHANG C H, YANG X, et al. Analysis and preventive measures of 500 kV GIL three post insulator explosion fault[J]. Insulators and Surge Arresters,2019(3):221-227.
- [8] 刘衍,尹桂来,龙国华,等. 应用理化分析探索 40.5 kV 开关柜绝缘隔板放电原因[J]. 高压电器,2019,55(9):222-229.  
LIU Y, YIN G L, LONG G H, et al. Exploring the causes of insulation partition discharge in 40.5 kV switchgear through physical and chemical analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 222-229.
- [9] 赵琳,王劲鹤,叶丽雅,等. 基于数值仿真的小型化开关柜绝缘件优化设计与布置[J]. 浙江电力,2019,38(3):25-31.  
ZHAO L, WANG S H, YE L Y, et al. Optimization design and layout of insulation components for miniaturized switchgear based on numerical simulation[J]. Zhejiang Electric Power,2019, 38(3):25-31.
- [10] 张冠军,李文栋,刘哲,等. 介电功能梯度材料在电气绝缘领域的研究进展[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):4232-4245.  
ZHANG G J, LI W D, LIU Z, et al. Research progress of dielectric functionally graded materials in the field of electrical insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4232-4245.
- [11] 李进,王泽华,陈允,等. 高压气体绝缘输电设备用功能梯度材料研究进展[J]. 高压技术,2020,46(7):2471-2477.  
LI J, WANG Z H, CHEN Y, et al. Research progress on functionally graded materials for high-voltage gas insulated transmission equipment [J]. High Voltage Engineering,2020,46(7):2471-2477.
- [12] LI J, LIANG H C, CHEN Y, et al. Promising functional graded materials for compact gaseous insulated switchgears/pipelines [J]. High Voltage,2020,5(3):231-240.
- [13] 李进,王雨帆,梁虎成,等. 高压直流 GIL 盆式绝缘子非线性电导参数优化[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):166-173.  
LI J, WANG Y F, LIANG H C, et al. Nonlinear conductivity parameter optimization of high voltage DC GIL basin insulators [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(1):166-173.
- [14] 谢珂,卢森微,邵春,等. 等离子体梯度氟化提升非均匀电场下环氧树脂沿面闪络性能的研究[J]. 绝缘材料,2023,56(10):75-83.  
XIE K, LU S W, SHAO C, et al. Study on the enhancement of surface flashover performance of epoxy resin under non-uniform electric field by plasma gradient fluorination[J]. Insulating Materials,2023,56(10):75-83.
- [15] 吴鹏,王静昕,雷战斐,等. 绝缘支撑用环氧树脂复合材料的空间电荷特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(10):66-74.  
WU P, WANG J X, LEI Z F, et al. Study on space charge characteristics of epoxy resin composite materials for insulation support[J]. Insulating Materials,2023,56(10):66-74.
- [16] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. Enhancing flashover performance of alumina/epoxy spacers by adaptive surface charge regulation using graded conductivity coating[J]. Nanotechnology,2020,31(36):364002.
- [17] 杜伯学,王泽华,李进,等. 表层介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化[J]. 高压技术,2020,46(5):1588-1595.  
DU B X, WANG Z H, LI J, et al. Optimization of dielectric constant distribution of surface dielectric functional gradient insulators[J]. High Voltage Engineering,2020,46(5):1588-1595.
- [18] LI W D, ZHAO J W, CHEN Y, et al. Surface insulation performance of 3D printed functionally graded insulator fabricated by active-mixing fused deposition modeling (AM-FDM) [C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China:IEEE,2020.
- [19] 尹昊阳,李文栋,郭旺,等. 体/表面介电功能梯度绝缘子的电场仿真及优化效果对比[J]. 高压技术,2022,48(9):3563-3573.  
YIN H Y, LI W D, GUO W, et al. Comparison of electric field simulation and optimization effects of bulk/surface dielectric functional gradient insulators[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(9):3563-3573.
- [20] HAYAKAWA N, MIYAJI Y, KOJIMA H, et al. Simulation on discharge inception voltage improvement of GIS spacer with permittivity graded materials ( $\epsilon$ -FGM) using flexible mixture casting method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1318-1323.
- [21] OCHIAI K, IZU A, OISHI R, et al. Fabrication of permittivity graded materials ( $\epsilon$ -FGM) by flexible mixture casting method [C]//2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico:IEEE,2018:578-581.
- [22] 孟珍政,常越,唐华超,等. 新型 420 kV 绝缘隔板绝缘性能研究[J]. 电气时代,2020(10):61-62.  
MENG Z Z, CHANG Y, TANG H C, et al. Study on the insulation performance of a new 420 kV insulation partition [J]. Electrical Times,2020(10):61-62.
- [23] 闫文博,黄超,易爱平,等. 一体化高压触发器绝缘隔板结构优化研究[J]. 现代应用物理,2023,14(1):56-62.  
YAN W B, HUANG C, YI A P, et al. Research on optimization of integrated high voltage trigger insulation partition structure [J]. Modern Applied Physics,2023,14(1):56-62.
- [24] 孙秋芹,郭晓和,张永涛,等. 基于介电功能梯度材料的盆式绝缘子电场分布优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(8):99-106.  
SUN Q Q, GUO X H, ZHANG Y T, et al. Optimization of electric field distribution in basin insulators based on dielectric functional gradient materials[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(8):99-106.

收稿日期:2023-10-20;修回日期:2024-01-05。

作者简介:

沈海波(1980-),男(汉族),山东东营人,高级工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究;

卞秋野(1987-),女(汉族),吉林长春人,高级工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究。