

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.018

电缆—架空线混联线路操作过电压下电缆中间接头绝缘特性及其优化方法研究

王瀚锋¹, 孙浩飞², 马许珩¹, 谈震¹, 王冲³, 李少斌¹

(1. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司, 西安 710032; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100;
3. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710048)

摘要: 电力电缆是电能传输和分配的关键媒介,对保障电网安全稳定运行具有重要意义。电缆中间接头是电缆系统故障多发点,为此文中开展了电缆—架空线混联线路过电压下中间接头绝缘特性研究。文中以西北某电缆—架空线混联线路为研究对象,对电缆中间接头电场开展研究,建立了电缆中间接头模型并仿真得到中间接头内部最大场强低于导体屏蔽击穿场强。由电场分布可知中间接头内部应力锥和高压屏蔽层附近电场变化明显,为了减小应力锥和高压屏蔽层周围最大场强,论文采用了蒙特卡罗算法对其材料参数进行了优化,采用单一控制变化,保持其它参数不变,对所研究的单一变量进行优化,将优化值和参数范围内特殊值综合比较得到最优值,优化结果表明:在参数范围内存在最优值,当应力锥相对介电常数取30,倾斜角度取10°时,半导体屏蔽层断口处电场最小;高压屏蔽层相对介电常数取20,屏蔽极半径取10 mm时,高压屏蔽层电场最小。

关键词: 电缆—架空线混联线路; 电缆中间接头; 电场分布; 优化; 蒙特卡罗法

Research on Insulation Characteristics and Optimization Methods of Cable Intermediate Joints Under Switching Overvoltage in Cable-overhead Hybrid Lines

WANG Hanfeng¹, SUN Haofei², MA Xuheng¹, TAN Zhen¹, WANG Chong³, LI Shaobin¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710032, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: Power cable is the critical medium for electric energy transmission and distribution, playing a vital role in ensuring safe and stable operation of power grid. Cable intermaridate joints are identified as the most vulnerable points prone to failures in cable systems. To address this issue, in this paper a research on the insulation characteristics of intermediate joints under overvoltage conditions in cable-overhead hybrid lines is performed. In this paper, a cable-overhead hybrid line in northwest of China is taken as the research object and the electric field of the cable intermediate joint is studied. The model of the cable intermediate joint is established and the simulation resultsthat the maximum field strength inside the intermediate joint is lower than the conductor shield breakdown field strength are obtained.It can be seen from the electric field distribution that the electric field near the stress cone and the high voltage shielding layer inside the intermediate joint changes obviously. For reducing the maximum field intensity around the stress cone and the high voltage shielding layer the Monte Carlo algorithm is adoptedin the paper to optimize the material parameters. A single control change is adopted, and other parameters remains unchanged to optimize the single variable under study. Furthermore, The optimized values are compared with the special values in the parameter range to get the optimal value. The optimization results show that the optimal values exist in the parameter range.

收稿日期:2026-05-12; 修回日期:2026-07-16

When the relative dielectric constant of the stress cone is 30 and the tilt angle is 10° , the electric field at the fracture of the semiconductor shield layer is the minimum. when the relative dielectric constant of the high voltage shield layer is 20 and the radius of the shield pole is 10 mm, the electric field of the high voltage shield layer is minimum.

Key words: cable-overhead line hybrid line; cable intermediate joint; electric field distribution; optimization; Monte Carlo algorithm

0 引言

电力电缆是电能传输和分配的关键媒介,因此电力电缆运行的安全性和可靠性对保障电力系统安全稳定运行至关重要。电缆中间接头是电缆系统中的重要组成部分,也是故障高发点。研究表明:电缆故障多发生于电缆中间接头上^[1-3],接头内部结构复杂,存在尖端、圆角等电场易聚集部位,需严密的电气密性和更高的抗外界干扰能力,电缆接头通常采用压接安装,存在机械损伤、应力集中和接触不良问题,这也是导致电缆接头故障高发的重要原因。因此开展电缆中间接头绝缘特性研究,掌握影响电缆中间接头绝缘特性影响因素及其变化规律,对提高接头可靠性具有重要意义^[4-8]。

针对电缆中间接头,国内外开展了许多相关研究,如武汉大学、广东电网等开展了110 kV交联聚乙烯电力电缆故障快速修复研究,使用GIS内锥插拔式快速接头并对接头内部部件进行优化设计,对应力锥和高压屏蔽极的参数取值分析电场得到了最优配合,研究结果表明应力锥与半导体屏蔽层相对介电常数比值越小越好^[9]。西安交通大学开展了 ± 320 kV直流电缆接头使用交联聚乙烯/三元乙丙橡胶材料时的击穿特性研究,研究结果表明电缆附件界面为击穿薄弱环节,最大电场出现在电缆绝缘靠近应力锥一侧^[10]。西安交通大学、厦门供电公司等还针对整体预制式、组合预制式两种电缆接头开展研究,结果显示组合预制式接头性能更佳,材料参数比尺寸对电场的影响更大^[11]。上述研究可有效帮助改善电缆中间接头绝缘特性,随着输电线路结构的变化给电力电缆线路的安全运行带来了不同的绝缘危害。频率高、衰减快的高频振荡过电压易在电缆绝缘层中引发局部放电,长期累积可能导致绝缘老化甚至击穿。而混联线路中谐振过电压在特定条件下会显著放大电压幅值,对电缆终端接头和中间接头的绝缘性能构成严重威胁,增加故障风险。针对新的过电压型式对电缆造成的危害,文中选取电缆—架空线中的电缆中间接头为研究对象,在得到混联线路操作过电压的条件下,开展电缆中

间接头绝缘特性的研究,分析接头绝缘性能影响因素,优化材料参数与结构,为电力电缆适应新形式过电压提供指导。

1 电缆中间接头电场仿真模型

1.1 330 kV 电缆—架空线混联线路过电压计算

330 kV 电缆—架空线混联线路接线图见图1。该混联线路中左侧为发电厂,右侧为变电站,在线路中还设有断路器、避雷器等设备,中间为电缆—架空线混联线路,两段电缆线之间有中间接头。330 kV 电缆—架空线混联线路仿真模型见图2,包括相位差 120° 的三相电源,频率为工频50 Hz;架空线选用J.Marti模型;电缆为单芯结构,线路选用Bergeron模型;断路器合闸时间为0.03 s^[12-18]。限于篇幅,建模过程不详述,只给出仿真模型和结果。

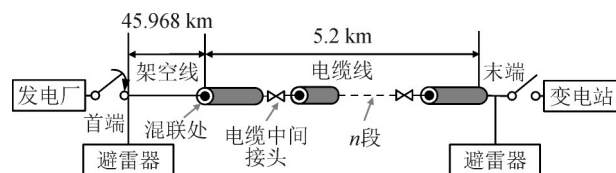


图1 330 kV 电缆—架空线混联线路接线图

Fig. 1 330 kV cable-overhead line hybrid wiring diagram

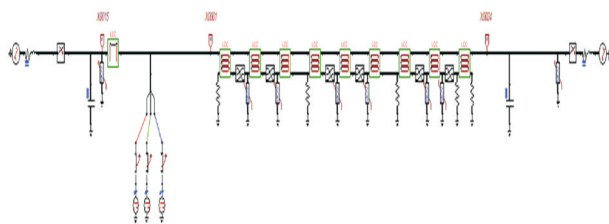


图2 330 kV 电缆—架空线混联线路仿真模型

Fig. 2 330 kV cable-overhead line hybrid line simulation model

根据该混联线路进行的操作过电压仿真计算见图3。使用行波法得到电缆操作过电压^[19-20],合闸操作过电压形式为

$$U_p(t) = A \cos(\omega t + \theta) + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \beta_i \cos(\omega_i t + \zeta_i) \quad (1)$$

式(1)中: A 为稳态分量振幅; A_i 为自由分量谐波振幅; ω 为工频; ω_i 为自由分量各谐波的振荡角频率。计算了不同操作情况下的过电压,在所有过

电压中,某一侧合闸时,30 ms附近过电压最大达到了613.2 kV,使用该值作为中间接头电场仿真初始条件。

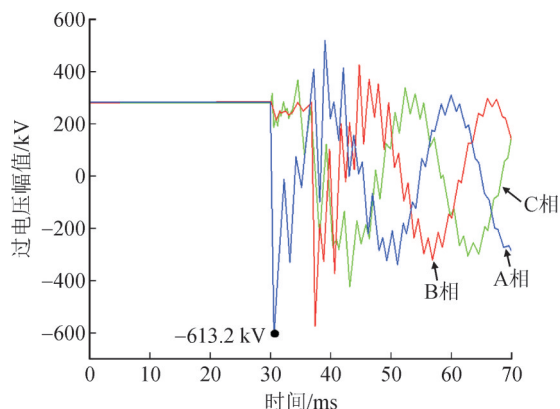


图3 混联线路三相重合闸波形图

Fig. 3 Hybrid line reclosing waveform diagram

1.2 330 kV 电缆接头结构

考虑到电缆长度远大于电缆中间接头的部分,忽略电缆端部的影响建立的电缆中间接头 1/4 切面见图4。电缆本体由电缆铜芯、电缆主绝缘、半导体屏蔽层、金属套、外护套组成,在中间接头内部还有空气腔、压接管、高压屏蔽层、应力锥、接头主绝缘层。对切面进行复制、翻转等操作来得到电缆中间接头三维模型见图5。

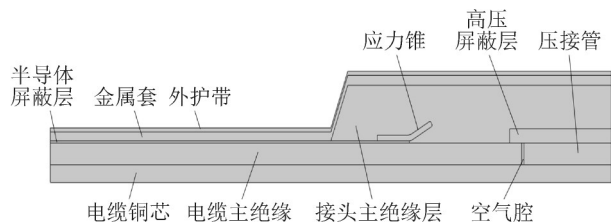


图4 电缆中间接头 1/4 切面图

Fig. 4 1/4 section diagram of cable intermediate joint

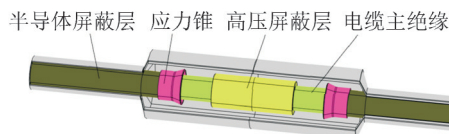


图5 电缆中间接头三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of cable joint

如图5所示,电缆终端的各组成材料在轴向上为各向同性均匀介质,忽略电缆和应力锥之间的各组成部分的接触电阻^[21-24]。

1.3 电缆接头电场计算模型

1) 电场控制方程。架空线路到电缆线路阻抗不同有折反射,考虑最大操作过电压下电缆中间接头绝缘性能,可当做静态场研究,建立静电场计算中间接头电场,麦克斯韦方程组为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: ∇ 为哈密顿算符; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, C/m^2 ; $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m ; ρ 为电荷体密度, C/m^3 ; ε 为电介质的介电常数, F/m 。金属护套和外半导体层接地。计算模型的材料属性见表1。

表1 电缆电场计算模型材料属性表

Table 1 Material attribute table of cable electric field calculation model

部件	相对介电常数	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
电缆铜芯	—	5.998×10^7
半导体屏蔽层	30.000	1.000×10^{-5}
电缆主绝缘层	2.300	1.000×10^{-13}
应力锥	4.200	—
高压屏蔽层	20.000	0.100
压接管	—	5.998×10^7
接头主绝缘层	1.006	1.000×10^{-13}
金属套	—	10.000
外护套	4.150	10.000
空气腔	1.000	0.000

2) 边界条件。由图2过电压仿真可知,中间接头电压初始条件为613.2 kV,静电场中两种介质界面上电势是连续的,各介质边界条件为

$$U = U_0 \quad (3)$$

3) 网格剖分。为提高电缆接头电场强度计算精度,对应力锥和高压屏蔽层的网格进行极细化剖分,电缆接头其余部分进行较细化剖分,电缆接头网格剖分图见图6。

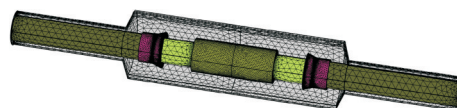


图6 电缆接头网格剖分图

Fig. 6 Cable joint meshing diagram

2 计算结果分析

2.1 中间接头电场分布

330 kV 电缆接头电场分布图见图7-10。由图7、8可知,最大电场强度出现在应力锥端部周围,达到了49.2 kV/mm,该混联线路电缆在导体屏蔽处的击穿场强为57.96 kV/mm,未被击穿,绝缘设计满足要求。由图8可知,电缆主绝缘层、应力锥、高压屏蔽层处的场强较高。应力锥局部电场、高压屏蔽层局部电场分布见图9、10。由图9可知,应力锥端部下方与半导体屏蔽层断口处场强较大,由图10可知,高压屏蔽层端部场强较大,电场畸变严重。

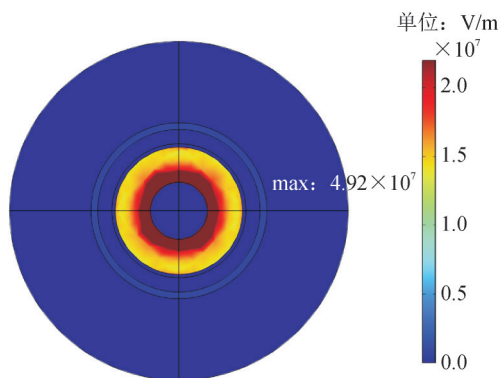


图7 电缆接头侧面电场分布图

Fig. 7 Three-dimensional side electric field distribution of cable joint

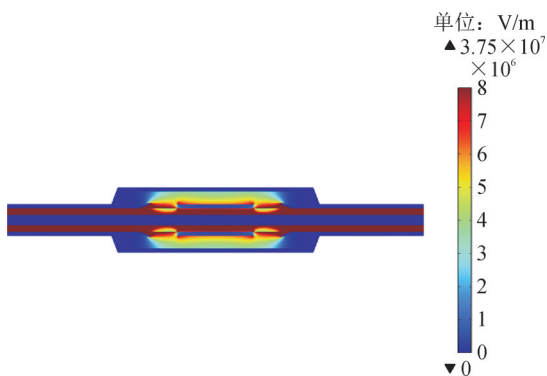


图8 电缆接头横截面电场分布图

Fig. 8 Electric field distribution in cross section of cable joint

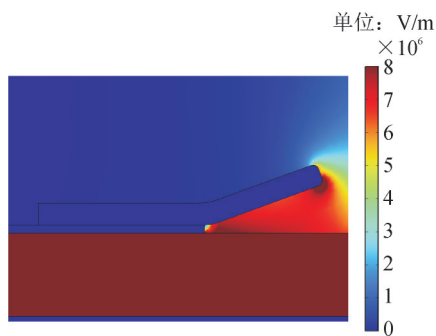


图9 应力锥局部电场分布图

Fig. 9 Local electric field distribution diagram of stress cone

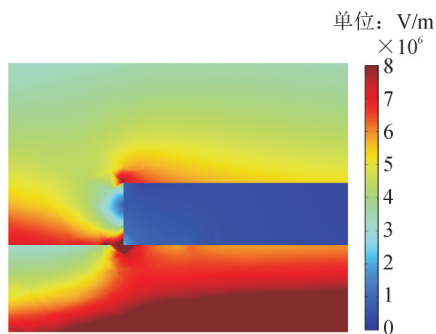


图10 高压屏蔽层局部电场分布图

Fig. 10 Local electric field distribution diagram of high voltage shielding layer

2.2 截面电场分布

选取电缆中间接头不同纵截面能更好地分析重要部件的电场特性,本次选取3个截面,各截面有不同绝缘层,各截面截点见图11。A截面(高压屏蔽层),B截面(应力锥、半导体屏蔽层),C截面(电缆主绝缘层)。截面A包括电缆铜芯、压接管、高压屏蔽层、接头主绝缘层、金属套、外护套,截面B包括电缆铜芯、电缆主绝缘层、半导体屏蔽层、应力锥、接头主绝缘、金属套、外护套,截面C包括电缆铜芯、电缆主绝缘层、半导体屏蔽层、金属护套、外护套。观察截面A的电场分布见图12。

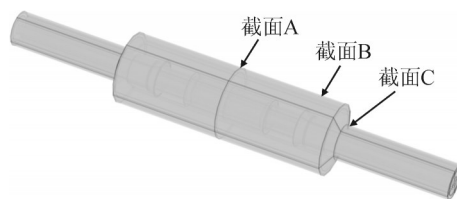


图11 电缆中间接头截点图

Fig. 11 Cable joint cut-off diagram

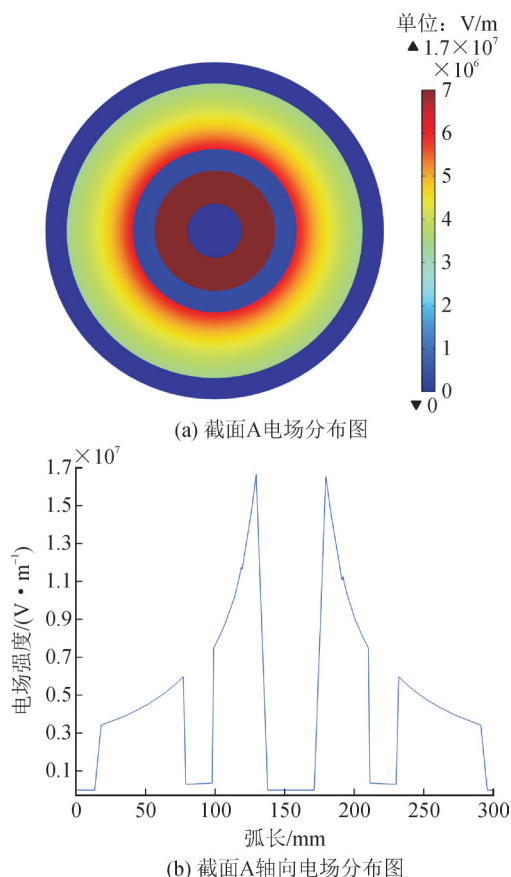


图12 电缆中间接头截面A电场分布

Fig. 12 Electric field distribution in section A of cable joint

截面A电场分布见图12(a),截面A轴向电场分布见图12(b),最大场强出现在铜芯导体附近,达到了17.0 kV/mm。这一数值远小于导体屏蔽击穿场强,表明铜芯导体附近的电场强度处于安全范围

内。在铜芯导体内部,电场强度为零,这是由于导体内部的电场分布受导体特性影响,从而在导体内部形成电场。在压接管处电场强度较大,然后逐渐向接头主绝缘层方向降低。这种逐渐降低的趋势表明电场在接头主绝缘层中逐渐分布,保持在可控范围内。由图 12(b)可知,电场强度在高压屏蔽层处急剧减小,在高压屏蔽层内部降至 0.4 kV/mm 左右。电缆中间接头截面 B 电场分布见图 13。

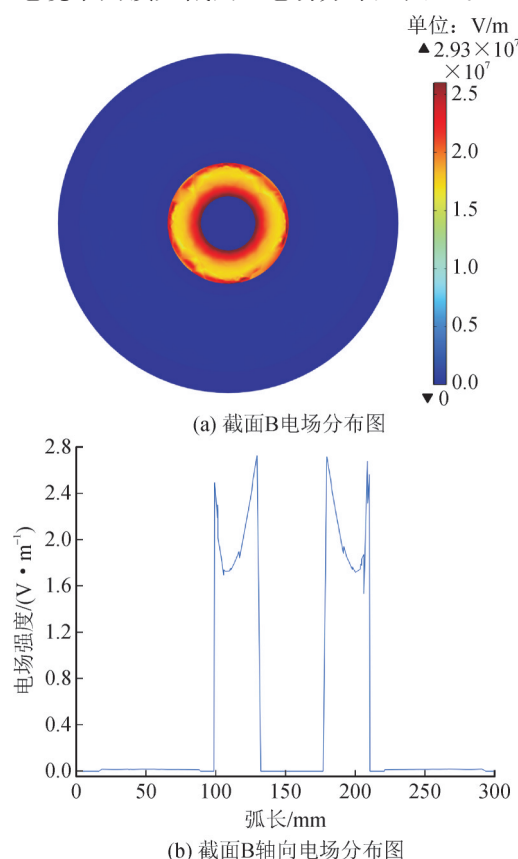


图 13 电缆中间接头截面 B 电场分布

Fig. 13 Electric field distribution in section B of cable joint

截面 B 场强最大值在半导体屏蔽层附近绝缘处,为 29.3 kV/mm,半导体屏蔽层与电缆主绝缘相对介电常数相差较大,电场易集中。在铜芯导体附近电场较大,达到了 20 kV/mm,应力锥屏蔽效果明显,在应力锥上方,电场较小为 0.7 kV/mm 左右,由图 13(b)可知,电场在电缆主绝缘层逐渐减小,到半导体屏蔽层断口处电场骤升。电缆中间接头截面 C 电场分布见图 14。

截面 C 为电缆截面,场强最大值在铜芯导体附近,为 31.4 kV/mm,相比于截面 A 与截面 B,截面 C 主要是电缆主绝缘层,半导体屏蔽层太薄屏蔽不明显,到金属套后电场降为 0。综上所述,电缆中间接头内部高压屏蔽层和应力锥对内部电场影响大,在高压屏蔽层内部电场骤降,在应力锥下方的半导体屏蔽层断口处电场较大,在设计中优化这两处的电场强度。

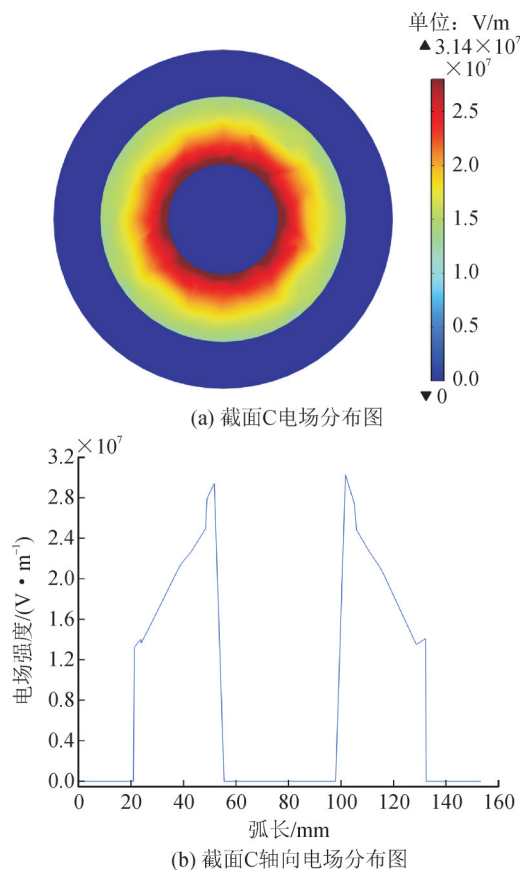


图 14 电缆中间接头截面 C 电场分布

Fig. 14 Electric field distribution in section C of cable joint

3 中间接头电场优化

3.1 蒙特卡罗法

由图 9、10 可知,影响中间接头分布的部件主要是应力锥和高压屏蔽层,由电场控制方程可知,相对介电常数会影响电场强度,为减小电场需对应力锥和高压屏蔽层相对介电常数进行优化。尖端部位面电荷密度较大,电场易集中导致电场强度大,故对应力锥倾斜角度和高压屏蔽极半径进行优化。改变应力锥参数时半导体屏蔽层断口处电场变化明显,改变高压屏蔽层参数时高压屏蔽层端口周围电场变化明显,优化参数见表 2。

表 2 优化部件参数表

Table 2 Optimize component parameter table

部件	优化参数	分析对象
应力锥	相对介电常数	半导体屏蔽层断口
应力锥	倾斜角度	半导体屏蔽层断口
高压屏蔽层	相对介电常数	高压屏蔽层
高压屏蔽层	高压屏蔽极半径	高压屏蔽层

本次优化的目的是在参数范围内选取最优值,形状参数的改变对周围电场影响复杂,蒙特卡罗法适用于处理高维、复杂问题,故文中使用蒙特卡罗

法进行参数优化。蒙特卡罗法生成大量随机样本,对这些样本进行独立随机样本并行计算,计算效率高,再根据样本结果得到最优的解^[25-32]。优化时和分析对象设置电场探针,使用蒙特卡罗求解器计算后能得到此探针电场分布。减小优化容差,增大计算次数可以得到更精确的解,设置迭代误差为 10^{-3} ,优化容差为0.01,计算次数设为200次,因为独立样本计算,每次计算迭代误差都需小于 10^{-3} ,计算200次后比较得到最优解。

使用控制变量法对单一变量进行优化,只对需要优化的参数计算最优值。先计算相对介电常数最优值,再使用此最优值计算形状参数的最优值,得到部件最优参数。具体步骤见图15。确定好材料参数范围,设置应力锥和高压屏蔽层探针,使用蒙特卡罗优化求解器计算参数范围内不同值下该探针的电场强度最大值,得到探针电场强度最大值达到最小时的参数解。再仿真计算参数范围内这些特殊点下应力锥和高压屏蔽层上电场分布,确定参数范围内最优值。

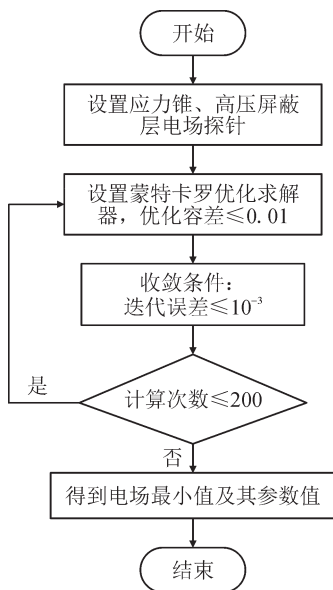


图15 优化流程图

Fig. 15 Optimization flow chart

3.2 应力锥最佳相对介电常数选择

应力锥和半导体屏蔽层紧密连接,材料不同介电常数不同,会影响其周围电场分布,而屏蔽层断口处电场较大,针对应力锥相对介电常数展开屏蔽层断口处电场特性研究。以半导体屏蔽层相对介电常数30为基准,改变应力锥相对介电常数,应力锥相对介电常数范围1~30,应力锥相对常数优化结果见图16。半导体屏蔽层断口处电场最大值随应力锥相对介电常数增大不断减小,且逐渐平稳,该范围内应力锥相对介电常数最优值为30,此时半导

体屏蔽层断口处电场最大值为15.2 kV/mm。

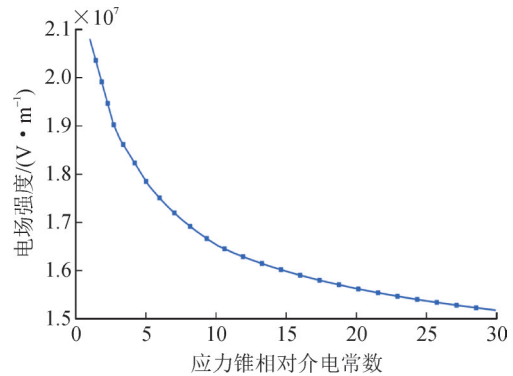
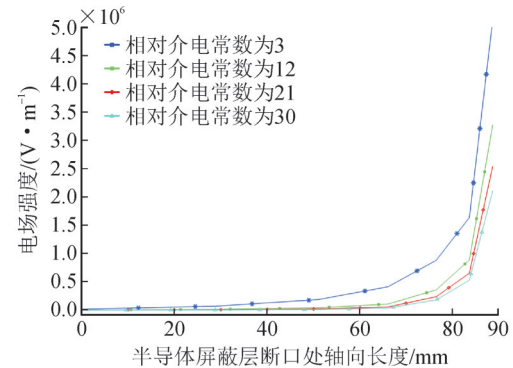


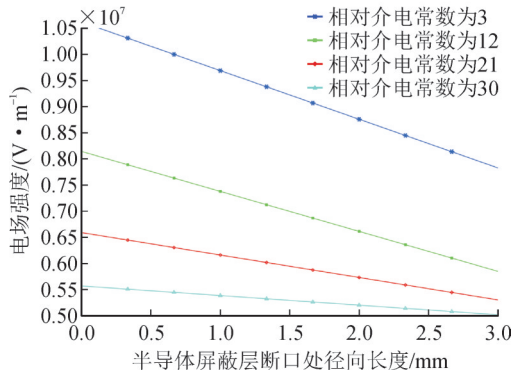
图16 应力锥不同介电常数时断口处电场最大值

Fig. 16 The maximum electric field at the fracture is obtained when the stress cone has different permittivity

选取得的参数最优值和特殊值进行电场研究,应力锥相对介电常数初值为3,优化最优值为30,在优化范围内再取两个点12和21进行比较,应力锥不同相对介电常数下半导体屏蔽层断口处轴向和径向电场分布见图17。由图17(a)可知,越靠近半导体屏蔽层断口处电场强度越大,且相对介电常数越大,在断口处电场最大值越小,由径向电场分布图可知,电场逐渐减小,应力锥相对介电常数越大,其径向电场越小。



(a) 轴向电场分布



(b) 径向电场分布

图17 应力锥不同介电常数时半导体表面电场分布

Fig. 17 Distribution of electric field on semiconductor surface with different permittivity of stress cone

由图17结果可知,应力锥相对介电常数在参数

范围内电场随介电常数增大而减小。对半导体屏蔽层断口处界面电场分布展开研究见图 18。由图 18 可知, 半导体屏蔽层断口处电场较大, 且断口处

底端电场强度比顶端大, 相对介电常数为 30 时断口处电场强度明显变小, 综上, 应力锥相对介电常数 30 为最佳选择。

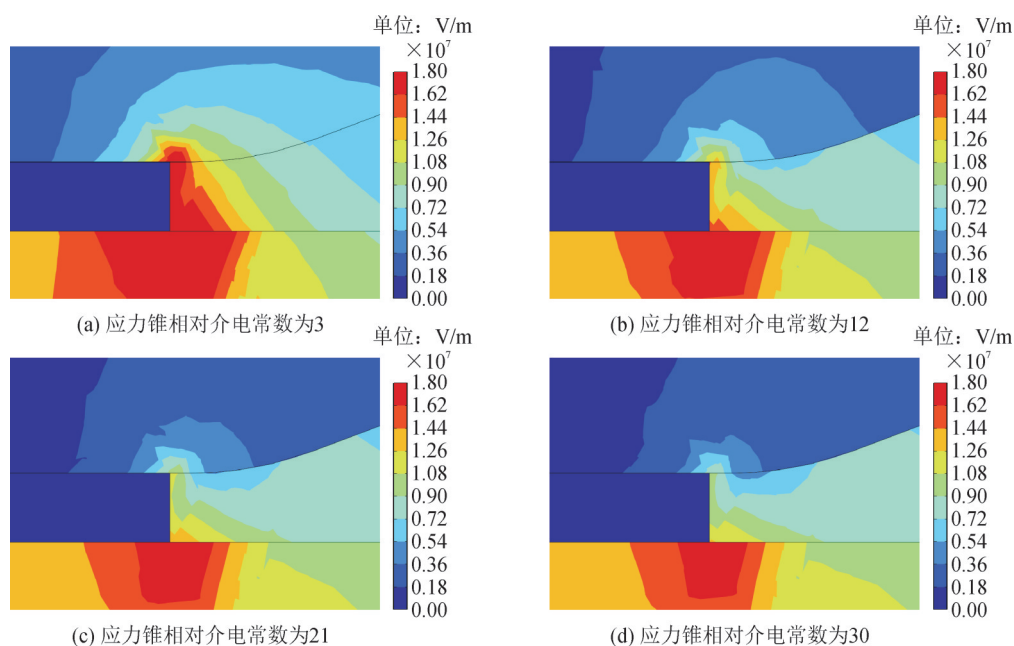


图 18 应力锥不同介电常数时半导体断口处电场分布图

Fig. 18 Electric field distribution at semiconductor fracture with different permittivity of stress cone

3.3 应力锥最佳倾斜角度选择

当应力锥相对介电常数为 30 时, 选择应力锥最佳倾斜角度。应力锥倾斜角度对断口处屏蔽效果有很大影响, 一般应力锥角度范围为 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 应力锥不同倾斜角度时断口处电场最大值见图 19。由图 19 可知, 所示角度为 10° 左右时半导体屏蔽层断口处电场强度最大值达到最小, 为 6.27 kV/mm , 倾斜角度 10° 之后, 断口处的电场强度最大值随角度增大而增大。

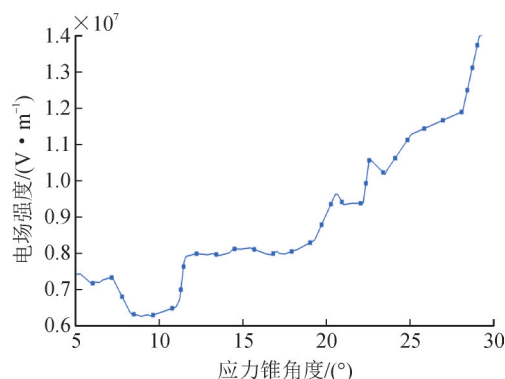


图 19 应力锥不同倾斜角度时断口处电场最大值

Fig. 19 The maximum value of electric field at fracture at different tilt angles of stress cone

由于断口处径向电场分布相差较大, 选取部分应力锥倾斜角度时半导体屏蔽层断口处电场分布

展开研究见图 20。由图 20 可知, 当应力锥倾斜角度变大时, 断口处电场逐渐变大, 且断口处与应力锥交点部位电场易聚集, 导致电场更大, 易发生事故。应力锥倾斜角度 10° 比角度为 5° 时电场更平滑更小。

半导体屏蔽层断口处径向电场分布见图 21。由图 21 可知, 应力锥角度为 30° 时断口处电场强度比其它角度要大很多, 应力锥角度为 5° 和 10° 时相对较小且平稳, 综合考虑半导体屏蔽层断口处界面电场分布及径向电场分布, 应力锥倾斜角度为 10° 最佳。

3.4 高压屏蔽层最佳相对介电常数选择

高压屏蔽层不同相对介电常数时表面和内部电场最大值见图 22。高压屏蔽层相对介电常数范围 $1 \sim 20$, 相对介电常数为 5 时高压屏蔽层表面电场最大值几乎不再改变, 但内部电场最大值还在随相对介电常数的增大而减小。

不同高压屏蔽层相对介电常数时电场分布见图 23。取范围边界 $1 \sim 20$, 取表面电场最大值特殊点 5 和范围中间的一个点, 由轴向和径向电场分布图可知在高压屏蔽层相对介电常数为 1 时电场较大, 在相对介电常数为 20 时电场最小, 相对介电常数为 5、10、20 时电场相差不大, 故最优值为 20。

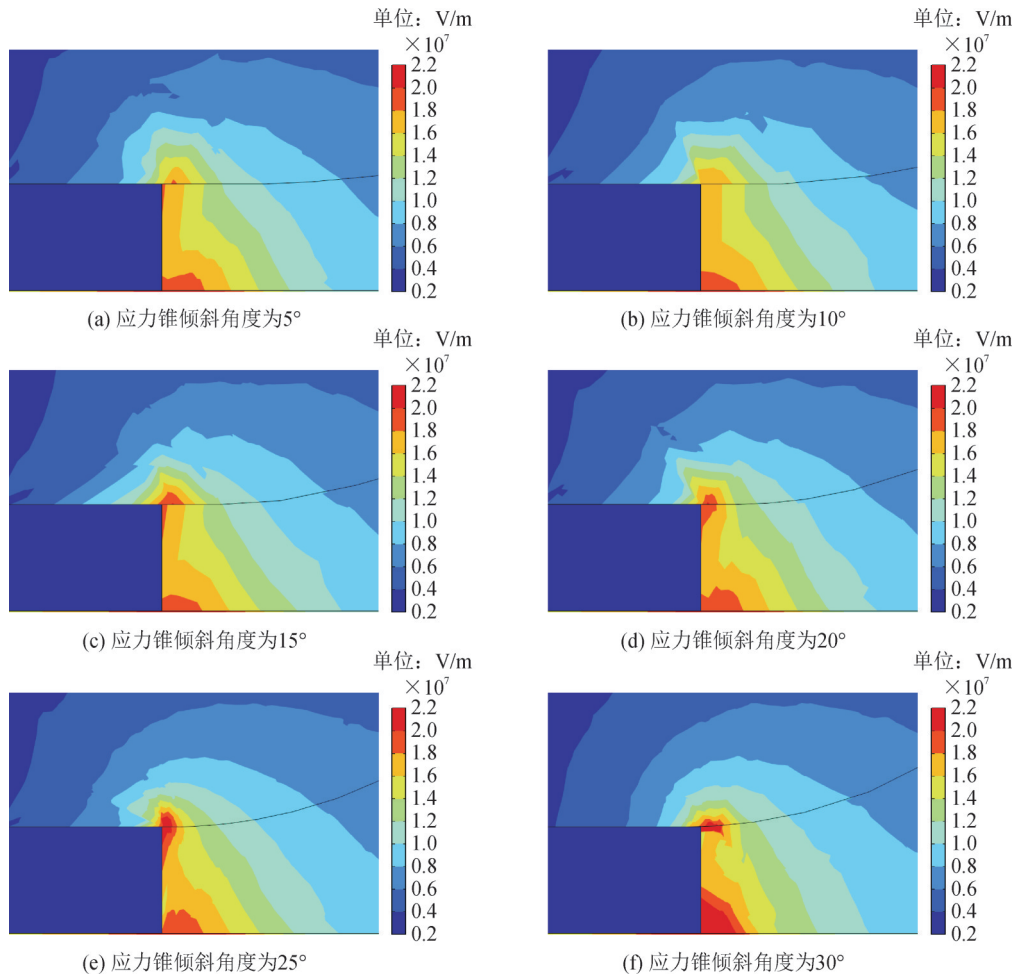


图20 半导体屏蔽层断口处界面电场分布图

Fig. 20 Diagram of the interfacial electric field distribution at the fracture of the semiconductor shielding layer

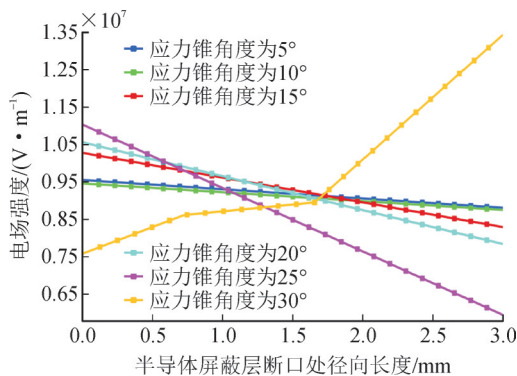


图21 半导体屏蔽层断口处径向电场分布

Fig. 21 Radial electric field distribution at the fracture of the semiconductor shielding layer

高压屏蔽层相对介电常数为1、5、10、20时高压屏蔽层处电场分布见图24。由图24可知,相对介电常数越大,内部电场越小,相对介电常数为1太小,屏蔽效果不明显,对周围电场影响不大,在相对介电常数为20时,在高压屏蔽层两端电场都较小,高压屏蔽层与电缆绝缘层相接处电场聚集,但电场强度较小,综上可知高压屏蔽层相对介电常数最优值为20。

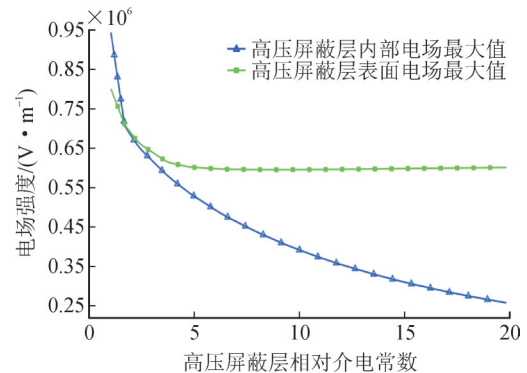


图22 高压屏蔽层不同相对介电常数时电场最大值

Fig. 22 The maximum value of electric field when the high voltage shielding layer is of different relative dielectric constant

3.5 高压屏蔽极最佳半径选择

当高压屏蔽层相对介电常数为20时,选择屏蔽极最佳半径。高压屏蔽层形状优化图见图25。高压屏蔽极半径范围为0~10 mm,屏蔽极半径为0 mm时为直角,大于0时为圆角,在半径为3 mm时,高压屏蔽层电场最大值达到最小,表面电场最大值达到最小,内部电场最大值变化不大。

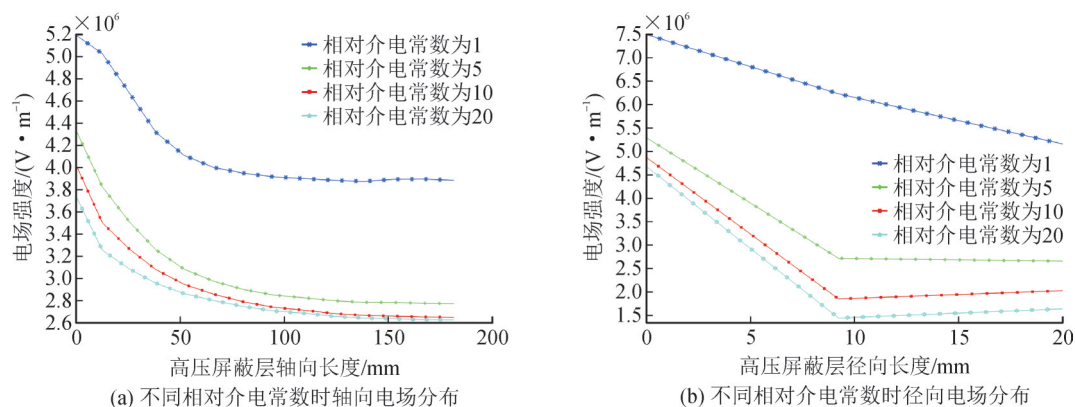


图 23 高压屏蔽层不同介电常数时表面电场分布

Fig. 23 Surface electric field distribution of high voltage shielding layer with different permittivity

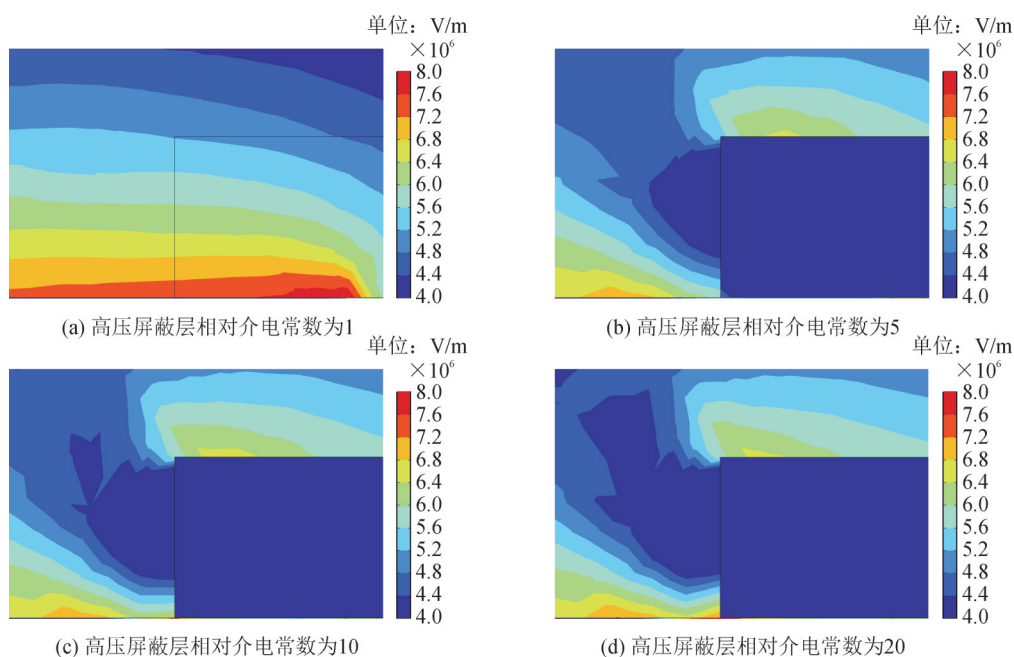


图 24 高压屏蔽层不同介电常数时电场分布图

Fig. 24 Electric field distribution of high voltage shielding layer with different permittivity

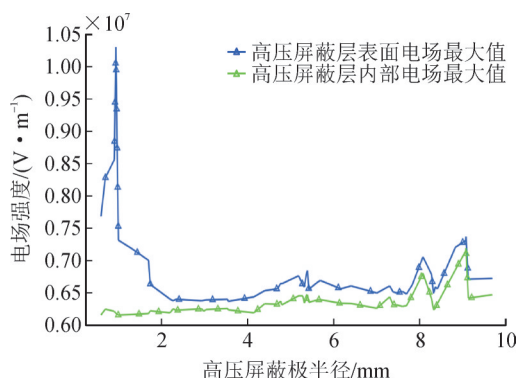


Fig. 25 The maximum value of electric field at different radii of high voltage shielding pole

选取高压屏蔽极半径为0、3、10 mm时高压屏蔽层上电场分布,在0 mm时屏蔽极为直角,电场分布见图26。由图26(a)可知3种情况下相差不大,由

图26(b)可知,高压屏蔽极半径为3 mm时端部电场较大,在10 mm时端部电场也较大,但是在高压屏蔽层与电缆主绝缘交汇处电场比端部大很多,且相差不大。

高压屏蔽极半径为0、3、6、10 mm时电场分布图见图27。屏蔽极为圆角时半径越大,其尖端电场分布更均匀,端部电场更小,屏蔽极半径为0 mm时,屏蔽极为直角,但高压屏蔽层三维模型为一空心圆柱,高压屏蔽极为直角时端部曲率半径小,电场易集中在端部,综上可知高压屏蔽极半径最优值为10 mm。

4 结论

建立330 kV电缆—架空线混联线路模型,计算三相重合闸时电缆侧操作过电压最高幅值达613.2 kV,

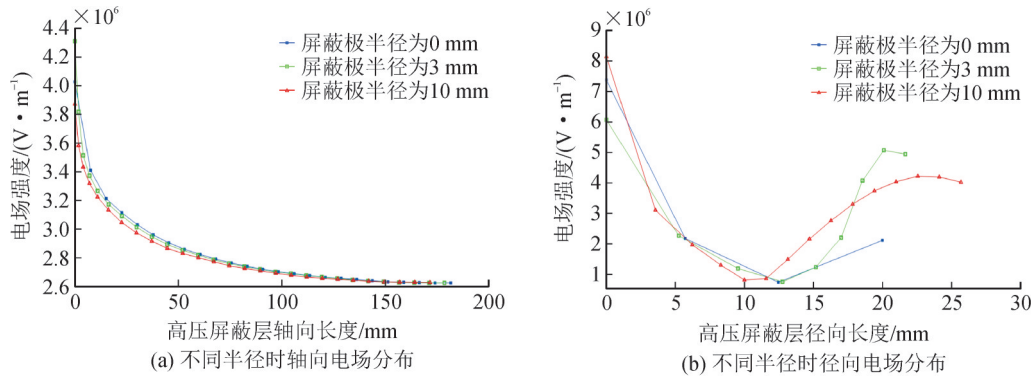


图26 高压屏蔽极不同半径时表面电场分布

Fig. 26 Surface electric field distribution at different radii of high voltage shielding poles

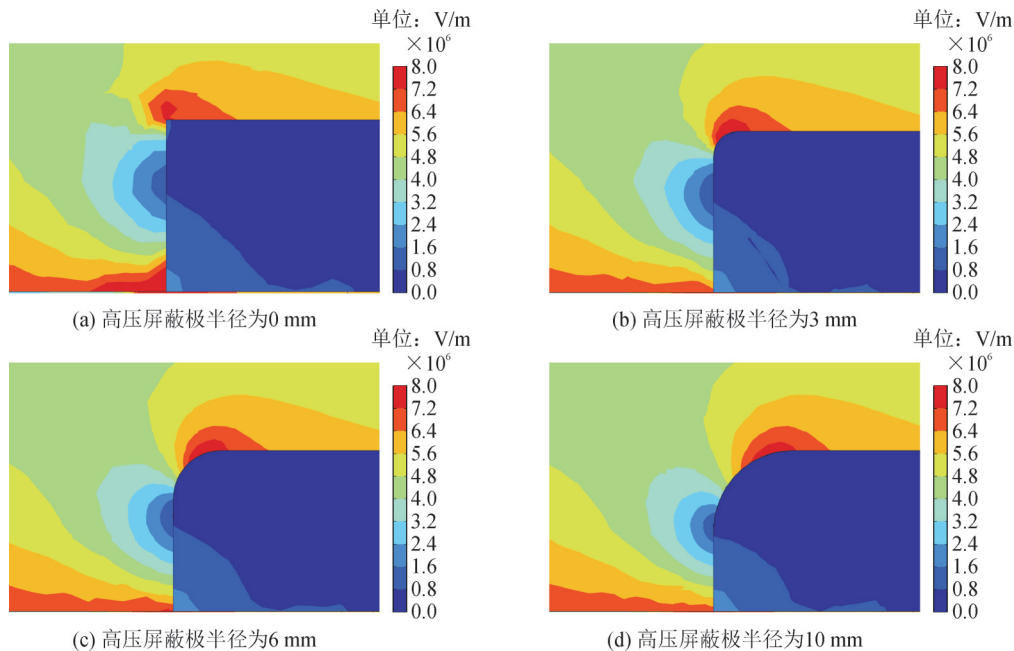


图27 高压屏蔽极不同半径时电场分布图

Fig. 27 Electric field distribution at different radii of high voltage shielding poles

在此条件下建立了电缆中间接头三维计算模型,对接头内部电场分布进行了计算,并采用蒙特卡罗算法对应力锥和高压屏蔽层材料参数进行了优化,得到结论如下:

1)中间接头最大场强出现在应力锥端部周围,达到了49.2 kV/mm,低于冲击试验下导体屏蔽击穿场强57.96 kV/mm,满足绝缘要求。

2)对材料参数优化结果表明:应力锥相对介电常数为30,倾斜角度为10°时半导体屏蔽层断口处电场强度最大值达到最小,高压屏蔽层相对介电常数为20,屏蔽极半径为10 mm时高压屏蔽层电场强度最大值达到最小。

参考文献:

[1] 杜 钢,杨 杰,蔡汉贤,等.湿热环境下聚丙烯基直流电缆绝

缘材料的应用前景[J]. 高压电器,2022,58(6):9-16.

Du Gang, Yang Jie, Cai Hanxian, et al. Application prospect of polypropylene based DC cable insulation materials in humid and hot environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 9-16.

[2] 王 植,王 宾.一种可反映电缆全类型故障的相模变换矩阵[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 42-50.

Wang Zhi, Wang Bin. A phase - mode transformation matrix for reflecting all types of cable faults[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 42-50.

[3] 贺冬珊,文 俊,杨 俊,等.高电缆化率对多馈入直流受端电网稳定性的影响研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(11): 30-37.

He Dongshan, Wen Jun, Yang Jun, et al. Impact of high cableization ratio on stability of multi - infeed DC receiving - end grids[J]. Smart Power, 2025, 53(11): 30-37.

[4] 周象贤,曹俊平,王少华,等. 110 kV 电缆中间接头典型缺陷电场三维仿真分析[J]. 绝缘材料, 2018, 51(7): 49-53.

Zhou Xiangxian, Cao Junping, Wang Shaohua, et al. Three - dimensional simulation analysis of electric field around typical defects in intermediate joints for 110 kV XLPE power cable[J].

- Insulating Materials, 2018, 51(7): 49-53.
- [5] 李中原. 高压直流电缆附件三元乙丙橡胶绝缘改性与电气性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- Li Zhongyuan. Insulation modifications and electrical properties of EPDM used for high voltage DC cable accessories[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [6] 赵健军. 电缆中间接头电场分析和界面缺陷研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
- Zhao Jianjun. Electric field analysis and interface defect research of cable middle joints[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [7] 斯捷, 陈植, 赵建, 等. 基于阻抗谱的电力电缆绝缘缺陷诊断函数故障定位与状态评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7): 217-224.
- Si Jie, Chen Zhi, Zhao Jian, et al. Research on fault location and state evaluation method of diagnostic function for power cable insulation defects based on the impedance spectrum[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 217-224.
- [8] 蒋浩月, 常凯颖, 伊德伦, 等. 老旧 XLPE 电缆绝缘状态评估方法及其应用[J]. 电力工程技术, 2026, 45(3): 20-27.
- Jiang Haoyue, Chang Kaiying, Yi Delun, et al. Condition assessment method of old XLPE cable insulation and its application [J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(3): 20-27.
- [9] 樊友平, 武利会, 康李一, 等. 110 kV XLPE 电缆 GIS 内锥插拔式快速中间接头的设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 485-495.
- Fan Youping, Wu Lihui, Kang Liyi, et al. Design of inner cone pluggable intermediate quick joint for 110 kV XLPE cables based on GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 485-495.
- [10] 刘泳斌, 高景晖, 钟力生, 等. ± 320 kV 直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 72-80.
- Liu Yongbin, Gao Jinghui, Zhong Lisheng, et al. Breakdown property of ± 320 kV HVDC cable system XLPE/EPDM accessories [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 72-80.
- [11] 严有祥, 朱婷, 王蕾. 基于有限元法对 ± 320 kV 直流 XLPE 电缆中间接头电场与空间电荷的仿真计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3591-3598.
- Yan Youxiang, Zhu Ting, Wang Lei. Simulation calculation of electric field and space charge in the joint of DC ± 320 kV XLPE cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3591-3598.
- [12] 张济安. 开关操作对电缆接头内部暂态电场分布影响机理研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- Zhang Ji'an. Research on influence mechanism of switching operation on transient electric field distribution inside cable joints [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [13] 张东东, 万慧娟, 张翼, 等. 含防爆盒电缆中间接头温度分布特性及其发热识别方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(1): 298-306.
- Zhang Dongdong, Wan Huijuan, Zhang Yi, et al. Temperature distribution characteristics and heat identification method of cable intermediate joints with explosion-proof boxes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 298-306.
- [14] 何亚文, 李友才, 李奇艳, 等. 防爆型高压电缆接头的泄能孔形状设计[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(4): 313-322.
- He Yawen, Li Youcai, Li Qiyang, et al. Shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4): 313-322.
- [15] 侯喆, 蒲路, 赵学风, 等. 330 kV 架空线—电缆混联线路的雷电过电压研究[J]. 电网与清洁能源, 2026, 42(4): 94-100.
- Hou Zhe, Pu Lu, Zhao Xuefeng, et al. Research on lightning overvoltage of 330 kV overhead line-cable hybrid lines[J]. Power System and Clean Energy, 2026, 42(4): 94-100.
- [16] 夏小飞, 刘磊, 俸波, 等. 变电站典型控制线缆高空电磁脉冲耦合特性仿真方法[J]. 南方电网技术, 2026, 20(4): 153-162.
- Xia Xiaofei, Liu Lei, Feng Bo, et al. Simulation method of coupling characteristics of shielded multi-core cable in HEMP environment [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(4): 153-162.
- [17] 陶玉宁, 陈皇熹, 赵国伟, 等. 10 kV 电缆中间接头典型施工缺陷的电场及局放特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 114-120.
- Tao Yuning, Chen Huangxi, Zhao Guowei, et al. Electric field and local discharge characteristics of typical construction defects of 10 kV cable intermediate joint[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 114-120.
- [18] 申虎. 电缆中间接头温度场分析和在线监测装置的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- Shen Hu. Temperature field analysis of cable intermediate joint and development of on-line monitoring device[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [19] 鞠晨. 高压电缆中间接头处测温装置的电场仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(4): 338-342.
- Ju Chen. Electric field simulation of temperature measuring device at middle junction of high voltage cable[J]. Automation & Instrumentation, 2023(4): 338-342.
- [20] 于竞哲. 基于 SCLC 理论的交流配电 XLPE 电缆在不同直流拓扑下的运行参数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Yu Jingzhe. Research on operating parameters of AC distribution XLPE cables under different DC topologies based on SCLC theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [21] 刘宇豪, 李江涛, 冯欣, 等. 220 kV 电缆中间接头操作过电压及抑制措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 146-152.
- Liu Yuhao, Li Jiangtao, Feng Xin, et al. Analysis on switching overvoltage and suppression method of cable joint in 220 kV cable line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 146-152.
- [22] Gu Borui, Li Han, Li Shurong, et al. Algorithms for fast calculation of energization overvoltage of hybrid overhead line-cable transmission lines based on full frequency-dependent parameters[J]. Electric Power Systems Research, 2023(225): 109875.
- [23] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344-354.
- Du Boxue, Li Zhonglei, Yang Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.
- [24] 刘雪丽, 肖登明, 李金忠, 等. 蒙特卡罗方法分析 SF_6/N_2 混合气体的绝缘特性[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 49-53.
- Liu Xueli, Xiao Dengming, Li Jinzhong, et al. Analysis of insulation characteristics of SF_6/N_2 gas mixtures with monte carlo

- on Energy Conversion, 2009, 24(1): 153-162.
- [20] 孙冰莹. 储能辅助火电机组 AGC 调频运行方法及容量配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 22-36.
- Sun Bingying. Research on AGC frequency modulation operation method and capacity configuration of energy storage auxiliary thermal power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 22-36.
- [21] 王伟亮, 刘会巧, 张天宇, 等. 基于多任务集成学习的储能电池剩余使用寿命预测[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 25-33.
- Wang Weiliang, Liu Huiqiao, Zhang Tianyu, et al. Multi-task ensemble learning-based prediction of remaining useful life of energy-storage batteries[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 25-33.
- [22] 丁勇, 华新强, 蒋顺平, 等. 大容量电池储能系统一次调频控制策略[J]. 电力电子技术, 2020, 54(11): 38-41.
- Ding Yong, Hua Xinqiang, Jiang Shunping, et al. A primary frequency regulation strategy of large-capacity battery energy storage system[J]. Power Electronics, 2020, 54(11): 38-41.
- [23] 颜湘武, 王德胜, 魏小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5911-5922.
- Yan Xiangwu, Wang Desheng, Wei Xiaoxue, et al. Research on the wind power-storage joint control based on fault ride-through and frequency regulation of wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5911-5922.
- [24] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020: 31-47.
- Li Lingao. Control strategy optimization of battery energy storage system to assist thermal power units to participate in grid frequency modulation[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020: 31-47.
- [25] 于雷. 电池储能系统参与电网调频的控制策略研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- Yu Lei. Research on control strategy of battery energy storage system participating in grid frequency regulation[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [26] Boyle J, Littler T, Foley A. Battery energy storage system state-of-charge management to ensure availability of frequency regulating services from wind farms[J]. Renewable Energy, 2020(160): 1119-1135.
- [27] Kazari H, Oraee H, Pal B C. Assessing the effect of wind farm layout on energy storage requirement for power fluctuation mitigation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 558-568.
- [28] 况理, 文云峰, 陆艺丹, 等. 含虚拟同步机的微电网频率稳定约束优化调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 71-82.
- Kuang Li, Wen Yunfeng, Lu Yidan, et al. Frequency stability constrained optimal dispatch model of microgrid with virtual synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 71-82.
- [29] Zhang Shengqi, Mishra Y, Shahidehpour M. Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1595-1603.
- 李明(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为新能源及储能并网运行与检测技术研究(通信作者)(E-mail: hanfenliming07@163.com)。
- 亚夏尔·吐尔洪(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为可调负荷控制及负荷数据通信技术(E-mail: 532130292@qq.com)。
- 郑云平(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为可调负荷控制及储能优化控制工作(E-mail: zyp_mess@163.com)。
- (上接第 167 页)
- method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 49-53.
- [25] 李志兵. GIS 隔离开关操作重复放电模型研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.
- Li Zhibing. Research on repeated discharge model of GIS disconnecting switching operation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2014.
- [26] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266.
- Liu Fenglian, Xia Rong, Li Wenjie, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 259-266.
- [27] 金祖山, 吴明祥, 李思南, 等. 浙江电网电力电缆故障的原因分析和对策[J]. 浙江电力, 2014, 33(5): 6-10.
- Jin Zushan, Wu Mingxiang, Li Sinan, et al. Cause analysis and countermeasures of power cable faults in Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(5): 6-10.
- [28] 廖雁群, 惠宝军, 夏荣, 等. 110 kV 电缆中间接头及本体典型缺陷局部放电特征分析[J]. 绝缘材料, 2014, 47(5): 60-67.
- Liao Yanqun, Hui Baojun, Xia Rong, et al. Partial discharge characteristics analysis of typical defects for 110 kV cable and joint[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 60-67.
- [29] 顾金, 王俏华, 尹毅, 等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3159-3163.
- Gu Jin, Wang Qiaohua, Yin Yi, et al. Design of prefabricated joints for HVDC XLPE power cables[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3159-3163.
- [30] 卓金玉. 电力电缆终端结构中的应力锥电场数值分析和模拟实验研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 15-19.
- Zhuo Jinyu. Experimental simulation and numeric analysis of the electric field in the stress-cone of power cable terminals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 15-19.
- [31] 马自伟, 贾江波, 查玮, 等. 10 kV XLPE 电缆终端电场分布与调整[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 304-306.
- Ma Ziwei, Jia Jiangbo, Zha Wei, et al. Electrical field distribution and adjustment in 10 kV XLPE cable terminals[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 304-306.
- [32] Ghassemi F, Dennis S, Ainsley A, et al. 275 kV cable discharge field measurement and analysis of SVLs chain failure using ATP[J]. Electric Power Systems Research, 2018(161): 95-102.
- 王瀚锋(1992—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压电缆绝缘状态评估(通信作者)(E-mail: 13991112028@163.com)。