·专题报道·

DOI:10.16105/j.dxdl.1672-6901.202206001

高压 XLPE 电缆主绝缘典型缺陷形态对电场畸变影响的仿真分析

夏俊峰, 施楠楠, 孙建生

(上海电缆研究所有限公司 特种电缆技术国家重点试验室, 上海 200093)

摘 要:高压交联聚乙烯(XLPE)电缆主绝缘内部微孔及绝缘-半导电屏蔽界面突起缺陷会导致其邻域内电场发生畸变,是造成高压 XLPE 电缆绝缘故障的重要原因。缺陷导致的电场畸变程度与缺陷的几何形态密切相关。现行国家标准中规定了各电压等级 XLPE 绝缘高压电缆中的微孔、突起等缺陷的尺寸限值,但未考虑缺陷几何形态对电场畸变的影响。本工作选取电缆绝缘内部微孔,半导电屏蔽层进入绝缘层内部的突起和绝缘进入半导电屏蔽层内部的突起 3 种典型缺陷,建立表征缺陷形态的几何模型,通过有限元法计算缺陷附近的电场分布,研究缺陷形态对电场畸变的影响。结果显示,缺陷的形状及其在绝缘内的取向是决定局部电场畸变程度的主要因素,而缺陷的尺寸主要影响电场畸变区域的范围。缺陷最大尺寸相同时,通过改变缺陷形态,也可以有效降低缺陷造成的电场畸变。

关键词:XLPE 电缆;主绝缘;缺陷形态;电场畸变;仿真

中图分类号:TM215 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-6901(2022)06-0001-06

Simulation of Electric Field Distortion Caused by Main Insulation Defects Morphology of XLPE Power Cable

XIA Junfeng, SHI Nannan, SUN Jiansheng

(State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: In high voltage XLPE cable, the microvoids in insulation bulk, as well as the protrusions at the interface of the insulation layer and the semi-conductive shield, will cause electrical field distortion, which is one of the main reasons of cable insulation faults. The degree of electric field distortion caused by these defects is closely related to geometry of defects. The current national standard specified the size limits of micropores, protrusions and other defects in XLPE insulated high voltage cables of various voltage levels, but did not explain the influence of defect geometry on electric field distortion. Three typical defects were considered: the bulk void, the protrusion of the semi-conductive shield into the insulation layer and the protrusion of the insulation into the semi-conductive shield. Geometric models of the three kinds of defects were established respectively. Finite element method was used to solve electric field distribution near the defects, and the influence of defect morphology on electric field distortion is studied. It was found that the shape of the defect and its orientation in the insulation are the main factors determining the degree of local electric field distortion, and the size of the defect mainly affects the range of electric field distortion area. When the maximum size of the defect remains unchanged, changing the shape of the defect can effectively reduce the electric field distortion caused by the defect.

Key words: XLPE cable; main insulation; defects morphology; field distortion; simulation

0 引 言

随着我国电网容量的扩大改造以及城市化进展的加快,超高压电缆的应用日益增多。电压等级的提高对电缆绝缘品质提出了更高的要求。目前超高压电缆主绝缘主要采用交联聚乙烯(XLPE)。主绝缘中存在的微孔、杂质及界面突起等缺陷易造成局部电场集中,是导致电缆故障的重要原因[1]。

主绝缘缺陷的几何形态对缺陷处的电场分布有重要影响[2]。目前,现行的高压电缆国家标准有 GB/T 11017.1—2014[3]、GB/T 18890.1—2015[4]和 GB/T 22078.1—2008[5],以上标准分别对 110,220,

收稿日期:2022-01-07

作者简介:夏俊峰(1982—),男,高级工程师。
E-mail:xiajunfeng@secri.com

500 kV 电缆绝缘中,以及半导电屏蔽与绝缘界面上的微孔、杂质及突起的最大允许尺寸进行了相应规定。文献[6]基于针板电极系统研究了绝缘内杂质尺寸对电树枝生长的作用,企业在电缆制造中也强调了对半导电屏蔽与绝缘界面的光滑程度的控制[7],但这些研究均未涉及缺陷形态对电场分布的影响。

本工作从模拟超高压电缆主绝缘存在的典型缺陷的形态出发,对电缆绝缘内部微孔、半导电屏蔽层进入绝缘层内部的突起和绝缘进入半导电屏蔽层内部的突起等 3 种典型缺陷分别建立几何模型,通过有限元法计算缺陷处的电场分布,研究了缺陷形态对电场畸变的影响。

1　模型建立

1.1　几何模型

XLPE 电缆绝缘中产生电场畸变的缺陷主要有绝缘内部的微孔及绝缘-半导电屏蔽界面突起。相较于电缆绝缘,这些缺陷的几何尺寸均很小,一般在数微米至数十微米量级,其形态可近似为椭球形[8]。在二维建模中,微孔类缺陷可近似为椭圆,界面突起类缺陷可以近似为圆弧,包含缺陷的电缆主绝缘几何模型见图 1。

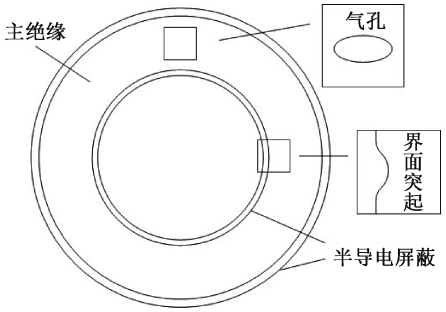


图 1　包含缺陷的电缆主绝缘几何模型

假定缺陷处电场方向沿 x 轴正方向,对于微孔类缺陷,其形态可以通过 3 个参数表示,即微孔长轴长度 a,短轴长度 b,以及长轴与电场方向的夹角(取向角)θ, 其中 a 和 b 的取值决定了微孔的大小,a 和 b 的比例决定了微孔的形状,θ 决定了微孔的取向,其几何建模见图 2。

对于界面突起类缺陷,其形态也可以通过 3 个参数表示,即界面突起高度 H,界面宽度 L,突起界面与基底平面交界处的曲率半径 R,参数的取值决定了突起的大小,参数之间的比例决定了界面突起的形状。半导电屏蔽进入绝缘突起的几何建模见图 3,绝缘进入半导电屏蔽突起的几何建模见图 4。通过改变形态参数的大小并计算相应的电场分布,可以模拟突起类缺陷的形态对缺陷处电场畸变的影响。

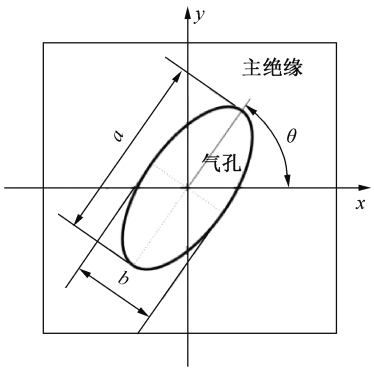


图 2　绝缘内部微孔形态的几何建模

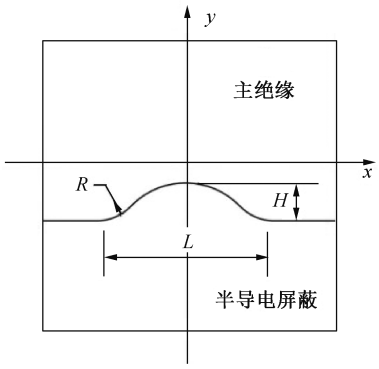


图 3　半导电屏蔽进入绝缘突起形态的几何建模

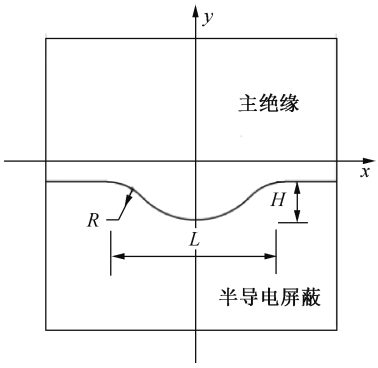


图 4　绝缘进入半导电屏蔽突起形态的几何建模

1.2　方程和边界条件

交流情况下,假设材料特性和外加电压不随时间改变,则绝缘内的电场为稳态分布,即在频域内求解二维平面内电流守恒问题,可用下述方程描述:

$$\nabla\cdot[(\sigma+\mathrm{j}\omega\varepsilon)E]=0 \tag{1}$$

$$E=-\nabla U \tag{2}$$

式中:σ 为电导率,$\mathrm{S\cdot m^{-1}}$;ε 为介电常数;ω 为角频率,$\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$;E 为求解域内各点电场,$\mathrm{V\cdot m^{-1}}$;U 为电位,V。

在几何建模中,涉及的材料有半导电屏蔽、主绝缘、空气等 3 种,由于半导电屏蔽的电导率远高于主

绝缘和空气,因此可以忽略屏蔽内的电场,此时求解域可以排除半导电屏蔽层,而将半导电屏蔽界面视为求解域边界。在电缆结构中,绝缘屏蔽半导电层与缓冲层、金属护套为良好接触,可以视为接地边界;导体屏蔽半导电层与导体良好接触,可以视为电位边界。因此,模型的的边界条件为

$$V_{\text{insem}} = U_0 \tag{3}$$

$$V_{\text{outsem}} = 0 \tag{4}$$

式中,V_{insem} 为导体半导电屏蔽与绝缘界面的电位,V;V_{outsem} 为绝缘半导电屏蔽与绝缘界面的电位,V;U_0 为导体对地电压,V。

2 模型的求解

从结构上看,电缆可以简化为同轴圆柱体绝缘结构,当绝缘为无缺陷的理想电介质时,电场沿电缆半径方向,其内部场强分布为

$$E_r = \frac{U_0}{r \times \ln(D_o/D_i)} \tag{5}$$

式中,E_r 为绝缘层内距电缆轴心为 r 处的电场强度,$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$;$D_o$ 为导体屏蔽外径,mm;D_i 为绝缘外径,mm。

由式(5)计算可知,电缆绝缘层内最大场强位于导体屏蔽与绝缘交界面,最小场强位于绝缘屏蔽与绝缘交界面。因此各类缺陷导致的畸变电场最大值与缺陷在绝缘内的位置以及主绝缘的尺寸均有关系。然而,由于高压电缆绝缘内的缺陷几何尺寸非常小,缺陷也仅能影响缺陷附近极小范围内的电场分布。因此特定的缺陷形态对电场分布的影响程度应和缺陷所处位置及主绝缘尺寸等因素无关,为此定义电场畸变率(DR)为缺陷处畸变电场(E)与缺陷处平均电场(E_{av})的比值,见式(6)。

$$DR = \frac{|E|}{|E_{\text{av}}|} \tag{6}$$

故障通常在电场畸变最大位置产生,因此需要关注最大电场畸变率,见式(7)。

$$DR_{\max} = \frac{|E_{\max}|}{|E_{\text{av}}|} \tag{7}$$

考虑到缺陷对电场分布的影响范围很小,缺陷处平均电场 E_{av} 在数值上近似等于无缺陷的理想绝缘在同一位置处的电场大小,可以通过式(5)计算。

由仿真计算方程和边界条件的特性可知,电位边界 U_0 取值是常数,求导后并不影响电场。E_{av} 则起到了归一化系数的作用,消除了绝缘内电场分布不均匀性的影响。因此由式(7)计算得到的最大电场畸变率 $DR_{\max}$ 与 U_0 和 E_{av} 取值无关,仅由缺陷的具体形态确定。根据式(7)计算了不同电压等级的高压电缆绝缘内直径为 50 μm 的圆形微孔的最大电场畸变率,结果见表 1。

表 1 高压电缆绝缘圆形微孔(ϕ50 μm)的最大电场畸变率

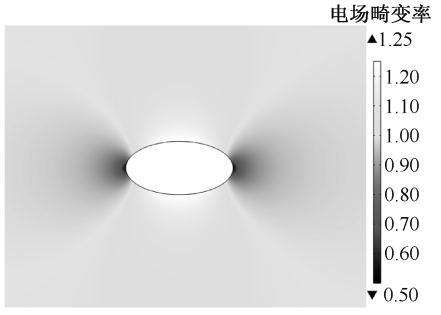
电压等级/kV	导体规格/mm^2	缺陷所处位置		
		导体屏蔽附近	绝缘中心	绝缘屏蔽附近
110	240	1.433	1.432	1.431
220	400	1.433	1.431	1.430
500	800	1.432	1.431	1.430

由表 1 可知,对于绝缘内微米级别的缺陷,最大电场畸变率仅取决于缺陷形态,与缺陷所处位置、绝缘的尺寸以及导体电压几乎无关。因此可以用最大电场畸变率来表征缺陷形态对电场畸变的影响程度。

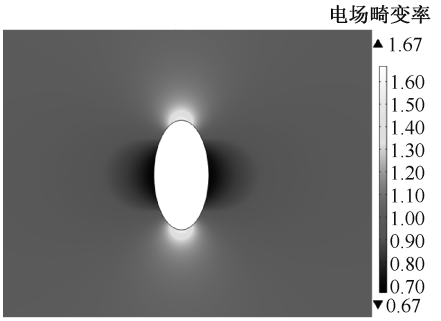
3 缺陷模型的典型仿真结果

以导体截面 2 500 mm^2 的 500 kV 电缆的结构参数建立主绝缘的几何模型,导体屏蔽外径取 67 mm,绝缘外径取 129 mm,导体对地电压 U_0 取 290 kV。

以长轴长度 a 为 50 μm,短轴长度 b 为 25 μm,长轴与电场方向的夹角 θ 分别取 0°和 90°,建立微孔几何模型,用有限元法计算微孔位于绝缘中心时,微孔附近的电场畸变率分布,典型计算结果见图 5。



(a) θ=0°



(b) θ=90°

图 5 微孔型缺陷电场畸变率分布的典型计算结果

由图 5 可知,微孔内部电场畸变率最大,电场畸

变导致微孔上方和下方电场被加强,微孔左右两侧电场被削弱。微孔长轴与电场方向垂直时的最大电场畸变率显著高于长轴与电场方向平行时的情况。

以突起高度 H 为 50 μm,突起宽度 L 为 200 μm,曲率半径 R 为 30 μm,建立界面突起的几何模型,分别计算绝缘进入屏蔽突起和屏蔽进入绝缘突起附近的电场畸变率分布,典型的计算结果见图 6。

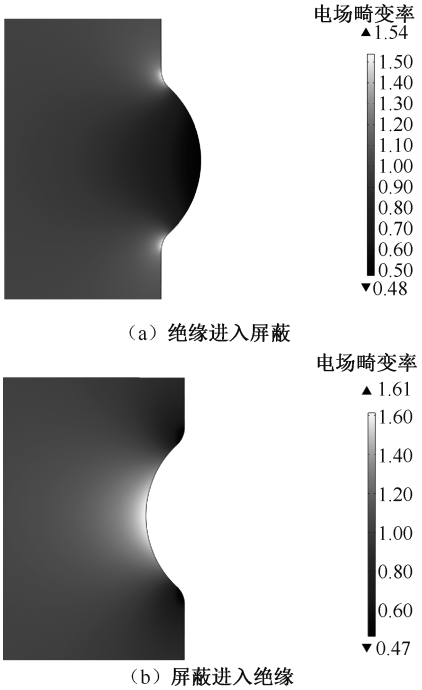


图 6　界面突起型缺陷电场畸变率分布的典型计算结果

由图 6 可知,从绝缘进入屏蔽的突起,电场畸变率最大出现在突起界面与基底平面交界处,交界处附近电场被加强,突起顶部附近电场被削弱;从屏蔽进入绝缘的突起,电场畸变率最大处位于突起中部,突起顶部的电场被加强,突起两侧电场被削弱。

4　形态参数对缺陷电场畸变的影响

4.1　内部微孔

固定微孔长轴与电场方向平行,即 $\theta=0°$,并取 $a:b$ 分别为 2∶1,3∶2 和 1∶1,改变 a 的取值从 10 μm 到 90 μm,对每一组参数值建模进行仿真计算,结果见图 7。

由图 7 可知,当 $a:b$ 恒定时,最大电场畸变率几乎不随 a 取值变化而改变,说明形状相同时,微孔大小对电场分布基本无影响;当 $a:b$ 下降时,最大电场畸变率明显增大,说明微孔形状对电场分布影响显著。

固定 a 为 50 μm,b 为 25 μm,当 θ 由 0°~180° 时,对每一组参数进行仿真计算,结果见图 8。

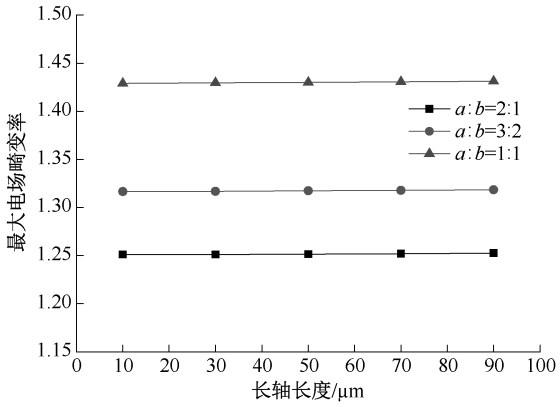


图 7　微孔大小对电场分布的影响

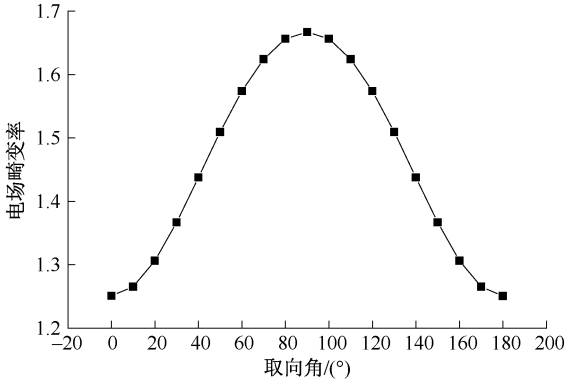


图 8　取向角对电场分布的影响

由图 8 可知,最大畸变率在取向角 90° 时取得最大值,在 0° 或 180° 时取得最小值,说明微孔取向对电场分布有显著性影响。当微孔形状一定时,若微孔长轴垂直于电场方向,电场畸变率最大;若微孔长轴平行于电场方向时,电场畸变率最小。

固定 b 为 10 μm,改变 a 的取值从 10 μm 到 90 μm,分别对 θ 为 0° 和 90° 两种情况进行计算,结果见图 9。

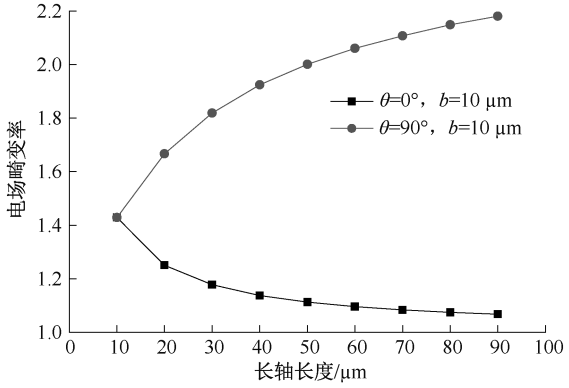


图 9　微孔在不同方向上投影长度对电场分布的影响

由图 9 可知,当 $\theta=0°$ 时,最大电场畸变率随 a 的增大而减小;当 $\theta=90°$ 时,最大电场畸变率随 a 的增大而增大。说明微孔造成的电场畸变程度与微孔

在垂直于电场方向的投影长度呈正相关,与微孔在平行于电场方向的投影长度呈负相关。

4.2 界面突起

由于同形态的界面突起在导体屏蔽处和绝缘屏蔽处产生的电场畸变率基本相同,因此分析时不再考虑突起位置的影响。

改变 H 取值从 25 μm 到 100 μm,计算不同 L、H、R 下两类界面突起的最大电场畸变率,相似形态界面突起大小对电场畸变率的影响见图 10。

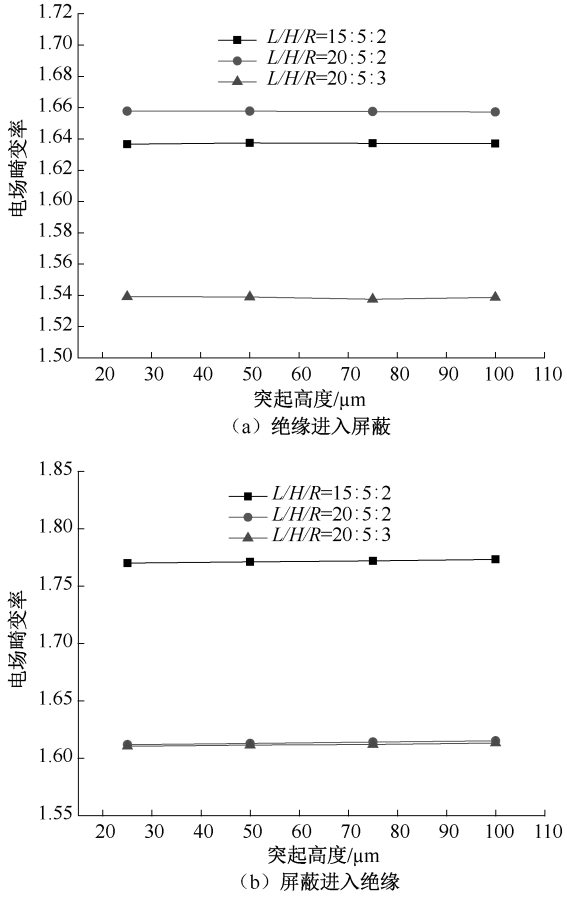


图 10 相似形态界面突起大小对电场畸变率的影响

由图 10 可知,确定 L、H、R 三者的比例后,无论突起是从绝缘进入屏蔽还是从屏蔽进入绝缘,最大电场畸变率几乎不随界面突起高度取值大小改变,说明在形状相同时,界面突起的大小对电场分布无影响。

取 L = 250 μm, H = 50 μm, 改变曲率半径 R 的取值从10 μm 到 90 μm, 曲率半径对电场畸变率的影响见图 11。

由图 11 可知,对于从绝缘进入屏蔽的突起,最大电场畸变率随曲率半径 R 增大显著降低;对于从屏蔽进入绝缘的突起,最大电场畸变率则几乎不随曲率半径 R 的变化而变化。

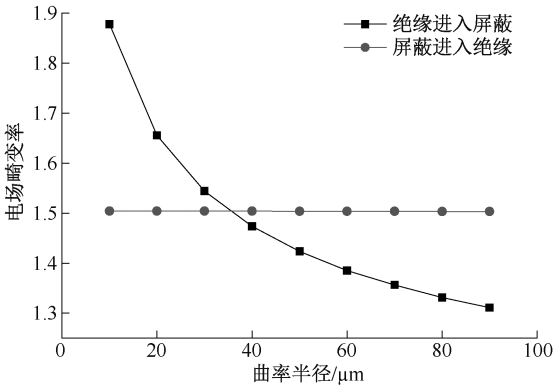


图 11 突起界面与平面交界处曲率半径对电场畸变率的影响

取 R = 30 μm,L = 250 μm,改变突起高度 H 的取值从10 μm 到 90 μm, 突起界面高度对电场畸变率的影响见图 12。

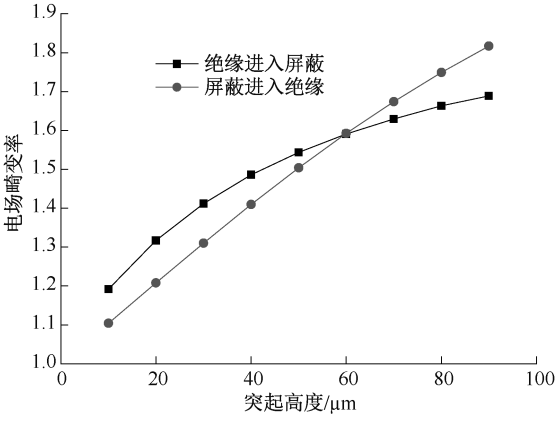


图 12 突起界面高度对电场畸变率的影响

由图 12 可知,两类突起的最大电场畸变率均随 H 增大而上升。比较而言,当突起从屏蔽进入绝缘时,最大电场畸变率随 H 上升趋势更为明显。

取 R = 30 μm,H = 50 μm,改变突起宽度 L 的取值从150 μm 到 500 μm, 突起界面宽度对电场畸变率的影响见图 13。

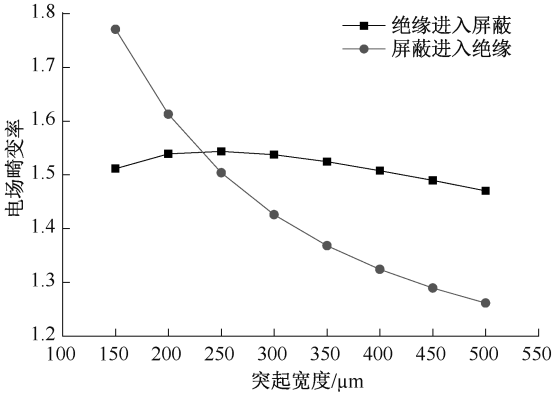


图 13 突起界面宽度对电场畸变率的影响

由图 13 可知,对于绝缘进入屏蔽的突起,最大电场畸变率随 L 增大时先小幅增大,后逐渐减小,

但变化趋势不明显。对于屏蔽进入绝缘突起,最大电场畸变率随 L 的增大显著减小。

5 结 论

本工作对高压电缆主绝缘内的典型缺陷建立二维仿真模型,采用有限元仿真计算了绝缘内部微孔和半导电屏蔽-绝缘界面突起的电场分布,仿真结果表明:

(1)电缆主绝缘内微孔和界面突起缺陷造成的电场畸变仅取决于缺陷的形状。当形状相同时,小尺寸缺陷造成的电场畸变程度与大尺寸缺陷相当,缺陷尺寸越大,造成的电场畸变范围越大。

(2)微孔缺陷造成的电场畸变程度主要取决于微孔在平行电场方向的投影长度和在垂直电场方向的投影长度间的比例,比例越大,电场畸变程度越小。

(3)当界面突起方向为从绝缘进入屏蔽时,电场畸变率最大处位于突起界面与基底平面交界处。通过增大交界处的曲率半径和减小突起高度,可有效降低电场畸变的程度。界面突起宽度的变化对电场畸变的影响不大。

(4)当界面突起方向为从屏蔽进入绝缘时,电场畸变率最大处位于突起顶部。通过增大突起宽度和减小突起高度,可有效降低电场畸变的程度。

参考文献:

[1] 应启良. 500 kV 交联聚乙烯绝缘电缆绝缘结构研究[J]. 电线电缆,2003(4):3-8.

[2] LEE W K. A study of electric stress enhancement part 2:stress enhancement on semiconductive shields [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6):983-989.

[3] 中国电器工业协会. 额定电压 110 kV(U_m=126 kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第 1 部分:试验方法和要求:GB/T 11017.1—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[4] 中国电器工业协会. 额定电压 220 kV(U_m=252 kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第 1 部分:试验方法和要求:GB/T 18890.1—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[5] 中国电器工业协会. 额定电压 500 kV(U_m=550 kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第 1 部分:试验方法和要求:GB/T 22078.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[6] 贾欣,刘英,曹晓珑. XLPE 电缆缺陷尺寸分布对电树枝起始的影响[J]. 高电压技术,2003,29(10):7-8.

[7] 李旭兵,李瑞. 高压交联电缆三层共挤绝缘屏蔽合缝问题的解决[J]. 电线电缆,2007(3):42-43.

“海底电力电缆”专题报道征稿启事

近年来,我国正朝着建设海洋强国的目标不断前进,海洋经济蓬勃发展,海底电力电缆作为内陆与岛屿之间、海上平台供电以及海上风电场输电的关键媒介,是沿海经济发展和资源开发的强力保障。随着海洋强国战略不断推进,沿海岛屿与内陆供电网互连规模不断扩大,海底电缆网络的安全稳定运行对于保障社会稳定和经济发展具有重大意义。

为展示该领域的最新进展和发展趋势,共享最新技术成果,《电线电缆》将于 2023 年第 3 期推出“海底电力电缆”专题报道,热忱欢迎相关领域高校、科研院所和企业科研技术人员踊跃投稿。

一、专题征稿范围(包括但不限于)

(1)中高压海缆及附件的研究与应用;

(2)轻量化海缆的研究与应用;

(3)海底电缆载流量研究;

(4)长距离深远海上风电用动态电缆的研究与应用;

(5)海底电力电缆故障在线监测技术研究。

二、投稿要求

本专题同时征集综述性、研究性及应用类文章。综述性文章要求能总结上述领域的研究现状并提出前瞻性的发展方向;研究性文章要求能反映上述领域的最新研究成果,数据详实、方法新颖、结果可靠;应用性文章要求具有实际推广价值。

三、截稿日期

2023 年 3 月 25 日

四、投稿方式

投稿请登录《电线电缆》在线投审稿系统(http://dxdl.cbpt.cnki.net),完成注册后在线投稿。来稿请用 word 排版,并在稿件中注明“海底电力电缆专题投稿”。

五、联系方式

联系人:贾竹青

电 话:021-65494605-296

邮 箱:wirecable@secri.com