

# 35 kV XLPE 电力电缆终端结构参数优化

范在乾<sup>1</sup>, 咸日常<sup>1</sup>, 冷学冰<sup>2</sup>, 邢雅雯<sup>1</sup>, 魏凯<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;  
2. 山东七星电气科技发展有限公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:**为解决电力电缆与其终端绝缘电场分布不均匀,易造成界面击穿及沿面放电的问题,本文对35 kV冷缩式电力电缆终端结构参数进行优化以提高其绝缘水平。首先基于COMSOL仿真软件分析应力锥的轴向长度和端部半径对终端电场分布的影响,得出终端结构参数的最优组合;随后研制电力电缆终端样品,通过工频交流耐压、局部放电试验进行性能指标的对比验证。结果表明:电力电缆终端应力锥的轴向长度是影响其界面电场变化与分布的主要因素,端部半径的变化对终端电场的影响较小;应力锥轴向长度的增大缓解了界面电场强度,但容易引发沿面放电问题;应力锥的轴向长度及端部半径最优值分别为25 mm和2.5 mm。

**关键词:** 电缆终端; 应力锥; 电场分布; 结构参数; 优化

**中图分类号:** TM247 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.012

## Optimization on structural parameters of 35 kV XLPE power cable terminal

FAN Zaiqian<sup>1</sup>, XIAN Richang<sup>1</sup>, LENG Xuebing<sup>2</sup>, XING Yawen<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
2. Shandong Qixing Electric Technology Development Co., Ltd., Zibo 255000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of interface breakdown and surface discharge caused by uneven distribution of electric field of power cable and its terminal insulation, the structural parameters of 35 kV cold shrinkable power cable terminal were optimized to improve its insulation level in this paper. Firstly, the influence of axial length and end radius of stress cone on the terminal electric field distribution was analyzed based on COMSOL simulation software, and the optimal combination of terminal structural parameters was obtained. Then the power cable terminal samples were prepared, and the performance indexes were verified by power frequency AC voltage resistance and partial discharge tests. The results show that the axial length of the power cable terminal stress cone is the main factor affecting the change and distribution of interfacial electric field, and the change of terminal radius has little effect on the terminal electric field. The increase of axial length of stress cone alleviates the interfacial electric field intensity, but it is easy to cause discharge along the surface. The optimal axial length and upper radius of stress cone are 25 mm and 2.5 mm, respectively.

**Key words:** cable terminal; stress cone; electric field distribution; structural parameters; optimization

## 0 引言

随着城市化进程加快,我国城市配电网中的架空线路正逐步被电力电缆线路替换,不仅减少了对城市美观的影响和土地资源的使用,而且电缆线路运行状态很少受外部环境因素的影响,减少了频繁维护,节约了大量的人力物力<sup>[1-2]</sup>,并且供电可靠性得到提高。但实际运行现状表明,电缆供电线路运行故障仍有发生,而电力电缆终端作为电缆与架空线路、电缆与电气设备连接的关键附件,由于需要在现场安装制作,受工艺和环境条件的影响较大,

相对于电缆本体,电缆附件发生故障的概率更高,约为70%<sup>[3-4]</sup>,其运行可靠性直接影响电缆线路的供电安全。

在冷缩式电力电缆终端的现场事故中,电缆主绝缘和增强绝缘之间的界面击穿是电力电缆终端破坏的主要形式,增强绝缘与空气之间的沿面放电是电力电缆终端破坏的次要形式<sup>[5]</sup>。位于双层介质绝缘之间的界面存在较强的切向电场,易于诱发绝缘界面放电并造成击穿,该界面是目前国内外学者普遍认同的电缆附件最薄弱环节和运行故障的典型部位<sup>[6-7]</sup>。增强绝缘和气体形成的绝缘薄弱处因为不同介质面造成电压分布不均匀而发生沿面放电,最终导致沿面击穿。沿面放电主要集中在第一

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077221)。

伞裙与第二伞裙之间的伞裙间隙。通常来看,该伞裙间隙是整个表面场强最大处,其引发的闪络电压比气体或固体单独存在时的击穿电压都小,于是在阴雨气象环境下沿面放电往往发展成局部放电,最终导致增强绝缘击穿。

近年来,国内外学者对电力电缆终端界面放电与沿面放电问题开展了一系列研究,王子康等<sup>[8]</sup>从硅橡胶主绝缘的材料特性与界面空腔放电的角度出发,解释了一个冷热循环周期内附件界面的局部放电行为特性。常文治等<sup>[9]</sup>研究硅橡胶/交联聚乙烯界面金属颗粒沿面绝缘缺陷局部放电的发展过程,为电缆中间接头放电严重程度的评估提供了依据。王少飞等<sup>[10]</sup>通过搭建变温沿面放电试验系统,研究不同温度下乙丙橡胶表面从起始放电到闪络过程的沿面放电特性。张开放等<sup>[11]</sup>对气-固绝缘在高频正弦电应力下的沿面放电现象及特征开展研究,总结出不同阶段的放电发展形态、放电特征参量、放电谱图和表面损伤状况。

本文采用有限元仿真软件 COMSOL 对 35 kV 交联聚乙烯(XLPE)电力电缆终端应力锥结构进行优化设计,通过解析法推算应力锥端部曲线,利用有限元方法得到应力锥轴向长度和端部半径的最优组合,以优化 35 kV XLPE 电力电缆终端的结构参数,并研制电力电缆终端样品,通过工频交流耐压、局部放电试验进行性能指标的对比验证。电缆终端结构参数优化能够提高电缆供电线路的运行可靠性,有效降低冷缩式电力电缆终端的现场事故率。

## 1 电力电缆终端模型的构建

在 35 kV XLPE 电力电缆终端安装的过程中,通常将电缆本体外绝缘剥开,除去铠装层和外屏蔽层,所以本次优化不再包含电缆外绝缘、铠装层和外屏蔽层。交流电缆终端绝缘中的电场按容性分布,可以认为材料的电容为常数,即不随场强、温度等外界因素的变化而变化,并且绝缘材料中正负电荷的迁移,难以与工频电场的快速变化达到同步,因此本文忽略空间电荷对电力电缆终端的影响<sup>[12]</sup>。本文针对 26/35 kV、截面积为  $1 \times 240 \text{ mm}^2$  的单芯铜芯 XLPE 电力电缆终端进行应力锥结构参数优化,建立的模型总长度为 433 mm,电缆主绝缘选择 XLPE,增强绝缘选择硅橡胶(SiR)材料。

应力锥作为冷缩式电力电缆终端的重要组成部分,担负着均化电场的作用,很大程度上决定了电力电缆终端的可靠性。XLPE 电力电缆终端中的

电场一般由两种方式控制,一个是参数型电场应力控制锥,通过填充高介电常数的复合电介质材料控制,另一个是几何型电场应力控制锥,通过几何形状的应力锥控制电场分布。相比之下,参数型应力锥稳定性差,容易发热并加速老化,而几何型电场应力控制锥在设计完成后受外界影响小。因此本文通过理论分析几何型应力锥的基本机构。

电力电缆终端是多层固体复合介质绝缘结构,由于内部存在大量的复合界面,在屏蔽层和绝缘层会出现电场应力集中的现象<sup>[13]</sup>。在常规电力电缆终端中,应力锥面按其表面轴向场强小于等于允许最大轴向场强进行设计。为了减少在第一伞裙和第二伞裙之间的伞裙间隙出现沿面放电的可能性,在设计时应缓解沿面电场集中。

图 1 为应力锥尺寸计算的数学模型,设 AB 面为应力锥面,AB 面切向角度为  $\alpha$ ,电缆线芯半径为  $r_c$ ,主绝缘外半径为  $R$ ,应力锥端部外半径为  $R_n$ ,应力锥厚度为  $\Delta t$ ,电缆主绝缘的相对介电常数为  $\epsilon_1$ ,电力电缆终端增强绝缘的相对介电常数为  $\epsilon_n$ ,应力锥的轴向长度为  $L_k$ 。

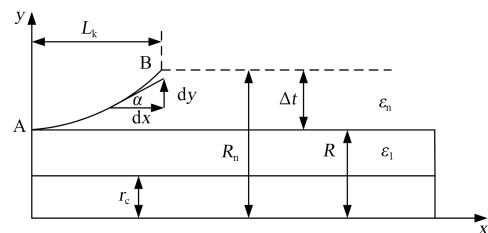


图 1 应力锥尺寸模型

Fig.1 Size model of stress cone

在应力锥面上任意一点  $F$  的轴向场强  $E_t$  与该点的径向场强  $E$  应有如式(1)的关系。

$$E_t = E \tan \alpha = E \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

整理式(1)得式(2)。

$$E = \frac{U_1}{y \ln B y} = \frac{U_1}{y \epsilon_n \left( \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R}{r_c} + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{y}{R} \right)} \quad (2)$$

式(2)中:  $B = \frac{R^{a-1}}{r_c^a}$ ;  $a = \frac{\epsilon_n}{\epsilon_1}$ 。

经过整理并积分得到式(3)。

$$E_t dx = \int_r^y \frac{U_1}{y \ln B y} dy \quad (3)$$

目前,增强绝缘电极就是保证这种电极形状边缘附近的场强小于在电极中间的均匀电场的场强。经过“许瓦兹变化”,电力电缆终端处的电场如式(4)所示<sup>[14]</sup>。

$$E_t = \frac{U_1/R}{\sqrt{1 - \cos^2\alpha}} \quad (4)$$

当令  $E_t=U/R$ , 则  $\alpha = 0.5\pi$ , 即在  $\alpha = 0.5\pi$  的等位线上任意一点的场强都  $\leq U/R$ 。用这条等位线作为增强绝缘与应力锥之间交界面的形状, 可以减少击穿的发生概率。设沿表面的轴向场强为一常数, 则得 AB 面方程如式(5)所示。

$$\int_0^x E_t dx = E_t x = U_1 \ln \frac{\ln By}{\ln BR} \quad (5)$$

整理式(5)得式(6)。

$$x = \frac{U_1}{E_t} \ln \frac{\ln By}{\ln BR} \quad (6)$$

式(6)即为应力锥 AB 面的方程, 目前生产厂家通常选取一个端部曲率半径替代端部曲线, 即端部曲率半径取为 60 mm。

当  $y=R_n$  时,  $x=L_k$ ,  $L_k$  即为应力锥的轴向长度, 如式(7)所示。

$$L_k = x = \frac{U_1}{E_t} \ln \frac{\ln By}{\ln BR} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,  $E_t$  值取得越小, AB 面越平,  $L_k$  长度越长。35 kV XLPE 电力电缆终端接头根据 GB/T 12976.1—2008 相关要求在电缆线芯铜导体上施加电缆设计用的额定工频电压有效值, 即  $U_0=26$  kV, 由于输电线路首末端 1.1 倍电压差, 交流电压有效值与峰值之间的转换关系为  $\sqrt{2}$ , 则电缆线芯上的电压为  $U_s=U_0 \times 1.1 \times \sqrt{2}=40.4$  kV。表 1 为电力电缆终端各个部分材料的参数。

表 1 电力电缆终端材料参数

材料	相对介电常数	电导率/(S/m)
铜	$1 \times 10^4$	$5.99 \times 10^7$
内外半导体层	70.00	2.00
XLPE	2.09	$3.92 \times 10^{-15}$
SiR	2.73	$1.57 \times 10^{-15}$
应力锥	30.00	2.00

## 2 电力电缆终端结构优化与仿真分析

应力锥的尺寸对电力电缆终端内部绝缘界面电场及第一伞裙和第二伞裙之间伞裙间隙的表面电场分布会产生影响, 传统的电力电缆终端应力锥较小, 轴向长度小于 15 mm, 为减少电力电缆终端绝缘界面击穿, 缓解其电场集中问题, 本文的应力锥优化设计主要是在应力锥的轴向长度和端部曲率半径上。

### 2.1 应力锥轴向长度优化

首先对应力锥的轴向长度进行优化, 在搭建模

型的过程中, 保证应力锥 AB 面曲率不变, 改变应力锥轴向长度, 选取轴向长度分别为 10、15、20、25、30、35 mm 的优化方案, 应力锥轴向长度优化的二维结构示意图如图 2 所示。使用 COMSOL 仿真软件进行仿真, 仿真结果如图 3 所示。

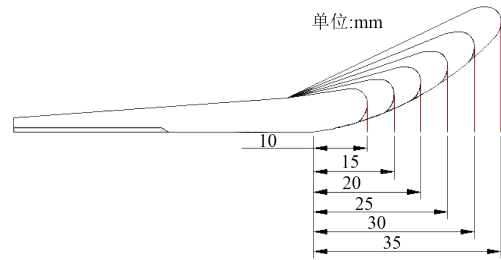


图 2 应力锥轴向长度优化的二维结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of two-dimensional structure of stress cone optimized by axial length

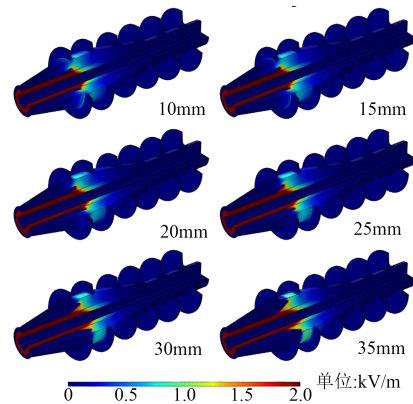


图 3 应力锥轴向长度优化的电场分布情况

Fig.3 The distribution of electric field of stress cone optimized by axial length

从图 3 可以看出, 电缆线芯内部场强为 0 kV/m, 电场集中在应力锥根部与内半导体层之间和 SiR 内靠近应力锥根部处。随着应力锥轴向长度的改变, 应力锥根部相应移动, SiR 内最大场强的位置随之移动。为了更好地观察应力锥轴向长度优化产生的电场变化, 探究设计后电力电缆终端表面场强分布和应力锥场强分布, 选取 3 条观测路径。观测路径 L1 是沿应力锥从应力锥根部经过应力锥 AB 面, 再经过应力锥根部到达外半导体层切断处; 选取 SiR 表面在第一伞裙和第二伞裙之间的伞裙间隙作为观测路径 L2; 选取从应力锥根部起的 XLPE 和 SiR 界面处作为观测路径 L3。观测路径 L1、L2、L3 的位置如图 4 所示。

通过上述仿真, 对观测路径 L1、L2、L3 上的场强分布进行绘图, 结果如图 5~7 所示。

从图 5 可以看出, 由于应力锥轴向长度有所改变, 造成了应力锥曲线长度随之改变, 峰值也随应

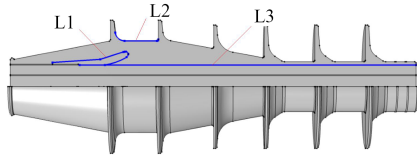


图4 观测路径

Fig.4 Observation paths

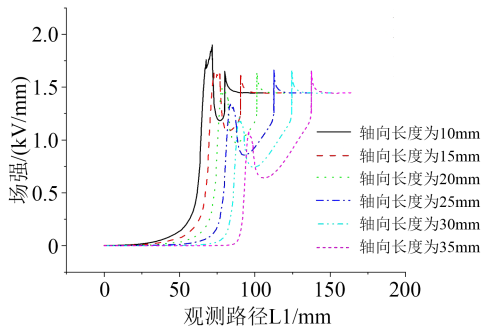


图5 观测路径 L1 的场强分布图

Fig.5 The field intensity distribution of the observed path L1

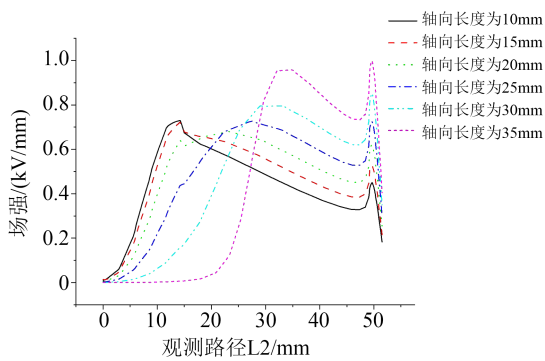


图6 观测路径 L2 的场强分布图

Fig.6 The field intensity distribution of the observed path L2

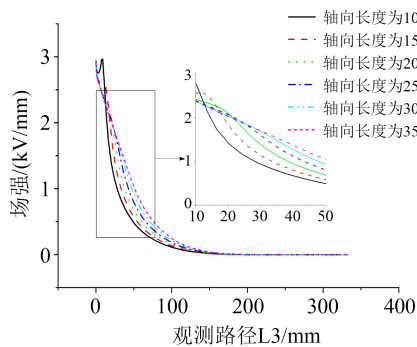


图7 观测路径 L3 的场强分布图

Fig.7 The field intensity distribution of the observation path L3

力锥轴向长度的增大而有所后移。图5中场强曲线第一峰值对应位置为应力锥根部,第二峰值对应位置为应力锥端部。随着应力锥轴向长度增大,应力锥端部场强呈现减小的趋势,其中,应力锥轴向长度为10 mm的端部最大场强为1.90 kV/mm,应力锥轴向长度为35 mm的端部最大场强为1.00 kV/mm,

相比之下,最大场强下降了47.37%,这是因为在应力锥轴向长度增大的同时法向半径也增大,造成场强减小。图5中每条场强曲线第二峰值基本一致,对应的应力锥根部场强变化不大,原因是应力锥根部处于电缆线芯和应力锥之间,应力锥轴向长度变化对内部电缆线芯、内半导体层和电缆主绝缘XLPE场强的影响较小。

从图6可以看出,场强曲线的第一峰值先缓慢减小后逐渐增大,并且对应的横坐标变大,这是应力锥端部随轴向长度的变化不断后移造成的;曲线的第二峰值靠近第二伞裙根部,第二峰值随应力锥轴向长度增大而增大。由于应力锥导电性好,并且与接地的外半导体层连接,应力锥表面电势为0 V。随着应力锥端部后移,应力锥端部也逐渐靠近伞裙间隙,导致在应力锥表面靠近伞裙间隙的同时伞裙间隙电势下降幅度变大,附近电场畸变加重。在图6中,应力锥轴向长度为35 mm的伞裙间隙上最大场强最大,为1.00 kV/mm;应力锥轴向长度为20 mm的伞裙间隙上最大场强最小,为0.68 kV/mm。

从图7可以看出,XLPE/SiR界面电场强度随观测路径L3增加而减小,其中应力锥轴向长度越小,场强曲线越陡峭,绝缘界面场强变化率越大,越容易发生击穿。其中应力锥轴向长度为10 mm的场强曲线在一开始有明显的上升趋势,对应位置是应力锥根部和双层介质绝缘之间的界面,其他轴向长度下的场强曲线并无明显上升趋势,说明轴向长度为10 mm应力锥对附近电场的均化作用较小,不能作为优化方案。

综上所述,应力锥轴向长度越小,应力锥端部、根部电场强度越大,SiR内部电场越集中,导致双层介质绝缘之间的界面电场集中严重;应力锥轴向长度越大,应力锥端部场强越小,绝缘界面上场强曲线倾斜程度变缓,伞裙间隙场强变大。虽然伞裙间隙上场强随应力锥轴向长度增大逐渐升高,但场强均小于1.00 kV/mm,相比之下,传统应力锥的轴向长度小于15 mm,虽然应力锥根部场强基本一致,但应力锥端部场强高于1.50 kV/mm,导致应力锥端部附近SiR电场畸变程度大。在应力锥曲线场强分布上,轴向长度为25 mm的场强曲线第一峰值较轴向长度为20 mm的场强曲线第一峰值小,并且轴向长度为20 mm和25 mm所表现的伞裙间隙上场强分布较为均匀,应力锥轴向长度为25 mm的伞裙间隙上最大场强为0.72 kV/mm,而且应力锥轴向长度为20 mm的绝缘界面电场比轴向长度为25 mm的电场更为集中。因此,在应力锥轴向长度的优化上选

择长度为25 mm。

### 2.2 应力锥端部半径的优化

在应力锥轴向长度为25 mm的基础上,继续对应力锥端部半径进行优化,保证应力锥轴向长度不变,设置应力锥端部半径分别为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mm,应力锥端部半径优化二维结构示意图如图8所示。使用COMSOL 仿真软件进行仿真,仿真结果如图9所示。

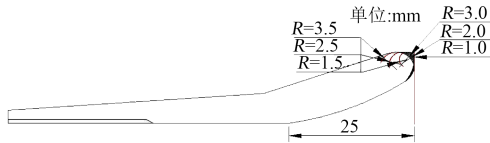


图8 应力锥端部半径优化的二维结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of two-dimensional structure of stress cone optimized by end radius

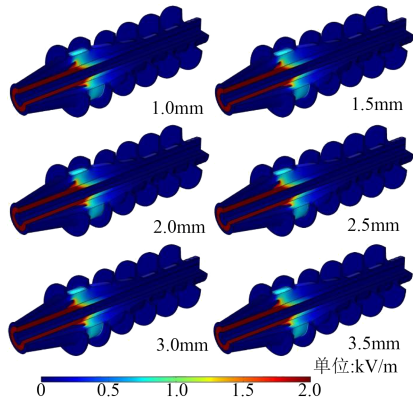


图9 应力锥端部半径优化的电场分布情况

Fig.9 The electric field distribution of stress cone optimized by end radius

从图9可以看出,应力锥端部半径的变化对电力电缆终端电场分布影响不大,将观测路径L1、L2、L3上的场强提取出来进行观察,场强分布如图10~12所示。

从图10可以看出,场强曲线第一峰值对应应力

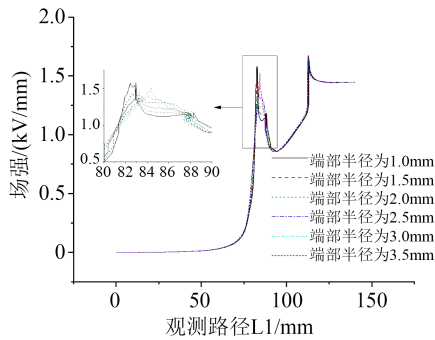


图10 观测路径L1的场强分布

Fig.10 The field intensity distribution of the observed path L1

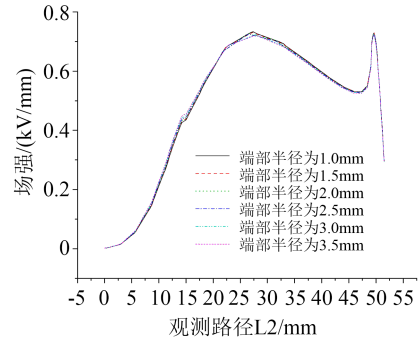


图11 观测路径L2的场强分布

Fig.11 The field intensity distribution of the observed path L2

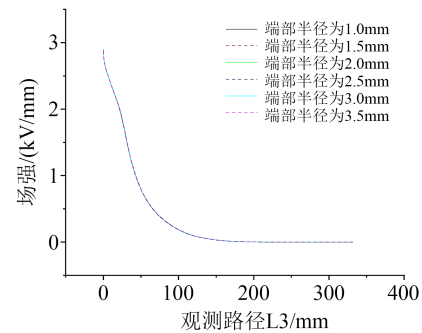


图12 观测路径L3的场强分布图

Fig.12 The field intensity distribution of the observation path L3

锥端部,第二峰值对应应力锥根部,不同应力锥端部半径对应的应力锥根部场强基本一致,而应力锥端部附近场强随端部半径变化而变化,其中应力锥场强曲线第一峰值随应力锥端部半径的变化而上下浮动,端部半径为1.0 mm的场强最大,为1.58 kV/mm,当端部半径大于2.5 mm后,其应力锥场强曲线基本一致。从图11可以看出,应力锥端部半径越大,其场强越大,因为端部半径变化不大所以现象不是很明显。从图12可以看出,场强曲线基本一致。

电力电缆应力锥端部半径的变化对应应力锥端部场强分布影响较大,对于其他部位影响较小。端部半径为2.5、3.0、3.5 mm的3种观测路径场强变化不大,但是在设计中端部半径越大,应力锥厚度越大。因此,在应力锥端部半径的优化上选取2.5 mm的端部半径。

### 3 样品试验验证

在仿真优化的过程中,从观测路径L1、L2、L3的场强曲线明显观察到应力锥轴向长度的变化是影响电力电缆终端电场分布的主要原因,应力锥端部半径的变化主要影响应力锥端部电场分布,对电力电缆终端应力锥其他部位电场分布影响较小。

根据仿真得到的数据制造模型,在制得试验样品后切开 SiR 内部,展现出应力锥侧面,如图 13 所示,黑色部分是应力锥,灰色部分是 SiR。



图 13 试验样品及剖面图

Fig.13 Test sample and its profile

通过搭建试验平台对传统电力电缆终端和优化后的电力电缆终端试验样品进行交流耐压试验和局部放电试验测试<sup>[15-16]</sup>,验证此次优化的完整性,试验平台如图 14 所示。在安装电力电缆终端样品前,确保 XLPE 表面平整光滑,无毛刺、杂质或其他制造过程中的瑕疵,使用无水乙醇对 XLPE 进行漂洗,去除表面灰层污物后在自然干燥条件下晾干,防止杂质、毛刺灰层污物对试验结果造成干扰。试验在密闭实验室进行,在 XLPE 表面均匀涂抹硅脂,硅脂涂抹厚度为 0.3 mm,按照施工步骤安装电力电缆终端样品,安装完成后,对电力电缆终端样品的 SiR 表面进行擦拭,因为刚生产完的电缆附件表面会形成毛刺。模拟正常施工电缆附件终端后,进行试验验证。



图 14 工频交流耐压试验平台

Fig.14 Power frequency AC withstand voltage test platform

### 3.1 工频交流耐压试验

交流耐压试验是鉴定电力电缆终端绝缘强度最有效和最直接的方法,能验证优化后的应力锥是否满足设计要求<sup>[17]</sup>。参照 GB/T 12706.4—2020 中 35 kV XLPE 电力电缆终端试验要求,对 35 kV XLPE 电力电缆终端样品施加  $4.5U_0$  (117 kV) 的交流电压,持续 5 min,以样品无击穿或闪络视为通过。

在试验过程中,观察是否在第一伞裙和第二伞裙之间的伞裙间隙中出现沿面放电。选取 3 组传统电力电缆终端和优化后的电力电缆终端样品作为试验样品,将交流耐压试验中的施加电压进行对比,结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,3 组传统电力电缆终端样品未发生击穿现象,能完成工频交流耐压试验;3 组优化后的电力电缆终端样品同样未出现击穿或闪络现象,说明绝缘设计满足耐压能力需求,且在试验过程中没有出现明显的沿面放电现象。

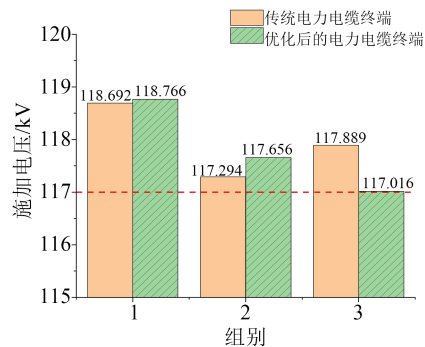


图 15 交流耐压试验结果

Fig.15 The test results of AC withstand voltage

### 3.2 局部放电试验

交流耐压试验中所施加的试验电压值,只是参考了产品能否经受住各种过电压的作用,但是这种过电压值的试验与运行中长期工作电压的作用是有区别的,经受住交流耐压试验的产品,能否在长期工作电压作用下安全运行,还需要进行局部放电试验<sup>[18]</sup>。参照 GB/T 12706.4—202 中 35 kV XLPE 电力电缆终端试验要求,对 35 kV XLPE 电力电缆终端样品施加  $1.73U_0$  (44.98 kV) 的交流电压,以放电量  $\leq 10$  pC 视为通过。为探究 35 kV XLPE 电力电缆终端的局部放电特征,分别对 3 组传统电力电缆终端和优化后的电力电缆终端样品进行局部放电试验,采用脉冲电流测量法测取局放信号,测取的放电量结果如图 16 所示。从图 16 可以看出,有一组传统电力电缆终端样品的放电量为 12.7 pC,没有满足局部放电试验要求。优化后的电力电缆终端样品的局部放电量均小于 10 pC,且没有观察到缺陷引起的局部放电。

传统电力电缆终端和优化后的电力电缆终端均通过工频交流耐压试验,但传统电力电缆终端中存在一组样品未能满足局部放电试验要求,其余两组传统电力电缆终端虽满足现行试验标准要求,但优化后的电力电缆终端放电量更少,降低了潜在局部击穿概率,提高了电缆绝缘寿命。

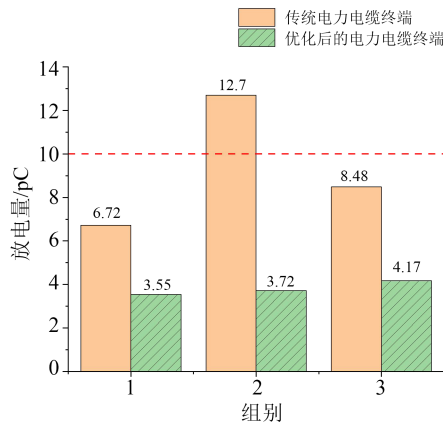


图 16 局部放电量试验结果

Fig.16 The test results of partial discharge

在经过交流耐压试验和局部放电试验验证后,可以认定优化后的电力电缆终端性能更好,轴向长度为 25 mm,端部半径为 2.5 mm 的应力锥起到良好的均化电力电缆终端场强的作用,减少了界面击穿和沿面放电现象。

#### 4 结论

(1)针对目前 35 kV XLPE 电力电缆终端在运行过程中出现沿面放电的现象,对应力锥的结构参数进行优化设计。在电力电缆终端设计之初,选择常用的 26/35 kV、截面积为  $1 \times 240 \text{ mm}^2$  的单芯铜芯 XLPE 电力电缆终端作为优化目标。通过有限元仿真软件对应力锥的轴向长度和端部半径进行参数调整,发现改变应力锥的轴向长度和端部半径都会对应力锥曲线 L1、伞裙间隙曲线 L2 和绝缘界面曲线 L3 的场强产生影响。随着应力锥的轴白长度增大,应力锥曲线上的场强逐渐减小,伞裙间隙曲线上的场强逐渐变大,绝缘界面曲线上的场强变小;随着应力锥的端部半径增大,应力锥端部场强减小,伞裙间隙曲线和绝缘界面曲线上的场强基本一致,并没有产生明显影响。最终得出优化后的应力锥轴向长度为 25 mm,应力锥端部半径为 2.5 mm。

(2)通过理论分析和现有的经验公式,并运用有限元软件对设计的电力电缆终端进行了参数确定,同时对研制样品进行了试验检验,结果达到预期目标,优化后的电力电缆终端优于传统电力电缆终端,有利于解决现有电力电缆终端绝缘界面击穿和沿面放电的问题,可以形成规模生产,具有极致的经济效益。

#### 参考文献:

[1] 孙略,张沛红,李中原,等. 高压直流电缆终端硅橡胶基非线性复合材料[J]. 高电压技术,2019,45(5):1654-1665.

[2] ZHU B, JIA Z D, HU H, et al. Relationship between the interfacial ramped DC breakdown voltage and the morphology of the XLPE/SiR interface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(3):689-697.

[3] 项恩新,王科,李丽妮,等. 导电杂质影响下 35kV 电缆终端绝缘特性研究[J]. 绝缘材料,2020,53(5):70-75.

[4] ZHAO X L, YANG X, GAO L, et al. Tuning the potential distribution of AC cable terminals by stress cone of nonlinear conductivity material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(5):2686-2693.

[5] 陈杰,吴世林,胡丽斌,等. 退役高压电缆附件绝缘状态及理化性能分析[J]. 电工技术学报,2021,36(12):2650-2658.

[6] 赵莉华,邱九皓,李彦姝,等. 硅脂环境下电缆中间接头界面压力演变规律研究[J]. 绝缘材料,2021,54(6):74-78.

[7] 王霞,余栋,段胜杰,等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术,2018,44(8):2710-2716.

[8] 王子康,周凯,朱光亚,等. 冷态循环单周期内电缆附件 XLPE-SiR 界面局部放电演变特性研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(15):6136-6145.

[9] 常文治,阎春雨,李成榕,等. 硅橡胶/胶联聚乙烯界面金属颗粒沿面放电严重程度的评估[J]. 电工技术学报,2015,30(24):245-254,261.

[10] 王少飞,雷志鹏,宋建成,等. 温度对乙丙橡胶绝缘表面沿面放电特征的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(7):41-48.

[11] 张开放,张黎,李宗蔚,等. 高频正弦电应力下气-固绝缘沿面放电现象及特征分析[J]. 电工技术学报,2019,34(15):3275-3284.

[12] 尚康良,曹均正,赵志斌,等. 320kV XLPE 高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):2018-2024.

[13] 李国倡,梁箫剑,魏艳慧,等. 配电网附件复合绝缘界面缺陷类型和位置对电场分布的影响研究[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2707-2715.

[14] 樊友平,武利会,康李一,等. 110kV 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.

[15] 罗容波,詹清华,王岩. 局放测试技术在高压电缆交流耐压试验中的应用[J]. 绝缘材料,2013,46(3):76-79.

[16] 孙抗,郭景蝶,马星河. 高压电缆局部放电小波包-峰度法在线检测与定位[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(7):1099-1106.

[17] 曹佳滨. 交联聚乙烯电缆现场耐压试验的特点分析[J]. 绝缘材料,2008,41(3):63-65.

[18] 汤浩,申泽军,张书琦,等.  $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流穿墙套管交、直流局部放电试验净空区域优化[J]. 高电压技术,2017,43(10):3173-3181.

收稿日期:2022-12-22;修回日期:2023-03-07。

作者简介:范在乾(1999-),男(汉族),山东聊城人,硕士生,主要从事电缆附件检测和外绝缘方面的研究;通信作者:戚日常(1966-),男(汉族),山东高密人,教授,主要从事电气设备状态检测与故障诊断技术的研究。