

DOI: 10.7652/xjtuxb201312018

一种新型高压电缆附件优化设计方法

王霞¹, 王陈诚¹, 吴锴¹, 柳松², 彭嘉康²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 上海捷锦电力新材料有限公司, 201200, 上海)

摘要: 针对电缆附件使用中的扩张变形对附件运行可靠性的影响,提出了一种新型高压电缆附件设计方法。该方法首先通过弹性力学理论,详细推导了电缆附件在扩张过程中的形变和位移方程,然后利用此形变和位移方程将电场优化后呈扩张态的附件结构进行结构松弛至生产结构,从而确保电缆附件安装后的最优电场分布。同时根据国产 35 kV 冷缩电缆结构参数,分析和对比了传统附件设计方法和新型附件设计方法对附件电场分布的影响,并通过实际电缆附件的结构扩张和松弛过程验证了附件形变和恢复方法的正确性。仿真和计算结果表明:电缆附件撑开时,绝缘内侧到外侧位移量非线性降低,附件厚度减薄、长度变短,应力锥角度、高压屏蔽管端部形状均偏离附件结构设计尺寸,造成附件界面电场、绝缘内部电场增加,而采用提出的新型电缆附件设计方法,能够有效确保电缆附件扩张后的最优电场分布。

关键词: 电缆附件;硅橡胶;扩张;形变;弹塑性

中图分类号: TM203 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0102-08

New Optimal Design Scheme for High Voltage Cable Accessory

WANG Xia¹, WANG Chencheng¹, WU Kai¹, LIU Song², PENG Jiakang²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Jiejin Advanced Electro-Material Company. Ltd., Shanghai 201200, China)

Abstract: Considering the effects of expansion and deformation after accessory installation on the reliability of cable accessory in service, a new optimal design scheme was proposed for high voltage cable accessory. The deformation and displacement equations of cable accessory during expansion were deduced in detail with the theory of elasticity, then the production structure was obtained via the optimized structure relaxation in an expansive state to ensure the optimum electrical field after accessory installation. According to the structure parameters of the domestic 35 kV cold shrinkage cable, the effects on electrical field distribution of cable accessory were analyzed by comparing the proposed and the traditional design schemes, then the deformation and recovery method were verified. The simulation and calculation show that the displacement nonlinearly decreases from inside to outside of the insulation during cable accessory expansion; the expanded accessory leads to a thinner main insulation thickness and a shorter length; the angle of stress cone and the end shape of high voltage shielding tube deviate from the design structure, which results in enhanced electric field at the interface and the end of HV shielding tube.

Keywords: cable accessory; silicone rubber; expansion; deformation; elastic-plasticity

收稿日期: 2013-03-12。 作者简介: 王霞(1976—),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907050, 51377131)。

网络出版时间: 2013-07-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130719.0910.006.html>

运行安全可靠且安装方便的电缆接头对于高压交联聚乙烯电缆是非常重要的,但电缆接头内部因存在复合界面和电场应力集中现象^[1-2],成为高压电缆输电线路的最薄弱环节和运行故障的典型部位。对国内近十年电缆本体、附件故障的统计表明,电缆接头质量故障率占了 63%,而接头故障中 73%源自界面放电^[3-4]。

为确保输电线路的安全运行,电缆附件质量受到越来越多的关注。国内外相关学者及企业不断探索附件的材料优化和结构仿真优化^[5-9],同时为避免附件沿面击穿,电缆附件在安装过程中与电缆过盈配合确保界面一定的抱紧力^[9]。在传统电缆附件结构设计过程中,电场优化尺寸即为附件生产尺寸,而实际电缆附件由于和电缆过盈配合,在投入运行后呈扩张态。扩张后的附件结构不仅导致附件主绝缘厚度变薄、长度变短,而且附件薄弱点如应力锥角度、高压屏蔽管端部形状均偏离附件结构设计过程中的优化尺寸。同时附件扩张率越大,偏离度越远,这势必大大降低了附件运行的可靠性。

目前,国内外对电缆附件的研究多集中在模拟附件安装过程的人为缺陷(刀痕、毛刺尖端、金属颗粒悬浮等)对附件电场分布的影响^[10],或者集中在夹层介质界面的闪络或击穿特性^[11],以及界面压力、粗糙度对界面介电性能的影响^[11-14],而对电缆附件在过盈配合使得扩张后结构变化对电场分布的影响未见报道。

本文针对国产 35 kV 冷缩电缆中间接头,基于硅橡胶高弹性材料的力学特性,利用弹性力学理论,详细推导了电缆附件在扩张过程中形变和位移方程。借助 MATLAB 计算软件,利用上述形变方程将电场优化后的冷缩接头扩张到安装尺寸,通过 ANSYA 有限元软件仿真与对比扩张前后冷缩接头的电场分布变化,提出新型电缆附件结构设计方案:电缆附件电场优化后的结构,不应作为生产尺寸而是安装尺寸。根据力学理论,通过过盈配合值,将电场优化后结构恢复到生产尺寸,从而确保电缆附件扩张后的最优电场分布。

1 电缆附件撑开前后的位移量

由于电缆附件(冷缩或预制型附件)在安装后成扩张态,为计算分析电缆附件在扩张后径向距离的变化。利用 ANSYS 软件初步建立内径为 10 mm、外径为 40 mm 的圆柱体模型(建立 1/4 模型)模拟电缆附件,如图 1 所示。设定对称边界条件,在模型

内圆柱面上施加边界条件为 0.25 MPa 的压力,进行应力场计算。设定已知条件(附件绝缘硅橡胶及电缆绝缘交联聚乙烯的弹性模量),计算得到扩张后模型的形变及位移量,如图 2 和图 3 所示。再取 ANSYS 模型径向上一条路径,对该路径进行位移分析,得出电缆附件从内侧到外侧绝缘位移量的大小分布如图 4 所示。由图 3 和图 4 可见,在附件内表面施加 0.25 MPa 压力后,模型中靠近附件内表面的单元径向位移越大外表面的单元径向位移越小,且位移量从内到外呈非线性降低。

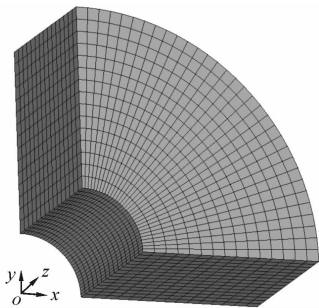


图 1 电缆附件 1/4 模型及其网格划分

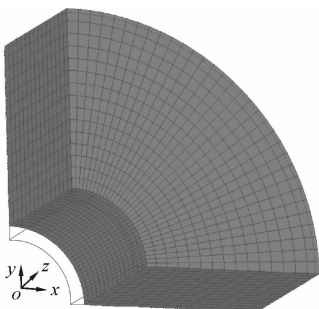


图 2 模型内侧施压后的形状变化

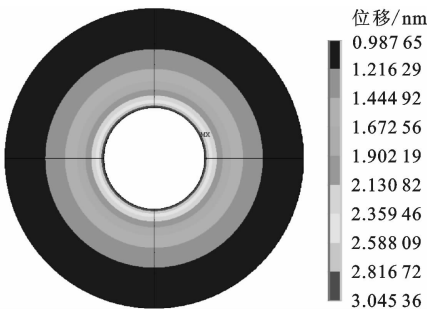


图 3 模型内侧施压后的位移分布图

由此可见,附件撑开后内外扩张量不同:内侧大而外侧小,必将导致电缆附件优化设计尺寸在附件撑开后发生变化。电缆附件的仿真与优化应是附件扩张后的尺寸,而实际生产过程中应是松弛态的附件尺寸。因此,有必要研究电缆附件扩张形变与结构松弛间的关系,从而实现扩张后的电缆附件结构

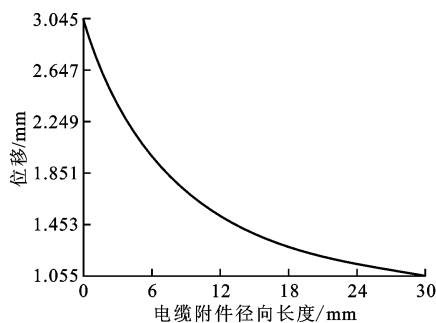


图4 沿径向从内至外位移量分布

优化后,再进行沿径向不同位置、不同位移量的用于附件生产尺寸的结构还原。

2 电缆附件扩张变形的力学分析

2.1 电缆附件扩张的形变分析

根据弹塑性力学^[15],当圆筒的外半径 b 与内半径 a 之比满足条件 $b/a > 1.2$ 时称为厚壁圆筒。它的几何形状对称于中心轴,且沿筒体轴向无变化。当厚壁圆筒处于弹性状态时,可以利用位移法进行求解,得到满足弹性边值问题的基本方程及相应的边界条件。电缆附件硅橡胶绝缘为高弹性塑料,因此可利用厚壁圆筒模型对电缆附件的扩张形变进行分析。

对厚壁圆筒模型,应力、应变和位移分量均与切向坐标 θ 无关,仅是径向坐标 r 的函数,因此采用极坐标 (r, θ) 对问题进行分析,如图5所示。由于轴对称性,所以剪应力 $\tau_{r,\theta} = 0$,切向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r 与 r 有关,而与 θ 无关,即它们的函数表达式可表示为 $\sigma_\theta(r)$ 、 $\sigma_r(r)$ 。同理可知,切向应变 ϵ_θ 和径向应变 ϵ_r 的函数表达式可写为 $\epsilon_\theta(r)$ 、 $\epsilon_r(r)$ 。由于轴对称,筒体沿径向的膨胀或收缩是均匀的,所以径向位移 μ 只与 r 有关,其函数表达式为 $\mu(r)$ 。筒体的轴向位移 ω 与 r 、 θ 无关,仅与 z 有关,因此轴向位移的函数表达式可写为 $\omega(z)$ 。

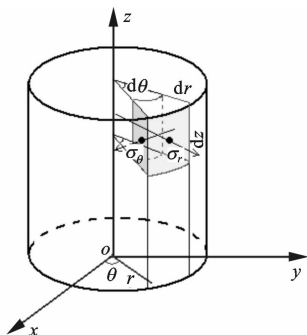


图5 筒状模型单元

2.2 建立附件形变的微元方程边界条件

提取图5中筒状模型的微元,画出微元的受力分布,如图6所示。

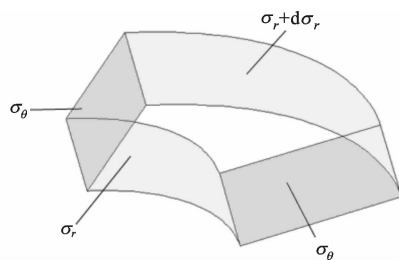


图6 厚壁圆筒微元及微元受力分析图

由于厚壁圆筒处于平衡状态,所以其合力必定为0,其微元所受合力也必定为0,所以必定满足

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\theta -$$

$$2(\sigma_\theta + \alpha d\sigma_r)dr\sin(d\theta/2) = \sigma_r r d\theta$$

上式经过简化之后得到平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

设微元的位移 $\Delta r = \mu$,则微元的切向应变 $\epsilon_\theta = \frac{\pi \Delta r d\theta}{\pi r d\theta} = \frac{\mu}{r}$,而微元的径向应变 $\epsilon_r = \frac{d\mu}{dr}$,所以有几何方程

$$\epsilon_\theta = \frac{d\mu}{dr}; \quad \epsilon_r = \frac{\mu}{r} \quad (2)$$

根据广义胡克定律,可得本构方程

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r + \nu \sigma_\theta) \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta + \nu \sigma_r) \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_r + \nu \epsilon_\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_\theta + \nu \epsilon_r) \\ \sigma_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3b)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比。

厚壁圆筒应满足的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r|_{s_a} &= F_r, \text{在力边界 } S_\sigma \text{ 上} \\ \mu|_{s_u} &= \bar{\mu}, \text{在位移边界 } S_\mu \text{ 上} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.3 附件微单元受力方程的求解

将几何方程(2)代入本构方程(3),得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{d\mu}{dr} + \nu \frac{\mu}{r} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{d\mu}{dr} + \frac{\mu}{r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

再将式(5)代入平衡方程(1),得

$$\frac{d^2\mu}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mu}{dr} - \frac{\mu}{r^2} = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(r\mu)}{dr} \right) = 0 \quad (6)$$

对式(6)积分,得

$$\begin{aligned} \mu &= Ar + \frac{B}{r} \\ \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[(1+\nu)A - (1-\nu) \frac{B}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[(1+\nu)A + (1-\nu) \frac{B}{r^2} \right] \\ \sigma_z &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: A 、 B 为积分常数,给定边界条件便可确定。

已知电缆附件受均匀内压 p ,外壁受压为 0,由此边界条件得

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) < 0 \\ \sigma_\theta &= \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) > 0 \\ \mu &= \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left[\frac{(1+\nu)b^2}{r} + (1-\nu)r \right] \end{aligned} \quad (8)$$

结合式(7)和式(8),可推知

$$\begin{aligned} A &= \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} (1-\nu) \\ B &= \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} (1+\nu)b^2 \end{aligned}$$

因此,可由本构方程(3)得出电缆附件的径向应变 $\epsilon_\theta(r)$ 、切向应变 $\epsilon_r(r)$ 和轴向应变 ϵ_z 的求解方程如下

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left[(1-\nu) - \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right] \\ \epsilon_\theta &= \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left[(1-\nu) + \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right] \\ \epsilon_z &= -\frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} 2\nu \end{aligned} \quad (9)$$

2.4 实际附件的形变分析

取硅橡胶泊松比 $\nu=0.5$;假设内径为 a 电缆附件未撑开时 a 为 R_1 ,撑开后的 a 为 R'_1 ;外径 b 为电缆附件未撑开时 b 为 R_2 ,撑开后 b 为 R'_2 。

由式(9)可得,轴向应变

$$\epsilon_z = -\frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} 2\nu = -\frac{R_1^2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)}$$

将几何方程(1)代入求解方程(9),得径向应变为

$$\epsilon_r = \frac{d\mu}{dr} = \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left[(1-\nu) - \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right] \quad (10a)$$

切向应变为

$$\epsilon_\theta = \frac{\mu}{r} = \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left[(1-\nu) + \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right] \quad (10b)$$

因为 $\epsilon_r = \frac{d\mu}{dr}$,所以对 ϵ_r 进行积分可得 $\Delta\mu = (R'_2 - R'_1) - (R_2 - R_1)$,而圆筒外径 $r=b$ 处的变化为 $(R'_2 - R_2)$,可得

$$\begin{aligned} \int_a^b \epsilon_r dr &= (R'_2 - R'_1) - (R_2 - R_1) = \Delta\mu \\ \frac{2a^2 bp}{E(b^2 - a^2)} &= (R'_2 - R_2) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)与 R_1 、 R_2 代入式(11),得

$$\begin{aligned} \frac{R_1^2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \left[0.5 - \frac{1.5R_2^2}{r^2} \right] dr &= \Delta\mu \\ \frac{2R_1^2 R_2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)} &= (R'_2 - R_2) \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)进行计算、变形后,得

$$\begin{aligned} \frac{R_1^2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)} \left[0.5(R_2 - R_1) + 1.5R_2^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right] &= \Delta\mu \\ \frac{R_1^2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)} &= \frac{(R'_2 - R_2)}{2R_2} \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可以看出

$$\frac{(R'_2 - R_2)}{2R_2} =$$

$$\Delta\mu / \left[0.5(R_2 - R_1) + 1.5R_2^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right] \quad (14)$$

将已知的 R_1 、 R'_1 、 R'_2 代入式(14),便能得到松弛后 R_2 的值。

因为 $\epsilon_z = -\frac{R_1^2 p}{E(R_2^2 - R_1^2)} = -\frac{(R'_2 - R_2)}{2R_2}$,只要代入 R_1 、 R'_1 、 R_2 、 R'_2 的值,便能够解算出 ϵ_z 。对于附件撑开前后半径变化的关系式,可通过改变式(12)中的积分上限,即 $\int_{R_1}^r \epsilon_r dr = (R - R'_1) - (r - R_1)$, ($R_1 \leq r \leq R_2$)。因此,当已知扩张前的半径 r 的大小时,可以得出扩张后的半径 R ;相反,当已知扩张后的半径 R 时,也可以利用上式得到扩张前的半径 r 。

3 电缆附件扩张形变与电场分析

3.1 电缆附件的形变与恢复方法

(1)将电缆附件生产尺寸扩张到安装尺寸。形变扩张需要的已知条件:①电缆截面尺寸(包括绝缘外径,即附件扩张后的内径 R'_1);②电缆附件内径 R_1 ;③电缆附件厚度 d (由附件厚度可计算得出附件

外径 $R_2 = R_1 + d$)。由已知条件,再根据前文电缆附件的扩张变形和位移方程进行计算。

(2) 将电缆附件安装尺寸松弛还原到生产尺寸。松弛还原需要的已知条件:①电缆截面尺寸(包括绝缘外径,即附件扩张后的内径 R'_1);②电缆附件扩张后的外径 R'_2 ;③单边过盈量 l (由单边过盈量可计算出松弛后的附件内径 $R_1 = R'_1 - l$)。由已知条件,再根据前文电缆附件的扩张变形和位移方程进行计算。

(3) 35 kV 冷缩电缆附件参数设定。以线芯截面为 630 mm^2 的电缆对应的国产 35 kV 独立式应力锥结构的冷缩电缆中间接头为例,已知电缆绝缘外半径为 26.68 mm,附件单边过盈量为 8.9 mm,附件内半径 17.78 mm,附件整体厚度为 27 mm。接头结构示意图如图 7 所示。

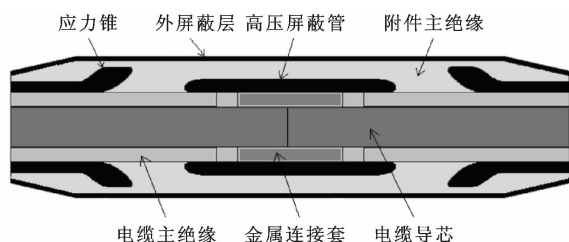


图 7 35 kV 冷缩电缆附件结构示意图

3.2 传统的设计方法(电场优化后再扩张)

传统的电缆附件设计流程如下:

(1) 对套装在电缆上的附件进行结构设计和电场优化,确保电缆附件的界面和高压屏蔽管端部场强不超过设计值^[16]。优化的结构如图 8 中①所示。

(2) 根据过盈量的要求,直接减小步骤①中附件内外径作为附件生产尺寸,而未考虑附件在“瘦身”过程中结构和厚度的改变,如图 8 中②所示。

(3) 根据 3.1 节中附件的形变与恢复方法(1),根据电缆附件的扩张变形和位移方程,借助 MATLAB 计算软件将附件生产尺寸扩张到安装尺寸。附件在安装后,由于撑开后厚度变薄、长度变短、应力锥角度、高压屏蔽管厚度及端部形状均发生变化,所以如图 8 中③所示,会偏离最初设计的最佳优化结构①。

为验证传统的设计方法对附件设计电场的影响,本文利用 ANSYS 有限元软件对图 8 中①电场优化尺寸和③实际安装尺寸进行电场仿真计算。硅橡胶材料已知参数:相对介电常数 $\epsilon_r = 2.7$;交流击穿强度 $E_{AC} = 18 \text{ V/mm}$ 。由 35 kV 高压交流电缆附件设计方法^[16]得:接头内部场强小于 4.5 kV/mm ,

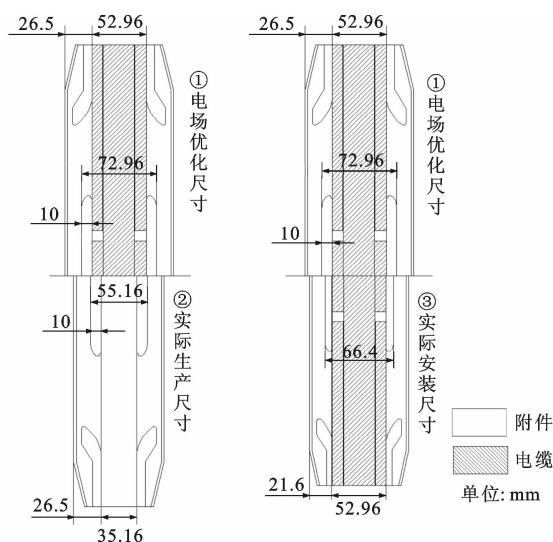


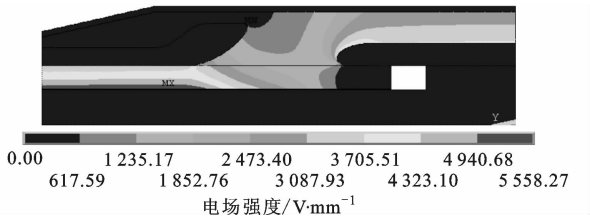
图 8 附件电场优化、实际生产与安装尺寸对比图

界面场强小于 2 kV/mm 。已知硅橡胶材料属于半无机材料,螺旋状的分子结构使其成为无定形的弹性聚合物。电缆附件在弹性扩张过程中沿切向拉伸和径向压缩,有利于减小硅橡胶分子链维持螺旋状结构的内在应力,促进分子链伸直排列,趋于热力学稳定的聚集态结构,介电常数略有降低(从 2.7 降到 2.6)^[17]。在交流电场下,电场分布与介电常数成反比,因此附件绝缘径向扩张率的梯度降低会导致附件绝缘内侧场强的略增,而一般安装后的电缆附件的扩张率均小于 50%,远低于硅橡胶 300% 的弹性形变范围,因此本文在后续的电场仿真计算过程中忽略了低扩张率下附件径向介电异性对计算结果的影响。关于径向介电参数的梯度变化对附件绝缘电场分布的影响,有待进一步深入研究。

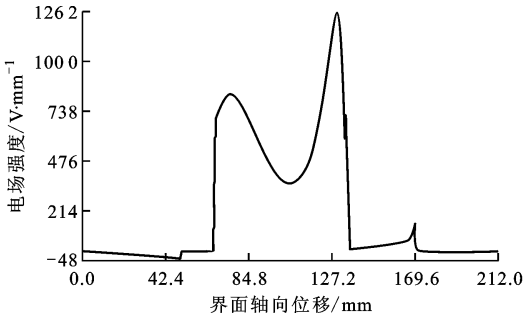
图 9 示出最佳优化结构(见图 8 中①)的电场分布。由图 9 可见,附件界面最大电场为 $1\,261 \text{ V/mm}$,高压屏蔽管端部最大电场为 $4\,240 \text{ V/mm}$,满足设计要求。图 10 示出传统附件设计中优化结构被扩张后的结构(见图 8 中③)的电场分布。由图 10 可见,附件被扩张后,由于附件厚度、长度、应力锥角度、高压屏蔽管厚度及端部形状均发生变化,导致界面最大电场增加到 $1\,765 \text{ V/mm}$,高压屏蔽管端部最大电场增加到 $5\,180 \text{ V/mm}$,远超出设计场强值。

3.3 新型设计方法(电场优化后松弛)

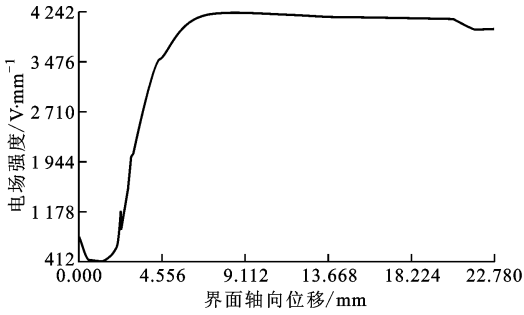
传统的附件结构设计方法以电场优化尺寸作为附件生产尺寸再扩张,会因为附件优化结构发生畸变而导致附件界面电场和绝缘内部电场增加,且冷缩附件的过盈量越大,扩张率越高,附件结构畸变越严重,势必造成附件安装后运行电场远高于设计电



(a)总电场分布

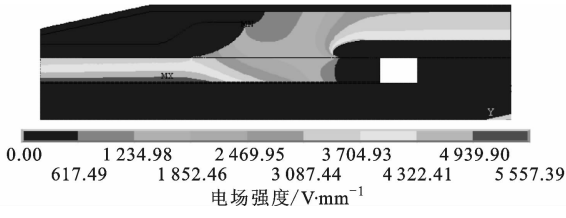


(b)界面电场分布

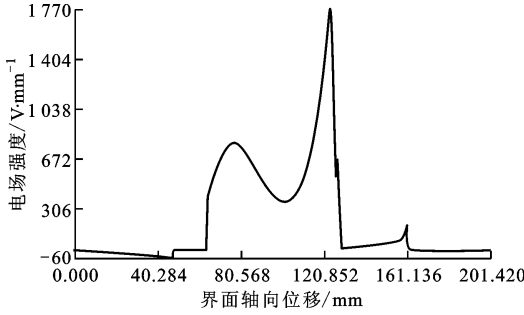


(c)高压屏蔽管端部电场分布

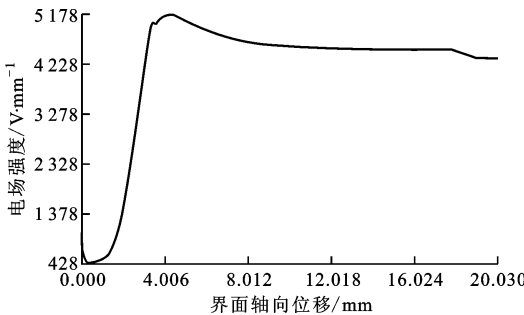
图 9 35 kV 冷缩电缆附件结构优化的电场分布



(a)总电场分布



(b)界面电场分布



(c)高压屏蔽管端部电场分布

图 10 35 kV 冷缩电缆附件优化结构被扩张后的电场分布

场,严重影响附件安全运行的可靠性。

因此,附件的合理结构设计流程应为:

(1)与传统设计流程(1)相同,首先对扩张态,即套装在电缆上的附件进行结构设计和电场优化。优化的结构同图 8 中①所示。

(2)根据附件的形变与恢复方法(2),由电缆附件的扩张形变和位移方程,利用 MATLAB 计算软件将附件安装尺寸松弛还原到生产尺寸。这样才能确保电缆附件以一定过盈量扩张后与最初设计的最佳结构相同,确保最优电场分布(见图 9)。

图 11 示出附件安装尺寸松弛还原到生产尺寸的 1/2 结构变化图。由图 11 可见,电缆附件在松弛还原整体厚度增加、长度变长,应力锥角度及应力管形状均发生了较大的变化。

以上分析表明,考虑电缆附件撑开前后的形变,对于实际附件生产有十分重要的意义。如果不考虑其形变,则附件安装之后形状会大大偏离优化设计

所规定的形状,这可能使得优化设计完全失去其应有的作用。相反,如果将电缆附件的形变考虑到设计环节,才能确保附件安装后的形状接近优化设计所需形状,从而进一步提高电缆附件安全运行可靠性。



图 11 35 kV 冷缩电缆附件松弛前后结构的变化

4 理论计算与实际测量值对比

为验证电缆附件形变方程理论计算的正确性,选取一根 3M 公司生产的 35 kV 冷缩电缆接头。为方便比较形变量,将接头从中间对半剖开,其中一半

保持含衬条的预扩张态,另一半为去掉衬条的松弛态,如图 12 所示。由图 12 可见,在撤去衬条后,电缆接头恢复至生产结构,内、外径变小,长度变长。具体的参数变化如表 1 所示。



图 12 冷缩附件在预扩张与松弛态的对比图

根据表 1 中形变参数,利用本文推导的附件在扩张或松弛过程中形变方程式(14),便可计算出电缆接头由工厂生产的松弛态到扩张态或由扩张态恢复到生产松弛态的形变过程。计算与实际测量结果如表 2 所示。可见,本文推导的电缆附件在扩张过程中的形变与位移方程,理论计算与实际测量误差小于 0.5%。因此,本文提出的电缆附件扩张形变与结构松弛设计方法对电缆附件实际生产和长期安全可靠运行具有一定的指导意义。

表 1 电缆接头扩张态与松弛态的尺寸对比		
参数	扩张态	松弛态
内半径/mm	38.29	15.0
外半径/mm	56.53	42.0
1/2 长度/mm	255.0	287.5

表 2 电缆接头扩张态与松弛态的计算值与实测值			
状态	参数	实测值	计算值
松弛态到 扩张态	外半径/mm	56.53	56.28
	1/2 长度/mm	255.00	254.50
扩张态到 松弛态	外半径/mm	42.00	42.20
	1/2 长度/mm	287.50	288.10

5 结 论

本文针对电缆附件在使用过程中的扩张态对附件结构的变化,通过弹性力学理论,推导了电缆附件在扩张过程中形变和位移方程,分析了附件过盈安装对电缆附件设计电场的影响,提出了新型电缆附件设计方法,主要得出如下结论。

(1)电缆附件撑开时,从绝缘内侧到外侧发生位

移,位移量不同,内侧大而外侧小,且位移量为非线性降低。

(2)根据厚壁圆筒力学形变原理,推导得出电缆附件扩张过程中的形变和位移方程。结果表明:电缆附件扩张后厚度减薄、长度变短,应力锥角度、高压屏蔽管端部形状均偏离附件结构设计尺寸,造成附件界面电场、绝缘内部电场增加。

(3)提出新型电缆附件设计方法,即将电场优化后呈扩张态的电缆附件安装尺寸,利用电缆附件扩张过程中的形变与位移方程,松弛还原到工厂生产尺寸,从而确保附件扩张安装后的形状为最优化结构。

参考文献:

[1] KWANG S S, JIN H N, JI H K, et al. Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7 (2): 216-221.

[2] TANAKA T, ITO T, TANAKA Y, et al. Carrier jumping over a patenting barrier at the interface of LDPE laminated dielectrics [C]//Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 40-43.

[3] YING Q L, WEI D, GAO X Q, et al. Development of high voltage XLPE power cable system in China [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 247-253.

[4] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.

LUO Junhua, QIU Yuchang, YANG Liming. Operation fault analysis of CLPE power cable about 10 kV [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 14-16.

[5] YAROSLAVSKIY V, WALKER M, KATZ C, et al. Comparative laboratory evaluation of preloaded joints for medium voltage cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 516-522.

[6] VIVO B D, SPAGNUOLO G, VITELLI M. Variability analysis of composite materials for stress relief in cable accessories [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 418-425.

[7] DAIGO Y, TAKEHISA H, SHIGEKI S, et al. Electric field optimization of the power cable joint by using evolutionary calculation method [J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 150 (4): 44-53.

[8] 李喆, 贾贤, 尹毅. 10 kV 及以下电缆附件的数值计

算和应力锥优化辅助设计 [J]. 高压电器, 2006, 42 (5): 379-381.

LI Zhe, JIA Xian, YIN Yi. Assistant design of numerical calculation and electrical stress optimizing on cable accessories up to 10 kV [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 379-381

[9] 王佩龙. 高压电缆附件的电场及界面压力设计 [J]. 电线电缆, 2011(5): 1-4.

WANG Peilong. Electrical field and interface pressure control in HV cable accessories design [J]. Electric Wire & Cable, 2011(5): 1-4.

[10] 王超, 刘毅刚, 刘刚, 等. 有限元法应用于电缆终端应力锥缺陷分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 152-154.

WANG Chao, LIU Yigang, LIU Gang, et al. Analysis of faults on cable terminal stress cone based on finite element method [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 152-154.

[11] DU B X, GU L. Effects of interfacial pressure on tracking failure between XLPE and silicon rubber [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1922-1930.

[12] DU B X, ZHU X H, GU L, et al. Effect of surface smoothness on tracking mechanism in LPE-Si-rubber interfaces [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 176-181.

[13] DANG C. Effect of the interfacial pressure and electrode gap on the breakdown strength of various dielectric interfaces [C]//Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 695-698.

[14] HASHEMINEZHAD S M, ILDESTAD E, NYSVEEN A. Breakdown strength of solid/solid interface [C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 695-698.

[15] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 183-230.

[16] 刘子玉, 王惠明. 电力电缆结构设计原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995: 259-268.

[17] 巫松桢, 谢大荣, 陈寿田, 等. 电气绝缘材料科学与工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 167-169.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 54 页)

[5] YANG B, BUDDHARAJU K D, TEO S H, et al. Vertical silicon-nanowire formation and gate-all-around MOSFET [J]. IEEE Electron Device Letters, 2008, 29(7): 791-794.

[6] LONG Wei, OU H, KUO J M, et al. Dual-material gate (DMG) field effect transistor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(5): 865-870.

[7] LI Zunchao. Dual-material surrounding-gate metal-oxide-semiconductor field effect transistors with asymmetric halo [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26 (1): 018502.

[8] CHIANG T K. A new two-dimensional threshold voltage model for cylindrical fully-depleted surrounding-gate (SG) MOSFET [J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(2/3): 379-383.

[9] GOEL K, SAXENA M, GUPTA M, et al. Two-dimensional analytical threshold voltage model for DMG Epi-MOSFET [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(1): 23-29.

[10] CHIANG T K. A new compact subthreshold behavior model for dual-material surrounding gate (DMSG) MOSFETs [J]. Solid-State Electronics, 2009, 53(5): 490-496.

[11] 甘学温, 黄如, 刘晓彦, 等. 纳米 CMOS 器件 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[12] 王阳元, 张兴, 刘晓彦, 等. 32 nm 及其以下技术节点 CMOS 技术中的新工艺及新结构器件 [J]. 中国科学: 信息科学, 2008, 38(6): 921-932.

WANG Yangyuan, ZHANG Xing, LIU Xiaoyan, et al. New technologies and structures of CMOS device in 32 nm technology node and beyond [J]. Science China: Information Sciences, 2008, 38(6): 921-932.

[13] 刘林林, 李尊朝, 尤一龙, 等. 全耗尽围栅金属氧化物半导体场效应管二维模型 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(2): 73-77.

LIU Linlin, LI Zunchao, YOU Yilong, et al. Two dimensional analytic model for fully depleted surrounding gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45 (2): 73-77.

(编辑 刘杨)