

高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨

王霞, 余栋, 段胜杰, 张宇巍, 张文辉, 吴锴, 屠德民

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 高压电缆附件的设计是一项涉及电气、机械、材料和热力学四方面的复杂过程, 只有经过周密、精确的电、力、热的复合场设计, 才能将因生产环节导致的故障率降至最低。因此针对高压电缆附件用预制或冷缩型附件设计环节中的几个关键问题, 从电学性能、力学性能、松弛特性、扩张变形和电场优化等几个方面出发, 提出橡胶材料弹性模量越高, 界面压力越大, 附件所需扩张率越低; 温度越高, 伸长率越大, 橡胶材料的应力松弛速度越快; 电缆附件撑开时, 从内侧到外侧发生非线性位移, 内侧大而外侧小, 根据弹塑性力学理论, 建立电缆附件的厚壁圆筒力学变形方程, 可将电缆附件扩展后的电场优化尺寸成功恢复到厂家生产尺寸; 最后给出合理设计电缆附件生产结构的方法和思路。该研究方法有望用于指导我国高压交、直流预制/冷缩型电缆附件的材料选型和结构优化设计。

关键词: 电缆附件; 弹性模量; 扩张率; 应力松弛; 形变与恢复

Dealing With Some Key Design Problems in HV Cable Accessory

WANG Xia, YU Dong, DUAN Shengjie, ZHANG Yuwei, ZHANG Wenhui, WU Kai, TU Demin

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

Abstract: The design of high voltage cable accessory is a complex process involving electric, machinery, material, and thermodynamics. The electrical, mechanical and thermal composite field is precisely designed to minimize the failure rate caused by production process. Consequently, we discussed several key design problems such as the electrical properties, mechanical properties, relaxation characteristics, expansion deformation and electric field optimization in high voltage prefabricated or shrinkable cable accessories. We proposed that accessories expansion rate would decrease with rubber elasticity modulus and increase of interfacial pressure, and rubber stress relaxation rate would increase with environment temperature and rubber elongation increasing. The expansion of the cable accessory brings a nonlinear displacement from the inside to the outside, and the inside displacement is large and the outside is small. Based on the theory of the elastic-plasticity mechanics, the thick-wall cylinder deformation equations of cable accessories were established. The production structure could be obtained by the relaxation process of the accessory, recovering from the expanded installation state after electrical field optimization. Finally, a reasonable method to design cable accessories production was proposed. The method is expected to guide the structure optimization design and material selection of high voltage AC and DC prefabricated/shrinkable cable accessories.

Key words: cable accessory; elasticity modulus; spreading rate; stress relaxation; deformation and recovery

0 引言

电缆附件在电力系统中扮演着衔接、过渡等重要角色, 是保证电力系统正常运行不可缺少的组成部分。电缆附件主要有冷缩、热缩、绕包或预制型四类。在高电压等级时, 电缆附件一般选用预制或冷缩形式。目前, 预制或冷缩电缆附件常用的绝缘材料主要为三元乙丙橡胶 (EPDM) 或硅橡胶 (SIR)

两种。电缆连接时由于外屏蔽层断开, 电场分布发生改变, 而电缆附件的作用即通过物理或化学的方法改变该处电场分布, 使其能承受电缆长期运行的需要, 并通过过盈配合后附件橡胶与电缆绝缘界面间形成一定的界面压力, 构成双层介质的复合结构。但实验及工程应用均表明: 电缆与附件间的复合界面和电场应力集中现象是电力输电系统的最薄弱环节和运行故障的典型部位^[1-5]。其中电力电缆线路的早期 (投运初期 1~5 年内) 故障 63%集中在附件产品质量问题^[6]。

目前, 国内外针对高压电缆附件的设计理念一

般通过有限元电场计算合理优化附件结构实现^[7-10]。仿真过程中界面设计场强的选取是在综合考虑各种界面条件(界面压力、界面粗糙度、界面受潮、界面污秽等)后,选取电缆与附件界面设计场强为0.4~0.7 kV/mm 的指导建议^[11-12]。而界面压力的选取则根据界面压力与界面击穿强度的关系特性,认为附件与电缆主绝缘件的界面压力在0.1~0.25 MPa 范围时,完全满足界面电气强度要求,也不会造成安装困难^[13]。

目前,我国高压交联电缆的发展较为成熟(达500 kV),而相应配套的电缆附件发展相对滞后。随着橡胶加工设备和工艺的日趋成熟和材料供应的专业化,仿造国外附件结构并不困难,但一个没有经过合理规划、精确设计的高压电缆附件,无法保证附件长期运行的安全可靠。高压电缆附件的设计是一项涉及电气、机械、材料和热力学四方面的复杂过程,本文针对高压电缆附件用预制或冷缩型附件设计环节中的几个关键问题,从电学性能、力学性能、松弛特性、扩张形变和电场优化等几个方面出发,提出合理设计电缆附件的方法和思路。该研究方法有望用于指导我国高压交、直流电缆附件的选型和结构设计优化。

1 电缆附件设计中的几个关键问题

1.1 弹性模量、界面压力与扩张率的关系

一般来讲,材料弹性模量越低,材料越柔软,则需较大的过盈量或扩张率来实现附件与电缆配合的接触面压;相反,材料弹性模量越高,材料越硬,所需过盈量或扩张率越小。一般橡胶材料的弹性模量为1~20 MPa。有研究表明:当电缆附件和电缆绝缘间的界面压力达到0.1~0.25 MPa 范围时,能够满足电气强度要求,且不会造成安装困难或电缆绝缘损坏^[9]。由此可见,附件过盈量的选取是确保界面压力的必要条件,而界面压力的大小又与橡胶材料弹性模量呈正比。而针对界面压力的测定方法较为复杂,比如用铝管代替电缆,在铝管内壁放置电阻应变器测量铝管外壁与橡胶间界面压力^[14]。然而,铝管是刚形体,而实际塑性电缆是弹性体,测量结果不具备可比性。或采用在电缆附件与电缆本体间界面预置传感器^[15]的方法测量界面压力,但传感器植入困难,同时会造成界面绝缘损坏等。

本文针对待选定的几种附件用橡胶材料和电缆用交联聚乙烯(XLPE)绝缘料,通过实际测量

其力学特性(弹性模量),利用ANSYS 软件建立电缆接头安装后力学仿真模型,定量分析电缆附件弹性模量、界面压力与扩张形变率之间的关系。详细的界面应力分布仿真计算过程参见文献^[16]。

图1 为仿真计算得到不同弹性模量的硅橡胶绝缘的15 kV 电缆附件(附件主绝缘厚10 mm)套接于15 kV 交流电缆(导体截面400 mm²,电缆绝缘厚4.5 mm)后,附件单边过盈量与相应的界面压力值关系。由图1 可见,附件单边过盈量或弹性模量越高,界面压力越大。同时由过盈量值计算得出附件内侧扩张率,见表1。由上述分析可知,硅橡胶弹性模量越大,较小的过盈量有助于降低附件的扩张形变率。但较高的弹性模量会造成电缆附件安装困难,甚至造成附件内绝缘或半导体层撕裂。为确保界面长期运行的抱紧力,附件内侧安装扩张率一般要求在120%~150%范围^[13]。扩张率越高界面压力越大,但弹性材料的应力松弛速度也越快^[17]。因此,为确保电缆与附件绝缘界面30 年的可靠面压,则需研究电缆附件用橡胶绝缘在长期运行中的应力松弛现象,从而指导电缆附件用橡胶绝缘弹性模量,即附件内侧扩张率的合理选择。

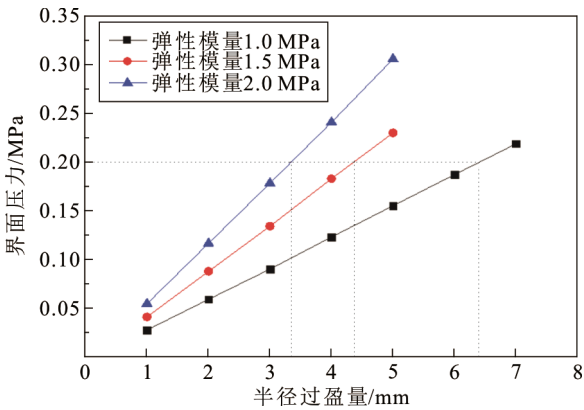


图1 不同弹性模量时电缆附件面压力与单边过盈量的关系
Fig.1 Relationship between single shrink range and interfacial pressure under different elasticity modulus

表1 电缆附件扩张参数表

物理量	弹性模量/MPa		
	1.0	1.5	2.0
单边过盈量/mm	6.4	4.4	3.4
内侧扩张率/%	143.1	129.6	122.9

注: 电缆截面为400 mm²; 附件厚度为10 mm; 电缆外直径为35.6 mm; 界面压力为0.20 MPa。

1.2 永久形变率与温度、伸长率、弹性模量的关系

如上所述, 电缆与附件界面抱紧力的实现, 依赖于附件用高弹性橡胶材料的高弹态所表现出来的力学特性。但橡胶高弹性的发展具有时间依赖性, 即松弛特性。当橡胶材料长期处于扩张态时, 材料内应力将随时间延长出现由于分子运动导致链段顺外力方向调整而出现逐渐衰减的现象, 即应力松弛现象。且扩张率越大或温度越高, 应力松弛越快^[17]。由 1.1 节可知, 橡胶材料弹性模量的大小决定了恒定界面压力下附件过盈量的选择。而过盈量的大小又反映了橡胶材料的扩张形变率, 因此, 根据时-温等效原理^[18-19], 通过研究橡胶材料在高温、短时间内的应力松弛特性, 反推出橡胶材料在常温下的应力松弛特性。该时-温等效方法可成功用于预测附件绝缘长期运行期间界面抱紧力/压力的可靠性和使用寿命, 或用于指导室温下附件绝缘预扩张态的工厂存储周期^[20]。

实验方法参照文献^[20], 按照 GB/T 9871—2008 硫化橡胶或热塑性橡胶老化性能的测定拉伸应力松弛试验标准制定实验方案。测量不同老化温度(150、200 °C)下, 不同拉伸率(125%、150%)时硅橡胶材料的应力松弛特性, 老化时间为 1 个月。

图 2 和图 3 分别为伸长率 125% 和 150% 的硅橡胶材料(弹性模量 1.5 MPa)在 150 °C 和 200 °C 下的应力松弛特性测量数据。由图中可见, 高温和大形变有利于加速材料的应力松弛速度。对图 2 和图 3 中曲线进行方程修正为: $\ln(F_t/F_0) = -kt^\theta$, 该表达式中, F_t 为经老化后面压, F_0 为初始面压, k 为反应速率常数, θ 为修正系数(取值范围为 0~1), 得出图 4 和图 5 中的松弛曲线。

根据图 4、图 5 松弛曲线, 利用待定系数法即得到任意温度下的 k 值, 从而得到工作温度下的松弛曲线(见图 6、7)。假设电缆附件初始设计的面压值为 0.25 MPa, 随着硅橡胶老化时间的推移, 界面面压逐渐减小。在电缆运行温度 t_1 分别为 40 °C、70 °C 及 90 °C 环境下应力松弛特性 30 年后的数值如表 2 所示。

表 2 中, 迈图液体硅橡胶弹性模量为 1.5 MPa。由表 2 可见, 附件运行温度越高, 界面压力下降越快。当电缆运行在最高室温 40 °C 时, 30 年后界面压力下降不明显; 而当电缆运行在规定最高允许工作温度 90 °C 时, 30 年后界面压力下降接近一半。由此可见, 为确保界面压力的长期可靠性(30 年后

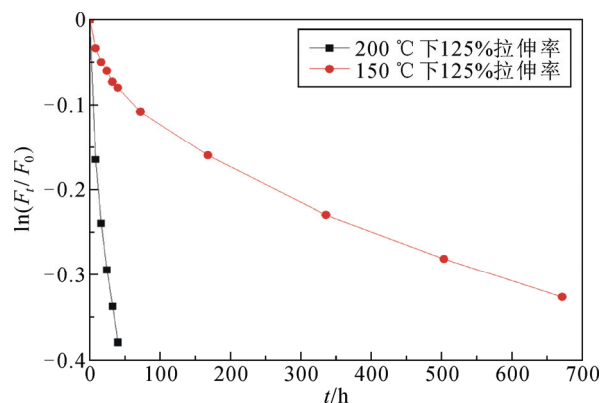


图 2 125%伸长率下应力松弛老化数据

Fig.2 Stress relaxation aging at 125% elongation

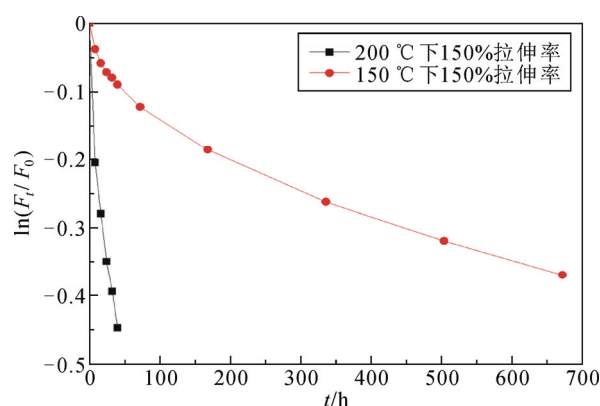


图 3 150%伸长率下应力松弛老化数据

Fig.3 Stress relaxation aging at 150% elongation

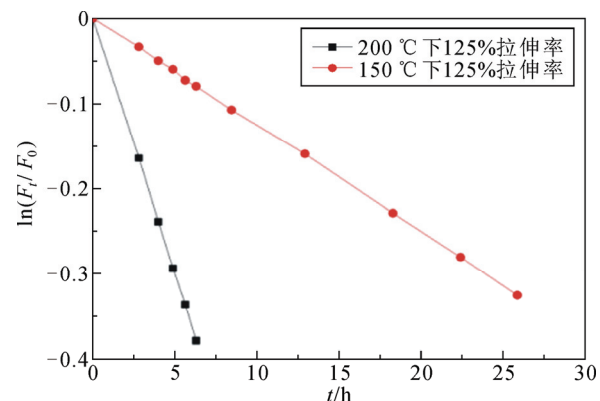


图 4 125%伸长率拟合后松弛曲线($\theta=0.5$)

Fig.4 Fitting relaxation curve at 125% elongation($\theta=0.5$)

界面压力应 >0.1 MPa), 通过附件的应力松弛实验, 得出界面压力下降率, 从而可确定附件安装的合理初始面压值。进而由此面压和弹性模量, 采用 1.1 节方法, 确定附件设计的过盈量值。

另外, 本文根据上述时-温等效原理, 同时研究了不同弹性模量时橡胶材料的应力松弛现象, 归纳总结见表 3。由表 3 可见, 随着温度升高, 各种

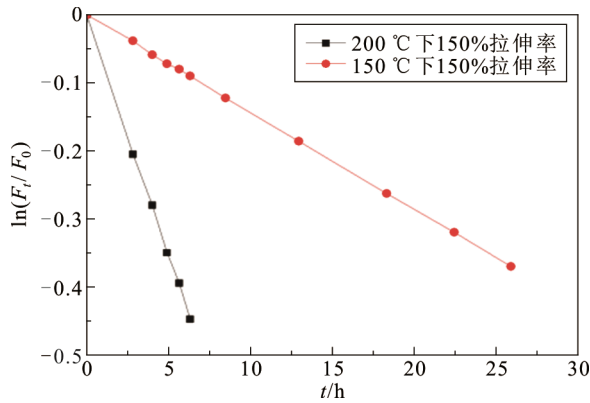


图5 150%伸长率拟合后松弛曲线 ($\theta=0.5$)

Fig.5 Fitting relaxation curve at 150% elongation($\theta=0.5$)

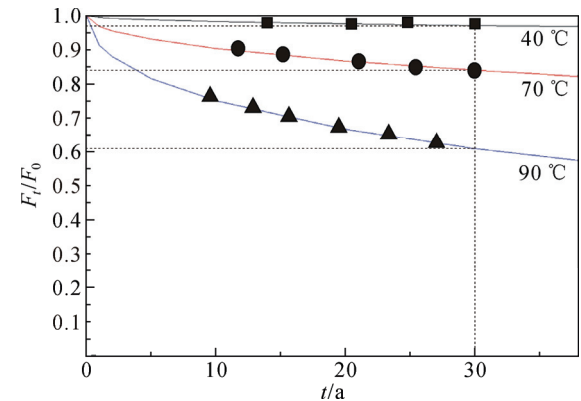


图6 125%伸长率下 30 年后的松弛特性

Fig.6 Relaxation characteristics after 30 years at
125% elongation

橡胶材料的应力变比值均呈下降趋势。且伸长率越高, 下降越快。但由于橡胶材料类型各异(固体或液体橡胶)、厂家不同, 橡胶材料弹性模量与应力变比值间没有明显的直接关系。由此可见, 不能根据橡胶材料弹性模量值的大小来判断材料的应力松弛特性。

由表 3 可见, 电缆附件用橡胶材料的弹性模量并不是越大越好。橡胶材料弹性模量的选择应根据附件安装扩张率 120%~150%范围要求, 由 1.1 节中界面压力、弹性模量和扩张率关系的力学仿真研究, 得到弹性模量的取值范围。然后, 对于选定的橡胶材料, 基于上述时-温等效原理的应力松弛实验, 确保 30 年后最小面压的要求, 合理选择附件扩张率及过盈量值。

1.3 电缆附件的扩张形变与结构恢复

如上所述, 电缆附件在使用过程中, 为保证一定的界面压力(即“握紧力”), 电缆附件需与电缆本体过盈配合, 从而电缆附件在安装投入运行后将呈现扩张状态。而实际电缆附件在生产时, 均是参

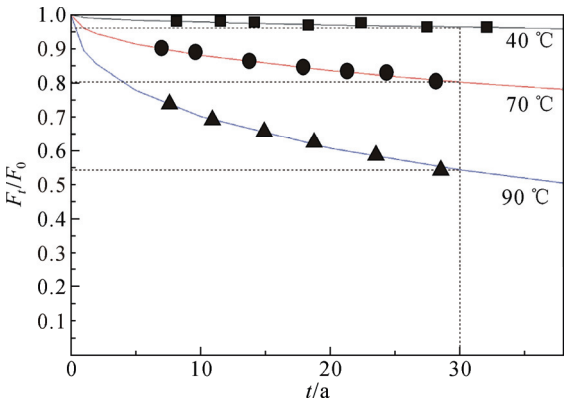


图7 150%伸长率下 30 年后的松弛特性

Fig.7 Relaxation characteristics after 30 years at
150% elongation

表 2 30 年后不同温度下的应力松弛特性

Table 2 Relaxation characteristics after 30 years at various
temperatures

伸长率 /%	物理量	数值		
		$t_1=40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_1=70\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_1=90\text{ }^{\circ}\text{C}$
125	30 年后 F_t/F_0	0.97	0.84	0.61
	30 年后面压/MPa (初始面压 0.25 MPa)	0.243	0.21	0.153
150	30 年后 F_t/F_0	0.96	0.80	0.54
	30 年后面压/MPa (初始面压 0.25 MPa)	0.24	0.20	0.135

表 3 不同橡胶材料 30 年后的应力变比值 (F_t/F_0)

Table 3 Stress ratio of different rubber materials after
30 years (F_t/F_0)

物理量		应力变比值(F_t/F_0)		
		迈图固体 硅橡胶	国产固体 硅橡胶	迈图液体 硅橡胶
125% 伸长率	弹性模量/MPa	0.6	1.0	1.5
	40 °C	0.94	0.96	0.97
	70 °C	0.72	0.85	0.84
150% 伸长率	90 °C	0.43	0.68	0.61
	40 °C	0.92	0.95	0.96
	70 °C	0.49	0.83	0.80
	90 °C	0.16	0.65	0.54

照已优化的电场结构(装配于电缆上结构)直接生产(直接减小附件内径形成过盈配合), 均未考虑到附件在现场安装后结构的再次扩张对电场分布的影响。当圆筒状电缆附件扩张后, 将使得附件长度变短、主绝缘厚度变薄, 尤其是应力锥角度变化、高压屏蔽管端部结构变化, 势必引起设计过程中最优的电场分布发生变化(见图 8)。因此若电缆附件直接按电场设计尺寸进行生产, 尤其是当过盈量较大时, 其撑开后的形状必定大大偏移优化设计所规定

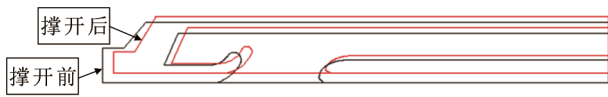


图8 电缆附件(1/4结构)安装前后内部形状对比示意图

Fig.8 Internal shape comparison diagram of cable accessory (1/4 structure) before and after installation

的形状,导致电场优化设计失去应有的作用。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在进行结构优化后,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^[21-22]。

本文基于橡胶高弹性材料的力学特性,利用弹性力学理论^[23],建立了电缆附件的圆筒状厚壁模型。当厚壁圆筒处于弹性状态时,可利用位移法求解。其解答满足弹性边值问题的基本方程及相应的边界条件。建立附件微单元受力方程并求解,得到电缆附件扩张过程中的径向和切向应变方程:

$$\begin{cases} \text{径向应变: } \varepsilon_r = \frac{d\mu}{dr} = \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left((1-\nu) - \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right) \\ \text{切向应变: } \varepsilon_\theta = \frac{\mu}{r} = \frac{a^2 p}{E(b^2 - a^2)} \left((1-\nu) + \frac{(1+\nu)b^2}{r^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_r 为径向应变; ε_θ 为切向应变; μ 为微元的位移; r 为径向坐标; a 、 b 为圆筒的内、外半径; E 为圆筒的弹性模量; ν 为圆筒材料的泊松比; p 为圆筒受的内压。

并根据已知条件,即附件安装后的内半径 R'_1 (电缆绝缘外半径) 和附件安装后的外半径 R'_2 , 这两者均为由附件结构仿真优化过程的已知参数。同时根据附件松弛后(减去为保证面压所需要的单边过盈量)的生产内半径尺寸 R_1 。由式(2)得到附件松弛后的生产外半径 R_2 , 即

$$\frac{(R'_2 - R_2)}{2R_2} = \frac{\Delta\mu}{\left(0.5(R_2 - R_1) + 1.5R_2^2 \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right)} \quad (2)$$

式中 $\Delta\mu = (R'_2 - R'_1) - (R_2 - R_1)$ 。

另外,由于附件扩张过程的非线性变化,附件松弛过程中绝缘内每一径向层都得进行非线性恢复,根据式(3)可成功地将附件扩张后的电场优化结构恢复至松弛态的生产结构,即

$$\int_{R_1}^r \varepsilon_r dr = (R - R'_1) - (r - R_1) \quad (3)$$

式中 $R_1 \leq r \leq R_2$ 。该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优化结构。

2 其他设计问题

2.1 电缆附件橡胶材料的选择

电缆附件在进行结构设计前,材料的选择至关重要,绝缘材料的电阻率、介电常数、击穿强度等电气参数将直接决定电缆附件的电气尺寸,如介电常数的大小将影响附件中的电场分布,决定应力锥的长度、附加绝缘的厚度;击穿强度的高低将直接影响中间接头的电气绝缘性能,若绝缘材料的击穿强度低,中间接头的厚度就要大,才能使中间接头的电气绝缘性能达到标准要求。另外,半导体材料的导电性能在电缆附件中也至关重要,附件中应力锥及屏蔽管都是用纯半导体橡胶制成,外面不再附加金属屏蔽物,因此,若半导体材料的导电性能不理想,附件中的应力锥及屏蔽管将不能充分发挥其功能,从而导致附件击穿事故。因此,设计电缆附件时首先要确定所用材料的各种电气性能,确保基本电气性能满足高压电缆附件用橡胶材料国家标准,才能依据这些性能进行有关设计。

2.2 附件结构与电场优化

传统的电缆附件(交流或直流)设计方法是通过有限元计算软件合理优化附件结构(主绝缘厚度、高压屏蔽管端部形状、应力锥形状及长度、内爬距等),使绝缘交界面电场小于设计值来实现。尤其是冷缩或预制式附件,由于采用工厂整体成型,连接管部位的空隙必须采用高压屏蔽的方式处理,造成高压屏蔽管端部等位线弯曲比较严重。因此,高压屏蔽管外形设计更为关键,可通过设计倒R型屏蔽管端部结构,增加屏蔽管厚度来降低屏蔽管端部电场。但考虑到造价成本,一般通过主绝缘和高压屏蔽管二者厚度的折中配合来设计。

另外,应力锥处的形状和结构也是附件设计的关键环节。应力锥曲线是根据应力锥与XLPE电缆绝缘界面切向电场梯度相等作为电场优化的优化条件。由于该界面不仅是预制件的关键部位,而且是电气绝缘的薄弱环节。实际应用时,一般适当地增大应力锥末端的曲率半径以缓和电场分布;同时,略抬高应力锥起始端位置以增加硫化成型过程中的结构致密性。

3 附件设计流程

由上述分析可见, 电缆附件的设计是一项涉及电气、机械、材料和热力学四方面的复杂过程。只有经过周密、精确的电、力、热复合场的设计, 才能尽可能将生产和安装过程中发生的问题降到最低。图9给出电缆附件设计环节的流程建议, 具体步骤如下:

1) 基本电性能测量。首先选至少三种橡胶材料 A、B、C, 测量该三种材料的基本电性能, 如温度-电场-体积电阻率关系、介电常数、交流/直流击穿强度等, 只有当橡胶材料基本电性能满足电缆附件用绝缘的国标要求, 才能备选为附件绝缘材料。

2) 机械性能测量。测量待选附件绝缘的机械性能, 如弹性模量、撕裂强度、拉伸强度和断裂伸长率等。同理, 只有当橡胶材料的机械性能满足电缆附件用绝缘的国标要求, 才能备选为附件绝缘材料。

3) 扩张率范围控制。根据步骤2)中弹性模量测量结果, 建立电缆附件力学仿真模型, 根据界面压力 0.1~0.25 MPa 的范围要求, 得到橡胶弹性模量、附件厚度和附件内层扩张率 (120%~150%) 间的关系。

4) 应力松弛特性。由步骤3)中特定面压范围 (0.1~0.25 MPa) 下对应的附件内绝缘扩张率范围 (120%~150%), 根据时-温等效原理, 查明橡胶绝缘在不同扩张率下的应力松弛特性, 预测面压大于 0.1 MPa 下的附件绝缘寿命。根据国标要求安装后 30 年可靠运行面压的要求, 得到满足要求的扩张率范围及其对应的橡胶材料, 如橡胶 A。

5) 附件结构设计及优化。根据橡胶 A 基本电性能测量结果, 利用 ANSYS 有限元计算软件, 优化设计电缆附件与电缆安装配合后结构, 包括主绝缘厚度、应力锥形状及长度、高压屏蔽管形状、内爬距等。

6) 扩张形变与结构恢复。由前述橡胶 A 力学性能测量结果, 得到附件生产所需要的过盈量值。根据本文 1.3 节所述附件结构松弛方程, 将步骤5)中与电缆安装配合后的最优电场结构, 非线性恢复至附件生产结构/尺寸。

按照图9设计流程, 才能确保电缆附件安装后可靠的界面压力、合理的过盈量设计、最佳的电场优化结构。当然, 电缆附件的合理设计仅为确保电缆附件长期可靠运行的必要条件之一。电缆与附件

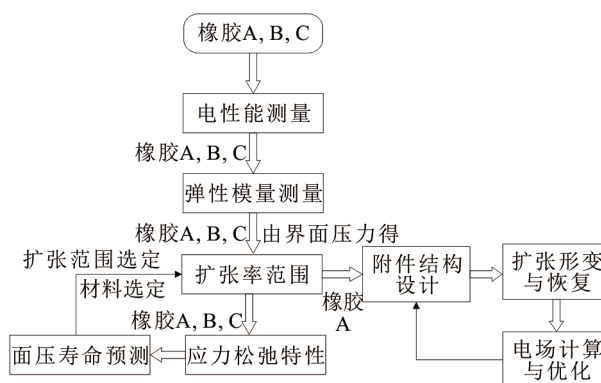


图9 附件设计流程

Fig.9 Cable accessories design process

绝缘间界面的配合 (尤其在直流下的空间电荷效应时)、界面污秽闪络特性、附件安装工艺等, 均会影响电缆附件安装后的使用寿命。因此, 作为电力输电系统的最薄弱环节, 如何有效降低电缆附件的运行故障率, 还有待结合绝缘配合、复合界面特性、安装工艺等方面进一步深入研究。

4 结论

本文针对高压电缆附件设计环节的界面压力、过盈量选择、应力松弛特性、扩张形变与结构恢复等关键问题展开论述, 得出以下结论:

1) 橡胶材料弹性模量越高, 界面压力越大, 附件所需扩张率越低, 但较低的扩张率会造成安装困难。

2) 合理选择电缆附件内侧扩张率 (建议 120%~150%), 从而确保附件界面处 0.1~0.25 MPa 的界面压力。另外, 在限定 30 年可靠的面压寿命前提下, 以此确定所需橡胶材料的弹性模量值。

3) 温度越高, 伸长率越大, 橡胶材料的应力松弛速度越快, 但橡胶材料弹性模量与应力松弛速度间没有明显的直接关系。

4) 电缆附件撑开时, 从内侧到外侧发生非线性位移, 内侧大而外侧小。根据弹塑性力学理论, 建立电缆附件的厚壁圆筒力学形变方程, 可将电缆附件扩展后的电场优化尺寸成功恢复到厂家生产尺寸。

参考文献 References

- [1] FOURNIER D, DANG C, PAQUIN L. Interfacial breakdown in cable joints[C]//Conference Record of International Symposium on Electrical Insulation. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 1994: 450-452.
- [2] 宋淑伟, 赵洪, 李中原, 等. 高压直流电缆接头稳态与暂态电场分布特征[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3607-3616.

- SONG Shuwei, ZHAO Hong, LI Zhongyuan, et al. Stationary and transient electric field distribution characteristics inside HVDC cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3607-3616.
- [3] 钟海杰, 王佩龙, 王锦明, 等. 用于抑制界面空间电荷的直流电缆附件设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1140-1146.
- ZHONG Haijie, WANG Peilong, WANG Jinming, et al. Design of DC cable accessories for suppressing interface space charge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1140-1146.
- [4] 韩宝忠, 傅明利, 李春阳, 等. 硅橡胶电导特性对 XLPE 绝缘高压直流电缆终端电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2627-2634.
- HAN Baozhong, FU Mingli, LI Chunyang, et al. Effect of silicone rubber's electric conductance characteristic on electric field distribution inside XLPE insulated HVDC cable termination[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2627-2634.
- [5] 陈庆国, 秦艳军, 尚南强, 等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2619-2626.
- CHEN Qingguo, QIN Yanjun, SHANG Nanqiang, et al. Influence analysis of temperature on electric-field distribution in HVDC cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2619-2626.
- [6] 钟力生, 任海洋, 曹亮, 等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3473-3489.
- ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3473-3489.
- [7] 顾金, 王俏华, 李旭光, 等. 30 kV 直流 XLPE 电缆电场及温度场的仿真计算[J]. 电线电缆, 2009(6): 9-12.
- GU Jin, WANG Qiaohua, LI Xuguang, et al. Simulation of electric field and temperature field in 30 kV DC XLPE cable[J]. Electric Wire & Cable, 2009(6): 9-12.
- [8] 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.
- [9] VIVO B D, SPAGNUOLO G, VITELLI M. Variability analysis of composite materials for stress relief in cable accessories[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2004, 40(2): 418-425.
- [10] 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.
- [11] ROSS R. Dealing with interface problems in polymer cable terminations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(4): 5-9.
- [12] 王霞, 姚航, 吴锴, 等. 交联聚乙烯与硅橡胶界面涂抹不同硅脂对其电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 74-79.
- WANG Xia, YAO Hang, WU Kai, et al. Effect of different coating silicone grease on space charge characteristics at XLPE / SR interface[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 74-79.
- [13] 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.
- [14] 张东升, 韩永胜, 刘红欣, 等. 高压电缆接头界面压力测试研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 173-176.
- ZHANG Dongsheng, HAN Yongsheng, LIU Hongxin, et al. Determination of the pressure distribution at the XLPE cable-rubber interface in a self-pressurized joint[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 173-176.
- [15] YOSHIDA S, TAN M, YAGI S, et al. Development of prefabricated type joint for 275 kV XLPE cable[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto, Canada: IEEE, 1990: 291-295.
- [16] 柳松, 彭嘉康, 陈守直, 等. 高压电缆接头过盈量与面压关系的仿真研究[J]. 电线电缆, 2013(1): 38-40.
- LIU Song, PENG Jiakang, CHEN Shouzhi, et al. Simulation on the relationship between shrink range and interfacial pressure in the HV cable joint[J]. Electric Wire & Cable, 2013(1): 38-40.
- [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.
- WU Songzhen, XIE Darong, CHEN Shoutian, et al. Electric insulation material science and engineering[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [18] 王宝珍, 周相荣, 胡时胜. 高应变率下橡胶的时温等效关系及力学形态[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(8): 5-8.
- WANG Baozhen, ZHOU Xiangrong, HU Shisheng. Dynamic mechanical behavior and rate-temperature equivalence of rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(8): 5-8.
- [19] 金日光, 刘薇. 高分子材料应力-时间等效性的考察[J]. 北京化工学院学报, 1994, 21(1): 35-40.
- JIN Riguang, LIU Wei. Study on the equivalency between stress and time of polymer materials[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 1994, 21(1): 35-40.
- [20] 柳松, 彭嘉康, 王霞, 等. 电缆附件的永久形变率与过盈量的关系研究[J]. 电工材料, 2013(2): 49-54.
- LIU Song, PENG Jiakang, WANG Xia, et al. Relationship between permanent deformation and shrink range in cable accessory[J]. Electrical Engineering Materials, 2013(2): 49-54.
- [21] 王霞, 王陈诚, 吴锴, 等. 一种新型高压电缆附件优化设计方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(12): 102-109.
- WANG Xia, WANG Chencheng, WU Kai, et al. New optimal design scheme for high voltage cable accessory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(12): 102-109.
- [22] WANG X, WANG C C, WU K, et al. An improved optimal design scheme for high voltage cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 5-15.
- [23] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- XU Bingye, LIU Xinsheng. Application of elastic plastic theory[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1995.



WANG Xia
Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

王霞(通信作者)

1976—, 女, 博士, 副教授

主要研究方向为聚合物绝缘中空间电荷测量、绝缘破坏机理与改性技术

E-mail: wxflying@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2017-10-10 修回日期 2018-03-14 编辑 卫李静