

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.003

电缆绝缘层老化对接头界面压力的影响研究

包淑珍¹, 邓红雷¹, 韩卓展¹, 刘剑华¹, 崔江静², 刘刚¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;

2. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000)

摘要:为研究老化电缆绝缘层弹性模量变化对界面压力的影响,文中实测3根不同运行年限电缆绝缘的击穿场强与介质损耗角正切表征其电性能,不同温度下的弹性模量表征其力学性能。基于超弹性材料本构理论,计算电缆接头与本体装配后的界面压力,并建立电缆接头的二维轴向仿真模型,计算轴向上的界面压力。仿真结果与理论计算结果的对比表明,运用二维轴向仿真模型计算电缆接头与本体之间的界面压力的误差不超过3.2%,仿真模型计算的准确度可为研究接头轴向上的界面压力分布提供可靠数据,虽然不同运行年限电缆绝缘层电性能不同,且弹性模量最大差异为29%,但界面压力仅变化0.275%。因此,全新接头与已运行一定年限的电缆装配后,仍能保证足够的界面压力。

关键词:高压电缆;电缆接头;界面压力;老化;弹性模量

中图分类号:TM215

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0016-07

0 引言

随着社会经济的发展及电力需求的增长,高压电缆在输配电系统中得到了广泛应用,电缆接头作为高压电缆输电线路的重要组成部分,在电缆接续和金属护套交叉互联等方面扮演着重要角色^[1-4]。电缆接头内部存在电场集中现象和不同介质构成的复合界面,在运行中容易发生故障。据不完全统计,在不计外力破坏时,电缆接头故障占比高达70%,由界面压力不足引起的复合界面沿面放电事故占比达23%,因此电缆接头是电缆系统中最薄弱的环节^[5-6]。

国内外学者针对电缆接头界面压力的影响因素进行了大量研究。文献[7-8]通过 ANSYS 建立三维仿真模型,探究过盈量、接头厚度和高温对电缆接头界面压力的影响,结果表明过盈量对界面压力的影响大。文献[9]通过 ANSYS 建立三维仿真模型,探究接头硅橡胶材料弹性模量与过盈量选择的关系,发现在一定界面压力下硅橡胶弹性模量越大所需过盈量越小。文献[10]通过 ABAQUS 建立二维截面模型,探究了不同扩径率下环向与径向应力的大小,发现机械应力过大将导致电缆接头内部发生结构损伤和破坏,诱发电树枝的生长。文献[11]提出了界面压力的理论计算模型并以实验验证,分析了冷缩型电缆接头在热循环下界面压力的动态过程,发现热循环后界面压力将上升。

当电缆本体或者已有的接头出现故障后,新的接头与已经运行一定年限的电缆装配到一起,让电缆重新投入运行,这是目前普遍采用的处理办法。而实际运行的高压电缆绝缘层交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)在热、电等因素下发生老化,内部分子链及交联键会发生不同程度的断裂,引起微观结构形态的变化,导致材料的弹性模量发生变化,影响材料的宏观力学性能^[12]。虽然已有学者研究电缆绝缘劣化后的力学性能,但鲜有学者关注其对界面压力的影响。当电缆接头发生故障后,全新接头装配于已运行一定年限的电缆绝缘上能否保持足够的界面压力需要探究。

基于以上情况,文中选取3根不同运行年限的高压电缆,实际测量绝缘层在不同温度下的弹性模量,结合应力计算理论,通过有限元分析软件 COMSOL 建立二维模型,对比理论与仿真计算结果,分析在不同温度下,不同运行年限电缆绝缘弹性模量变化对电缆接头界面压力的影响。

1 材料电性能与力学性能测试

1.1 试样制备

试验选用3根110 kV XLPE 电力电缆,其中1根为新电缆,编号为S1;另外2根分别为运行年限15 a和30 a的退役电缆,分别编号为S2和S3。选取长约15 cm的短样,通过环切法获得如图1(a)所示的样品,取绝缘中层的薄片为试样,试样厚度约为0.4 mm,用于工频击穿强度试验、介质损耗角正切试验和动态热机械分析试验。

收稿日期:2020-04-21;修回日期:2020-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977083)

选取由电缆附件厂家提供的绝缘硅橡胶和半导电硅橡胶原料,依据 GB/T 6038—2006 标准,采用高温硫化的方法制备厚度为 2 mm 的硅橡胶薄片,并在具有标准哑铃形切割器的冲压机上冲压成哑铃型试样,获得如图 1(b)和图 1(c)所示的样品,用于测试硅橡胶的拉伸特性。

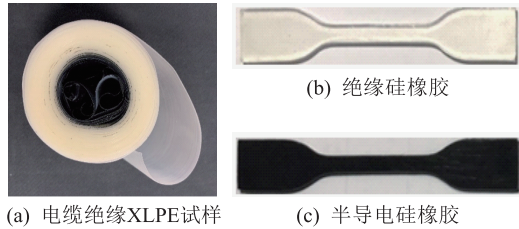


图 1 检测样品示意

Fig.1 Schematic diagram of test samples

1.2 测试方法

采用电压击穿试验仪,以 25 号变压器油为媒质,施加电压频率 50 Hz,温度为室温,电压以 1 kV/s 的速率增大直至试样击穿。每一试样重复测量 10 次,取平均值作为有效值。

利用宽频介电谱测试仪测试试样介电谱。实验温度为室温,频率范围为 $10^{-2} \sim 10^6$ Hz,电压 5 V。采用 DMA Q800 动态热机械分析仪,按照 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 升温至 $90 \text{ }^\circ\text{C}$,测量不同温度下的 XLPE 弹性模量。

参照 GB/T 528—2009 试验标准^[13],在 AG-IC50 kN 型电子万能试验机上对电缆接头的绝缘硅橡胶和半导电硅橡胶做拉伸实验,拉伸速率设定为 $50 \text{ mm}/\text{min}$,记录电缆接头材料的应力应变曲线。

1.3 测试结果

1.3.1 XLPE 电性能结果

通过测量工频击穿强度和介质损耗角正切来初步评估不同运行电缆绝缘层 XLPE 的电性能,结果如表 1 所示。相比于全新电缆,运行 15 a 的电缆绝缘 XLPE 的工频击穿强度增大,介质损耗角正切值减小,电气性能增强;而运行 30 a 的电缆绝缘 XLPE 的工频击穿强度减小,介质损耗角正切值略微减小,电气性能降低。

表 1 XLPE 电性能测试结果

Table 1 Electrical performance test results of XLPE

编号	工频击穿强度 /(kV·mm ⁻¹)	介质损耗角 正切×10 ⁻⁴
S1	66.8	25.76
S2	69.1	19.25
S3	62.1	21.16

XLPE 电缆投入运行后,在电、热等应力作用

下,XLPE 网状结构的分子链发生变化,结晶区也呈现不同的状态,使不同运行年限的 XLPE 分子结构不同,最终导致 XLPE 宏观上的电气性能不同^[14]。

1.3.2 XLPE 弹性模量结果

在不同温度下,XLPE 试样的弹性模量变化如表 2 所示。在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,S1 和 S2 的弹性模量相差较小,而 S3 的弹性模量远小于 S1 的弹性模量。温度在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 及其以上时,S2 和 S3 的弹性模量高于 S1 的弹性模量,但 3 根电缆绝缘层的弹性模量总体差异小,且随着温度升高,差异逐渐减小。不同运行年限老化电缆绝缘层弹性模量随着温度的变化有相同趋势,都随着温度的升高而逐渐下降。主要原因是实际运行过程中,在电、热联合老化作用下,电缆绝缘 XLPE 材料内部大分子发生热裂解并生成较多的小分子链,增强了分子链的运动,导致交联度和结晶度下降^[15]。在不同温度下,不同运行年限电缆绝缘内部分子链的活动性及断裂程度不同,影响了 XLPE 的宏观力学特性。

表 2 不同温度下电缆绝缘弹性模量

Table 2 Elastic modulus of XLPE as a function of temperature

温度/ $^\circ\text{C}$	弹性模量/MPa		
	S1	S2	S3
-40	1 679.200 0	1 711.902 0	1 535.568 0
20	319.523 2	327.892 1	373.616 1
40	183.711 8	190.899 9	236.975 2
60	99.562 3	101.953 6	124.219 9
80	44.045 7	42.264 2	50.230 9

1.3.3 电缆接头半导电层和绝缘层本构模型参数

文献[16]指出在具备单轴拉伸实验数据的情况下,Yeoh 模型拟合得到的参数可靠性较高,在保证计算精度的前提下有较高的计算效率。因而文中选用 Yeoh 模型对半导电层和绝缘层的单轴拉伸曲线进行拟合。Yeoh 模型典型的三参数形式如下:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

式中: C_{10}, C_{20}, C_{30} 为模型参数; I_1 为第一阶应变不变量, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, λ_1, λ_2 和 λ_3 为主伸长率。结合应力与应变能密度函数的关系及应力与应变的关系,推导得到如下关系式:

$$\frac{\sigma}{2[(1 + \varepsilon) - (1 + \varepsilon)^{-2}]^2} = C_{10} + 2C_{20}[(1 + \varepsilon)^2 + 2(1 + \varepsilon)^{-1} - 3] + 3C_{30}[(1 + \varepsilon)^2 + 2(1 + \varepsilon)^{-1} - 3]^2 \quad (2)$$

式中： σ 为应力； ε 为应变。以 $(1+\varepsilon)^2 + 2(1+\varepsilon)^{-1} - 3$ 为横坐标， $\sigma / [(1+\varepsilon) - (1+\varepsilon)^{-2}]$ 为纵坐标，根据接头导电硅橡胶和绝缘硅橡胶的拉伸曲线进行最小二乘拟合求解模型参数，拟合计算结果见表 3，这些模型参数是后续理论计算与有限元仿真的基础。

表 3 基于 Yeoh 模型的拟合结果

Table 3 Fitting results based on Yeoh model

电缆接头用料	模型参数		
	C_{10}	C_{20}	C_{30}
半导体层	0.2488	-5.875×10^{-4}	8.491×10^{-5}
绝缘层	0.2320	-1.588×10^{-3}	8.511×10^{-5}

2 电缆接头界面压力理论计算

为保证足够的界面压力，接头以一定的过盈量装配于电缆本体上。由于橡胶通常被视为不可压缩的超弹性体，变化过程复杂且具有高度的非线性，因此基于橡胶本构模型理论，计算在相同过盈量下，不同运行年限的 XLPE 弹性模量变化对界面压力的影响。橡胶本构关系通过应变能密度函数定义为^[17-18]：

$$\sigma' = \frac{2}{J} \text{DEV} \left[\left(\frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \right) \bar{\mathbf{B}} - \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \bar{\mathbf{B}}^2 \right] \quad (3)$$

式中： σ' 为 Cauchy 应力偏量；以 \mathbf{F} 表示变形梯度张量，变形前后体积比 $J = |\mathbf{F}|$ ，左 Cauchy-Green 张量 $\mathbf{B} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$ ，等容左 Cauchy-Green 张量 $\bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{F}} \cdot \bar{\mathbf{F}}^T = J^{-2/3} \mathbf{B}$ ； $\text{DEV}[\cdot]$ 表示取张量的偏量； \bar{I}_1, \bar{I}_2 分别为 $\bar{\mathbf{B}}$ 的第一与第二不变量。假设橡胶不可压缩，即 $J = 1$ ，则 $\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B}$ ， $I_1 = \text{tr}(\mathbf{B})$ ， $I_2 = I_1^2 - \text{tr}(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)$ ， $\bar{I}_1 = J^{-2/3} I_1$ ， $\bar{I}_2 = J^{-4/3} I_2$ 。

对于轴对称平面应变问题的 3 个主伸长量 $\lambda_i (i=r, \theta, z)$ 分别为：

$$\begin{cases} \lambda_r = dr/dR \\ \lambda_\theta = r/R \\ \lambda_z = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： R 为变形前的半径； r 为变形后的半径，结合式 (3) 计算得：

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \right) \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_\theta} - \frac{\lambda_\theta}{\lambda_r} \right) - \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \left(\frac{\lambda_r^2}{\lambda_\theta^2} - \frac{\lambda_\theta^2}{\lambda_r^2} \right) \right] \quad (5)$$

轴对称平面问题的平衡方程为：

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (6)$$

联立 Yeoh 的本构方程式 (1)、式 (5) 和式 (6)，可得：

$$\frac{r^2}{2R} \frac{d\sigma_r}{dR} = [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

假定电缆接头内径为 R_a ，半导体层外径为 R_b ，接头外径为 R_c ， u_b 为半导体层在 R_b 处的径向位移。 R_1 和 r_1 为半导体层内任一位置变形前后半径， R_2 和 r_2 为绝缘层内任一位置变形前后半径。对于电缆接头绝缘层，由于外表面为自由面，因而对式 (7) 进行积分可得，绝缘层内径为 R_b 处的径向应力表达式如下：

$$-P_b = \int_{R_b}^{R_c} \frac{2R_2}{r_2^2} [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\frac{r_2^2}{R_2^2} - \frac{R_2^2}{r_2^2} \right) dR_2 \quad (8)$$

由硅橡胶的不可压缩性可得：

$$r_2 = \sqrt{R_2^2 - R_b^2 + (R_b + u_b)^2} \quad (9)$$

对于电缆接头半导体层，记电缆接头内径的径向应力为 P_a ，该处的径向位移为 u_a ，根据式 (7) 计算可以得到，电缆接头内径处的径向应力表达式如式 (10) 所示。

$$P_a = P_b - \int_{R_a}^{R_b} \frac{2R_1}{r_1^2} [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2] \left(\frac{r_1^2}{R_1^2} - \frac{R_1^2}{r_1^2} \right) dR_1 \quad (10)$$

其中：

$$r_1 = \sqrt{R_1^2 - R_a^2 + (R_a + u_a)^2} \quad (11)$$

对于电缆绝缘 XLPE，以 u_{aa} 表示 XLPE 发生的径向位移； δ 为接头与电缆绝缘 XLPE 的过盈量； v_c 为 XLPE 的泊松比； E_c 为 XLPE 的弹性模量。由于过盈配合面两侧径向应力连续，可得：

$$u_{aa} = P_a (R_b + \delta) \frac{(1 - 2v_c)(1 + v_c)}{E_c} \quad (12)$$

过盈配合面处的径向位移关系为：

$$u_a = \delta + u_{aa} \quad (13)$$

考虑半导体层橡胶的不可压缩性，可得：

$$(R_b + u_b)^2 - R_b^2 = (R_a + u_a)^2 - R_a^2 \quad (14)$$

联立式 (8) 一式 (13)，运用 Matlab 软件进行迭代求解，即可解出接头内径处的径向应力 P_a ，即电缆接头与电缆绝缘 XLPE 间的界面压力，以及电缆绝缘 XLPE 的径向位移 u_{aa} 。

3 电缆接头二维有限元仿真计算

3.1 仿真模型搭建

文中选用 110 kV XLPE 电缆为仿真对象。电缆结构从内至外依次为铜芯、导体屏蔽、XLPE 绝缘、绝缘屏蔽、阻水带、铝护套和外护套。绝缘线芯的尺寸参数如表 4 所示。

表 4 110 kV XLPE 电力电缆结构参数

Table 4 Structural specifications of selected 110 kV XLPE cables

结构	内直径/mm	外直径/mm	厚度/mm	材料
铜芯		30		铜
导体屏蔽	30	32	1	半导体材料
XLPE	32	65	16.5	XLPE
绝缘屏蔽	65	66	0.5	半导体材料

选用冷缩型电缆附件,主要由高压屏蔽管、应力锥和绝缘三部分构成。高压屏蔽管和应力锥由半导体硅橡胶组成,绝缘部分由绝缘硅橡胶组成,接头内直径 52 mm,厚度 44 mm,总长 680 mm。

接头由应力锥、高压屏蔽管和绝缘组成,与电缆装配后存在许多由不同介质构成的复合界面,探究沿接头轴向上界面压力的分布规律对工程实际有重要意义。由于电缆接头与本体是轴对称结构,在同一圆周上的界面压力处处相同,因此,为简化模型并提高收敛速度,在有限元分析软件 COMSOL 中搭建电缆接头与本体的二维轴向仿真模型,如图 2 所示。

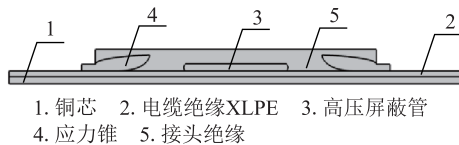


图 2 仿真模型结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the simulation model

铜的弹性模量为 126 GPa, XLPE 的弹性模量如表 2 所示,电缆接头半导体层和绝缘层都是橡胶材料,选用超弹性模型,模型参数如表 3 所示。

3.2 仿真结果

文中针对 XLPE 在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 种不同温度下进行研究,仿真计算不同温度下电缆本体与接头之间的界面压力大小。图 3 为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下接头装配于不同运行年限电缆的应力云图。可以看出,接头与电缆绝缘 XLPE 接触面上的径向应力最大,从接头内侧到外侧应力逐渐减小。

为了更直观地研究接头轴向上界面压力的大小,定义接头中部为原点,向右为 x 轴正方向,向左

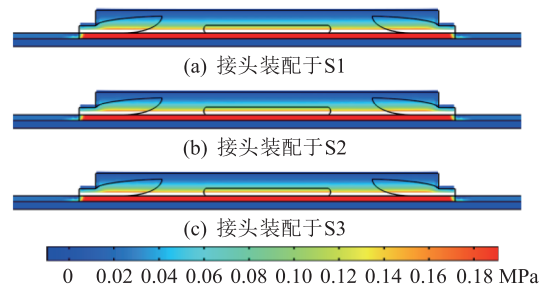


图 3 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下电缆接头应力分布云图

Fig.3 Maps of stress distribution for cable joints at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

为 x 轴负方向,沿接头内侧采集轴向上的应力数据,每隔 0.05 m 采集 3 个数据点,总计采集 42 个数据。电缆接头轴向上界面压力分布如图 4 所示。可以看出:

(1) 在相同过盈量下,电缆接头与不同运行年限电缆装配后界面压力无明显差异;

(2) 接头是轴对称结构,其沿轴向上的界面压力也呈对称分布;接头两端是应力锥的延伸部分,厚度薄,该处的界面压力小;

(3) 界面压力随着半导体层厚度增加而增大,其原因是应力锥和高压屏蔽管由半导体硅橡胶构成,其弹性模量比绝缘硅橡胶弹性模量大,对界面压力的影响大,因而最大应力出现在应力锥根部。

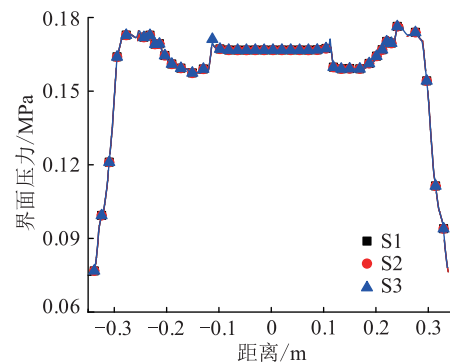


图 4 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下电缆接头轴向上界面压力分布曲线

Fig.4 Pressure distribution curve at the axial interface of cable joints at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

4 结果讨论与分析

针对电缆接头的薄弱点,对接头绝缘与 XLPE 接触面及应力锥根部与 XLPE 接触面的界面压力展开计算分析,理论与仿真的计算结果见表 5 和表 6。从表中看出,理论计算与仿真结果差异较小,具体误差见表 7。理论与仿真计算的结果偏差在 3.2% 以内,二者的吻合度高。

由表 5 和表 6 可知,新电缆接头分别与 S1、S2 和 S3 装配后,界面压力变化不大。结合表 2 计算可

表 5 电缆接头绝缘处界面压力计算结果

Table 5 The error of theoretical and simulation value comparison

温度 / $^{\circ}\text{C}$	界面压力/MPa					
	理论计算值			仿真计算值		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
-40	0.161 6	0.161 6	0.161 6	0.158 4	0.158 4	0.158 4
40	0.161 5	0.161 6	0.161 6	0.158 2	0.158 2	0.158 3
60	0.161 5	0.161 5	0.161 5	0.157 6	0.157 6	0.158 0
80	0.161 3	0.161 3	0.161 3	0.156 4	0.156 5	0.156 8

表 6 电缆接头应力锥根部处界面压力计算结果

Table 6 The error of theoretical and simulation value comparison

温度 / $^{\circ}\text{C}$	界面压力/MPa					
	理论计算值			仿真计算值		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
-40	0.169 1	0.169 1	0.169 1	0.171 0	0.171 0	0.171 0
40	0.169 0	0.169 0	0.169 1	0.170 5	0.170 5	0.170 6
60	0.169 0	0.168 9	0.168 9	0.170 0	0.170 0	0.170 2
80	0.168 8	0.168 8	0.168 9	0.168 3	0.168 5	0.168 9

表 7 理论与仿真值对比误差

Table 7 The error of theoretical and simulation value comparison

温度 / $^{\circ}\text{C}$	对比误差/%					
	绝缘处			应力锥根部处		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
-40	2.02	2.01	2.01	1.14	1.14	1.14
40	2.12	2.12	2.10	0.87	0.89	0.94
60	2.44	2.43	2.22	0.61	0.62	0.07
80	3.15	3.09	2.91	0.26	0.19	0

得,不同运行年限的老化电缆绝缘 XLPE 弹性模量最大差异为 29%,但其界面压力仅变化了 0.275%。且随着温度的升高,接头装配于不同运行年限电缆绝缘后的界面压力呈下降趋势,XLPE 在 -40°C 时的弹性模量数值约为其在 80°C 时的 37 倍,但其界面压力仅变化了 1.62%。可见,在不同温度下,尽管不同运行年限电缆绝缘 XLPE 的弹性模量变化显著,但界面压力变化极小。

基于上述方法,可算得电缆绝缘 XLPE 在接头绝缘及应力锥根部接触面处的压缩形变量如表 8 所示。

电缆接头分别与 S1、S2 和 S3 装配后,XLPE 的压缩形变量逐渐减小。主要原因是运行年限越长,XLPE 材料内部分子链在电、热老化作用下断裂越剧烈,力学性能劣化越严重^[19-21],引起弹性模量增加,硬度变大,导致 XLPE 越不容易发生形变。

表 8 不同运行年限的 XLPE 压缩位移

Table 8 XLPE compression displacement for different operating years

温度 / $^{\circ}\text{C}$	压缩位移/ μm					
	绝缘处			应力锥根部处		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
-40	0.460 0	0.450 0	0.500 0	0.480 0	0.470 0	0.530 0
40	4.207 4	4.049 0	3.262 0	4.402 3	4.236 6	3.413 2
60	7.760 5	7.578 6	6.221 0	8.120 1	7.929 8	6.509 3
80	19.271 0	18.261 0	15.370 0	20.164 0	19.108 0	16.082 0

根据胡克定律,应力与应变呈正相关,应变越大,应力越大,因而界面压力与接头硅橡胶和电缆绝缘 XLPE 的形变量密切相关。结合表 8 可知,电缆绝缘 XLPE 的最大压缩形变量不足 $21\ \mu\text{m}$,相对于过盈量 14 mm 而言远小得多。说明过盈量主要取决于电缆接头硅橡胶的压缩形变量,可忽略由电缆绝缘 XLPE 压缩形变引起的过盈量变化。因而,当相同规格的电缆接头套装在相同尺寸的电缆本体上时,由实际运行老化引起的电缆绝缘 XLPE 弹性模量变化对界面压力的影响可忽略不计。

基于上述讨论可知,在理论与仿真计算界面压力时可忽略电缆绝缘 XLPE 的压缩形变量,将 XLPE 当作是一个刚性物体,简化计算过程。通过实验模拟探究实际电缆接头装配于电缆本体上界面压力的大小时,可用铝管等刚性物体代替电缆本体,简化实验过程。

5 结论

文中基于橡胶本构模型的超弹性力学理论,利用有限元分析软件 COMSOL 建立电缆接头的二维轴对称仿真模型,研究了在不同温度下,不同运行年限电缆绝缘 XLPE 弹性模量变化对界面压力的影响。得出如下结论:

(1) 在 -40°C 时,不同运行年限的电缆绝缘 XLPE 的弹性模量差异明显,在 20°C 及以上时,由实际运行老化引起的 XLPE 弹性模量变化较小。

(2) 电缆接头轴向上的界面压力呈对称分布,应力锥和高压屏蔽管处的界面压力比绝缘处的界面压力大,最大应力出现在应力锥根部,最小应力出现在接头两端口位置。

(3) 仿真结果与理论计算的界面压力绝对差值不超过 3.2%,接头二维轴向仿真模型可为研究接头轴线上的界面压力分布情况提供可靠数据。

(4) 电缆接头与电缆本体装配后,由电缆绝缘 XLPE 产生的压缩形变量极小,过盈量的大小主要取决于电缆接头的压缩形变量。

(5) 不同运行年限老化引起的电缆绝缘 XLPE 电气性能不同,且弹性模量最大差异为 29%,但界面压力仅变化 0.275%,因而由运行老化导致的电缆绝缘 XLPE 弹性模量变化对界面压力的影响可忽略不计,全新接头与已运行一定年限的电缆绝缘装配后仍能维持足够的界面压力,保证电缆系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 谭笑,陈杰,李陈莹,等. 高压电力电缆增加段长关键技术研究展望及应用[J]. 电力工程技术,2018,37(3):91-96.
TAN Xiao, CHEN Jie, LI Chenying, et al. Research prospect and application of technology to increase the length of high voltage power line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):91-96.
- [2] 赵一枫,刘刚,谢月,等. 退役高压 XLPE 电缆绝缘空间电荷行为研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):151-157,172.
ZHAO Yifeng, LIU Gang, XIE Yue, et al. Space charge behavior of retired high-voltage XLPE cables[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3):151-157,172.
- [3] 杨引虎,罗建勇,韦远涛,等. 分布式电缆局部放电在线监测系统的研制[J]. 智慧电力,2018,46(3):91-94.
YANG Yinhu, LUO Jianyong, WEI Yuantao, et al. Development of distributed on-line PD monitoring system for cables [J]. Smart Power, 2018, 46(3):91-94.
- [4] 刘家军,杜智亮,李娟绒,等. 铁路 10 kV 电力电缆头发热分析与安全监测[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(24):131-138.
LIU Jiajun, DU Zhiliang, LI Juanrong, et al. Thermal analysis and safety monitoring of railway 10 kV power cable joints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24):131-138.
- [5] 王劲,覃煜,张行,等. 10 kV 交流电力电缆冷缩式中间接头电场仿真[J]. 广东电力,2018,31(12):127-133.
WANG Jin, QIN Yu, ZHANG Hang, et al. Simulation on electric field of cold shrinkable intermediate connector of 10 kV AC power cable [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12):127-133.
- [6] 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(6):14-16.
LUO Junhua, QIU Yuchang, YANG Liming. Operation fault analysis of clpe power cable above 10 kV[J]. High Voltage Engineering, 2003(6):14-16.
- [7] 柳松,彭嘉康,陈守直,等. 高温对交联聚乙烯电缆/硅橡胶预制件接头界面压力影响的仿真研究[J]. 电线电缆,2014(1):10-13.
LIU Song, PENG Jiakang, CHEN Shouzhi, et al. Simulation of interfacial pressure between XLPE cable and silicon rubber prefabricated joint coupled with high temperature[J]. Electric Wire & Cable, 2014(1):10-13.
- [8] 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):38-40,43.
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):38-40,43.
- [9] 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.
WANG Xia, YU Dong, DUAN Shengjie, et al. Dealing with some key design problems in HV cable accessory [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8):2710-2716.
- [10] 刘昌,惠宝军,傅明利,等. 机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(2):518-526.
LIU Chang, HUI Baojun, FU Mingli, et al. Influence of mechanical stress on the operation reliability of silicone rubber high voltage cable accessories [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):518-526.
- [11] AMYOT N, DAVID E. A study of interfacial pressure behavior for two types of thermally cycled coldshrinkable joints [C]// Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316). 2002:476-480.
- [12] XU Y, LUO P, XU M, et al. Investigation on insulation material morphological structure of 110 and 220 kV XLPE retired cables for reusing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4):1687-1696.
- [13] 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定:GB/T 528—2009[S]. 2009.
Rubber, vulcanized or thermoplastic: determination of stress-strain properties:GB/T 528—2009[S]. 2009.
- [14] 刘刚,谢月,李立涅. 110 kV 交联聚乙烯电缆绝缘层老化状态研究[J]. 广东电力,2015,28(10):72-77.
LIU Gang, XIE Yue, LI Licheng. Research on aging state of insulating layer of 110 kV XLPE cable [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(10):72-77.
- [15] 郑建康,赵艾萱,林涛,等. 高频冲击电压对 XLPE 电缆介电响应特性的影响[J]. 智慧电力,2018,46(5):46-52.
ZHENG Jiankang, ZHAO Aixuan, LIN Tao, et al. Effect of high frequency impulse voltage upon dielectric response of XLPE cables [J]. Smart Power, 2018, 46(5):46-52.
- [16] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定 [J]. 橡胶工业,2014,61(8):453-457.
YAN Shan, WANG Wei. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models [J]. China Rubber Industry, 2014, 61(8):453-457.
- [17] 仲健林,马大为,李士军,等. 海绵/橡胶适配器应力和变形模式的轴对称平面应变解析[J]. 航空学报,2014,35(12):3324-3330.
ZHONG Jianlin, MA Dawei, LI Shijun, et al. Axisymmetric plain strain analysis of stress and deformation mode for foam/rubber adapter [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 35(12):3324-3330.
- [18] 邹雨,庄茁,黄克智. 超弹性材料过盈配合的轴对称平面应力解答[J]. 工程力学,2004(6):72-75,83.

ZOU Yu, ZHUANG Zhuo, HUANG Kezhi. The solutions of axisymmetric plane stress for a hyperelastic material interference problem[J]. Engineering Mechanics, 2004(6):72-75, 83.

[19] 李欢, 翟双, 陈杰, 等. 热历史过程对XLPE电缆热历史温度的影响研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5):157-163.

LI Huan, ZHAI Shuang, CHEN Jie, et al. Influence of thermal history process on the thermal history temperature of XLPE cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5):157-163.

[20] 李盛翀, 马宏忠, 付明星, 等. 高压电缆热机械效应监测系统的研制[J]. 智慧电力, 2018, 46(11):65-69.

LI Shengchong, MA Hongzhong, FU Mingxing, et al. Development of thermo-mechanical effect monitoring system for high voltage cables[J]. Smart Power, 2018, 46(11):65-69.

[21] 李欢, 李建英, 马永翔, 等. 不同温度热老化对XLPE电缆绝

缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22):6740-6748, 6787.

LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effect of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22):6740-6748, 6787.

作者简介:



包淑珍

包淑珍(1996),女,硕士在读,研究方向为电缆本体与附件的界面压力、电力电缆载流量(E-mail:shuzhen_bao@163.com);

邓红雷(1975),男,博士,副教授,研究方向为电力设备在线监测、交直流混合配电网;

韩卓展(1993),男,硕士在读,研究方向为电缆本体与附件的界面压力、电力电缆载流量。

The influence of aging cable insulation on the interface pressure of cable joint

BAO Shuzhen¹, DENG Honglei¹, HAN Zhuozhan¹, LIU Jianhua¹, CUI Jiangjing², LIU Gang¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: To study the influence of the change in elastic modulus of retrieved cable insulation on interface pressure, the breakdown field strength and dielectric loss angle tangent of cable insulation with different operating years are measured to characterize the electrical properties, as well as the mechanical properties of the elastic modulus at different temperatures. Based on the constitutive theory of hyperelastic materials, the interface pressure of new cable joint assembled on the cable is calculated. Meanwhile, a two-dimensional axial simulation model of the cable joints is established, and the axial distribution of interface pressure is analyzed. The comparisons between simulation and theoretical results show that the error of the interface pressure between the cable body and the joint is not more than 3.2% by using the two-dimensional axial simulation model. The accuracy of the simulation model can provide reliable data for studying the interface pressure distribution on the joint axis maximum. Although the electrical performance of the insulation layer of the cable of different operating years is different, and the difference of cable insulation elastic modulus with different operation year is 29%, but the interface pressure changes only by 0.275%. Therefore, when the new cable joint assembled on the old cable, the interface pressure is sufficient enough.

Keywords: high voltage cable; cable joint; interface pressure; aging; elastic modulus

(编辑 方晶)