

硅橡胶绝缘材料温度及场强依赖特性对 XLPE 绝缘直流 电缆预制接头内电场分布的影响

赵明伟, 马天祥, 李 丹, 张 拓

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 由于电缆接头在直流运行下的电场分布受绝缘材料电导率影响, 而电导率受温度与电场的影响并呈现非线性特性, 故接头内电场分布变得异常复杂。为选择或确定适合工程应用的接头绝缘材料, 改善接头内的电场分布, 本文针对 10 kV 电压等级 XLPE 绝缘直流电缆预制接头结构构建仿真模型, 通过改变硅橡胶的电导非线性特征参数, 探究接头运行在满载运行状态下硅橡胶的电导活化能及电导场强依赖特性对接头内电场分布的影响。结果表明: 高负载情况下, 接头绝缘交界面处的直流稳态场强受绝缘材料电导活化能及电导场强依赖特性的影响, 其中电导活化能的影响更大。从经济性角度考虑, 硅橡胶与 XLPE 绝缘材料的电导活化能与电导场强依赖系数之比分别为应不高于 0.94 和不低于 0.50。

关键词: 硅橡胶; 电缆预制接头; 电场分布; 非线性电导

Effect of temperature and field strength dependence characteristics of silicone rubber insulating material on electric field distribution in prefabricated joints of XLPE insulated DC cables

ZHAO Mingwei, MA Tianxiang, LI Dan, ZHANG Tuo

(Electric Power Science Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.,
Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The electric field distribution of cable joints under DC operation is influenced by the conductivity of insulating materials, which exhibits non-linear characteristics under the effects of temperature and electric field, so the electric field distribution within the joints is exceptionally complex. In order to select or determine suitable insulating materials for joint in engineering applications and improve the electric field distribution inside the joint, we constructed a simulation model for the prefabricated joint structure of 10 kV voltage level XLPE-insulated DC cables. By changing the non-linear characteristic parameters of the conductance of silicone rubber, the influence of the conductance activation energy and conductance field strength dependence of silicone rubber on the electric field distribution inside the joint under full load operation was explored. The results show that under high load conditions, the DC steady-state field strength at the insulation interface of the joint is influenced by the conductance activation energy and the conductance field strength dependence of the insulating material, the conductance activation energy has a greater impact. From an economic perspective, the ratio of the conductance activation energy and field strength dependence coefficient of conductance between silicone rubber and XLPE insulating material should not be higher than 0.94 and not be lower than 0.50, respectively.

Key words: silicon rubber; cable prefabricated joint; electric field distribution; non-linear conductance

0 引言

随着我国城市化进程的推进和可再生能源的发展, 直流电缆在城市配网及远距离输电系统中起着日益重要的作用。XLPE 绝缘电缆由于其众多优点成为了直流电缆的首选^[1], 其配套接头常用以硅

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(kj2021-003)。

橡胶为主绝缘材料的固体预制接头。相比于电缆本体, 电缆接头包含众多复合界面, 结构复杂更易发生故障, 是电缆线路的薄弱环节^[2]。与在交流电压下相比, 接头在直流电压下的电场分布更加复杂。首先, 在直流电压下, 绝缘中的电场按电导率分布, 受温度和场强的影响显著, 且热场和电场相互耦合, 互相影响, 从而导致接头在运行时, 其内部

绝缘材料电导率呈非线性特性,当绝缘两侧温差过大时,还会由于电导率梯度过大而引起场强反转^[1];其次,在直流电压下运行时,接头内部双层介质界面处由于电导特性的不连续性易于积聚空间电荷,造成电场的畸变和局部集中,引发局部放电,甚至可能沿内部通道发生击穿^[9];最后,在应力锥根部,即半导电应力锥、电缆主绝缘与接头绝缘3种材料的交界位置,电导率变化梯度大,电应力集中,因此为击穿多发部位。毫无疑问,接头是直流电缆输电线路中的最薄弱环节,其绝缘材料的选择应引起重点关注。

由于非线性绝缘材料的电导率在一定的场强范围内可以随电场强度升高而明显增大,因而具有较好的均化电场分布的能力。国内外大量研究表明,通过在聚合物绝缘基体中添加SiC、ZnO、BaTiO₃等无机微、纳米填料可制备非线性绝缘介质。B R VARLOW等^[5]和K DONNELLY等^[6]应用具有非线性电导特性的压敏氧化锌填充硅橡胶制作电应力控制体,使得绝缘屏蔽端部的电场分布得到明显改善。韩宝忠等^[7]通过向硅橡胶中添加纳米SiC来改变硅橡胶的电导特性,应用Comsol仿真软件计算可知,以非线性硅橡胶做电缆附件增强绝缘时,电缆接头内最高场强点始终位于XLPE绝缘内,且接近于平均场强,即电场分布合理。李长明等^[8]通过添加纳米填料制备了用于制作电缆接头应力控制体的非线性硅橡胶复合材料,在场强高于特定值后,非线性硅橡胶基复合材料的电导率大于XLPE材料,使电缆接头内的电场分布得到优化。然而,目前对通过改善硅橡胶电导特性来优化接头内电场分布的研究偏于定性分析,缺少定量的表征,不利于工程上进行电缆接头设计时,选择或确定合适的接头绝缘材料。

本文以10 kV电压等级直流电缆接头为研究对象,通过仿真计算研究硅橡胶电导温度及场强依赖特性对XLPE绝缘直流电缆预制接头内电场分布的影响,并给出定量结论,为工程上选择或确定合适的接头绝缘材料提供参考。

1 试验设备及方法

1.1 XLPE及普通硅橡胶试样的制备

制备XLPE试样的原料选用北欧化工生产的LE4201型超净交联聚乙烯粒料,试样的制备步骤如下:将粒料在110℃的双辊开式混炼机上滚轧熔化,待混炼均匀后,按质量分数加入2.2%的交联剂过氧

化二异丙苯(DCP)和0.5%的300#抗氧剂,混炼15 min,制成母料。然后将母料放入聚酯模具中,在120℃的平板硫化机上预热10 min,之后将硫化机升温至160℃,热压硫化30 min,压力为10 MPa,最后在室温下冷却。从制备的试样中选取厚度为0.5 mm、均匀无明显杂质和气泡的样品若干。

制备普通硅橡胶试样的原料由上海三原电缆附件有限公司提供,试样的制备步骤如下:用混炼机将基料A与基料B以1:1的质量比混合均匀,然后置于真空箱中除去气泡。将混料倒入经过脱模剂处理的模具中,在250℃下模压硫化15 min,压力为15 MPa。经硫化成型后,从制备的试样中选取厚度为0.5 mm、均匀无明显杂质和气泡的样品若干。

1.2 固体绝缘材料电导特性测试

直流电导率测量系统如图1(a)所示,主要包括:高压直流电源、高精度电流表、数据采集系统、电极系统和温控装置。电极系统为三电极系统,具体尺寸如图1(b)所示。试验时将电极置于恒温干燥的烘箱中,并在高压极和保护极缝隙处缠上屏蔽带以隔绝外部电磁干扰等因素的影响。

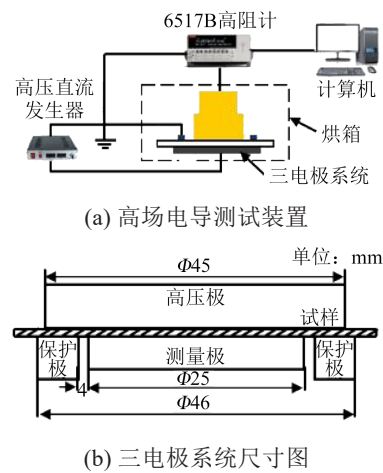


图1 直流电导率测量系统

Fig.1 DC conductivity measurement system

本文分别测量了XLPE和硅橡胶试样在不同温度与场强下的直流电导率。温度选择30、40、50、60℃,场强选择3、5、10、15 kV/mm,采用4 500 s时的电流值^[9]来计算试样的直流电导率。

2 试验结果

图2为不同温度和场强下XLPE和硅橡胶试样的直流电导率分布图。由图2可知,两种绝缘材料的电导率均与温度、场强成正相关,其中受温度影响更大。在温度较低时,XLPE电导率小于硅橡胶

电导率,而随着温度的升高,XLPE电导率增幅明显,在50℃以上时,已超过硅橡胶的电导率,该变化趋势与文献[10]中一致。由Maxwell-Wagner界面极化理论可知,当温度过高时,硅橡胶绝缘电导率低

于XLPE绝缘,此时接头内会出现“电场反转”的现象,最大场强会转移至绝缘交界面处,增大接头击穿的风险。

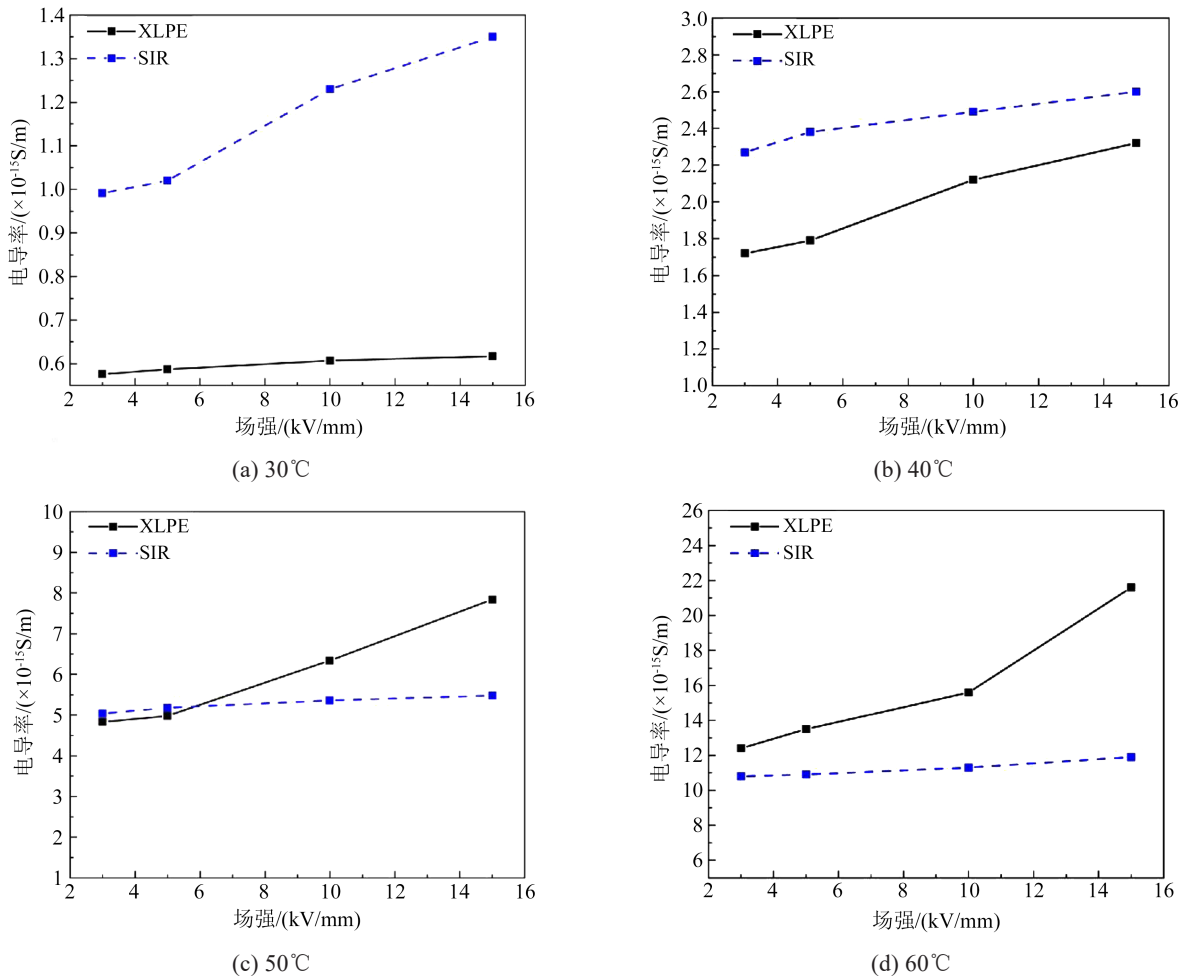


图2 不同温度和场强下XLPE和硅橡胶的直流电导率分布

Fig.2 DC conductivity distribution of XLPE and silicone rubber under different temperatures and field strength

3 仿真模型建立

3.1 电缆接头结构参数

由于在35 kV及以下的中低压应用场合,交、直流接头在材料、结构上并无明显区别,在一些将现役交流电缆系统改造为直流运行的线路中,保留了交流接头。因此,本文选用型号为YJV22-8.7/15kV-3×240mm²的10 kV交流XLPE电缆用预制接头作为研究对象,以导体中心线为基准,按照实际接头尺寸以1:1的比例构建仿真模型,同时为减少计算量,建立二维电缆中间接头轴对称仿真模型,如图3所示。其中,电缆线芯半径为9.15 mm,XLPE主绝缘厚度为4.5 mm,接头绝缘材料为硅橡胶,厚度为10

mm。

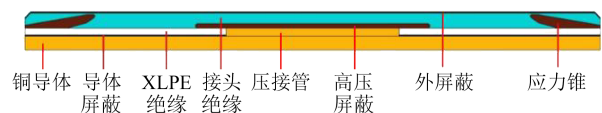


图3 10 kV电缆接头的仿真模型

Fig.3 The simulation model of 10 kV cable joint

3.2 电缆接头材料属性

接头中各材料的导热系数如表1所示,为实现一定程度的简化,对性能接近的导体屏蔽、应力锥、高压屏蔽、外屏蔽,统一采用半导体屏蔽层的导热系数^[11]。

将XLPE和硅橡胶所测电导率 σ 与温度 T 和电

表1 接头中各材料的导热系数

结构名称	导热系数/(W/(m·K))
铜导体	385
XLPE绝缘	0.286
硅橡胶绝缘	0.270
半导体屏蔽层	0.280

场强度 E 的关系利用式(1)^[12]进行函数拟合,获得两种绝缘材料的参数 A 、 φ 、 B 的值如表2所示,用于后续的仿真计算。

$$\sigma(T, E) = A \exp\left(\frac{-\varphi}{k_b T}\right) \frac{\sinh(BE)}{E} \quad (1)$$

式(1)中: E 为电场强度, V/m; A 为材料特性参数, V/($\Omega \cdot m^2$); φ 为活化能, eV; k_b 为波尔兹曼常数, 其值为 1.38×10^{-23} J/K; B 为电导场强依赖系数, m/V。

表2 XLPE和硅橡胶的电导率相关系数拟合结果

材料种类	$A/(V/(\Omega \cdot m^2))$	φ/eV	$B/(m/V)$
XLPE	4.48×10^4	0.77	1.20×10^{-7}
硅橡胶	1.50×10^4	0.72	5.43×10^{-8}

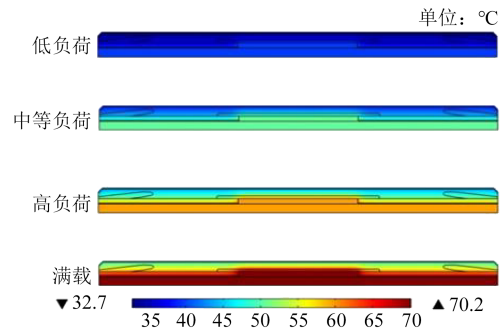
4 仿真计算

4.1 以普通硅橡胶为接头绝缘的直流电缆接头电热耦合场仿真

4.1.1 温度场仿真

在正常运行情况下,直流电缆线路中导体最高温度一般为 70°C ,因此本文以导体温度为 70°C 为基准,以每降低 10°C 为一个梯度,同时将负荷条件分为4种:满载、高负荷、中等负荷和低负荷,即对应的导体温度分别为 70 、 60 、 50 、 40°C 。在上述条件下,开展 10 kV 电缆接头的温度场仿真研究。设定电缆接头在空气中敷设,电缆接头外表面的换热系数为 $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[13],周围环境温度为 25°C ,接头两端边界条件为绝热。图4为接头的温度场仿真结果,不同负荷条件下对应的负载电流与导体温度见表3。

从图4可以看出,在不同的负荷条件下,接头内温度分布特性相似,除在高压屏蔽管附近等温线略有向上拱起外,接头中其他位置的热场基本呈现同轴型分布特征,即线芯处温度最高,沿半径向外温度逐渐降低。从表3可以看出,随着负载电流增加,对应导体温度也随之提升,4种负荷条件下对应的导体温度也基本符合 10°C 为一个梯度的要求。

图4 不同负荷条件下 10 kV 接头的温度分布Fig.4 Temperature distribution of 10 kV cable joint under different load conditions表3 不同负荷条件下 10 kV 接头的负载电流与导体温度

负荷条件	负载电流/A	导体温度/ $^\circ\text{C}$
低负荷	410	39.7
中等负荷	540	50.4
高负荷	630	59.6
满载	720	70.2

4.1.2 电场仿真

电场仿真是在温度场的基础上对电缆导体施加一定的直流电压进行仿真计算。文献[14]对直流配电电压等级序列进行了探讨,认为直流配电的中压配电主干网将以 $\pm 10\text{ kV}$ 网络为主; $\pm 10\text{ kV}$ 可与现有的交流 10 kV 相匹配,并满足现有 10 kV 交流配网容量规模要求,光伏电站也可通过并联后升压至 $\pm 10\text{ kV}$ 送出。鉴于实际直流电缆工程中已有 $\pm 10\text{ kV}$ 线路投运^[15],因此本文选择在导体上施加 10 kV 直流电压,并将应力锥与外屏蔽接地,利用仿真软件下的电场和热场耦合功能计算得到在不同负荷条件下运行的接头内电场分布与最大场强,结果如图5所示。

由图5可以看出,对于电缆接头,随着运行负荷的增加,XLPE绝缘内出现“电场反转”的现象,接头内最大场强由XLPE绝缘内侧转移至相对薄弱的应力锥根部处,并且随电流增大应力锥根部的场强逐渐增大。这是因为XLPE与硅橡胶材料的电导率对温度与场强的依赖特性不同,随着负荷水平的升高,两种绝缘材料的电导率差值越大,与之对应的绝缘界面不匹配程度加剧,最终导致接头内的最大场强转移到应力锥根部,并且随绝缘温差增大而持续增大。此外,以未改性的普通硅橡胶为接头绝缘,当电缆接头运行在高温高压下时,接头内最大

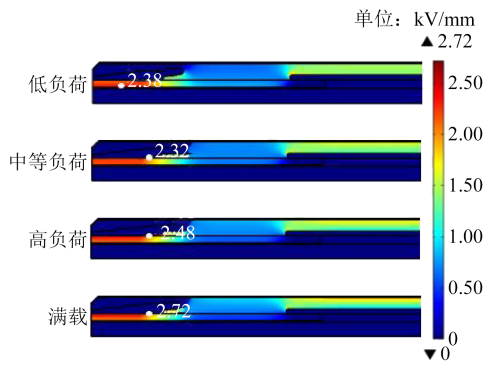


图5 不同负荷条件下10 kV接头内的电场分布

Fig.5 Electric field distribution in 10 kV cable joint under different load conditions

场强集中在应力锥根部处,增大了接头击穿的风险,因此有必要研究如何改变硅橡胶电导非线性特性来改善接头内电场分布,从而使接头安全运行。

4.2 硅橡胶电导温度及场强依赖特性对电场分布的影响

为探究硅橡胶电导非线性特性对接头内电场分布的影响以及优化接头内电场分布的规律,此处首先明确式(1)中描述电导率非线性程度的特征参数主要是活化能 φ 和电导场强依赖系数 $B^{[6]}$,在选择或确定合适的接头绝缘材料之前,需要明确 φ 与 B 对电场分布的影响规律。由之前的分析可知,电缆接头内较为薄弱的环节是其内部的绝缘交界面,尤其是应力锥根部处,因此以图6中的路径GH为研究对象,计算其场强分布,其中G点为高压屏蔽管、硅橡胶绝缘与XLPE绝缘3种材料交界处,H点为应力锥根部处。



图6 10 kV接头中的仿真路径

Fig.6 Simulation path in 10 kV cable joint

4.2.1 电导活化能对电场分布的影响

由4.1节计算结果可知,电缆接头运行在满载情况下时,其内部场强最大且位于应力锥根部处,对应的击穿风险最高。本节探究接头运行在满载情况下,电导活化能 φ 对接头内电场分布的影响。根据文献调研结果,硅橡胶电导活化能的取值一般在 $0.5\sim 1.0\text{ eV}^{[17-18]}$,结合表2中绝缘材料电导率函数的拟合参数,将硅橡胶材料的电导活化能分别取为 $0.70、0.72、0.74、0.76\text{ eV}$,其余参数与表2中的一致,即XLPE的电导活化能固定为 0.77 eV 不变。

图7为沿接头绝缘交界面上路径GH的场强分布随电导活化能 φ 的变化。从图7可以看出,最大场强位于应力锥根部,随着 φ 的增大,接头绝缘交界面上的场强整体增大,尤以应力锥根部H处增幅明显,当 φ 的取值从 0.70 eV 增大至 0.76 eV (增幅为 8.57%)时,应力锥根部的场强从 2.45 kV/mm 增至 8.35 kV/mm ,增幅高达 240.82% 。

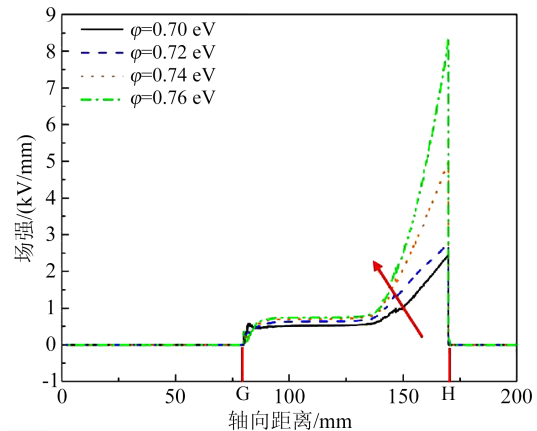


图7 接头绝缘交界面场强分布随 φ 的变化

Fig.7 The change of electric field distribution on the interface of joint insulation with φ

为了更详细地探究电导活化能变化对接头中应力锥根部场强的影响,在上述 φ 的取值基础上增加取值 $0.71、0.73、0.75\text{ eV}$,计算不同 φ 值下应力锥根部场强(E_y)以及两侧XLPE与硅橡胶的电导率比值(R),结果如表4所示。

表4 不同 φ 值下应力锥根部场强及其两侧XLPE与硅橡胶电导率比值

Table 4 Field strength at the root of stress cone and conductivity ratio of XLPE and silicone rubber on both sides under different φ values

φ/eV	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76
$E_y/(\text{kV/mm})$	2.45	2.47	2.72	3.71	4.97	6.53	8.35
R	0.58	0.83	1.18	1.69	2.44	3.57	5.30

由表4可以看出,随着活化能 φ 的增加,应力锥根部两侧绝缘材料的电导率比值也逐步增大,由Maxwell-Wagner界面极化理论可知,应力锥根部的场强随着界面电导率不匹配程度的提高而变大,故而可通过降低接头绝缘材料的电导活化能使接头绝缘交界面上的电场分布更加均匀。为了给出 φ 的合理范围,为接头绝缘材料的选型提供参考,此处将表4中数据进行绘制,如图8所示。

从图8可以看出,当 φ 从 0.76 eV 降至 0.72 eV

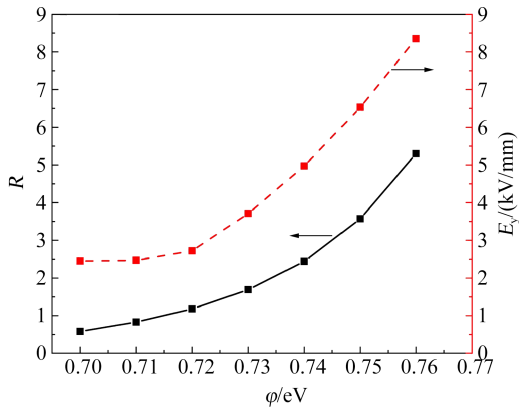


图8 不同 ϕ 值对应的绝缘材料电导率比值及应力锥根部场强

Fig.8 The conductivity ratio of insulating material and field strength at the root of stress cone corresponding to different ϕ values

时,对应的场强也基本呈线性下降的趋势,从 ϕ 降至0.72 eV开始,场强下降的趋势开始减缓,继续降低 ϕ 值作用不大,此时硅橡胶与XLPE材料的 ϕ 值之比为0.72/0.77=0.94。因此,推荐接头绝缘材料与电缆主绝缘XLPE材料的电导活化能之比应低于0.94,以改善接头内部电场。

4.2.2 电导场强依赖系数对电场分布的影响

令电缆接头运行在满载的状态下,探究电导场强依赖系数 B 对接头内电场分布的影响。此处硅橡胶材料的电导场强依赖系数分别取 2×10^{-8} 、 4×10^{-8} 、 6×10^{-8} 、 8×10^{-8} m/V,其余参数与表2中的一致,即XLPE的电导场强依赖系数固定为 1.2×10^{-7} m/V。

图9为沿接头内绝缘交界面上路径GH的场强分布随电导场强依赖系数 B 的变化。由图9可以看出,绝缘交界面上的最大场强依然位于应力锥根部;随着 B 的增大,场强整体下降,应力锥根部H处降幅明显,当 B 从 2×10^{-8} m/V增大至 8×10^{-8} m/V(增幅为300%)时,应力锥根部的场强从6.38 kV/mm降至2.47 kV/mm,降幅为61.29%。因此,相比于电导场强依赖系数,电导活化能对接头绝缘交界面上的场强影响更为显著。

在上述 B 的取值基础上增加取值 3×10^{-8} 、 5×10^{-8} 、 7×10^{-8} m/V,计算得出每一取值对应的应力锥根部场强以及两侧XLPE与硅橡胶绝缘的电导率比值,结果如表5所示,绘制的曲线如图10所示。

由图10可以看出,从 $B=6 \times 10^{-8}$ m/V开始,后续的应力锥根部场强基本无变化,此时硅橡胶与XLPE材料的 B 值之比为 $6 \times 10^{-8} / 1.2 \times 10^{-7} = 0.50$ 。因

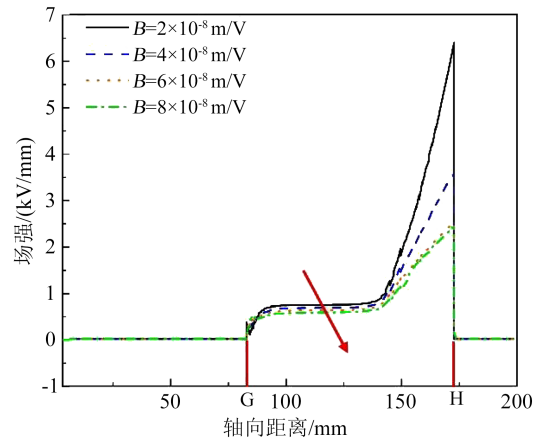


图9 接头内绝缘交界面处的场强分布随电导场强依赖系数的变化

Fig.9 The variation of field strength distribution on the insulation interface inside the joint with the dependence coefficient of conductivity field strength

表5 不同 B 值对应的应力锥根部场强及两侧绝缘材料的电导率比值

Table 5 Field strength at the root of stress cone and conductivity ratio of insulating materials on both sides under different B values

$B/(\times 10^{-8} \text{ m/V})$	2	3	4	5	6	7	8
$E_y/(\text{kV/mm})$	6.38	4.59	3.58	2.93	2.49	2.48	2.47
R	3.46	2.19	1.62	1.28	1.07	0.91	0.79

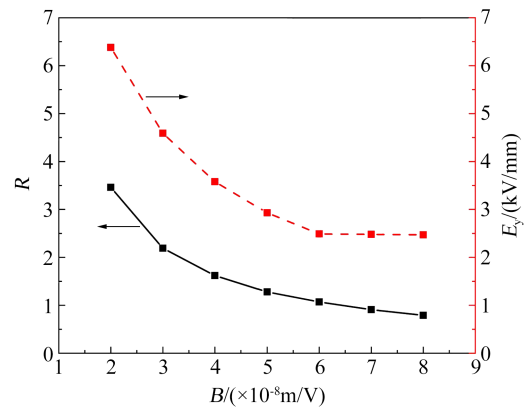


图10 不同 B 值对应的绝缘材料电导率比值及应力锥根部场强

Fig.10 The conductivity ratio of insulating material and field strength at the root of stress cone corresponding to different B values

此,从经济性角度考虑,推荐接头绝缘材料与电缆主绝缘XLPE材料的电导场强依赖系数之比应不低于0.50,以改善接头内部电场。

直流运行时,电缆线路除了需要耐受长期额定

直流运行电压,还应进行冲击电压耐受性能的校核。因此后续应研究在直流叠加冲击电压下,接头绝缘材料的电导非线性特性对接头内暂态电场分布的影响。

5 结论

(1)以未改性普通硅橡胶作为直流电缆接头绝缘,接头运行在高温高压下时,由于其电导率比XLPE绝缘电导率小,接头内最大场强会转移至应力锥根部处,增加接头击穿的风险。

(2)高负载情况下,接头绝缘交界面处的直流稳态场强受接头绝缘材料电导活化能及电导场强依赖系数的影响,且电导活化能影响更大。随着电导活化能的增大,接头绝缘交界面处的场强增加,且应力锥根部场强增幅明显,推荐接头绝缘与电缆主绝缘材料的电导活化能之比不高于0.94。随着电导场强依赖系数的增大,接头绝缘交界面处的场强减小,且应力锥根部场强降幅明显,推荐接头绝缘与电缆主绝缘材料的电导场强依赖系数之比不低于0.50。

参考文献 References

- [1] 周远翔,吴优,张灵,等.预交联对XLPE直流电缆料空间电荷特性的影响[J].绝缘材料,2022,55(3):23-31.
ZHOU Y X, WU Y, ZHANG L, et al. Effect of pre-crosslinking on space charge characteristics of XLPE DC cable materials[J]. Insulating Materials,2022,55(3):23-31.
- [2] 尚康良,曹均正,赵志斌,等.320 kV 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.
SHANG K L, CAO Y Z, ZHAO Z B, et al. Simulation analysis and structural optimization design of 320 kV XLPE high voltage DC cable joint accessories[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):2018-2024.
- [3] 胡巍,赵洪,牛越,等.高压电缆附件用橡胶基增强绝缘电学性能研究进展[J].绝缘材料,2021,54(7):1-9.
HU W, ZHAO H, NIU Y, et al. Research progress on electrical properties of rubber-based reinforced insulation for high voltage cable accessories[J]. Insulating Materials,2021,54(7):1-9.
- [4] 刘宗喜,张磊,欧阳本红,等.500 kV直流电缆接头增强绝缘设计关键参数及其控制研究[J].绝缘材料,2021,54(12):80-86.
LIU Z X, ZHANG L, OUYANG B H, et al. Research on key parameters and its control of reinforced insulation design for 500 kV DC cable joint[J]. Insulating Materials,2021,54(12):80-86.
- [5] VARLOW B R, LI K. Non-linear A.C. properties of a ceramic-resin composite[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE,2000:89-92.
- [6] DONNELLY K, VARLOW B R. AC conductivity effects of non-linear fillers in electrical insulation[C]//Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada: IEEE,2000:132-135.
- [7] 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 B Z, FU M L, LI C Y, 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.
- [8] 李长明,孙钦佩,李春阳,等.硅橡胶电导特性对XLPE绝缘高压直流电缆中间接头内电场分布的影响[J].南方电网技术,2015,9(10):47-51.
LI C M, SUN Q P, LI C Y, et al. Effect of silicone rubber's electric conductance characteristics on electric field distribution inside XLPE insulated HVDC cable joints[J]. Southern Power System Technology,2015,9(10):47-51.
- [9] GHORBANI H, OLSSON C, ANDERSSON J. Robust characterization of the DC-conductivity of HVDC insulation materials at high electric fields[C]//The 9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: Jicable,2015.
- [10] 顾金.柔性高压直流交联聚乙烯(XLPE)电缆及其附件的设计研究[D].上海:上海交通大学,2010.
GU J. Research on the design of HVDC lightcross-linked polyethylene (XLPE) cable and accessory[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2010.
- [11] International Electrotechnical Commission. Electric cables - calculation of the current-rating - part 1-1: current rating equations and calculation of losses: IEC 60287-1-1[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2006:24-30.
- [12] REDDY C C, RAMU T. On the DC conductivity of HVDC cable insulation cautions in using the empirical models[C]//International Symposium on Electrical Insulation. Bangalore, India: IEEE,2008:39-42.
- [13] 李昭红.高压直流XLPE绝缘电缆中间接头电热耦合仿真研究和稳态载流量计算[D].广州:华南理工大学,2016.
LI Z H. Simulation study on electro-thermal coupling and steady-state rating computation of HVDC XLPE insulation cable joint[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.
- [14] 盛万兴,李蕊,李跃,等.直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J].中国电机工程学报,2016,36(13):3391-3403.
SHENG W X, LI R, LI Y, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(13):3391-3403.
- [15] 刘英,曹晓珑,何子兰,等.现役交流XLPE电缆配电线路改为直流运行的技术方案及实例分析[J].中国电机工程学报,2016,36

- (1):96-103.
- LIU Y, CAO X L, HE Z L, et al. Technical scheme and case study of the upgrading renovation of existing XLPE cables from AC distribution system to DC operation[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):96-103.
- [16] 陈庆国,尚南强,秦艳军,等. 纳米碳化硅/液体硅橡胶复合材料非线性电导特性[J]. 高电压技术,2017,43(11):3521-3527.
- CHEN Q G, SHANG N Q, QIN Y J, et al. Non-linear conductivity characteristic of SiC/LSR nanocomposite[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3521-3527.
- [17] CHEN X R, YU J Z, YU L W, et al. Numerical analysis of thermo-electric field for AC XLPE cable in DC operation based on conduction current measurement[J]. IEEE Access, 2019, 7(7): 8226-8234.
- [18] 赵鹏,赵健康,陈铮铮,等. 直流叠加雷电冲击电压下 $\pm 320\text{kV}$ 直流电缆整体预制式接头典型故障机理分析[J]. 高电压技术, 2019,45(12):3964-3969.
- ZHAO P, ZHAO J K, CHEN Z Z, et al. Mechanism analysis of typical failures of integrally prefabricated joint in $\pm 320\text{kV}$ DC cable under DC superposition lightning impulse voltage[J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):3964-3969.

收稿日期:2024-01-28;修回日期:2024-04-19。

作者简介:

赵明伟(1997-),男(汉族),河北石家庄人,助理工程师,主要从事配电网设备检测技术的研究;

马天祥(1986-),男(汉族),辽宁喀左人,高级工程师,主要从事配电网故障分析与处理技术的研究。