

# 基于增强绝缘材料非线性电导率的特高压直流 电缆接头优化设计研究

刘宗喜, 欧阳本红, 赵鹏, 陈铮铮, 赵健康

(中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**特高压直流输电工程的实施使得特高压直流电缆装备的需求日渐迫切。为研究特高压直流电缆接头的结构设计,从聚合物绝缘材料的非线性电导率特性对直流电缆接头绝缘电场分布的影响入手,分析改性硅橡胶对特高压直流电缆接头绝缘结构优化设计的影响。结果表明:直流电缆接头增强绝缘中电场强度会随着电缆负荷电流的增大而发生极性反转。掺杂的钛酸铜钙纳米纤维无机填料大幅增强了硅橡胶的电导率非线性,提高了硅橡胶的活化能和电场强度系数参数,降低电导率进入非线性区的阈值电场强度。改性硅橡胶增强绝缘材料明显抑制特高压直流电缆接头中的双层介质界面切向电场、应力锥和高压屏蔽管表面电场的畸变。采用改性硅橡胶作为特高压直流电缆接头增强绝缘材料,可弥补调整电缆接头结构尺寸仍不能有效抑制接头中电场畸变的不足。研究结果可有效解决特高压直流电缆接头设计中的电场控制难题。

**关键词:**特高压直流电缆接头; 聚合物绝缘; 非线性电导率; 改性硅橡胶; 绝缘结构优化

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)08-0074-09

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.08.012

## Optimal Design of UHVDC Cable Joints Based on Nonlinear Conductivity of Reinforced Insulation Materials

LIU Zongxi, OUYANG Benhong, ZHAO Peng, CHEN Zhengzheng, ZHAO Jiankang

(State Grid China Electric Power Research Institute, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** It is increasingly urgent to the demand of ultra-high voltage direct current (UHVDC) cable equipment because of the implementation of UHVD transmission project. In order to study the structural design of UHVDC cable joints, we start from the influence of nonlinear conductivity characteristics of polymer insulation materials on the insulation electric field distribution of DC cable joints to analyze the effect of modified silicone rubber on the optimal design of the insulation structure of UHVDC cable joints. The results show that the electric field in the reinforced insulation of DC cable joints will reverse polarity with the increases of the cable load current. The nonlinear conductivity of the silicone rubber is greatly enhanced by doping copper calcium titanate nanofibers inorganic filler, the activation energy and electric field strength coefficient of the silicone rubber are improved, and the threshold electric field strength of conductivity entering the nonlinear region is reduced. The distortion of tangential electric field of double-layer dielectric interface and surface electric field of stress cone and high-voltage shielding tube in the UHVDC cable joint are obviously suppressed by the modified silicone rubber reinforced insulation material. The modified silicone rubber, used as the reinforced insulating material for UHVDC cable joints, can make up for the insufficient that the field distortion in the joint cannot be suppressed effectively by adjusting the structural size of cable joints. The research results can effectively solve the electric field control problem in the design of UHVDC cable joints.

**Key words:** UHVDC cable joint; polymer insulation; nonlinear conductivity; modified silicone rubber; insulation structure optimization

收稿日期: 2020-09-08 修回日期: 2020-10-16

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGSHDK00SPJS1800273)

作者简介: 刘宗喜(1982-), 男(汉族), 河南南阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事交/直流电力电缆绝缘性能可靠性评价相关技术的研究。

## 0 引言

直流输电技术是实现远距离、大容量、低损耗、高效率电力传输和新能源并网的最佳选择,也是建设全球能源互联网的基础。在远距离以及跨海直流输电工程中,直流电缆由于具有成本优势而成为直流输电的关键装备之一。当前,国外已经研制出700 kV电压等级的聚丙烯层压纸绝缘电缆(PPLP)和640 kV的XLPE挤出直流电缆,国外600 kV的油纸直流电缆、国内±320 kV电压等级XLPE电缆输电工程都已经投运,500 kV直流XLPE电缆正在国产化。我国正在大力发展特高压直流输电工程,随着输送容量要求的不断提高,对特高压直流电缆的需求也日渐迫切,因此,需要提前开展特高压直流电缆装备的研究,其中影响整个特高压直流电缆系统运行性能的关键组件——中间接头的设计显得尤为重要。

在直流电场下,聚合物绝缘介质中电荷传导受到电极注入电荷的限制,存在局部能带上电子跃迁、电极电子发射电流和空间电荷限制电流等现象,其电导率呈现出依赖于温度和电场强度的非线性伏安关系<sup>[1-7]</sup>。直流电场作用下的非线性电导绝缘材料,在不同输送负荷下绝缘层中的电场分布会产生反转,由于两种绝缘材料电导率数量级相差甚远,且电导率随温度梯度变化的特性不同步,在直流电缆主绝缘和接头增强绝缘交界面上会聚集空间电荷<sup>[8-11]</sup>。因此,主绝缘和增强绝缘材料电导率的配合,成为直流电缆中间接头结构设计的关键问题。文献[8]计算分析了320 kV直流电缆增强绝缘材料不同活化能和非线性系数对接头电场分布的影响特性。文献[12-14]主要研究直流电缆接头界面空间电荷行为对电场分布的影响,旨在通过抑制界面空间电荷聚集的方法来改善界面电场的畸变情况。文献[15-16]则着重分析界面压力因素对电缆附件界面特性的影响。文献[17-18]在320 kV直流电缆接头的仿真试验中对交联聚乙烯/硅橡胶不同电导率比值对接头电场分布进行定性分析。文献[19-22]对硅橡胶和三元乙丙橡胶材料非线性电导率的改善研究做了大量试验和分析。

基于上述研究基础,本文从改善接头增强绝缘材料非线性电导率特性出发,对特高压直流电缆中间接头的结构设计进行研究,发挥接头增强绝缘材料在直流电缆负荷变化引起的温度梯度改变对电场的调节作用,研究改性硅橡胶绝缘材料对特高压

直流电缆接头电场分布特征的影响。通过上述改性方法对特高压直流电缆中间接头的长度和厚度等结构参数加以控制,以优化特高压直流电缆中间接头结构设计,降低加工制造、安装运输的难度。

## 1 非线性电导材料对直流电缆电场的调节作用

### 1.1 直流电缆接头电场的分布特点

电缆接头中的主绝缘和增强绝缘是典型的同轴柱状双层介质,如图1所示。介质1为电缆的主绝缘,介质2为电缆接头处的增强绝缘。根据Maxwell-Wagner极化效应,在施加直流电场的初始阶段,忽略界面处的空间电荷,介质1和介质2中的电场强度分别如式(1)、式(2)所示<sup>[23]</sup>。

$$E_1(r) = \frac{\sigma_2 U}{(\sigma_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_i}{r_1}) r} \quad (1)$$

$$E_2(r) = \frac{\sigma_1 U}{(\sigma_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_i}{r_1}) r} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 分别为介质1、2的电导率; $U$ 为导体与介质2外表面之间的电势差,单位为kV; $r_1$ 为电缆导体半径,单位为mm; $r_i$ 为电缆绝缘外半径,单位为mm; $r_2$ 为介质2外半径,单位为mm; $r$ 为介质1和介质2中某点所在圆环的半径,单位为mm。

由式(1)和式(2)可计算得到直流电缆接头双层绝缘在界面处的电场强度比率,如式(3)所示。

$$\frac{E_1(r)}{E_2(r)} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (3)$$

从式(3)可知,直流电压下电缆绝缘层中稳态电场强度仅由材料电导率决定。主绝缘和增强绝缘材料的电导率不匹配,导致界面两侧电场分布不连续,界面上的间隙和缺陷会聚集大量的空间电荷,改变电场的不连续性。

直流电缆接头中主绝缘和增强绝缘中的电场分布,由绝缘材料受温度和电场影响的非线性电导特性决定,表现为聚合物绝缘材料在直流电缆承载不同负荷电流时电场分布的反转现象。

图2为普通硅橡胶材料作为增强绝缘材料的直流电缆接头时,电场强度随电缆负荷的变化情况。从图2可以看出,直流电缆空载时,接头主绝缘中的电场强度远大于增强绝缘,两部分绝缘的最大电场强度均位于绝缘层的内表面;随着直流电缆中负荷

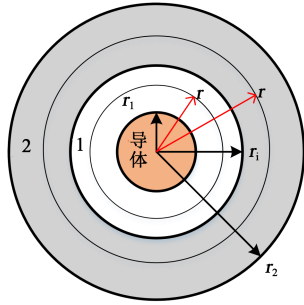


图1 同轴柱状双层介质模型

Fig.1 Coaxial cylindrical double-layer media model

电流的增大,绝缘层内侧电场强度逐渐降低,绝缘层外侧电场强度逐渐增大,两部分绝缘中最大电场强度位置转移到绝缘层外表面;在接头双层绝缘界面上,由于界面两侧电场强度差别较大,电场强度比值随着直流电缆负荷电流增大也逐渐增大,表明该双层绝缘界面产生了随着绝缘温度分布变化而改变的空间电荷。

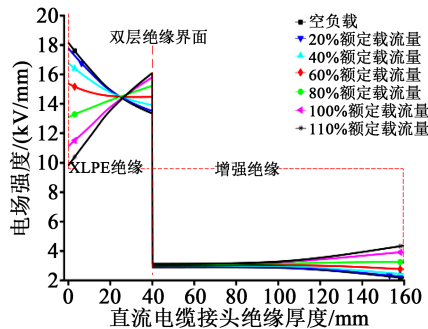


图2 直流电缆接头中绝缘层径向电场强度随负荷电流的变化特征

Fig.2 Variation of radial electric field intensity of insulation layer in DC cable joint with load current

## 1.2 非线性电导材料对电场的调节机理

聚合物绝缘材料的电导率与施加电场强度之间的变化关系如图3所示。从图3可以看出,对于多数聚合物,存在一个阈值场强 $E_r$ ,当施加在材料上的电场强度低于阈值场强时,电导率随着电场强度变化不明显;当电场强度增大至 $E_r$ 后,材料内部电流密度呈非线性增长,使得聚合物材料的电导率也呈非线性增长。聚合物绝缘材料电导率与电场强度的数学关系如式(4)所示。

$$\sigma = \alpha E^\beta \quad (4)$$

式(4)中: $\alpha$ 为与材料相关的常数; $E$ 为电场强度,单位为kV/mm; $\beta$ 为材料的电导非线性系数。

利用聚合物绝缘材料的非线性电导率实现对

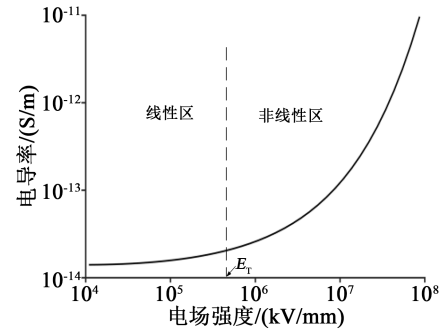


图3 聚合物绝缘材料电导特性

Fig.3 Conductivity characteristics of polymer insulating materials

直流电缆接头增强绝缘中电场的调节,通过对接头增强绝缘材料进行非线性改性,调整增强绝缘材料在电导率非线性区的曲线陡度,改变高电场强度下直流电缆接头主绝缘和增强绝缘之间的电导率比率,实现对接头增强绝缘中电场分布的调节和改善。

## 2 硅橡胶绝缘材料的电导率调控

### 2.1 改性硅橡胶的非线性电导性能

钛酸铜钙不但具有超高的介电常数和较低的介质损耗,还表现出优异的电导非线性特性,非线性系数可高达900。本研究采用钛酸铜钙纳米纤维(CCTO NFs)作为无机填充材料,选择具有较高电气强度和优异力学性能的加成型双组分液体硅橡胶(LSR)作为聚合物基体,制备出纯硅橡胶及不同CCTO NFs填充比例的钛酸铜钙纳米纤维/液体硅橡胶复合介质。

使用三电极系统测试改性硅橡胶平板试样的电导率,三电极测试系统如图4所示。测量过程中恒温干燥箱的工作温度分别设置为30、50、70℃,测量每个温度下试样在不同直流电场强度下的体积电导率,测量结果如图5所示。从图5可以看出,不同温度下改性硅橡胶的电导率与电场强度呈现明显的分段线性变化趋势,线性区的电导率变化较小,当电场强度超过阈值电场强度后进入非线性区,电导率快速增大;硅橡胶的阈值电场强度随着CCTO NFs填料体积分数的增加而快速下降,同时非线性度提升。分析原因可能是随着CCTO NFs填料体积分数的增加,相互交织的CCTO纤维在LSR基体中形成导电通道,载流子势垒降低,从而降低了电导率非线性阈值电场强度。导电通道使载流子的输运能力增加,从而增大了电导率非线性

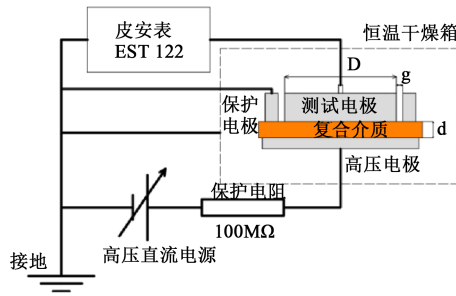


图4 三电极系统原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of three-electrode system principle

系数。

温度对硅橡胶非线性电导率和阈值电场强度的影响比较复杂。总体上硅橡胶的电导率随着温度的升高而增大,阈值电场强度和电导率的非线性系数则随之下降低。一方面,温度升高,载流子获得更多的高温动能,提高了载流子的迁移率,甚至会产生热激发载流子而提高载流子数量;在较小的电场强度下,硅橡胶中的载流子即可发生空间电荷限制电流效应和逾渗效应,从而大幅提高硅橡胶的电导率并降低电导率进入非线性区的阈值电场强度。另一方面,温度升高加速了硅橡胶内具有高温动能的载流子的迁移,导致更多的载流子获得较大能量,从晶格结构中脱离并引发隧道效应,由于基体和填料本身运输载流子能力存在上限,载流子运输将趋于饱和,致使电导率非线性系数减小<sup>[24]</sup>。

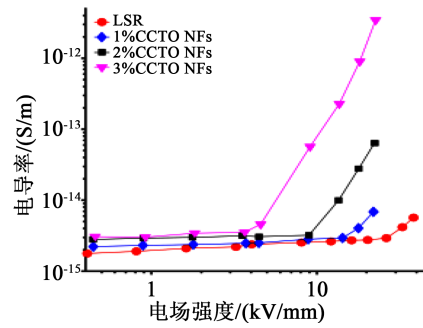
### 2.2 非线性电导率参数拟合

聚合物固体介质的电导率通常采用跳跃电导模型来表示,如式(5)所示<sup>[10]</sup>。

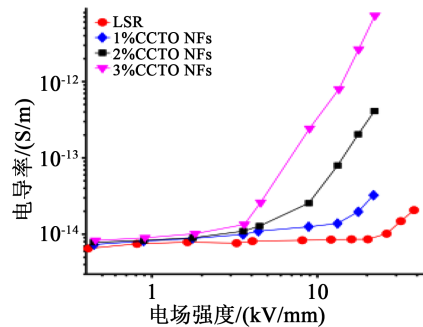
$$\sigma(E,T) = Ae^{\frac{-\varphi}{k_b T}} \frac{\sinh(B|E|)}{E} \quad (5)$$

式(5)中: $\sigma$ 为电导率,单位为S/m; $T$ 为温度,单位为K; $E(E > 0)$ 为电场,单位为V/m; $A$ 为与材料有关的常数,单位为V/( $\Omega \cdot m^2$ ); $B$ 为场强系数,单位为m/V; $\varphi$ 为活化能,单位为eV; $q$ 为电子电荷量,单位为C; $k_b$ 为波尔兹曼常数,单位为J/K,  $\sinh$ 是双曲正弦函数。

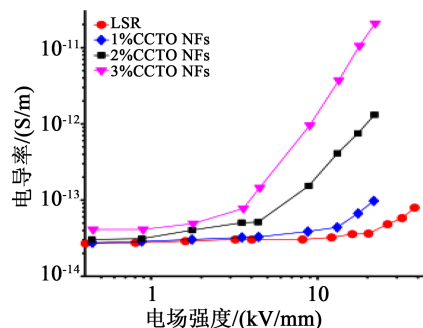
用式(5)对直流XLPE、普通硅橡胶和使用不同体积分数CCTO NFs无机填料改性的硅橡胶电导率测试结果进行拟合,得到非线性电导率的相关表征参数,如表1所示。从表1可知,随着无机填料体积分数的增加,改性硅橡胶的材料常数、活化能和场强系数也逐渐增大。



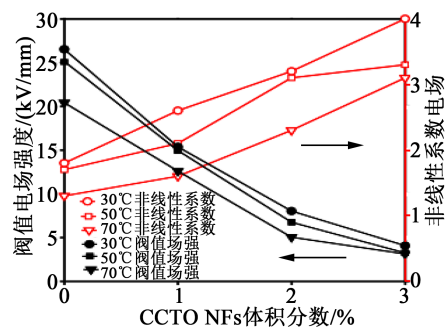
(a) 30°C



(b) 50°C



(c) 70°C



(d) 阈值场强和非线性系数电场

图5 不同CCTO NFs填料体积分数的硅橡胶电导率、阈值电场强度和非线性系数

Fig.5 Conductivity threshold electric field strength, and nonlinear coefficient of silicone rubber with different volume fraction of CCTO NFs fillers

### 2.3 改性硅橡胶直流电气强度测试

对不同温度下、不同无机填料体积分数的硅橡胶材料试样进行直流电气强度测试,结果如图6

表1 聚合物非线性电导率参数

Tab.1 Nonlinear conductivity parameters of polymer	聚合物类型	材料常数 $A$ /( $V/\Omega \cdot m^2$ )	活化能 $\phi$ /eV	场强系数 $B$ /( $m/V$ )
	XLPE	3.20	0.560 0	$2.770 \times 10^{-7}$
	SR	10.42	0.506 7	$7.097 \times 10^{-8}$
	1%CCTO NFs/SR	11.57	0.527 7	$1.377 \times 10^{-7}$
	2%CCTO NFs/SR	96.56	0.571 2	$2.270 \times 10^{-7}$
	3%CCTO NFs/SR	197.62	0.653 3	$3.210 \times 10^{-7}$

所示。

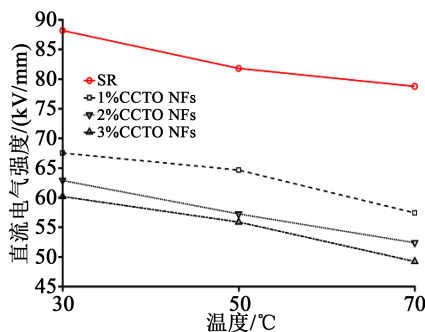


图6 改性硅橡胶的直流电气强度与温度的关系

Fig.6 Relationship between DC electric strength and temperature of the modified silicone rubber

从图6可以看出,相对于改性前的硅橡胶,改性硅橡胶的直流电气强度存在一定程度的降低,并随着温度的升高而降低。此外,硅橡胶的直流电气强度受无机填料体积分数的影响较为明显,体积分数越大,直流电气强度越低;随着体积分数的进一步增大,直流电气强度下降的幅度有所减小。

### 3 特高压直流电缆接头结构设计

#### 3.1 接头结构初步设计

特高压直流电缆接头应力锥结构的设置参照文献[17]中的设计方案,高压屏蔽管利用“法拉第电笼效应”均化电缆连接处的电场分布。为避免可能出现的局部高场强,应力锥和高压屏蔽管均采用半导电橡胶材料<sup>[25]</sup>。电缆主绝缘和增强绝缘材料界面的切向电场强度一般小于3 kV/mm,接头增强绝缘的正常允许工作场强是其直流电气强度的20%<sup>[18]</sup>,根据图6,70℃时无机填料体积分数为0、1%、2%和3%的硅橡胶的直流电气强度分别为78.75、57.4、52.37、49.22 kV/mm,正常允许工作场强设计值应为

15.75、11.48、10.47、9.84 kV/mm。特高压直流电缆导体施加的电压取为额定电压  $U_0$  的1.05倍,即840 kV。

特高压直流电缆接头结构设计参照500 kV交直流电缆接头设计原则,特高压直流电缆接头的基本结构如图7所示。其中,特高压直流电缆绝缘内径为34.25 mm,绝缘外径为74.25 mm,双层绝缘介质界面长度为1 000 mm,增强绝缘厚度为220 mm,应力锥有效长度为351 mm,应力锥厚度为94 mm,高压屏蔽管厚度为66 mm。

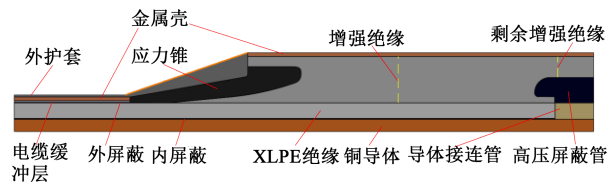


图7 特高压直流电缆中间接头结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of UHVDC cable joint structure

#### 3.2 特高压直流电缆接头电场分布

使用有限元数值分析方法,对特高压直流电缆接头内电场分布进行仿真计算,接头内外初始温度均为25℃。接头增强绝缘材料为普通硅橡胶。

特高压直流电缆空负载和满负载(2 500 A)时,接头中的电场分布如图8所示。从图8可以看出,应力锥根部和端部、以及高压屏蔽管端部电场发生畸变。空负载和满负载条件下,电缆中XLPE绝缘和接头增强绝缘中的电场分布有明显的区别,接头部分XLPE绝缘中的电场发生反转。满负载时,接头部分XLPE绝缘中的等电场线基本上沿径向延伸;接头增强绝缘中(尤其在应力锥根部)的等电场线也呈现沿径向延伸的趋势。

特高压直流电缆空负载和满负载(2 500 A)时,接头中径向电场和界面切向电场分布如图9和图10所示。从图9可以看出,电缆本体XLPE绝缘、接头部分XLPE绝缘和接头增强绝缘中的电场均出现不同程度的反转现象,接头部分XLPE绝缘中的电场强度水平远小于本体XLPE绝缘;由于电缆接头中高压屏蔽管的存在,使得电缆接头中间位置的剩余增强绝缘中电场强度较高。

从图10可以看出,接头界面切向电场强度分布与界面位置和负载情况有关。接头界面上靠近高压屏蔽管和应力锥的位置界面切向电场强度出现极大值;应力锥根部的界面切向电场强度较高;从空负载到满负载,接头界面上高压屏蔽管端部附近

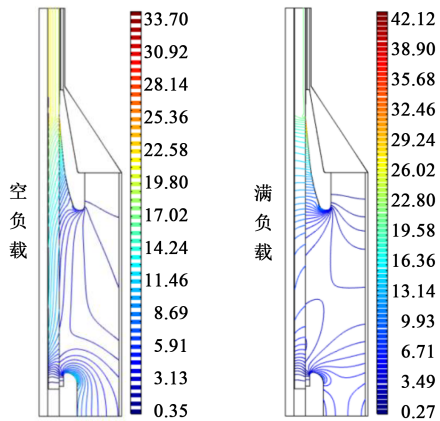


图8 空载和满载时特高压直流电缆接头中电场等值线分布

Fig.8 Distribution of electric field contours in UHVDC cable joint without load and with full load

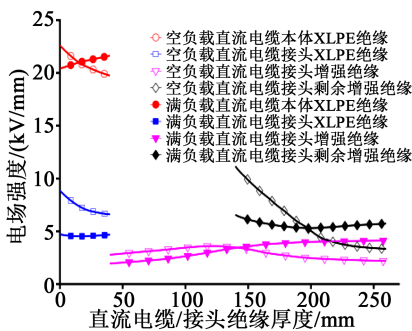


图9 空载和满载时特高压直流电缆接头中电场径向分布  
Fig.9 Radial distribution of electric field in UHVDC cable joints without load and with full load

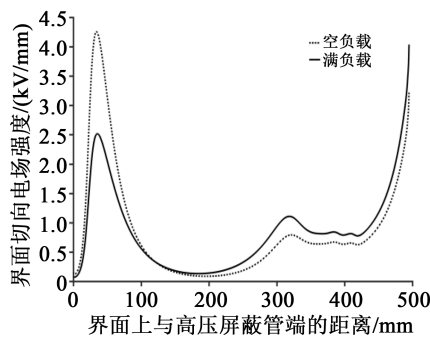


图10 空载和满载时双层介质界面上切向电场分布  
Fig.10 Tangential electric field distribution on the double-layer dielectric interface without load and with full load

的界面切向电场强度显著减小,相反地,界面上其余位置的切向电场强度显著增大。此外,上述两种负荷条件下的界面切向电场强度最大值都超过了3.0 kV/mm。

### 3.3 特高压直流电缆接头结构优化仿真

改变特高压直流电缆接头的界面长度和增强

绝缘厚度,得到不同负载条件下接头界面切向电场、高压屏蔽管表面和应力锥表面电场强度最大值与界面长度和增强绝缘厚度的变化关系如图11和图12所示。

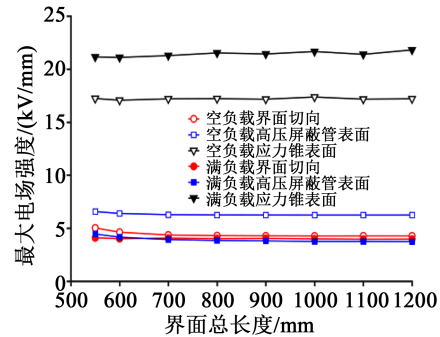


图11 不同界面长度时空载和满载下接头电场强度  
Fig.11 Electric field strength of joints under no-load and full-load conditions with different interface lengths

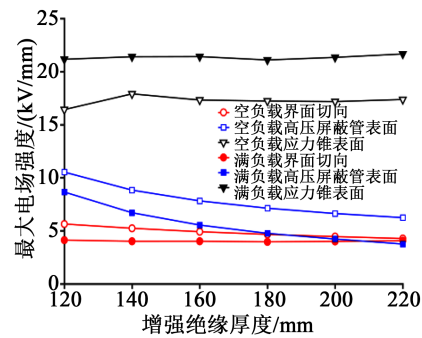


图12 界面长度为100 mm时增强绝缘厚度对接头电场强度的影响

Fig.12 Influence of reinforced insulation thickness on the electric field of joint with 100 mm length of interface

从图11和图12可以看出,满载时应力锥表面的电场强度始终保持在20 kV/mm左右,且不随接头结构尺寸改变而变化,结合图6可知,已超过普通硅橡胶的直流电气强度水平的20%;增加增强绝缘厚度对减小界面切向电场和高压屏蔽管表面电场强度作用较为明显,但很难进一步降低;当接头界面长度大于800 mm时,界面切向电场强度始终维持在4 kV/mm以上,不满足特高压直流电缆接头的设计保证值。

综上可知,特高压直流电缆接头使用普通硅橡胶作为增强绝缘材料时,双层介质界面切向电场强度、应力锥表面电场强度均超过设计保证值。依靠改变接头结构尺寸对上述电场强度的影响微弱,同时导致特高压直流电缆接头尺寸过大。这对特高压直流电缆接头生产制造、运输、安装、运行散热和

维护都将是一个难题,需从改变接头增强绝缘材料的电气性能尤其是电导率性能方面进行优化设计。

### 3.4 改性硅橡胶对直流电缆接头电场分布的影响

设定特高压直流电缆接头双层介质界面长度为800 mm,改变接头增强绝缘厚度,得到接头界面切向电场强度、高压屏蔽管表面和应力锥表面电场强度最大值的变化情况如图13所示。从图13可以看出,各个电场的变化趋势与图12非常接近,说明增强绝缘厚度与界面长度对电缆接头中电场分布的影响较小。

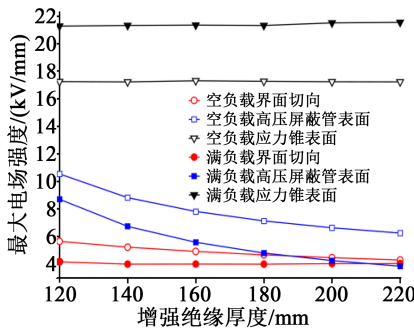


图13 界面长度为800 mm时增强绝缘厚度对接头电场的影响

Fig.13 Influence of reinforced insulation thickness on the electric field of joint with of 800 mm length of interface

采用掺杂无机填料的改性硅橡胶作为增强绝缘材料,当增强绝缘厚度为180 mm和200 mm时,接头界面切向电场强度、高压屏蔽管表面和应力锥表面电场强度最大值如图14~16所示。

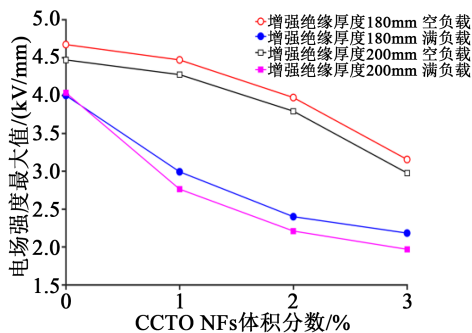


图14 改性硅橡胶对直流电缆接头界面切向电场的影响

Fig.14 Effect of modified silicone rubber on the tangential electric field at DC cable joints interface

从图14~16可以看出:(1)无机填料CCTO NFs的体积分数增大对改性硅橡胶作为增强绝缘材料的特高压直流电缆对接头中电场畸变的削减作用非常明显,尤其是能使高压屏蔽管表面的电场强度

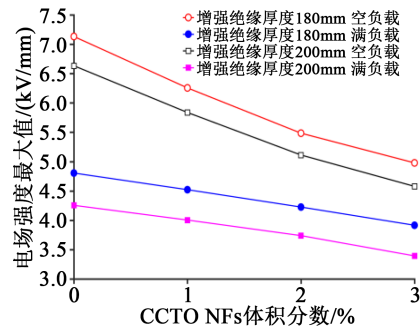


图15 改性硅橡胶对高压屏蔽管表面电场最大值的影响

Fig.15 Influence of modified silicone rubber on the maximum surface electric field of the high voltage shielding tube

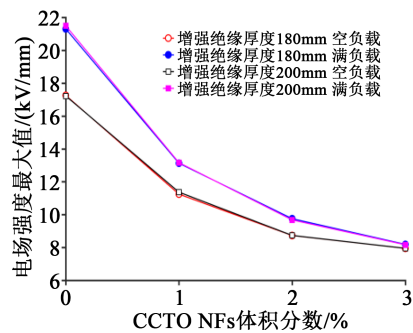


图16 改性硅橡胶对应力锥表面电场最大值的影响

Fig.16 Effect of modified silicone rubber on the maximum surface electric field of the stress cone

快速下降;满负载时,体积分数为3%的CCTO NFs的改性硅橡胶作为增强绝缘材料,对于厚度为180 mm和200 mm的增强绝缘,均可使应力锥表面的电场强度最大值下降到8.2 kV/mm左右。

(2)接头界面切向电场和应力锥表面电场除了随无机填料体积分数增加而降低外,增加增强绝缘的厚度对电场也具有一定程度的抑制作用。从图14可以看出,空负载时,体积分数为3%的CCTO NFs的改性硅橡胶作为增强绝缘材料,对于厚度为200 mm的增强绝缘,可使直流电缆接头双层介质界面切向电场强度下降到2.97 kV/mm,可弥补调整电缆接头结构尺寸仍不能有效降低接头中电场强度的不足之处,解决了特高压直流电缆接头的设计难题。

(3)空负载和满负载负荷条件下,接头中电场强度随无机填料体积分数的变化趋势一致,但接头界面切向电场强度和高压屏蔽管电场强度与应力锥表面电场强度的大小关系相反。这是因为前两个位置比较靠近接头增强绝缘内表面,而应力锥最大电场强度位置靠近接头增强绝缘材料外表面,电

缆负荷的增加,导致增强绝缘内电场强度数值出现了反转。

(4)改变增强绝缘厚度几乎不影响力锥表面电场强度。

综合无机填料 CCTO NFs 的体积分数和增强绝缘厚度对特高压直流电缆接头中电场分布的影响特征可知,采用体积分数为 3% 的 CCTO NFs 作为增强绝缘材料,且厚度大于 180 mm 的直流电缆接头,可有效满足特高压直流电缆接头中的电场强度设计值。

### 3.5 改性硅橡胶对雷电冲击特性的影响

以正极性工作电压叠加负极性雷电脉冲为例,研究特高压直流电缆接头中改性硅橡胶绝缘材料对雷电冲击特性的影响。根据 GB/T 3048.13—2007,标准雷电电压的幅值为  $2.1U_0^{[26]}$ ,即 1 600 kV。以稳态运行满负荷状态下的温度分布作为雷电冲击暂态分析的初始温度,导体与电缆外表面温差为 36.44℃。暂态过程中,特高压直流电缆接头增强绝缘、高压屏蔽管表面和应力锥表面电场强度最大值与硅橡胶中 CCTO NFs 的体积分数关系如图 17 所示。

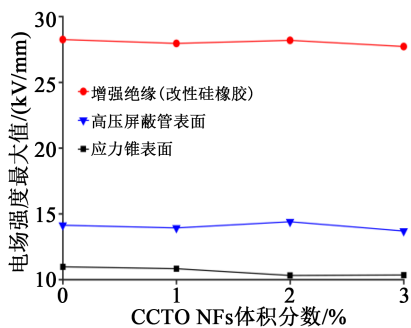


图 17 改性硅橡胶对特高压直流电缆接头雷电冲击暂态特性的影响

Fig.17 Influence of modified silicone rubber on the lightning impulse transient characteristics of UHVDC cable joints

由图 17 可知,改性硅橡胶中无机填料的体积分数对特高压直流电缆接头在正极性工作电压叠加负极性雷电脉冲时的暂态特性影响不明显。这是因为对于雷电冲击脉冲的信号周期值为  $\mu\text{s}$  级,此时特高压直流电缆接头中的电位仍按材料的等效电容分布,与接头中各种绝缘材料的介电常数相关。本研究仅对改性硅橡胶的电导特性进行测试和分析,为进一步明确硅橡胶改性对直流电缆接头雷电冲击响应特性,未来仍需对改性硅橡胶材料的介电

特性进行研究。

## 4 结论

(1)直流电缆接头双层绝缘界面的电场会发生突变;由于聚合物绝缘材料的电导率具有与温度和电场相关的非线性特征,直流电缆接头增强绝缘中电场会随着电缆负荷电流的增大而发生极性反转。

(2)硅橡胶中掺杂 CCTO NFs 无机填料可有效提高其载流子输运能力,在改性硅橡胶直流电气强度降低程度很小的基础上,其电导率非线性特征明显,电导率得到提升,并降低了电导率进入非线性区的电场强度阈值。

(3)改性硅橡胶对特高压直流电缆在接头中接头界面切向电场强度、高压屏蔽管表面和应力锥表面电场畸变的抑制作用明显,尤其是高压屏蔽管表面的电场强度快速下降,采用体积分数为 3% 的 CCTO NFs 的改性硅橡胶作为增强绝缘材料,可保证界面长度大于 800 mm、增强绝缘厚度大于 180 mm 的特高压直流电缆接头内电场强度满足设计要求。

(4)掺杂钛酸铜钙纳米纤维无机填料的硅橡胶作为特高压直流电缆接头增强绝缘材料,弥补了调整电缆接头结构尺寸仍不能有效抑制接头中电场畸变的不足,有效解决了特高压直流电缆接头设计中的电场控制难题。

## 参考文献:

- [1] MONTANARI G C, MAZZANTI G, PALMIERI F, et al. Space-charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(18): 2902.
- [2] SESSLER G M, HAHN B, YOON D Y. Electrical conduction in polyimide films[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(1): 318-326.
- [3] TU N R, KAO K C. High-field electrical conduction in polyimide films[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(10): 7267-7275.
- [4] KARANJA P, NATH R. Charge trapping and conduction in pure and iodine-doped biaxially-oriented polypropylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(2): 213-223.
- [5] CAO Y, IRWIN P C. The electrical conduction in polyimide nanocomposites[C]//2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Albuquerque, USA: IEEE, 2003.
- [6] BODEGA R, MONTANARI G C, MORSHUIS P H F. Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation[C]//The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Boulder, USA: IEEE, 2004.
- [7] 兰莉. 温度对聚合物绝缘中空间电荷行为的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [8] 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.
- [9] VU T T N, TEYSSEDE G, VISSOUVANADIN B, et al. Electric field profile measurement and modeling in multi-dielectrics for HVDC application[C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE,2013.
- [10] BOGGS S, DAMON D H, HJERRILD J, et al. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(4):456-461.
- [11] QIN S S, BOGGS S. Design considerations for high voltage DC components[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(6): 36-44.
- [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.
- [13] 张宇巍,朱有玉,王霞,等. 正交电场下XLPE/SIR介质界面空间电荷特性[J]. 南方电网技术,2015,8(10):52-56.
- [14] CHOO W, CHEN G, SWINGLE S G. Electric field in polymeric cable due to space charge accumulation under DC and temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(2):596-606.
- [15] 柳松,彭嘉康,王霞,等. 高压电缆附件界面压力的影响因素分析[J]. 绝缘材料,2013,46(6):86-89.
- [16] 谢强,王晓游,傅明利,等. 高压电缆接头过盈配合及硅橡胶附件力学性能计算[J]. 高电压技术,2018,44(2):498-506.
- [17] 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,2018,36(7):2018-2024.
- [18] 顾金,王俏华,尹毅,等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的设计[J]. 高电压技术,2009,35(12):3159-3163.
- [19] 胡军,赵孝磊,杨霄,等. 非线性电导材料应力锥改善电缆终端电场强度分布[J]. 高电压技术,2017,43(2):398-404.
- [20] 吴叶平,顾金,吴建东,等. 挤包绝缘高压直流电缆及附件绝缘性能的研究[J]. 电线电缆,2011(6):24-27.
- [21] 孙略. 高压直流电缆附件硅橡胶基非线性复合材料研 [D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [22] LI C M, HAN B Z, ZHAO L, et al. Inhibiting effect of nonlinear shielding layer on electrical tree propagation inside insulation layer of high-voltage cable[J]. Advanced Materials Research, 2014,3326(1983):1273-1277.
- [23] GIOVANNI M, MASSIMO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development[M]. New Jersey:EE Press,2013.
- [24] 李振. 钛酸铜钙/硅橡胶复合介质电导非线性特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [25] 刘子玉. 电气绝缘机构设计原理(上) [M]. 西安:机械工业出版社,1981.
- [26] CIGRE Working Group WG B1.32. Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500kV[R]. Paris,France: CIGRE,2012.