

# 直流-温度复合场下环氧树脂内电树枝生长特性研究现状

李志坚<sup>1</sup>, 张莹<sup>2</sup>, 田猛<sup>1</sup>, 肖萌<sup>2</sup>, 杜伯学<sup>2</sup>

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300100; 2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 本文介绍了直流复合场对电树枝生长特性的影响规律, 综述了温度和电场耦合条件下电荷输运对电树枝劣化的影响机理及环氧树脂纳米复合电介质电气性能的研究进展。

**关键词:** 高压直流输电; 电缆终端; 复合电压; 环氧树脂; 电树枝; 击穿

**中图分类号:** TM215; TM852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-9239(2021)03-0010-08

**DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.03.002

## Research Status of Electrical Tree Growth Characteristics in Epoxy Resin Under DC-Temperature Compound Field

LI Zhijian<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>, TIAN Meng<sup>1</sup>, XIAO Meng<sup>2</sup>, DU Boxue<sup>2</sup>

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300100, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In this paper, the effect of DC-temperature composite field on the electrical tree growth characteristics was introduced. The effect mechanism of charge transport on the electrical tree deterioration under temperature and electric field coupling conditions and the research progress in electrical properties of epoxy nanocomposite dielectrics were reviewed.

**Key words:** HVDC transmission; cable termination; compound voltage; epoxy resin; electrical tree; breakdown

### 0 引言

高压直流(HVDC)输电技术是将交流电整流成直流电后,经高压直流线路输送到负荷中心,然后把直流电逆变成交流电供用户使用的技术。随着电网的规模越来越大,直流输电在远距离大容量输电、大电网区域互联、负荷中心供电、孤岛送电和可再生能源并网等方面具有不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。高压直流输电有架空线路、电缆和气体绝缘管道3种形式,其中电缆输电作为直流输电系统的关键部分,具有输送容量高、损耗小、占地少、效率高等优势,被广泛应用于新能源并网、跨海输电、大城市供电等场所,可以增强电网安全运行和抵御外部灾害的能力,对我国建设坚强智能电网有关键作用<sup>[3]</sup>。

环氧树脂是一类含有环氧基团的高分子聚合物的总称,具有优良的介电性能、力学性能、理化特性和良好的可加工性,配合固化剂、填料、添加剂后,能满足不同的使用性能和工艺要求<sup>[4-5]</sup>。且环氧树脂在固化过程中挥发物少、成型后体积收缩率小、粘接性好。因此在直流系统中的电缆终端、换流变压器阀侧套管、中接头、气体绝缘开关终端套管等许多设备的绝缘部分都采用环氧绝缘材料或环氧的绝缘体系<sup>[6]</sup>。双酚A型环氧树脂具有很高的透明度、耐腐蚀性和电性能,是环氧树脂中产量最大、使用最广的一种品种,同时也在电力行业应用最广。

在直流电缆系统中,电缆附件是实现电缆本体与电网或其他电气设备相连接的重要装置,可分为终端和中接头两大类<sup>[7-8]</sup>。由于剥除屏蔽后最大电场发生在金属护套边缘,容易产生场强畸变引发局部放电,因此电缆的末端都要加装终端来抵消由于电缆几何尺寸变化引起电应力的增大<sup>[9]</sup>。为使电

收稿日期:2020-02-16 修回日期:2020-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807137)

作者简介:李志坚(1965-),男(汉族),天津人,高级工程师,研究方向为高电压试验检测技术。

缆轴向电场分布均匀,从金属护套到增强绝缘外表面需要绕包出一个过渡的锥面,该结构称为应力锥<sup>[7]</sup>。环氧树脂套管紧密包裹在增强绝缘上,并使用弹簧对应力锥加压以保证整个终端内的压力分布均匀。因此环氧树脂套管可以提高应力锥处的电气强度,提升电缆终端的绝缘水平。

由于电缆终端本身结构和制作工艺复杂,内部的电场分布比电缆本体复杂得多;同时在现场组装的过程中易出现气泡、杂质、表面划痕等缺陷,因此各种故障事故频繁发生<sup>[10]</sup>。据统计,电缆附件的故障数占整个电缆系统故障总数的70%<sup>[7]</sup>。在电缆事故中,故障多发生在半导体层与环氧材料的结合点处<sup>[10-11]</sup>。2013年,西北某风电场发生多起电缆终端击穿事故导致电容器组不能投运,风电机组退出运行等故障<sup>[12]</sup>。经排查,事故原因为电缆终端内部电场畸变严重导致局部放电,最终击穿主绝缘。2016年,某220 kV电缆终端发生击穿爆炸,在应力锥表面有明显的树枝状放电痕迹<sup>[13]</sup>。2017年,某电缆的户外终端在竣工耐压时发生多起击穿故障,经事故分析是由于弹簧压力不够,在应力锥和环氧套管界面产生放电。

合闸送电、运行跳闸、竣工耐压均可能发生电缆附件的击穿事故,而在合闸送电的过程中发生概率最高<sup>[13]</sup>。这是因为合闸操作时,元件参数和工作条件的改变会引起系统内电容与电感间的电磁能量转换,造成操作过电压。此外,突然起停、换流失败、自然雷击、线路接地短路也可以引起过电压。过电压会导致绝缘内部产生局部温升和进一步增大缺陷处的畸变电场,当局部电场超出一定阈值时,会引发局部放电继而产生树枝状放电通道。放电行为导致了绝缘的劣化,降低绝缘性能,最终引发故障事故。

此外,在运行工况下电力系统中也会出现高次谐波分量<sup>[14-15]</sup>。在电力系统中,谐波是指频率大于基波频率(50 Hz)整数倍的正弦分量。电力系统中某些设备和负荷的非线性特性导致了高次谐波的产生<sup>[16]</sup>。当这些非线性设备在传输、变换、消耗电力系统的工频电压时又会将部分电压转换为高次谐波。以换流变压器为例,其换流桥与工频电压相连,阀侧内部的绝缘套管工作在交流和直流的复合电压下,再加上频繁的换向操作和复杂的工作环境,环氧树脂绝缘套管承受着直流、工频、冲击、高次谐波等多种电压叠加后的复合电压。对换流变

压器实际的电压波形进行傅里叶分解后,发现谐波电压会随着谐波次数的升高而降低,并且主要以 $(2n+1)$ 次的谐波分量为主,其中50 Hz基波分量占比最大,约为18.5%<sup>[17]</sup>。

因此,电缆终端内环氧树脂绝缘除了要经受直流电压外,还有暂态工况出现的脉冲过电压和谐波电压。多种电压形式相叠加会产生直流复合电压,导致绝缘缺陷处的场强变化,影响绝缘劣化的过程。电树枝放电作为绝缘劣化的主要形式,是导致聚合物材料绝缘性能降低、引发电气故障的重要原因。本文以环氧树脂为研究对象,综述不同复合电压波形下聚合物内电树枝的生长规律,分析复合电压下电介质内部的电荷输运过程,为探寻绝缘材料劣化失效机理提供实验基础和理论依据。

## 1 聚合物电树枝化研究现状

在电气设备的长期运行下,聚合物绝缘都会出现老化现象,电气性能随着服役时间的延长而降低,最终导致绝缘失效和设备故障。其中,电树枝劣化现象是导致绝缘故障的重要原因<sup>[18]</sup>。电树枝是一种电致裂纹现象,当聚合物中存在杂质、气泡、金属突起等缺陷时,会发生内部场强畸变,引起局部放电现象,出现树枝状放电通道,因而被命名为电树枝。自从1951年J H MASON第一次发现聚乙烯中的电树枝以来,围绕电树枝产生机理和抑制方法的研究经久不衰<sup>[19]</sup>。1972年,有学者指出电树枝是绝缘长期破坏积累的结果<sup>[20]</sup>。大量研究指出,电树枝劣化是制约高压直流电缆安全可靠运行的关键因素,亟待探寻绝缘劣化以及失效机理。

### 1.1 电树枝的引发理论

聚合物电树枝化过程总是伴随着剧烈的局部放电行为,因此在研究初期认为是局部放电导致了电树枝。这是因为在当时的生产工艺下,聚合物中存在许多杂质和大气隙,这些缺陷容易引起场强集中,导致局部放电,最终形成电树枝通道。随着材料水平和制造工艺的改进,发现在观测到树枝状通道之前,聚合物中只能探测到高场强区域的电致发光现象。电致发光与局部放电存在很大的差异,不仅发光强度低两个数量级,而且光谱也存在根本区别<sup>[21]</sup>。电致发光现象证明了空间电荷与电树枝引发之间的紧密联系。因此研究方向逐渐转为电树枝潜伏期内绝缘材料在电场、温度、机械应力等多种因素影响下所发生的结构变化。在多因素影响下,



径上的电场下降,直到外电场使局域电场重新增加为止,局部电场和放电中局部电场的变化共同决定了电树枝的生长过程。

总的来说,电树枝的生长伴随着剧烈的局部放电行为,并受到许多因素的影响,如电场分布、电荷输运、气体压强、材料聚集态、通道电导率等。而目前这些研究多基于交流电压,电树枝生长理论在直流复合电压下的应用还缺乏验证。相比于交流电缆,直流电缆特有的空间电荷积聚问题是引起聚合物劣化失效的主要原因。暂态电压下会引起电介质内部的电荷输运过程和电场分布变化,进而影响绝缘的电树枝劣化现象。但当前,对于脉冲叠加直流电压和谐波叠加直流电压下的电树枝引发和生长特性的研究较少。直流复合电压下聚合物内陷阱能级对电荷输运过程的影响机理尚不明确,不同环境温度和复合电压下电荷输运与电树枝劣化的关系还有待探讨。因此探索直流复合场下电树枝的劣化机理,对掌握高压直流电缆附件绝缘技术、提高附件绝缘可靠性有重要意义。

## 2 影响聚合物电树枝化的因素

### 2.1 电压波形对电树枝劣化的影响

直流电缆系统在运行过程中,绝缘要承受直流电压和可能出现的极性反转情况。LIU Y等<sup>[33]</sup>研究发现,即使在直流电压高达+70 kV和-60 kV的针-板电极系统下,交联聚乙烯中也不会出现电树枝引发的现象,这是因为针尖会发生同极性电荷的注入,这些电荷聚集在针尖周围形成空间电荷层并削弱了电场,因此在直流电压下电树枝难以引发。Y SEKII等<sup>[34]</sup>研究发现,直流电树枝更容易在正电压下引发,而直流通地电树枝更容易在负电压下引发。这是因为电子体积小,穿透力强,在针尖附近分布的范围更广,对附近场强的均化作用更明显,所以直流电树枝在负电压下更不易引发。而电极突然短路时,仅剩针尖附近的电子形成的反向电场,且短时间大量电荷释放会产生更大的热能,使得接地电树枝在负电压下易引发。M MAMMERI等<sup>[35]</sup>指出直流通地过程中决定电树枝生长的不是聚合物中保持入陷状态的电荷,而是当电压瞬时变化时能向电极快速输运的空间电荷。程子霞等<sup>[36]</sup>发现在极性反转电压下,从直流电压负极性到正极性时的电树枝起始概率高于从正极性到负极性,如图2所示。这是因为空间电荷通过预施直流电压注入

试样中,极性反转后浅陷阱电荷出陷并快速向针尖移动,导致了电树枝的引发。负极性直流电压下积聚在针尖附近的电子数量更多,因此在极性反转过程中针尖处电场强度更高,电树枝更容易引发。

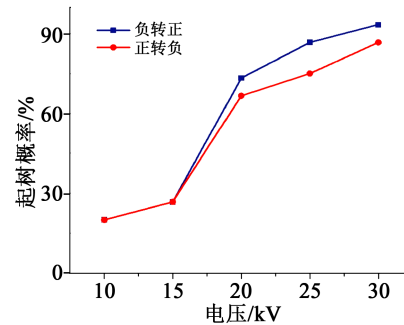


图2 硅橡胶电树枝起始的极性效应

Fig.2 Polarity effect of electrical tree initiation in SIR

此外,聚合物绝缘除了经受直流电压外,还有雷击、倒闸操作、换流失败等暂态工况出现的脉冲过电压和谐波电压。这些电压与直流电压相叠加产生直流复合电压,导致绝缘内部出现空间电荷输运和电树枝劣化。DU B X等<sup>[37]</sup>发现脉冲幅值是影响硅橡胶内电树枝起始、生长和击穿过程的重要因素。脉冲幅值增大会增强针尖附近的电场,使更多的高能电荷从针尖注入,最终导致电树枝生长。苏金刚等<sup>[38]</sup>研究了脉冲叠加直流电压下硅橡胶内电树枝的引发过程,发现当脉冲和直流电压极性相同时,热电子可以在增强的电场下获得足够的能量,入陷电荷获得能量从陷阱中逃逸,同时,施加同极性脉冲时,针尖处电场迅速增大,当超过临界场强时,载流子转变为高能态,注入电荷迅速增多,碰撞电离概率增大,电树枝生长加速,如图3所示。当脉冲电压和直流电压极性相反时,其效果类似于直流通地电树枝。施加异极性脉冲时,针尖处电场迅速减小,空间电荷在脉冲电压作用下释放复合,同时形成一个反向电场,如图4所示,其中 $d_0$ 为空间电荷注入的深度, $E_{sc}$ 为空间电荷形成的电场强度, $E_{DC}+E_p$ 为电源形成的电场强度。

由于换流变压器等设备的存在,直流高压线路可能存在同时承受交、直流电压的情况,因此,国内外学者对交流电压叠加直流电压条件下电树枝的生长情况进行研究,以期探索绝缘劣化机理。I ID-DRISSU等<sup>[39]</sup>研究了交流叠加直流电压下的电树枝生长特性,发现交流分量是驱动电树枝生长的主要因素,直流分量可以促进电树枝的生长,且正直流分量的促进作用更为明显。分析认为,在纯直流电

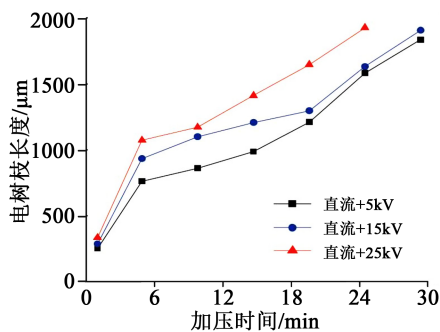


图3 同极性脉冲叠加不同直流电压下电树枝生长特性

Fig.3 Growth characteristics of electrical tree under the same polarity pulse voltage superimposing different DC voltage

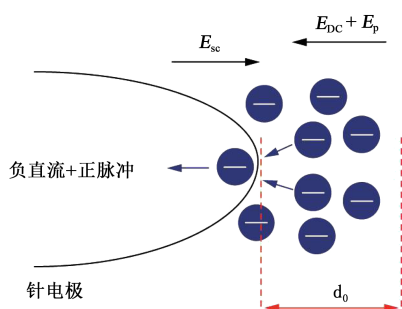


图4 异性脉冲叠加负直流电压下电荷运动特性

$$(E_{DC} + E_p < 0)$$

Fig.4 Charge transport characteristics under different polarity pulse voltage superimposing negative DC voltage

$$(E_{DC} + E_p < 0)$$

情况下,空间电荷将始终起到均化电场的作用。对于交流电情况,由于在每个半周期重复进行电荷注入和提取,麦克斯韦机械应力可能导致局部击穿,进而发生局部放电。极性效应是由于在正极性和负极性下电荷注入的差异。

综上所述,高压直流系统下存在多种复杂电压工况,电压波形会对聚合物绝缘内电荷输运和电树枝劣化过程产生影响。而目前的研究多集中于单一电压形式,关于复合电压下环氧树脂内电树枝生长特性的研究尚不完善,直流复合电压影响电荷输运过程的机理缺乏深入探讨。

## 2.2 环境温度对电树枝劣化的影响

环境温度主要通过改变绝缘介质的分子聚集态影响电树枝劣化特性。对于聚合物而言,玻璃化转变温度( $T_g$ )以下时为玻璃态, $T_g$ 以上时为高弹态,高弹态时聚合物分子链运动的自由度比其在玻璃态时要大,因而呈现出不同的电树枝形态和生长速率。J V CHAMPION等<sup>[40]</sup>指出当环氧树脂的温度低于 $T_g$ 时,电树枝为导电型,放电发生在电树枝通道末端;当温度高于 $T_g$ 时,电树枝为不导电型,放电发

生在电树枝主通道。在高温超导电缆线路中,环氧树脂绝缘材料承受着77~300 K的工作温度。DU B X等<sup>[41]</sup>发现随着试样温度的降低,电树枝的生长速度下降,并且通道颜色变深。这是因为低温使结晶区密度增大,分子链难以被破坏。如图5所示,马一力等<sup>[42]</sup>研究发现电树枝50%起始电压随温度的降低而升高,且温度越低其增加幅度越小,并指出低温下空间电荷对针尖附近电场的削弱程度减小。

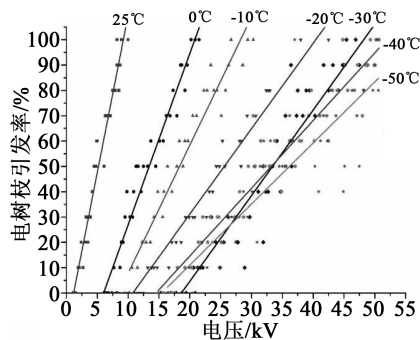


图5 不同温度下电压与电树枝引发率的关系

Fig.5 Relationship between voltage and electric tree initiation rate at different temperatures

在长期运行过程中,聚合物绝缘也承受着温度梯度分布的问题。设备中的导体通过电流产生焦耳热导致内绝缘温度上升,而外绝缘处在环境温度下,因此绝缘中存在连续的温度梯度分布。在暂态情况下,环氧树脂终端可在高达150°C的温度下运行<sup>[43]</sup>。在直流电压下,温度梯度导致绝缘各部分的电导不一致,因此内部电场分布和电荷输运过程产生变化。D FABIANI等<sup>[44]</sup>在温度梯度下进行空间电荷的测量,发现在高场强条件下电荷积聚受电极温度而非温度梯度分布的影响。W CHOO等<sup>[45]</sup>研究发现,导体内部温升会降低界面势垒,增强电荷注入和传输过程。随着温度从电缆绝缘由内而外降低,电荷积聚会使最大场强位置向外部区域移动。ZHANG Y X等<sup>[46]</sup>在温度梯度下进行了直流电树枝引发实验,指出针尖温度和温差决定电树枝的引发特性,前者影响材料的聚集态和电荷碰撞电离过程,后者决定了针-板系统的电场分布。HAN T等<sup>[47]</sup>在温度梯度下进行了脉冲电树枝实验,指出温度和不均匀电场通过改变电导率进而影响电树枝的引发特性,温度梯度影响陷阱特性和电荷输运过程导致电树枝形态的变化。DU B X等<sup>[48]</sup>在温度梯度下进行了谐波叠加负直流电压下的电树枝实验,指出当接地侧的温度升高时,电树枝生长速率增大,如图6所示, $\Delta T$ 是指高压侧和接地侧间的温差。分析认为,在低温区域,电荷注入后难以脱附,只有

少量电子可以从浅陷阱中逃逸; 在高温区域, 由于热激励作用, 电子较易从陷阱中逃逸, 促进电荷输运过程, 存在较少的入陷电荷, 如图7所示。

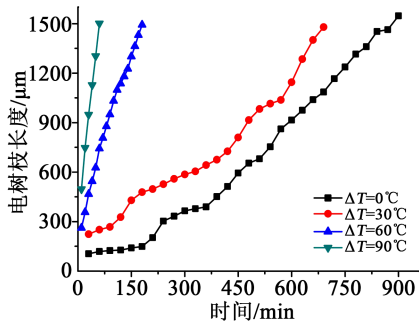


图6 不同接地侧温度下电树枝长度随时间的变化曲线

Fig.6 Variation of electrical tree length with time at different ground-side temperatures

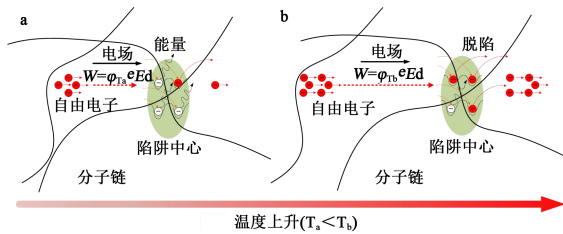


图7 不同温度下电荷运输模型

Fig.7 Charge transport model at different temperatures

以上研究表明, 温度会使聚合物聚集态和电荷行为产生变化, 进而影响电树枝劣化的过程。但目前关于温度对电树枝影响的研究多集中在单一温度, 对不同温度和温度梯度下电荷输运过程的探讨还不够深入, 尤其是直流复合电压下温度影响电树枝劣化的研究尚未见报道。因此研究不同温度下直流复合电压对电树枝劣化及绝缘失效的影响机理, 揭示温度和电场耦合条件下电荷注入和输运机理, 对了解电缆绝缘劣化机理和预防电缆故障事故有重要意义。

### 2.3 纳米微粒对电树枝劣化的影响

为提高环氧树脂的耐电树枝能力, 通常会添加大量填料, 其中纳米微粒改性已成为研究热点。添加纳米微粒后, 在有机物和无机纳米微粒间因交织会形成众多界面, 从而引入陷阱。电子在迁移过程中容易被陷阱捕获, 形成同极性感应电荷, 起到均匀电场的作用。

界面区域对纳米复合材料有很大的影响, 目前用于解释界面区域的模型有双层区模型与多核模型<sup>[49]</sup>, 如图8所示。

在双层区模型中, 界面区分为束缚层与松散层, 束缚层结构紧密, 对玻璃化转变温度没有影响;

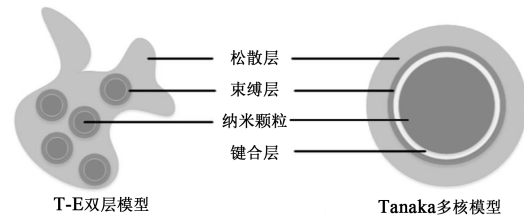


图8 纳米复合材料模型

Fig.8 Nanocomposite model

松散层结构疏松, 且相邻纳米颗粒的松散层可以重叠。在多核模型中, 界面区分为键合层、束缚层与松散层。键合层一般厚度为2~10 nm, 由强相互键合作用形成。束缚层厚度为10 nm左右, 是形成深陷阱的主要作用区, 由与键合层和无机粒子表面紧密结合相互作用的聚合物链组成。松散层厚度一般为几十纳米, 是一个化学交联较弱的层, 是形成离子陷阱或浅陷阱的主要作用区。由此可知, 双层区模型主要关注界面区域对材料力学及热学方面的影响, 而多核模型不仅提出了每一层由于不同的构成对载流子迁移的影响, 而且提出了库仑力相互作用叠加的影响, 所以在研究纳米填充复合材料的介电性能时, 多核模型更加普遍。

常见的纳米微粒有 SiO<sub>2</sub>、MgO、ZnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CCl<sub>4</sub>与 TiO<sub>2</sub>。王诗成等<sup>[50]</sup>研究发现, 当纳米粒子质量分数为5%时, 纳米二氧化硅/环氧树脂复合材料的局部放电起始电压达到最大值, 较纯环氧树脂提高了22.5%; 复合材料的导热系数达到最大值, 较纯环氧树脂提高了157%, 如图9所示。

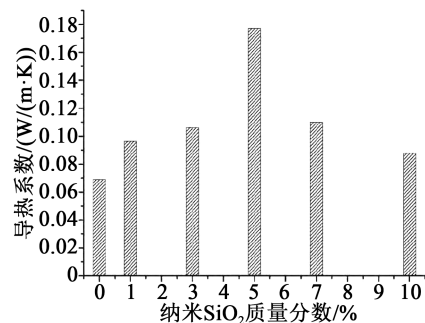


图9 纳米环氧复合材料的导热系数

Fig.9 Thermal conductivity of nano epoxy composite

江平开等<sup>[51]</sup>研究发现, 纳米 MgO 加入到聚丙烯中会起到异相成核剂的作用, 减小聚丙烯内球晶的尺寸, 且会诱导 β 晶生成, 大幅降低其空间电荷密度, 提高绝缘性能。高铭泽等<sup>[52]</sup>研究了纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧树脂复合材料介电性能与纳米粒子分散性的关系, 发现纳米 SiO<sub>2</sub> 在环氧树脂基体中分散性越好, 复合材料的击穿特性和耐电晕性越好。杨国清等<sup>[53]</sup>研

究了 ZnO/环氧树脂复合材料的耐电树枝能力,发现纳米 ZnO 提升了环氧树脂的局放起始电压,并显著改善了环氧树脂抑制电树枝生长的能力。在纳米 ZnO 质量分数达到 3% 时,局部放电起始电压达到峰值 14.5 kV,相比纯环氧提升了 67.7%,如图 10 所示。但是纳米颗粒含量继续增加后,纳米粒子的间距开始缩短,粒子间界面开始出现重叠,导致电荷开始出现重叠,再加上陷阱的增多造成能量释放频率加快,大分子链断裂加快,使得材料在更大范围降解,低密度区形成,碰撞电离频繁,导致电气性能降低,耐电树枝能力也随之下降。

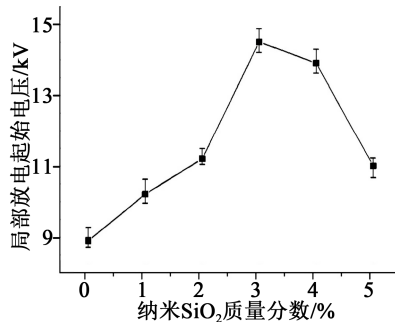


图 10 局放起始电压与纳米 ZnO 掺杂量的关系<sup>[53]</sup>

Fig.10 Relation between partial discharge inception voltage and nano-ZnO content

以上研究表明,添加适量的纳米颗粒可显著提高聚合物的力学性能与电气性能。但是,在电树枝生长过程中,具有“相互作用区”的纳米复合材料的行为与微米复合材料的行为完全不同,而且“相互作用区”的介电性能和厚度仍不清楚。

### 3 结束语

环氧树脂因其优良的绝缘性能,在直流输电系统中应用广泛。电树枝放电作为聚合物劣化的重要形式,是导致绝缘老化失效的主要原因。在不同工况下,电缆终端环氧树脂绝缘要经受直流电压及暂态过程出现的脉冲电压或谐波电压,同时绝缘也工作在低温、室温和温度梯度等不同温度环境。复合电压和环境温度会影响空间电荷的运输过程,加速绝缘老化,影响绝缘电气性能。借助于多核模型,发现添加纳米颗粒对环氧树脂复合材料的介电性能有很大的改善作用。

### 参考文献:

[1] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社,2013:263-265.  
 [2] 周远翔,赵健康,刘睿,等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术,2014,40(9):2593-2612.  
 [3] 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):7-23.

[4] 牛正. 高压电缆附件用真空浇注环氧树脂的研究[J]. 绝缘材料, 2003,36(3):23-24.  
 [5] 肖艳. 环氧树脂分类、应用领域及市场前景[J]. 化学工业,2014, 32(9):19-24.  
 [6] 朱竣. 138kV 高压绝缘套管的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.  
 [7] 李新平,刘守功,曹晓珑,等. 高压电缆终端结构设计的进展[J]. 电线电缆,2002(3):11-14.  
 [8] THUE W A. 电力电缆工程[M]. 北京:机械工业出版社,2014: 3-9.  
 [9] 高寒,李卫国,贾国滨,等. 320kV XLPE 高压直流电缆终端电场分析[J]. 绝缘材料,2017,50(6):48-52,58.  
 [10] 惠宝军,傅明利,刘通,等. 110kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术,2017,11(12):44-50,67.  
 [11] 逯康康,方进,黄晓华,等. 高温超导电缆终端预制式应力锥缺陷的研究分析[J]. 低温与超导,2014,42(4):31-35.  
 [12] 高宁,张群刚,张志强,等. 某风电场 35kV 电缆头击穿事故初步分析[J]. 西北水电,2013(5):64-67.  
 [13] 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.  
 [14] WOOD T B, MACPHERSON D E, BANHAM-HALL D, et al. Ripple current propagation in bipole HVDC cables and applications to DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014, 29(2):926-933.  
 [15] QI B, WEI Z, LI C R. Influences of different ratios of AC-DC combined voltage on internal air-gap discharge in oil-pressboard insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,31(3): 1026-1033.  
 [16] FARD M A, REID A J, HEPBURN D M. Influence of HVDC converter operation on partial discharge characteristics[C]//2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. San Francisco,USA:IEEE,2016:680-683.  
 [17] 程建伟,赵林杰,孙夏青,等. 实际运行电压下特高压换流变压器阀侧套管电场分布研究[J]. 南方电网技术,2017,11(5):1-8.  
 [18] 李盛涛,郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.  
 [19] MASON J H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges[J]. Proceedings of the IEE - Part I: General,1951,98(109):44-59.  
 [20] IEDA M, NAWATA M. A consideration of treeing breakdown in polymers[C]//Annal Report Conference Electric Insulation and Dielectric Phenomenon. Tokyo,Japan:IEEE,1972:143-150.  
 [21] SHIMIZU N, LAURENT C. Electrical tree initiation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1998,5(5): 651-659.  
 [22] TANAKA T, GREENWOOD A. Effects of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1978,97(5):1749-1759.  
 [23] TANAKA T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(5):733-743.  
 [24] BAMJI S S, BULINSKI A T, DENSLEY R J. Evidence of near-ultraviolet emission during electrical-tree initiation in polyethylene[J]. Journal of Applied Physics,1987,61(2):694-699.  
 [25] BAMJI S S. Luminescence and space charge phenomena in

- polymeric dielectrics[C]//2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec,Canada: IEEE,2008:1-12.
- [26] ALISON J M, HILL R M. A model for bipolar charge transport, trapping and recombination in degassed crosslinked polyethene [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,1994,27(6):1291-1299.
- [27] MEUNIER M, QUIRKE N. Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators[J]. *The Journal of Chemical Physics*,2000,113(1):369-376.
- [28] TEYSSEDRE G, LAURENT C. Charge transport modeling in insulating polymers: From molecular to macroscopic scale[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2005, 12(5):857-875.
- [29] NIEMEYER L, PIETRONERO L, WIESMANN H J. Fractal dimension of dielectric breakdown[J]. *Physical Review Letters*, 1984,52(12):1033-1036.
- [30] WIESMANN H J, ZELLER H R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics[J]. *Journal of Applied Physics*,1986,60(5):1770-1773.
- [31] NOSKOV M D, KUKHTA V R, LOPATIN V V. Simulation of the electrical discharge development in inhomogeneous insulators[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,1999,28(6):1187-1194.
- [32] DISSADO L A, FOTHERGILL J C, WISE N, et al. A deterministic model for branched structures in the electrical breakdown of solid polymeric dielectrics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2000,33(19):109-112.
- [33] LIU Y, CAO X L. Electrical tree initiation in XLPE cable insulation by application of DC and impulse voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013,20(5):1691-1698.
- [34] SEKII Y, KAWANAMI H, SAITO M, et al. DC tree and grounded DC tree in XLPE[C]//2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville:USA: IEEE,2005:523-526.
- [35] MAMMERI M, LAURENT C, NEDJAR M. Dynamics of voltage polarity reversal as the controlling factor in space-charge induced breakdown of insulating polymers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,1997,4(1):44-51.
- [36] 程子霞,刘杰,张云霄,等. 极性反转电压下硅橡胶电树枝起始的温度特性[J]. *高电压技术*,2019,45(2):470-477.
- [37] DU B X, HAN T, SU J G. Electrical tree characteristics in silicone rubber under repetitive pulse voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2015,22(2):720-727.
- [38] 苏金刚,杜伯学,李进,等. 直流电场中高压电缆绝缘电树枝劣化研究现状[J]. *广东电力*,2019,32(12):66-72.
- [39] IDDRISSU I, ROWLAND S M, ZHENG H, et al. Electrical tree growth and partial discharge in epoxy resin under combined AC and DC voltage waveforms[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2018,25(6):2183-2190.
- [40] CHAMPION J V, DODD S J. The effect of material composition and temperature on electrical tree growth in epoxy resins [C]//2000 Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Edinburgh, UK: IET,2000: 30-34.
- [41] DU B X, ZHANG M M, HAN T, et al. Effect of pulse frequency on tree characteristics in epoxy resin under low temperature[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2016, 23(1):104-112.
- [42] 马一力,丛祥旭,李忠华. 0~-50 °C 交联聚乙烯材料的电树枝生长特性[J]. *哈尔滨理工大学学报*,2018,23(3):111-116.
- [43] BOZZO R, GEMME C, GUASTAVINO F. The effects of temperature on the tree growth phenomena and relevant PD[C]//Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach,USA:IEEE,1995:69-72.
- [44] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation. Part 3: Effect of temperature gradient[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2008,24(2):5-14.
- [45] CHOO W, CHEN G, SWINGLER 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.
- [46] ZHANG Y X, ZHANG L, ZHOU Y X, et al. DC electrical tree initiation in silicone rubber under temperature gradient[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2018,25(3): 1142-1150.
- [47] HAN T, DU B X, MA T T, et al. Electrical tree in HTV silicone rubber with temperature gradient under repetitive pulse voltage [J]. *IEEE Access*,2019(7):41250-41260.
- [48] DU B X, MENG T, SU J G, et al. Temperature gradient dependence on electrical tree in epoxy resin with harmonic superimposed DC voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2020,27(1):270-278.
- [49] 江铁,关弘路,陈向荣,等. 环氧树脂纳米复合材料电气性能研究综述[J]. *浙江电力*,2019,38(11):65-71.
- [50] 王诗成,王福春,杨国清,等. 纳米SiO<sub>2</sub>/环氧树脂复合材料局部放电和导热特性研究[J]. *绝缘材料*,2016,49(9):57-60.
- [51] 江平开,孙小金,黄宇,等. 纳米氧化镁聚丙烯复合绝缘材料的制备及其性能[J]. *高电压技术*,2017,43(2):355-366.
- [52] 高铭泽,张沛红. 纳米SiO<sub>2</sub>/环氧树脂复合材料介电性与纳米粒子分散性关系[J]. *物理学报*,2016,65(24):192-199.
- [53] 杨国清,张琦炜,王德意,等. ZnO/环氧树脂复合材料的耐电树枝能力[J]. *高电压技术*,2019,45(1):91-96.